

Севастопольский государственный университет

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infocommunications
and Radio Technologies

2020
Том 3
№ 1

2020
Vol. 3
No. 1

Sevastopol

Почетный главный редактор

Президент РНТОРЭС им. А. С. Попова, академик РАН ГУЛЯЕВ Ю. В.

Главный редактор

д. т. н., проф. ГИМПЛЕВИЧ Ю. Б. (СевГУ, Севастополь, Россия)

Редакционная коллегия

д. ф.-м. н., проф. АБРАМОВ И. И. (БГУИР, Минск, Беларусь)

д. ф.-м. н. ВОЛЬВАЧ А. Е. (КрАО, Крым, Россия)

д. т. н., проф. ГРОМОВ Д. В. (МИФИ, Москва, Россия)

к. т. н. ЕРМОЛОВ П. П. (СевГУ, Севастополь, Россия — зам. главного редактора)

д. т. н., проф. ИВАНОВ В. Э. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. ф.-м. н., проф. КАЛОШИН В. А. (ИРЭ РАН, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. ЛЕРЕР А. М. (ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия)

д. ф.-м. н., проф. МАГДА И. И. (ННЦ «ХФТИ», Харьков, Украина)

д. т. н., проф. НОСКОВ В. Я. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. ф.-м. н. ОБУХОВ И. А. (НПП «Синергетика», Москва, Россия)

д. т. н., проф. ПЕСТРИКОВ В. М. (СПбГИКиТ, Санкт-Петербург, Россия)

д. т. н., проф. ПЕСТРЯКОВ А. В. (МТУСИ, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. КУРАЕВ А. А. (БГУИР, Минск, Беларусь)

д. т. н., проф. СОВЛУКОВ А. С. (ИПУ РАН, Москва, Россия)

д. ф.-м. н., проф. СТАРОСТЕНКО В. В. (КФУ, Симферополь, Россия)

д. т. н., проф. ШИРОКОВ И. Б. (СевГУ, Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

д. т. н., проф. АФОНИН И. Л. (СевГУ, Севастополь, Россия)

д. ф.-м. н., проф. БОГУШ В. А. (БГУИР, Минск, Беларусь)

проф. ИЛЬЧЕВ С. Д. (Durban University of Technology, South Africa)

проф. КАРМАКАР Н. Ч. (Monash University, Australia)

д. т. н., проф. КНЯЗЕВ С. Т. (УрФУ, Екатеринбург, Россия)

д. п. н. НЕЧАЕВ В. Д. (СевГУ, Севастополь, Россия)

д. т. н., проф. НОВИКОВ В. В. (ЧВВМУ им. П. С. Нахимова, Севастополь, Россия)

Заведующая редакцией: *В. П. Коломийченко*

Сайт журнала: icrtjournal.com

Подписано к печати 16.06.2020

Формат 64×90/16. Усл. печ. л. 8,94. Уч.-изд. л. 8,8. Тираж 300 экз.

Адрес редакции: ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053

Адрес для переписки: а/я 63, Севастополь, 299053

Тел. +7 (978) 745-27-51, e-mail: icrt.mail@gmail.com

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

Отпечатано в типогр. Printex

ул. Кулакова, 59а, Севастополь, 299011. Тел.: +7 8692 464 744, +7 8692 455 678

Honorary Chief Editor

President of RNTORES n. a. A. S. Popov, Academician of RAS GULYAEV Yu. V.

Editor in Chief

D.Sc., Prof. GIMPILEVICH Yu. B. (SevSU, Sevastopol, Russia)

Editorial Board

D.Sc., Prof. ABRAMOV I. I. (BSUIR, Minsk, Belarus)

D.Sc. VOLVACH A. Ye. (CrAO, Crimea, Russia)

D.Sc., Prof. GROMOV D. V. (MEPhI, Moscow, Russia)

C.Sc. YERMOLOV P. P. (SevSU, Sevastopol, Russia – Deputy Editor in Chief)

D.Sc., Prof. IVANOV V. E. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)

D.Sc., Prof. KALOSHIN V. A. (IRE of RAS, Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. LERER A. M. (SFU, Rostov-on-Don, Russia)

D.Sc., Prof. MAGDA I. I. (KhIPT, Kharkov, Ukraine)

D.Sc., Prof. NOSKOV V. Ya. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)

D.Sc. OBUKHOV I. A. (Sinergetika Ltd., Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. PESTRIKOV V. M. (SPbSUFT, Saint-Petersburg, Russia)

D.Sc., Prof. PESTRYAKOV A. V. (MTUSI, Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. KURAYEV A. A. (BSUIR, Minsk, Belarus)

D.Sc., Prof. SOVLUKOV A. S. (ICS of RAS, Moscow, Russia)

D.Sc., Prof. STAROSTENKO V. V. (CrFU, Simferopol, Russia)

D.Sc., Prof. SHIROKOV I. B. (SevSU, Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

D.Sc., Prof. AFONIN I. L. (SevSU, Sevastopol, Russia)

D.Sc., Prof. BOGUSH V. A. (BSUIR, Minsk, Belarus)

Prof. ILCEV D. S. (Durban University of Technology, South Africa)

Prof. KARMAKAR N. Ch. (Monash University, Victoria, Australia)

D.Sc., Prof. KNYAZEV S. T. (UrFU, Ekaterinburg, Russia)

D.Sc. NECHAYEV V. D. (SevSU, Sevastopol, Russia)

D.Sc., Prof. NOVIKOV V. V. (P. S. Nakhimov ChHNS, Sevastopol, Russia)

Head of Editorial Board: *V. P. Kolomiychenko*

Address:

Sevastopol State University

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

E-mail: icrt.mail@gmail.com

Website: icrtjournal.com

Содержание — Contents

Астрономия (01.03.00) — Astronomy

- Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Вольвач Л. Н., Аллер Х. Д., Аллер М. Ф.** Двойные сверхмассивные черные дыры как возможные источники мощного излучения гравитационных волн
A. E. Volvach, M. G. Larionov, L. N. Volvach, H. D. Aller, and M. F. Aller, Extraction parameters of the compact model of hardware components IC chip special purpose 5
- Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Дмитроца А. И.** Гигантские вспышки мазера метанола в G358.931-0.030 и возможность детектирования гравитационных волн от тесных массивных звездных систем
L. N. Volvach, A. E. Volvach, M. G. Larionov, and A. I. Dmitrotsa, Giant methanol maser flares in G358.931-0.030 and possibility of detecting gravitational waves from close massive stellar systems 24
- Вольвач А. Е., Якубовская И. В.** Наблюдения вспышечной активности Солнца 6 сентября 2017 года
A. E. Volvach and I. V. Yakubovskaya, Observations of flare activity of the Sun on September 6, 2017 32

Радиотехника и связь (05.12.00) — Radio engineering and communication

- Водяных А. А., Бритков А. В., Горбанов Н. А., Дементенко С. А., Дудник К. В., Игрунов А. Ю., Кондратенко Г. Г., Лактионов А. И., Матюхин Н. Н., Пацановский Д. С., Перькова Н. И., Прокопенко А. Э., Ракитянский Ф. А., Сtrybizh И. С., Тертышный О. И.** Конструкторские решения и интерфейсы оборудования радиотехнической разведки, радиоэлектронного подавления и блокирования радиолиний связи и управления, производимого АО «Руспром»
A. A. Vodyanykh, A. V. Britkov, N. A. Gorbanov, S. A. Dementenko, K. V. Dudnik, A. Yu. Igrunov, G. G. Condratenko, A. I. Laktionov, N. N. Matyukhin, D. S. Patsanovsky, N. I. Perkova, A. E. Prokopenko, F. A. Rakityansky, I. S. Strybizh, and O. I. Tertychny, Selected results of theoretical and experimental 40 years research of textures, fractals, fractional operators and scaling effects for solving problems of radio physics and radio electronics. Part 2. Fractal-and-scaling radio location and new information technologies 41

Электроника (05.27.00) — Electronics

- Боровик А. М., Баранова М. С., Гвоздовский Д. Ч.** Моделирование электрических характеристик графенового полевого транзистора на основе данных расчетов из первых принципов
A. M. Borovik, M. S. Baranova, and D. C. Hvazdousky, Simulation of the graphene field effect transistor electrical characteristics based on data of first-principles calculations ... 63

История науки и техники (07.00.10) — History of science and technology

- Савченко Е. М., Першин А. Д., Кузьмин А. Ю.** СВЧ МИС широкополосных усилителей как универсальные компоненты современной радиоэлектронной аппаратуры
Ye. M. Savchenko, A. D. Pershin, and A. Yu. Kuzmin, Microwave monolithic ICs of broadband amplifiers as universal components of modern electronic equipment 75
- Пестриков В. М.** На пути к вакуумному диоду
V. M. Pestrikov, On the way to the vacuum diode 98

УДК 521

Двойные сверхмассивные черные дыры как возможные источники мощного излучения гравитационных волн

¹ Вольвач А. Е., ² Ларионов М. Г., ¹ Вольвач Л. Н.,
³ Аллер Х. Д., ³ Аллер М. Ф.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,

Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,

Астрономический центр, Москва, Российская Федерация

³ Радио обсерватория Мичиганского университета

Анн Арбор, MI 48109, США

volvach@bk.ru

Получено: 22 февраля 2020 г.

Отрецензировано: 2 марта 2020 г.

Принято к публикации: 5 марта 2020 г.

Аннотация: В плане выполнения программы по нахождению и отбору кандидатов в двойные сверхмассивные черные дыры (ДСМЧД) собраны данные длительных многочастотных мониторингов активных ядер галактик (АЯГ) из базы данных Крымской астрофизической обсерватории и других мировых баз данных. Созданы методики определения гармонических составляющих в рядах данных многочастотных мониторингов, получения кросскорреляционных функций, определения параметров ДСМЧД. На примере АЯГ 0235+1634 показана эффективность предложенных методик, которые будут использованы для определения мощности гравитационных волн (ГВ), идущих от отобранных ДСМЧД.

Ключевые слова: гравитационные волны, АЯГ, черные дыры, радиоизлучение.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Вольвач Л. Н., Аллер Х. Д., Аллер М. Ф. Двойные сверхмассивные черные дыры как возможные источники мощного излучения гравитационных волн // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 5—23.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, А. Е. Двойные сверхмассивные черные дыры как возможные источники мощного излучения гравитационных волн / А. Е. Вольвач, М. Г. Ларионов, Л. Н. Вольвач, Х. Д. Аллер, М. Ф. Аллер // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 1. — С. 5—23.

Double supermassive black holes as possible sources of powerful gravitational wave radiation

A. E. Volvach¹, M. G. Larionov², L. N. Volvach¹,
H. D. Aller³, and M. F. Aller³

¹Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory,
Yalta, 298688, Russian Federation

²Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 117997 Russian Federation

³Department of Astronomy, University of Michigan, Ann Arbor, USA
volvach@bk.ru

Received: February 22, 2020

Peer-reviewed: March 2, 2020

Accepted: March 5, 2020

Abstract: *In terms of program execution on finding and selecting candidates for dual supermassive black holes (DSMBHs) collected data long-term multi-frequency monitoring of active galactic nuclei (AGNs) from the databases of the Crimean Astrophysical Observatory and other world databases. Methods for determining the harmonic components in the data series of multi-frequency monitoring, obtaining cross-correlation functions, and determining the parameters of DSMBHs have been developed. The efficiency of the proposed methods, which will be used to determine the power of the GW coming from the selected DSMCHD, is shown on the example of the AGN AO 0235+164.*

Keywords: *gravitational waves, AGN, black holes, radio emission.*

For citation (IEEE): A. E. Volvach, M. G. Larionov, L. N. Volvach, H. D. Aller, and M. F. Aller, “Double supermassive black holes as possible sources of powerful gravitational wave radiation,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 5–23.

1. Введение

Из существующих двойных сверхмассивных черных дыр (ДСМЧД) мощным источником излучения гравитационных волн (ГВ), достоверно установленным, считается блазар ОJ 287 [1, 2]. Этот АЯГ в оптическом диапазоне длин волн наблюдается более ста лет и имеет самую продолжительную базу данных. Все остальные АЯГ, в лучшем случае, насчитывают пятидесятилетнюю историю. При этом полученных данных в оптическом диапазоне значительно меньше, чем в радиодиапазоне. К тому же, ОJ 287

— сравнительно близкий и яркий объект в оптическом диапазоне длин волн.

Иногда сложность заключается в том, что в центральных областях АЯГ порой наблюдается значительное поглощение в оптическом диапазоне, из-за чего и так слабые из-за удаленности источники становятся еще тусклее.

Установление двойственности среди сверхмассивных черных дыр (СМЧД) требует использования определенных подходов и методов исследования. В первую очередь, необходимо иметь набор данных наблюдений каждого кандидата в ДСМЧД, по возможности в широком диапазоне длин волн — от радио- до гамма диапазона. В большинстве случаев — это просто невыполнимая задача из-за отсутствия такого набора данных.

Затем надо выбрать диапазон, в котором для каждого рассматриваемого источника достаточно информации для проведения математических анализов по выявлению гармонических составляющих в наблюдательных данных. Эти ряды должны быть достаточно продолжительными (многие десятки лет) для гармонических составляющих орбитального, прецессионного и, возможно, других периодов.

После этого, необходимо выбрать оптимальный метод проведения гармонического анализа для определения гармонических составляющих в наблюдательных рядах данных. В предложенном методе должны учитываться особенности сбора экспериментальных данных, их качество, скважность и т. д.

Так как многочастотные мониторинговые данные несут в себе дополнительную и существенную информацию, в процессе их использования понадобится проводить кросс-корреляционные анализы между различными частотными диапазонами. Поскольку не во всех собранных данных присутствует везде равноточная по времени информация, то требуется предварительно выполнить процедуру по приведению массивов данных к равноточному виду с использованием различных процедур сглаживания.

Необходимые для проведения анализов параметры ДСМЧД непременно включают в себя нахождение масс их компонентов. Как первый шаг для их определения сначала нужно иметь возможность определить суммарную массу центрального тела с использованием динамического метода нахождения скоростей объектов, движущихся по кепплеровским орбитам вокруг центральной области ДСМЧД. К сожалению, этот метод неприемлем для большинства АЯГ, которые находятся на удаленных космологических расстояниях по причине невозможности получить по ним данные в оптическом диапазоне длин волн. Поэтому необходимо найти другие мето-

ды определения масс компаньонов ДСМЧД. Отсюда возникает задача разработки такого метода в другом диапазоне длин волн, кроме оптического.

Таким образом, перед тем, как проводить обработку длинных рядов экспериментальных данных, необходимо иметь набор методов, с помощью которых можно было бы решить поставленную задачу по нахождению фактов двойственности ДСМЧД, способных эффективно излучать ГВ.

2. Наблюдения и обработка данных

Наблюдения в миллиметровом диапазоне длин волн на частотах 22.2 и 36.8 ГГц производились с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории. Использовались радиометрические приемники с диаграммной модуляцией [3]. Благодаря такой методике приема сигнала удавалось избежать искажения результатов аномальным спектром флуктуаций коэффициентов усиления усилителей. Кроме того, снижался уровень флуктуаций из-за неоднородностей атмосферы, которые существенны на сантиметровых и особенно на миллиметровых волнах.

Антенная температура от источников определялась как разность сигналов с выхода радиометра в двух положениях антенны, когда радиотелескоп устанавливался на источник поочередно, то одним (оп), то другим (оп) приемными рупорами (методика “on-on”). Наблюдения каждого источника состояли из 5—20 накоплений сигнала, в зависимости от достижения необходимого отношения сигнал/шум. Затем рассчитывалось среднее значение и вычислялась среднеквадратичная ошибка среднего. Вместе с наблюдениями исследуемых объектов проводились наблюдения калибровочных источников, параметры которых указаны в Таблице 1.

Антенные температуры от источников пересчитывались в спектральные плотности потоков с использованием зависимости:

$$P = 2kT_a / S_{\text{эфф}}, \quad (1)$$

где P — спектральная плотность потока радиоисточника, k — постоянная Больцмана, T_a — антенная температура от источника, $S_{\text{эфф}}$ — эффективная площадь поверхности основного зеркала радиотелескопа.

Таблица 1. Параметры калибровочных источников

Table 1. Parameters of calibration sources

Частота, ГГц	Принятые значения потоков для источников, P (Ян)			
	DR 21	3C 274	NGC 7027	3C 286
36.8	18.3	14.3	5.1	1.56

Изменение эффективной площади $S_{\text{эфф}}$ от угла места h определялась по данным наблюдений калибровочных источников на разных h и азимутах A_z антенны с введением соответствующих поправочных коэффициентов. В диапазоне h от 60° до 90° изменений $S_{\text{эфф}}$ не отмечено и на этих углах поправочные коэффициенты не вводились.

Среднеквадратичные ошибки плотностей потоков включали ошибки измерений антенной температуры. Типичные ошибки значения T_a находились в пределах 5 %. При данной методике наблюдений учитывались также ошибки, возникающие вследствие изменений уровня шумов аппаратуры, вариаций коэффициента поглощения в атмосфере, нестабильности коэффициента усиления радиометра и ошибки наведения радиотелескопа.

Мониторинг на частотах 4.8, 8 и 14.5 ГГц выполнялся на радиотелескопе РТ-26 обсерватории Мичиганского университета в период с 1974 по 2012 гг., данные наблюдений которого были ранее опубликованы и использованы в работах [4, 5]. Мониторинг на частоте 8 ГГц выполнялся с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-22 КрАО в период 2012—2020 гг. Мониторинг на частоте 15 ГГц выполнялся с помощью 40-метрового радиотелескопа Owens Valley Radio Observatory [6] в период 2013—2019 гг.

Фотометрические наблюдения в полосе В проводились с помощью the Small and Moderate Aperture Research Telescope System (SMARTS) в период с 2008 по 2017 гг. Процедура калибровки и обработки представлены в работе [7].

Данные в гамма-диапазоне получены в рамках миссии FERMI на инструменте LAT¹.

3. Численный анализ неравномерных по времени рядов плотностей потоков радиоисточников базы данных КрАО

3.1. Гармонический анализ

Переменность плотностей потоков радиоисточников представляет собой сложное и многообразное явление. Начиная с 1973 г. на радиотелескопе РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории проведено более 20 тыс. наблюдений и получены данные более чем для 250 источников на частотах 22 и 36.8 ГГц. По результатам исследований из общего числа источников нами были отобраны те, в которых вариации плотностей потоков имели квазипериодический характер.

В связи с тем, что в основной своей массе наблюдения проводились с интервалами времени 5—7 дней, в ряде случаев они не имели постоян-

¹ http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/extract_latdata.html

ного шага по времени получения данных. Поэтому для их исследования в работе были применены методы спектрального анализа неравномерных временных рядов. С их помощью удалось свести к минимуму влияние неравномерности временной сетки на вычисляемую периодограмму — оценку спектра мощности.

Одной из часто применяемых на практике оценок спектра мощности является *LS*-спектр [9, 10, 11], математический аппарат которого представлен в работах [12, 13, 14]. В основе его построения лежит аппроксимация временного ряда суммой гармонических функций методом наименьших квадратов. Преимуществом *LS*-спектра считается экспоненциальное распределение отсчетов периодограммы белого шума. С другой стороны, главным недостатком является отсутствие аналитической связи между оценкой спектра мощности и его истинным значением.

Другим свободным от этого недостатка методом анализа является вычисление периодограммы Шустера $D(\omega)$ [15, 16], связанной с истинным спектром мощности $g(\omega)$ и спектральным окном $W(\omega)$ фундаментальным соотношением:

$$D(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega') W(\omega - \omega') d\omega' \quad (2)$$

Наличие такой связи позволяет производить «чистку» спектра — удаление боковых лепестков и пиков, обусловленных конечностью и неравномерностью временной сетки, а также ложных максимумов, присутствие которых определяется шумом.

Для «чистки» спектра нами был применен метод *CLEAN*, который первоначально разработан для обработки получаемых при апертурном синтезе двумерных карт. Позже его стали применять и в спектральном анализе одномерных временных рядов [17]. Суть указанного алгоритма заключается в последовательном вычитании из «грязного» спектра всех достоверных максимумов. Каждый вычитаемый спектральный пик определяется своей комплексной амплитудой, частотой и спектральным окном, зависящим от распределения временных отсчетов. Все вычитенные пики образуют «чистый» спектр, свободный от ложных максимумов и шумовой компоненты. Процедура «очистки» спектра длится до тех пор, пока в «грязном» спектре не останется ни одного пика, величина которого превосходит некоторый пороговый уровень, зависящий от вероятности обнаружения сигнала в шуме. Этот уровень можно определить, зная вид распределения отсчетов периодограммы шума [14, 18]. Однако, в случае неравномерной временной сетки, нельзя получить строгое выражение для этого распределения. Авторами [19] были

получены эмпирические формулы для определенных неравномерных рядов, но их нельзя считать универсальными, так как для каждого конкретного ряда рассматриваемое распределение будет специфическим. Поэтому, чтобы получить порог обнаружения сигнала в шуме, в данной работе для каждого обрабатываемого ряда вычисляется характерное для него распределение отсчетов периодограммы белого шума.

С помощью описанных выше алгоритмов спектрального анализа в кривых блеска различных источников удастся выделить колебания различного периода, что будет показано на примере ниже.

3.2. Корреляционный анализ

В то же время в базе данных радиотелескопа РТ-22 Крымской обсерватории имеются записи наблюдений различных источников на нескольких частотах (рис. 1). Определив фазовые соотношения между обнаруженными колебаниями на разных частотах наблюдений, можно получить сведения о свойствах среды, в которой эти колебания распространяются. Для обнаружения временного сдвига между каждыми двумя записями $x_1(t)$ и $x_2(t)$ необходимо найти их взаимную кросс-корреляционную функцию $R(\tau)$:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t) x_2(t + \tau) dt. \quad (3)$$

Так как исследуемые сигналы регистрируются в определенные, вообще говоря, не равноотстоящие моменты времени t_i , то приходится иметь дело с дискретными функциями времени или временными рядами x_i . Кроме того, наблюдения длятся конечный промежуток времени, поэтому рассматриваемые ряды являются конечными. В этом случае нельзя определить корреляционную функцию с использованием определения (3). Поэтому часто пользуются *оценкой* корреляционной функции, которую называют коррелограммой c_m [20].

$$c_m = \frac{1}{N-m} \sum_{k=0}^{N-m-1} (x_k - \bar{x})(y_{k+m} - \bar{y}) \quad (4)$$

$$m = 0, 1, \dots, N-1$$

Следует отметить, что коэффициент $1/(N-m)$ в (4) вводится для того, чтобы исключить искажение коррелограммы, связанное с конечностью временного ряда, поэтому такая оценка называется *смещенной*. Для нормализации оценки c_m , ее делят на произведение среднеквадратичных отклонений рядов $\sigma_x \sigma_y$, где

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k - \bar{x})^2, \quad (5)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (y_k - \bar{y})^2. \quad (6)$$

Сказанное выше относится к наиболее простому случаю равномерного распределения временных отсчетов. Однако используемые нами временные ряды имеют неравномерную временную сетку. Поэтому использование классических методов нахождения оценок взаимных корреляционных функций не представляется возможным.

Один из способов решения этой проблемы состоит в интерполяции неравномерного ряда на равномерную временную ось. По формуле (4) вычисляется оценка корреляционной функции. При этом каждый отсчет, независимо от того был ли он реально зарегистрирован или является продуктом интерполяции, вносит одинаковый вклад в искомую функцию корреляции. Существенным недостатком метода является отсутствие возможности определения теоретической достоверности полученного результата.

Другой подход к определению оценок взаимных корреляционных функций неравномерных временных рядов, свободный от вышеупомянутых недостатков, подробно обоснован в работе [21]. В своем исследовании авторы предлагают использовать т. н. дискретную функцию корреляции *DCF* (Discrete Correlation Function), определяемую с помощью множества всех возможных корреляций *UDCF_{ij}* (Unbinned Discrete Correlation Functions) следующим образом

$$UDCF_{ij} = \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sigma_x^2 - e_x^2)(\sigma_y^2 - e_y^2)}}. \quad (7)$$

Здесь e_x, e_y — ошибки измерения случайных величин x и y соответственно. Каждому значению *UDCF_{ij}* соответствует своя задержка $\tau_{ij} = t_i - t_j$. Для вычисления самой дискретной функции корреляции *DCF*(τ) временную ось разбивают на некоторое число интервалов $\Delta\tau$ (бинов), после чего каждому интервалу τ ставят в соответствие среднее всех *UDCF_{ij}* для которых $\tau - \Delta\tau/2 \leq \tau_{ij} < \tau + \Delta\tau/2$.

$$DCF(\tau) = \frac{1}{M} \sum UDCF_{ij} \quad (8)$$

При выборе размера бина следует руководствоваться поставленными целями, т. к. чем шире бин, тем лучше проводится усреднение (4), но в то же время хуже временное разрешение оси абсцисс, и наоборот.

Часто во время одновременных наблюдений во временных рядах возникают коррелированные ошибки измерений, приводящие к интенсивному ложному пику при $\tau = 0$. Для того чтобы устранить влияние этих ошибок необходимо из множества $UDCF_{ij}$ исключить все элементы, для которых $i = j$. При этом все остальные отсчеты коррелограммы оказываются свободными от этих ошибок, чего нельзя сказать в случае применения метода интерполяции.

Указанный способ позволяет легко получить стандартное отклонение полученных значений $DCF(\tau)$. В случае, если значения $UDCF_{ij}$ являются некоррелированными внутри данного бина, стандартное отклонение σ_{DCF} определяется дисперсией значений $UDCF_{ij}$ вокруг среднего $DCF(\tau)$

$$\sigma_{DCF}^2(\tau) = \frac{1}{N-1} \sum (UDCF_{ij} - DCF(\tau))^2 \quad (9)$$

Таким образом, методика построения оценок взаимных корреляционных функций [21] обладает рядом существенных достоинств по сравнению с интерполяционным методом. Неоспоримым преимуществом является возможность определения достоверности полученного результата. В нашем исследовании для сравнения использовались оба подхода [20, 21].

Таким образом, разработан пакет программ, позволяющий вычислять оценки спектров мощности различными способами, исключать из них ложные пики, вызванные неравномерностью временной сетки, а также выделять с заданной вероятностью достоверные спектральные максимумы.

Применение этих методов к реальным астрофизическим данным показало, что наблюдаемые кривые блеска, как правило, представляют композицию вариаций на разных временных масштабах: от долговременных трендов (~10 лет и более), наблюдаемых в ~85 % всех источников, до коротко временных вариаций (~1—2 года).

3.3. Вычисление параметров орбит ДСМЧД

Набор параметров ДСМЧД включает в себя определение масс компаньонов — M и m , размер орбиты r , в общем случае эксцентриситет орбиты — e , период обращения — T , периоды вращения центрального тела и компаньона — T_{ep1}, T_{ep2} , Лоренц-фактор γ , время жизни до слияния — t_{cl} .

Прецессия центральной черной дыры в совокупности с центральными областями аккреционного диска, откуда происходят выбросы реляти-

вистского вещества, может происходить за счет возмущения компаньона, движущегося по орбите с орбитальным периодом $T_{\text{орб}}$:

$$m+M = (4\pi^2 r^3)/(GT_{\text{орб}}^2), \quad (10)$$

где m — масса компаньона, M — масса центральной черной дыры, r — радиус орбиты компаньона, G — гравитационная постоянная. Выражение (10) получено для круговой орбиты из соотношений небесной механики: $v^2/r = G(M+m)/r^2$ и $T=2\pi \cdot r/v$.

С другой стороны, угловая скорость прецессии центрального тела $\Omega_{\text{пр}}$ определяется из соотношения

$$\Omega_{\text{пр}} = (3G \cdot m \cdot \text{Cos}\theta)/(4r^3\omega), \quad (11)$$

где θ — половинный угол конуса прецессии, ω — угловая скорость вращения центрального тела.

Учитывая, что $\Omega_{\text{пр}} = 2\pi/T_{\text{пр}}$ и $\omega = 2\pi/T_{\text{вр}}$, соотношения (10) и (11) можно преобразовать к виду

$$T_{\text{вр}}T_{\text{пр}} = (16\pi^2 r^3)/(3G \cdot m \cdot \text{Cos}\theta) \quad (12)$$

Разделив выражение (10) на (12), перегруппировав и учитывая, что угол раствора конуса прецессии центрального тела 2θ в тесных двойных системах, как правило, не превышает (10—20) градусов ($\text{Cos}\theta \approx 1$), получим

$$(m+M)/m = 0,75 T_{\text{вр}}T_{\text{пр}}/T_{\text{орб}}^2 \quad (13)$$

В случае тесных двойных систем из черных дыр также нельзя исключить того, что из-за сильных приливных воздействий друг на друга может возникнуть ситуация, когда период орбитального движения компаньона совпадет с периодом вращения более массивного центрального объекта или компаньона.

Естественно предположить, что самый большой наблюдаемый период следует отнести к прецессионным движениям центральной массивной черной дыры и связанных с нею центральных областей аккреционного диска.

Самый короткий период можно соотнести периодам вращения центрального тела и компаньона по орбите. В случае 3C120 получим соотношение масс

$$(m+M)/m \approx 8.7 \quad (14)$$

Другими словами, масса центрального тела в 7.7 раза превышает массу компаньона.

Умножив правые и левые части выражений (10) и (12) соответственно друг на друга и учитывая, что соотношение масс $(m+M)/m = 8.7$, получим выражение для массы компаньона

$$m = (8\pi^2 r^3) / \{G \cdot T_{\text{орб}} (3T_{\text{вр}} T_{\text{пр}})^{1/2}\} \quad (15)$$

Наблюдается сильная зависимость массы компаньона от размеров его орбиты. Увеличивая размеры орбиты компаньона, мы увеличиваем его массу, а вместе с ней и массу центрального тела.

Естественно считать, что небольшие значения периодов орбит компаньонов двойных систем из черных дыр связаны с тем, что мы наблюдаем релятивистское движение вещества под небольшим углом зрения. Поэтому периодические изменения в системе отсчета, связанной с центром тяжести двойных черных дыр, будут другими после введения Лоренц-фактора Υ и перехода в систему отсчета, связанную с АЯГ [22]. Тогда связь между наблюдаемым периодом $P_{\text{набл}}$ и периодом в системе отсчета источника P определяется выражением

$$P \approx (P_{\text{набл}} \Upsilon^2) / (1+z). \quad (16)$$

4. Пример использования результатов численного анализа неравномерных по времени многочастотных рядов радиоастрономических данных

На рис. 1 приведены данные многочастотного долговременного мониторинга АЯГ АО 0235+164, полученные в разных частотных диапазонах. Наиболее длинный ряд данных получен на частоте 8 ГГц. На рис. 2, 3 приведены данные долговременного мониторинга на частоте 8 ГГц для 12 АЯГ, имеющих выраженные данные присутствия гармонических составляющих.

Наиболее короткий период, возможно связанный с движением компаньона по орбите вокруг центральной СМЧД, лучше выявляется на высоких частотах 22 и 36.8 ГГц. Это объясняется тем, что мы принимаем излучение из узкого конуса прецессии центрального тела, ограниченного углом между направлением выбросов и наблюдателем. В том случае наиболее высокочастотное излучение возникает из области, находящейся ближе к центральным областям.

В таблице 3 приведены источники, имеющие данные по длительному мониторингу и признаки наличия гармонических составляющих в спектральных плотностях потоков излучения (для объектов, у которых не определена звездная величина, величина приведена в *Near-IR* диапазоне или мЯн).

С использованием выражения (2) были определены гармонические составляющие данных длительного мониторинга источника АО 0235+164 на частоте 14.5 ГГц.

Результаты анализа показаны на рис. 1 и приведены в таблице 2. Значение красного смещения АО 0235+164 приведены в работах [23, 24], а величина u дана в [25].

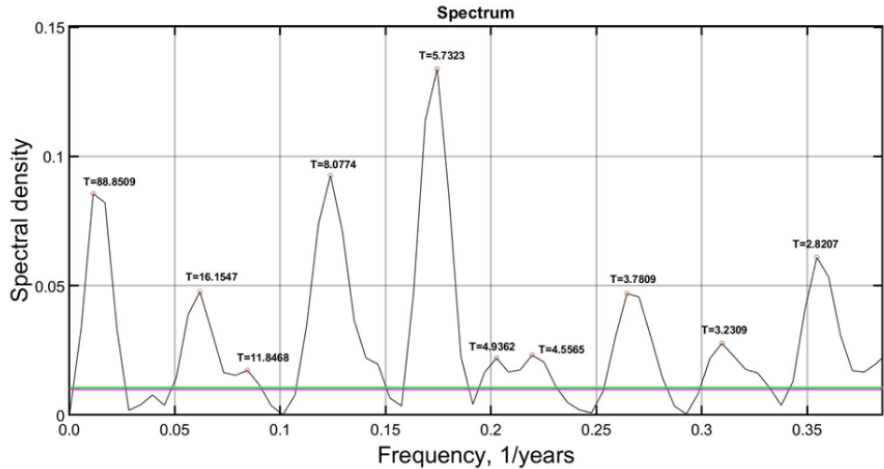


Рис. 1. Результаты гармонического анализа АЯГ АО 0235+164.

Fig. 1. Results of harmonic analysis of AGN AO 0235+164

Таблица 2. Результаты гармонического анализа кривой блеска
долговременной переменности источника АО 0235+164.

Table 2. The results of a harmonic analysis of the light curve
of the long-term variability of the source AO 0235 + 164

Система отчета:	Период T, годы	Период T, годы	Период T,годы	Период T, годы	Период T, годы
связанная с наблюдателем	16.15 (0.05)	8.08 (0.09)	5.73 (0.13)	3.78 (0.05)	2.82 (0.06)
связанная с излучающим объектом $P_{ист} \approx (P_{набл} \gamma^2)/(1+z)$	3322 (68)	1662 (34)	1178 (24)	777 (16)	580 (12)

Таблица 3. Источники длительного мониторинга.

Table 3. Sources of long-term monitoring

№ п/п	Источник B1950.0	Источник J2000.0	Другое название	Опт. класс	Красное смещение	Звездная величина
1.	0003-066	0006-0623	NRAO 005	QSO	0.347	17.14
2.	0048-097	0050-0929	OB-080	QSO	0.635	15.31
3.	0133+476	0136+4751	DA 55	QSO	0.859	19.25

№ п/п	Источник B1950.0	Источник J2000.0	Другое название	Опт. класс	Красное смещение	Звездная величина
4.	0234+285	0237+2848	CTD 20	QSO	1.207	16.99
5.	0235+164	0238+1636	АО	QSO	0.940	15.0
6.	0336-019	0339-0146	СТА 26	QSO	0.852	17.33
7.	0430+052	0433+0521	3C 120	RG	0.033	7.9 (NIR)
8.	0458-020	0501-0159	4C-02.19	QSO	2.286	18.5
9.	0528+134	0530+1331	S 0528+134	QSO	2.060	19.35
10.	0552+398	0555+3948	DA 193	QSO	2.365	12.955
11.	0642+449	0646+4451	ОН 471	QSO	3.396	14.494
12.	0716+714	0721+7120	—	QSO	0.300	13.39
13.	0804+499	0808+4950	OJ 508	QSO	1.435	18.626
14.	0851+202	0854+2006	OJ 287	BL Lac	0.306	12.79
15.	0923+392	0927+3902	4C 39.25	QSO	0.698	16.77
16.	0954+658	0958+6533	S40954+65	QSO	0.386	12.42 (NIR)
17.	1101+384	1104+3812	MRK 0421	G	0.031	8.31
18.	1226+023	1229+0203	3C 273	QSO	0.158	11.628
19.	1253-055	1256-0547	3C 279	QSO	0.536	9.9 mJy
20.	1308+326	1310+3220	OP 313	QSO	0.997	14.15
21.	1334-127	1337-1257	PKS 1335-127	QSO	0.539	16.22
22.	1404+286	1407+2827	OQ 208	RG	0.077	10.29
23.	1510-089	1512-0905	PKS 1510-089	QSO	0.360	-
24.	1606+106	1608+1029	4C +10.45	QSO	0.672	18
25.	1611+343	1613+3412	DA 406	QSO	1.401	12.85 (NIR)
26.	1633+382	1635+3808	4C 38.41	QSO	1.813	17.438
27.	1638+398	1640+3946	NRAO 512	QSO	1.666	18.86
28.	1642+690	1642+6856	4C +69.21	QSO	0.751	19.38
29.	1725+044	1728+0427	1725+044	QSO	0.296	16.24
30.	1739+522	1740+5211	4C+51.37	QSO	1.379	16.73
31.	1730-130	1733-1304	PKS 1730-13	QSO	0.902	18.78
32.	1741-038	1743-0350	1741-038	QSO	1.054	17.98
33.	1749+096	1751+0939	4C +09.57	BL Lac	0.320	15.57
34.	1803+784	1800+7828	—	BL Lac	0.680	15.46
35.	1921-293	1924-2914	OV-236	QSO	0.352	15.07
36.	2145+067	2148+0657	4C+06.69	QSO	0.999	15.06
37.	2155-304	2158-3013	PKS 2155-304	QSO	0.116	34.45 мЯн
38.	2200+420	2202+4216	BL Lac	BL Lac	0.069	7.9 (NIR)
39.	2223-052	2225-0457	3C 446	QSO	1.404	14.48
40.	2230+114	2232+1143	СТА 102	QSO	1.037	16.7
41.	2251+158	2253+1608	3C 454.3	QSO	0.859	12.69

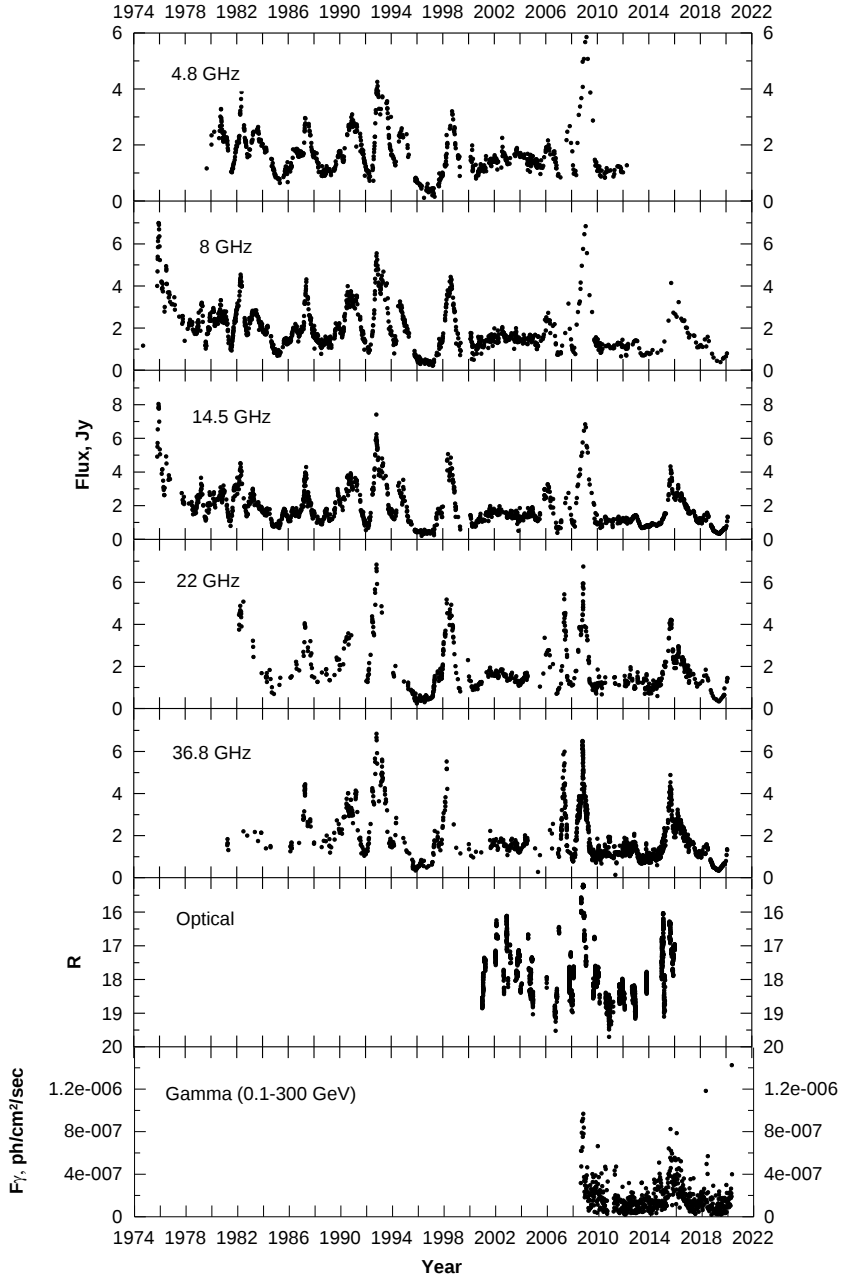


Рис. 2. Долговременный мониторинг спектральных плотностей потоков АЯГ АО 0235+164.

Fig. 2. Long-term monitoring of spectral flux densities of AGN fluids AO 0235+164

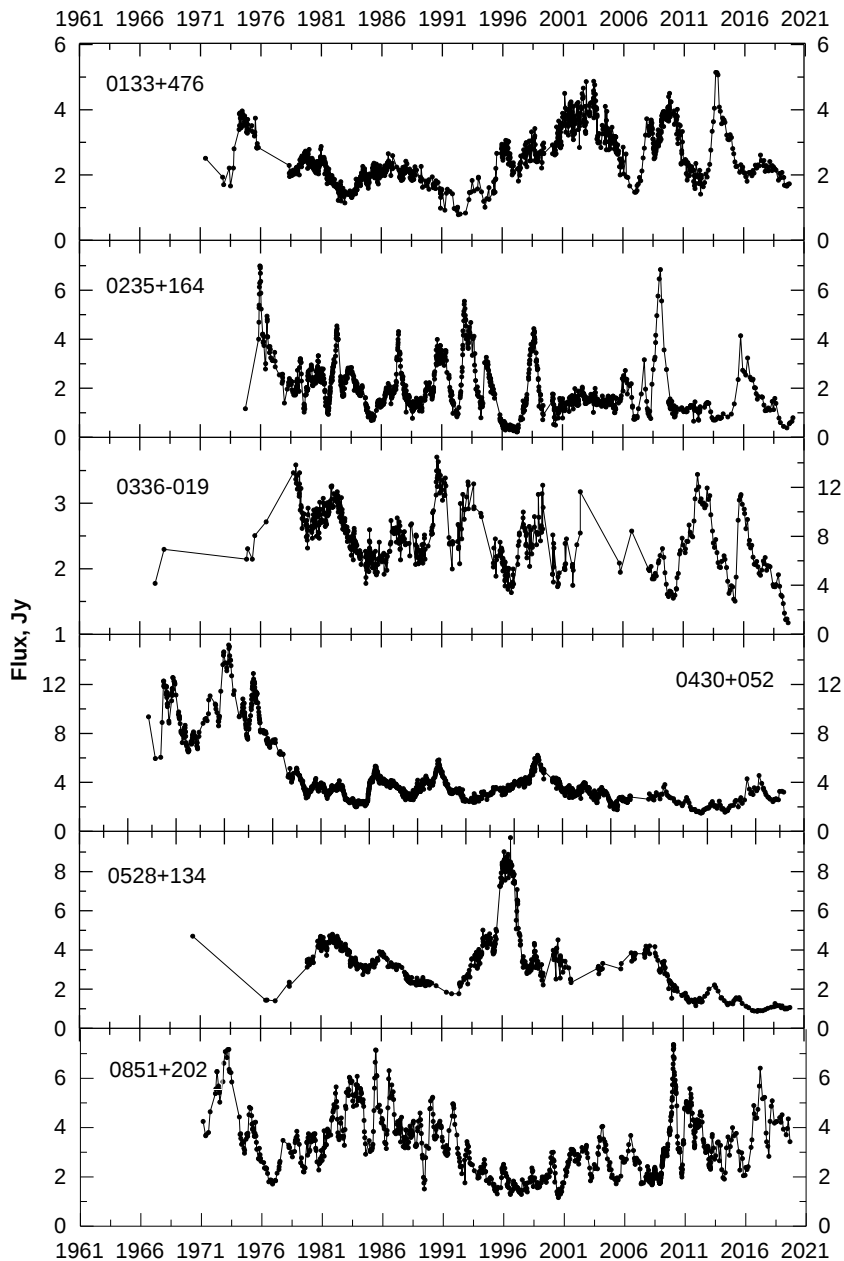


Рис. 3. Долговременный мониторинг спектральных плотностей потоков АЯГ на 8 ГГц.

Fig. 3. Long-term monitoring of the spectral density of AGN fluxes at 8 GHz

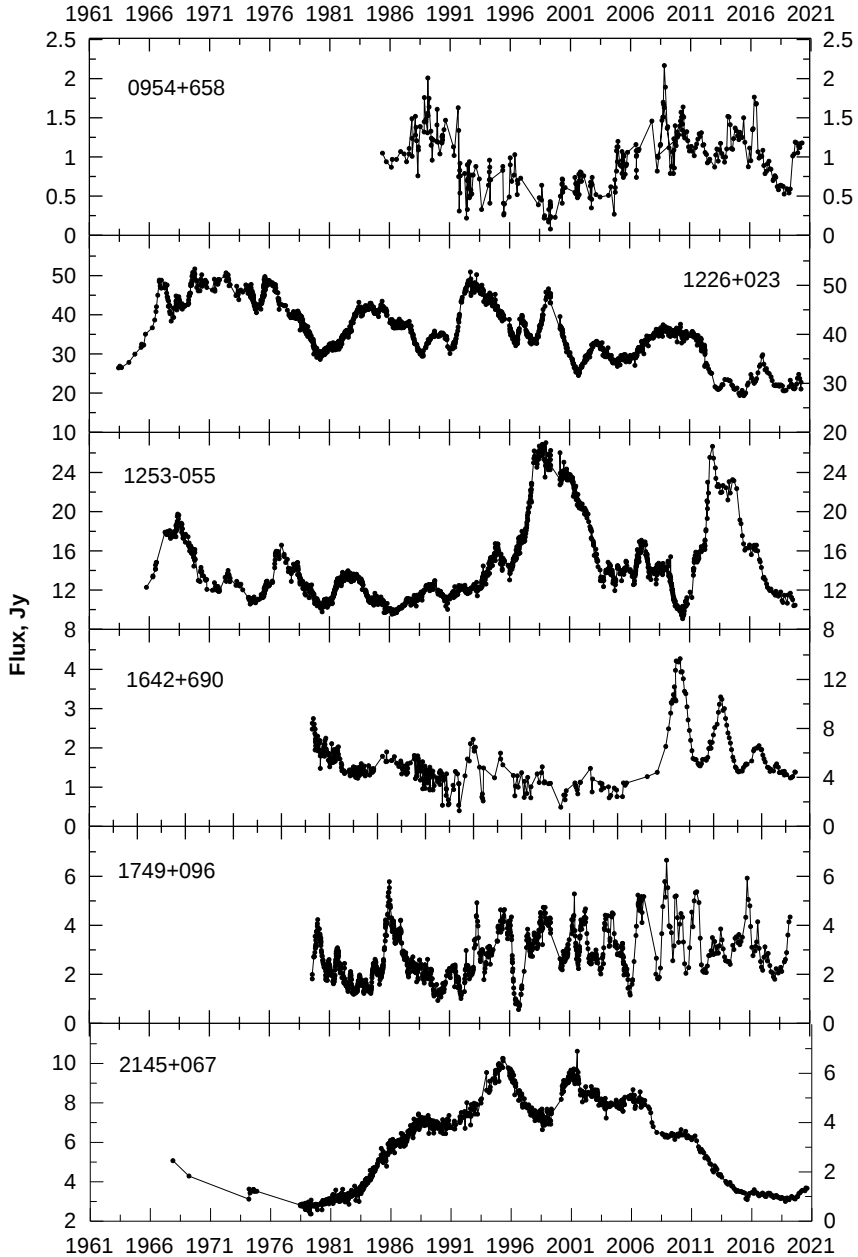


Рис. 4. Долговременный мониторинг спектральных плотностей потоков АЯГ на 8 ГГц.

Fig. 4. Long-term monitoring of the spectral density of AGN fluxes at 8 GHz

Как обычно в таких случаях минимальное значение периода в системе считается орбитальным, а максимальное — прецессионным. При таких условиях по формулам (12—15) можно оценить значение масс компаньонов и радиус орбиты. Результаты сведены в таблицу 4. Наблюдается очень резкая зависимость массы компаньонов от величины радиуса орбиты (формула 15).

Таблица 4. Значения масс и радиусов орбит.

Table 4. The values of the masses and radii of the orbits

Радиус орбиты компаньона	Масса компаньона	Масса центрального объекта
$2.0 \cdot 10^{18}$ см	$2.4 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$1.8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
$1.5 \cdot 10^{18}$ см	$10^9 M_{\odot}$	$0.7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
10^{18} см	$3 \cdot 10^8 M_{\odot}$	$2.3 \cdot 10^8 M_{\odot}$

Примечание: Из-за сильного приливного взаимодействия между компаньонами принимается $T_{\text{пр}} = T_{\text{орб}}$.

Из таблицы 4 видно, что объект АО 0235+164 является очень массивной ДСМЧД и может быть сравнимым по массе с хорошо изученной ДСМЧД ОJ287 — перспективного кандидата в мощные излучатели гравитационных волн (ГВ).

5. Заключение

1. В плане выполнения программы по поиску двойных систем из сверхмассивных черных дыр ДСМЧД среди ярких АЯГ отобран 41 радиоисточник.

2. Предложены методики нахождения гармонических составляющих в долговременных рядах данных АЯГ, определения кросс-корреляционных функций между различными частотными диапазонами и определения параметров систем, состоящих из ДСМЧД.

3. На примере АЯГ АО 0235+164 показана эффективность действия предложенных методик по определению параметров ДСМЧД.

4. Полученные данные будут использованы при работе по нахождению мощных источников гравитационно-волнового излучения среди ДСМЧД.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-29-11005. Авторы статьи выражают благодарность персоналу РТ-22 КрАО РАН за помощь в проведении наблюдений.

В исследовании использованы данные программы мониторинга 40-метрового радиотелескопа OVRO [6], которая частично поддержана грантами НАСА NNX08AW31G, NNX11A043G, NNX14AQ89G и NSF, а также грантами AST-0808050 и AST-1109911.

Список литературы

1. Dev L., Gopakumar A., Valtonen M. et al. The Unique Blazar OJ 287 and Its Massive Binary Black Hole Central Engine // *Universe*, 2019, vol. 5, p.108.
2. Sun Yu-Tao, Liu Jie-Ying, Liu Jin-zhong, Ai Yan-Li, Zhou Ming, Qiao Er-lin. A Research on the Gravitational Wave Radiation of OJ 287 // *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2011, vol. 35, p.123.
3. Ефанов В. А., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С. Обзор внегалактических радиоисточников на длине волны 1.35 см // *Изв. Крым. астрофиз. Обсерватории*, 1979, т. 60, С. 3—13.
4. Volvach A. E., Volvach L. N., Kut'kin A. M., Larionov M. G. et al. Multi-Frequency Studies of the Non-Stationary Radiation of the Blazar 3C 454.3 // *Astronomy Reports*, 2011, vol. 55, no. 7, pp. 608—615.
5. Vol'vach A. E., Kut'kin A. M., Larionov M. G. et al. A prolonged flare in the blazar 3C 454.3 // *Astronomy Reports*, 2013, vol. 57, no. 1, pp. 46—51.
6. Richards J. L., Max-Moerbeck W., Pavlidou V. et al. Blazars in the Fermi era : the OVRO 40m telescope monitoring program // *ApJS*, 2011, vol. 194, pp.29—51.
7. Bonning E., Urry Megan C., Bailyn C. et al. SMARTS optical and infrared monitoring of 12 gamma-ray bright blazars // *The Astrophysical Journal*, 2012, vol. 756, no. 1, pp. 1—16.
8. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. // 1992, *Numerical Recipes in C* (2nd ed.; Cambridge : Cambridge Univ. Press).
9. Wen L. et al. A Systematic Search for Periodicities in RXTE ASM Data // *Ap. J. S.*, 2006, vol. 163, pp. 372—392.
10. Claudi R. U. et al. Asteroseismology of Procyon : Preliminary results from SARG, 2004 // *Co. Ast.*, vol. 145, pp. 53—54.
11. Lanza A. F., Rodono M., Zappala R. A. Fourier analysis of spotted star light curves as a tool to detect stellar differential rotation // *A&A*, 1993, vol. 269, pp. 351—354.
12. Barning F. J. M. The numerical analysis of light curve of 12 Lacertae // *Bull. Astr. Inst. Neth.*, 1963, vol. 17, no. 1., pp. 22—28.
13. Lomb N. R. Least-squares frequency analysis on unequally spaced data // *Astrophys. Sp. Sci.*, 1976, vol.3 9, pp. 447—462.
14. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis on une-venly spaced data // *Ap. J.*, 1982, vol. 263, pp. 835—853.
15. Deeming T. J. Fourier analysis with unequally-spaced data // *Astrophys. And Space. Sci.*, 1976, vol. 36, pp.447—462.
16. Edelson R. A., Krolik J. H. The Discrete Correlation Function : A new method for analyzing unevenly samled variability data // *Ap. J.*, 1988, vol. 333, pp. 646—659.
17. Roberts D. H., Lehar J., Dreher J. W. Time series analysis with CLEAN. I. Derivation of a spectrum *Astronomical Journal*, 1987, vol. 93, pp. 968—989.
18. Carbonell M., Oliver R., Ballester J. L. Power spectra of gapped time series: a comparison of several methods // *Astron. and Astrophys*, Vol. 264, pp. 350—360.
19. Baliunas S. L., Horne J. H. A prescription for period analysis of unevenly sampled data, 1986 // *Ap. J.*, vol. 302, p. 757—763.

20. Витязев В. В. Анализ неравномерных временных рядов : учеб. пособие. СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. 68 с.
21. Edelson R. A., Krolik J. H. The Discrete Correlation Function : A new method for analyzing unevenly samled variability data, 1988 // Ap. J., vol. 333, pp. 646–659.
22. Rieger F. M. Periodic variability and binary black hole systems in blazars // AIP Conference Proceedings, 2005, vol. 745, pp. 487–492.
23. Rieke G. H., Grasdalen G. L., Kinman T. D., Hintzen P., Wills B. J., Wills D. Photometric and spectroscopic observations of the BL Lacertae object AO 0235+164 // Nature, 1976, vol. 260, pp. 754–759.
24. Cohen R. D., Smith H. E., Junkkarinen V. T., Burbidge E. M. The nature of the BL Lacertae object AO 0235+164 // Astrophysical Journal, vol. 318, pp. 577–584.
25. Vol'vach A. E., Larionov M. G., Vol'vach L. N. et al. Physical Characteristics of the Blazar AO 0235+164 // Astronomy Reports, 2015, vol. 59, no. 2, pp. 145–155.

Информация об авторах

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Ларионов Михаил Григорьевич, доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва.

Аллер Марго Ф., доктор философии, научный сотрудник Радиообсерватории Мичиганского университета, Анн Арбор, США.

Аллер Хьюдж Д. научный сотрудник Радиообсерватории Мичиганского университета, Анн Арбор, США.

Information about the authors

Larisa N. Volvach, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Michail G. Larionov, Dr. Sci., Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russian Federation.

Margo F. Aller, PhD, Research Scientist, Department of Astronomy, University of Michigan, Ann Arbor, USA.

Huge D. Aller, PhD, Research Scientist, Department of Astronomy, University of Michigan, Ann Arbor, USA.

УДК 523.9

Гигантские вспышки мазера метанола в G358.931-0.030 и возможность детектирования гравитационных волн от тесных массивных звездных систем

¹ Вольвач Л. Н., ¹ Вольвач А. Е., ² Ларионов М. Г., ¹ Дмитроца А. И.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,

Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,

Астрокосмический центр, Москва, Российская Федерация

volvach@bk.ru

Получено: 29 февраля 2020 г.

Отрецензировано: 9 марта 2020 г.

Принято к публикации: 12 марта 2020 г.

Аннотация: С помощью радиотелескопа РТ-22 в Симеизе проведен мониторинг линий метанола CH_3OH на частотах 19.967 ГГц (переход $2_1 \rightarrow 3_0 \text{ E}$) и 20.971 ГГц (переход $10_1 \rightarrow 11_2 \text{ A}$) в направлении на массивную область активного звездообразования G358.931-0.030. Зафиксированы две вспышки мазерного излучения. Проведен мониторинг вспышечного явления, произошедшего на частоте 19.967 ГГц. Галактические тесные двойные системы, состоящие из массивных звезд, находящихся на стадии предшествующей главной последовательности, могут быть мощными источниками гравитационных волн.

Ключевые слова: радиотелескоп, радиоизлучение, вспышка, мазер, гравитационные волны.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Дмитроца А. И. Гигантские вспышки мазера метанола в G358.931-0.030 и возможность детектирования гравитационных волн от тесных массивных звездных систем // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 1. С. 24—31.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, Л. Н. Гигантские вспышки мазера метанола в G358.931-0.030 и возможность детектирования гравитационных волн от тесных массивных звездных систем / Л. Н. Вольвач, А. Е. Вольвач, М. Г. Ларионов, А. И. Дмитроца // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 1. — С. 24—31.

Giant methanol maser flares in G358.931-0.030 and possibility of detecting gravitational waves from close massive stellar systems

L. N. Volvach¹, A. E. Volvach¹, M. G. Larionov², and A. I. Dmitrotsa¹

¹Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory,
Yalta, 298688, Russian Federation

²Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 117997 Russian Federation
volvach@bk.ru

Received: February 29, 2020

Peer-reviewed: March 9, 2020

Accepted: March 12, 2020

Abstract: Using radiotelescope RT-22 in Simeiz, methanol lines of CH₃OH were monitored at frequencies of 19.967 GHz (transition $2_1 \rightarrow 3_0 E$) and 20.971 GHz (transition $10_1 \rightarrow 11_2 A$) in the direction of the massive region of active star formation G358.931-0.030. Two flashes of maser radiation were recorded. Monitoring of the flare-up event that occurred at a frequency of 19.967 GHz was preached. Galactic close binary systems, consisting of massive stars at the stage of the preceding main sequence, can be powerful sources of gravitational waves.

Keywords: radiotelescope, radio emission, flare, maser, gravitational waves.

For citation (IEEE): L. N. Volvach, A. E. Volvach, M. G. Larionov, and A. I. Dmitrotsa, "Giant methanol maser flares in G358.931-0.030 and possibility of detecting gravitational waves from close massive stellar system" *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 24–31.

1. Введение

В нашей Галактике имеются массивные зоны активного звездообразования, большинство из которых находятся в направлении на ее центральную область. Проблема изучения сверхмассивных звезд ($\sim 60 M_\odot$) состоит в том, что их эволюция скрыта от наших глаз гигантским поглощением электромагнитного излучения. Время жизни таких объектов в тысячи раз меньше, чем у нормальных звезд. Именно мазеры (в том числе и CH₃OH) являются указателями областей [1, 2], в которых происходят процессы рождения сверхмассивных звезд.

Менее изучен на данный момент массивный комплекс звездообразования G358.931-0.030 из каталога компактных источников (CSC) с пото-

ком 1.4 Ян на длине волны 870 μ [3]. Объект G358.931-0.030 включен в международную мониторинговую наблюдательную программу [4, 5].

Регистрации линий вблизи малоисследованного диапазона частот 19.9 ГГц и 20.9 ГГц была проведена на РТ-22 в Симеизе в период с 23 января 2019 г. по 5 марта 2019 г.

2. Оборудование и наблюдения

Наблюдения проводились с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории в Симеизе. Приемник диапазона 18—26 ГГц был установлен во вторичном фокусе РТ-22. Высокостабильная частота 5 МГц от водородного стандарта *VCH-1005* подавалась на перестраиваемые по частоте гетеродины. При этом обеспечивалось преобразование входных частот приема в промежуточную частоту с указанными значениями полос [6]. Наблюдательный цикл состоял из накопления сигнала в течение 5—10 минут при наведении на источник и столько же при отведении с источника на фиксированное расстояние 0.5°. Циклы повторялись для достижения заданного отношения сигнал/шум.

Весь процесс наблюдений проходил в автоматическом режиме под управлением модернизированной программы «*field system*». Это касалось наведения антенны на источник, сопровождения источника, отведения с источника, проведения калибровочных процедур и перестройки гетеродинов.

Цикл наблюдений мазерных линий состоял в накоплении сигнала в течение (5—10) минут при наведении на источник (*on*) и при отведении с источника на градус в сторону от источника (*off*). Циклы могли повторяться для достижения необходимого отношения сигнал/шум.

Первичная обработка наблюдательных данных осуществлялась в режиме «*on-line*», что обеспечивало возможность оперативно вносить коррекции в наблюдательный процесс.

3. Результаты

Наблюдения проводились на частотах метанольных линий 19.967 ГГц и 20.971 ГГц в период с 23 февраля по 5 марта и были инициированы сообщением о появлении вспышки мазера метанола на частоте 6.7 ГГц в G358.931-0.030 [7].

В результате сразу было обнаружено мазерное излучение на частоте 19.967 ГГц в диапазоне скоростей от -14 до -18 км/с, представляющее собой совокупность отдельных линий от источников с близкими скоростями. На рис 1. показана спектральная линия излучения метанола вблизи частоты 19.9 ГГц [3, 4].

На рис 2. показана линия метанола CH_3OH , впервые зарегистрированная на частоте 20.971 ГГц в источнике G358.931-0.030 [3, 4].

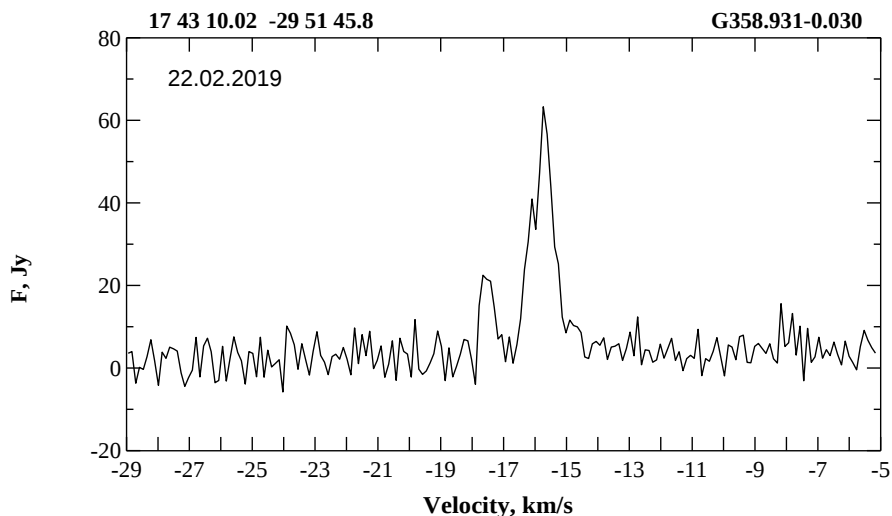


Рис. 1. Линия метанола CH_3OH , зарегистрированная на частоте 19.967 ГГц в источнике G358.931-0.030.

Fig. 1. The methanol line CH_3OH , recorded at a frequency of 19.967 GHz in the source G358.931-0.030

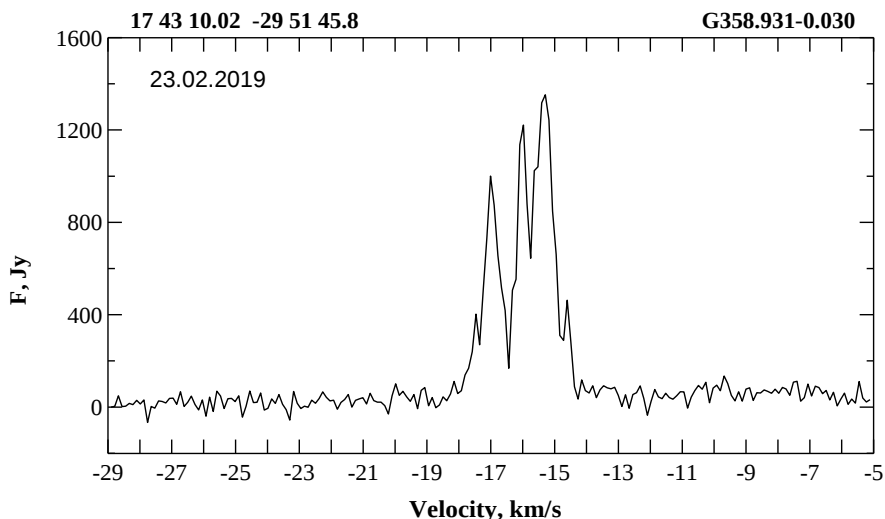


Рис. 2. Линия метанола CH_3OH , зарегистрированная на частоте 20.971 ГГц в источнике G358.931-0.030.

Fig. 2. Methanol CH_3OH line recorded at a frequency of 20.971 GHz in source G358.931-0.030

Общая продолжительность вспышки составляет около полутора месяцев и поэтому может относиться к разряду коротких вспышечных явлений. В этом смысле она ничем не отличается от коротких вспышек мазера водяного пара [8]. Корректность такого сравнения заключается в том, что энергетические переходы в рассматриваемых линиях метанола и водяного пара близки.

Вспышки излучения мазера метанола CH_3OH менее мощные, чем гигантские всплески мазеров водяного пара H_2O . В дополнении к этому, активность мазеров метанола в линиях диапазона 19—25 ГГц заметно ниже, чем на более низких частотах.

С учетом сказанного про обилие рабочих молекул метанола в областях активного звездообразования, зафиксированную нами вспышку на частоте 20.971 ГГц можно сравнить с самой мощной вспышкой мазера водяного пара в галактическом источнике G25.65+1.05 [9]. Не вдаваясь в детали процесса возбуждения мазера метанола, можно предположить, что указанный механизм возможен для объяснения рассматриваемой мощной вспышки мазера метанола в источнике G358.931-0.030 на частоте 20.971 ГГц. Разницу на два порядка по сравнению с амплитудой гигантской вспышки мазера водяного пара в источнике G25.65+1.05 на частоте 22.231 ГГц можно объяснить существенно более низкой плотностью рабочих молекул метанола (на два-три порядка) в зонах высокой звездной активности.

Наличие близкой по времени другой вспышки на частоте 19.967 ГГц может свидетельствовать в пользу рядом расположенных мазерных структур в областях $\sim 10^{17}$ см, которые представляют собой набор еще более мелких структур $\sim (10^{15} - 10^{16})$ см. Каждая вспышка состоит из ряда — 5 деталей, каждую из которых можно интерпретировать как излучение отдельной глобулы.

Таким образом, в массивной области активного звездообразования G358.931-0.030, как и в W49N, могут активироваться конденсации, излучающие мазеры метанола, мощную вспышку которого нам и удалось зафиксировать на частоте 20.971 ГГц. Менее мощная вспышка произошла на частоте 19.967 ГГц, которая, возможно, связана с соседней мазерной конденсацией.

Вспышки в G358.931 на частотах 19.967 ГГц и 20.971 ГГц обнаружены впервые.

Известно, что вокруг молодых массивных звезд в областях активного звездообразования расположены газово-пылевые молекулярные диски, в которых находятся мазерные глобулы. Так как в нашей Галактике больше половины двойных и кратных звезд, то и в случае G358.931 мы можем

иметь двойную (кратную) звездную систему с массой центральной звезды $60M_{\odot}$ и компаньона $(10\text{—}20) M_{\odot}$. Мы предположили в работе [9], что тесная массивная звездная система (ТДС) может быть причиной возникновения гигантских вспышек мазеров воды в немногочисленных галактических киломазерах G25.65+1.05 и W49N.

ТДС в массивных галактических комплексах звездообразования могут излучать гравитационные волны (ГВ). В эксперименте по обнаружению гравитационных волн 11 февраля 2016 г., возможно, зафиксированы слияния объектов звездных масс. Не исключено, что индикаторами схождения кратных массивных звезд в фазе, близкой к слиянию, могут быть гигантские вспышки мазера воды. Такими массивными областями активного звездообразования являются Orion KL, G25.65+1.05, W49N, G45.47+9.95, NGC63341-MM1, S255IR-NIRS3, G358.93-0.03 и др. Кратные ТДС в таких областях могут излучать гравитационные волны в интервале $10^{-8}\text{—}10^{-9}$ Гц (орбитальные периоды ТДС, составляющие 3—30 лет).

Мощность ГВ двойной системы для случая сверхмассивных черных дыр (СМЧД) была предложена Валлонен [10]:

$$dE/dt = L(\text{эрг/сек}) = \{[32 \cdot G^4 \cdot m_1^2 \cdot m_2^2 (m_1 + m_2) \cdot (1 + 73e^2/21 + 37e^4/26)]/[5c^5 \cdot a^5 (1 - e^2)^{1/2}]\}.$$

Здесь масса центральной СМЧД m_1 , масса компаньона m_2 , эксцентриситет e , большая полуось орбиты a , — значения параметров двойной системы.

Подставив ориентировочные значения параметров ТДС для W49N: $m_1=60M_{\odot}$, $m_2=20M_{\odot}$, $e=0.7$, $a=10^{13}$ см, получим светимость объекта $L \approx 10^{31}$ эрг/сек. На поверхности Земли будет поток от источника равный $S=L/4\pi R^2$, где R — расстояние от источника до Земли. Если мазерный источник находится в известном галактическом комплексе Orion KL (400 пк), то $S=5.8 \cdot 10^{-13}$ эрг/(сек·см²).

Для сравнения, мощность ГВ, идущих от самого известного источника OJ 287 составляет $L_{\text{OJ 287}} \approx 6 \cdot 10^{43}$ эрг/сек [11]. Поток от него на поверхности Земли $S_{\text{OJ 287}}=5.6 \cdot 10^{-13}$ эрг/(сек·см²), что практически совпадает с потоком от ТДС, находящейся в массивном комплексе активного звездообразования Orion KL.

Таким образом, нельзя исключить, что галактические ТДС, состоящие из массивных звезд, находящихся на стадии, предшествующей главной последовательности, могут быть мощными источниками ГВ. Следует заметить, что регистрировать ГВ от таких источников приходится на сверхнизких частотах порядка 10^{-8} Гц, учитывая периоды обращения таких систем ~ 10 лет. Выгоднее регистрировать ГВ во время вспышек при слия-

нии объектов, длящихся доли секунды и имеющие частотные полосы на много порядков шире, как это предполагается при использовании детекторов LIGO и LISA. А вот детекторы IPTA рассчитаны на детектирование именно низкочастотных (10^{-8} — 10^{-9}) Гц гравитационных волн [12].

4. Заключение

1. С использованием радиотелескопа РТ-22 выполнен мониторинг линий метанола CH_3OH на частотах 19.967 ГГц (переход $2_1 \rightarrow 3_0$ E) и 20.971 ГГц (переход $10_1 \rightarrow 11_2$ A) в массивной области активного звездообразования G358.931-0.030.

2. Впервые обнаружены новые линии метанола на этих частотах.

3. Зафиксирована мощная вспышка в метанольной линии на частоте 20.971 ГГц в этом объекте, представляющая собой совокупность излучения от отдельных мазерных конденсаций. Наличие сложных структур мазера метанола с такими потоками ранее не отмечалось.

4. Галактические ТДС, состоящие из массивных звезд, находящихся на стадии предшествующей главной последовательности, могут быть мощными источниками гравитационных волн.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-29-11005 в части обработки и анализа данных наблюдений. Авторы статьи выражают благодарность персоналу РТ-22 КрАО РАН за помощь в проведении наблюдений.

Список литературы

1. Sugiyama K., Fujisawa K., Doi A., Honma M. et al. Mapping Observations of 6.7 GHz Methanol Masers with the Japanese VLBI Network // PASJ, 2008, vol. 60, pp. 23–35.
2. Bartkiewicz A., Szymczak M., van Langevelde H. J. European VLBI Network imaging of 6.7 GHz methanol masers // A&A, 2016, vol 587, A104.
3. Urquhart J. S., Moore T. J. T., Schuller F., et al. ATLASGAL – environments of 6.7 GHz methanol masers // MNRAS, 2013, vol. 431, pp. 1752–1776.
4. Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G., Mac-Leod G. C. Detection of Methanol Maser Flares Near 19.9 and 20.9 GHz toward the Massive Source of Active Star Formation G358.931-0.030 // Astronomy Letters, 2019, vol. 45, no. 11, pp. 764–769.
5. Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G., MacLeod G. C., van den Heever S. P., Sugiyama K. Monitoring a methanol maser flare associated with the massive star-forming region G358.93-0.03 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society : Letters, 2020, vol. 494, pp. L59–L63.
6. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Стрепка И. Д., Антюфеев А. В., Мышенко В. В., Зубрин С. Ю., Шульга В. М. Некоторые результаты совместных исследований НИИ «КрАО» и

- РИ НАНУ областей звездообразования в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн // Изв. Крымской Астрофиз. obs., 2009, т. 104, № 6, с. 72—79.
7. Sugiyama K., Saito Y., Yonekura Y., Momose M. Bursting activity of the 6.668 GHz CH_3OH maser detected in G 358.93-00.03 using the Hitachi 32-m // The Astronomer's Telegram, 2019, # 12446.
 8. Volvach L. N., Volvach A. E., Larionov M.G. et al. Powerful bursts of water masers towards G25.65+1.05 // Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 2019, vol. 482, pp. L90–L92.
 9. Volvach L. N., Volvach A. E., Larionov M. G., MacLeod G. C., van den Heever S. P., Wolak P., Olech M., Ipatov A. V., Ivanov D. V., Mikhailov A. G., Mel'nikov A., Menten K., Belloche A., Weiss A., Mazumdar P., Schuller F. A Giant Water Maser Flare in the Galactic Source IRAS 18316-0602 // Astronomy Reports, 2019, vol. 63, no. 1, pp. 49–65.
 10. Valtonen M. J. New orbit solutions for the precessing binary black hole model of OJ 287 // Astrophysical Journal, 2007, vol. 659, pp.1074–1081.
 11. Hobbs G., Archibald A., Arzoumanian Z., Backer D., Bailes M., Bhat N. D. R. Burgay M., Burke-Spolaor S., Champion D. et al. The International Pulsar Timing Array project : using pulsars as a gravitational wave detector // Classical and Quantum Gravity, 2010, vol. 27, no. 8, p. 084013.
 12. Manchester R. N. The Parkes Pulsar Timing Array // ChJAS, 2006, vol. 6, pp. 139–147.

Информация об авторах

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Ларионов Михаил Григорьевич, доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва.

Дмитроца Андрей Иванович, научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Information about the authors

Larisa N. Volvach, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Michail G. Larionov, Dr. Sci., Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russian Federation.

Andrej I. Dmitrotsa, Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea.

УДК 523.9

Наблюдения вспышечной активности Солнца 6 сентября 2017 года

Вольвач А. Е., Якубовская И. В.

*Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация
volvach@bk.ru*

Получено: 22 февраля 2020 г.

Отрецензировано: 2 марта 2020 г.

Принято к публикации: 5 марта 2020 г.

Аннотация: Возмущение, вызванное солнечной вспышкой, сопровождается генерацией радиоизлучения понижающейся частоты, воздействует на биосферу и влияет на качество работы многих устройств наземного и космического оборудования. Радиоастрономический диагностический комплекс, созданный на базе радиотелескопа РТ-22 и трех малых радиотелескопов, интегрирован во Всемирную Службу мониторинга солнечной активности, которая включает 14 наземных станций в кооперации с орбитальными обсерваториями. Четыре робот-радиотелескопа КрАО, объединенные в Службу Солнца KRIM, расположенную в координатах $33^{\circ} 59' 30''$ Е долготы и $44^{\circ} 23' 52''$ N широты, ведут наблюдения Солнца в диапазоне длин волн от 8 мм до 1,2 м в режиме мониторинга и алертов. В сентябре 2017 года Служба Солнца KRIM зарегистрировала серию сильных вспышек в момент минимума солнечной активности.

Ключевые слова: радиотелескоп, радиоизлучение, вспышка, Солнце.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Якубовская И. В. Наблюдения вспышечной активности Солнца 6 сентября 2017 года // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 32—40.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, А. Е. Наблюдения вспышечной активности Солнца 6 сентября 2017 года / А. Е. Вольвач, И. В. Якубовская // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 1. — С. 32—40.

Observations of flare activity of the Sun on September 6, 2017

A. E. Volvach and I. V. Yakubovskaya

*Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory,
Yalta, 298688, Russian Federation
volvach@bk.ru*

Received: February 22, 2020

Peer-reviewed: March 2, 2020

Accepted: March 5, 2020

Abstract: *The perturbation caused by the solar flare is accompanied by the generation of radio frequency radiation of decreasing frequency, affects the biosphere and affects the quality of work of many devices of ground and space equipment. The radio astronomy diagnostic complex, created on the basis of the RT-22 radio telescope and three small radio telescopes, is integrated into the World Solar Activity Monitoring Service, which includes 14 ground stations in cooperation with orbital observatories. Four KrAO robotic radio telescopes, combined into the Solar Service KRIM, located at coordinates $33^{\circ} 59' 30''$ E longitude and $44^{\circ} 23' 52''$ N latitudes, are observing the Sun in the wavelength range from 8 mm to 1.2 m in the mode monitoring and alerts. In September 2017, the Sun Service KRIM recorded a series of powerful flares at the time of minimum solar activity.*

Keywords: *radio telescope, radio emission, flare, Sun.*

For citation (IEEE): A. E. Volvach and I. V. Yakubovskaya, “Observations of flare activity of the Sun on September 6, 2017,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 32–40.

1. Введение

Солнечные вспышки — чрезвычайно мощные взрывы в солнечной атмосфере. Они встречаются вблизи солнечных пятен, обычно вдоль линии разделения (нейтральная линия) между областями с противоположно направленными магнитными полями. Физически вспышка представляет собой отклик солнечной атмосферы на внезапный быстрый процесс энерговыделения, возможно, магнитного происхождения. Отклик затрагивает, главным образом, хромосферу и корону [1]. Возмущение, вызванное солнечной вспышкой, сопровождается радиоизлучением, которое можно исследовать в широком диапазоне волн, от миллиметровых до длины волны 15—20 м [2].

Солнечные вспышки сопровождаются увеличением уровня ионизирующей радиации, прекращением радиосвязи, изменением озонового слоя, усилением интенсивности космических лучей и т. д. Корпускулярный поток вызывает магнитные бури и полярные сияния. Поэтому дистанционные системы контроля и управления, радиационная обстановка в ближнем космосе, навигация, системы посадки самолетов, радиосвязь и другие виды технической деятельности человечества подвержены влиянию солнечной активности. В связи с этим прогнозирование «космической погоды» имеет большое значение.

С целью исследования геодинамических явлений и влияния физических параметров объектов Солнечной системы и Солнца на состояние экосистемы Земли и околоземного пространства создан комплекс для проведения непрерывных наблюдений в соответствии с существующими международными критериями станциями гелио-геодинамического полигона «Симеиз-Кацивели»: РСДБ станция «Симеиз», лазерные дальномеры «Симеиз-1873» и «Кацивели-1893», GPS-станции «GPS-CRAO» и «GPS-Katsively» в составе международных сетей; службой мониторинга солнечной активности с помощью радиотелескопов РТ-22, РТ-2, РТ-3, РТ-М в составе международной сети Службы Солнца [3]. Получение и совершенствование знаний о механизмах такого влияния, проведения мониторинга и прогнозирования изменений в масштабных экосистемах существования человечества позволяют определять условия его жизнедеятельности.

2. Оборудование и наблюдения

Для получения систематических данных о состоянии солнечной активности в Крымской астрофизической обсерватории были сконструированы и длительное время эксплуатируются радиотелескопы сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов длин волн (рис. 1).

Радиотелескоп РТ-2 представляет собой параллактическое поворотное устройство с электрическим приводом по часовому углу, на котором установлено параболическое зеркало диаметром 2,5 м с совмещенными облучателями на длинах волн 3 и 5 см (частоты 10 и 6 ГГц), помещенное в 6-метровый радиопрозрачный купол. Радиометры прямого усиления построены на основе маломощных микроволновых (сверхвысокочастотных) усилителей. На длине волны 3 см ширина луча составляет $1^{\circ} 15'$, а на длине волны 5 см — $1^{\circ} 45'$. Полоса пропускания каждого канала составляет 40 МГц, постоянная времени — 1 с. РТ-2 принимает излучение в сантиметровом диапазоне длин волн, чтобы получить информацию о процессах, происходящих в нижней хромосфере Солнца.

Радиотелескоп RT-3 представляет собой параллактическое поворотное устройство с электроприводом по часовому углу, на котором установлено параболическое зеркало диаметром 3 м с совмещенными облучателями для длин волн 10 и 12 см (частоты 2,5 и 2,85 ГГц). Он помещен в радиопрозрачный купол диаметром 6 м для защиты от метеовоздействий, что значительно улучшает качество и стабильность данных. Ширина диаграммы направленности антенны составляет $2,3^{\circ}$ — $2,5^{\circ}$. Это обеспечивает получение радиоизлучения со всей поверхности радиодиска Солнца. Полоса пропускания каждого канала составляет 40 МГц, минимальная постоянная времени — 10 мс, сигнал записывается в цифровом виде с частотой дискретизации 1 Гц в режиме ожидания и 100 Гц во время всплеска радиоизлучения. Телескоп собирает информацию о физических условиях в области энерговыделения солнечных вспышек — верхней хромосфере и нижней короне.



Рис. 1. Радиотелескопы Службы Солнца Крымской астрофизической обсерватории.

Fig. 1. Radio telescopes of the Sun Service of the Crimean Astrophysical Observatory

Радиотелескоп RT-M оснащен антенной 4×4 м, установленной на параллактической установке с электроприводом по часовому углу. Она представляет собой синфазную решетку, состоящую из 16 элементов. Ширина полосы пропускания каждого канала составляет 250—350 МГц. Ширина луча составляет 11° , ширина полосы частот каждого канала составляет 300 кГц, минимальная постоянная времени составляет 1,25 мс, непре-

рывный динамический диапазон — 30 дБ, запись цифрового сигнала происходит на частоте 400 Гц.

Для регистрации коронального излучения установлен радиоспектрограф e-Callisto, рабочие частоты которого варьируются от 275 до 327 МГц (длины волн от 0,9 до 1,09 м). На нем ведутся регулярные наблюдения в автоматическом режиме с передачей полученных данных каждые 15 минут в Центральную базу данных в Цюрихе для предоставления онлайн-вой диагностики солнечных вспышек.

Динамический спектрограф позволяет регистрировать зависимость интенсивности излучения от частоты и времени. Спектральные наблюдения позволяют классифицировать радиовсплески, основываясь на четко определенных особенностях радиоизлучения, например таких как скорость частотного дрейфа, ширина полос отдельных деталей всплеска и структур гармоник. Эти характеристики всплеска важны, поскольку они связаны с физическими свойствами источника.

Данные, полученные радиотелескопом RT-M в виде динамических спектров, дают ценную информацию для изучения различных событий в короне, таких как вспышки, выбросы корональной массы. Такие данные полезны для определения физических явлений, ответственных за ускорение частиц на Солнце [4].

солнечной

3. Результаты

На сентябрь 2017 года приходился 24 цикл минимума солнечной активности. С 4 по 10 сентября через западную половину видимого диска солнца проходил активный регион NOAA 12673 (согласно NOAA — National Oceanographic and Atmospheric Administration), увеличивая свою площадь и поддерживая очень активные бета-гамма-дельта магнитные группы. Согласно SWPC (Центр предсказания космической погоды) всего в этом районе зафиксировано 54 вспышки класса C, 26 вспышек класса M, 4 вспышки класса X.

Служба Солнца KRIM зафиксировала некоторые из этих всплесков на радиотелескопах сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов волн. 6 сентября 2017 года, с 11:53 до 13:00 UT, радиотелескопы Службы Солнца KRIM зафиксировали мощный радиовсплеск, который достиг максимального значения в 12:02 UT (рис.3, 4).

Проведено многоволновое исследование двух вспышек X-класса 6.09.2017. Во время вспышек наблюдалось два мощных радио всплеска. Первый всплеск (X2.2) имел временную задержку около 12 с от более высоких до более низких частот см диапазона длин волн и 23 с между сантиметровым и метровым диапазонами волн. Для второго всплеска (X9.3) времен-

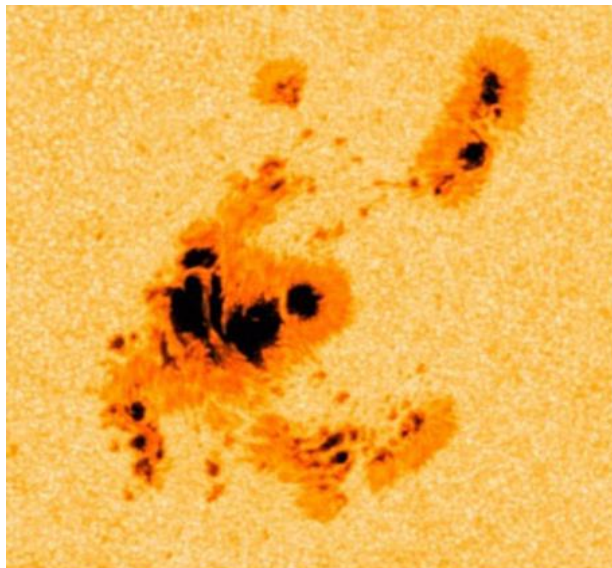


Рис. 2. Область пятен, находящихся в активной области NOAA 12673 (согласно HMI NASA SDO).

Fig. 2. The area of spots located in the active area of NOAA 12673 (according to HMI NASA SDO)

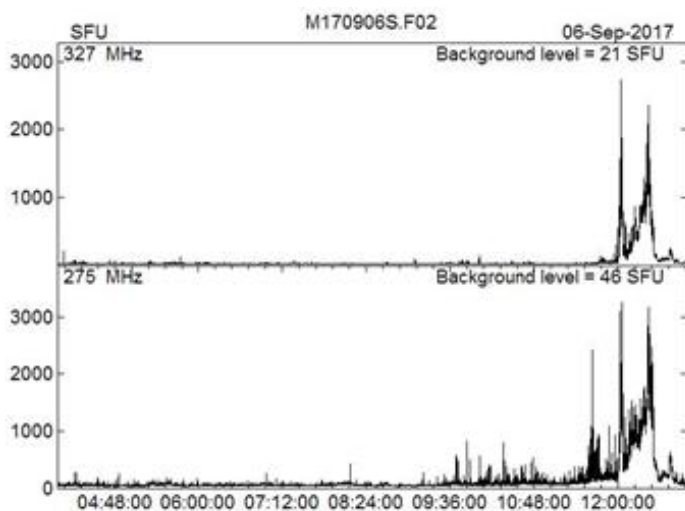


Рис. 3. Спектральные потоки радиоизлучения, зарегистрированные RT-M. На графике хорошо видны сильные радиовсплески произошедшие в 12:02 UT с максимальным значением плотности спектрального потока 3260 SFU на частоте 275 и 2733 SFU на частоте 327 МГц.

Fig. 3. Spectral fluxes of radio emission recorded by RT-M. Strong radio bursts that occurred at 12:02 UT with a maximum spectral flux density of 3260 SFU at a frequency of 275 and 2733 SFU at a frequency of 327 MHz are clearly visible on the graph

ная задержка составила 1.4 минуты и 5.5 минут соответственно. Для вспышки X2.2 частотный спектр более жесткий, по сравнению со вспышкой X9.3. Нормированные потоки интенсивностей в континууме и (E)UV варьируются в соответствии с изменениями излучения SXR.

Проведено многоволновое исследование двух вспышек X-класса 6.09.2017. Во время вспышек наблюдалось два мощных радио всплеска. Первый всплеск (X2.2) имел временную задержку около 12 сек от более высоких до более низких частот см диапазона длин волн и 23 сек между сантиметровым и метровым диапазонами волн. Для второго всплеска (X9.3) временная задержка составила 1.4 минуты и 5.5 минут соответственно. Для вспышки X2.2 частотный спектр более жесткий, по сравнению со вспышкой X9.3. Нормированные потоки интенсивностей в континууме и (E)UV варьируются в соответствии с изменениями излучения SXR.

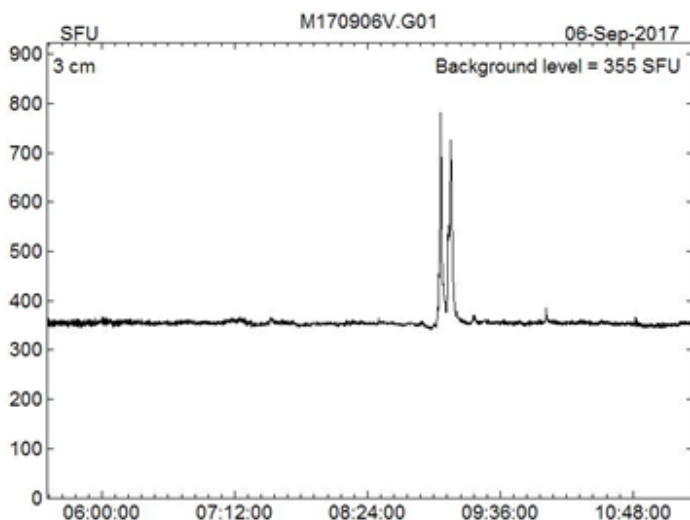


Рис. 4. Спектральный поток радиоизлучения, зарегистрированный RT-2 на частоте 10 ГГц.

На графике хорошо виден сильный радио всплеск, произошедший в 09:10 UT с максимальным уровнем плотности спектрального потока 691 SFU на частоте 10 ГГц.

Fig. 4. Spectral radiation flux recorded by RT-2 at a frequency of 10 GHz. The graph shows a strong radio burst that occurred at 09:10 UT with a maximum spectral flux density of 691 SFU at a frequency of 10 GHz

Корреляция между фотосферной, хромосферной и корональной активностями предполагает магнитную связь между фотосферным, хромосферным и корональным слоями во время мелкомасштабных процессов на предварительной фазе вспышки. Различные временные константы в разных слоях атмосферы могут объяснить некоторые различия во временных

профилях. Таким образом, оптически тонкие корональные источники могут быстро излучать энергию, в то время как источники глубоко в хромосфере и такие особенности, как излучение SXR, могут тратить больше времени на рассеивание энергии, выделяемой в этих слоях.

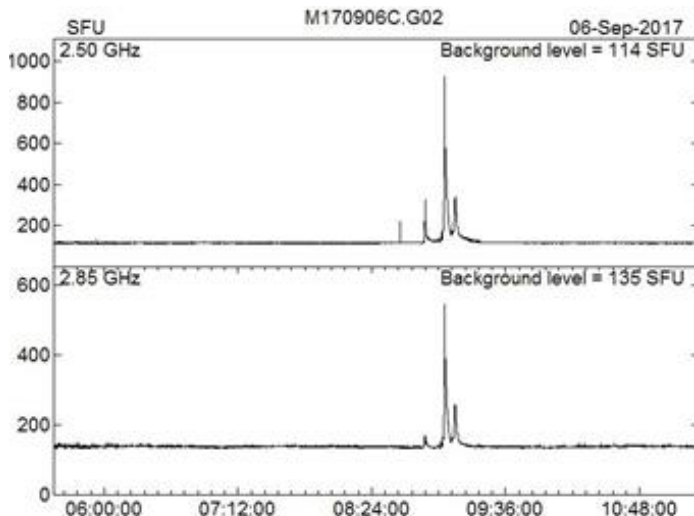


Рис. 5. Спектральные потоки радиоизлучения, зарегистрированные РТ-3 на частоте 2,5 ГГц и 2,85 ГГц. На графике хорошо виден сильный радиовсплеск, произошедший в 09:10 по UT, с максимальным уровнем плотности спектрального потока 941 SFU на 2.5 ГГц и 578 SFU на 2.85 ГГц.

Fig. 5. Spectral fluxes of radio emission recorded by RT-3 at a frequency of 2.5 GHz and 2.85 GHz. The graph clearly shows a strong radio burst that occurred at 09:10 UT, with a maximum spectral flux density of 941 SFU at 2.5 GHz and 578 SFU at 2.85 GHz

4. Заключение

Возмущение, вызванное солнечной вспышкой, достигает орбиты Земли, воздействует на биосферу и влияет на качество работы многих устройств наземного и космического оборудования.

Данные ежедневного мониторинга солнечной активности с помощью радиотелескопов Службы Солнца KRIM позволяют оценить радиационную обстановку вблизи Земли, прогнозировать стабильность радиосвязи, надежность навигационных систем, дистанционный мониторинг и контроль, являются основой для изучения физических условий в солнечной короне, что позволяет повысить точность прогноза солнечной активности.

6 сентября 2017 года радиотелескопы Службы Солнца KRIM зафиксировали мощный радиовсплеск. Распространение возмущения в солнеч-

ной атмосфере сопровождалось генерацией радиоизлучения понижающейся частоты. Своевременное предсказание наступления таких событий позволяет подготовиться к преодолению их негативных последствий.

Список литературы

1. Мирошниченко Л. И. Физика Солнца и солнечно-земные связи ; под ред. М. И. Панасюка. М. : Университетская книга, 2011. 174 с.
2. Железняков В. В. Радиоизлучение Солнца и планет // Успехи физических наук, 1958, т. LXIY, вып. 1, с. 113—154.
3. Kurbasova G. S., Volvach A. E., and Volvach L. N. Astronomical Cycles in the Climatic and Geophysical Characteristics of Crimea // Cosmic Research, 2019, Vol. 57, No. 4, pp. 243–251.
4. Вольвач А. Е., Юровский Ю. Ф., Самисько К. В., Самисько С. А., Якубовская И. В. Мониторинг солнечной активности в радиодиапазоне станциями службы солнца «KRIM». Изв. Крымской астрофиз. общ., 2016, т. 112, № 2, с. 179—186.

Информация об авторах

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Якубовская Инна Валерьевна, научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Information about the authors

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Inna V. Yakubovskaya, Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea.

УДК 623.623

Конструкторские решения и интерфейсы оборудования радиотехнической разведки, радиоэлектронного подавления и блокирования радиолиний связи и управления, производимого АО «Руспром»

Водяных А. А., Бритков А. В., Горбанов Н. А., Дементенко С. А.,
Дудник К. В., Игрунов А. Ю., Кондратенко Г. Г., Лактионов А. И.,
Матюхин Н. Н., Пацановский Д. С., Перькова Н. И., Прокопенко А. Э.,
Ракитянский Ф. А., Стрыбиж И. С., Тертышный О. И.

АО «Руспром»

ул. Беговая, д. 13, Москва, 125284, Российская Федерация

rusprom@rusprom.su

Получено: 22 мая 2020 г.

Отрецензировано: 26 мая 2020 г.

Принято к публикации: 29 мая 2020 г.

Аннотация: В статье представлены конструкторские решения и рабочие интерфейсы оборудования радиотехнической разведки (определение пеленга на источник сигнала, оценка параметров сигнала), радиоэлектронного подавления (формирование, излучение помехового сигнала) и блокирования радиолиний связи и управления (с дополнительным режимом секторного подавления сигналов управления и навигации беспилотных летательных аппаратов), работающего в диапазоне частот от 20 МГц до 6000 МГц.

Ключевые слова: пеленг на источник сигнала, излучение помехового сигнала, секторное подавление, БПЛА.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Водяных А. А., Бритков А. В., Горбанов Н. А. и др. Конструкторские решения и интерфейсы оборудования радиотехнической разведки, радиоэлектронного подавления и блокирования радиолиний связи и управления, производимого АО «Руспром» // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 41—53.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Водяных, А. А. Конструкторские решения и интерфейсы оборудования радиотехнической разведки, радиоэлектронного подавления и блокирования радиолиний связи и управления, производимого АО «Руспром» / А. А. Водяных, А. В. Бритков, Н. А. Горбанов и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 1. — С. 41—53.

Design solutions and interfaces of radio intelligence equipment, radio-electronic suppression and blocking of radio communication links and control produced by Rusprom Co.

A. A. Vodyanykh, A. V. Britkov, N. A. Gorbanov, S. A. Dementenko, K. V. Dudnik, A. Yu. Igrunov, G. G. Condratenko, A. I. Laktionov, N. N. Matyukhin, D. S. Patsanovsky, N. I. Perkova, A. E. Prokopenko, F. A. Rakityansky, I. S. Strybizh, and O. I. Tertychny

Rusprom Co.
13 Begovaya Str., Moscow, 125284, Russian Federation
rusprom@rusprom.su

Received: May 22, 2020
Peer-reviewed: May 26, 2020
Accepted: May 29, 2020

Abstract: *The article presents design solutions and operational interfaces of radio intelligence equipment (determination of bearing per signal source, estimation of signal parameters), electronic suppression (generation, emission of interference signal) and blocking of radio communication and control links (with additional mode of sector suppression of control and navigation signals of unmanned aerial vehicles) operating in the frequency range from 20 MHz to 6000 MHz.*

Keywords: *bearing on a signal source, radiation of an interfering signal, sector suppression, the UAV.*

For citation (IEEE): A. A. Vodyanykh et al. "Design solutions and interfaces of radio intelligence equipment, radio-electronic suppression and blocking of radio communication links and control produced by Rusprom Co.," *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 41–53.

1. Введение

Идеология построения приемной системы радиотехнической разведки, позволяющей определять пеленг на источник сигнала и производить оценку параметров сигнала (длительность импульсов, несущие частоты, время прихода импульсов относительно времени GPS) приведена в [1]. Система радиоэлектронного подавления, предназначенная для формирования, излучения помехового сигнала по заданным извне данным: частоте, направлению излучения, времени удержания помехового сигнала на

заданной частоте рассматривается в [2]. Наконец, в работе [3] предложен принцип реализации блокиратора каналов связи радиоуправляемых устройств диапазона частот от 20 МГц до 6000 МГц, в котором кроме режима заградительной помехи реализован дополнительный режим для секторного подавления сигналов управления и навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В настоящей статье приведены результаты реализации перечисленных выше систем — конструкторские решения и рабочие интерфейсы.

2. Станция радиотехнической разведки

Частотный диапазон станции: 70—500 МГц и 0,9—3 ГГц. Она позволяет производить анализ сигналов (CW — непрерывных, Pulse — импульсных) источников излучения и определять пеленг на эти источники. Точность определения пеленга $\pm 5^\circ$. Частотный диапазон станции может быть расширен путем смены антенной системы, т. к. приемное оборудование работает до 18 ГГц. На рис. 1 видны те конструкторские решения, которые применены в станции радиотехнической разведки (РТР). Антенная система расположена в защитном колпаке, легко монтируемом на мачте. Все приемное и обрабатывающее оборудование крепится на этой же мачте под антенной системой и защищено от внешних воздействий с помощью брезентового чехла. По кабелю снижения на станцию РТР поступает только питание и Ethernet трафик. Внешний вид станции РТР приведен на рис. 1. Станция может последовательно производить анализ до восьми источников излучения в каждом из четырех частотных поддиапазонов, назначенных (выбранных) оператором в диапазонах 70—500 МГц и 0,9—3 ГГц (всего 32 источника).

Интерфейс работы со станцией приведен на рис. 2.

Он содержит окно Spectrum Analyzer (окно для анализа спектра выбранного поддиапазона); таблицу требований РТР (окно Requirements Table), которое заполняется оператором по результатам анализа спектра (частота, полоса анализируемого сигнала и т. д.); и четыре окна: Видеодетектор (Video Detector), гистограмма импульсов (Histogram Pulse), гистограмма пауз (Histogram Pause), частотно-временная матрица (Time-frequency Matrix), отражающие характеристики текущего выбранного сигнала (в таблице требований текущий выбранный сигнал маркирован желтым цветом). Окно Peleng, Platform Leveling, Position отражает горизонтирование платформы и пеленг на источники сигналов. Имеется также окно Attack Setting REF, позволяющее передавать данные от станции РТР внешнему источнику назначения (по каналу связи РРЛ миллиметрового диапазона).



Рис. 1. Внешний вид станции ПТР.

Fig. 1. Appearance of a radio intelligence station



Рис. 2. Интерфейс станции РТР.

Fig. 2. Interface of a radio intelligence station

Ниже приведено описание интерфейса работы со станцией РТР.

1. Выбирается частотный поддиапазон $i = 1 \dots 4$ (Freqsubrange) приемника (ПРМ).

2. Устанавливаются режимы анализатора спектра для выбранного частотного поддиапазона: центральная частота поддиапазона F_{center} (0.07—18 GHz), мгновенная полоса анализа BW 36 или 3.2 MHz. Разрешение по частоте RBW выбирается автоматически в зависимости BW, соответственно, 40 кГц или 4.44 кГц. Максимальный требуемый уровень отображения на экране REF «связан» с ослаблением входного аттенюатора Atten. Задаются так же другие типовые параметры, используемые в анализаторе спектра (Trace View, Average...) в окне Spectrum Analyzer Settings RTI. Количество пикселей в окне анализатора спектра (AC) — 1000.

3. В окне AC маркируются те спектральные составляющие $i = 1 \dots 8$, которые заинтересовали оператора. Для этого в окне таблицы требований (Requirements Table — RTI) выбирают, активируют один из восьми маркеров кликом мышки (требуемый маркер при этом должен светиться желтым цветом. А поле Enable, рядом с выбранным маркером, должно быть активировано зеленым цветом).

В окне AC в этом случае появляется выбранный маркер, которым может быть помечена любая спектральная составляющая («перетаскиванием» маркера мышкой на требуемую спектральную составляющую). При этом частота этой спектральной составляющей автоматически прописыва-

ется в поле таблицы Frequency, MHz (маркер сопровождается информационным окошком: частота, уровень сигнала). Информация в окне AC обновляется каждые 200 мс.

4. Заполняются остальные поля таблицы требований: Filter BW, Filter Type, CW/Pulse, Threshold Video, Peleng/Omni. После этого выбранный для анализа сигнал будет пропущен через один из полосовых фильтров. В диапазоне частот 0,9—18 ГГц это 36 МГц, 10 МГц, 3,2 МГц, 1 МГц, 0,2 МГц, а в диапазоне частот 0,07—0,9 ГГц имеется возможность установить дополнительные фильтры: 200 кГц, 150 кГц, 100 кГц, 50 кГц, 12,5 кГц, 6,25 кГц. В диапазоне частот 0,9—18 ГГц имеется возможность установить тип фильтра: с гауссовской импульсной характеристикой для радарных сигналов или чебышевской — для связных сигналов (Filter Type). Гауссовская характеристика (по сравнению с характеристикой Чебышева) имеет пологий скат АЧХ. В полосе прозрачности фильтр Чебышева (по уровню -1 dB) имеет затухание -11 dB и -6 dB в половинной полосе прозрачности. Для улучшения фильтрующих свойств фильтра Гаусса, сигнал с его выхода также дополнительно пропускается через однотипный фильтр Чебышева. (Фильтр Гаусса не имеет звона по переднему и заднему фронту радиоимпульса и ему отдается предпочтение при фильтрации радарных сигналов). К выходу заданного фильтра подключен амплитудно-фазовый детектор (АФД). С помощью движка MAF фильтр (слева от окна Video Detector) оператор может отфильтровать ВС (видеосигнал с выхода АФД). Порог (Threshold Video) должен быть установлен из условия отсутствия дребезга в стробирующем импульсе, формируемым по пересечению сигнала ВС порога Treshold. Значения порога в таблице требований устанавливается автоматически после того, как оператор в окне Video Detector с помощью мыши установит линию порога в заданное положение. Поле CW/Pulse заполняется оператором по данным, полученным из AC и Видеограммы сигнала. Для сигнала CW (непрерывный сигнал) это будет означать, что стробирующий импульс будет формироваться от внутреннего генератора, а не от ВС (стробирующий импульс для сигнала CW необходим для взятия пеленга на источник). ТТХ (тактико-технические характеристики) прописываемого в таблице требований сигнала будут выводиться в окнах интерфейса Video Detector, Histogram Pulse, Histogram Pause, Time-frequency Matrix, Peleng, Platform Leveling, Position.

5. Видеограмма сигнала с выхода АФД отражается в окне Video Detector. Отражение видеограммы имеет разрешение 512 пикселей. В зависимости от режима Sweep выводится SweepX1 — 512 отчетов, SweepX8 — 4096 отчетов с прореживанием и отражением каждого 8-го отсчета,

SweepX256 — 131072 отчетов с прореживанием и отражением каждого 256-го отсчета. В этом же окне отражается порог для оцифровки видеосигнала Threshold, а также стробирующий импульс, сформированный из видеосигнала (BC). Амплитуда видеосигнала и порог отражаются в дБ относительно полной шкалы АЦП (Full Scale ADC). Стробирующий импульс отражен в относительных единицах.

Фазовая (при активации кнопки Phase) характеристика импульса, как более устойчивая к искажениям, также может быть отражена в окне Video Detector и помогает оператору в установлении порога Threshold. Также фазовая характеристика помогает оператору произвести оценку внутримпульсной модуляции выбранного сигнала.

В этом же окне (окне Video Detector) с помощью кнопки Weight можно проконтролировать правильность наложения весовой функции, используемой в БПФ при вычислении частоты несущей радиоимпульса. Взвешенные отсчеты на входе АЦП отражаются на экране оператора в линейном масштабе. У оператора имеется возможность изменить (увеличить) масштаб отображения по амплитуде (в 4 раза) и изменить масштаб по длительности (кнопка Sweep). Частота несущей радиоимпульса используется при построении матрицы частотно-временного распределения (ЧВР) — Time-frequency Matrix. В матрице ЧВР квадратом красным цветом обозначаются импульсы, синим цветом — паузы. По номеру квадрата (в матрице ЧВР) можно определить длительность импульса или паузы, обратившись к графикам гистограмм импульсов и пауз. Возможно появление в матрице ЧВР белых квадратов в случае, если, например, измеренная длительность отсутствует в гистограмме (в гистограмме отражаются только пять наиболее часто встречающихся градаций длительностей и этим длительностям в гистограмме присвоены номера. Эти номера используются при формировании матрицы ЧВР). Тогда неизвестная длительность импульса, отмеченная в матрице ЧВР белым квадратом, может быть уточнена с помощью клика маркера по указанному квадрату. Если частота импульса не определена (а длительность импульса определена), то красный квадрат отражается на нулевой частоте. Уточнить частоту можно также с помощью клика маркера по указанному квадрату (после клика маркера приемник «вылавливает» длительность импульса, частоту которого не удалось определить и вычисляет его частоту. Частота в матрице ЧВР определяется с помощью БПФ на 1024 или 128 отсчетов (по желанию оператора). Чем больше отсчетов используется в БПФ, тем большее время тратится на их обработку. Так время, затраченное на обработку 1024 отсчетов, составляет 20 мкс. В случае если следующий радиоимпульс приходит через время менее чем 20 мкс от предыдущего, то его частота в матрице ЧВР не будет определена. Длительность этого импульса будет отражена в матрице ЧВР

красным квадратом на нулевой частоте. БПФ с числом отсчетов 128, кроме того, используется при построении матрицы ЧВР узкополосных импульсных сигналов (при использовании фильтров 200 кГц и менее. т. к БПФ на 1024 отсчета будет давать избыточное разрешение).

6. Видеограмма сигнала может обновляться:

— автоматически при нажатой кнопке Autosync. Обновление производится каждые 200 мс по первому приходящему импульсу (для сигнала CW выборка берется сразу по истечении времени 200 мс);

— вручную оператором при использовании кнопки . Обновление производится по первому приходящему импульсу после нажатия указанной кнопки (для CW выборка берется сразу после нажатия кнопки);

— вручную оператором при использовании кнопки . Обновление происходит по первому приходящему импульсу с заданной длительностью после нажатия указанной кнопки (данный режим только для импульсных сигналов).

7. По прописанному сигналу (в таблице требований) будут построены гистограммы импульсов, пауз, частотно-временная матрица, а также определен пеленг на сигнал, если в графе Peleng/Omni таблицы требований стоит Peleng (см. окна Histogram Pulse, Histogram Pause, Time-frequency Matrix, Peleng, Platform Leveling, Position). Новый набор данных для гистограмм и ЧВР матрицы (частотно-временной матрицы) осуществляется через активацию кнопок , расположенных рядом с указанными гистограммами. Данные для гистограмм набираются в течение времени T, заданном оператором (0,1—10000 ms), либо автоматически, если количество анализируемых импульсов превысило значение N=2000 (в зависимости от того, какое событие завершится раньше).

В верхнем правом углу гистограмм имеется обозначение, по какому количеству импульсов и пауз построены гистограммы Nsum, а также индицируется интервал времени Tsum (время набора данных для гистограмм). Отражается также информация о том, все ли градации длительностей и пауз воспроизведены (displayed) в окнах гистограмм (в % от Nsum, т. к. в гистограммах индицируются только пять градаций длительностей и пять градаций пауз).

8. Значение пеленга на сигнал отображается в таблице требований в поле Azimuth, и в окне Peleng, Platform Leveling, Position. Погрешность определения пеленга составляет 5°. При определении пеленга измеряется уровень импульсного сигнала или непрерывного сигнала по каждой из восьми антенн (для диапазона 0.9—3 ГГц). Уровень сигнала в каждой антенне определяется по одному приходящему радиоимпульсу путем усреднения его отсчетов. Количество отсчетов и начало взятия отсчетов относи-

тельно переднего фронта импульса задается оператором в окне Video Detector путем «перетаскивания» маркеров мышкой (маркер расположен на стробирующем импульсе и изменяет свое местоположение вдоль оси длительности стробирующего импульса). Длительность входного радиоимпульса (по которому будут браться отсчеты для пеленга) также может быть задана оператором в окне Video Detector или, имеется и такая возможность, отсчеты будут взяты по первому приходящему импульсу (задается оператором в таблице требований Peleng — Plg1/ PlgAll). Одновременно с измерением уровня сигнала по любой из восьми антенн, которые по очереди подключаются к измерительному приемнику (slave), производится измерение уровня этого же сигнала с выхода omni антенны измерительным приемником master (одновременность выборки с omni антенны и любой из направленных антенн достигается путем формирования стробирующего импульса в приемнике master и передачи его в приемник slave). Это исключает возможную ошибку в измерениях, вызванную флуктуацией уровня измеряемого сигнала во времени (т. к. процедура последовательного измерения уровня сигнала по каждой из восьми антенн занимает некоторый интервал времени, который в общем может быть большим, т. к. зависит еще и от скажности измеряемого сигнала). В колонке Peleng Wait Time также можно считать время ожидания, потраченное оборудованием РТР для определения пеленга на источник. Просмотр пеленга сразу по нескольким сигналам, прописанным в таблице, возможно при нажатой кнопке Peleng*8 в таблице требований и при прописанном оператором времени Peleng*8 Wait Time. Это время оператор может оценить по считанным данным таблицы требований в колонке Peleng Wait Time. При нажатой кнопке Peleng*8 окна Video Detector, Histogram Pulse, Histogram Pause, Time-frequency Matrix будут не доступны для отображения информации.

9. Таким образом можно прописать в таблицу требований до восьми анализируемых сигналов (в каждом из четырех частотных диапазонов, которые определены в частотном диапазоне 0.07—18 GHz). При этом вся информация о текущем прописанном сигнале (когда инициализированы зеленый и желтый маркеры в таблице требований) будет отражена в окнах Video Detector, Histogram Pulse, Histogram Pause, Time-frequency Matrix, Peleng, Platform Leveling, Position. Далее, если предусматривается совместная работа оборудования РТР (приемника с антенной системой) с оборудованием РЭБ, оператор должен заполнить поля для РЭБ (Attack Settings — REF): Attack Time — требуемое время работы оборудования РЭБ по каждому из сигналов таблицы требований; REF Time — время работы оборудования РЭБ с момента получения им отчета (от приемника) до посылки обратной квитанции по отработанному отчету; Peleng Time — интервал времени между процедурами взятия пеленга в приемнике (взятие

пеленга существенно снижает время реакции ПРМ на формирование отчета, т. к. требуется проанализировать уровни сигналов со всех восьми антенн кольцевой антенной системы). Оборудование РЭБ получает таблицу требований от оборудования РТР в отчете, передаваемом по РРЛ миллиметрового диапазона (при активировании кнопки ).

10. С помощью окна Peleng, Platform Leveling, Position, оператор может произвести горизонтирование платформы приемника (при этом центр внутренней окружности должен совпадать с центром наружной окружности).

11. Кнопка Save Setting позволяет сохранить прописанные настройки АС, данные таблицы требований, настройки для РЭБ в энергонезависимую память.

12. Рассмотренный выше алгоритм работы ПРМ — это работа в ручном режиме (оператор сам заполняет таблицу требований из восьми частот). Кнопка Manual/Auto в таблице требований при этом находится в состоянии Manual. Возможен еще режим Auto (кнопка Manual/Auto в состоянии Auto).

13. В случае, когда выбран режим auto, оператор заносит в таблицу требований в поле Frequency, MHz, одну центральную частоту. Для этой частоты задается полоса анализа (в поле Filter BW). ПРМ по этим данным обнаруживает в указанной полосе до восьми частот и сам формирует таблицу требований. При активированной кнопке  оборудованию РЭБ будет переслан отчет об обнаруженных (автоматически) восьми сигналах в заданной полосе анализа, а при получении квитанции от РЭБ, ПРМ (РТР) снова запускает процедуру обнаружения. Т. е. процедура общения оборудования ПРМ (РТР) и РЭБ происходит без участия оператора и может быть им прервана переводом ПРМ в режим Manual. Процедура автоматического обнаружения в ПРМ использует результаты АС. При этом используются установки АС, заданные оператором в окне Spectrum Analyzer Settings — RTI. Эти установки определяют длительность реакции ПРМ от момента получения квитанции от оборудования РЭБ до момента передачи нового отчета по обнаружению. Например, использует ли АС режим усреднения и какой? Average, Holdmax? Какой запуск АС? От внутреннего генератора AS/MIS или от стробирующего импульса, сформированного по импульсу с выхода детектора подключенного к заданной полосе анализа? Также это время зависит от того, требуется ли определение пеленга на источник, от параметров исследуемого сигнала, например, скважности и т. д. Минимальное время реакции ПРМ от получения квитанции до выдачи нового отчета — 200 мкс. Время реакции РЭБ от получения отчета до фор-

мирования по этому отчету помехового сигнала — 70 мкс (для случая, когда изменяется только одна частота в известном и заранее установленном частотном поддиапазоне при заданном направлении излучения).

14. Имеется еще одна возможность у оператора при заполнении таблицы требований. Прописывая таблицу по «конкретному сигналу», оператор может произвести длительную запись образов I и Q этого сигнала нажатием кнопки  и передать их на компьютер нажатием кнопки  (запись сигналов типа Pulse начинается по первому приходящему импульсу). Длительность этой записи значительно превышает длительность записи отсчетов отражаемых в окне Video Detector (например, для фильтра 36 МГц длительность записи составит 200 мс).

Анализ сигналов CW осуществляется (в диалоге оператор — компьютер) после записи образов I, Q и вывод на экран спектрограммы I2+Q2. Цель (разрабатываемого) программного обеспечения, анализирующего сигнал CW — оценка символьной скорости, полосы прозрачности и roll-off фильтра I,Q с последующим построением констелляционной диаграммы для видов модуляции: BPSK, QPSK, QAM N.

15. В станции имеется возможность обновления программного обеспечения через интерфейс управления.

3. Станция радиоэлектронного подавления

Станция радиоэлектронного подавления (РЭП) работает в диапазоне частот 70—500 МГц и 1—3 ГГц с выходной мощностью используемых усилителей 90 Вт и 2×(40—60) Вт соответственно. С учетом антенной системы энергопотенциал станции в диапазоне частот 1—3 ГГц повышается до 300—600 Вт. Станция РЭП позволяет формировать помеховый сигнал по заданным извне данным: частоте, направлению излучения, времени удержания помехового сигнала на заданной частоте, времени работы станции РЭП. Имеется также возможность формирования помехового сигнала заданной формы. На рис. 3 видны те конструкторские решения, которые применены на станции РЭП. На рис. 4 приведена структурная схема станции РЭП. На рис. 3 показан интерфейс станции РЭП.

Антенная система расположена в защитном колпаке, легко монтируемом на мачте. Все передающее оборудование крепится на этой же мачте сразу под антенной системой и защищено от внешних воздействий с помощью брезентового чехла. По кабелю снижения на станцию РЭП поступает только питание и Ethernet трафик. Станция может управляться по Ethernet каналу, как через кабель снижения, так и через Ethernet канал, передаваемый через РРЛ миллиметрового диапазона. В диапазоне частот 1—3 ГГц два усилителя с выходной мощностью 40—60 Вт работают на две направленные логопериодические антенны (входы 1К и 5К, или 2К и 6К,



Рис. 3. Внешний вид станции РЭП.

Fig. 3. The appearance of the electronic jamming station

или 3К и 7К, или 4К и 8К). Каждая пара из указанных антенн образует антенную решетку первого этажа (состоящую из четырех пар антенн). Антенная решетка второго этажа строится аналогично и имеет сдвиг на 45° по направлению излучения относительно антенной решетки первого этажа (второй антенный этаж на рис. 3, 4 не показан). Первый и второй коммутаторы позволяют подать сигнал с выходных усилителей 1—3 ГГц на любую пару антенн первого или второго этажей (каждый коммутатор имеет по 9 выходов, один из которых подключен к одной антенне 1—3 ГГц, четыре выхода используются для подключения к антеннам первого этажа и еще четыре выхода для подключения второго этажа; на рис. 2 показано управление только одним этажом). Коммутаторы антенн выполнены на реле Axiscom HF3 S. Потери в коммутаторе составляют 1,5 дБ.

Формирователь поддерживает на выходах усилителя (1—3 ГГц) заданную разность фаз в зависимости от требуемого направления излучения. Это позволяет менять положение диаграммы направленности, формируемой каждой парой антенн, в пределах $\pm 35^\circ$ и обеспечивает высокое значения энергopotенциала станции в широком диапазоне частот (1—3 ГГц) при любых направлениях излучения. В диапазоне частот 70—500 МГц используется ненаправленное излучение.

Устройство позволяет по записанным данным (через Ethernet протокол) формировать сигнал заданной формы с полосой частот до 40 МГц в течение отрезка времени 200 мс (с возможностью циклического повторения). Для этого в устройстве используются микросхемы SDRAM SAMSUNG K4S281632I.

Время реакции станции от момента получения данных по частоте излучения составляет 70 мкс. При условии, что направление излучения, длительность излучения на заданной частоте и центральная частота предварительно установлены, а формирование помехового сигнала осуществляется в полосе частот ± 50 МГц относительно центральной частоты.

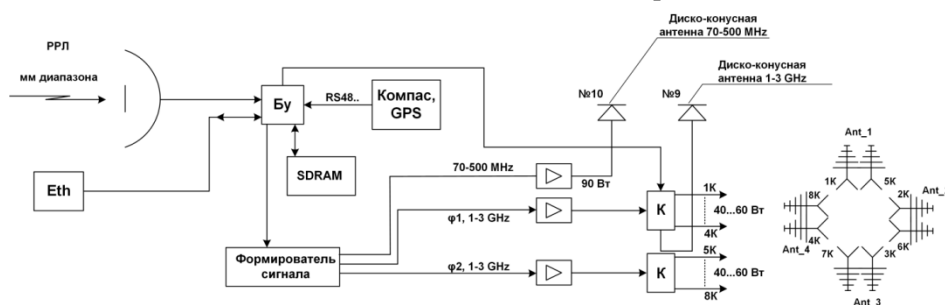


Рис. 4. Структурная схема станции РЭП.

Fig. 4. Block diagram of an electronic jamming station

IP address: 10 . 0 . 0 . 10

Connect

SUBBAND 1 | SUBBAND 2 | SUBBAND 3 | SUBBAND 4 | IP MAC

START: 2600 END: 2700

FREQ	MHz	KHz	Direct
☒	2650	0	5°/RAM
☒	2652	350	75°
☒	2654	0	110°/RAM
☒	2657	500	75°
☒	2660	0	235°/RAM
☒	2670	0	120°
☐	950	0	190°
☐	625	0	350°

Time

Attack time: 99 mS 50 uS

REF time: 3 S 500 mS 500 uS

Connect SEND

Рис. 5. Интерфейс станции РЭП.

Fig. 5. Radio electronic jamming interface

4. Устройство блокирования радиолиний связи и управления

Блокиратор JAGUAR разработан в связи с широким распространением новых систем радиосвязи и передачи информационных данных — 3G, 4G, радиоканалы управления БПЛА, и т. д.

Блокиратор формирует заградительную помеху с линейно частотной модуляцией, перекрывающую весь частотный диапазон от 20 МГц до 6000 МГц, но в отличие от изделия, рассмотренного в докладе [3], конструкция нового блокиратора выполнена в стойке 19U, что значительно улучшает эксплуатационные характеристики блока, так как упрощает возможную модернизацию или ремонт изделия. Также в новом блокираторе JAGUAR

установлены дополнительные ВЧ коммутаторы, позволяющие оперативно подключать направленные антенны (вместо ненаправленных) для подавления необходимых сигналов в заданном секторе. Для установки направленных антенн разработана и изготовлена специальная поворотная платформа, управление положением которой осуществляется с помощью пульта ДУ блокиратора. Структурная схема системы для блокировки каналов связи радиоуправляемых устройств JAGUAR показана на рисунке 6.

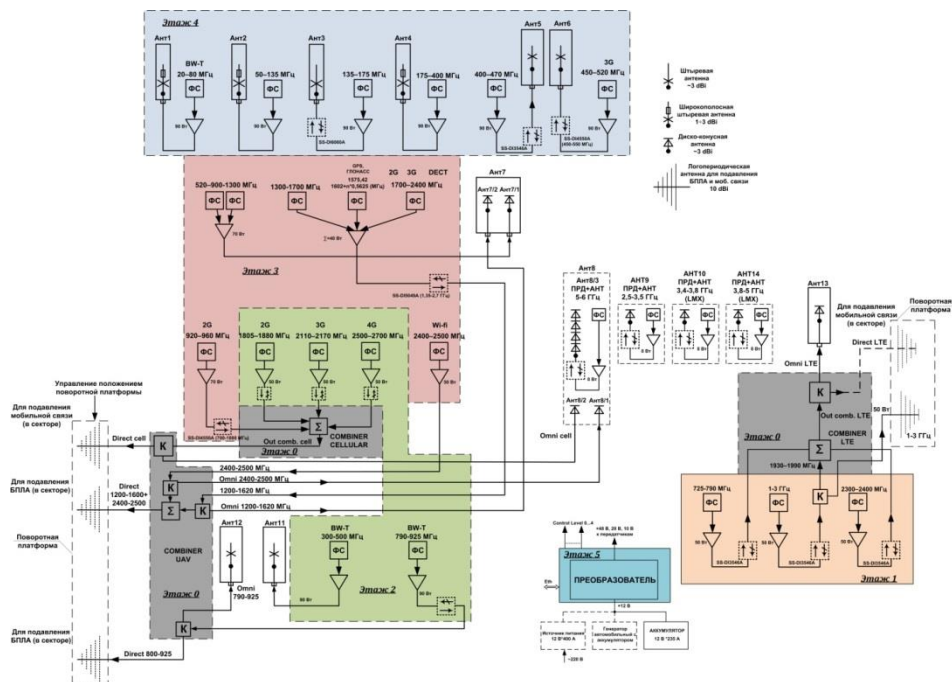


Рис. 6. Структурная схема изделия JAGUAR.

Fig. 6. JAGUAR block diagram

Конструктивно блокиратор состоит из шести блоков (этаж 0 ... этаж 5), установленных в стойку, каждый из которых, в случае необходимости, может быть легко из нее извлечен.

Стойка основного передатчика состоит из 18 литерных передатчиков, перекрывающих частотный диапазон от 20 до 2700 МГц (каждый передатчик включает в себя: генераторы специальных сигналов, усилитель мощности, преобразователь напряжения, модуль управления и контроля), три ВЧ комбайнера CELLULAR, LTE и UAV, объединяющие сиг-

налы мобильной связи и сигналы подавления БПЛА, ВЧ коммутаторы для оперативного переключения между направленными и штатными антеннами блокиратора (режим секторного подавления), а также содержит систему жидкостного охлаждения блока и преобразователи напряжения для питания изделия. Внешний вид передней и задней панелей стойки показан на рис. 7.

Антенное поле состоит из четырнадцати передающих антенн на магнитных основаниях. Четыре самых высокочастотных литерных передатчиков в диапазоне частот 2,5—6 ГГц смонтированы в корпусах антенн 8, 9, 10, 14. Пример размещения антенного поля блокиратора в автобоксе Thule показан на рисунке 4.

Инженерный пульт с сенсорным экраном, для дистанционного управления блокиратором по кабелю через интерфейс Ethernet позволяет оператору осуществлять мониторинг и управлять режимами работы системы.

Имеется также эксплуатационный пульт для дистанционного управления блокиратором по кабелю через интерфейс Ethernet в антивандальном исполнении. Внешний вид пультов показан на рисунке 3.

Реализованная конструкция и габариты изделия позволяют эффективно использовать блокиратор, как на стационарных объектах, так и в движении на легковом автотранспорте.



Рис. 7. Фото внешнего вида передней (а) и задней (б) панелей стойки основного блокиратора JAGUAR.

Fig. 7. Photo of the appearance of the front (a) and rear (b) rack panels JAGUAR main blocker



Рис. 8. Фото внешнего вида инженерного и эксплуатационного пультов дистанционного управления блокиратора JAGUAR.

Fig. 8. Photo of the appearance of the engineering and operational remotes of the JAGUAR lock



Рис. 9. Фото внешнего вида антенного поля блокиратора JAGUAR, размещенного в автобоксе Thule и общий внешний вид автомобиля с установленной антенной системой.

Fig. 9. Photo of the appearance of the antenna field of the JAGUAR blocker located in the Thule autobox and the general appearance of the car with the antenna system installed

Антенное поле (с ненаправленными антеннами) установлено в автобоксе Thule Motion XT XXL Black Glossy TH629901. Некоторые антенны имеют размер по высоте больше, чем высота автобокса. Для их размещения в основании автобокса сделаны отверстия, а под автобоксом прикреплен металлический лист. Указанные антенны крепятся к этому листу через магнитные основания. Внутри автобокса также имеется дополнительный металлический лист, к которому крепятся антенны меньшего размера.

В основном режиме эксплуатации блокиратор формирует широкополосную заградительную всенаправленную помеху во всем диапазоне частот от 20 до 6000 МГц (формирование помехового сигнала в литерных передатчиках с полосами частот до 200 МГц осуществляется с помощью прямого синтезатора частоты — DDS). Суммарная мощность излучаемой помехи 1300 Вт. Это обеспечивает надежное подавление наиболее распространенных радиоканалов связи в радиусе не менее 60 метров от антенного поля системы. Частотный план заградительной помехи и выходные мощности литерных усилителей указаны в таблице 1.

Табл. 1. Частотный план заградительной помехи.

Table 1. Frequency plan of the barrier

Литера	Частота, МГц	Выходная мощность, Вт
1	20—80 BW-T*	90
2	50—135	90
3	135—175	90
4	175—400	90
5	300—500 BW-T*	90
6	400—470	90
7	450—520	90
8	725—790	50
9	790—925 BW-T*	90
10	925—960	70
11	520—1300	70
12	1300—2400 GPS, ГЛОНАСС	50
13	1805—1880	50
14	1930—1990	50
15	2110—2170	50
16	2300—2400	50
17	2400—2500	50

Литера	Частота, МГц	Выходная мощность, Вт
18	2500—2700	50
19	2500—3500	7
20	3400—3800	7
21	3800—5000	7
22	5000—6000	7*4 (антенна 8/3-антенная решетка из 4-х антенн)

*BW-T (Band width tunable) — формирование сигнала помехи в указанном диапазоне частот или части диапазона, задаваемой оператором.

При необходимости подавления только определенных диапазонов частот (стандартов связи), оператор системы может включить/выключить нужные литерные передатчики с помощью инженерного пульта дистанционного управления блокиратором. Управление системой осуществляется по кабелю через интерфейс Ethernet. Это также дает возможность дистанционного управления блокиратором через любую Ethernet сеть с помощью компьютера.

В блокираторе JAGUAR реализован дополнительный режим для секторного подавления сигналов управления и навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). При его включении будут работать только литерные передатчики, подавляющие все известные основные частотные диапазоны, используемые для управления и навигации БПЛА (см. таблицу 2). Эти литерные передатчики будут отключены от антенн всенаправленного излучения (Кус $\sim 0...+3$ дБи) и подключены к направленным антеннам с коэффициентом усиления 10 дБи. Антенны направленного действия располагаются на поворотной платформе, которая позволяет осуществить излучение помехового сигнала по заданному азимуту и углу места. Алгоритм сканирования задается через инженерный пульт (платформа расположена в боксе автомобиля — towcar и на фото не показана). Имеется также возможность поднятия платформы на мачте на высоту 2.5 м).

Табл. 2. Частотный план заградительной помехи в режиме секторного подавления БПЛА.

Tab. 2. Frequency plan of the barrier in the mode of sector UAV suppression

Литера	Частота, МГц	Выходная мощность, Вт
1	20—80 BW-T*	90
5	300—500 BW-T*	90
9	790—925 BW-T*	90
12	1220—1620 GPS, ГЛОНАСС	50
17	2400—2500	50

Литера	Частота, МГц	Выходная мощность, Вт
21	4900—6000	7*4 (антенна 8/3-антенная решетка из 4-х антенн)

В режиме подавления сигналов управления БПЛА литерные передатчики с аббревиатурой BW-T (Band width tunable) позволяют оператору сформировать помеху, как во всей указанной полосе частот, так и в какой-либо ее части. Для снижения количества направленных антенн мощности соответствующих литерных передатчиков суммируются между собой ВЧ комбайнером UAV (см. рис. 6).

Аналогично организован режим секторного подавления мобильной связи (2G, 3G, LTE). В табл. 3 указаны те литерные передатчики, которые могут быть подключены к направленным антеннам, расположенным на той же поворотной платформе, что и антенны для подавления БПЛА.

Табл. 3. Частотный план заградительной помехи в режиме секторного подавления сигналов мобильной связи.

Tab. 3. Frequency plan of the barrier in the mode of sector suppression of mobile communication signals

Литера	Частота, МГц	Выходная мощность, Вт
8	725—790	50
9	790—925	90
10	925—960	70
13	1805—1880	50
14	1930—1990	50
15	2110—2170	50
16	2300—2400	50
18	2500—2700	50

5. Заключение

В статье представлены современные конструкторские решения и интерфейсы оборудования радиотехнической разведки, радиоэлектронного подавления и блокирования радиолиний связи и управления, производимого АО «Руспром». Максимальная мгновенная полоса анализа станции РТР увеличена до 108 МГц, серийно выпускаемый блокиратор каналов связи радиоуправляемых устройств обладает необходимыми техническими характеристиками и многофункциональностью режимов работы для эффективного подавления современных распространенных средств радиосвязи и борьбы с беспилотными летательными аппаратами.

Список литературы

1. Степанов В. Г., Коврыгин Д. В., Дудник К. В., Кондратенко Г. Г., Стрыбиж И. С., Игрунов А. Ю., Бондарь Г. Г., Лобко А. Я. Приемная система РТР // 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019). Севастополь, 8—14 сентября 2019 г. : тезисы д-дов. — Москва; Минск; Севастополь, 2019. С. 63—67.
2. Степанов В. Г., Коврыгин Д. В., Лактионов А. И., Бритков А. В., Горбанов Н. А. Третьшный О. И., Игрунов А. Ю. Антенная передающая система РЭП // 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019). Севастополь, 8—14 сентября 2019 г. : тезисы д-дов. — Москва; Минск; Севастополь, 2019. С. 53—54.
3. Степанов В. Г., Коврыгин Д. В., Ракитянский Ф. А., Дементенко С. А., Дудник К. В., Прокопенко А. Э. / Система блокировки каналов связи радиоуправляемых устройств // 29-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2019). Севастополь, 8—14 сентября 2019 г. : тезисы д-дов. — Москва; Минск; Севастополь, 2019. С. 68—69.

Информация об авторах

Бритков Анатолий Васильевич, начальник отдела микропроцессорной техники, АО «Руспром», г. Москва.

Водяных Анатолий Анатольевич, заместитель генерального директора, АО «Руспром», г. Москва.

Горбанов Николай Алексеевич, главный конструктор филиала АО «Руспром», г. Москва.

Дементенко Сергей Анатольевич, заместитель начальника группы телевизионной техники, АО «Руспром», г. Москва.

Дудник Константин Викторович, начальник отдела СВЧ техники, АО «Руспром», г. Москва.

Игрунов Андрей Юрьевич, инженер отдела СВЧ техники, АО «Руспром», г. Москва.

Кондратенко Григорий Геннадиевич, ведущий инженер отдела микропроцессорной техники, АО «Руспром», г. Москва.

Лактионов Александр Иванович, начальник группы усилительной техники высокой мощности, АО «Руспром», г. Москва.

Матюхин Никита Николаевич, начальник инженерно-конструкторского отдела Трубчевского завода «Руспром», г. Трубчевск, Брянская обл.

Пацановский Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер группы источников питания, АО «Руспром», г. Москва.

Перькова Наталья Ивановна, заместитель главного конструктора филиала АО «Руспром», г. Москва.

Прокопенко Александр Эдуардович, заместитель директора по производству филиала АО «Руспром», г. Москва.

Ракитянский Филипп Александрович, начальник группы телевизионной техники, АО «Руспром», г. Москва.

Стрыбиж Игорь Сергеевич, ведущий инженер отдела микропроцессорной техники, АО «Руспром», г. Москва.

Тертышный Олег Игоревич, ведущий инженер группы усилительной техники высокой мощности, АО «Руспром», г. Москва.

Information about the authors

Anatoly V. Britkov, head of the department of microprocessor technology, JSC Rusprom, Moscow.

Anatoly A. Vodyanykh, deputy general director, JSC Rusprom, Moscow.

Nikolay A. Gorbanov, chief designer of the branch of JSC Rusprom, Moscow.

Sergey A. Dementenko, deputy head of the group of television equipment, JSC Rusprom, Moscow.

Konstantin V. Dudnik, head of the department of microwave engineering, JSC Rusprom, Moscow.

Andrey Yu. Igrunov, engineer of the microwave technology department, JSC Rusprom, Moscow.

Grigory G. Kondratenko, leading engineer of the microprocessor technology department, JSC Rusprom, Moscow.

Alexander I. Laktionov, head of the group of high-power amplification equipment, JSC Rusprom, Moscow.

Nikita N. Matyukhin, head of the engineering and design department of the Trubchevsky plant, JSC Rusprom, Trubchevsk, Bryansk region.

Dmitry S. Patsanovsky, leading engineer of the group of power sources, JSC Rusprom, Moscow.

Natalia I. Perkova, deputy chief designer of the branch, JSC Rusprom, Moscow.

Alexander E. Prokopenko, deputy production director of the branch of JSC Rusprom, Moscow.

Philip A. Rakityansky, head of the television equipment group, JSC Rusprom, Moscow.

Igor S. Strybizh, leading engineer of the microprocessor technology department, JSC Rusprom, Moscow.

Oleg I. Tertyslshny, leading engineer of the group of high-power amplification equipment, JSC Rusprom, Moscow.

Моделирование электрических характеристик графенового полевого транзистора на основе данных расчетов из первых принципов

Боровик А. М., Баранова М. С., Гвоздовский Д. Ч.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь
borovik@bsuir.by*

Получено: 13 мая 2020 г.

Отрецензировано: 20 мая 2020 г.

Принято к публикации: 2 июня 2020 г.

Аннотация: Предложен и апробирован подход к моделированию электрических характеристик приборных структур на основе квазидвумерных пленок, суть которого состоит в определении значений необходимого набора параметров, описывающих электрофизические свойства квазидвумерных пленок и процессы переноса носителей заряда в них, посредством расчетов из первых принципов или экспериментальных измерений и дальнейшем использовании квантовомеханических моделей после необходимой их коррекции в рамках приборно-технологического моделирования. С использованием расчетов из первых принципов установлены значения электрофизических параметров графена с учетом энергетического воздействия контактирующего слоя оксида кремния. Посредством приборно-технологического моделирования с использованием результатов расчетов из первых принципов получены электрические характеристики конденсаторной структуры и полевого транзистора на основе графена.

Ключевые слова: графеновый полевой транзистор, квазидвумерная пленка, расчеты из первых принципов, приборно-технологическое моделирование, квантовомеханические эффекты.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Боровик А. М., Баранова М. С., Гвоздовский Д. Ч. Моделирование электрических характеристик графенового полевого транзистора на основе данных расчетов из первых принципов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 63—74.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Боровик, А. М. Моделирование электрических характеристик графенового полевого транзистора на основе данных расчетов из первых принципов / А. М. Боровик, М. С. Баранова, Д. Ч. Гвоздовский // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 1. — С. 63—74.

Simulation of the graphene field effect transistor electrical characteristics based on data of first-principles calculations

A. M. Borovik, M. S. Baranova, and D. C. Hvazdousky
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
6, P. Brovki Str., Minsk, 220013, Republic of Belarus
borovik@bsuir.by

Received: May 13, 2020

Peer-reviewed: May 20, 2020

Accepted: June 2, 2020

Abstract: *An approach to simulation of the electrical characteristics of device structures based on quasi-two-dimensional films is proposed and tested. The essence of this approach is determining the values of the necessary parameters set, which describe the electrophysical properties of the quasi-two-dimensional films and the processes of charge carriers transfer in them, by first-principles calculations or experimental measurements and further use of quantum-mechanical models after their correction within the framework of device-technological simulation. Using first-principles calculations, the values of the graphene electrophysical parameters are determined taking into account the energy impact of the silicon oxide layer. By device-technological simulation, using the results of first-principles calculations, the electrical characteristics of capacitor structure and graphene-based field effect transistor were obtained.*

Keywords: *graphene field effect transistor, quasi-two-dimensional film, first-principles calculations, device-technological simulation, quantum-mechanical effects.*

For citation(IEEE): A. M. Borovik et al. "Simulation of the graphene field effect transistor electrical characteristics based on data of first-principles calculations," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 63–74, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Уникальные электрофизические особенности квазидвумерных пленок, в том числе графена, делают их перспективными для реализации активной области транзисторов [1]. Переход к новым типам полевых транзисторов, сформированным с использованием квазидвумерных пленок, требует обязательного учета некоторых физических эффектов, влияние которых в этих типах приборных структур становится существенным. В таких полевых транзисторах величина потенциальной ямы для электронов опре-

деляется толщиной активной области, образованной квазидвумерной пленкой и составляющей зачастую менее 1 нм. Поскольку потенциальная яма для электронов является настолько узкой, учет квантовомеханической природы электронного газа (эффекта квантового ограничения) является обязательным условием адекватного моделирования рассматриваемых приборных структур [2]. При уменьшении размеров элементов приборных структур существенным становится эффект туннелирования.

Важно отметить значительное различие физических свойств и значений соответствующих параметров, наблюдаемое между новыми, толщиной до нескольких монослоев, материалами и исходными объемными материалами. Помимо этого в условиях реального применения квазидвумерных пленок имеет место их физический контакт с окружающей средой. Графеновый слой, как правило, находится на подложке, может быть покрыт буферным слоем и имеет иные контакты различных типов, которые влияют на электрофизические параметры материала. В целом существует немало факторов, которые оказывают влияние на величину электрофизических параметров графена. Некоторые факторы связаны со структурой самого слоя графена (количество слоев, присутствующие функциональные группы, дефекты), другие факторы связаны с особенностями конкретного применения графена (тип подложки и иных контактирующих слоев, топологические размеры, химическое легирование, ультрафиолетовое и плазменное облучение). Поэтому очень важно иметь представление об особенностях границ раздела металл/графен и диэлектрик/графен, физических процессах там протекающих, а также учитывать это влияние при моделировании приборных структур на основе графена [3—5]. Кроме того, исследование особенностей влияния перечисленных факторов на параметры графена может способствовать обнаружению новых возможностей использования этого материала.

Указанные физические явления оказывают существенное влияние на процессы генерации и переноса свободных носителей заряда в рассматриваемых типах полевых транзисторов, определяя концентрацию и подвижность свободных носителей заряда в канале, а значит, и электрические характеристики приборных структур.

2. Описание подхода к моделированию приборных структур на основе квазидвумерных пленок

Моделирование приборных структур на основе квазидвумерных пленок требует предварительного определения минимального набора параметров квазидвумерного материала, включающего ширину запрещенной

зоны материала, энергию сродства к электрону, плотность состояний для электронов и дырок, диэлектрическую проницаемость материала, эффективную массу и подвижность носителей заряда. Также может быть необходимо определение некоторых параметров рекомбинации носителей заряда. Эти параметры, описывающие физические свойства квазидвумерных пленок, не интегрированы в программные комплексы приборно-технологического моделирования. Высокая степень зависимости электрофизических параметров квазидвумерных пленок от особенностей приборной структуры, контактирующих с квазидвумерным слоем материалов и параметров самого слоя приводит к необходимости учета условий расположения квазидвумерных пленок в конкретной приборной структуре, и прежде всего, возникающих контактов пленок с другими материалами, при определении электрофизических параметров. Получить значения некоторых параметров возможно без привлечения экспериментальных методов, зачастую отличающихся сложностью проведения соответствующих экспериментов, используя вместо них расчеты из первых принципов [6, 7]. Схема реализации подхода к моделированию приборных структур на основе квазидвумерных пленок с привлечением расчетов из первых принципов для получения значений параметров, описывающих электрофизические свойства квазидвумерных пленок и процессы переноса носителей заряда в них, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема реализации подхода к моделированию электрических характеристик приборных структур на основе квазидвумерных пленок.

Fig. 1. The scheme for implementation of the approach to simulation of the electrical characteristics of device structures based on quasi-two-dimensional films

В соответствии с предложенным подходом определенный посредством расчетов из первых принципов набор параметров используется на этапе моделирования приборной структуры. Описание физических процессов в приборной структуре основано на использовании стандартных

для приборного моделирования уравнений: Пуассона, непрерывности, транспорта носителей заряда (диффузионно-дрейфовая модель, модель энергетического баланса, гидродинамическая модель). При этом многочисленные модели, входящие в состав программных комплексов приборно-технологического моделирования, служат для описания конкретных физических процессов и явлений. Некоторые из них требуют адаптации и калибровки с учетом особенностей физических процессов в рассматриваемых приборных структурах посредством использования методов определения значимости параметров и методов оптимизации.

Важным элементом предлагаемого подхода является выбор способа и соответствующих моделей для учета квантовомеханических эффектов в рамках приборно-технологического моделирования. Существуют два основных подхода к учету квантовомеханических эффектов при моделировании наноразмерных полевых транзисторов: непосредственное квантовомеханическое описание, используя, например, уравнение Шредингера и метод неравновесных функций Грина, и введение необходимой квантовомеханической поправки к базовой, например, диффузионно-дрейфовой модели. Несмотря на все достоинства подхода, основанного на непосредственном квантовомеханическом описании физических процессов в приборной структуре, отсутствие надежности используемых численных методов, высокие требования к вычислительным ресурсам и «простоте» приборной структуры зачастую делают невозможным его применение при моделировании процессов переноса носителей заряда. В этом случае необходим переход к использованию подхода на основе квантовомеханической коррекции базовой модели. Этот переход должен сопровождаться калибровкой моделей, определяющих квантовомеханическую коррекцию, с учетом результатов моделирования вольт-фарадных характеристик с использованием уравнения Шредингера или соответствующих экспериментальных измерений. Это оказывается возможным, поскольку при моделировании вольт-фарадных характеристик большинство указанных недостатков первого подхода не наблюдается.

Существуют, однако, и другие подходы к решению рассматриваемой задачи. В частности, высокую эффективность демонстрируют комбинированные модели полевых графеновых транзисторов на основе уравнений квантовой диффузионно-дрейфовой модели [8, 9].

3. Результаты расчетов из первых принципов

Уникальность графена обусловлена, прежде всего, его энергетическим спектром: линейный характер энергетических зон вблизи точек Ди-

рака обосновывает высокую подвижность носителей заряда. Изменение энергетического спектра, определяющего электрофизические свойства графена, возможно из-за влияния контактирующего материала [10].

Зачастую в приборных структурах графен размещен на пленке SiO_2 . Для адекватного учета влияния диэлектрического слоя на свойства графена прежде всего необходимо определить механизмы адсорбции графена и установить энергетически выгодное пространственное положение квазидвумерной пленки относительно SiO_2 . Решение этих задач возможно посредством моделирования из первых принципов с использованием программного комплекса VASP, в котором реализованы методы моделирования, основанные на теории функционала электронной плотности [11, 12].

Наиболее стабильной полиморфной модификацией SiO_2 является α -кварц, наиболее устойчивая поверхность которого — (001) [13]. Для SiO_2 существуют два основных типа поверхности: поверхность с оборванными связями кремния (Si^{unsat}) и поверхность с оборванными связями кислорода (O^{unsat}). Для каждого типа поверхности выполнялся поиск оптимальных пространственных положений атомов углерода относительно SiO_2 : как положений атомов в плоскости графена, так и расстояния между слоями.

Для устранения влияния волновых функций друг на друга, возникающего из-за особенностей реализации моделирования в программном комплексе VASP — трансляции ячеек, в суперячейках создан вакуумный слой толщиной 20 Å вдоль кристаллографического направления z . Расчеты проводились без учета спиновой поляризации. Значение энергии обрезаания составило 520 эВ. Степень влияния поверхности SiO_2 на структурные и электронные свойства графена оценивалась с помощью рассмотрения механизмов взаимодействия. В качестве критериев оценки принято количественное значение энергии адсорбции: ~ 100—400 кДж/моль для хемосорбции и до 100 кДж/моль для физосорбции, а также значение длины связи. Длина связи при химической адсорбции близка к соответствующей длине связи в обычных химических соединениях.

В результате расчетов из первых принципов для различных типов поверхности (Si^{unsat} и O^{unsat}) установлены значения энергии адсорбции графена на поверхности SiO_2 (4,11 кДж/моль и 13,56 кДж/моль соответственно), величины межслоевого расстояния (4,32 Å и 3,31 Å соответственно), а также положение атомов углерода относительно SiO_2 . Такие численные значения энергии адсорбции и межслоевого расстояния соответствуют физической адсорбции, для которой характерно отсутствие химических связей, а также наличие слабых сил Ван-дер-Ваальса, влияющих на устойчивость системы «графен/ SiO_2 ». Анализ результатов позволяет устано-

вить, что адсорбция графена наиболее вероятна на поверхности с оборванными связями кислорода, при межслоевом расстоянии 3,31 Å. Рассчитанные параметры адсорбции используются при последующем определении электрофизических свойств графена, помещенного на SiO₂.

Посредством расчетов из первых принципов исследовались характеристики энергетического спектра графена, расположенного на SiO₂. Для получения энергетического спектра выполнена «развертка» полученных результатов относительно зоны Бриллюэна графена по контуру Г-М-К-Г. Определен вклад атомов углерода в формирование каждого уровня. Энергетические уровни, где этот вклад оказался существенен, составили энергетическую зонную диаграмму графена, расположенного на SiO₂ (рис. 2).

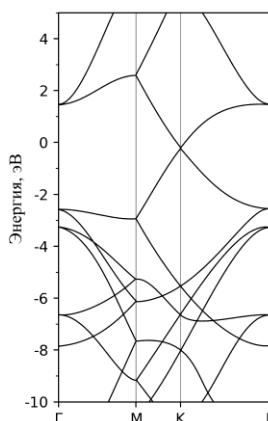


Рис. 2. Зонная структура графена, расположенного на поверхности SiO₂.

Fig. 2. The band structure of graphene disposed on the SiO₂ surface

Расположение зон, соответствующих графену, во многом остается неизменным, в частности расположение и форма σ - и π -зон, ответственных за проводимость. Однако ряд изменений электронных состояний графена под действием приповерхностных атомов SiO₂ наблюдается в непосредственной близости к уровню Ферми. Основное влияние слоя SiO₂ на энергетический спектр графена заключается в появлении энергетического зазора (0,02 эВ) между связывающей и антисвязывающей π -зонами графена. Появление запрещенной зоны связано с неэквивалентным расположением атомов подложки по отношению к атомам углерода графена.

Закон дисперсии отдельно стоящего графена имеет линейный характер. Это значит, что эффективная масса электронов и дырок в графене вблизи точки Дирака равна нулю. В энергетическом спектре графена, расположенного на подложке SiO₂, в точках экстремума вблизи уровня Фер-

ми (интервал энергий от $-1,3$ до $0,7$ эВ) появляется небольшая кривизна, свидетельствующая, что носители заряда приобретают отличную от нуля эффективную массу. С использованием полученной зонной диаграммы графена (рис. 2), с помощью метода конечных разностей (с шагом сетки $0,01$) определена эффективная масса электронов вблизи потолка валентной зоны, которая составила $0,0036m$, где m – масса электрона. По результатам расчетов из первых принципов получены также константа диэлектрической проницаемости графена ($1,39$) и работа выхода из него ($4,3$ эВ).

4. Результаты моделирования электрических характеристик графенового полевого транзистора

С целью исследования эффективности предложенного подхода к моделированию приборных структур на основе квазидвумерных пленок рассматривались конденсаторные структуры и полевые транзисторы на основе графена. Необходимые значения параметров (ширина запрещенной зоны, работа выхода, диэлектрическая проницаемость, эффективная масса носителей заряда, плотность состояний), описывающих электрофизические свойства графена, были получены посредством расчетов из первых принципов с учетом контактирующих с графеном материалов, а также на основании анализа научных публикаций.

С использованием программного комплекса компании Silvaco осуществлено моделирование конденсаторной структуры, образованной последовательным формированием на кремниевой подложке слоев диэлектрика (SiO_2) толщиной 8 нм, графена и металлов (Cr и Au) [14]. Использование в процессе моделирования уравнения Шредингера обеспечило учет квантовомеханических эффектов, проявляющихся при столь малой, порядка единиц ангстрем, толщине графена. Моделирование всех электрических характеристик осуществлялось при комнатной температуре (300 K), что соответствует условиям экспериментальных измерений. Полученные в результате моделирования вольт-фарадные характеристики конденсаторной структуры (рис. 3) находятся в согласии с экспериментальными данными, представленными в работе [14]. Особенности поведения экспериментальной кривой в диапазоне напряжений от $-0,8$ до $0,3$ В объясняются влиянием атмосферы, которое не учитывалось при моделировании.

Приборная структура исследуемого графенового полевого транзистора (рис. 4) отличается относительной простотой с точки зрения моделирования [15]. Монослой графена расположен на поверхности слоя оксида кремния толщиной 300 нм, сформированного на высоколегированной

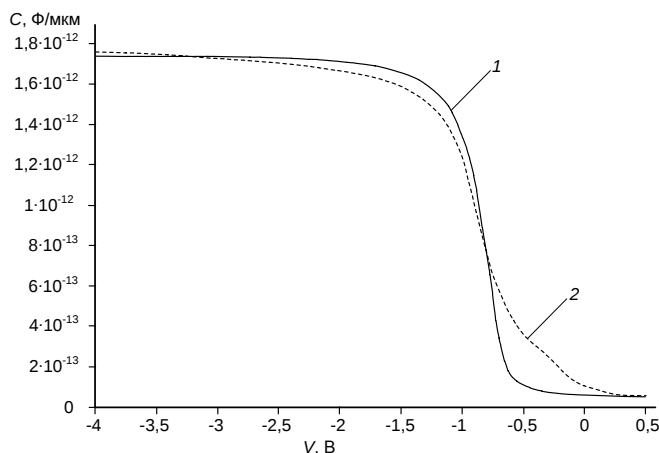


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования (кривая 1) вольт-фарадной характеристики конденсаторной структуры с данными экспериментальных измерений (кривая 2) [14].

Fig. 3. Comparison of the simulation results (curve 1) of the capacitance-voltage characteristic of the capacitor structure with experimental data (curve 2) [14]

кремниевой подложке. Кремниевая подложка выступает в роли затвора рассматриваемого транзистора. Металлические контакты к истоку и стоку полевого транзистора, образованные тонким слоем хрома толщиной 2 нм нанесенным поверх толстым слоем золота, формируют ту же конденсаторную структуру, что и описанная выше. При этом графен при моделировании следует рассматривать как набор из трех областей, две из которых соответствуют положению слоя графена между оксидом кремния и металлом, а третья, центральная, находится в контакте с оксидом кремния и окружающей атмосферой. Таким образом, необходимо задавать два набора значений параметров для двух типов указанных гетероструктур, один из которых соответствует описанной выше конденсаторной структуре.

С использованием квантовомеханической поправки (квантовым потенциалом Боба) к базовой, диффузионно-дрейфовой, модели после необходимой ее коррекции получены электрические характеристики графенового полевого транзистора. Выбор диффузионно-дрейфовой модели в качестве базовой при тестировании предложенного подхода обусловлен наличием хорошо организованных математического аппарата модели и методов ее численного решения. Подвижность в данном исследовании подбиралась исходя из имеющихся результатов экспериментальных измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) приборной структуры и оставалась постоянной ($3300 \text{ см}^2/(\text{В} \times \text{с})$) во всем анализируемом диапазоне напряжений на электродах. На рис. 5 представлено сравнение результатов

моделирования ВАХ (зависимости тока стока I_C от напряжения затвор-исток $V_{ЗИ}$ при напряжении сток-исток $V_{СИ} = 0,02$ В), полученной с использованием программного комплекса компании Silvaco, с данными экспериментальных измерений.

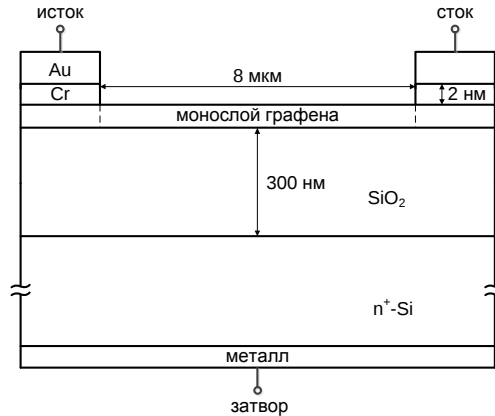


Рис. 4. Приборная структура графенового полевого транзистора.

Fig. 4. Device structure of graphene field effect transistor

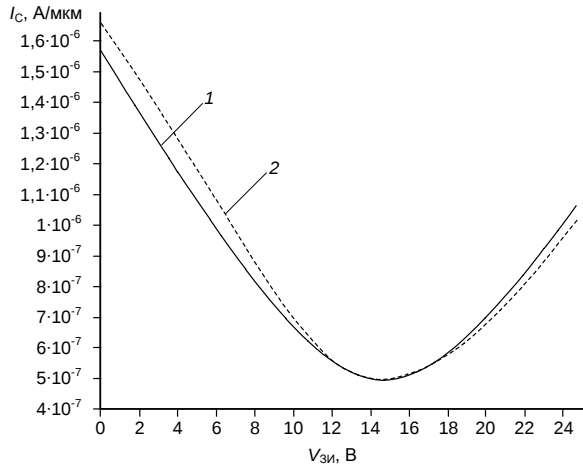


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования ВАХ (кривая 1) графенового полевого транзистора с экспериментальными данными (кривая 2) [15]

Fig. 5. Comparison of the simulation results (curve 1) of the current-voltage characteristic of the graphene field effect transistor with experimental data (curve 2) [15]

Результаты моделирования электрических характеристик полевого транзистора на основе графена согласуются в анализируемом диапазоне

напряжений с экспериментальными данными, представленными в работе [15], с относительной погрешностью, не превышающей 9 %.

4. Заключение

Предложен и апробирован подход к моделированию электрических характеристик приборных структур на основе квазидвумерных пленок, суть которого состоит в определении значений необходимого набора параметров, описывающих электрофизические свойства квазидвумерных пленок и процессы переноса носителей заряда в них, посредством расчетов из первых принципов или экспериментальных измерений и дальнейшем использовании квантовомеханических моделей после необходимой их коррекции в рамках приборно-технологического моделирования. Достижение высокой степени соответствия результатов моделирования электрических характеристик графенового полевого транзистора с данными экспериментальных измерений позволяет сделать вывод о возможности эффективного использования предложенного подхода при исследовании и оптимизации новых конструктивных решений полевых транзисторов на основе квазидвумерных пленок.

Список литературы

1. International Technology Roadmap for Semiconductors // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.itrs2.net/itrs-reports.html> (дата обращения: 27.02.2020).
2. Борисенко В. Е., Воробьева А. И., Данилюк А. Л. и др. Нанoeлектроника: теория и практика. М. : Бином, 2013. 366 с.
3. Yang N., Yang D., Chen L. и др. Design and adjustment of the graphene work function via size, modification, defects, and doping: a first-principle theory study // *Nanoscale Research Letters*. 2017. Т. 12, № 642. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nanoscalereslett.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s11671-017-2375-3> (дата обращения: 27.02.2020).
4. Hwang Ch., Siegel D. A., Sung-Kwan Mo и др. Fermi velocity engineering in graphene by substrate modification // *Scientific Reports*. 2012. Т. 2, № 590. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/srep00590.pdf> (дата обращения: 27.02.2020).
5. Santos E. J. G., Kaxiras E. Electric-Field Dependence of the Effective Dielectric Constant in Graphene // *Nano Letters*. 2013. Т. 13, № 3. С. 898—902.
6. Dean C. R., Young A. F., Meric I. и др. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics // *Nature nanotechnology*. 2010. Т. 5, № 10. С. 722—726.
7. Avouris P. Graphene: Electronic and photonic properties and devices // *Nano Letters*. 2010. Т. 10, № 11. С. 4285—4294.
8. Абрамов И. И. Основы моделирования элементов микро- и нанoeлектроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 444 с.
9. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А. и др. Моделирование полевых графеновых транзисторов с одним и двумя затворами в различных режимах функционирования // *Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век*. 2018. Т. 10, № 3. С. 16—24.

10. Preobrajenski A. B., Ng M. L., Vinogradov A. S. и др. Controlling graphene corrugation on lattice-mismatched substrates // *Physical Review B*. 2008. Т. 78, № 7. С. 073401.
11. Parr R. G., Yang W. *Density-Functional Theory of Atoms and Molecules*. Oxford University Press, 1989. 352 p.
12. Blöchl P. E. Projector augmented-wave method // *Physical Review B*. 1994. Т. 50, № 24. С. 17953.
13. Rignanese G-M., De Vita A., Charlier J-C. Density functional theory calculations on graphene/ α -SiO₂(0001) interface // *Physical Review B*. 2000. Т. 61. С. 13250.
14. Song S. M., Park J. K., Sul O. J. и др. Determination of Work Function of Graphene under a Metal Electrode and Its Role in Contact Resistance // *Nano Letters*. 2012. Т. 12, № 8. С. 3887—3892.
15. Tahy K., Fang T., Zhao P. и др. Graphene Transistors // *Physics and Applications of Graphene — Experiments*. InTech, 2011. С. 473—500.

Информация об авторах

Боровик Артур Михайлович, младший научный сотрудник НИЛ 4.4 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь.

Баранова Мария Сергеевна, младший научный сотрудник НИЛ 4.4 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь.

Гвоздовский Дмитрий Чеславович, младший научный сотрудник НИЛ 4.4 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь.

Information about the authors

Artur M. Borovik, junior scientific researcher of the laboratory 4.4 of Research and Development Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus.

Maryia S. Baranova, junior scientific researcher of the laboratory 4.4 of Research and Development Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus.

Dmitryi C. Hvazdousky, junior scientific researcher of the laboratory 4.4 of Research and Development Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований РБ «Конвергенция» (задание № 3.02).

УДК 621.375.4

СВЧ МИС широкополосных усилителей как универсальные компоненты современной радиоэлектронной аппаратуры¹

¹ Савченко Е. М., ² Першин А. Д., ³ Кузьмин А. Ю.

¹ *Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)*
Проспект Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Российская Федерация
rector@mirea.ru

² *АО «Научно производственное предприятие “Пульсар”»*
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация
administrator@pulsarnpp.ru

³ *АО «Государственный завод “Пульсар”»*
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация
administrator@pulsarnpp.ru

Получено: 25 апреля 2020 г.

Отрецензировано: 30 апреля 2020 г.

Принято к публикации: 11 мая 2020 г.

Аннотация: *Представлена хронология развития монолитных широкополосных усилителей, имеющих в основе схему Дарлингтона. Рассмотрены этапы формирования современной производимой номенклатуры широкополосных усилителей Дарлингтона как неотъемлемой части ЭКБ для всех видов РЭА.*

Ключевые слова: *широкополосный усилитель, схема Дарлингтона, отрицательная обратная связь, сверхвысокочастотный усилитель, СВЧ МИС.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Савченко Е. М., Першин А. Д., Кузьмин А. Ю. СВЧ МИС широкополосных усилителей как универсальные компоненты современной радиоэлектронной аппаратуры // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 75—97.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Савченко, Е. М. СВЧ МИС широкополосных усилителей как универсальные компоненты современной радиоэлектронной аппаратуры // Е. М. Савченко, А. Д. Першин, А. Ю. Кузьмин // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 1. — С. 75—97.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

Microwave monolithic ICs of broadband amplifiers as universal components of modern electronic equipment

Ye. M. Savchenko¹, A. D. Pershin², and A. Yu. Kuzmin³

¹Russian Technological University (RTU MIREA)
78, Vernadsky Prospect, Moscow, 119454, Russian Federation
rector@mirea.ru

²Scientific Production Enterprise “Pulsar”, JSC
27, Okrugnoy proezd, Moscow, 105187, Russian Federation
administrator@pulsarnpp.ru

³State Plant “Pulsar”, JSC
27, Okrugnoy proezd, Moscow, 105187, Russian Federation
administrator@pulsarnpp.ru

Received: April 25, 2020

Peer-reviewed: April 30, 2020

Accepted: May 11, 2020

Abstract: A chronology of the development of monolithic broadband amplifiers based on the Darlington scheme is presented. The stages of the formation of the modern manufactured range of Darlington wideband amplifiers as an integral part of the electronic components for all types of electronic equipment are considered.

Keywords: broadband amplifier, Darlington circuit, negative feedback, microwave amplifier, microwave monolithic IC.

For citation(IEEE): Ye. M. Savchenko et al. “Microwave monolithic ICs of broadband amplifiers as universal components of modern electronic equipment,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 75–97, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Многообразие видов современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) СВЧ диапазона, создает необходимость иметь широкий спектр универсальной электронной компонентной базы (ЭКБ), одной из неотъемлемых составляющих которой являются усилители сигналов малой и средней мощности. Основой универсальности для таких усилителей являются широкая полоса рабочих частот (от десятков мегагерц до десятков гигагерц), однополярное питание и малые габариты всего усилительного звена [1, 2]. К широкополосным усилителям (ШПУ) относятся усилители, ши-

рина полосы пропускания которых превышает их центральную рабочую частоту [3]. В области СВЧ диапазона частот для реализации ШПУ наибольшее распространение получили схема усилителя с распределенным усилением (УРУ) и схема широкополосного усилителя на основе составного транзистора Дарлингтона с отрицательной обратной связью (ШПУ с ООС).

Схема УРУ построена по принципу формирования эквивалентных длинных линий, в которых емкостные составляющие схемы формируются емкостями усилительных элементов, а индуктивные — катушками индуктивности или полосковыми линиями в зависимости от диапазона рабочих частот. Схема УРУ позволяет достигать верхней границы диапазона рабочих частот более 70—80 % от граничной частоты используемых транзисторов [2, 4]. К основным недостаткам УРУ можно отнести: большие размеры кристалла МИС (многозвенная структура усилителя и использование большого числа индуктивных элементов), относительно низкий коэффициент усиления (как правило, 8—12 дБ), высокий коэффициент шума в области нижних частот, двухполярное питание (для большинства схем) и требование к последовательности его подачи (при использовании нормально-открытых транзисторов).

В ШПУ с ООС на основе составного транзистора реализован принцип двухстороннего согласования и выравнивания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) коэффициента усиления посредством введения отрицательной обратной связи, которая в наиболее простом варианте реализуется включением резистора между входом и выходом усилительного каскада. Верхняя рабочая частота схемы, как правило, составляет 20—30 % от граничной частоты единичного усиления используемых транзисторов, нижняя — определяется цепями обвязки (дроссельная катушка индуктивности и разделительные конденсаторы) и может достигать 0 Гц, обеспечивая работу ШПУ на постоянном токе. Схема является компактной, простой в применении, имеет однополярное напряжение питания, что важно для универсального усилительного СВЧ компонента, так как упрощает его применение. Таким образом, ШПУ с ООС является одной из наиболее распространенных широкополосных усилительных схем, что подтверждается выпуском большой номенклатуры таких изделий зарубежными производителями СВЧ ЭКБ.

В данной работе представлен обзор эволюции СВЧ широкополосных усилителей с отрицательной обратной связью параллельно с развитием технологий СВЧ МИС, а также показаны достигнутые на данный момент мировые и отечественные результаты по их разработке.

2. Составной транзистор Дарлингтона (1953—1980 гг.)

В качестве усилительного элемента в ШПУ с ООС получил наибольшее распространение транзистор, запатентованный Сиднеем Дарлингтоном в 1953 г. как составной транзистор с высоким коэффициентом передачи тока базы (β) в схеме с общим эмиттером [5], и раскрывший свои преимущества с развитием полупроводниковых технологий (рис. 1).

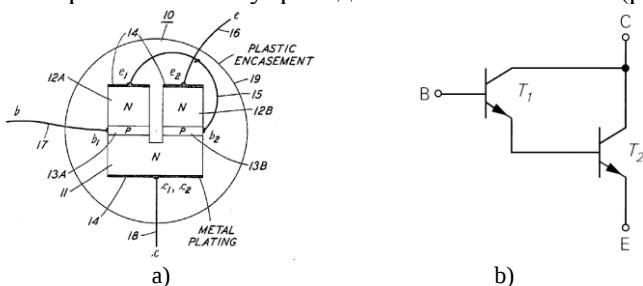


Рис. 1. Составной транзистор Дарлингтона 1953 г. (а), схема составного транзистора Дарлингтона (б).

Fig. 1. 1953 Darlington composite transistor (а), Darlington composite transistor circuit (b)

На протяжении многих лет схема использовалась как составной транзистор для общего применения. Кроме того, представляла большой интерес потенциальная область применения схемы в качестве усилителя ВЧ и СВЧ, согласованного с волновым трактом посредством выполнения условия двухстороннего согласования для источника тока, управляемого напряжением (рис. 2а). Однако введение отрицательной обратной связи (R) было затруднено из-за влияния значительного фазового сдвига в переходах база — эмиттер существовавших на то время биполярных транзисторов, который приводил к самогенерации в усилительном каскаде из-за перехода отрицательной обратной связи в положительную с увеличением частоты.

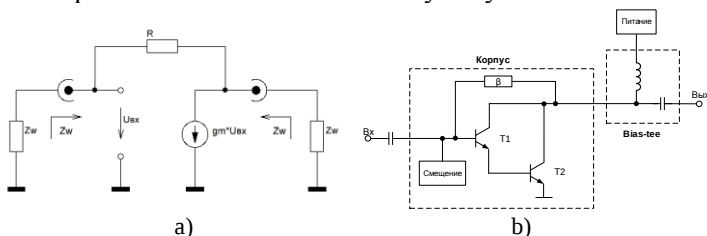


Рис. 2. Схема двухстороннего согласования источника тока управляемого напряжением (а); схема усилительного каскада Дарлингтона с реализацией двухстороннего согласования (схема с ООС) (б).

Fig. 2. Scheme of bilateral matching of a voltage-controlled current source (а); Darlington amplifier stage circuit with bi-directional matching (negative feedback circuit) (b)

Впервые сконструировать устойчивый усилитель с ООС на основе составного транзистора Дарлингтона удалось в 1980 г. (Карл Батъес, Tektronix, Inc.) вводом дополнительного транзистора в диодном включении [6] (рис. 3а). Добавление транзистора позволило снизить коэффициент усиления по току общей структуры с β^2 до 2β , обеспечивая при этом значение f_t в 1,5—2 раза больше, чем у единичного транзистора. При этом падение коэффициента усиления модифицированной структуры составляло 6 дБ на октаву, вместо 12 дБ как для составного транзистора. К преимуществам схемы также относится меньший фазовый сдвиг (в отличие от составного транзистора Дарлингтона), что позволило сделать структуру пригодной для использования с отрицательной обратной связью.

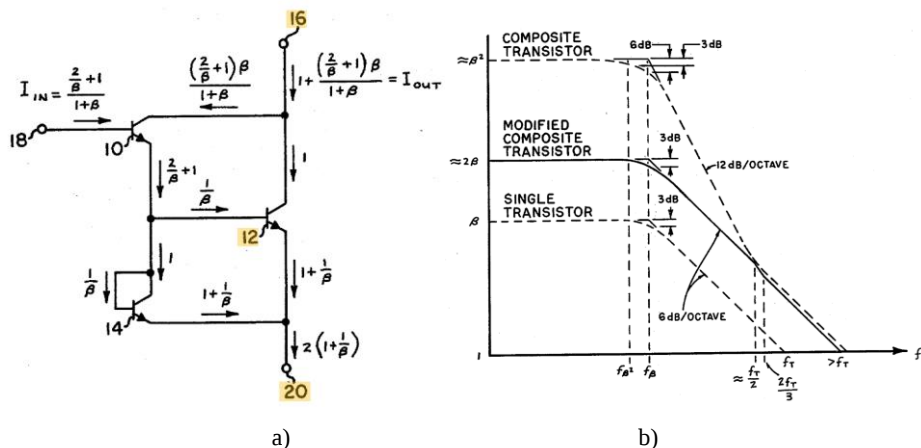


Рис. 3. Схема широкополосного усилителя с ООС, запатентованная Карлом Батъесом в 1980 г. (а) и сравнительная АЧХ (б).

Fig. 3. Circuit of a broadband amplifier with negative feedback, patented by Karl Battjes in 1980 (a) and comparative frequency response (b)

3. Обзор монолитных усилителей на основе транзисторной пары Дарлингтона на мировом рынке в 1981—1999 гг.

Началу развития компактных интегральных схем, в том числе СВЧ широкополосных усилителей, способствовала разработка стандартов сотовой связи, для которой требовалась общая миниатюризация портативных устройств, а также повышение рабочих частот.

В 1981 г. на основе Si биполярного технологического процесса с граничной частотой транзисторов $f_t = 10$ ГГц компания Avantec разработала полностью интегральный широкополосный усилитель на основе составного транзистора с отрицательной обратной связью по напряжению

MSA0736 [7] (рис. 4). Введение резистивной ООС позволило в диапазоне частот от 0 до 2,5 ГГц обеспечить коэффициент усиления по мощности 10,3—13,5 дБ, чего не удавалось достичь ранее. При этом усилитель имел размеры, близкие к размерам одиночного транзистора, за счет отсутствия в схеме реактивных элементов (конденсаторов и индуктивностей). В последующем данное решение стало базовым для большинства СВЧ МИС усилителей с ООС. Из-за простоты использования возможности каскадирования (последовательного включения нескольких ШПУ для увеличения суммарного коэффициента усиления тракта без дополнительных цепей согласования) и малых размеров, в зарубежной литературе данная функциональная схема получила название gain-block (усилительный блок).

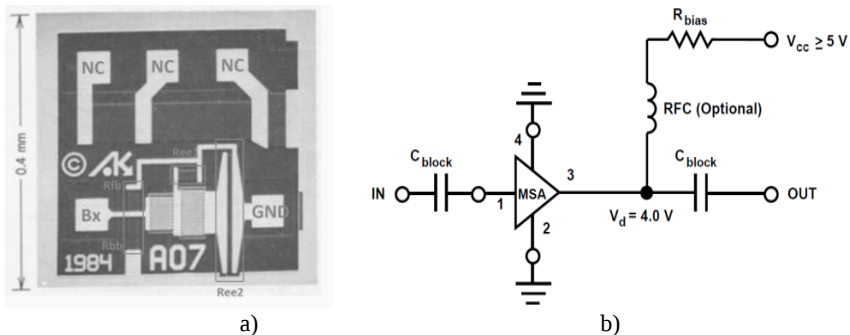


Рис. 4. Топология кристалла MSA0736 (a); схема включения при работе (b) широкополосного усилителя MSA0736 [7].

Fig. 4. The topology of the crystal MSA0736 (a); switching circuit during operation (b) of the broadband amplifier MSA0736 [7]

Вышедшие на рынок в конце 80-х гг. AlGaAs/GaAs гетеропереходные биполярные транзисторы (ГБТ) обладали большими в сравнении с Si биполярными транзисторами рабочими частотами и лучшей линейностью, что позволило значительно повысить рабочие частоты усилителей.

Технология изготовления GaAs ГБТ основана на использовании гетероэпитаксиальной структуры, где ширина запрещенной зоны эмиттера превосходит ширину запрещенной зоны базы, за счет чего возникает различие в потенциальных барьерах для электронов и дырок, вследствие чего инжекция электронов из эмиттера в базу возрастает, а поток дырок из базы в эмиттер сокращается. Это приводит к увеличению эффективности эмиттера, и как следствие, получению преимущества в создании транзистора с сильнолегированной базой. В сравнении с Si биполярными транзисторами аналогичных размеров, такие транзисторы имеют меньшее сопротивление базы, и соответственно, более высокие значения максимальной частоты

генерации (f_{max}). Тонкая эпитаксиальная база и высокая скорость носителей заряда обеспечивают малое время пролета носителей заряда через базу, что увеличивает значение граничной частоты транзистора f_t [8].

Кроме того, полуизолирующие подложки из GaAs имеют еще одно важное преимущество для усилительных схем — возможность создания сквозных отверстий и их металлизация для соединения цепи земли электрической схемы на кристалле и общего вывода корпуса, что позволяет снизить значения паразитной индуктивности в цепи общего вывода и тем самым повысить рабочие частоты.

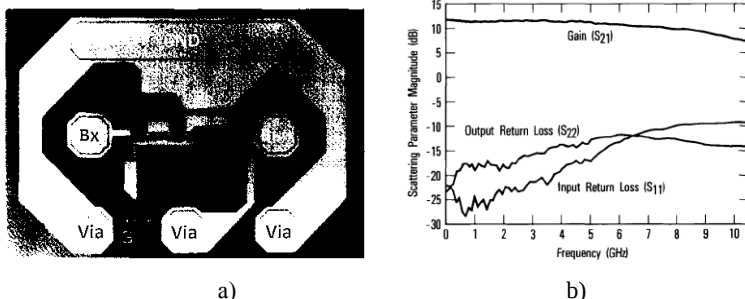


Рис. 5. Топология кристалла (а); частотные характеристики малосигнальных параметров (б) широкополосного усилителя, разработанного Кобаяши в 1989 г., TRWinc [9].

Fig. 5. Crystal topology (a); frequency characteristics of low-signal parameters (b) of a broadband amplifier developed by Kobayashi in 1989, TRWinc [9]

В 1989 г. группа ученых из TRWinc. под руководством Кевина Кобаяши, представила первый AlGaAs/GaAs ГБТ широкополосный усилитель на основе составного транзистора Дарлингтона с ООС [9]. В схеме использовались транзисторы с граничной частотой $f_t=25$ ГГц. Диапазон рабочих частот схемы составлял от 0 до 10 ГГц, коэффициент усиления от 7 до 12 дБ (рис. 5).

В начале 90-х гг. компания Stendford Microdevices выпустила линейку AlGaAs/GaAs ГБТ широкополосных усилителей с ООС с диапазонами частот до 10 ГГц: SNA-100, SNA-576, SNA-586 и др. [10, 11]. Благодаря компактной схеме ШПУ без использования реактивных элементов размеры кристаллов составляли $0,30 \times 0,33$ мм². Усилители отличались значением коэффициента усиления (от 9 до 20 дБ) за счет использования разной глубины ООС.

Наряду с AlGaAs/GaAs ГБТ, начиная с 1984 г. прорабатывались схемы широкополосных усилителей на основе GaAs полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ) [12]. Однако составной транзистор Дарлингтона на основе данной технологии распространения не получил из-за проблем с устойчивостью [13].

Наряду с AlGaAs/GaAs ГБТ для рынка гражданских мобильных устройств многие компании прорабатывали направление СВЧ МИС на SiGe ГБТ, в первую очередь из-за технологической преемственности SiGe технологии, что обуславливало больший диаметр полупроводниковых пластин и совместимость с КМОП технологией [8, 14, 15, 16]. Также к преимуществам SiGe ГБТ можно отнести меньшее значение коэффициента шума в сравнении с [15].

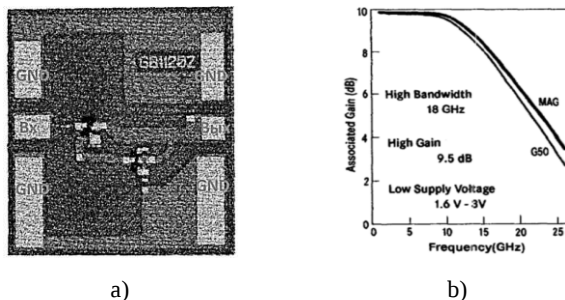


Рис. 6. Топология (а) и амплитудно-частотная характеристика (б) ИМС SiGe ГБТ ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона, разработанной компанией DB Electronics в 1995 г. [15].

Fig. 6. Topology (a) and amplitude-frequency characteristic (b) of an SiGe IC for heterojunction bipolar transistors based on a Darlington transistor pair developed by DB Electronics in 1995 [15]

На рис. 6 показаны топология и малосигнальные характеристики SiGe ГБТ ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона, разработанной компанией DB Electronics в 1995 г. на основе транзисторов с граничными частотами порядка 120 ГГц. Полоса рабочих частот по уровню снижения коэффициента усиления на 3 дБ составила 18 ГГц [15].

В промышленное производство SiGe ГБТ был внедрен компанией IBM в 1996 г., а в 1999 г. компания Sirenza Microdevices (в прошлом Stendford Microdevices) выпустила серию SiGe СВЧ МИС ШПУ: SGA-6589, SGA-3586, SGA-1263, SGA-9189, SGA-2486 и др. с диапазоном рабочих частот до 5 ГГц и коэффициентом шума от 2,5 до 4,7 дБ [17]. Усилители предназначались, прежде всего, для мобильных систем, и выпускались в универсальных малогабаритных пластмассовых корпусах SOT-86, SOT-89 и SOT-363.

4. СВЧ МИС широкополосных усилителей на мировом рынке, 2000 г. — н. в.

Начиная с конца 90-х гг. в схемах СВЧ ШПУ с ООС получили распространение ГБТ на основе гетероструктуры база — эмиттер: InGaP/GaAs, обладающие меньшим разрывом зоны проводимости и большим разрывом

валентной зоны в сравнении со структурой AlGaAs/GaAs, что позволило обеспечить выигрыш в частотных и энергетических характеристиках транзисторов [8]. Также к преимуществам InGaP/GaAs можно отнести лучшую технологичность благодаря наличию InGaP стоп-слоя и возможности изотропного травления при формировании структуры транзистора.

В 2001 г. компания Alpha Industries освоила промышленную технологию производства InGaP/GaAs структур. В 2002 г. для ШПУ с ООС на основе InGaP/GaAs ГБТ было достигнуто значение точки пересечения интермодуляционных искажений третьего порядка (OIP3) более 40 дБм на частотах до 1 ГГц и более 35 дБм на частоте 2 ГГц при напряжении питания 5 В [16], что являлось хорошим результатом, необходимым для применения в сотовых системах связи с большим числом каналов.

С середины 90-х гг. начали разрабатываться GaAs полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов в канале — НЕМТ, которые не уступали GaAs ГБТ по максимальным рабочим частотам, обеспечивая при этом несколько большие выходные мощности и КПД усилительных каскадов [15].

В 2006 г. Кевином Кобаяши был представлен ШПУ с ООС на основе GaAs нормально открытого (E-mode — Enhancement mode) псевдоморфного НЕМТ, который показал существенные преимущества перед InGaP/GaAs ГБТ в части IP3 на верхней частоте рабочего диапазона благодаря меньшей паразитной емкости затвор — сток в сравнении с диффузионной емкостью база — коллектор InGaP/GaAs ГБТ [19], что позволило повысить эффективность использования ООС на верхних частотах. Дополнительное улучшение линейности было достигнуто за счет цепи активной обратной связи на основе транзистора M3 (рис. 7), которая снижает уровень напряжения смещения первого транзистора (M1) при повышении амплитуды сигнала.

Данная схема была запатентована Кобаяши в 2005 г. как схема для динамического самосмещения ШПУ Дарлингтона на основе биполярных транзисторов. Данное решение позволило исключить из схемы включения ШПУ с ООС внешний токозадающий резистор (R_{bias}), который необходим в «классической схеме» для снижения зависимости режимного тока от напряжения питания, но ограничивающий амплитуду выходного сигнала и ухудшающий КПД усилителя. Кроме того, схема позволяет повысить стабильность режимного тока усилителя при изменении температуры кристалла [20]. Данное решение использовалось в серии ШПУ Sirenza Microdevices на основе InGaP/GaAs ГБТ (SBB серия с активным смещением) с диапазоном рабочих частот до 6 ГГц: SBB-5089, SBB-4089 и др.

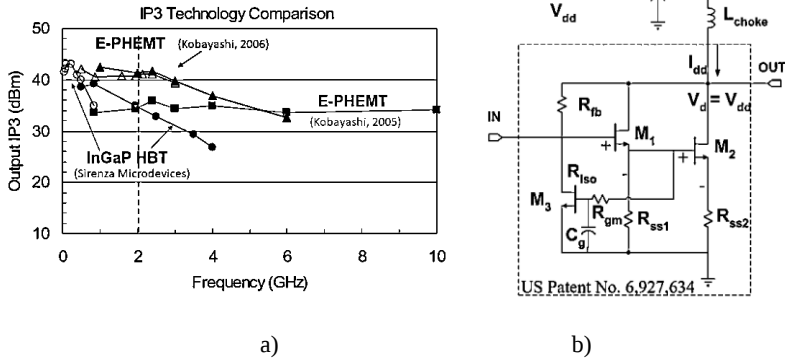


Рис. 7. Сравнительные характеристики OIP3 InGaP ГБТ (HBT) ШПУ и E-mode псевдоморфного HEMT ШПУ (a); схема E-mode HEMT ШПУ (b) [19].

Fig. 7. Comparative characteristics of OIP3 InGaP HBT and E-mode pseudomorphic HEMT (a); E-mode HEMT circuit (b) [19]

Еще одно решение по стабилизации рабочей точки транзисторов при изменении температуры и напряжения питания в усилительном каскаде с высокочастотным дросселем предложил Дуглас М. Джонсон, запатентовав в 2005 г. схему с токозадающим токовым зеркалом для усилительного транзистора (рис. 8a) [21]. В данной схеме опорный ток I_{CM} пропорционален току потребления I_{RF} , а напряжение смещения первого транзистора, в свою очередь, пропорционально опорному току I_{CM} . На рис. 8b и показана схема с температурной стабилизацией, достигаемой за счет обратной связи, реагирующей на изменения напряжения на коллекторе транзистора 210 через цепочку транзисторов: 285, 290, 230.

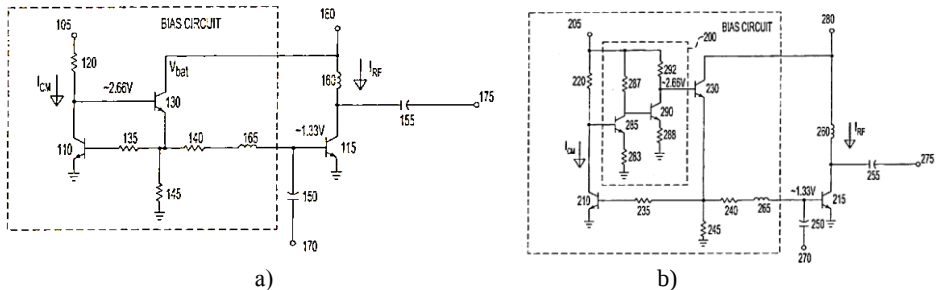


Рис. 8. Принципиальные схемы стабилизированных усилительных каскадов, предложенные Дугласом М. Джонсоном [21].

Fig. 8. Schematic diagrams of stabilized amplification cascades proposed by Douglas M. Johnson [21]

К основным преимуществам данной схемы относятся стабильность тока потребления при изменении температур и напряжений питания, возможность исключения токозадающего резистора в цепи питания, что повышает выходную мощность и увеличивает КПД усилителя.

Еще одним направлением модификации схемы ШПУ на основе составного транзистора с ООС стали активные частотно зависимые цепи коррекции. В 2005 г. была запатентована схема на основе биполярных транзисторов, позволяющая скомпенсировать фазовый сдвиг переходов база-эмиттер составного транзистора за счет частотно-зависимой цепи смещения каскодного транзистора Q22 (рис. 9) [22].

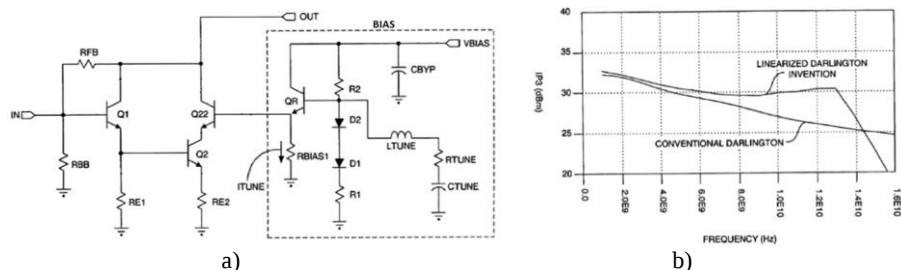


Рис. 9. Принципиальная схема (а) линейаризованного ШПУ Дарлингтона, запатентованная Кевином Кобаяши в 2005 г. и частотная зависимость ОИРЗ в сравнении с «классической» схемой (б) [22].

Fig. 9. Schematic diagram (a) of a linearized Darlington HBT, patented by Kevin Kobayashi in 2005 and the frequency dependence of OIP3 in comparison with the “classical” circuit (b) [22]

Данное решение позволяет расширить диапазон рабочих частот на 25—30 % по уровню интермодуляционных искажений в сравнении с классической схемой. Особенностью настройки цепи коррекции является подбор номинала индуктивности L_{tune} , которая регулирует величину фазового сдвига в зависимости от частоты. Подбор индуктивности осуществлялся таким образом, чтобы обеспечить устойчивость усилителя в области высоких частот.

Основным недостатком использования схемы [22] является снижение максимальной выходной мощности за счет падения напряжения на переходе коллектор — эмиттер каскодного транзистора. Таким образом, данное решение в большей степени применимо к ШПУ малой и средней мощности (до 100 мВт).

С начала 2000-х гг., начали появляться публикации по разработкам ИМС СВЧ ШПУ на основе GaN HEMT, которые в усилительных каскадах сопоставимы с GaAs ГБТ и HEMT по максимальным рабочим частотам, при этом обеспечивают большие выходные мощности и КПД за счет вы-

сокого напряжения пробыа транзисторов и лучшей теплопроводности подложки (для SiC подложек).

В статье Картикьяна Кришнамурти 2000 г. показываются две ИМС СВЧ ШПУ на основе схемы « f_t -doubler» (рис. 10, а) с использованием GaAs MESFET и GaN/AlGaN HEMT техпроцессов. Схема позволяет получить полосу рабочих частот до 33 % от f_t за счет частотно-зависимой цепи смещения второго транзистора пары Дарлингтона, позволяющей увеличить верхнюю границу положительных значений коэффициента передачи тока в режиме короткого замыкания (h_{21}) до частоты, равной $2f_t$ [13]. Полученный в статье образец на основе GaN HEMT имеет значительно более высокую выходную мощность в сравнении с образцом на основе GaAs MESFET (2 Вт и 350 мВт на частоте 1 ГГц соответственно), при этом полосы рабочих частот и значения КПД обоих усилителей близки. Зависимости энергетических характеристик ИМС GaN HEMT ШПУ показаны на рис. 10, б.

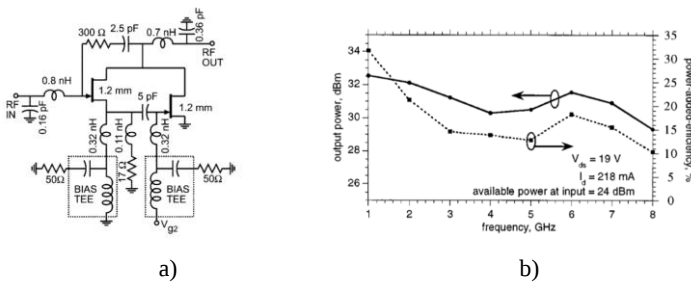


Рис. 10. Схема (а) и основные энергетические характеристики (б) усилительного каскада GaN HEMT, реализованного по схеме « f_t -doubler» [13].

Fig. 10. Scheme (a) and main energy characteristics (b) of the GaN HEMT amplifier stage, implemented according to the “ f_t -doubler” scheme [13]

В 2007 г. Кевин Кобаяши публикует статью, в которой представлен ШПУ на основе технологии GaN/SiC HEMT с длиной затвора 0,2 мкм, в котором была достигнута мощность более 1 Вт при КПД до 21 % и OIP3 41—44 дБм на частотах до 4 ГГц, при этом ШПУ имеет полосу рабочих частот на малом сигнале 18 ГГц [23]. В статье рассматривается два варианта ШПУ: на основе классической схемы транзисторной пары Дарлингтона с ООС, а также с дополнительным транзистором в каскодном включении (рис. 11, а). ШПУ с каскодным транзистором позволяет увеличить коэффициент усиления (на 3—5 дБ) — рис. 11, с, а также улучшить значение OIP3 на 2 дБ в диапазоне до 3 ГГц — рис. 11, d. Выходная мощность обоих образцов сопоставима (30—31 дБм в диапазоне до 4 ГГц при уровне компрессии коэффициента усиления на 1 дБ). К недостаткам ШПУ с каскод-

ным транзистором можно отнести большую неравномерность K_y (на 5—6 дБ в диапазоне до 18 ГГц) и худшее согласование по входу усилителя.

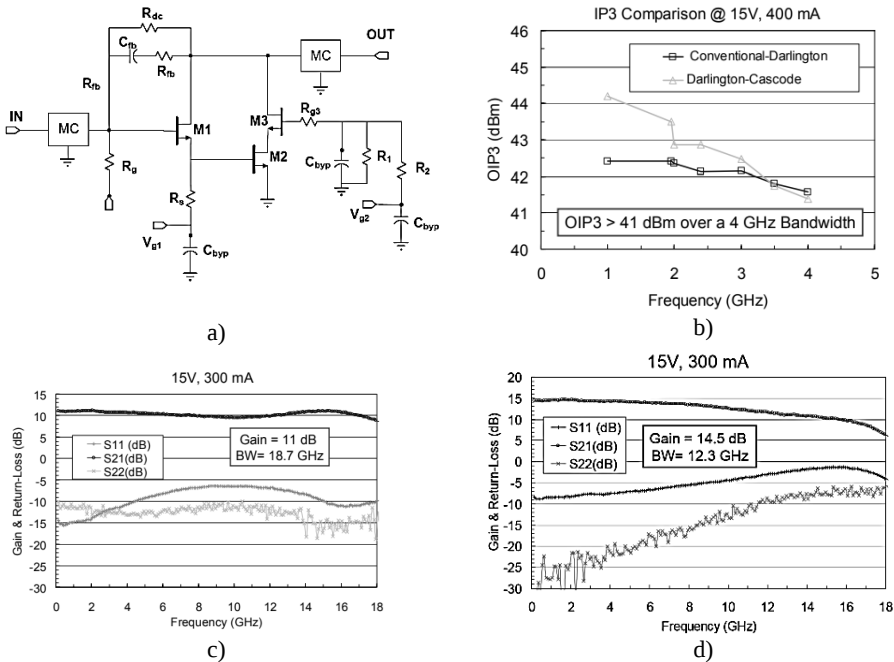


Рис. 11. Схема ШПУ с каскодным транзистором (а), сравнение интермодуляционных искажений (б), характеристики на малом сигнале ШПУ с ООС (с) и ШПУ с ООС и каскодным транзистором (д), опубликованных Кевинном Кобаяши в 2007 г. [23].

Fig. 11. Scheme of HBT with cascode transistor (a), comparison of intermodulation distortions (b), characteristics of a small signal HBT with OOS (s) and HBT with OOS and cascode transistor (d) published by Kevin Kobayashi in 2007 [23]

В том же 2007 г. Кобаяши публикует еще одну работу, в которой представлен GaN/SiC НЕМТ ШПУ с ООС на основе одного каскада с общим истоком (рис. 12), согласованного методом дегенеративной индуктивности в цепи истока на минимальное значение $K_{ш} < 1$ дБ в диапазоне 1—8 ГГц [24], что достигается за счет малой длины затвора (0,2 мкм) в сочетании с высокой подвижностью электронов в канале. Смещение нормально открытых транзисторов задается отрицательным внешним напряжением. В импульсном режиме работы выходная мощность данного усилителя достигает 2,5 Вт.

В 2012 г. Шанвен Ху и др. (Нанкийский университет, Китай) публикуют схему ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона с ООС и

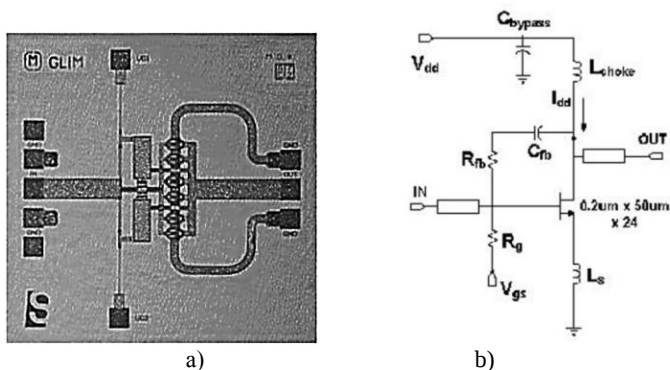


Рис. 12. Топология (а) и принципиальная схема (б) 2,5 Вт GaN/SiC HEMT ШПУ, опубликованного Кевином Кобаяши в 2007 г. [24].

Fig. 12. Topology (a) and circuit diagram (b) of 2.5 W GaN/SiC HEMT NBT, published by Kevin Kobayashi in 2007 [24]

каскадным транзистором с дополнительной линеаризацией и предискажениями [31], что позволило выровнять выходную мощность и повысить значение OIP3 на верхних частотах (рис. 13, б). ШПУ реализован с использованием InGaP/GaAs ГБТ технологии. Линеаризация входного каскада усилителя (транзистор Q1 с общим эмиттером) происходит за счет использования RC элементов в цепи ООС, предискажения вводятся в выходном каскаде с каскадным транзистором Q3 (рис. 13, а) путем оптимизации номиналов RLC компонентов в базе транзистора.

В 2012 г. Кевином Кобаяши был опубликован ШПУ с рекордными значениями OIP3 (более 51 дБм) на основе GaN/SiC HEMT [25]. Усилитель имеет каскадную схему (рис. 14). К преимуществам усилителя также относится крайне низкий коэффициент шума: согласно приведенным данным, при высоких значениях сопротивления резистора цепи обратной связи (>3 кОм) данный усилитель имеет $K_{ш} < 1$ дБ в полосе частот до 4 ГГц. При применении цепи обратной связи с резистором 500 Ом, позволяющей получить неравномерность K_y в полосе 1—4 ГГц менее 1 дБ, $K_{ш} = 1$ —1,6 дБ.

К одним из последних публикаций по ШПУ с ООС на основе транзисторной пары Дарлингтона можно отнести публикации 2013 года [26], 2016 года [27] и 2017 года [28].

В [26] рассматривается дифференциальный ШПУ на основе 0,18 мкм Si КМОП техпроцесса. В качестве симметрирующих устройств для деления и суммирования мощности используется трансформатор Гуанелла, реализованный на полосковых линиях. ШПУ состоит из двух последовательных дифференциальных усилительных каскадов: первый кас-

кад реализован на основе каскодной схемы, второй — на основе транзисторной пары Дарлингтона с каскодным транзистором (рис. 15).

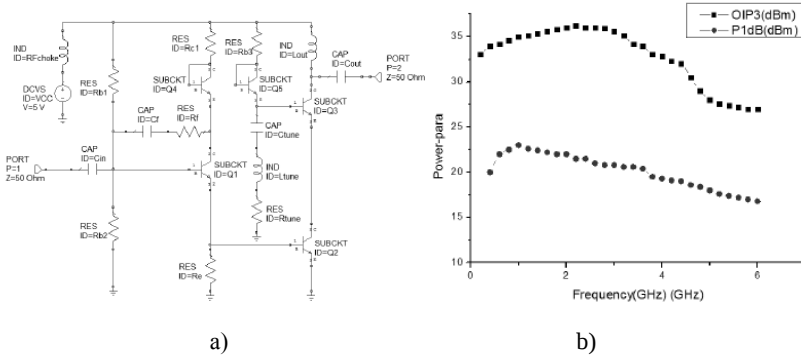


Рис. 13. Схема (а) и результаты частотная зависимость выходной Рвых и OIP3 (b) для InGaP/GaAs ГБТ ШПУ [31].

Fig. 13. Scheme (a) and results, the frequency dependence of the output Pout and OIP3 (b) f or InGaP / GaAs GBT HBT [31]

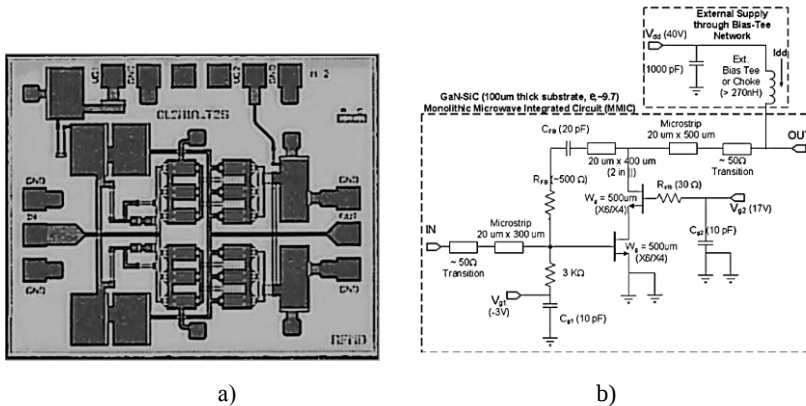


Рис. 14. Топология (а) и принципиальная схема (b) 8 Вт GaN/SiC НЕМТ ШПУ, опубликованного Кевином Кобаяши в 2012 г. [25].

Fig. 14. Topology (a) and schematic diagram (b) of an 8 W GaN/SiC HEMT NPTU published by Kevin Kobayashi in 2012 [25]

Авторам [26] удалось достичь полосы рабочих частот от 15 до 33 ГГц, выходной мощности 50—100 мВт при напряжении питания 3,6 В и токе потребления 196 мА и усиления более 10 дБ. Ключевым является возможность использования схемы в стандартном технологическом процессе для разработок систем на кристалле (СнК) Ku-, K-, Ka-диапазонов частот.

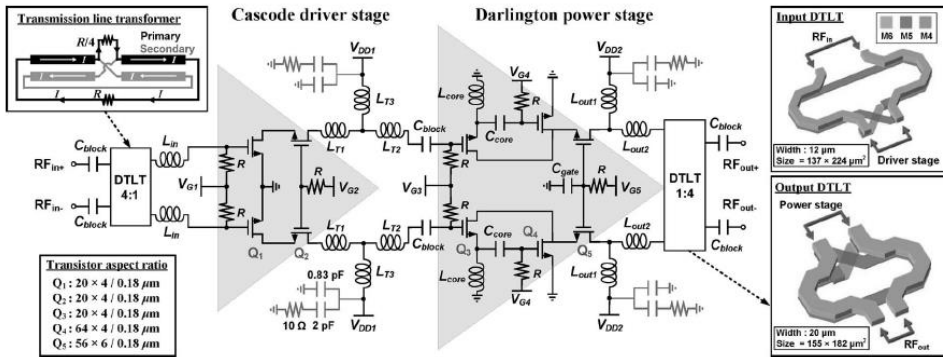


Рис. 15. Схема Si КМОП усилителя с выходным каскадом на основе транзисторной пары Дарлингтона и каскодным транзистором [26].

Fig. 15. Si circuit of a CMOS amplifier with an output stage based on a Darlington transistor pair and a cascode transistor [26]

В [27] приводятся результаты разработки китайскими учеными ШПУ до 6 ГГц на основе GaN/SiC HEMT с проектной нормой 0,5 мкм. Интерес представляет использование дополнительной ООС в выходном каскаде составного транзистора, а также катушек индуктивности по входам обоих транзисторов (рис. 16). Индуктивность $L1$ необходима для улучшения согласования по входу, индуктивность $L2$ вместе с конденсатором $C3$ образует резонанс для минимизации влияния паразитных емкостей транзисторов $M1$ и $M3$. Авторам удалось достичь уровня выходной мощности более 1 Вт на частоте 4,8 ГГц при усилении более 10 дБ.

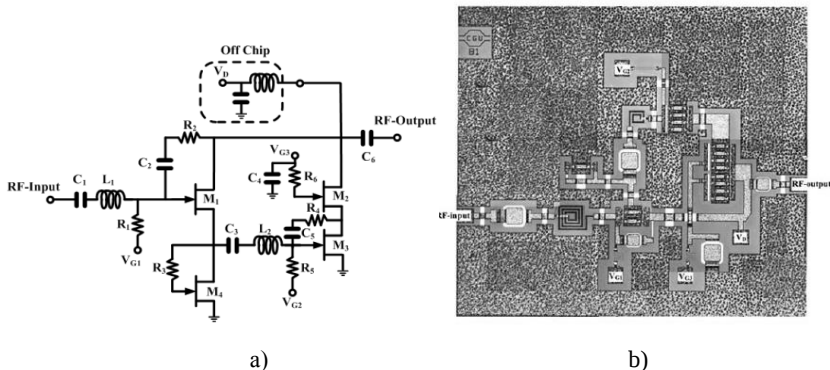


Рис. 16. Схема (а) и фотография кристалла (б) GaN HEMT HBT на основе транзисторной пары Дарлингтона [27].

Fig. 16. Scheme (a) and photo of a crystal (b) GaN HEMT HBT based on Darlington transistor pair [27]

В [28] приводятся данные о разработке усилителя для высокоскоростной системы передачи данных с использованием 0,18 мкм SiGe БиКМОП техпроцесса. В качестве входного буфера усилителя используется ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона с каскодным транзистором для обеспечения широкой полосы частот (до 27 ГГц по уровню падения Ку на 3 дБ).

В целом можно наблюдать тенденцию сокращения публикаций по отдельным схемам СВЧ ШПУ на основе составного транзистора и использования данного решения при разработке сложнофункциональных схем на основе Si и SiGe технологий.

5. Советские и российские разработки, 1988 г. — н. в.

Первые в СССР СВЧ МИС ШПУ М42177 были разработаны в 1988 г. Новосибирским электровакуумным заводом на основе Si БТ. Они имели $\Delta f = 0\text{—}500$ МГц, $P_{\text{вых}} > 10$ мВт, $K_{\text{ш}} < 10$ дБ, $\Delta K_y < 6$ дБ.

Еще одним образцом СВЧ МИС ШПУ, разработанным в СССР, был А1163, выпущенный на предприятии «Государственный завод “Пульсар”» в 1993 г. на основе Si БТ. Усилитель был разработан на основе составного транзистора Дарлингтона с резистивной ООС и выпускался в металлокерамическом корпусе КТ-22, аналогичном по присоединительным размерам пластмассовым корпусам СВЧ МИС ШПУ, таких как MSA0736. Усилитель имел следующие характеристики: $\Delta f = 0\text{—}1$ ГГц, $P_{\text{вых}} > 5$ мВт, $K_{\text{ш}} < 4$ дБ, $\Delta K_y = 11\text{—}20$ дБ.

В период с 1993 по 2011 гг. российскими предприятиями: НПФ «Микран», ФГУП «НПП “Исток”», ФГУП «ННИПИ “Кварц”», ФГУП «ЦНИТ-РИ им. академика А. И. Берга», «ВНИИРА-Навигатор», ФГУП «НИИПП» был разработан достаточно широкий ряд различных широкополосных СВЧ усилителей в модульных исполнениях, основным назначением которых является усиление широкополосных сигналов в кабельных линиях различной аппаратуры связи и радиолокации. Однако классических схем ШПУ на основе составного транзистора Дарлингтона в микросхемном корпусе для поверхностного монтажа в этот период не выпускалось.

Первыми с 1993 года СВЧ МИС ШПУ для поверхностного монтажа в аппаратуру стали усилители серии 1324, разработанные в АО «НПП “Пульсар”».

В период с 2007 по 2011 гг. были разработаны и серийно выпущены СВЧ МИС ШПУ 1324УВ1, 1324УВ2, 1324УВ3 на основе Si БТ с граничной частотой более 15 ГГц. Усилители были разработаны на основе составного транзистора Дарлингтона с ООС и выпускаются в 8-выводном металлокера-

мическом корпусе для поверхностного монтажа 5140.8-АНЗ, размером 5×5 мм². Усилители отличаются уровнем выходной мощности: до 120 мВт (1324УВ1, 1324УВ2 и 1324УВ6) и до 10 мВт (1324УВ3), а также коэффициентом усиления: 20 дБ (1324УВ2 и 1324УВ3) и 15 дБ (1324УВ1) [2, 29] (рис. 17). Для соответствия по габаритно-присоединительным размерам зарубежным аналогам была выпущена модификация ШПУ 1324УВ6У1 в пластмассовом корпусе КТ-47, являющегося аналогом широко распространенного корпуса SOT-89 размером $4,5 \times 4,1$ мм².

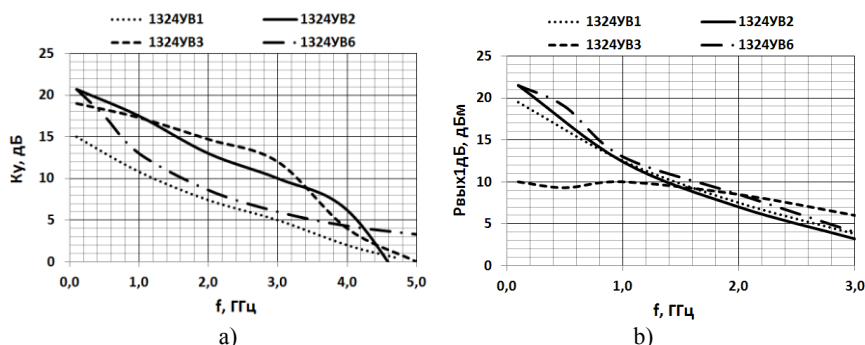


Рис. 17. Зависимости коэффициента усиления (а) и выходной мощности при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ (б) от частоты Si БТ СВЧ МИС ШПУ 1324УВ1-3 и 1324УВ6 [2].

Fig. 17. Dependences of the gain (a) and the output power during compression of the gain by 1 dB (b) on the frequency Si of BT BT-UHF MIS HBT 1324UV1-3 and 1324UV6 [2]

В период 2012—2014 гг. в АО «НПП “Пульсар”» были разработаны и выпущены СВЧ МИС ШПУ с расширенным частотным диапазоном (до 6 ГГц) на основе InGaP/GaAs ГБТ (1324УВ7, 1324УВ8, 1324УВ9) в металлокерамических (5140.8-АНЗ) и пластмассовых (КТ-47) корпусах [29]. При разработке была значительно усовершенствована методика оптимизации схемы ШПУ для достижения равномерных динамических характеристик в полосе рабочих частот [30]. Была реализована частотная зависимость цепи ООС за счет применения индуктивности $L1$ для коррекции АЧХ, а также в корректирующая полосковая индуктивность $L2$ в цепи эмиттера транзистора Т1 для коррекции входного импеданса по критерию оптимального шумового коэффициента отражения от входа (рис. 18). Для температурной коррекции тока потребления ШПУ 1324УВ9 используются транзисторы Т3 и Т4 в диодном включении (рис. 18, б), что позволяет минимизировать разброс тока в диапазоне температур $-60^\circ\text{C} \dots +125^\circ\text{C}$ до 5 %. Усилители отличаются выходной мощностью: 1324УВ7 до 25 мВт, 1324УВ8 до 60 мВт, 1324УВ9 до 120 мВт (рис. 19, б).

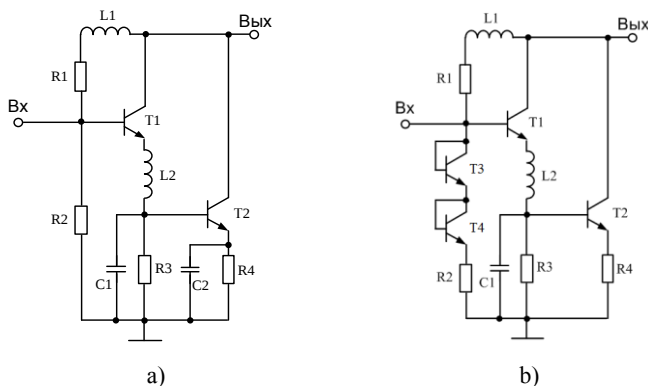


Рис. 18. Принципиальные схемы GaAs ГБТ СВЧ ШПУ 1324УВ7, 1324УВ8 (а), 1324УВ9 (б).

Fig. 18. Schematic diagrams of GaAs HBT microwave broadband amplifier 1324UV7, 1324UV8 (a), 1324UV9 (b)

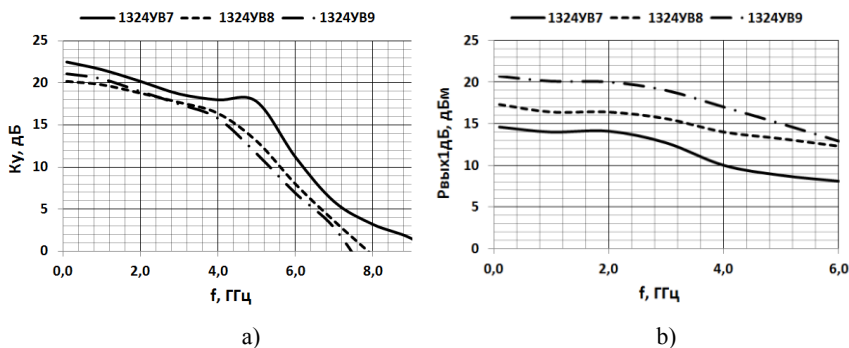


Рис. 19. Зависимости коэффициента усиления (а) и выходной мощности при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ (б) от частоты GaAs ГБТ СВЧ МИС ШПУ 1324УВ7-9.

Fig. 19. Dependences of the gain (a) and the output power during compression of the gain by 1 dB (b) on the frequency of GaAs GBT SHF MIS broadband amplifier 1324UV7-9

Дополнительно к данному комплекту InGaP/GaAs ГБТ СВЧ ШПУ для применения в системах с напряжением питания 3,3 В был выпущен усилитель 1324УВ15, аналогичный по динамическим характеристикам и принципиальной схеме усилителю 1324УВ7 и оптимизированный для использования при пониженном напряжении питания.

В период 2014—2017 гг. в АО «НПП «Пульсар»» были разработаны и выпущены СВЧ МИС ШПУ с применением GaAs рНЕМТ технологии. Усилители были разработаны на основе составного транзистора Дарлингтона с ООС в диапазоне частот до 9,5 ГГц и выходной мощностью до 320 мВт (1324УВ11, 1324УВ12, 1324УВ13), в металлокерамических (5140.8-АН3) и

пластмассовых (КТ-47) корпусах. В схемах реализована частотно-зависимая ООС на основе полосковых индуктивностей $L1$, $L2$, позволяющая получить существенную равномерность АЧХ во всем диапазоне рабочих частот (рис. 20). Усилители отличаются уровнем выходной мощности и диапазоном рабочих частот: 1324УВ13 до 15 мВт в диапазоне до 9,5 ГГц, 1324УВ12 до 100 мВт в диапазоне до 7,5 ГГц, 1324УВ11 до 320 мВт в диапазоне до 5,5 ГГц), рис. 21.

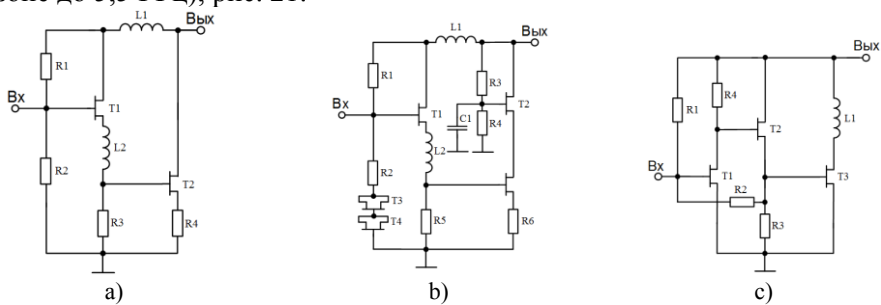


Рис. 20. Принципиальные схемы GaAs HEMT СВЧ ШПУ 1324УВ11 (а), 1324УВ12 (б), 1324УВ13 (с).

Fig. 20. Schematic diagrams of GaAs HEMT microwave HBT 1324UV11 (a), 1324UV12 (b), 1324UV13 (c)

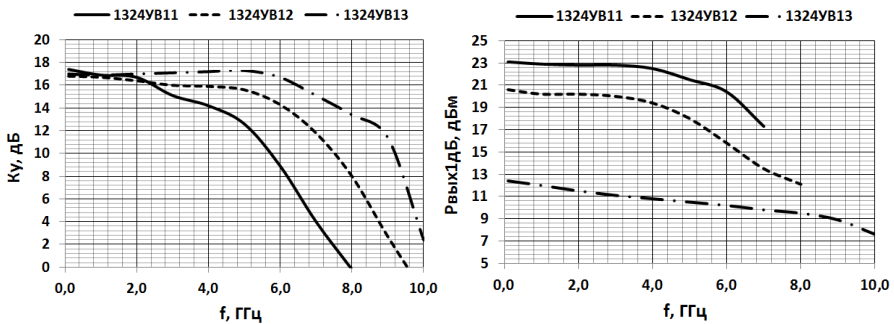


Рис. 21. Зависимости коэффициента усиления (а) и выходной мощности при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ (б) от частоты GaAs pHEMT СВЧ МИС ШПУ 1324УВ11-13.

Fig. 21. Dependences of the gain (a) and the output power during compression of the gain by 1 dB (b) on the frequency of GaAs pHEMT SHIS MIS broadband amplifier 1324UV11-13

С 2017 г. по настоящее время АО «НПП «Пульсар»» ведет разработки новых комплектов СВЧ МИС ШПУ на основе GaAs ГБТ и pHEMT технологий. Разрабатываются комплекты расширенной номенклатуры, нормированные на различные уровни коэффициента усиления (от 9 до 25 дБ),

различной линейной выходной мощности (от 8 до 130 мВт) и отличающиеся равномерными частотными характеристиками (неравномерность АЧХ не более 2,5—3,5 дБ, в диапазонах частот от 10 МГц до 8 ГГц). Также разрабатывается дифференциальный ШПУ на основе транзисторной пары Дарлингтона до 2,5 ГГц для применения в качестве драйвера аналого-цифровых преобразователей.

Разработаны и готовятся к серийному производству СВЧ МИС ШПУ с выходной мощностью до 560 мВт и рабочими частотами до 3,5 ГГц на основе GaAs ГБТ в металлокерамических корпусах для поверхностного монтажа, аналогах зарубежного корпуса QFN12 размером 3×3 мм². Ведется разработка СВЧ МИС ШПУ на основе GaAs pHEMT с повышенной стабильностью тока потребления и динамических параметров в пределах разброса напряжений питания 4,5—5,5 В. Разработаны и готовятся к серийному производству двухканальные СВЧ МИС ШПУ, предназначенные для работы в схеме с симметрирующими трансформаторами для достижения высокой линейности.

7. Заключение

При кажущейся простоте схемотехнического решения ШПУ с ООС на основе транзисторной пары Дарлингтона за прошедшие 30 лет было опубликовано значительное количество статей на тему разработок разнообразных видов микросхем данного типа при постоянно совершенствующихся полупроводниковых технологиях.

На сегодняшний день широкополосные усилители на основе составного транзистора Дарлингтона с ООС являются универсальными усилительными элементами для многих видов радиоэлектронной аппаратуры с частотами от нуля до десятков гигагерц. Серийные образцы изделий выпускаются на основе SiGe ГБТ, InGaP/GaAs ГБТ и GaAs pHEMT технологий, отличающихся диапазоном рабочих частот, выходной мощностью, коэффициентом шума и уровнем интермодуляционных искажений. Технология GaN HEMT позволяет получить большие уровни мощности широкополосных усилителей с ООС (более 1 Вт) вплоть до X-диапазона частот, что делает усилители на ее основе бесспорным лидером в части энергетических характеристик. Однако, несмотря на обилие публикаций, серийно-выпускаемых схем ШПУ на основе GaN крайне мало. СВЧ МИС ШПУ на основе GaAs и SiGe до сих пор преобладают на мировом рынке, ввиду их более низкой стоимости, простоте применения и возможности использования в низковольтной аппаратуре.

Список литературы

1. Каленкович Н. И., Боровиков С. М., Ткачук А. М., Образцов Н. С. Радиозлектронная аппаратура и основы ее конструирования. Минск : БГУИР, 2008. 200 с.
2. Савченко Е. М., Першин А. Д., Будяков А. С., Фондеркин К. И. Результаты разработки СВЧ МИС усилителей малой и средней мощности // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА Материалы XII Научно-технической конференции. Москва. 2013. С. 78—81.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II . М. : ДМК Пресс, 2007. 728 с.
4. Шмаков Н. Д., Иванюшкин Р. Ю. Исследование усилителя мощности бегущей волны на полевых транзисторах // Материалы международной научно-технической конференции INTERMATIC-2016. М. : МИРЭА, 2016. С.
5. S. Darlington (Bell Labs), US Pat. No. 2,663,806, “Semiconductor signal translating device,” Dec. 1953.
6. Carl Battjes (Tektronics), US Pat. No. 4,236,119, “Monolithic Wideband Amplifier,” Nov. 1980.
7. MSA-0735, 0736, Cascadable Silicon Bipolar MMIC Amplifiers, Technical Data.
8. Шахнович И. Твердотельные СВЧ приборы и технологии. Невоспетые герои беспроводной революции // ЭЛЕКТРОНИКА : Наука, Технология, Бизнес, 2005, № 4.
9. Kobayashi K. W. et. al. GaAs Heterojunction Bipolar Transistor MMIC DC to 10 GHz Direct-Coupled Feedback Amplifier // IEEE GaAs IC Symposium. San Diego. CA. C. 87—90.
10. StandfordMicrodevices, SNA-586, datasheet.
11. StandfordMicrodevices, SNA-100, datasheet.
12. Beyer J. B., Prasad S. N., Bechker R. C., Nordman J. E., and Hohenwarter G. K. MESFET distributed amplifier design guidelines // IEEE Trans. Microwace Theory Tech. 1984. T. MTT-32, №. 3. C. 268—275.
13. Karthikeyan Krishnamurthy et. al. Broadband GaAs MESFET and GaN HEMT Resistive Feedback Power Amplifiers // IEEE JSSC. 2000. T. 35, № 9.
14. Kukiella J. F. and Snapp C. P. Wideband Monolithic Cascadable Feedback Amplifiers Using Silicon Bipolar Technology. IEEE press. 1985. C. 330—331.
15. Konig U., Gruhle A., Schuppen A. SiGe Devices and Circuits : Where are Advantages over III/V // GaAs IC Symposium IEEE Gallium Arsenide Integrated Circuit Symposium 17th Annual Technical Digest 1995, San Diego, CA, USA. 1995. C. 14—17.
16. Schuppen A., Dietrich H., Gerlach S., Qhnnemann H., Arndt J., Seiler U., Gotzfried R., Erben U., Schumacher H. SiGe-Technology for Mobile Communication Sitemes // Proceedings of the 1996 BIPOLAR/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (1996). C. 130—133.
17. SGA-6589 SGA-6589Z, DC-3500 MHz, Cascadable SiGe HBT MMIC Amplifier. Datasheet.
18. Ming-Chou Chiang, Shey-Shi Lu, Chin-Chun Meng, Shih-An Yu, Shih-Cheng Yang, and Yi-Jen Chan, Analysis, Design, and Optimization of InGaP–GaAs HBT Matched-Impedance Wide-Band Amplifiers With Multiple Feedback Loops // IEEE Journal of Solid-state Circuits. 2002. T. 37. C 694—701.
19. Kevin W. Kobayashi, High Linearity-Wideband PHEMT Darlington Amplifier with +40 dBm IP3 // Proceedings of Asian-Pacific Microwave Conference. 2006 Asia-Pacific Microwave Conference. C. 1035—1038.
20. Kobayashi K. W., US Pat. No. 6,972,630 B2, “Self-biased darlington amplifier”. Dec. 6, 2005.

21. Douglas M. Johnson, Henry Z. Liwinski, US Pat. No. 6,842,075 B2. Jan. 11, 2005.
22. Kobayashi K. W., US Pat. No. 6,933,787 B1, "Linearized darlington amplifier". Aug. 23, 2005.
23. Kevin W. Kobayashi, et. al. 1-Watt Conventional and Cascoded GaN-SiC Darlington MMIC Amplifiers to 18 GHz // IEEE RFIC Symp. Honolulu, Hawaii. 2007. C. 585—588.
24. Kobayashi, K. et al. "A 2 Watt, Sub-dB Noise Figure GaN MMIC LNA-PA Amplifier with Multi-octave Bandwidth from 0.2—8 GHz." 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, 2007. C 619—622.
25. Kobayashi K. W. An 8-W 250-MHz to 3-GHz Decade-Bandwidth Low-Noise GaN MMIC Feedback Amplifier With > +51-dBm OIP3 // IEEE Journal of Solid State Circuits. 2012. T. 47, № 10. C. 2316—2326.
26. Chin-Wei Kuo, Hwann-Kaeo Chiou, An 18 to 33 GHz Fully-Integrated Darlington Power Amplifier With Guanella-Type Transmission-Line Transformers in 0.18μm CMOS Technology // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2013. T. 23, № 12. C. 668—670.
27. Chou, Min-Li et al. A broadband Darlington power amplifier using 0.5 μm GaN-on-SiC HEMT process. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference. 2016. C. 1947—1948.
28. Lin, Yu-An et al. A 27-GHz 45-dB SFDR track-and-hold amplifier using modified darlington amplifier and cascoded SEF in 0.18-μm SiGe process // 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2017. C. 137—140.
29. Савченко Е. М., Будяков А. С., Першин А. Д., Дроздов Д. Г., Кузьмин А. Ю., Сиомко В. О. Новые разработки отечественных СВЧ МИС широкополосных усилителей // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции. М. : 2015. С. 183—187.
30. Савченко Е. М., Кузьмин А. Ю. Широкополосные сверхвысокочастотные усилители на основе биполярных и гетеробиполярных транзисторов // Материалы международной научно-технической конференции INTERMATIC-2018. М. : МИРЭА. 2018.
31. Shanwen Hu, Zhong Wang, Huai Gao, Li G. P. A Novel Darlington Cascode Broadband Drive Power Amplifier in 2μm InGaP/GaAs HBT Technology, WAMICON 2012 IEEE Wireless & Microwave Technology Conference, USA. 2012. C. 1—6.

Информация об авторах

Савченко Евгений Матвеевич, к. т. н., заместитель заведующего базовой кафедрой, доцент кафедры РТУ МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация.

Першин Александр Дмитриевич, ведущий инженер научного отделения № 8, АО «НПП «Пульсар», г. Москва, Российская Федерация.

Кузьмин Алексей Юрьевич, заместитель начальника конструкторско-технологической группы АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва, Российская Федерация.

Information about the authors

Evgenii M. Savchenko, Ph. D. in technology, leading researcher and deputy head of the department, associate professor Russian Technological University MIREA, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0001-5843-4782.

Alexander D. Pershin, leading engineer "Pulsar" research and production enterprise, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0001-7985-0101.

Alexey Y. Kuzmin, engineer of the "Pulsar" research and production enterprise, Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0001-8226-3346.

УДК 621.37-621.39(091)

На пути к вакуумному диоду

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, д. 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 21 мая 2020 г.

Отрецензировано: 30 мая 2020 г.

Принято к публикации: 11 июня 2020 г.

Аннотация: *Исследована история открытия явления термоэлектронной эмиссии. Рассмотрены работы Шарля Дюфе, Фредерика Гатри и других ученых. Основное внимание уделено открытию эффекта термоэлектронной эмиссии Т. Эдисоном и изобретению им двухэлектродной вакуумной лампы. Проанализированы работы ученых по исследованию эффекта Эдисона, в частности, У. При-са, Дж. А. Флеминга, Ю. Эльстера и Г. Гейтеля, а также Дж. Хауэлла. Показа-но, что благодаря открытию Эдисона была создана двухэлектродная лампа, ко-торая явилась прообразом вакуумного диода Дж. А. Флеминга.*

Ключевые слова: *Шарль Дюфе, Фредерик Гатри, эффект Эдисона, двухэлек-тродная лампа Эдисона, Дж. А. Флеминг, вакуумный диод.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. На пути к вакуумному диоду // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 98—134.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. На пути к вакуумному диоду // В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные техно-логии*. — 2020. — Т. 3, № 1. — С. 98—134.

On the way to the vacuum diode

V. M. Pestrikov

*St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda Str., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru*

Received: May 21, 2020

Peer-reviewed: May 30, 2020

Accepted: June 11, 2020

Abstract: *The history of the discovery of the phenomenon of thermionic emission is in-vestigated. The works of Charles du Fay, Frederick Guthrie and other scientists are*

considered. The main attention is paid to the effect of thermionic emission by T. Edison and his invention of a two-electrode vacuum lamp. The work of scientists on the study of the Edison effect, in particular, W. Preece, J. A. Fleming, J. Elster and H. Geitel, as well as J. Howell, is analyzed. It is shown that, thanks to the discovery of Edison, a two-electrode lamp was created, which was the prototype of the J. A. Fleming vacuum diode.

Keywords: Charles du Fay, Frederick Guthrie, Edison effect, Edison two-electrode lamp, J.A. Fleming, vacuum diode.

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov “On the way to the vacuum diode,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 98–134, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Открытие того, что пространство около раскаленного тела проводит электричество, было сделано в 1733 г. французским натуралистом и интендантом¹ Королевскими садами² (фр. *Jardin du Roi*) в Париже Шарлем Франсуа де Систерне Дюфе (фр. *Charles François de Cisternay du Fay*, 14.09.1698—16.07.1739), рис. 1. Он заметил, что газ проводит электричество, когда находится рядом с нагретым твердым телом [1]. По его словам, «в одиночку всегда можно много узнать о некоторых истинах, о чем-то неясном и столь же сложном».



Рис.1. Шарль Франсуа де Дюфе (Гравюра на дереве Франция. 19 век.) и вид Экспериментального зала в Ботаническом саду в Париже (*Jardin du Roi*) [2]. 18 век.

Fig. 1. Charles Francois de Dufe (Woodcut France. 19th Century) and View of the Experimental Hall at the Botanical Garden in Paris (*Jardin du Roi*) [2]. 18 Century

После наблюдений Дюфе, почти через 100 лет, в 1853 г. французский физик Эдмунд Беккерель (фр. *Alexandre-Edmond Becquerel*; 24.03.1820—11.05.1891) показал возможность получения электрического

¹ Интендант (фр. *intendant* — управляющий, смотритель) — во Франции первоначально всякое лицо, которому поручалась какая-либо отрасль управления.

² Шарль де Дюфе за 7 лет управления Садами превратил их в один из важнейших научных исследовательских центров Европы, который обладал значительными ресурсами и отличными условиями для исследовательской и лекционной работы. Он умер в довольно раннем возрасте в 40 лет от оспы.

тока, генерируемого двумя горячими платиновыми электродами, имеющими небольшую разность потенциалов, между которыми нагнетался нагреваемый воздух [3, 4].

Принцип термоэлектронной эмиссии и разработка устройств, использующих его, восходит к концу 19 века. В 1873 г. английский профессор Королевского научного колледжа (Royal College of Science) Фредерик Гатри³ (Frederick Guthrie, 15.10.1833—21.10.1886) опубликовал небольшую статью об экспериментальных исследованиях взаимосвязи между теплом и электричеством, в которой отметил следующий факт [5, 6]. Если раскаленную металлическую пластину соединить с землей и расположить ее на некотором расстоянии от положительно заряженного электроскопа, не касаясь его, то происходит разряд прибора. Если электроскоп несет отрицательный заряд, то никакого разряда не происходит. Гатри показал, что эти эффекты в отношении разряда аналогичны при использовании платиновой проволоки, нагретой гальваническим током, а также при экспериментах с конденсированным электричеством лейденской банки.

Неординарные исследования Гатри стали предметом некоторых споров с секретарем Королевского общества Г. Г. Стоксом (G. G. Stokes), особенно в отношении его особенностей терминологии и изложения. Стокс, к большому огорчению Гатри, вообще отказывался публиковать статьи Гатри в «*Philosophical Transactions of the Royal Society*», отсылая их в «*Proceedings of the Royal Society of London*». Рецензенты статьи Гатри расходились в утверждении того, что раскаленные металлы теряют отрицательный заряд быстрее, чем положительный.

Королевский профессор инженерии (англ. *Regius Professor of Engineering*) в университете Эдинбурга Флееминг Дженкин (англ. *Henry Charles Fleeming Jenkin*, 25.03.1833—12.06.1885) утверждал, что автор не показал ничего более оригинального «...чем явления столь же хорошо известные, как разряд проводника и точка, находящаяся напротив него». Джеймс Клерк Максвелл пришел к выводу, что «интересные эксперименты» Гатри связаны с «изменением электрических свойств воздуха под воздействием тепла» и пожелал автору продолжить эти эксперименты, «чтобы полнее изучить предмет» [7].

Гатри был избран членом Королевского общества в 1871 г. Отметим, что подопечными Гатри были выдающиеся ученые, которые сыграли большую роль в зарождении радиотехники и радиоэлектроники, в частности:

³ Благодаря усилиям Гатри и его помощника Уильям Барретт (William Barrett) в марте 1874 г. было организовано Физическое общество в Лондоне. Общество издавало свой журнал «*Proceedings of the Physical Society*» с 1874 по 1967 год.

Оливер Лодж, Сильванус Филлипс Томпсон (Silvanus Phillips Thompson, 1851—1916) и Джон Амброуз Флеминг. Они тепло и уважительно относились к Гатри, в шутку называли его в середине 1870-х годов «добрый папаша» (old daddy). Теплое отношение к нему его учеников отразил в шарже С. Ф. Томпсон в 1870-х гг., рис. 2. Шарж содержит надпись: «Посмотри на эту картинку! И на это!». Рисунок противопоставляет автопортреты Томпсона, отдыхающего на пляже в Дугласе, на острове Мэн⁴ и Фредерика Гатри, читающего лекции студентам. Томпсон сидит на экстравагантном кресле-качалке, курит и наслаждается цветочным ароматом, отбросив книгу «Under Two Flags»⁵. Гатри показан на кафедре лекционной аудитории, перед горелкой Бунзена и другим оборудованием, с носом у точильного камня. Филлипс Томпсон стал членом Королевского общества в 1891 г.



Рис. 2. Фредерик Гатри и карикатура на него и его протеже Сильвануса Филлипса Томпсона [8]. 1870-е годы.

Fig. 2. Frederick Guthrie and the caricature of him and his protege Silvanus Phillips Thompson [8]. 1870s.

На юбилейных торжествах Физического общества пятьдесят лет спустя Джон Амброуз Флеминг, инженер-электрик, который был учеником Гатри в 1872—1873 гг., не без иронии заметил, что «в то время результаты проведенных исследований Гатри не были должным образом поняты». Флеминг ретроспективно обнаружил тесную связь между этими спорными выводами, работой Эдисона (англ. *Thomas Alva Edison*, 11.02.1847—18.10.1931) над углеродными лампами накаливания и собственными исследованиями по «лампам накаливания», и утверждал, что «эффект потери отрицательного электричества от раскаленного углерода в вакууме трактовался до тех пор не так, пока исследования сэра Дж. Дж. Томсона не познакомили нас с электроном и электронной эмиссией от раскаленных тел» [9].

Фредерик Гатри в 1873 г. открыл основной эффект, лежащий в работе еще не появившегося вакуумного лампового диода, а через 7 лет его

⁴ Остров Мэн — коронное владение Британской короны. Расположен в Ирландском море на примерно одинаковом расстоянии от Англии, Ирландии, Шотландии и Уэльса.

⁵ Роман «Под двумя флагами» самое известное произведение английской романистки Уйд (настоящее имя Мария Луиза Раме), впервые опубликованный в 1867 г., рассказывает историю попавшего в трудную жизненную ситуацию английского аристократа, который уходит и присоединяется к французскому батальону Иностранного легиона в Алжире.

независимо заново открыл Томас Альва Эдисон и эффект получил уже другое название.

2. Хаммеровские тени призраков

В декабре 1879 г. лабораторию Томаса Эдисона в Менло-Парк (Menlo Park, New Jersey) посетил молодой инженер Уильям Джозеф Хаммер (William Joseph Hammer, 16.02.1858—24.03.1934) из Weston Malleable Nickel Company, который должен был координировать работу этой компании с Edison Electric Light Company в области консалтинга⁶. Он попросил принять его на работу без оплаты, пока не проявит себя достойно. В скором времени он обратил на себя внимание Эдисона и был назначен ответственным за многие проекты на ближайшие несколько лет. Почти сразу же, в 1880 г., он стал первым главным инженером компании Edison Electric Lamp Company.

Хаммер, будучи помощником Т. Эдисона, принял участие в экспериментах, связанных с телефоном, фонографом, электрической железной дорогой, сепаратором для железной руды, электрическим освещением, а также по другим перспективным изобретениям. Тем не менее, У. Хаммер занимался в основном электрическими лампами накаливания и был назначен ответственным за их испытания. По словам Т. Эдисона, У. Хаммер был «пионером ламп электрического освещения», рис. 3.



Рис. 3. Уильям Джозеф Хаммер, помощник Т. Эдисона (Париж. Electrical Exposition 1881 г.) и часть его коллекции научных устройств (1900 г.).

Fig. 3. William Joseph Hammer, Assistant T. Edison (Paris. Electrical Exposition 1881) and part of his collection of scientific devices (1900)

В 1880—81 гг., во время испытания первых опытных партий вакуумных электрических ламп с угольной нитью накала внимание У. Хаммера⁷

⁶ Консалтинг — деятельность по консультированию производителей, продавцов, покупателей по широкому кругу вопросов в сфере технологической, технической, экспертной деятельности. Цель консалтинга — помочь менеджменту в достижении заявленных целей.

⁷ Уильям Хаммер более известен благодаря его впечатляющей исторической коллекции ламп накаливания, собранных со всего мира в течение 34 лет его жизни (Hammer Historical Collection of

привлекло почернение внутренней поверхности стеклянной колбы. Он отметил, также слабое голубое свечение вокруг положительного полюса в вакуумной колбе, и еще почернение провода и лампочки на отрицательном полюсе. Неизвестное явление в начале получило название «Хаммеровские тени призраков» (Hammer's Phantom Shadow).

Гатри и Хаммер, таким образом, независимо друг от друга обнаружили явление движения потока индуцированного теплом заряда в одном направлении, которое позже стало известно как термоэлектронная эмиссия электронов, без рассмотрения практического применения их работы.

Отмеченное явление в вакуумной лампе, как потом оказалось, было связано с теорией электрона и явилось в дальнейшем основой для всей электронной промышленности! Почернение внутренней поверхности стеклянной колбы электрической лампы напрямую зависело от длительности ее эксплуатации. Нужно заметить, что в газонаполненных лампах с вольфрамовой нитью накала такой дефект практически не заметен. Обнаруженным эффектом сразу занялся Томас Эдисон.

3. Исследования лаборатории Эдисона

С начала 1880 г. Томас Эдисон начал коммерческие продажи новых конструкций электрических ламп с углеродной (карбонизированный бамбук) нитью накала. Срок службы такой лампы составлял 1200 часов. Сама лампочка стоила меньше 25 центов, благодаря выбранному материалу нити накала, которая стоила 1 цент. Нить накаливания из бамбука помогла Эдисону избежать нескольких судебных процессов, связанных с использованием карбонизированной нити в качестве тела накала.

По прошествии некоторого времени к Эдисону стали поступать жалобы клиентов на черный налет, который образовывался внутри стеклянных колб, после некоторого периода их эксплуатации. Это заставило Эдисона начать серию экспериментов для выяснения причины и поиска способов ее устранения. После наблюдений он предположил, что почернение представляет собой налет мельчайших частиц угля, которые оторвались от нагретой нити накала и имеют отрицательный заряд. Оказалось, у ветви U-образно изогнутой нити накала, соединенной с положительным полюсом батареи питания, образовывается узкая более светлая полоска. Получалось, что одна ветвь нити экранировала другую. Из этого следовало: если в стеклянную колбу ввести дополнительный электрод, соединенный с

Incandescent Electric Lamps). Коллекция была очень большой и ее приобрела компания General Electric в 1912 г. за 10000 долларов. Коллекция ламп накаливания является самой полной из известных в мире и в настоящее время находится в музее Генри Форда в Дирборне, штат Мичиган.

плюсом батареи, он начнет притягивать отрицательно заряженные частицы. Это должно было привести, по мысли Т. Эдисона, к недопущению почернения лампы.

Для изучения возникшей проблемы Эдисон решил изготовить несколько электрических лампочек, которые кроме нити накала содержали, еще и небольшие металлические экранирующие элементы в виде стержней. По замыслу изобретателя эти своеобразные экраны, если найти для них определенное место в баллоне лампы, должны были воспрепятствовать образованию в ней налета.

Уже 13 февраля 1880 г. Эдисон сделал эскиз-задание в лабораторном блокноте (Lab Notebook — LNB). Эдисон в начале своей карьеры твердо усвоил, что когда есть идея, то запись должна быть сделана сразу! Это было настолько укоренившимся в его системе, что для него было почти невозможным провести даже самый тривиальный эксперимент не делая тщательной записи об этом. Эдисон делал свои записи карандашом. В конце дня записи тщательно упаковывались и убирались для хранения. Каждый месяц эти записи переплетались в виде книги, где они сохранялись для дальнейшего использования. Он выиграл много патентных исков благодаря своим заметкам, которые были сделаны десятки лет назад.

По эскизам была изготовлена лампа с дополнительным электродом, рис. 4. Удивительно, но эскиз лампы с расположенным над нитью накала отрезком провода, то есть дополнительным электродом, представлял собой прототип будущего электронного прибора — двухэлектродной вакуумной лампы.

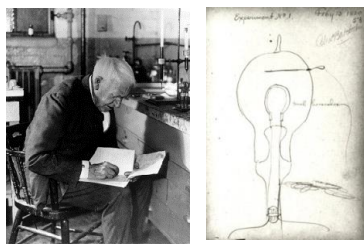


Рис. 4. Томас Эдисон составляет задание для эксперимента в лабораторном блокноте и эскиз-задание Т. Эдисона для эксперимента № 1 13 февраля 1880 г. [10]

Fig. 4. Thomas Edison is writing an assignment for an experiment in a lab notebook and Sketch assignment T. Edison for experiment number 1 February 13, 1880 [10]

Первый эксперимент был поручен сотруднику Эдисона, инженеру Чарльзу Батчелору (Charles W. Batchelor, 25.12.1845—01.01.1910). Эдисон называл Батчелора своим главным экспериментальным помощником. Вместе Бэтчелор и Эдисон придумывали перспективные разработки. Эдисон также часто назначал его ответственным за специальные разработки. Эксперимент № 1 был проведен с электрической лампой, содержащей один дополнительный электрод. Для эксперимента были взяты стандартные для

того времени безцокольные лампы накаливания постоянного тока на 100 вольт и мощностью 16 свечей. Его целью было отыскать приемлемое решение, которое бы позволило предотвратить перенос электрифицированного углерода с одной стороны изогнутой в виде подковы нити накала лампы на поверхность стеклянного баллона лампы. В процессе эксперимента была определена мощность свечения (candle powers) при различных питающих напряжениях лампы. После этого последовали другие тесты.

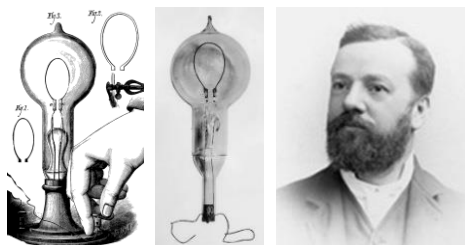


Рис. 5. Электрическая лампа Эдисона, взятая для исследований, к которой позже был добавлен второй электрод (около 1880 г.) и Чарльз Батчелор, один из самых ценных помощников Эдисона.

Fig. 5. T. Edison electric lamp taken for research, to which was later added a second electrode (circa 1880) and Charles Batchelor, one of Edison's most valuable assistants

С 28 ноября 1880 г. начались исследования электрических ламп с несколькими добавленными электродами при их вертикальном расположении, о чем имеется запись в лабораторном блокноте, рис. 6. При тестировании пробовали соединять концы электродов, выходящих наружу стеклянной колбы с полюсами нити накала, питаемой от гальванической батареи. Однако в решении проблемы ничего существенного это не прояснило. Эксперименты продолжались почти 2,5 года. Эдисон занялся экспериментами с лампой с установкой в ней дополнительных электродов только 5 июня 1882 г. 5 июля 1882 г. появилась запись в лабораторном блокноте о тестировании ламп с расположением электродов над нитью накала и соединением их с полюсами нити накала, рис. 7.

После этого в исследованиях наступил месячный перерыв. 4 сентября 1882 г. компания Эдисона Edison Illuminating Company открыла станцию на Перл-стрит в Нижнем Манхэттене Нью-Йорка, первую в мире генераторную станцию для подачи электроэнергии постоянного тока на 3000 новых электрических ламп. Началась эпоха современной коммунальной индустрии. Цена электроэнергии⁸, поставляемой в дома, была сравнимой со стоимостью газа. Эдисон изобрел, спроектировал и построил генератор-

⁸ 1 киловатт-час стоил 24 цента. \$1 (1882 г.) $\approx$ \$20 (2020 г.)

ры, распределительные линии, счетчики, выключатели, предохранители и практически все, что связано с электроснабжением. Эдисон был занят в этот период времени другими делами и экспериментами не занимался.

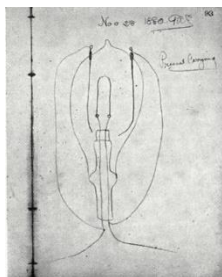


Рис. 6. Электроды возле каждого конца нити накала для предотвращения электрического переноса. Страница 93 из лабораторного блокнота Эдисона. 28 ноября 1880 г. [10].

Fig. 6. Electrodes near each end of the filament to prevent electrical transfer. A page 93 from Edison's lab notebook. November 28, 1880 [10]

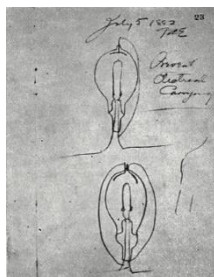


Рис. 7. Различное расположение электродов для предотвращения электрического переноса. Страница 23 из лабораторного блокнота Эдисона. 5 июля 1882 г. [10]

Fig. 7. Different arrangement of electrodes to prevent electrical transfer. A page 23 from Edison's lab notebook. July 5, 1882 [10]

В начале 1883 г. Эдисон освободился от загруженности по работе и весь рабочий день посвящал поиску решения проблемы налета в электролампах. В одном из своих экспериментов он установил дополнительный электрод в виде металлической пластины внутри стеклянной колбы вблизи нити накала. Подключил его к гальванометру, последовательно соединенному с положительной клеммой нити накала, рис. 8. Он был озадачен, когда гальванометр показал, что между этими двумя электродами протекал электрический ток, когда нить была раскаленной. Этот ток протекал через вакуум! Это происходило только тогда, когда положительная клемма батареи была подключена к пластине. Если же этот электрод был соединен с отрицательным концом нити, то никакого тока не было. В последующих экспериментах Эдисон заметил, что ток пластины увеличивался быстро, даже экспоненциально, когда нить была нагрета до более высокой температуры. Исходя из результатов эксперимента была изготовлена двухэлектродная вакуумная лампа, которая по существу представляла собой вакуумный диод, рис. 8.

Не найдя должного объяснения открытому явлению, Т. Эдисон подробно его описал и начал работать над его практическим использованием. Отправной точкой в принятии такого решения стала одна особенность лампы с добавочным электродом: при изменении напряжения питания нити накала происходят колебания силы тока в цепи гальванометра, соединенного с дополнительным электродом. Эдисон через несколько месяцев использовал этот факт, применив электролампу с дополнительным электродом в практической конструкции индикатора изменения напряжения. Для повышения чувствительности прибора дополнительный электрод из

толстого провода установили под нитью накала, рис. 9а. Однако, уже 8 марта в лабораторном блокноте Эдисона появилось эскиз-задание на изготовление лампы, в которой, в отличие от предыдущей конструкции, дополнительный электрод-стержень был заменен на электрод-полосу, рис. 9б.



Рис. 8. Эксперимент по определению протекания тока через вакуум, ранний образец лампы Эдисона с дополнительным электродом в виде анода (1883г.) и Эдисон в лаборатории (1925 г.)

Fig. 8. An experiment to determine the flow of current through a vacuum, an early sample of an Edison lamp with an additional electrode in the form of an anode (1883) and Edison in the laboratory (1925)

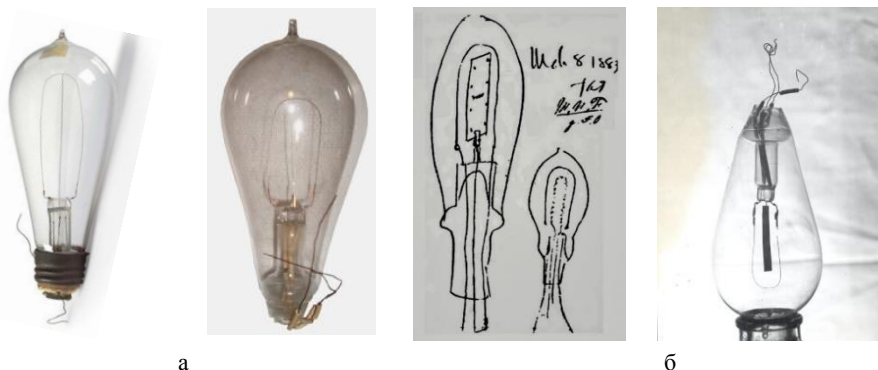


Рис. 9. Эволюция дополнительного электрода под нитью накала лампы Эдисона: а — в виде стержня, б — эскиз-задание на лампу с дополнительным электродом в виде полосы (страница из лабораторного блокнота Эдисона, 8 марта 1883 г.) и общий вид изделия.

Fig. 9. Evolution of an additional electrode under the filament of an Edison lamp: a – in the form of a rod, b – sketch-task for a lamp with an additional electrode in the form of a strip (page from Edison's laboratory notebook on March 8, 1883) and its general view as a product

4. Изобретение лампового индикатора напряжения

В первых числах октября 1883 г. вышла из строя станция Перл-Стрит в Нью-Йорке из-за перегруженности вспомогательной линии в Биржевом квартале города, что привело к последовательному отказу предохранитель-

ных устройств. Ликвидацией аварии занялся руководитель конструкторского отдела Фрэнк Дж. Спрейг (Frank J. Sprague, 25.07.1857— 25.10.1934), который находился в это время в Броктоне, штат Массачусетс. Решение проблемы он сообщил по телеграфу Эдисону, который сразу вызвал его в Нью-Йорк, чтобы обсудить возникшую задачу с перегрузкой напряжения. Вскоре авария Спрейгом была успешно ликвидирована.

Произошедшая авария заставила Эдисона немедленно заняться работой по практическому конструированию лампового индикатора напряжения. Не теряя времени, уже 8 октября 1883 г., Эдисон попросил сотрудника лаборатории Джона Отта⁹ (John Ott, 1850—1931) установить лампу с дополнительным электродом, подключенным через гальванометр к одной стороне электрической линии, о чем свидетельствует запись, сделанная в лабораторном блокноте (рис. 10). Цель эксперимента состояла в том, чтобы понять, можно ли использовать ток в этой ветви электрической цепи для определения величины напряжения на линии. Это, по всей видимости, была первая запись, показывающая гальванометр в цепи и вполне вероятно, что ток дополнительного электрода измерялся и раньше, а полученное его значение ставилось в зависимость от температуры нити накала. Это также первое применение термоэлектронного тока в практических целях и первая электронная схема с первой термоэлектронной лампой.



Рис. 10. Томас Эдисон с помощником Дж. Отт (примерно 1890-е гг.) и схема цепи индикации напряжения (страница из блокнота Эдисона. 8 октября 1883 г. [10]).

Fig. 10. Thomas Edison with Assistant John Ott (1890s circa) and voltage indicating circuit (a page from Edison's lab notebook. October 8, 1883 [10])

Эдисон увидел потенциальную полезность в такой схеме (рис. 10) и как обычно, сразу, 15 ноября 1883 г. подал заявку на патент на индикатор напряжения. Патент US307031 на электрический индикатор (Electrical Indicator) был выдан менее чем через год, 21 октября 1884, рис. 11 [11]. В патенте он не упомянул о его выпрямляющих свойствах, поскольку продвигал постоянное, а не переменное напряжение. Эдисон после получения

⁹ Джон Отт был верным другом и сотрудником Эдисона до самой его смерти. У него было 22 патента, некоторые из них принадлежали Эдисону. С 1870-х годов он был главным модельщиком и изготовителем инструментов. С 1887 г. работал начальником механического цеха, пока ужасное падение в 1895 г. не сделало его тяжело больным. Он умер через день после Эдисона. По просьбе миссис Эдисон его костыли и инвалидное кресло были поставлены рядом с гробом Эдисона.

патента больше не занимался этой проблемой. Получение патента стало последним аккордом в завершении исследований по проблеме почернения в электрических лампах, которые длились почти 4 года. Следует отметить, что цель, поставленная в этих исследованиях так, и не была достигнута.

На рис. 11 представлен патентный чертеж регулятора напряжения. Его основой является гальванометр с подвижным магнитом, прогиб которого растет с увеличением напряжения на линии и, следовательно, с увеличением температуры нити накала. Предусматривалось ручное и автоматическое регулирование напряжения. В начале текстовой части патента Эдисон сразу приводит четкое утверждение: «Я обнаружил, что если проводящее вещество помещается где-либо в пустом пространстве в пределах баллона электрической лампы накаливания, и указанное проводящее вещество соединено снаружи лампы с одним выводом, предпочтительно положительным, из лампы накаливания часть тока, когда лампа работает, пройдет через шунтирующую цепь, сформированную таким образом, которая включает в себя часть пустого пространства внутри лампы. Я обнаружил, что этот ток пропорционален степени накаливания проводника или мощности свечи».

Томас Эдисон надеялся в будущем на коммерческий успех электрического индикатора. Прибор хотя и не получил широкого распространения, но он не был забыт. В первую мировую войну его использовали для регулирования генераторного напряжения в радиоаппаратуре самолетов.

Патент Т. Эдисона на электрический индикатор, *по существу, был первой заявкой на изобретение в области электроники.*

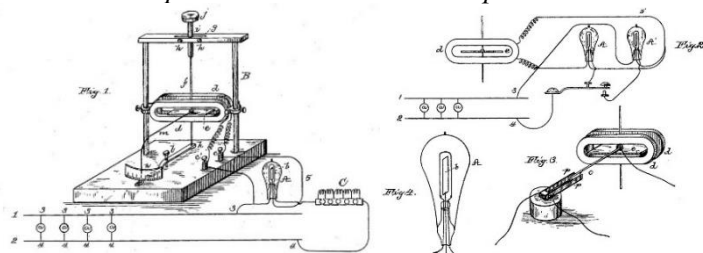


Рис. 11. Устройство и схема электрического индикатора Т. Эдисона из патента US307031 с приоритетом от 15 ноября 1883 г.

Fig. 11. The device and circuit of an Electrical Indicator T. Edison from patent US307031 with a priority of November 15, 1883

После этого Т. Эдисон изготовил электрическую лампу с добавочным электродом в виде полосы, которая располагалась под нитью накала в ее плоскости. На основе этой лампы он построил высокочувствительный индикатор изменения напряжения, который отправил на открывающуюся

в сентябре 1884 г. Международную электротехническую выставку в Филадельфии.

Что удивительно, в заметке о специальной демонстрации Т. Эдисоном своей двухэлектродной электролампы на Филадельфийской выставке, помещенной в журнале «Engineering», наблюдаемые явления в лампе связывают с электрическим зарядом: «По-видимому, в этой лампе частицы воздуха (или угля) разлетаются от нити по прямым линиям, унося электрический заряд» [12].

Однако Эдисон, которого называли «волшебником Менло Парка», не до конца разобрался в открытом им самим явлении, предполагая, что это поток заряженных углеродных частиц, и не занимался его технической и коммерческой эксплуатацией. Если бы он осознал, что ток в вакууме между горячей нитью накала и пластиной вызван отрицательно заряженными частицами, которые были гораздо меньше атома, то его можно было бы назвать отцом электроники, вместо этого прошло еще 13 лет, прежде чем было сделано открытие электрона.

В течение следующих нескольких лет явление в двухэлектродной электролампе, исследованное Эдисоном, оставалось в основном малоизвестным любопытным лабораторным экспериментом. Однако известность этого явления постепенно распространилась в научном мире и вызвала интерес к нему ученых в Америке и Европе, которые благодаря этому значительно изменили мир, в котором мы живем.

5. Ламповый индикатор напряжения Фрэнка Дж. Спрейга

Примерно в это же время, когда произошла авария на электростанции Перл-Стрит в Нью-Йорке, приступил к разработке и испытанию первого реального лампового индикатора напряжения Фрэнк Дж. Спрейг. Следует заметить, что в это время в патентном ведомстве США уже лежала заявка на изобретение Эдисоном подобного устройства. Спрейг об этом не знал, вероятно, он не был поставлен в известность Эдисоном.

27 декабря 1883 г. Спрейг сделал технический эскиз устройства, рис. 12. Его собственное описание индикатора приводится в письме от того же числа, написанном своему другу и коллеге Уильяму Дж. Хаммеру, в то время главному инженеру Deutsche Edison Gesellschaft в Берлине. Он пишет: «Затем я перешел к новому индикатору напряжения, основанному на старом открытии E's (хорошо известный «эффект Эдисона»). При вышеуказанных соединениях (см. рис. 12) у этой специальной лампы никакой заметный ток не будет протекать через катушку гальванометра, соединенному с платиной к углероду до тех пор, пока не будет достигнуто опреде-

ленное раскаление, а затем ток очень быстро увеличивается. Следовательно, индикатор не показывает отклонения, пока вы этого не пожелаете, и затем он начинает быстро двигаться. Он имеет точную настройку и настолько высокую чувствительность, что, если уменьшить на 0,01 питание лампы, он покажет изменение напряжения. Его чувствительность может быть сделана более или менее высокой» [13]. Заметим, что в схеме индикатора Спрейга, в отличие от индикатора Эдисона, использована электролампа с дополнительным электродом в виде тонкого стержня, рис. 9а.

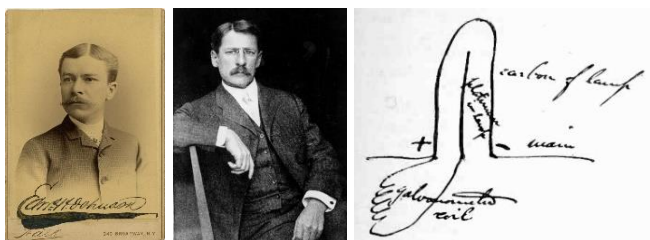


Рис. 12. Эдвард Х. Джонсон (слева), Фрэнк Дж. Спрейг (1890 г.) и эскиз его лампового индикатора напряжения (27 декабря 1883 г.).

Fig. 12. Edward H. Johnson (left), Frank J. Sprayg (1890) and a sketch of his tube voltage indicator (December 27, 1883)

На эскизе Спрейга изображен типичный диод, включающий платиновый анод, последовательно соединенный с гальванометрической катушкой. Напряжение на анод подается с положительной стороны нити накала при питании ее постоянным током. В угольной лампе отрицательная ветвь нити накаливания действует как катод при нагреве. Ламповый индикатор Спрейга был разработан только в виде экспериментального образца, но тем не менее представляет интерес как один из предшественников современного устройства на двухэлектродной вакуумной лампе.

Спрейг стал сотрудником лаборатории благодаря Эдварду Джонсону (Edward Hibberd Johnson, 04.01.1846—09.09.1917), деловому партнеру Томаса Эдисона. Джонсон умел находить большие таланты. О нем говорили: «Есть только один Эдисон, а Джонсон — его пророк». В Лондоне на международной выставке Джонсон познакомился с Спрейгом и убедил его уволиться из военно-морской комиссии, чтобы работать у Эдисона. Джонсон отправил Спрейга через Атлантику к Эдисону так же, как он это сделал с другой известной личностью, Самуэлем Инсуллом.

В мае 1883 г. Эдисон установил Спрейгу оклад \$2500 и послал его руководить конструкторскими отделами по строительству своих электростанций в различных штатах США. Спрейг внес значительный вклад в

развитие лаборатории Эдисона в Менло-Парке (штат Нью-Джерси), который заключался во внедрении в практические расчеты математических методов. До его прихода Эдисон провел множество дорогостоящих экспериментов методом проб и ошибок. Подход Спрейга состоял в том, чтобы вычислять с помощью математических методов оптимальные параметры и таким образом сэкономить много ненужных манипуляций. Он выполнил еще одну важную работу для Эдисона, в частности, исправил систему магистралей и фидеров Эдисона для распределения электроэнергии на центральной станции. Спрейгом была выведена формула для определения величины сечения провода в зависимости от величины протекающего тока.

Спрейг не проработав даже года, в 1884 г. решил, что его интересы лежат в другой области, которая не связана с эксплуатацией электричества, и оставил Эдисона, чтобы основать свою компанию Sprague Electric Railway & Motor Company (SERM) с капиталом \$100000. Учредителями компании, кроме Спрейга, стали У. Хаммер и Э. Джонсон.

6. Международная электротехническая выставка 1884 г.

В 1884 г. состоялась Международная электротехническая выставка (International Electrical Exhibition of Philadelphia), организованная Институтом Франклина, которая проходила в Филадельфии с 2 сентября по 11 октября 1884 г. Церемония открытия выставки состоялась в здании, которое в последнее время использовалось в качестве вокзала железной дороги Пенсильвании и было отдано в аренду институту. Генеральным директором выставки был назначен профессор Уильям Д. Маркс (William D. Marks) из Пенсильванского университета (University of Pennsylvania), а главным электриком — профессор Эдвин Дж. Хьюстон¹⁰ (Edwin James Houston, 09.07.1847—01.03.1914) из Центральной средней школы в Филадельфии.

На выставке было представлено 1500 экспонатов, из них 196 коммерческих экспонатов, в том числе и исторические экспонаты: устройства Бенджамина Франклина и первый телеграфный аппарат Морзе.

Эдисон представил на выставку несколько экспонатов, в том числе модель регулятора напряжения. Это устройство имело при себе табличку для объяснения принципа его работы. Текст для таблички регулятора напряжения подготовил бизнес-менеджер Самуэль Инсулл¹¹ (Samuel

¹⁰ Дж. Хьюстон в 1882 г. вместе с Элиу Томпсоном (Elihu Thompson) организовали компанию, чье имя до сих пор сохранилось в названии британской компании Томпсон-Хьюстон (British Thompson-Houston Company).

¹¹ Самуэль Инсулл прибыл в Соединенные Штаты в 1881 г. и был нанят Томасом Эдисоном в качестве личного секретаря. Завоевав полную доверенность изобретателя, молодой англичанин отпра-

Insull, 11.11.1859—16.07.1938): «Устройство для отображения проводимости постоянных токов через высокий вакуум» (англ. *Apparatus for showing the conductivity of continuous currents through high vacuum*), рис. 13.

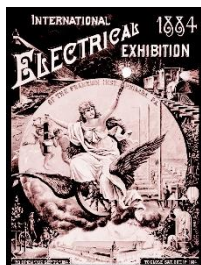


Рис. 13. Плакат Международной электротехнической выставки 1884 г. в Филадельфии и бизнес-менеджер Самуэль Инсулл (1888 г.)

Fig. 13. Poster of the Philadelphia International Electrotechnical Exhibition 1884 and Business Manager Samuel Insull (1888)

Во время проведения выставки в Институте Франклина 7—8 октября 1884 г. состоялось первое заседание Американского института инженеров-электриков (American Institute of Electrical Engineers, сокращено AIEE). К этому мероприятию Эдисон подготовил доклад о своем открытии, который представил Дж. Хьюстон. Он к этому времени стал известным ученым в области всех видов электрических исследований. Хьюстон, находясь под впечатлением от исследований Эдисоном явлений высокого вакуума в лампах накаливания, сказал: «Я не подготовил никакой статьи, а просто хочу привлечь ваше внимание к предмету, который, как я полагаю, вы все видели и над которым ломали голову. В самом деле, я хочу представить его обществу с тем, чтобы вы ломали над ним голову. Я имею в виду необычные явления высокого вакуума, наблюдаемые господином Эдисоном в некоторых его лампах накаливания» [14]. Он подробно описал эффекты, которые наблюдаются в трех конструкциях электрических ламп Эдисона с дополнительными электродами, рис. 14. Подводя итог своего выступления, Хьюстон сказал: «У меня нет теории, выдвинутой в отношении происхождения этих явлений». После этого он пригласил к дискуссии по представленной проблеме участников заседания. В обсуждении принял участие Натаниэль Кейт¹² (Nathaniel Shepard Keith, 14.07.1838—27.01.1925), господин Келли (Mr. Kelly), а также главный инженер телеграфного Британско-

вился в Скенектади, штат Нью-Йорк, чтобы запустить электротехническую фабрику, при поддержке Эдисона: «Сделай это масштабно, Сэмми... Сделай это». Это была первая организационная структура, из которой потом выросла General Electric. Позже он стал главным в управлении промышленными холдингами Эдисона.

¹² Кейт Н. — американский промышленник, химик, изобретатель, писатель и инженер-электрик. В 1880-х гг. работал в консультативном штабе Томаса А. Эдисона. Его знания об электромагнетизме и электродинамике помогли Эдисону и его коллегам в разработке многих их первых изобретений. В 1884 г. он стал редактором журнала «Electric World», соучредителем Американского института инженеров электриков (AIEE) и первым секретарем этой организации.

го почтового отделения сэр Уильям Прис (Sir William Henry Preece, 15.02.1834—06.11.1913).

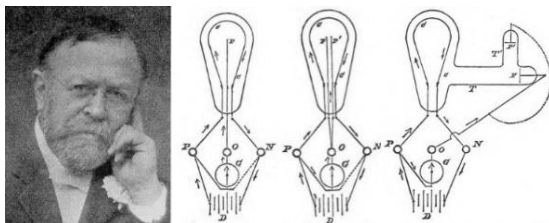


Рис. 14. Эдвин Дж. Хьюстон и конструкции электрических ламп с дополнительными электродами представленные им в ходе дискуссии по эффекту Эдисона на заседании Американского института инженеров электриков 7 октября 1884 г.

Fig. 14. Edwin J. Houston and the design of electric lamps with additional electrodes presented to him during a discussion on the Edison effect at a meeting of the American Institute of Electrical Engineers on October 7, 1884

В ходе обсуждения представленной информации У. Прис сказал: «То, что я увидел на выставке — меня очень озадачило. Вначале я думал, что здесь был представлен новый источник электроэнергии, однако мой ум мне подсказывает, что причина этого замечательного явления, связана с эффектом Крукса. Каждый электрик, присутствовавший на выставке, я думаю, наблюдал этот эксперимент с большим интересом. Я чувствую недоумение, в связи с этим, и я чувствую, что это одна из тех вещей, которая требует быть очень тщательно и осторожно рассмотрена. Я намерен воспользоваться своим убедительным красноречием и обратиться к мистеру Эдисону с просьбой, что, когда я увижу его на следующей неделе, чтобы он дал мне одну из своих ламп. По возвращению в Англию я проведу тщательное их исследование и, конечно, продемонстрирую свои результаты перед научным обществом» [14].

Т. Эдисон в беседе с У. Присом сообщил тому, что хотя причин этого явления он пока не установил, но уже сумел его применить в устройстве на двухэлектродной электрической лампе для регулировки тока в электрических цепях освещения.

Сообщение о презентации открытия Эдисона на заседании AIEE было опубликовано в первом томе Трудов Американского института инженеров электриков за 1884 год.

Выставка в Филадельфии стала своеобразной линией разграничения между доэлектричеством и электричеством, в котором электрический свет и мощность стали фактами жизни во всех аспектах ее социальной и промышленной среды. Она послала сигнал о том, что индивидуальный изобр-

ретатель стал инициатором развития электричества, а также о доминировании профессионального инженера в корпоративной структуре.

7. Исследования Уильяма Приса

В конце 1884 г. сэр Уильям Прис вернулся домой в Англию с несколькими различной формы и вида термоэлектрическими лампами с дополнительными электродами, которые для него сделал Т. Эдисон и приступил к исследованиям, рис. 15. Лампы были безцокольные и имели угольную нить накаливания на напряжение на 100 В и мощность 8 и 16 Вт. В экспериментах использовались конструкции ламп двух типов:

— Простые стеклянные колбы с тремя проводами, выступающими из основания, и электродами из меди, железа и углерода. Была одна лампа с двумя электродами.

— Стеклянные колбы с трубчатой насадкой, содержащие электрод диаметром около 15 мм и различной длины с размещением либо сверху, либо сбоку от нити накала. Одна из ламп, под № 5, имела три трубчатых электрода.

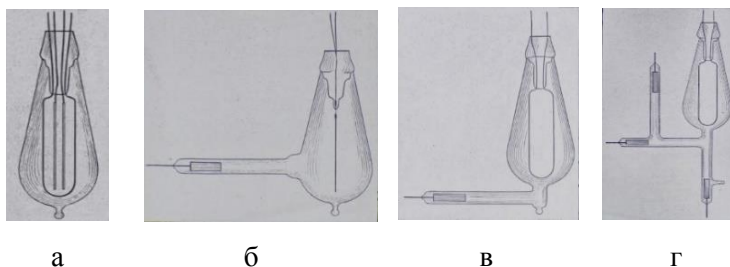


Рис.15. Конструкции электроламп с дополнительным электродом в экспериментах У. Приса.1885 г.

Fig. 15. Designs of electric lamps with an additional electrode in the experiments of W. Preece. 1885

Для экспериментов с электролампами с дополнительным электродом У. Прис собрал схему, состоящую из двух электрических цепей. Одна цепь включала нить накала — миллиамперметр и гальваническую батарею А из стандартных элементов Даниэля¹³ по 1,07 В, другая — один из полюсов нити накала — гальванометр G — шунт 1070 Ом — дополнительный электрод, рис. 16.

¹³ В 1836 г. английский химик Джон Дэниэль усовершенствовал элемент Вольта, поместив цинковый и медный электроды в раствор серной кислоты. Эта конструкция стала называться «элементом Даниэля».

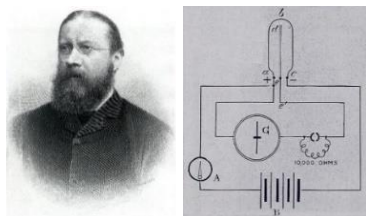


Рис. 16. Сэр Уильям Прис и его электрическая схема исследования эффектов в электролампах Эдисона с дополнительным электродом. 1884 г.

Fig. 16. Sir William Preece and his circuit for investigating effects in Edison light bulbs with an additional electrode. 1884

С лампами было проведено 7 экспериментов. Диапазон напряжений нити накала выбирался от 40 до 120 В. В каждом эксперименте определялось сопротивление нити, Э.Д.С. (Е.М.Ф.), ток в миллиамперах, проходящий через «шунт», включенный в цепь, и сопротивление «шунта».

Прис при проведении экспериментов отметил одну особенность: в большинстве случаев, когда лампы работали при высоком напряжении, возникало «синее свечение». Наиболее сильным это пламя было в месте соединения угольной нити с положительным электродом. Было отмечено, что свечение положительного полюса сопровождается разряд в разреженном газе. Это обычное явление в лампах накаливания, у которых выводы нити накала расположены близко друг к другу. При слишком большой электродвижущей силе между этими выводами образуется дуга. Поэтому в последних конструкциях ламп, требующих напряжения в 100 вольт, г-н Сван (Swan) значительно увеличил расстояние между электродами. Появление эффекта синего свечения является предвестником разрушения нити.

В результате проведенной серии экспериментов с электролампами с дополнительными электродами (рис. 15), У. Прис сделал вывод: «совершенно очевидно, что эффект Эдисона обусловлен образованием дуги между угольной нитью и металлической пластиной, укрепленной внутри колбы лампы. Эта дуга образуется вследствие вылета угольных частиц по прямым линиям через пустое пространство лампы. В силу этого дуга появляется раньше и выражена она сильнее, когда соединения сделаны так, как показано на рис. 16, а не наоборот, потому что, как указал Крукс, полет частиц происходит от отрицательного полюса к положительному, и начинается в точке с наименьшим сопротивлением» [15, 16].

Прис заметил, что на электрический ток в лампе не оказывает влияние материал, из которого изготовлен холодный электрод, однако, этот ток быстро растет с увеличением потенциала на нем. Последнее подтвердило замечание Эдисона в его ранее выданном патенте о том, что рассматриваемый эффект пропорционален степени накаливания лампы.

В статье У. Приса, поданной 18 марта 1885 г. в журнал «Proceedings of the Royal Society of London», впервые явление почернения внутри стек-

лянного баллона электролампы было названо «эффектом Эдисона». Нужно отметить, что У. Прис не делал попыток применить «эффект Эдисона» для практических целей и, проведя эксперименты, больше не занимался этой научной проблемой.

В марте 1885 г. Уильям Прис выступил в Лондонском королевском обществе с докладом о результатах проведенных им исследований под названием «Необычное поведение свечения ламп при большом накале» (*On a Peculiar Behavior of Glow-Lamps when raised to High Incandescence*). Предложенное У. Присом объяснение причины почернения внутри электрической лампы не в полной мере удовлетворило присутствовавшего на заседании профессора лондонского университетского колледж Джона Амброза Флеминга (англ. *Sir John Ambrose Fleming*; 29.12.1849 — 18.04.1945).

8. Работа Дж. А. Флеминга в компаниях Эдисона

Телефонный бизнес переживал период больших перемен, включая слияния и расширение монополии почтового ведомства (Post Office) Великобритании с телеграфа на телефон. Судебное решение в пользу почтового ведомства пришло к выводу, что телефон — это телеграф, а телефонный разговор — телеграмма в значении раздела 4 Закона о телеграфе 1869 г. Это означало, что телефонные компании должны были получать лицензию у генерального почтмейстера (Postmaster-General), благодаря этому почтовое ведомство имело свой доход и возможность приобрести их через определенный период времени.

В Лондоне, помимо компании Эдисона, присутствовала и телефонная компания Белла, которая была конкурентом в создании телефонных станций в городе и в других местах. Телефонные компании не хотели рисковать своими капиталами и приняли предложенные условия. Компании Edison Telephone Company of London и Telephone Company (Bell's Patents) Ltd для защиты своих интересов объединились 13 мая 1880 г. в одну компанию под названием United Telephone Company Limited¹⁴, а затем 10 марта 1881 г. была организована ее провинциальная дочерняя компания National Telephone Company (NTC).

Таким образом, в результате действий 1868 и 1869 гг. контроль над этой новой и удивительной отраслью под названием «телефония» перешел в руки General Post Office, и ее развитие было таким образом замедлено в Великобритании, в отличие от США, где она не находилась под контролем правительства.

¹⁴ United Telephone Company Limited была ликвидирована в 1889 г.

Осенью 1881 г. Т. Эдисон направил своего помощника У. Хаммера в Лондон в качестве главного инженера своей английской компании Edison Electric Light Company of London. В обязанности У. Хаммера также входил контроль строительства Дворца Эдисона на Лондонской Выставке 1882 г.

В том же 1881 г. Джон А. Флеминг стал первым профессором физики и математики в новом университетском колледже Ноттингема¹⁵ (University College Nottingham). К этому времени Флеминг был одним из немногих, кто знал что-либо об электротехнике. Его практические знания быстро принесли ему широкую известность, такую, что его стали приглашать и даже упрасивать со всех сторон проводить консультативную работу по электричеству. Поэтому неслучайно в 1882 г. Edison Electric Light Company через его двоюродного брата Арнольда Уайта (Arnold White), который был секретарем телефонной компании Эдисона в Лондоне, сделала ему предложение, которое он принял — поработать у них в качестве научного консультанта.

Дж. А. Флеминг познакомился с Уильямом Хаммером и от него узнал об эффекте почернения внутри работающей электрической лампы, а также о тех экспериментах Т. Эдисона с электрической лампой с дополнительным электродом, которые должны были уменьшить этот эффект.

Уайт в новой компании NTC, так же как в предыдущих компаниях, занял должность секретаря, а Флеминг через некоторое время стал в ней научным консультантом. Флеминг был активным и заинтересованным участником всех этих судебных процессов, связанных с защитой интересов нескольких компаний, в которых он был консультантом.

Компании Edison Electric Light Company и Swan Electric Light Company решили объединиться в одну компанию Edison & Swan United Electric Light Company, которая была зарегистрирована 26 октября 1883 г. Она получила известность под сокращенным названием «Эдисван» (Ediswan). По договоренности завод Свана был перенесен из Ньюкасла в район под Лондоном. Такая необходимость была вызвана тем, чтобы избежать оспаривания приоритета патента и облегчить судебное преследование нарушителей. Вскоре ламповый завод занял участок в Пондерс-Энд, недалеко от Тоттенхэма. Это изменение позволило Флемингу установить контакты с Джозефом Сваном (Sir Joseph Wilson Swan, 31.10.1828—27.10.1914) и его партнером С. Х. Стерном (C. H. Stearn), рис. 17.

¹⁵ Ноттингемский университет (англ. *The University of Nottingham*) — один из крупнейших и самых престижных университетов Великобритании и мира. Он был основан как Университетский колледж Ноттингема в 1881 г. Это государственный исследовательский университет, расположенный в центральной части города Ноттингем, который находится в 208 км от Лондона.

Флеминг, таким образом, стал прямым куратором завода Swan Lamp. Он познакомился с изготовлением тонких целлюлозных нитей и процессом их карбонизации (методом Свана). Вклад Флеминга в работу завода заключался главным образом в разработке электрических и фотометрических приборов, пригодных для использования на заводе и необходимых для контроля качества выпускаемой продукции. Лампы, продаваемые в Британии, почти полностью соответствовали конструкции Свана, за исключением нитей накала.

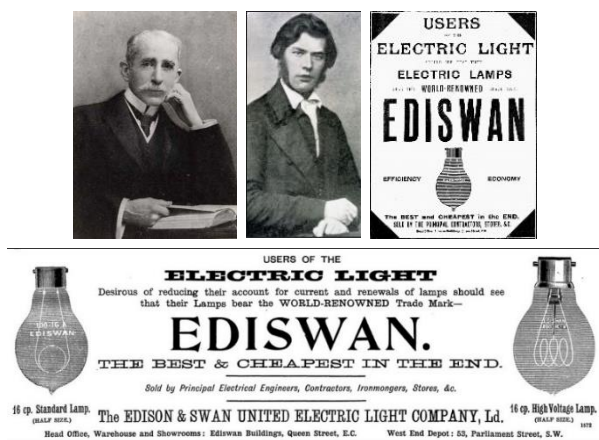


Рис. 17. Профессор электротехники университетского колледжа Лондона Дж. А. Флеминг (1899 г.), предприниматель и ученый Джозеф Сван, и реклама лампочек Ediswan (1889 г.).

Fig. 17. J. A. Fleming, professor of electrical engineering, University College London (1899), Joseph Swan, entrepreneur and scientist, and Ediswan bulb advertising (1889)

Флеминг кроме консультативной работы в компании Ediswan занимался рекламой ее продукции, а также ездил по стране в поисках заказчиков. Он организовал получение ряда заказов для компании, в том числе один — для первого Адмиралтейского корабля с электрическим освещением.

В 1884 г. Джон Флеминг как представитель компании Ediswan посетил научную конференцию в Канаде. Он, совершил поездку в США (город Нью-Джерси), чтобы встретиться со своим братом, а также ознакомиться с лабораторией Эдисона. Томас Эдисон показал Флемингу эксперимент с электрической лампой, внутри которой находился металлический электрод, чем очень удивил лондонского профессора. Американский изобретатель также рассказал англичанину о своих безуспешных попытках использовать это устройство для регулирования электрического тока, протекающего в электрических осветительных сетях. Флеминг был сильно заинтригован

«эффектом Эдисона», гораздо больше, чем сам Эдисон. Эдисону было трудно понять волнение консультанта Ediswan от того, что еще не имело очевидного практического применения. Это пробудило в Флеминге научный интерес вплотную заняться исследованием природы открытого явления.

9. Исследования Дж. Флемингом почернения в электрических лампах Эдисона

Флеминг, невзирая на загруженность консультативной деятельностью, заинтересовался проблемой почернения в электрической лампе Эдисона. 26 мая 1883 г. на заседании Физического общества он сделал сообщение «О явлении молекулярного излучения в лампах накаливания» (On a phenomenon of molecular radiation in incandescence lamps). Свое видение проблемы он обосновал исходя из неравномерности диаметра нити накала по ее длине и некачественного контакта зажатия углеродной нити в маленьких медных зажимах на концах платиновых проводов, которые загерметизированы внутри баллона, рис. 18.

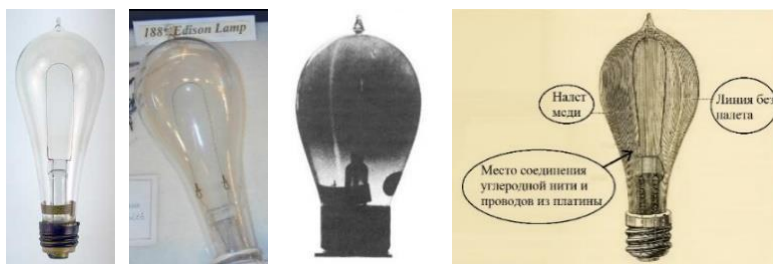


Рис. 18. Промышленные образцы ламп Эдисона, лампа с обесцвеченной четкой полосой и почернением, и расположение мест в лампе, где образуются и отсутствуют почернения (1883 г.).

Fig. 18. Industrial designs of Edison lamps, a lamp with a discolored clear strip and blackening, and the location of places in the lamp where blackening is formed and absent (1883)

Если в каком-либо месте нить тоньше, чем в других местах, то в этом месте будет большее выделение тепла и более высокая температура. Происходит улетучивание углерода и пар равномерно конденсируется по бокам стеклянной колбы. В случае если точка наибольшего сопротивления возникает на медном зажиме, то обнаруживается, что медь улетучивается и осаждается на внутренней стороне стекла. Отсюда, делает вывод Флеминг, молекулы меди отстреливаются по прямой линии, в противном случае линия без осаждения невозможна. Самое заметное, что это происходит только тогда, когда происходит осаждение меди, и что он никогда не за-

мечал этого в обычном углеродном отложении. Резюмируя, Флеминг высказывает предположение, что исследованное явление напоминает прекрасное исследование мистера Крукса с вакуумными трубками, но в данном случае мы имеем дело не с разрядом индукционной катушки, а со сравнительно низким потенциалом. Материал сообщения был опубликован [17]. Это первая публикация Флеминга посвященная эффекту Эдисона, после того как он узнал о нем от Хаммера.

К 1885 г. репутация Флеминга в области новейших разработок в области электротехники была такова, что его пригласили занять должность первого профессора электротехники в Университетском колледже в Лондоне (Electrical Technology at University College London). Эта должность позволила ему уделять больше времени для консультаций в компаниях и заниматься научными исследованиями. Он оставался на этой должности в течение 42 лет вплоть до своей отставки в 1926 г. На кафедре, где работал Флеминг, никакого оборудования не было, только «доска и мел!». Однако он сумел убедить руководство колледжа, чтобы ему выделили небольшое помещение и финансовую поддержку. В 1896 г., во многом благодаря его усилиям, было выделено £5000 на оборудование электротехнической лаборатории.

После публикации небольшой статьи в 1883 г. по вышеуказанному вопросу у Флеминга появилось много дополнительных возможностей, чтобы исследовать условия, в которых образуются молекулярные тени в лампах накаливания с углеродной нитью. В конце июня 1885 г. Дж. А. Флеминг опубликовал работу «О молекулярных тенях в лампах накаливания» (On molecular shadows in incandescent lamps) в журнале «Philosophical Magazine and Journal of Science» [18].

Появившиеся новые данные позволили ему внести коррективы в некоторые сделанные ранее утверждения, приведенные в упомянутой статье. При определенных обстоятельствах на поверхности в плоскости нити накала образуется линия без отложений, которая как бы является тенью одной стороны петли. Это указывает на то, что процесс молекулярного рассеяния, который происходит в некоторой точке на том или ином зажиме, представляет собой не просто испарение или улетучивание металла, а проекцию молекул по прямым линиям во всех направлениях. Траектория молекул будет нарушаться в некоторых направлениях углеродной нитью, и, следовательно, в результате линии и места без осаждения становятся молекулярными тенями петли. Флеминг заключает, что в большинстве случаев углеродные отложения дают отчетливые тени в лампах не только с одной петлей нити накала, но также и в лампах Swan с двойной петлей. Изготавливая лампы с зажимами из различных металлов, можно получить металлические пленки

осаждения различных видов. Интересные магнитооптические явления могут возникнуть при получении прозрачных пленок железа.

Статья несомненно была написана под впечатлением работы У. Приса, хотя Дж. А. Флеминг отрицал это и утверждал, что он самостоятельно заметил почернение и тени в лампе еще в 1882 г. [19].

10. Исследования Дж. Флемингом электрических ламп с дополнительным электродом

В 1890 г. вышла первая статья Флеминга о проведенных экспериментах с лампой Эдисона, содержащей дополнительный электрод [20]. В этой статье он излагает фундаментальные выводы из проведенных экспериментов. Приведем далее некоторые из них.

В случае угольной лампы накаливания в условиях яркого накаливания частицы углерода проецируются из всех частей нити накала, но главным образом из отрицательной половины петли. Эти молекулы углерода несут отрицательные заряды электричества, и когда они сталкиваются с металлической пластиной, помещенной в вакуум, то могут разряжаться. Пластина, таким образом, положительно электризуется, находясь в металлическом соединении с положительным электродом лампы или с отдельным положительно заряженным телом.

По мнению Дж. Флеминга, гипотеза о том, что молекулы углерода отделяются от поверхности углеродной нити накаливания лампы в высоком вакууме и могут только передавать отрицательный заряд, позволяет описать такие наблюдаемые эффекты, как проекция отрицательно заряженных молекул углерода на стекло баллона и экранирование нити накала. Это, похоже, окончательно подтверждает исследования господина Крукса о том, что протекание электрического разряда через высокий вакуум представляет собой поток заряженных частиц, которые исходят из отрицательного электрода. Если это так, то начальное значение электродвижущей силы, необходимой для разряда через разреженный газ, может быть уменьшено путем нагревания отрицательного электрода, то есть нити накала.

В этой работе он отмечает, что хороший вакуум не является проводником, и что для протекания электрического тока в нем необходимы носители. Носителями, по его мнению, должны быть частицы углерода, что явилось неправильной интерпретацией эффекта Крукса. Эффект Эдисона имеет место независимо от того, из какого материала изготовлен дополнительный электрод, например, из платины, алюминия или углерода.

Из проведенных экспериментов Дж. Флеминг делает заключение, что ограниченное пустое пространство, содержащее два электрода, один

из которых нить накаливания, а другой — холодный электрод, *обладает односторонней проводимостью электрического разряда*, когда эти электроды расположены друг от друга на расстоянии длины свободного пробега проекции молекул, которые под воздействием электродвижущей силы могут отделиться и отойти от горячего отрицательного электрода.

Нужно заметить, что в рассмотренной выше статье, Флеминг затронул вопрос появления эффекта Эдисона при питании электроламп переменным током. Он отмечает, что в этом случае гальванометр, включенный между изолированной пластиной и любой клеммой лампы, показывает, что отрицательное электричество течет от пластины через гальванометр к клемме лампы. Если лампа имеет плохой вакуум, то отрицательное электричество течет от пластины через гальванометр к положительной клемме лампы, а отрицательное электричество течет к пластине через гальванометр от отрицательной клеммы лампы.

Опубликованные результаты исследований Флеминга не внесли полной ясности в выяснении причины появления налета в электрических лампах, и тогда он решил перейти от теоретических умозаключений к экспериментальным. Дж. А. Флеминг провел серию экспериментов с лампами, содержащими угольные нити накала, которые ему дал Т. Эдисон, когда посетил его лабораторию в США, рис. 19. Основной целью его экспериментов было дальнейшее изучение эффекта Эдисона. Результатом его изысканий стала опубликованная в 1896 г. объемная 50-страничная статья в журнале *Proceedings of the Physical Society of London* под названием «Дальнейшее исследование эффекта Эдисона в лампах накаливания» (*A Further Examination of the Edison Effect in Glow Lamps*) [21]. По словам Флеминга, Прис собрал ряд очень интересных фактов, в результате которых был только описан общий характер явления. Однако информация, полученная таким образом, поставила много новых вопросов для дальнейших исследований.



Рис. 19. Лампа с эффектом Эдисона, сделанная в 1885 г. для профессора Флеминга [22].

Fig. 19. Edison effect lamp made in 1885 for Professor Fleming [22]

В намечаемых исследованиях Флеминг намеревался, помимо прочего, подтвердить и переосмыслить экспериментальные результаты, полученные Присом, а также рассмотреть возникшие новые проблемы, которые не были ранее известны.

Для выяснения природы наблюдаемого эффекта в лампах накаливания, имеющих изолированный провод или пластину и помещенных в вакуум, было проведено 29 экспериментов [21]. В экспериментах исследовались лампы с различного вида дополнительными электродами в баллоне электрической лампы.

Соединив дополнительный электрод с минусом батареи накала, Флеминг заметил, что бомбардировки наэлектризованных частиц не происходит. Исследователь обратил внимание и на другой факт: если металлический электрод выполнен в виде пластины и соединен с плюсом накальной батареи, то в зависимости от его расположения относительно нити накала изменяется интенсивность потока частиц. Положение металлической пластины относительно положительного вывода лампы, а также расстояние между ними оказывают наибольшее влияние на величину анодного тока. Показания гальванометра, включенного между дополнительным электродом и положительным полюсом нити накала, очень сильно зависят от размеров и положения металлической пластины. Анодный ток в этом случае резко уменьшается, если площадь поверхности пластины (дополнительный электрод) очень маленькая или когда пластина установлена ребром к нити накала, рис. 20.

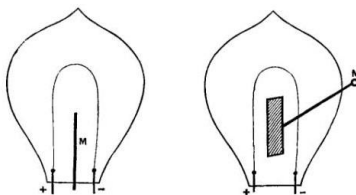


Рис. 20. Влияние положения дополнительного электрода на величину анодного тока в двухэлектродной электрической лампе.

Fig. 20. Influence of the position of the additional electrode on the value of the anode current in a two-electrode electric lamp

Работа Флеминга может служить образцом в проведении экспериментальных исследований. В ней приводится четкая методика проведения эксперимента, в частности, получение данных, их обработка и представление в виде таблиц и графиков. В пяти экспериментах (№№ 1, 2, 3, 11 и 14) построены вольтамперные характеристики (ВАХ) диодной пары: нити

накала и дополнительного электрода, подключенного к положительной клемме нити накала.

В статье Флеминг приводит описание проведенных экспериментов и констатирует факты увиденного. Только в конце статьи он отмечает, что отрицательный электрический ток может протекать через пустое пространство между раскаленным углем и металлической пластиной, то есть от горячего углерода к более холодной металлической пластине, но не в обратном направлении. Эксперименты также подтвердили гипотезу Дж. Дж. Томсона о том, что газы или, по крайней мере, некоторые газы в разреженном состоянии являются очень хорошими проводниками, и отсюда следует, что одна из существенных преград для проводимости через вакуумную лампу связана с электродами и может быть в значительной степени устранена путем нагревания катода до определенной температуры накаливания.

Эксперимент № 27 был проведен с лампой Эдисона с питанием от переменного тока. Исследовалась электрическая лампа с углеродной нитью в форме подковы, рис. 20. Под нитью, перпендикулярно ее плоскости, располагалась платиновая пластина размером $2,5 \times 1,5$ см, которая была приварена к платиновой проволоке, запаянной через боковую часть колбы. Лампа при работе в условиях нормальной температуры при напряжении 40 В потребляла 3,7 А. В эксперименте лампа питалась переменным током с частотой 80—100 Гц. При подключении миллиамперметра между любыми электродами и средней пластиной через гальванометр протекал непрерывный электрический ток. Направление этого тока было таким, что позволило обнаружить течение положительного электричества от любой клеммы лампы к средней пластине лампы. Другими словами, непрерывный ток отрицательного электричества протекал от средней пластины к любому из двух выводов лампы, а именно к тому выводу, к которому был присоединен другой конец гальванометра. Каждая ветвь углеродной нити периодически на мгновение становилась положительной или отрицательной, исходя из характера переменного тока. В этом случае наблюдается односторонний эффект тока, протекающего между средней пластиной и положительной ветвью, когда ток протекает через углеродную нить. В данном случае протекающий ток является постоянным, и он в равной степени существует между средней пластиной и обоими выводами лампы. Это только то, что можно было ожидать. Отсюда вывод: при питании лампы Эдисона переменным током имеет место однонаправленный электрический ток между нитью накала и дополнительным электродом, как и при питании ее постоянным током.

11. Исследования эффекта Эдисона при переменном токе

Факт наличия эффекта налета при переменном токе в лампах Эдисона, установленный Флемингом, был также подтвержден сотрудниками лаборатории Т. Эдисона. В феврале 1897 г. инженер лаборатории Эдисона, Дж. Хауэлл (John White Howell, 22.12.1857—28.07.1937, рис. 21) выступил на заседании с докладом “Conductivity of incandescent carbon filaments and the space surrounding them” (Проводимость углеродных нитей накаливания и окружающего их пространства) [23]. Работа была проделана в лаборатории Эдисона в сотрудничестве с другим инженером Эдисона, А. Е. Кеннелли (Arthur Edwin Kennelly, 17.12.1861—18.06.1939, рис. 21).

В опубликованной статье рассматривались особенности эффекта Эдисона, которые возникают в лампах при ярко выраженном «голубом свечении» и утверждается, что наличие голубого свечения указывает на прохождение электрического тока через пустое пространство.

Эта статья примечательна тем, что в ней впервые показано, что токи в несколько миллиампер могут протекать через пространство при небольших напряжениях. Хауэлл отмечает, что он измерил пустотные токи в обычной углеродной лампе накаливания, и они оказались более 25 ампер, что было достаточно для расширения платиновых вводных проводов и разрушения стекла.

Хауэлл и Кеннелли установили, что оба конца нити накала бросают белую тень на стеклянный баллон электролампы, если для ее нагрева используется переменный ток и в этом случае «эффект Эдисона» имеет место независимо от того, к какому концу нити накала подключен дополнительный электрод. Они также обнаружили, что ток на собирающем электроде был один и тот же при подключении его к любому концу нити накала.

Экспериментируя с одной из ламп, Джон У. Хауэлл в лаборатории Харрисона¹⁶ (Harrison laboratory), обнаружил, что ее можно использовать и в качестве выпрямителя. При обсуждении статьи профессор А. Э. Кеннелли сказал: «Интересно отметить, что вакуумная трубка, в самом широком смысле этого слова, способна преобразовать... переменный ток в постоянный ток». Следует заметить, что до этого времени никто, кроме Эдисона, не продемонстрировал никакого технического применения рассматриваемого эффекта. Вероятно, что Эдисон сделал это, прежде всего, с целью получения патентной защиты.

¹⁶ В 1882 г., через 6 лет после того, как лаборатория Эдисона в Менло-Парке усовершенствовала лампу накаливания, Edison Light Works открыла свой завод на Берген-стрит и Пятой авеню в Харрисоне, Нью-Джерси (Harrison NJ). К 1912 г. на этом единственном заводе работало 4000 человек. В 1929 г. завод был свернут, и его производство было перенесено на другие заводы в стране.

Практическое использование лампы Эдисона с дополнительным электродом в качестве преобразователя переменного тока отмечено в статье, опубликованной в докладах AIEE [23], однако этот факт был принципиально проигнорирован Эдисоном. Он был фанатичным человеком постоянного тока и ничего не хотел иметь общего с сетью переменного тока или выпрямителями!

Хауэлл и Кеннелли по-прежнему рассматривали анодный ток в термоэлектрической лампе как поток отрицательно заряженных молекул углерода, хотя электрон уже был открыт.

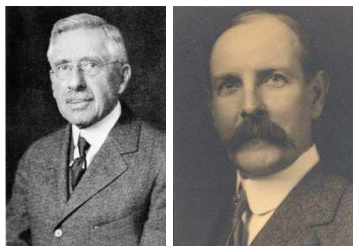


Рис. 21. Инженеры лаборатории Эдисона Дж. Хауэлл и Артур Кеннелли (слева направо).

Fig. 21. Edison Lab Engineers John Howell and Arthur Kennelly (left to right)

По всей видимости, статья Дж. Хауэлла была последней публикацией по исследованиям эффекта Эдисона, который проявился в углеродных лампах накаливания. Что касается изобретательской стороны вопроса, то Флеминг в 1904 г. подал заявку на получение патента на колебательный клапан только для радиоприема, более известный как клапан Флеминга. Это была выпрямительная (детекторная) лампа. Позже он отказался ее использовать на низких частотах, возможно, из-за статьи Хауэлла.

12. Исследования Юлиуса Эльстера и Ганса Гейтеля

Эффект Эдисона с момента его открытия и в течение последующих двадцати лет изучался многими учеными, особенно тщательно исследовался электрический ток, протекающий между нитью накала и анодом.

Наиболее заметные результаты по этой проблеме были получены в Германии. Два преподавателя гимназии в немецком городе Вольфенбюттеле Юлиус Эльстер (Julius Elster, 24.12.1854—8.04.1920) и Ганс Гейтель (Hans Friedrich Geitel, 16.07.1855—15.08.1923), начиная примерно с 1880 г. провели ряд масштабных исследований, рис. 22. Они очень подробно изучили электрическую проводимость воздуха в непосредственной близости от раскаленных металлов. Результаты своих исследований они опубли-

ликовали в серии статей в журнале Wiedemann's Annalen за период с 1882 по 1889 гг.

Первые четыре статьи Эльстера и Гейтеля опубликованные 1882—1885 гг. посвящены характеристикам пламени, особенно в отношении его несимметричной проводимости, и частично подтверждают более ранние работы, выполненные в этом направлении.

Последующие их статьи относятся к исследованию электрического тока, возникающего между накалинной металлической или углеродной нитью и холодным электродом. В большинстве своих экспериментов они помещали металлическую пластину рядом с металлической нитью или углеродной нитью внутри стеклянной колбы и изучали заряд, получаемый пластиной при различных условиях температуры нити накала и давления газа, рис. 22. Пластина была подключена к электроскопу. Они обнаружили, что в большинстве газов нить накала имеет тенденцию выделять положительное электричество, когда она находится при красном калении, однако при очень высоких температурах она выделяет отрицательное электричество активнее, чем положительное. Когда колба содержала высокий вакуум, такой, насколько это было возможно в те годы, то тенденция к выделению положительного электричества значительно уменьшалась и не сохранялась, в то время как тенденция к выделению отрицательного электричества была более сильной, чем в других случаях [24].

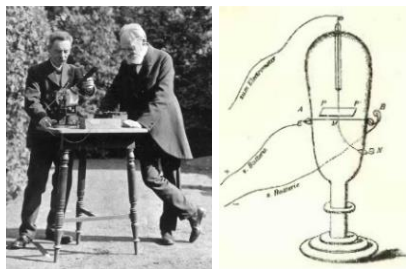


Рис. 22. Юлиус Эльстер и Ганс Гейтель (слева направо) проводят эксперимент в саду дома Эльстера (1893 г.). Фото: архив Фрике (Fricke, 1992). Справа: электрическая лампа в эксперименте Ю. Эльстера и Г. Гейтеля по установлению однонаправленного характера, протекающего электрического тока в вакууме между нитью накала и анодом (1887 г.).

Fig. 22. Julius Elster and Hans Geitel (from left to right) conduct an experiment in the garden of Elster's house (1893). Photo: Fricke Archive (Fricke, 1992). Right: an electric lamp in an experiment by J. Elster and H. Geitel to establish a unidirectional nature of the flowing electric current in a vacuum between a filament and an anode (1887)

Вообще говоря, Эльстер и Гейтель обнаружили, что металлический провод выделяет положительное электричество при температуре, близкой

к красному калению (550—650 °C) или ниже нее, а при более высоких температурах происходит выделение отрицательного электричества, которое быстро увеличивается количественно по мере повышения температуры, и поэтому изолированная пластина заряжается от отрицательного заряда. В то же время было обнаружено, что углеродные нити выделяют отрицательное электричество при любых температурах.

В статье [25], опубликованной в 1889 г., была описана серия экспериментальных исследований, в которой авторы рассмотрели случай возбуждения электричества при контакте газов и накаливаемых тел для случая, когда газы находились под давлением одной атмосферы или под давлением менее 10 мм рт. ст. В этих экспериментах была предпринята попытка исследовать явление при очень незначительных давлениях. В этом случае, в соответствии с предыдущими результатами, при использовании гальванических ламп накаливания с нитью из платины толщиной более 0,2 миллиметра, кислород имеет положительный заряд даже при самом высоком разрежении, а водород — отрицательный.

Воздух, водяной пар, сера и пары фосфора, будучи чистыми, электризуются положительно, но более слабо, чем кислород, тогда как ртуть, напротив, остается нейтральной. Продукты разложения жировых паров, которые при использовании смазанных запорных кранов и соединений проникают в приемник ртутного насоса, приобретают большей величины отрицательные заряды, чем водород. При непрерывном накаливании проводов происходит изменение молекулярной структуры разреженных газов, а также самих проводов, особенно если они тоньше 0,2 мм.

Природа электродов имеет небольшое влияние. Аналогичным образом окклюзия¹⁷ газов проволокой, а также отделение твердых частиц при воспламенении не играют существенной роли. Только при использовании накаливаемых углеродных нитей происходит ионизация газов, поглощенных углеродом. Углеродные нити накаливания в электролампе всегда отрицательно электризуют частицы, выпускаемые в окружающую среду.

Лампа накаливания из платины, иридия, палладия и железной проволоки существенно не отличается от лампы из платиновой проволоки. Электродвижущая сила зависит от действия внешних магнитных сил. В разреженном водороде на нее влияет возникновение явления Холла, существование которого не всегда можно доказать с той же уверенностью, как в кислороде. В этом газе при воздействии на него магнита происходит увеличение его положительного заряда. В водороде магнитное поле при-

¹⁷ Окклюзия (англ. *occlusion* от лат. *occlusio* «сокрытие») — термин, который указывает на какое-либо состояние, которое обычно открыто, а в определенный момент времени полностью закрыто.

водит к уменьшению его отрицательного заряда, а при электронизации возможна даже смена знака, в то же время положение полюсов оказывает незначительное влияние. Явления полярной проводимости проявляются в разреженных газах, подобных газам нормальной плотности. Это связано с тем, что электричеству всегда легче разряжать, знак которого противоположен тому, который возбуждается в процессе накаливания в газе. В магнитном поле проводимость газа в контакте с накаливаемым проводом увеличивается для отрицательного электричества. Здесь также положение полюсов оказывает определяющее влияние.

В последней части статьи для объяснения однополярной проводимости используется теория, впервые сформулированная английским физиком Артуром Шустером (нем. *Franz Arthur Friedrich Schuster*; 12.09.1851—17.10.1934) [26]. Эта теория основана на диссоциации молекул газа при контакте с раскаленным телом.

В заключение авторы указывают на связь своих исследований с исследованиями своих соотечественников физиков Гольдштейна (нем. *Gotthilf-Eugen Goldstein*, 05.09.1850—26.12.1930) и Гитторфа (нем. *Johann Wilhelm Hittorf*, 27.03.1824—28.11.1914) по прохождению электричества через разреженные газы с использованием накаливаемых электродов. Они связывают результаты рассмотренных экспериментов с электродвижущей силой, возникающей при накаливании провода.

В последней работе из этой серии исследований приводится описание дальнейших экспериментов с различными формами электроламп [27].

Исследования Эльстера и Гейтеля носили чисто научный характер. Они позволили прояснить неизвестные стороны эффекта Эдисона, хотя и не имели прямого технического приложения, в частности, для выпрямления переменного тока или использования в каких-либо практических целях вакуумной лампы с угольной нитью, имеющей внутри в колбы металлическую пластину.

Нужно отметить, что немецкие физики-экспериментаторы Юлиус Эльстер и Ганс Гейтель были выдающимися учеными, несмотря на то, что они работали в гимназии, а не в научном заведении. За свою научную карьеру они опубликовали около 200 статей, 72 из которых были посвящены атмосферным явлениям. Их научные исследования относятся к проводимости газов, термоэлектронной эмиссии, ионизации в атмосфере, фотоэффекту, радиоактивности. В 1910 г. они внедрили в технику фотоэлементы. Они несколько раз были номинированы на Нобелевскую премию по физике, но так ее и не получили.

13. Заключение

Изобретение Т. Эдисоном двухэлектродной вакуумной электронной лампы (1883 г.) опередило научно-технический прогресс того времени. Еще не были открыты электромагнитные волны Г. Герцем (1888 г.) и не была изобретена система беспроводного телеграфа А. С. Поповым (1895 г.). Другими словами, вообще отсутствовала научно-техническая область, которой был бы необходим этот радиокомпонент.

Представляет интерес то, что вакуумный диод Т. Эдисона был законченной конструкцией и его можно было сразу использовать в радиоприемниках в качестве детектирующего элемента радиосигнала. Если бы Г. Маркони обратил внимание на эту двухэлектродную лампу, то мог бы ее использовать в своих радиоприемниках еще до появления вентиля Флеминга, когда проводил эксперименты по приему радиосигналов на большие расстояния.

В 1933 г. в США отмечался 50 летний юбилей изобретения вакуумного диода Эдисона. В связи с этим американский радиотехнический журнал Radio-Craft опубликовал статью президента Нью-Йоркского электротехнического общества (President of the New York Electrical Society) господина Ореста Г. Колдуэлла (Dr. Orestes H. Caldwell) и доктора Клейтона Н. Шарпа (Dr. Clayton H. Sharp), в которой была приведена конструкция двухконтурного радиоприемника компании National Broadcasting Co. с установленной в нем оригинальной лампой Эдисона. Схема радиоприемника приведена на рис. 23 [28].

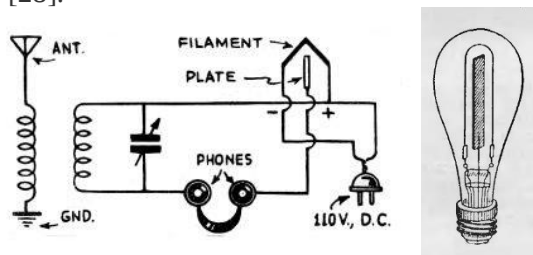


Рис. 23. Принципиальная схема радиоприемника и общий вид двухэлектродной лампы Эдисона, использованной в этой схеме. 1933 г.

Fig. 23. Schematic diagram of the radio receiver and a General view of the two-electrode Edison lamp used in this scheme. 1933

К особенностям этого радиоприемника следует отнести то, что для питания нити накала требовалось постоянное напряжение величиной 110 В. Это и не удивительно, так как базой для создания вакуумного диода Эдисона послужила обычная осветительная лампа, применявшаяся в быту. В конструкции радиоприемника использовалась двухэлектродная лампа

Эдисона образца 1885 г., в которой в качестве тела накала использовалась карбонизированная бамбуковая нить, рис. 24.

Реальный небольшой радиоприемник на лампе Эдисона успешно принимал на внешнюю антенну сигналы от радиостанции WJZ¹⁸ на частоте 1300 кГц (230,77 метра). Слушатели утверждали, что прослушивание было таким же хорошим, как и в обычных ламповых радиоприемниках. Это явилось доказательством пригодности для радиоприема двухэлектродной лампы Эдисона, рис. 24.

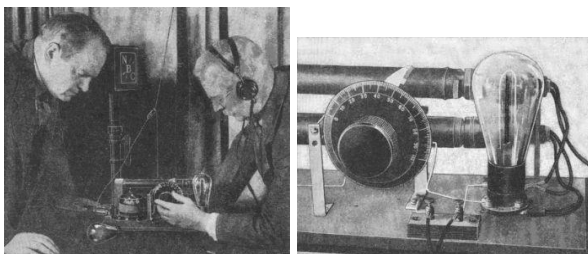


Рис. 24. Общий вид радиоприемника на двухэлектродной лампе Эдисона образца 1885 г. и прием радиосигналов на этот радиоприемник господином О. Г. Колдуэллом и доктором К. Н. Шарпом. 1933 г.

Fig. 24. General view of a radio receiver on a two-electrode Edison lamp of the 1885 model and reception of a radio signals to this radio receiver by Mr. O. H. Caldwell and Dr. C. H. Sharp. 1933

Лишь спустя годы, по прошествии почти 10 лет Дж. А. Флеминг использовал свойство выпрямления двухэлектродной лампы для обнаружения (демодуляции) радиосигналов, когда радиосвязь уже завоевывала земные пространства. Александр Попов 12 марта 1896 г. передал по радиоволнам первое в мире радиосообщение «Генрих Герц» азбукой Морзе на расстояние 250 метров. Спустя три года, в 1899 г., Гульемо Маркони с помощью беспроводного телеграфа передал радиосообщение сначала через Ла-Манш, а в 1901 г. и Атлантический океан. Эксперименты ученых и инженеров в области радиотехники показывали, что для прогресса в радиосвязи необходим стабильный и устойчивый в работе детектор взамен когерера и кристаллического детектора с пружинкой и кристаллом. Этим требованиям как раз и отвечало изобретение Дж. А. Флеминга, которое появилось вовремя.

Не попадись на глаза Томасу Эдисону лампа с угольной нитью, открытие нового эффекта могло состояться значительно позже. Эффект

¹⁸ Нью-Йоркская широковещательная радиостанция с позывным WJZ основана в 1922 г. как WEAR (радиовещательное подразделение Westinghouse Electric Corporation) и принадлежала Entercom (Entercom Communications Corporation). 29 августа 1931 г. станция стала филиалом NBC Red Network.

Эдисона с конца 20-х годов прошлого века чаще стали называть термоэлектронной эмиссией, которая стала концепцией большинства электронных ламп. Эдисону не удалось войти в историю как изобретателю системы радиосвязи, но благодаря многим его открытиям и изобретениям появились важнейшие устройства в области радиотехники, в частности, был создан вакуумный диод.

Список литературы

1. Fay Mons Du. A Letter from Mons. Du Fay, F. R. S. and of the Royal Academy of Sciences at Paris, to His Grace Charles Duke of Richmond and Lenox, concerning Electricity. Translated from the French by T. S. M D // Philosophical Transactions of the Royal Society (1683–1775). 1733–1734. Vol. 38. P. 258–266.
2. Website “History and Philosophy in Science Teaching”. Charles d   Fay – Explorative Experiments: Describing and Explaining Electrical Phenomena. URL: <http://hipstwiki.wikifoundry.com/page/Charles+d  Fay+--+Explorative+Experiments%3A+Describing+and+Explaining+Electrical+Phenomena> (24.03.2020).
3. Becquerel Edmond. Recherches sur la conductibilit     lectrique des gaz    des temperatures elevees // Comptes Rendus. 1853. Vol. 37. P. 20–24.
4. Becquerel Edmond. Recherches sur la transmission de V  lectricit   au travers des gaz    des temperatures elevees // Annales de Chimie. 1853. Vol. 39. P. 355–402.
5. Guthrie Frederick. On a Relation between Heat and Electricity // Philosophical Magazine and Journal of Science. 4th series. April 1873. Vol. 45. P. 308–309.
6. Guthrie Frederick. On New Relation between Heat and Electricity // Proceedings of the Royal Society of London. 31 December 1873. Vol. 21. P. 168–169.
7. History of Technology. Edited by Graham Hollister-Short and Frank A. J. L. James. Mansell, London & New York. 1991. Vol. 13. P.82–85.
8. Caricature of Silvanus Phillips Thompson (1851–1916) and Frederick Guthrie (1833–1886). URL: <https://prints.royalsociety.org/collections/scientific-instruments-diagrams-art-prints/products/caricature-of-silvanus-phillips-thompson-1851-1916-and-frederick-guthrie-1833-1886-rs-9260> (24.03.2020).
9. Hollister-Short Graham, James Frank. History of Technology Vol. 13. New York. Bloomsbury Academic.2016. P.82-85.
10. Johnson J. B. Contribution of Thomas A. Edison to Thermionics // American journal of physics. December 1960. Vol. 28. Num. 9. P. 764–773.
11. Edison T. A. Electrical indicator. US307031. Patented Oct. 21, 1884. Applications field November 15, 1883.
12. Явления в лампе Эдисона (Engineering, 12 December 1884. P. 553). В сб. оригинальных статей и материалов. Из предыстории радио. Сост. проф. С. М. Рытов. Под ред. акад. Л. И. Мандельштама. М.—Л. : Изд. АН СССР, 1948. С. 366.
13. The First industrial application of electronics? Sprague, Frank J. : Letter to W. J. Hammer, dated December 27, 1883 // Electronics. 1933. No. 1 P. 15.
14. Houston Edwin J. Notes on Phenomena in Incandescent Lamps // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers (Philadelphia). May 1884 – October 1884. Vol. 1. P. 2–8.
15. Preece W. H. On Peculiar Behavior of Glow-Lamps When Raised to High // Proceedings of the Royal Society of London. 01 January 1885. Vol. 38. Issue 235–238. P. 219–230.

16. Прис Вильям Генри. XLVIII. Об особом поведении ламп накаливания при сильном накале. В сб. оригинальных статей и материалов. Из предыстории радио. Сост. проф. С. М. Рытов. Под ред. акад. Л. И. Мандельштама. М.—Л. : Изд. АН СССР, 1948. С. 365—367.
17. Fleming J. A. VI. On a phenomenon of molecular radiation in incandescence lamps // Philosophical Magazine and Journal of Science. July 1, 1883. Vol. 16. No. 97. P. 48–49.
18. Fleming J. A. XVI. On molecular shadows in incandescence lamps // Philosophical Magazine and Journal of Science. August 1, 1885. Vol. 20. No. 123. P.141–144.
19. Fleming J. A. XXXI. On a Phenomenon of Molecular Radiation in Incandescence Lamps // Proceedings of the Physical Society of London. January 1, 1882. Vol. 5. P. 283–285.
20. Fleming J. A. II. On Electrical Discharge between Electrodes at different Temperatures in Air and in High Vacuum // Proceedings of the Royal Society of London. January 9. 1890. Vol. 47. P. 118–126.
21. Fleming J. A. III. A further examination of the Edison effect in glow lamps // Philosophical Magazine and Journal of Science. July 1, 1896. Vol. 42. No. 254. P. 52–102.
22. Edison Effect. Website “The National Valve Museum”. URL: <http://www.r-type.org/exhib/aag0124.htm> (07.04.2020).
23. Howell J. W. Conductivity of Incandescent Carbon Filaments, and of The Space Surrounding Them // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Jan. 1897. Vol. XIV, Issue 1. P. 25—42.
24. Elster Julius and Geitel Hans. Ueber die Electrisirung der Gase durch glühende Körper // Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie. 1887. Band 31. P. 109–126.
25. Elster, Julius and Geitel, Hans. Ueber die Electricitätserregung beim Contact verdünnter Gase mit galvanischem glühendem Drahten // Wiedemann's Annalen der physik und Chemie. 1889. Band 37. P. 315–329.
26. Schuster, A. Experiments on the discharge of electricity through gases // Proceedings of the Royal Society of London. Vol. 37. 1884. P. 317–339.
27. Elster Julius and Geitel Hans. Einige Demonstrationversuche zum Nachweis einseitiger Electricitätsbeeinflussungen im verdünnten Gasen bei Anwendung glühender Electroden // Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie. 1889. Band 38. P. 27–39.
28. 50-year-old lamp used in receiver// Radio-Craft. 1933. No. 2.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Information about the authors

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.