

Севастопольский государственный университет

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infocommunications
and Radio Technologies

**2021
Том 4
№ 1**

2021
Vol. 4
No. 1

Sevastopol

Почетный главный редактор

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

Главный редактор

д. т. н., проф. ГИМПИЛЕВИЧ 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)

Сайт журнала: <https://www.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/1268-njirt>

Подписано к печати 17.12.2021

Формат 64×90/16. Усл. печ. л. 4,38. Уч.-изд. л. 5,2. Тираж 200 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)

Address:

Sevastopol State University

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

E-mail: icrt.mail@gmail.com

Website: <https://www.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/1268-njrt>

Содержание — Contents

Физические науки (1.3) — Physical sciences

- Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г.** Необычное вспышечное явление
мазера водяного пара в протозвездном источнике IRAS 16293-2422
A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, An unusual flare phenomenon
of a water vapor maser in the protostellar source IRAS 16293-24225

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2) — Electronics, photonics, instrumentation and communications

- М. V. Davidovich, G. N. Kolesov, and A. K. Kobets,** On forms of integral and
integro-differential equations of vibratory antennas and convergence of algorithms
Давидович М. В., Колесов Г. Н., Кобец А. К. О формах интегральных
и интегро-дифференциальных уравнений вибраторных антенн
и сходимости алгоритмов их расчета 17
- Чернега В. С., Арбузов И. А.** Влияние конструктивных особенностей волоконного
тулиевого лазера на клинические характеристики литотриптера
V. S. Chernega and I. A. Arbuzov, Influence of design features of thulium fiber laser
on clinical characteristics of lithotripter 31

История науки и техники (5.6.6) — History of science and technology

- Пестриков В. М.** Генезис аудиона Ли де Фореста
V. M. Pestrikov, The genesis of Lee de Forest audion 42

УДК 524.3

Необычное вспышечное явление мазера водяного пара в протозвездном источнике IRAS 16293-2422

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

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация

² Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН
Москва, Российская Федерация
volvach@bk.ru

Получено: 15 сентября 2021 г.

Отрецензировано: 16 сентября 2021 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2021 г.

Аннотация: Получены и проанализированы данные длительного мониторинга молодого протозвездного источника IRAS 16293-2422, имеющего протопланетные газово-пылевые диски. Необычная по форме и продолжительности вспышка, длящаяся около полугода, состоит из шести коротких вспышек мазера, находящихся в ненасыщенном состоянии. Вспышки находятся на вершине седьмой, более продолжительной вспышки, которая своим излучением инициирует мазеры шести отдельных вспышек. Получены прямые доказательства гипотезы активации мазеров воды за счет увеличения длины пути накачки мазеров при каскадном усилении в мазерных пятнах, находящихся на луче зрения к наблюдателю. В связи с полученными данными рассмотрена структурная конфигурация источника.

Ключевые слова: звездные образования, звезды с экзопланетами, молекулы, радиолинии, водные мазеры.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Необычное вспышечное явление мазера водяного пара в протозвездном источнике IRAS 16293-2422 // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 1. С. 5—16.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, А. Е. Необычное вспышечное явление мазера водяного пара в протозвездном источнике IRAS 16293-2422 / А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач, М. Г. Ларионов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 1. — С. 5—16.

An unusual flare phenomenon of a water vapor maser in the protostellar source IRAS 16293-2422

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

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

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

Received: September 15, 2021

Peer-reviewed: September 16, 2021

Accepted: September 16, 2021

Abstract: Long-term monitoring data of the young protostellar source IRAS 16293-2422, having protoplanetary gas-dust disks, were obtained and analyzed. An uncommon in shape and duration flare, lasting about six months, consists of six short maser flares in an unsaturated state. The flares are at the top of the seventh, longer flare, which by its emission initiates the masers of six separate flares. Direct evidence has been obtained for the hypothesis of activation of water masers due to an increase in the length of the pumping path of masers during cascade amplification in maser spots located in the line of sight to the observer. In connection with the data obtained, the structural configuration of the source is considered.

Keywords: star formations, stars with exoplanet, molecules, radio lines, water masers.

For citation (IEEE): A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, “An unusual flare phenomenon of a water vapor maser in the protostellar source IRAS 16293-2422”, *Infocommunications and Radio Technologies*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 5–16.

1. Введение

После обнаружения космических мазеров начался процесс изучения протозвездных образований, состоящих из низкотемпературных газа и пыли, в которых под действием агентов возбуждения возникает мазерное излучение. Важным направлением является исследование протопланетных дисков у звезд, которые имеют экзопланеты, от стадии молекулярных облаков в межзвездной среде до звезд с планетными системами. Особенно ценную информацию предоставляет мазерное излучение в радиолиниях, что дает нам важные сведения и о тех астрофизических объектах, с которыми они связаны. Мазерные линии и их связь с данными теоретических расче-

тов переноса излучения в этих линиях могут быть использованы для оценки физических параметров исследуемых объектов.

Молодая звездная система IRAS 16293-2422 (в дальнейшем — IRAS 16293), открытая уже более 30 лет назад, классифицируется исследователями как звездный источник класса «0», который имеет экзопланеты или образующие планетные пылевые диски [1—4]. Система представляет собой сложное комплексное образование, состоящее, возможно, из трех протозвезд массой около $2M_{\odot}$, вращающихся вокруг общего центра тяжести, включающая, кроме того, коллапсирующее облако размером 3000 АЕ и массой около $2M_{\odot}$. Интерферометрическими наблюдениями установлено существование вокруг двух протозвезд газово-пылевых дисков размерами 12 АЕ и менее 3.6 АЕ (IRAS 16293 A1 и A2), вращающихся по кеплерианским орбитам вокруг протозвезд [5]. A1 и A2 разделены расстоянием 40 АЕ и имеют период обращения около 530 лет. IRAS 16293B разделена расстоянием 800 АЕ от IRAS 16293 A1 и A2 [6]. Источник IRAS 16293 чрезвычайно активен и был отмечен тремя выбросами в двух направлениях, что говорит о присутствии активности двух протозвезд [7].

Возникновение мощного излучения мазера воды в IRAS 16293 указывает на наличие в нем для этого благоприятных условий, как с точки зрения температурного режима, так и плотности и степени ионизации. Хотя переход H_2O из стадии льда, впрессованного в пыль, в фазу водяного пара происходит при температуре около 130 К, ее недостаточно для эффективной работы «машины накачки мазера», основанной на столкновительно-столкновительных (CCr) процессах во вращательных переходах молекулах воды. Это происходит из-за высокого положения сигнальных уровней молекулы и необходимости иметь достаточную степень ионизации. Все это требует кинетических температур более 500 К. Обсуждение этого вопроса было начато нами в работе [8].

Одним из самых важных вопросов остается объяснение, что собой представляет источник первичной энергии, необходимой для активации мазера и конкретная физическая картина его реализации. В работе представлены новые уникальные данные мощного длительного вспышечного явления, произошедшего в IRAS 16293 в линии с радиальной скоростью около 6 км/с и анализ этого явления.

2. Наблюдения и обработка

22-метровый радиотелескоп в Симеизе был использован для наблюдений на частоте 22.235 ГГц $6_{16} - 5_{23}$ перехода мазера водяного пара в источнике IRAS 16293. Входные сигналы усиливались высокочувствитель-

ным СВЧ приемником и поступали на спектрально-поляриметрический радиометр с параллельным Фурье-спектральным анализатором, разрешение которого по частоте и радиальной скорости в линии H_2O составляло соответственно 8 и 2 кГц (0.105 и 0.03 км/с) [9]. Полуширина диаграммы направленности радиотелескопа (FWHM) составляла 2.5 угл. мин., чувствительность 13 Ян/К. Температура шума приемной системы в зависимости от погодных условий варьировалась в пределах 120—150 К. В собранные данные вносилась коррекция на атмосферное поглощение и изменения эффективной площади радиотелескопа от угла места.

3. Результаты

Наблюдения мазера воды в линии 6 км/с были выполнены в период с января 2019 г. по январь 2021 г. (рис. 1). Интервал между съемом данных был 1—2 дня. Было зафиксировано необычное мощное вспышечное явление, длившееся около полугода и состоящее из шести отдельных вспышек, каждая из которых длилась менее месяца. Вспышки частично накладывались друг на друга по времени, что могло указывать на то, что они возникли в мазерных пятнах, принадлежащих одному мазерному скоплению. Несмотря на сложную конфигурацию длительного вспышечного явления, можно попытаться восстановить физическую картину явления. Для этого мы используем спектральной-временной метод исследований, основанный на одновременном использовании мониторинговых и спектральных данных. Мониторинговые данные вспышечного явления в IRAS 16293 показаны на рис. 1, где отмечены все шесть мощных вспышек.

Необычное явление возникло с резкого увеличения спектральной плотности потока, которая превысила 10 кЯн. После этого рост потока продолжился возникновением следующей вспышки и был подхвачен третьей вспышкой, плотность потока которой достигла 22 кЯн. Подъем и спад плотности потока каждой вспышки происходил по экспоненте, что не противоречит свойствам мазеров, находящихся в ненасыщенном состоянии. Продолжительность каждой из вспышек составила 20—25 дней по уровню, составляющему половину плотности потока. Из интерферометрических данных известно (например, для ORION KL), что размер мазерных пятен находится в пределах 0.5—2 АЕ. Эту величину можно рассматривать только как верхний предел, ибо существует рассеяние излучения в межзвездной среде или вблизи самого источника [10].

В настоящее время еще недостаточно данных, чтобы ответить на вопрос являются ли указанные размеры типичными для всех источников мазера воды в различных скоплениях одного и того же источника и тем более

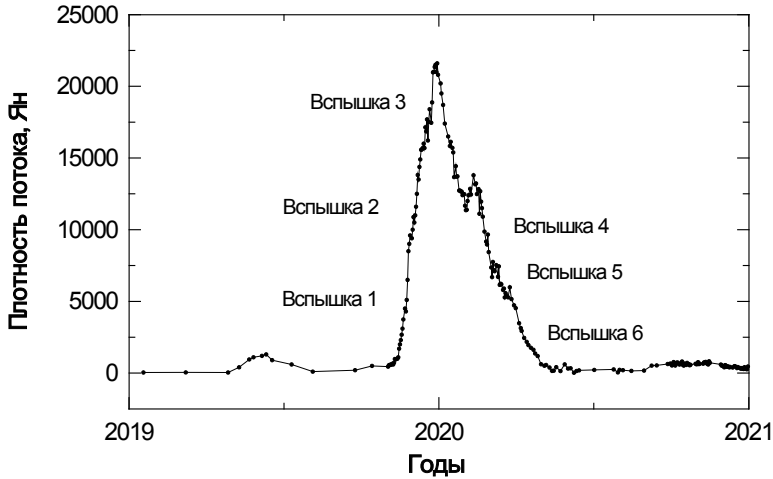


Рис. 1. Явление мощных вспышек вблизи радиальной скорости 6 км/с, произошедшее в IRAS 16293 с января 2019 по январь 2021 г.

Fig. 1. The phenomenon of powerful flares near a radial velocity of 6 km/s, which occurred in IRAS 16293 from January 2019 to January 2021

в различных объектах? Кроме того, одинаковы ли для всех источников скорости агентов, инициирующих мазерное излучение? Если ответ положителен, тогда продолжительность всех коротких мазерных вспышек, при которых мазеры находятся в ненасыщенном состоянии, должна быть одинакова во всех источниках. Для подтверждения или опровержения такой гипотезы необходимо иметь достаточное число похожих вспышек, зарегистрированных с высоким временным разрешением (как в нашем случае). Пока таких данных недостаточно и каждый подобный случай имеет важное значение для ответов на поставленные вопросы.

Но вернемся к рассмотрению нашего вспышечного явления. Если плотность потока вспышки растет и падает экспоненциально, то зависимость ширины линии от потока будет иметь зависимость, показанную на рис. 2 для вспышки 3. Спектр линии 6 км/с для вспышки 3 показан на рис. 3. Вид зависимости (рис. 2) предсказывается, когда мазер находится в ненасыщенном состоянии [11, 12]:

$$\Delta v = \Delta v_0 / [\sqrt{1 - \ln(S/S_0)}], \quad (1)$$

где Δv — полуширина линии радиальной скорости по уровню половины максимальной плотности потока, Δv_0 — тепловая полуширина радиальной скорости линии для максимального значения плотности потока вспышки $S_{\max}$, S — спектральная плотность потока, $G = \ln(S/S_0)$ — усиление мазера,

S_0 — входная плотность потока в мазерном компоненте. Мы имеем линейную аппроксимацию (best-fit line) для шести вспышек, описываемую выражением [13]:

$$1/(\Delta v)^2 = a + b \cdot \ln S, \quad (2)$$

где a, b являются коэффициентами. После преобразований выражений (1, 2)

$$1/\Delta v^2 = [(1 - \ln S_0) + \ln S]/(\Delta v_0)^2. \quad (3)$$

В данном соотношении

$$a = (1 - \ln S_0)/(\Delta v_0)^2, \quad b = 1/(\Delta v_0)^2. \quad (4)$$

Для v_0 и S_0 мы получим выражение:

$$\Delta v_0 = (1/b)^{1/2}, \quad \ln S_0 = 1 - a \cdot (\Delta v_0)^2. \quad (5)$$

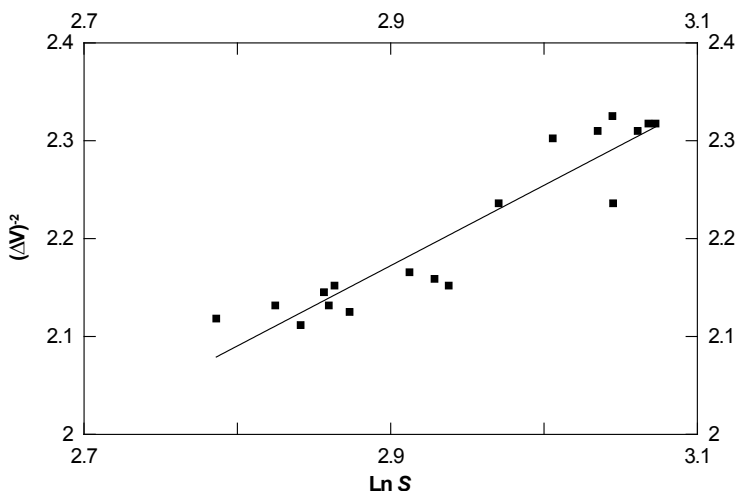


Рис. 2. Зависимость обратной величины квадрата полуширины линии от натурального логарифма плотности потока для вспышки 3 в IRAS 16293.

Fig. 2. Relationship of the reciprocal of the square of the half-width of the line on the natural logarithm of the flux density for flash 3 in IRAS 16293

В таблице 1 собраны значения параметров для всех вспышек. Для каждой вспышки, отмеченной на рис. 1, строилась зависимость, показанная на рис. 2 и по формулам 4, 5 определялись их параметры. Для всех вспышек зависимости $(\Delta v)^{-2}/\ln(S)$ аппроксимировались прямыми линиями с положительным наклоном, что указывало на сужение линии при экспоненциальном увеличении плотности потока вспышки. Мазер ведет себя подобным образом, когда находится в ненасыщенном состоянии. Т. о., для шести вспышек были получены основания считать их мазеры ненасыщенными.

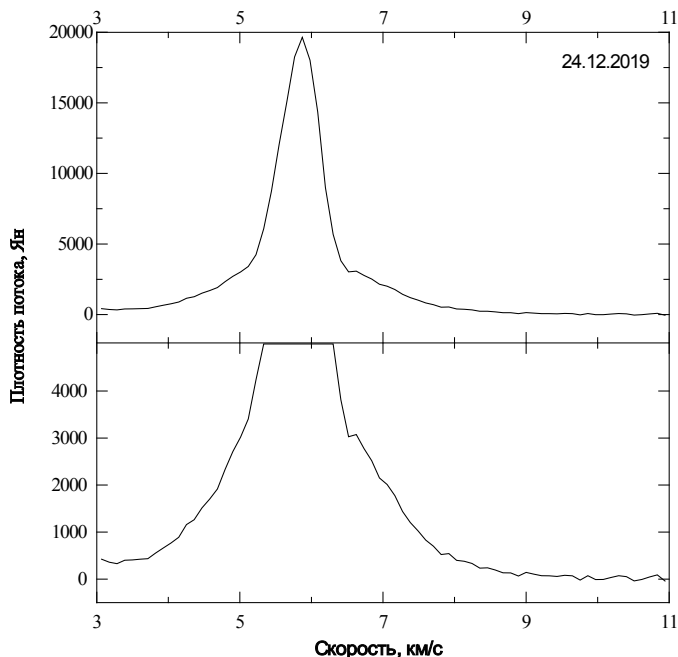


Рис. 3. IRAS 16293. Спектр линии вблизи 6 км/с для вспышки 3 (верхняя панель) и при ограниченном значении плотности потока 5 кЯн.

Fig. 3. IRAS 16293. Line spectrum near 6 km/s for flare 3 (top panel) and at a limited flux density of 5 kJy

Таблица 1. Характеристики вспышек в линиях около 6 км/с в IRAS16293

№ вспышки	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	Δv_0 , км/с
1	0.106	1.535	0.94	0.81
2	0.100	1.490	0.96	0.82
3	0.248	1.670	0.85	0.77
4	0.124	1.506	0.82	0.81
5	0.010	1.756	0.79	0.77
6	0.009	1.755	0.87	0.75
Σ/n and σ	0.102 ± 0.088	1.642 ± 0.243		0.79 ± 0.05
№ вспышки	S_0 , кЯн	S_{max} , кЯн	$G \ln(S_{max}/S_0)$	T_k , К
1	2.51	9.5	1.33	222
2	2.54	16.0	1.84	228
3	2.35	22.0	2.24	200
4	2.51	13.5	1.64	222
5	2.71	7.5	1.02	200
6	2.70	5.0	0.62	190
Σ/n and σ	2.55 ± 0.11 ($\Sigma/n = \text{Flare7}$)			210 ± 16

Примечания к таблице: a , b — коэффициенты в формуле 2, R — доверительная вероятность выбранной аппроксимации для зависимости $(\Delta v_0)^{-2}/\ln S$, Δv_0 — полуширина линии при $S_{\max}$ (максимальное значение плотности потока вспышки), S_0 — входной поток для лазерной конденсации, G — коэффициент усиления лазера, T_k — кинетическая температура газа в каждом лазерном образовании, полученная в рамках рассматриваемой модели по ширине линий.

4. Дискуссия

Анализируя приведенные данные для радиолиний вблизи лучевой скорости 6 км/с можно заметить, что линия каждой вспышки во время действия всех 6 вспышек находится на вершине другой, менее мощной, но более широкой линии (см., например, рис. 3). Это означает, что кроме шести отмеченных вспышек, существует седьмая, являющаяся базовой, поток которой, по-видимому, инициирует излучение всех вспышек. За время действия шести вспышек амплитуда седьмой меняется в пределах 1.5—4 кЯн. Ширина линии седьмой вспышки почти в 4 раза превышает ширины линий шести мощных вспышек. Это может свидетельствовать в пользу насыщенного состояния лазера этой вспышки.

Таблица 2. Измеренные характеристики вспышек вблизи скорости 6 км/с

№ вспышки	$\Delta v_{\text{измерен}}$, км/сек	T_k (измерен), К	$S_{\text{Вспышка7}}$ (измерен), кЯн	$\Delta v_{\text{Вспышка7}}$, км/с	$T_{k \text{ H}_2\text{O}}$ Вспышка7, К
1	0.70	165	2.8	2.72	2500
2	0.67	150	1.8	2.80	2650
3	0.69	160	3.4	2.75	2556
4	0.75	190	2.0	2.50	2110
5	0.66	147	1.8	2.12	1520
6	0.89	266	0.8	1.90	1220
Средняя величина и среднеквадратичная ошибка	0.73±0.09	180±24	2.1±0.90	2.46±0.38	2100±570

Примечания к таблице: $\Delta v_{\text{измерен}}$ — измеренная полуширина линии, T_k (измерен) — кинетическая температура газа в каждом лазерном образовании, измеренная по ширинам линий, $S_{\text{Вспышка7}}$ — плотность потока седьмой вспышки во время действия каждой из шести вспышек, $\Delta v_{\text{Вспышка7}}$ — полуширина линии седьмой вспышки во время каждой из шести вспышек, $T_{k \text{ H}_2\text{O}}$, Вспышка7 — кинетическая температура H_2O в лазерном образовании, ответственном за седьмую вспышку, рассчитанная по приведенной в [11] формуле.

Рассмотренная конфигурация вспышек приводит нас к заключению, что появление мощных вспышек ненасыщенных лазеров воды связано с перекрытием нескольких лазерных пятен, находящихся на луче зрения наблюдателя (радиотелескопа). Такую возможность мы уже указывали в работе [14], основываясь на факте, что входной поток S_0 , полученный для

мощной вспышки в W49N, значительно превышает все известные фоновые излучения. Именно насыщенный мазер с близкой лучевой скоростью подсвечивает мазерные пятна, находящиеся на луче зрения. Схожая мысль была высказана в [15] и получила реальное подтверждение в работе [8]. В таблице 2 приведены измеренные параметры всех вспышек.

Ширины линий были измерены методом вписывания кривой Гауса в наблюдательные данные (таблица 2) и получены также с использованием рассмотренной модели (таблица 1). Ширины линий в обоих случаях совпадают в пределах ошибок. В таблице 2 кинетические температуры приведены, как для H_2O , так и для газовой среды. Мы должны сделать вывод, что для эффективной работы мазерной «машины» требуются достаточно высокие уровни входного потока S_0 и высокие температуры H_2O .

Таблица 3. Величина смещения частоты вспышек

№ вспышки	$V_{\text{центральная частота}}$ км/с	$V_{\text{Вспышка 7}}$ км/с
1	5.90	5.95
2	5.86	5.96
3	5.87	5.92
$\Sigma/n, \sigma$	5.88±0.02	5.94±0.02
4	6.05	5.87
5	6.07	5.87
6	6.03	5.90
$\Sigma/n, \sigma$	6.05±0.02	5.88±0.02

Примечания к таблице: $V_{\text{центральная частота}}$ — центральная частота вспышки (в км/с), $V_{\text{Вспышка 7}}$ — центральная частота вспышки 7.

За время действия вспышек 1—6 происходит их частотное смещение по отношению к седьмой вспышке. Использование метода вписывания Гауссовой кривой в наблюдательные данные позволило численно оценить величину смещения. Полученные данные суммированы в таблице 3, из которой видно, что существуют две группы мазерных пятен со значительным различием частот линий на уровне 8 стандартных отклонений. Для вспышки 7 отклонения можно считать статистически не значимыми. Поэтому можно предположить наличие сдвигов по частоте линий вспышек 1—6 и считать, что вспышки произошли в разных мазерных пятнах, в каждом со своими радиальными скоростями и расположенными поблизости друг от друга, скорее даже в одном мазерном кластере. Если нам известны размеры мазерных пятен, то мы можем оценить скорость распространения агента, инициирующего мазерное излучение. Так, для размера 1 АЕ мы получим значение скорости $v_{\text{пер}} \approx 10^2$ км/с. При полученной высокой плотности мазерных пятен в кластере его размеры можно оценить как ≥ 7 АЕ (оценка снизу сделана по количеству мазерных пятен).

Структура мазерных пятен, полученная нами в IRAS 16293 в линии 6 км/с и линии 8 км/с [8], а также в W49N в линии –60 км/с [16], указывает на схожую структуру мазерных пятен в разных галактических источниках и общий способ возбуждения мощных вспышек мазера воды. Необходимо иметь несколько пятен на луче зрения к наблюдателю, среди которых инициатором мощных мазерных вспышек выступает мазер, находящийся в насыщенном состоянии, производящий высокий уровень входного потока для остальных мазеров, «работающих» в ненасыщенном режиме.

5. Выводы

1. В период 2019—2021 гг. выполнен детальный мониторинг мазера водяного пара в галактическом источнике с протопланетными системами IRAS 16293-2422.

2. Мощное комплексное вспышечное явление было зарегистрировано в линии около 6 км/с, продолжавшееся 6 месяцев и состоящее из отдельных мощных вспышек.

3. Используя спектрально-временной способ анализа наблюдательных данных, впервые удалось выделить отдельные вспышки из общего вспышечного явления.

4. Шесть мощных вспышек появлялись на вершине менее мощной, но более продолжительной седьмой вспышки, радиация которой инициировала излучение шести вспышек.

5. Шесть мощных вспышек, по-видимому, находились в ненасыщенном состоянии, в то время как седьмая «работала» в насыщенном режиме.

6. Была реализовывалась конфигурация мазерных пятен, при которой мощное мазерное излучение возникает за счет увеличения длины мазерной накачки при каскадном усилении.

Благодарности

Авторы признательны правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 в части обработки и анализа данных РТ-22.

Список литературы

1. Walker C. K., Lada C. J., Young, E. T. Maloney, P. R. Wilking B. A. Spectroscopic evidence for infall around an extraordinary IRAS source in Ophiuchus // *Astrophysical Journal*. 1986. Vol. 309. P. L47–L51.

2. Menten K. M., Serabyn E., Gusten R., Wilson T. L. Physical conditions in the IRAS 16293-2422 parent cloud // *Astronomy & Astrophysics*. 1987. Vol. 177. P. L57–L60.
3. Chen X., Arce H. G., Zhang Q. et al. SMA Observations of Class 0 Protostars : A High Angular Resolution Survey of Protostellar Binary Systems // *Astrophysical Journal*. 2013. Vol. 768, iss. 2. Article id. 110.
4. Tobin J. J., Sheehan P. D., Megeath S. T. et al. The VLA/ALMA Nascent Disk and Multiplicity (VANDAM) Survey of Orion Protostars. II. A Statistical Characterization of Class 0 and Class I Protostellar Disks // *Astrophysical Journal*. 2020. Vol. 890. Article id. 130.
5. Jørgensen J. K., van der Wiel M. H. D., Coutens A. et al. The ALMA Protostellar Interferometric Line Survey (PILS). First results from an unbiased submillimeter wavelength line survey of the Class 0 protostellar binary IRAS 16293-2422 with ALMA // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. Vol. 595. Article id. A117.
6. Maureira M. J., Pineda J. E., Segura-Cox D. M. et al. Orbital and Mass Constraints of the Young Binary System IRAS 16293-2422 A // *Astrophysical Journal*. 2020. Vol. 897. Article id. 59.
7. Kristensen L. E., Klaassen P. D., Mottram J. C. et al. ALMA CO J = 6–5 observations of IRAS 16293–2422 // *Astronomy & Astrophysics*. 2013. Vol. 549. Article num. L6.
8. Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G. Composite powerful short flare of water maser emission in IRAS 16293-2422 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. Vol. 507, iss. 1. P. L52–L56.
9. Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G. Unusually powerful flare activity of the H₂O maser feature near a velocity of –60 km s^{–1} in W49N // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. Vol. 496, iss. 1. P. L147–L151.
10. Johnston K. J., Knowles S. H., Sullivan W. T. An interferometer map of the water-vapor sources in W49 // *Astrophysical Journal*. 1971. Vol. 166. P. L21–L26.
11. Goldreich P., Kwan J. Astrophysical Masers. IV. Line Widths // *Astrophysical Journal*. 1974. Vol. 190. P. 27–34.
12. Volvach L. N., Volvach A. E., Larionov M. G. et al. Flaring water masers associated with W49N // *Astronomy & Astrophysics*. 2019. Vol. 628. Article num. A89.
13. Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov, M. G. et al. Powerful bursts of water masers towards G25.65+1.05 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 482, iss. 1. P. L90–L92.
14. Volvach L. N., Volvach A. E., Larionov M. G. et al. Unusual flare activity in the extreme-velocity –81 km s^{–1} water-maser feature in W49N // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 487. P. L77–L80.
15. Burns R. A., Orosz G., Bayandina O. et al. VLBI observations of the G25.65+1.05 water maser superburst // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. Vol. 491. P. 4069–4075.
16. Volvach L. N., Volvach A. E., Larionov M. G. Unusually powerful flare activity of the H₂O maser feature near a velocity of –60 km s^{–1} in W49N // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. Vol. 496. P. L147–L151.

Информация об авторах

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

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник 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.

Information about the authors

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

Larisa N. Volvach, PhD. 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.

On forms of integral and integro-differential equations of vibratory antennas and convergence of algorithms

M. V. Davidovich¹, G. N. Kolesov¹, and A. K. Kobets²

¹ *Institute of physics, Saratov State University
83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russian Federation
davidovichmv@info.sgu.ru*

² *Etna-Plus Co.
Saratov, 410040, Russian Federation*

Received: April 15, 2021

Peer-reviewed: September 16, 2021

Accepted: September 16, 2021

Abstract: *For dipole (vibratory) antennas we consider the forms of integral equations, their transformations and how it effects on convergence. The optically pumped carbon nanotubes were studied numerically.*

Keywords: *vibratory antenna, integral equations, CNT.*

For citation (IEEE): M. Davidovich, G. Kolesov, and A. Kobets, “On forms of integral and integro-differential equations of vibratory antennas and convergence of algorithms”, *Infocommunications and Radio Technologies*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 17–30.

УДК 524.3

О формах интегральных и интегро-дифференциальных уравнений вибраторных антенн и сходимости алгоритмов их расчета

¹ Давидович М. В., ¹ Колесов Г. Н., ² Кобец А. К.

¹ Институт физики, Саратовский государственный университет
Саратов, 410012, Российская Федерация

² ННФ «ЭТНА ПЛЮС»
davidovichmv@info.sgu.ru
Саратов, 410040, Российская Федерация

Получено: 15 апреля 2021 г.

Отрецензировано: 16 сентября 2021 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2021 г.

Аннотация: Для дипольных (вибраторных) антенн рассмотрены формы интегральных уравнений, их преобразования и влияние на сходимость. Численно исследованы углеродные нанотрубки с оптической накачкой.

Ключевые слова: вибраторная антенна, интегральные уравнения, углеродные нанотрубки.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Давидович М. В., Колесов Г. Н., Кобец А. К. О формах интегральных и интегро-дифференциальных уравнений вибраторных антенн и сходимости алгоритмов их расчета // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 1. С. 17—30.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Давидович, М. В. О формах интегральных и интегро-дифференциальных уравнений вибраторных антенн и сходимости алгоритмов их расчета / М. В. Давидович, Г. Н. Колесов, А. К. Кобец // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2021. — Т. 4, № 1. — С. 17—30.

1. Introduction

In 1888 H. Hertz have obtained the solution to the problem of a point electric dipole, and a decade later (in 1897) H. Pocklington published an article on the integral equation (IE) of a thin electric linear vibrator (LV) [1]. From this moment the countdown in the development of antenna theory and technology began. Further, other forms of IEs for the vibratory antenna (VA) were obtained by E. Hallen [2], then M. Leontovich and M. Levin [3], then L. Vainshtein,

P. Kapitsa and V. Fok [4, 5], L. Vainshtein [6–10], L. Vainshtein and V. Fok [11]. In a number of recent works [12–18] new modifications of the Pocklington IE are proposed, including those having the form of Fredholm IEs of the second kind, as well as those recorded with respect to the magnetic field [18]. These IEs have different forms than the original Pocklington equation (PE). The PE itself can be considered first as 1st-order Fredholm IE with an exact singular kernel, and second as a similar IE with an approximate continuous kernel. Thus, all transformations of the PE of thin LV boil down to how the integral operator can be transformed. For a number of years, the interest has been aroused by strip, microstrip and other planar antennas [19], which are similar in principle to wire VAs. Recently, there has been interest in THz, IR and even optical band antennas, structurally made in the form of carbon nanotubes (CNTs), graphene strips and other nanostructures. CNT and graphene have surface conductivity σ and can even be active (under optical pumping) [20]. They are promising for the transmission of THz and IR radiation at short distances. The final complex impedance requires an impedance approach to the formulation of the problem and can significantly change the properties of such antennas due to the occurrence of plasmons and other effects [21]. In a strict solution, all forms of equations (with the same formulation of the problem) should give the same results, but have different convergence and require different computational resources and methods of solution, which is the subject of this work. It is interesting to trace the methods of transformation of IEs and their impact on obtaining solutions. In addition, the paper considers Vas in the form of CNT and graphene strips, which are of interest for the transmission of THz and IR energy in microstructures and over short distances. Since the IE in the simplest architecture is a one-dimensional (1D), the methods of its transformation are clearer and simpler than for 2D and 3D IEs, which is why its consideration in the work is due. Often IE is understood not as an integral one with a smooth kernel, but as a singular IE (SIE). In this paper, modifications of IE and integrodifferential equations (IDEs), as well as one-dimensional SIE and singular IDE (SIDE) for an electrically thin and thick LV are obtained from PE of even from volume IE. Their connection with the PE (1897) and the Hallen equation (1938) is shown. LAs with impedance CNT and graphene nanoribbon are considered (see for compare [21–30]).

2. Problem statement

LV Fig. 1 since Pocklington, who based his work on the Hertz approach [31], is a classical object of IE theory. Usually the problem is considered in a simplified formulation: the cylinder is considered complete and perfectly conductive without end surfaces, and its excitation is carried out by a point voltage

source through an infinitesimal gap. As seen in Fig. 1, in the technical implementation, it also includes two conductive cylinders 1 of radius a , usually powered from a shielded source 2 by a feeder 3. The feeder does not radiate, because the two wires of the last close, and the currents in them are antiphase. Therefore, only the currents flowing over the surface of the cylinders and the gap are radiating. The model for the gap has a very strong influence on the calculation of the input impedance, as well as the ends in the case of a thick VA. Usually the cylinders are considered perfectly conductive, and the current is superficial. Recently, there have been works taking into account the finite surface impedance, for example, [21–29]. Its accounting is important, for example, for the analysis of terahertz antennas based on CNT. For such bands, metal nanowires (quantum threads) can be used as LV. Their conductivity is quantized and the field penetrates deep, requiring the use of volume integral equations. Usually for theoretical research consider the simplest symmetrical LV. Asymmetry is not particularly difficult. Consideration of a thin VA in the form of a curved wire is convenient on the basis of the Hallen equation and leads to complication of the kernel of the integral operator. Another approximation is a hollow LV. In this case, the equations are quite simplified, since the end currents are not taken into account (Fig. 1). Another strong approximation is a thin VA. Usually the approximation $a/\lambda \ll 1$ is used: the smallness of the radius in relation to the wavelength. However, the ratio a/l characterizing the elongation of the cylinder is also important. The strongest approximation associated with the fineness of the VA is the azimuthal independence of the current density, i.e. the one-dimensionality of the IE. And although a number of publications have obtained results suitable for $a/\lambda \sim 1$, the condition $a/l \sim 1$ requires taking into account many azimuthal harmonics. It is connected, in particular, with asymmetry of excitation by feeder and external field (incident plane wave), with neighboring VA, etc. With symmetric feeding of a single VA without incident field, the density of the longitudinal current $J_z(\rho, z) = \eta_z(z)\delta(a - \rho)$ on the side surface depends only on the longitudinal coordinate z , and at the ends there is only a radial component $J_\rho(\rho, z)$. At the ends $J_\rho(\rho, z) = \eta_{\pm\rho}(\rho)\delta(z \mp \Delta/2)$ and $J_\rho(\rho, z) = \eta^\pm_\rho(\rho)\delta(z \mp (l + \Delta/2))$. Here $\eta_z(z)$, $\eta_{\pm\rho}(\rho)$ and $\eta^\pm_\rho(\rho)$ is the surface current density. Another significant approximation is the narrow gap $\Delta \ll l$. It is due to the fact that usually the current density $J_z = I_0\delta(z)\delta(\rho)$ in the gap is replaced by, which means continuity J_z . On the other hand, an electric field is excited in the gap $E_z \approx U_0\delta(z)$, which is

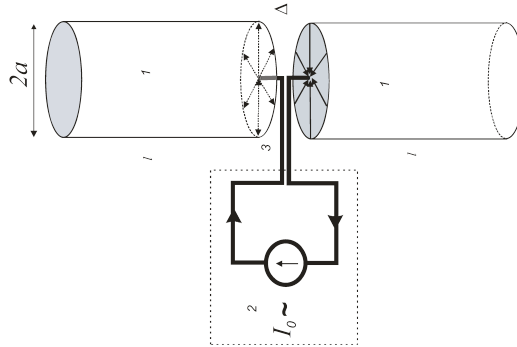


Fig. 1. Schematic view of LV: cylinders with ends 1, generator, feeder 2. Arrows show currents.

Рис. 1. Схематическое изображение линейного вибратора: цилиндры с концами 1, генератор, фидер 2. Стрелками показаны токи

proportional to the bulk density of the displacement electric current $J_z = i\omega\varepsilon_0 U_0 \delta(z)$. For a thin VA with a small gap, the conduction current passes into the bias current, so one-dimensional IE can be used in the region $-l < z < l$. For a wide gap, this is not possible: the bias current extends beyond the cylinder $-l \leq z \leq l$, $\rho \leq a$, so a strict approach should include excitation by surface side and end currents. In addition, it is necessary to take into account two linear currents suitable for the points of power supply. They can be taken on the axes of these wires. Boundary conditions must be imposed on the entire surface of both cylinders and on the side surface of the supply wires. This is a strict statement of the problem. It allows you to determine the component E_z on the surface of the gap and calculate the average voltage in the gap $\bar{U}$. Then the input impedance of the gap is $Z_{in} = \bar{U} / I_0$. Since the diameter of the feeder wire $r_0 \leq a$ is small, in this case the approximation of point feeding is quite justified: $J_z(\rho, z) = I_0 \delta(r_0 - \rho) \delta(z)$.

The LV from CNT corresponds to this consideration. Given the problem of excitation of such a VA, let consider a single radiating CNT excited in the optical range by laser pumping. The conductivity of CNTs is considered in [31, 33] and for big radius a limits to the graphene one for zigzag and armchair configurations. So we use the graphene conductivity, which has a negative real part due to the pumping power. In balance, the radiation power coincides with the pumping power, so the calculation of such antennas is very simple, especially for CNTs without ends: the power developed on the surface must coincide with

the power emitted through the remote sphere Σ :

$$P = -\operatorname{Re} \oint_S \mathbf{\eta}(\mathbf{r}) \mathbf{E}^*(\mathbf{r}) ds / 2 = -\operatorname{Re} \oint_S \sigma |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 ds / 2 = \operatorname{Re} \oint_\Sigma \mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}^*(\mathbf{r}) ds / 2.$$

At the same time, the density of the surface current $\mathbf{\eta}$ satisfies IE. In general case of field penetration into the volume of the VA the IE

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_{in}(\mathbf{r}) + Z_0 \frac{k_0^2 + \nabla \nabla \cdot}{ik_0} \int_V G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') d^3 r'. \quad (1)$$

For magnetic field we have

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_{in}(\mathbf{r}) + \nabla \times \int_V G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') d^3 r'. \quad (2)$$

These 3D volumetric IEs are suitable for finding the volumetric current density in the cylinder [34]. They should be used when the radius a is of the order of the skin layer δ . This is the case for nanowires, or for very high frequencies when the dielectric constant of the metal is almost real positive and the normal skin effect is not performed. Also it is the case for ultra-low frequencies when the penetration depth is great. When $\delta \ll a$ one can use the surface IE:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_{in}(\mathbf{r}) + Z_0 \frac{k_0^2 + \nabla \nabla \cdot}{ik_0} \int_S G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{\eta}(\mathbf{r}') d^2 r' + \mathbf{z}_0 E_{0z}(\mathbf{r}) + \boldsymbol{\rho}_0 E_{0\rho}(\mathbf{r}), \quad (3)$$

$$E_{0z}(\mathbf{r}) = 2\pi I_0 Z_0 r_0 \frac{G_{0zz}(\rho, z | r_0, 0) + k_0^2 G_0(\rho, z | r_0, 0)}{ik_0},$$

$$E_{0\rho}(\mathbf{r}) = 2\pi I_0 Z_0 r_0 \frac{G_{0z\rho}(\rho, z | \rho, 0)}{ik_0}. \quad (4)$$

If $\mathbf{r} \in S$ this is 2D surface IE. Here $\mathbf{E}_{in}$, $\mathbf{H}_{in}$ are initial field, $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$ is the impedance, G is the scalar Green's function (GF), G_θ is its the azimuth independent part, the subscripts correspond to the coordinate derivatives. Note that on the surface $\mathbf{\eta} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{v} \times \mathbf{E} \times \mathbf{v} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{E}_\tau$, so taking into account the finite surface impedance the IE (3) becomes the second kind IE. It is convenient to use 1D IE instead 2D one, using smallness of a . We have

$$G_0(\rho, z | \rho', z') = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \frac{\exp\left(-\sqrt{\chi^2 - k_0^2} |z - z'|\right) I_0(\chi \rho) K_0(\chi \rho')}{\sqrt{\chi^2 - k_0^2}} \chi d\chi. \quad (5)$$

We will use multiple views of the GF $G = (4\pi R)^{-1} \exp(-ik_0 R)$,

$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = \sqrt{(z - z')^2 + \rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho'\cos(\theta)}$, $\theta = \varphi - \varphi'$, in particular

$$G = \sum_{n=0}^{\infty} [G_n \cos(n\theta) - iF_n \sin(n\theta)]. \quad (6)$$

The azimuth independent part also has the views

$$G_0(\rho, z | \rho', z') = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\infty} \cos(-ih(z - z')) f_0(\kappa(h), \rho, \rho') dh, \quad (7)$$

$$G_0(\rho, z | \rho', z') = \frac{1}{8\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-h(\kappa)|z - z'|) g_0(h(\kappa), \rho, \rho') h^{-1}(\kappa) \kappa d\kappa. \quad (8)$$

Here $h = \sqrt{\kappa^2 - k_0^2}$, $\kappa = \sqrt{h^2 - k_0^2}$, and the functions have the following form below. If $\rho < \rho'$, then $f_0(\kappa(h), \rho, \rho') = K_0(\kappa\rho') I_0(\kappa\rho)$, $g_0(h(\kappa), \rho, \rho') = K_0(h\rho') I_0(h\rho)$. If $\rho > \rho'$, then $f_0(\kappa(h), \rho, \rho') = I_0(\kappa\rho') K_0(\kappa\rho)$, $g_0(h(\kappa), \rho, \rho') = I_0(h\rho') K_0(h\rho)$. $I_0(z)$ and $K_0(z)$ mean McDonald's cylindrical functions of the second kind of complex argument. We have

$$G(\rho, \phi, z | \rho', \phi', z) = \frac{4\pi^2}{i\sqrt{\rho\rho'}} \sum_{m=0}^{\infty} (m+1/2) H_{m+1/2}^{(2)}(k_0\rho) J_{m+1/2}(k_0\rho') P_m(\cos(\theta)).$$

Here $\rho > \rho'$. Since there are also relations $R = \sqrt{u_+^2 + u_-^2 - 2u_+u_- \cos(\theta)}$, $2u_{\pm} = \sqrt{(z - z')^2 + (\rho + \rho')^2} \pm \sqrt{(z - z')^2 + (\rho - \rho')^2}$, then [4]

$$G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \frac{4\pi^2}{i\sqrt{u_+u_-}} \sum_{m=0}^{\infty} (m+1/2) H_{m+1/2}^{(2)}(k_0u_+) I_{m+1/2}(k_0u_-) P_m(\cos(\theta)). \quad (9)$$

This allows to compute functions in the decomposition (6):

$$G_n = \frac{1}{\pi \varepsilon_n} \int_0^{2\pi} G \cos(n\theta) d\theta, \quad F_n = \frac{i}{\pi} \int_0^{2\pi} G \sin(n\theta) d\theta. \quad (10)$$

Here $\varepsilon_n = 1 + \delta_{n0}$ is the Neumann multiplier. Expressions (10) are given by series (9), in which instead of Legendre polynomials one should substitute the integrals from them I_{mn}^c and I_{mn}^s :

$$I_{mn}^c = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} P_m(\cos(\theta)) \cos(n\theta) d\theta = \frac{1 + (-1)^{n+m}}{\pi} \int_1^{-1} \frac{P_m(x) T_n(x) dx}{\sqrt{1-x^2}}, \quad (11)$$

$$I_{mn}^s = \frac{i}{\pi} \int_0^{2\pi} P_m(\cos(\theta)) \sin(n\theta) d\theta = i \frac{1 + (-1)^{n+m}}{\pi} \int_{-1}^1 P_m(x) U_{n-1}(x) dx. \quad (12)$$

In particular, $I_{m0}^s = 0$, $I_{mn}^c = I_{mn}^s = 0$, if $m+n$ is odd,

$I_{(2m)0}^c = 2[\Gamma^2(1/2 + m)/m!]^2 / \pi$, so we get another representation

$$G_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \frac{4\pi}{i\sqrt{u_+ u_-}} \sum_{m=0}^{\infty} (m+1) H_{2m+1/2}^{(2)}(k_0 u_+) I_{2m+1/2}(k_0 u_-) \left[\frac{\Gamma(1/2 + m)}{m!} \right]^2. \quad (13)$$

For integral (12) one can find

$$I_{mn}^s = 2i \frac{(1 + (-1)^{n+m})(m-n+1)(m-n+3)\dots(m+n+1)}{\pi(m-n)(m-n+2)\dots(m+n)}. \quad (14)$$

We express the Legendre polynomials $P_n(x)$ using Chebyshev polynomials:

$$P_0 = T_0, \quad P_1 = T_1, \quad P_2 = 3/4 T_2 + 1/4 T_0, \quad P_3 = 5/8 T_3 + 3/8 T_1, \quad P_4 = 35/64 T_4 + 5/16 T_2 + 9/64 T_0, \dots$$

To calculate subsequent expansions, we have obtained the recurrent formulas for the decomposition coefficients, but they are some cumbersome. It is convenient to calculate integrals using the orthogonality of Chebyshev polynomials:

$$I_{1n}^c = \delta_{n1}; \quad I_{0(2n)}^c = 2\delta_{n0}; \quad I_{mn}^c = 0, \quad \text{if } n > m \text{ and if } n+m \text{ is odd. We have:}$$

$$I_{22}^c = 3/4, \quad I_{31}^c = 3/8; \quad I_{33}^c = 5/8; \quad I_{40}^c = 9/64; \quad I_{42}^c = 5/16; \quad I_{44}^c = 35/64 \dots$$

Thus, it is possible to compute GF (9) as a decomposition of (6) with known and simply computable functions G_n and F_n .

In the work [4] the functions F_n were not considered, and for G_n the formula (1.15) is received resulted with a typo (instead of 1 it is necessary to take 1/2). This formula coincides with (13) (up to the factor 4π determining the GF) and in our case it can be written as:

$$G_n(\mathbf{r} - \mathbf{r}') = \frac{4\pi^2}{i\sqrt{u_+ u_-}} \sum_{m=0}^{\infty} (n+2m+1/2) H_{n+2m+1/2}^{(2)}(k_0 u_+) I_{n+2m+1/2}(k_0 u_-) I_{(n+2m)n}^c. \quad (15)$$

Let's consider one more representation of G_n and F_n on an example G_n . First take the decomposition of GF

$$G = \sum_{m=0}^{\infty} g_m = \frac{1}{4\pi} \sum_{m=0}^{\infty} (-ik_0)^m R^{m-1/2}.$$

Denoting $\alpha^2 = 4\rho\rho' / \left[(\rho + \rho')^2 + (z - z')^2 \right]$, according to (10) we write the decomposition G_n into a double series with coefficients $(-ik_0)^m G_{nm}$, where the integrals are denoted

$$G_{nm} = \frac{2^{m-2}}{\pi^2 \varepsilon_n} \left(\sqrt{\rho\rho'} / \alpha \right)^{m-1} \int_0^\pi \cos(n\theta) (1 - \alpha^2 \cos(\theta))^{(m-1)/2} d\theta.$$

They can be represented as

$$G_{nm} = \frac{2^{m-2}}{\pi^2 \varepsilon_n} \left(\sqrt{\rho\rho'} / \alpha \right)^{m-1} \int_{-1}^1 \frac{T_n(x) (1 - \alpha^2 x)^{(m-1)/2}}{\sqrt{1-x^2}} dx,$$

and also calculate through elliptic integrals.

3. IEs transformation. Kernels. Convergence

So, the transformation of the equations can be performed on the basis of the transfer of differentiation operators $\nabla \cdot$, $\nabla \nabla \cdot$ and $\nabla \times$ from the coordinate of the observation point in kernel to the source point with the use of integral theorems, which in the one-dimensional case are reduced to integration in parts. This results to the surface charge density $\zeta = i\omega^{-1} \nabla \cdot \mathbf{\eta}$. It is convenient to transfer these operators to weight functions when using functionals or projection algorithms. Another approach is the allocation of the singular part of the integral operator and its reversal (regularization). In particular, after integration by angle and differentiation by z , GF acquires a Cauchy-type singularity [12–14], for which and for the logarithmic singularity there are inversion formulas. Differentiation in (1)–(3) requires the definition of singular integrals in the sense of the principal value, for example, by Cauchy. The neighborhood of the singular point of origin is removed from the kernel, and the integral is understood as the limit when the neighborhood is tightened into a point, thus there is a nonintegral term [34]. This procedure is also regularization, and the IE of the 1st kind it is reduced to the IE of the 2nd kind. In numerical algorithms, a differentiated kernel can be computed directly using G or its decomposition (10). To modify the kernel, it is possible to introduce new potentials and perform the replacement of variables and functions. In particular, the representation of a vector field through new functions related to its potential and solenoid parts. In 1938, Gallen proposed an equation with the kernel G . It is based on the representation of the vector potential through the current density and G , followed by the integration of the wave equation for $\mathbf{A}$. in this case, there are integration constants, which are

determined from the boundary conditions. A similar approach is used in [4]. In fact, the use of the potential $\mathbf{A}$ rather than the field $\mathbf{E}$ means integration over the observation point [35]. Such integration is convenient in functionals when transferring operators to weight functions [34]. An approach based on the use of three-dimensional volume equations for vector potentials is described in [34, 35]. For one-dimensional it is possible to apply the method of direct integration on the observation point [35, 36]. The singularity of a kernel depends on whether differential or integral operators act on it. The integration reduces singularity. The action of the operators ∇ , $\nabla \times$ and $\nabla \otimes \nabla$ on G can be transferred to other functions. This, in particular, it can be the current density or the field. The transfer of the differential operator to the current density gives the divergence $\nabla \cdot \mathbf{J}$, i.e. a formulation with respect to the charge density.

Let us consider other approaches to the transformation of IE (4). Considering its right part as a one-dimensional field, we use Helmholtz's theorem:

$$E_{iz}(z) = -\text{grad}_z(U(z)) + \text{rot}_z(\mathbf{z}_0 V(z)) = -\partial_z U(z). \quad (16)$$

Here $\text{grad}_z = \mathbf{z}_0 \partial_z$, $\text{rot}_z(\mathbf{z}_0 V(z)) = \mathbf{z}_0 \partial_z \times \mathbf{z}_0 V(z) \equiv 0$. Helmholtz's theorem uniquely defines the vector field through its solenoid and potential part, i.e. through its rotor and gradient. A one-dimensional field cannot have a solenoid part, which shows a very approximate view of one-dimensional PE for real VAs modeling. It follows that the entire integral in (4) can be written as a gradient. After integration we get the ratio (6), (7), in which $U(z) = -\partial_z E_{iz}(z)$ can be interpreted as the voltage in the gap of the VA. Thus, obtaining equations for potentials leads to a lower kernel singularity than obtaining equations for fields. The PE is a record of the boundary condition for the electric field (its longitudinal component). In the Hallen equation the boundary conditions are written for the vector potential component. The kernel of this IE is function (11).

4. Model of optically pumped CNT

For structures with a surface current, it is convenient IDE [35, 37] $\mathbf{E}_\tau = \mathbf{E}_{0\tau} + \mathbf{E}_{d\tau}$, in which the total tangent field is the sum of the tangent field $\mathbf{E}_{0\tau}$ of the plane wave and the tangent diffraction field on CNT, at that $\boldsymbol{\eta} = \sigma \mathbf{E}_\tau$ and

$$\boldsymbol{\eta} = \xi \mathbf{E}_{0\tau} - ik_0 \xi \int_S \left[G(\mathbf{r}_\tau - \mathbf{r}'_\tau) \boldsymbol{\eta}(\mathbf{r}'_\tau) + k_0^{-2} \nabla G(\mathbf{r}_\tau - \mathbf{r}'_\tau) \nabla' \cdot \boldsymbol{\eta}(\mathbf{r}'_\tau) \right] d^2 r', \quad (17)$$

Where $\xi = Z_0 \sigma$. To reduce the singularity, the stationary functional is formed by multiplying (19) scalar by $\boldsymbol{\eta}^*$, integrating over the CNT surface and trans-

ferring the operator action from G to $\boldsymbol{\eta}^*$. Writing (17) in operator form $\boldsymbol{\eta} = \xi \mathbf{E}_{0r} + \hat{K}(\boldsymbol{\eta})$, denoting the integration by a scalar product $(\cdot)$ and using the divergence theorem, we obtain a functional with zero stationary value in the form $\Phi = (\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\eta} - \xi \mathbf{E}_{0r} - \hat{K}(\boldsymbol{\eta}))$ or $\Phi = (\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\eta}) - \xi(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{E}_{0r}) - ik_0 \xi (\boldsymbol{\eta}, \hat{G}(\boldsymbol{\eta})) + ik_0^{-1} \xi (\nabla \cdot \boldsymbol{\eta}, \hat{G}(\boldsymbol{\eta}))$. Here $\hat{G}$ is an integral operator with kernel G . We used the relation $\boldsymbol{\eta}^* \nabla G = \nabla \cdot (G \boldsymbol{\eta}^*) - G \nabla \boldsymbol{\eta}^*$. Since the CNT surface is closed and has no bounding contours, the integral form $\nabla \cdot (G \boldsymbol{\eta}^*)$ over it is zero. The complex value $P = (\boldsymbol{\eta}, \mathbf{E}_r)/2 = \sigma^{-1}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{E}_r)/2$ is the power developed on CNT, and when $\text{Re}(\sigma) < 0$ there is an amplification of the incident wave. It is really convenient to estimate it with respect to the scattering cross sections at pumping $\tilde{\Sigma}_s$ and without it Σ_s . The calculations show that the equality $\tilde{P}_\Sigma - P_\Sigma = (\tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\mathbf{E}}_r)/2 - (\boldsymbol{\eta}, \mathbf{E}_r)/2$ is fulfilled with an accuracy of one percent. Here on the left is the radiation power, the tilde denotes the solution when pumped, and without it the dissipative solution.

The equation (19) was solved for CNT armchair and zigzag with lengths $l = 100$ microns and $a = 20$ nm Fig. 2. The Kubo formula was used for the nonequilibrium conductivity of CNTs [21] under optical pumping. The results show a strong dependence of the amplitude η_z on the chemical potential μ_c . At large CNT radii, their conductivity for both configurations is close to that of graphene [33, 34]. We used the basis functions $\varphi_n(z) = z(l-z)z^{n-1}$, neglecting the dependence on φ , and the representation (19). The solution of IDE with a semi-inverted kernel is also obtained. For Fig. 2 the results of such calculations are given. Both algorithms give the same results. Also we have calculated the strip graphene nanoribbon LVs.

5. Conclusions

We present various forms of the Pocklington, Harrington and Hallen equations, as well as other similar IEs obtained by converting these equations with decreasing the degree of singularity of their nuclei and methods for obtaining them, are considered. One-dimensional singular IEs of electrically thin VAs are also considered. The convergence of the THz wave amplification algorithm is considered on the example of LV as an active CNT. The convergence of the algorithms is determined by the singularity of the kernel, the fulfillment of conditions on the edge and the proximity of the selected first basis function to the solution. The best stability corresponds to the second kind Fredholm IE and determined by the accuracy of the kernel calculation.

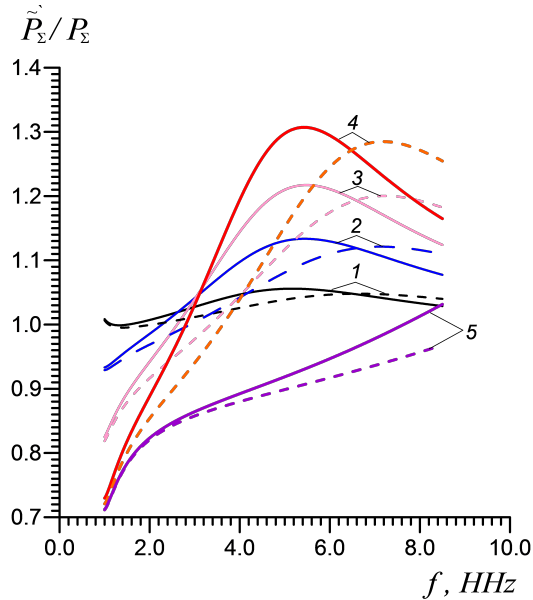


Fig. 2. The ratio of the scattered power of the pumped and conventional CNT at different power densities of the optical pump: 10 (curves 1), 20 (2), 30 (3) and 40 (4,5) W/cm². Solid curves – Armchair (300,300), dashed curves – zigzag (300,120). Curves 1–4 are obtained for $l = 10$ mm, curves 5 correspond to 1 mm, all CNT parameters correspond to [20].

Рис. 2. Соотношение рассеянной мощности накачиваемой и обычной углеродной нанотрубки при различных плотностях мощности оптической накачки: 10 (кривые 1), 20 (2), 30 (3) и 40 (4,5) Вт/см². Сплошные кривые — «кресло» (300,300), пунктирные кривые — зигзаг (300,120). Кривые 1—4 получены для $l = 10$ мм, кривые 5 соответствуют 1 мм, все параметры углеродной нанотрубки соответствуют [20]

Acknowledgment

This work was supported by grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state task (project No. FSRR-2020-0004).

References

1. Pocklington H. C. Electrical Oscillations in Wires // Cambridge Phil. Soc. Proc. London. Oct. 1897. Vol. 9. P. 324–332.
2. Hallen E. Theoretical investigations into the transmitting and receiving qualities of antennæ // Nova Acta Regiae Soc. Sci. Upsaliensis. 1938. Vol. 11, ser. 4. P. 3–44.

3. Leontovich M., Levin M. On the theory of oscillations excitation in antenna's vibrators // J. Tech. Phys. 1944. Vol. 14. P. 481–506.
4. Kapitsa P. L., Fok V. A., Vainshtein L. A. Symmetrical electrical oscillations of a perfectly conducting cylinder of finite length // J. Tech. Phys. 1959. Vol. 29, no. 10. P. 1188–1205.
5. Kapitsa P. L., Fok V. A., Vainshtein L. A. Static boundary problems for a hollow cylinder of finite length // J. Tech. Phys. 1959. Vol. 29, no. 10, P. 1177–1187.
6. Vainshtein L. A. Current waves in a thin cylindrical conductor. I. Transmitting oscillator current and impedance // J. Tech. Phys. 1959. Vol. 29, no. 6. P. 673–700.
7. Vainshtein L. A. Current waves in a thin cylindrical conductor. II. The current in the passive vibrator and the radiation of the transmitting vibrator // J. Tech. Phys. 1959. Vol. 29, no. 6. P. 689–699.
8. Vainshtein L. A. Current waves in a thin cylindrical conductor. III. Variational method and its application to the theory of ideal and impedance wires // J. Tech. Phys. 1961. Vol. 31, no. 1. P. 29–44.
9. Vainshtein L. A. Current waves in a thin cylindrical conductor. IV. Oscillator input impedance and precision of formulas // J. Tech. Phys. 1961. Vol 31, no. 1. P. 45–50.
10. Vainshtein L. A. Symmetrical electrical oscillations of a perfectly conducting hollow cylinder of finite length. II. Numerical results for passive vibrator // J. Tech. Phys. 1967. Vol 37, no. 7. P. 1182–1188.
11. Vainshtein L. A., Fok V. A. Symmetrical electrical oscillations of a perfectly conducting hollow cylinder of finite length. III. The transmitting vibrator. General comments // J. Tech. Phys. 1967. Vol 37, no. 7. P. 1189–1195.
12. Neganov V. A., Matveev I. V. Application of the singular integral equation for the calculation of a thin electric vibrator // Dokl. Acad. Nauk/ 2000. Vol. 373, no. 1. P. 36–38.
13. Neganov V. A., Kornev M. G., Matveev I. V. A new integral equation for calculating thin electric vibrators // Technical Physics Letters. 2001. Vol. 27, no. 2. P. 160–163.
14. Neganov V. A., Kluev D. S., Medvedev S. V. A functional for the input impedance of thin electric vibrator // Technical Physics Letters. 2001. Vol. 27, no. 11. P. 902–904.
15. Eminov S. I. The asymptotic calculation of dipole antennas // Tech. Phys. Lett. 2002. Vol 28, no. 3. P. 194–197.
16. Eminov S. I. Calculating impedance vibrator antennas // Technical Physics Letters. 2017. Vol 43, no. 7. P. 593–595.
17. Eminov I., Sochilin A. V. A numerical-analytic method for solving integral equations of dipole antennas // J. of Comm. Tech. and Electronics. 2008. Vol. 53, no. 5. P. 523–528.
18. Davidovich M. V., Skobelev S. P. Analysis of some integral equations in the theory of wire antennas // Radiotekhnika (Moscow). 2014. No. 1. P. 106–109.
19. Davidovich M. V. Gap impedance characteristics for microstrip dipole patch antenna // Telecommunications and Radio Engineering. 1990. No. 6. P. 6872–6874.
20. Ryzhii V., Ryzhii M., Otsuji T. Negative dynamic conductivity of graphene with optical pumping // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 083114.
21. Hanson G. V. Fundamental Transmitting Properties of Carbon Nanotube Antennas // IEEE Trans. 2005. Vol. AP-53, no. 11. P. 3426–3435.
22. Burke P. J., Li S., Yu Z. Quantitative theory of nanowire and nanotube antenna performance // IEEE Trans. on nanotechnology. 2006. Vol. 5, no. 4. P. 314–334.
23. Fichtner N., Zhou X., Russeret P. Investigation of copper and carbon nanotubes antennas using thin wire integral equations // IEEE APMC. 2007. DOI: 10.1109/APMC.2007.4554722.
24. Huang Y., Yin W.-Y., Liu Q. H. Performance predication of carbon nanotubes bundle dipole antenna // IEEE Trans. on nanotechnology. 2008. Vol. 7. P. 331–337.
25. Wang Y., Wu Q. Properties of terahertz wave generated by the metallic carbon nanotube antenna // Chinese optics letters. 2008. Vol. 6, iss. 10. P. 770–772.

26. Wu Q., Wang Y., Zhang S.-g., et al. Terahertz generation in the carbon nanotubes antenna // IEEE 2008 APMC. 2008. P. 978. DOI: 10.1109/APMC.2008.4958448.
27. Jornet J. M., Akyildiz I. Grapheme-based nano-antennas for electromagnetic nanocommunications in the terahertz band // Proceedings of the forth EuCAP, Barcelona. 2001. P. 1–5.
28. Choi S., Sarabandi K. Design of efficient terahertz antennas : CNT versus gold // APS, 2010. DOI: 10.1109/APS.2010.5560976.
29. Forati E., Mueller A. D., Yarandi P. G. et al. A New Formulation of Pocklington's Equation for Thin Wires Using the Exact Kernel // IEEE Trans. 2011. Vol. AP-59, no. 11. P. 4355–4360.
30. El-Sherbiny Sh. G., Wageh S., Elhalafawy S. M. et al. Carbon nanotube antennas analysis and applications: review // Advances in Nano Research. 2013. Vol. 1, no. 1. P. 13–27.
31. Hertz H. The Forces of Electric Oscillations Treated according to Maxwell's Theory // Nature. 1889. P. 402–404, 450–452.
32. Lakhtakia A., Slepian G. Ya., Maksimenko S. A. et al. Effective medium theory of the microwave and the infrared properties of composites with carbon nanotube inclusions // Carbon. 1998. Vol. 36. P. 1833–1838.
33. Slepian G. Ya., Maksimenko S. A., Lakhtakia A. et al. Electrodynamics of carbon nanotubes : Dynamic conductivity, impedance boundary conditions, and surface wave propagation // Phys. Rev. 1999. Vol. B 60. P. 17136–17149.
34. Davidovich M. V., Nefedov I. S. Spatiotemporal dispersion and waveguide properties of 2D-periodic metallic rod photonic crystals // JETP. 2014. Vol. 118, no. 5. P. 673–686.
35. Davidovich M. V. Iterative methods for solving electrodynamic problems. Saratov : Saratov University Publishing House, 2014. 240 p.
36. Davidovich M. V. Solution of three-dimensional Poisson equation for cylindrical magnetron // Radiotekhnika i elektronika. 1986. Vol. 31, no 11. P. 2224–2232.
37. Davidovich M. V. Localised plasmons in sphere-like fullerenes and nanoparticles with conducting shells : Classical electrodynamic approach // Quantum Electronics. 2019. Vol. 49, no. 9. P. 868–877.

Информация об авторах

Давидович Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и электродинамики Института физики Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. ORCID 0000-0001-8706-8523.

Колесов Герман Николаевич, инженер, аспирант, РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской области.

Кобец Александр Константинович, директор по качеству, научно-производственная фирма «Этна», г. Саратов.

Information about the authors

Michael V. Davidovich, Dr. Sci., Professor, Professor of the Department of Radio Engineering and Electrodynamics of the Institute of Physics, Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Russian Federation. ORCID 0000-0001-8706-8523.

German N. Kolesov, engineer, postgraduate student, RFNC-VNIIEF, Sarov, Russian Federation.

Alexander C. Kobets, quality director, scientific and production company “Etna”, Saratov, Russian Federation.

Влияние конструктивных особенностей волоконного тулиевого лазера на клинические характеристики литотриптера¹

¹ Чернега В. С., ² Арбузов И. А.

¹ Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
v_chernega@rambler.ru

² Городская больница № 9
ул. Мира, 5, Севастополь, 299018, Российская Федерация
arbuzov-007@mail.ru

Получено: 21 ноября 2021 г.

Отрецензировано: 24 ноября 2021 г.

Принято к публикации: 24 ноября 2021 г.

Аннотация: Проведено сравнение конструктивных особенностей литотриптеров, построенных на основе твердотельных гольмиевых и волоконных тулиевых лазеров. Показано, что благодаря использованию в тулиевых литотриптерах в качестве рабочего тела оптического волокна, легированного ионами тулия, излучения оптических колебаний с длиной волны 1940 нм, оптических зондов с сердцевинной диаметром 50–100 мкм, а также уменьшению энергии оптических импульсов при повышении их частоты, сокращается время операции по удалению мочевого камня лазера и, вследствие этого, снижается вероятность возникновения осложнений и повреждения окружающих тканей.

Ключевые слова: гольмиевый твердотельный литотриптер, волоконный тулиевый литотриптер, конструктивное исполнение литотриптеров, клинические параметры.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Чернега В. С., Арбузов И. А. Влияние конструктивных особенностей волоконного тулиевого лазера на клинические характеристики литотриптера // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 1. С. 31–41.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Чернега, В. С. Влияние конструктивных особенностей волоконного тулиевого лазера на клинические характеристики литотриптера / В. С. Чернега, И. А. Арбузов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 1. — С. 31–41.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 31-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2021 (Севастополь, РФ, 5–11 сентября 2021 г.).

Influence of design features of thulium fiber laser on clinical characteristics of lithotripter

V. S. Chernega¹ and I. A. Arbuzov²

¹Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
v_chernega@rambler.ru

²City Clinical Hospital № 9, Department of Urology
5, Mira Str., Sevastopol, 299018, Russian Federation
arbuzov-007@mail.ru

Received: November 21, 2021

Peer-reviewed: November 24, 2021

Accepted: November 24, 2021

Abstract: Design features of lithotripters built on the basis of solid-state holmium and fiber thulium lasers have been compared. It is shown that due to the use of optical fiber as a working medium in thulium lithotripters, doped with thulium ions, radiation of optical oscillations with a wavelength of 1940 nm, optical probes with a core with a diameter of 50–100 μm , as well as a decrease in the energy of optical pulses while increasing their frequency, reduced operation time for removal of laser urinary stones and, as a result, reduced probability of complications and probability of damage to surrounding tissues.

Keywords: holmium laser, specific stone loss, duration of calculus destruction, lithotripsy.

For citation (IEEE): V. S. Chernega et al. “Influence of design features of thulium fiber laser on clinical characteristics of lithotripter”, *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 31–41, 2021. (In Russ.).

1. Введение

В современной урологии для лечения мочекаменной болезни (МКБ) путем дробления мочевых конкрементов (камней) используются литотриптеры, построенные на основе квантовых генераторов различного типа. В настоящее время для фрагментации мочевых камней наиболее широко применяется литотрипсия на основе гольмиевого лазера. Дробление мочевых конкрементов с использованием гольмиевого лазера считается «золотым стандартом» лазерной литотрипсии [1, 2, 3].

В качестве рабочего тела в гольмиевых лазерах используется алюмоиттриевый гранат, легированный ионами редкоземельного элемента гольмия Ho:YAG (*Holmium:yttrium-aluminum-garnet*). Источником накачки

служит ксеноновая или криптоновая импульсная лампа, излучающая белый свет в широком спектральном диапазоне. Типовыми параметрами гольмиевого лазера являются: длина волны оптических колебаний 2100 нм; максимальная мощность излучения 30 Вт; энергия импульсов может регулироваться от 0,2 до 4 Дж; частота импульсов может устанавливаться от 3 до 25 Гц, а длительность импульсов — от 150 до 850 мкс. Особенности лечения мочекаменной болезни с помощью гольмиевого литотриптера освещена в [4].

Несмотря на ряд преимуществ гольмиевых литотриптеров по сравнению с ультразвуковыми и пневматическими устройствами для дробления мочевых камней, гольмиевые лазеры обладают рядом недостатков, существенно влияющих на их клинические параметры, а также на затраты на эксплуатацию, что приводит к снижению качества и увеличению стоимости операции. На клинические параметры, стоимость литотриптера и затраты на его эксплуатацию влияют следующие факторы.

1. Сравнительно малая глубина проникновения оптического излучения в биоткань (до 0,4 мм) не соответствует современным потребности урологии из-за достаточно высокой вероятности повреждения окружающей слизистой оболочки.

2. Большая часть энергии, излучаемой импульсной лампой системы накачки, тратится впустую и вызывает нагрев резонатора лазера. Это вызвано тем, что импульсная лампа излучает энергию в широком спектре, тогда как рабочее тело Ho:YAG поглощает энергию в узком спектральном диапазоне, причем перекрытие между ними не превышает 7—8 %. Следовательно, генераторы гольмиевых лазеров обладают низким коэффициентом полезного действия (к. п. д) и нуждаются в громоздкой системе водяного охлаждения. В связи с этим гольмиевые литотриптеры потребляют довольно значительную энергию (около 2000 Вт), имеют большой вес (75—90 кг) и габариты 25(Ш)×90(В)×80(Г) см. Кроме того, максимальный температурный диапазон внутри лазерного кристалла ограничивает предел мощности и частоты, при которых может работать один резонатор Ho:YAG (<30 Вт, <30 Гц).

3. Другим ограничением литотриптера на основе гольмиевого лазера является то, что пространственный профиль выходного луча является мультимодальным и неоднородным. Такой луч труднее сфокусировать в небольшом пятне, поэтому в гольмиевом лазере минимально возможный диаметр сердцевинной зонды не может быть меньше 200 мкм [5].

4. Следует также учитывать, что гольмиевые литотриптеры весьма чувствительны к внешним ударам, которые могут привести к смещению

зеркал внутри полости и вызвать необратимые повреждения лазерного генератора. Поэтому при работе или транспортировке такого литотриптера требуется большая осторожность и внимание.

Более перспективными для лечения МКБ являются литотриптеры, построенные на основе волоконных тулиевых лазеров [1, 2, 6, 7].

Целью настоящей статьи является анализ конструктивных особенностей волоконных тулиевых литотриптеров, которые позволили улучшить по сравнению с гольмиевыми лазерами клинические параметры лечения МКБ, существенно повысить к. п. д устройств, снизить стоимость и габариты литотриптеров.

2. Конструктивные особенности волоконного тулиевого литотриптера

В тулиевых волоконных лазерах TFL (*Thulium Fiber Laser*), которые являются основой литотриптера, рабочим телом является кварцевое оптическое волокно, легированное ионами тулия (Tu_2O_3). Сердцевина волокна имеет диаметр 10—20 мкм, а его длина варьируется в пределах от 10 до 30 м. Оболочка выполнена из чистого кварца, а самая внешняя оболочка представляет собой полимерное покрытие. В качестве источника оптической накачки используется один или несколько мощных лазерных диодов. Длина волны излучаемого колебания в волоконных тулиевых лазерах равна 1940 нм.

Для лазерной литотрипсии тулиевый волоконный лазер оптимизирован для излучения на длине волны 1940 нм, что соответствует пику поглощения воды в ближнем инфракрасном диапазоне при 22 °С. Выполнение литотрипсии при длине волны 1940 нм существенно повышает качество проведения операции. Это связано с тем, что поглощение энергии инфракрасных колебаний при такой длине волны в 4,5 раза выше, чем у гольмиевого Ho:YAG лазера с длиной волны 2100 нм и в 2,3 выше, чем у твердотельного лазера с рабочим телом на основе Tm:YAG [3].

С коэффициентом поглощения связан важнейший клинический параметр «глубина проникновения». Чем выше коэффициент поглощения, тем меньше глубина проникновения лазерных лучей в окружающие ткани и меньше вероятность их коагуляции. Под оптической глубиной проникновения принимается глубина, на которой излучение ослабляется в « $e = 2,7$ » раз относительно своего первоначального значения. В гольмиевых Ho:YAG-лазерах глубина оптического проникновения достигает 400 мкм, а в волоконных тулиевых она составляет всего лишь около 15 мкм [6].

Энергия импульсов в TFL-лазерах может устанавливаться от 0,025 до 6 Джоулей. Дробление конкремента при низких уровнях энергии импульсов приводит к распылению его на более мелкие частицы и уменьшению ретропульсии камня.

Схематическое изображение устройства тулиевого волоконного лазера показано на рис. 1. Для многократного отражения оптических колебаний в тулиевом световоде используются волоконные дифракционные брэгговские решетки, формируемые в фоточувствительной сердцевине световода. Дифракционные решетки играют роль, аналогичную зеркалам в гольмиевом лазере.

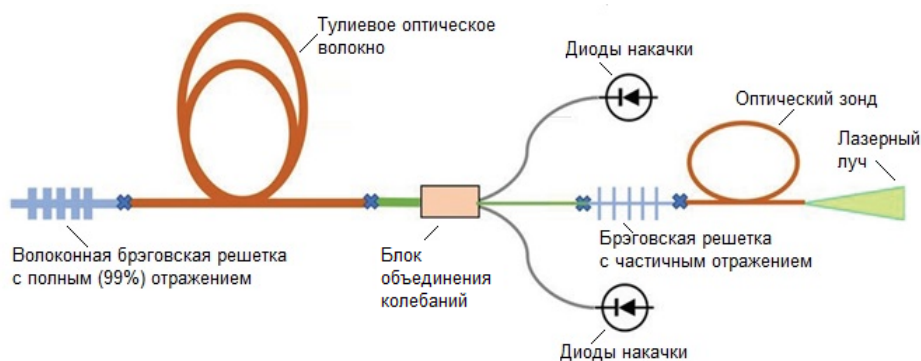


Рис. 1. Устройство тулиевого волоконного литотриптера.

Fig. 1. Thulium Fiber Lithotripter Device

Коэффициент полезного действия тулиевого волоконного лазера значительно выше, чем у твердотельного гольмиевого с накачкой от импульсной лампы, поскольку спектр излучения диодного лазера, используемого для лазерной накачки, практически совпадает с линией поглощения ионов тулия. Следовательно, тулиевый волоконный лазер выделяет значительно меньше тепла, в связи с чем он может работать в диапазонах большей мощности (> 50 Вт) и на высоких частотах (до 2000 Гц). Для его охлаждения достаточно простого воздушного вентилятора, размещенного внутри генератора. Кроме того, волоконные литотриптеры нечувствительны к повреждениям, связанным с ударами, в отличие от гольмиевых, поскольку в конструкции волоконного лазера не применяются зеркала. Благодаря использованию в TFL-литотриптерах в качестве источников накачки лазерных диодов с электронной модуляцией, появилась возможность сравнительно просто и более гибко изменять энергию и длительность излучаемых импульсов.

Пространственный профиль лазерного луча, излучаемого тулиевым волоконным лазером, из-за небольшого размера сердцевины волокна, в котором возникает свет, состоит всего из нескольких мод и имеет колоколообразную форму. Этот более равномерный пространственный профиль луча позволяет упростить фокусировку луча в очень маленькую точку для передачи оптических колебаний высокой мощности через сверхтонкие световоды с диаметром сердцевины 50—100 мкм [8].

Использование в литотриптере более тонких волокон позволяет уменьшить радиус изгиба гибкого уретероскопа и тем самым обеспечить доступ к нижнему полюсу почки. Кроме того, применение более тонких световодов оказывает возможность уменьшить диаметр рабочего канала уретероскопов, что позволяет увеличить пространство между уретероскопом и мочеточником или оболочкой доступа, тем самым повысить поток ирригации и улучшить видимость в зоне дробления конкремента. Практически одномодовый профиль пространственного луча TFL обеспечивает передачу более высокой мощности лазера по оптическому волокну меньшего диаметра, по сравнению с HO:YAG лазером. Это свойство в свою очередь стимулировало разработку различных волоконно-оптических зондов для TFL с индивидуальными наконечниками дистальных волокон для возможности применения при гибкой уретероскопии.

3. Клинические характеристики литотрипсии

Рассмотренные выше конструктивные особенности гольмиевых и тулиевых волоконных лазеров оказывают существенное влияние на клинические параметры литотриптеров. К таким параметрам относятся порог абляции, скорость фрагментации (абляции) конкрементов и величина ретропульсии [7, 9]. Под *абляцией* понимают удаление участка мочевого конкремента под непосредственным воздействием лазерного луча. Минимальная плотность энергии, при которой начинается удаление материала конкремента, называется порогом абляции. Для определения порога абляции на практике измеряется зависимость потери массы конкремента от плотности энергии излучения лазерных импульсов.

Зависимость потери массы камня при гольмиевой литотрипсии имеет линейный характер [7, 8], а уменьшение массы конкремента начинается при плотности излучения около 83 Дж/см^2 . Потеря массы при этом при плотности энергии излучения 500 Дж/см^2 составила 50 мг. При волоконной тулиевой литотрипсии зависимость потери массы конкремента от плотности энергии излучения также линейная, однако порог абляции существенно меньше и имеет значение $20,8 \text{ Дж/см}^2$. При этом потеря массы

конкремента при плотности излучения 100 Дж/см^2 составила 9,6 мг. Эти данные получены при относительно низком уровне энергии импульсов и при низкой частоте импульсов (10 Гц) для обоих лазеров.

Скорость абляции при гольмиевой литотрипсии с увеличением энергии импульсов линейно возрастает и при энергии равной 165 мДж скорость абляции оксалатного камня составляет 100 мкг/с. При тулиевой литотрипсии скорость абляции возрастает с увеличением частоты импульсов, однако зависимость имеет нелинейный вид, причем крутизна графика с ростом частоты снижается. Так, при увеличении частоты импульсов с 10 до 100 Гц наблюдается только 5-кратное увеличение скорости абляции с 28 до 140 мкг/с. Однако и в этом случае скорость разрушения камней при тулиевой литотрипсии выше, чем при гольмиевой [8]. Следует заметить, что скорость абляции при тулиевой литотрипсии может быть еще увеличена, поскольку волоконный лазер с диодной накачкой способен работать с частотой импульсов до 1000 Гц. Максимально допустимая частота импульсов гольмиевого лазера ограничена величиной 30 Гц из-за возможности его перегрева.

Сравнение отечественного промышленного волоконного тулиевого литотриптера типа «FiberLase U2»² с гольмиевыми литотриптерами различных производителей показало, что скорость дробления камней в режиме «Распыление» тулиевого волоконного лазера в 2 или более раз выше, чем у лучших гольмиевых лазерных систем.

В статье [9] приводятся данные исследований *in vitro* скорости абляции при работе волоконного тулиевого лазера в режимах фрагментации и распыления при более высоких значениях энергии излучения. Измерения выполнялись с использованием реальных мочевых камней, удаленных у пациентов хирургическим путем. В частности, авторами статьи было установлено, что скорость абляции составляет 1,1; 1,4 и 1,9 мг/с при выполнении литотрипсии в режиме фрагментации и параметрах излучения 0,6 Дж/3,6 Вт; 0,8 Дж/6,4 Вт и 1,0 Дж/10 Вт соответственно. В случае выполнения литотрипсии в режиме «распыления» скорость абляции составила 0,3; 0,6 и 1,1 мг/с при установлении следующих параметров излучения 0,2 Дж/4 Вт; 0,2 Дж/8 Вт и 0,6 Дж/30 Вт соответственно. Зависимость скорости абляции при повышении энергии импульсов является нелинейной. Эти данные сопоставимы с результатами, полученными в [7].

К существенному недостатку контактной литотрипсии относится явление ретропульсии [8, 9], которое характеризуется смещением и ми-

² Fiberlase U2. Инновационный лазерный аппарат для литотрипсии. URL: <https://fiberlase-u2.ru> (дата обращения: 17.12.2021).

грацией камня, происходящих за счет образования ударных волн при схлопывании газового пузыря в месте воздействия лазерного излучения. Ретропульсия и миграция камней зачастую приводит к увеличению длительности литотрипсии в связи с необходимостью перемещения оптического зонда для восстановления контакта с камнем, а также за счет необходимости перехода от полужесткого уретероскопа к гибкому.

В статье [7] приведены результаты исследований *in vitro* влияния на величину ретропульсии искусственного камня, выполненного из стоматологического гипса (Plaster-of-Paris) диаметром 6 мм, энергии и частоты импульсов гольмиевого и тулиевого лазеров. При этом в гольмиевом литотриптере была установлена частота следования импульсов 10 Гц, длительность импульсов 350 мкс, а диаметр используемого оптического волокна равнялся 270 мкм. Энергия импульсов изменялась от 30 до 500 мДж. В волоконном тулиевом литотриптере энергия импульсов изменялась от 5 до 37 мДж. Длительность импульсов задавалась равной 350 мкс, а частота их следования варьировалась от 10 до 400 Гц, диаметр оптического волокна равнялся 200 мкм. Выполненными *in vitro* исследованиями влияния на величину ретропульсии искусственного камня энергии и частоты импульсов гольмиевого и тулиевого лазеров установлено, что величина смещения камня при гольмиевой литотрипсии линейно возрастает с увеличением энергии импульсов. Так, при энергии импульсов 100 мДж смещение равно около 1 мм, а при энергии импульсов 500 мДж смещение камня достигает 4,5 мм. Если учесть, что типичным режимом при гольмиевой литотрипсии является установка энергии импульсов 600—800 мДж, то урологам приходится считаться с эффектом ретропульсии, который приводит к увеличению времени операции и опасности миграции камня в чашечно-лоханочную систему почки.

Величину ретропульсии мочевого конкремента, которая считается приемлемой в клиническом исследовании, трудно определить количественно. Однако в процессе экспериментальных исследований авторами [7] установлено, что минимально допустимый интервал ретропульсии не должен превышать 2 мм. Это значение частично основано на наблюдении, в котором рабочее расстояние между наконечником волокна и поверхностью камня должно быть достаточно малым, чтобы гарантировать условия для эффективного разрушения камня во время литотрипсии гольмиевым литотриптером.

При использовании волоконного тулиевого литотриптера основным фактором, влияющим на величину ретропульсии, является частота следования лазерных импульсов. При этом обнаружено, что ретропульсия при

дроблении тулиевым литотриптером практически отсутствовала при частотах импульсов менее 150 Гц, а затем линейно увеличивалась с ростом частоты импульсов. Величина смещения конкремента при частоте импульсов 400 Гц достигала 10 мм.

Исследованиями, проведенными [9] установлено, что при воздействии на мочевого конкремент импульсов тулиевого лазера с энергиями импульсов 0,5; 1,0; 2,0 и 3 Дж эффект смещения камня от одного импульса составил соответственно 0,5; 1,0; 2,0 и 3 мм.

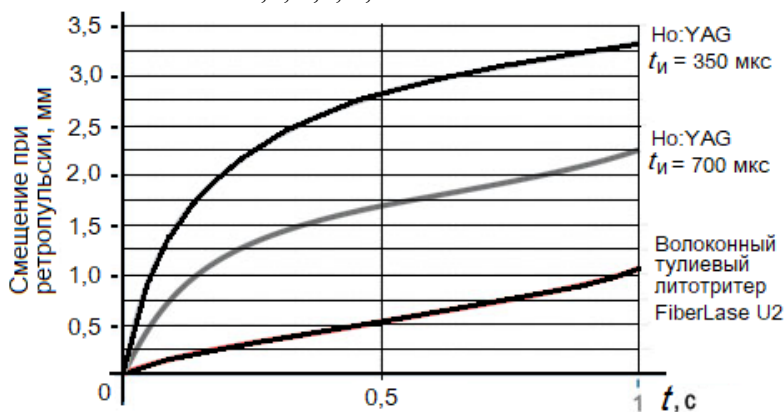


Рис. 2. Зависимости смещения камня при использовании гольмиевого и тулиевого лазерных литотриптеров.

Fig. 2. Dependence of stone displacement when using of holmium and thulium laser lithotripters

На рис. 2 приведены результаты исследований параметров отечественного волоконного тулиевого лазерного литотриптера типа FiberLase U2. В процессе измерений установлено³, что величина ретропульсии при воздействии на камень импульсов волоконного тулиевого лазера примерно в 4 раза меньше ретропульсии, вызванной при аналогичных условиях гольмиевым лазером при использовании коротких импульсов ($t_{И} = 350$ мкс) и в 2,3 раза меньше по сравнению дроблениями гольмиевым лазером в режиме длинных импульсов ($t_{И} = 700$ мкс).

4. Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что благодаря использованию в тулиевых литотриптерах в качестве рабочего тела оптического волокна, легированного ионами тулия, излучения оптических ко-

³ См. сноску на с. 37.

лебаний с длиной волны 1940 нм, оптических зондов с сердцевинной диаметром 50—100 мкм, а также уменьшению энергии оптических импульсов при повышении их частоты до 150 Гц, сокращается время операции по удалению мочевого камня и, вследствие этого, снижается вероятность возникновения осложнений, а также вероятность повреждения окружающих тканей. Таким образом, тулиевые литотриптеры являются реальной альтернативой литотриптеров, построенных на основе гольмиевых лазеров.

Список литературы

1. Мартов А. Г., Диамант В. М., Борисик А. В. и др. Сравнительное исследование эффективности электроимпульсного и лазерного литотриптеров in vitro // Урология. 2013. № 2. С. 61—70.
2. Kronenberg P., Traxer O. The laser of the future : reality and expectations about the new thulium fiber laser — a systematic review // Transl. Androl. Urol. 2019. Vol. 8, S. 4. P. 398—417.
3. Traxer O., Keller E. X. Thulium fiber laser : the new player for kidney stone treatment? A comparison with Holmium:YAG laser // World Journal of Urology. 2020. Vol. 38. P. 1883—1894.
4. Чернега В. С., Еременко А. Н. Особенности использования твердотельных лазеров при лечении мочекаменной болезни // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 287—295.
5. Nazif O. A., Teichman J. M., Glickman R. D. [et al.]. J. Review of laser fibers : a practical guide for urologists // J. Endourol. 2004. Vol. 18(9). P. 818—829.
6. Замятина В. А., Винниченко А. В., Минаев В. П. [и др.]. О возможности применения импульсных волоконных лазеров с длиной волны излучения 1,94 мкм для лазерной литотрипсии // Радиооптика. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 04. С. 20—35. URL: 10.7463/rdopt.0415.0799055 (дата обращения: 25.11.2021).
7. Blackmon R., Irby P., Fried N. Comparison of holmium:YAG and thulium fiber laser lithotripsy : ablation thresholds, ablation rates, and retropulsion effects // Journal of biomedical optics. 2011. Vol. 16(7). P. 071403. URL: 10.1117/1.3564884 (дата обращения: 25.11.2021).
8. Blackmon R. L., Hutchens T. C., Hardy L. A., Wilson C. R. [et al.]. Thulium fiber laser ablation of kidney stones using a 50- μ m-core silica optical fiber // Opt. Eng. 2014. Vol. 54, iss. 1. 7 p. URL: <https://doi.org/10.1117/1.oe.54.1.011004> (дата обращения: 25.11.2021).
9. Тулиевая (Тм) лазерная литотрипсия. Экспериментальное исследование / Глыбочко П. В., Альтшулер Г. Б., Винаров А. З. [и др.] // V Российский Конгресс по эндоурологии и новым технологиям : материалы конгресса (Ростов-на-Дону, 8—10 сентября 2016 г.). URL: https://uroweb.ru/article/tulievaya_tm_lazernaya_litotripsiya_eksperimentalnoe_issledovanie (дата обращения: 19.12.2021).

Информация об авторах

Чернега Виктор Степанович, к. т. н., доцент кафедры «Информационные системы» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-5054-0396.

Арбузов Игорь Анатольевич, заведующий урологическим отделением городской больницы № 9 г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-6652-0231.

Information about the authors

Viktor S. Chernega, Associate Professor on Department of Information Systems. Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-5054-0396.

Igor A. Arbuzov, Head of the Department of Urology of City Clinical Hospital No. 9, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-6652-0231.

УДК 621.37-621.39(091)

Генезис аудиона Ли де Фореста

Пестриков В. М.

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

Получено: 15 сентября 2021 г.

Отрецензировано: 21 сентября 2021 г.

Принято к публикации: 22 сентября 2021 г.

Аннотация: *Исследована история создания трехэлектродной лампы с небольшим содержанием газа (аудиона) американским изобретателем Ли де Форестом. Подробно рассмотрены детекторы пламени, которые стали прообразом двухэлектродных и трехэлектродных аудионов с газом низкого давления. Уделено внимание спору между Дж. А. Флемингом и Ли де Форестом о приоритете в изобретении вакуумного диода. Показан выбор научного пути в конструировании аудиона (триода) с управляющим электродом.*

Ключевые слова: *Ли де Форест, Дж. А. Флеминг, детектор пламени, двухэлектродный аудион, трехэлектродный аудион, триод.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Генезис аудиона Ли де Фореста // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 1. С. 42—79.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Генезис аудиона Ли де Фореста / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 1. — С. 42—79.

The genesis of Lee de Forest audion

V. M. Pestrikov

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

Received: September 15, 2021

Peer-reviewed: September 21, 2021

Accepted: September 22, 2021

Abstract: *The history of the creation of a three-electrode tube with a low gas content (audion) by the American inventor Lee de Forest is investigated. The flame detectors, which became the prototype of two-electrode and three-electrode audions with low-pressure gas, are considered in detail. Attention is paid to the dispute between J. A. Fleming and Lee de Forest about the priority in the invention of the vacuum diode. The choice of a scientific path in the design of an audion (triode) with a control electrode is shown.*

Keywords: *Lee de Forest, J. A. Fleming, flame detector, two-electrode audion, three-electrode audion, triode.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov “The genesis of Lee de Forest audion,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 42–79, 2021. (In Russ.).

1. Введение

История изобретений во многих случаях связана с притязаниями и встречными исками, и помимо этого украшена легендами. Часто сам изобретатель вносит большой вклад в путаницу изложения событий. Так обстоит дело с термоэмиссионным триодом, который Ли де Форест изобрел в 1906 г. как детектор сигналов беспроводной телеграфии. Триод, трехэлектродная вакуумная лампа, был поистине плодотворным изобретением. Как детектор, усилитель и генератор он стал основой современной радиоэлектроники, а вместе с его производными он доминировал в электронной технологии на протяжении почти 50 лет.

Большая часть того, что было известно об истории изобретении вакуумного триода, исходит от самого де Фореста. Он, вплоть до своей кончины в 1961 г., рассказывал и пересказывал истории о своем изобретении. В своих интервью и воспоминаниях де Форест был больше поэтом, чем инженером или ученым [1–3]. Между его воспоминаниями и действи-

тельной последовательностью событий довольно часто прослеживается лишь поверхностная связь. Если интерпретировать живые рассказы де Фореста в формате реальной истории, то можно приблизиться к воссозданию реалистичного описания его экспериментов и методов научно-технического познания на заре радиосвязи. Среди этих методов, оказывается, много подражания и самообмана, а также проявляется изобретательность, настойчивость и удача.

2. Детекторы с открытым нагревом

Вечером 10 сентября 1900 г. Ли де Форест проводил эксперименты с электролитическим детектором беспроводных сигналов при свете горелки Вельсбаха¹ (*Welsbach burner*), рис. 1. Он обратил внимание на то, что свет тускнел и снова становился ярче, когда работал небольшой искровой передатчик. Форест посчитал, что открыл новый детектор беспроводных волн. Эта интерпретация увиденного явления оказалась ошибочной, поскольку хлопки в ладоши производили тот же эффект, показывая, что на пламя воздействовал звук искр, а не электромагнитное излучение.



Рис. 1. Горелка Вельсбаха (патент CH11701A с приоритетом от 21 февраля 1896 г.) и портрет австрийского химика Карла Ауэра фон Вельсбаха на почтовой австрийской марке 2012 г. и австрийской денежной купюре 20 шиллингов 1956 г.

Fig. 1. Welsbach burner (patent CH11701A with priority dated February 21, 1896) and portrait of Austrian chemist Karl Auer von Welsbach on a 2012 Austrian postage stamp and Austrian 20 schilling banknote. 1956

19 сентября 1900 года, то же вечером, были проведены эксперименты по выяснению того факта, каким образом работа индукционной катуш-

¹ В 1885 году австрийский химик Карл Ауэр фон Вельсбах (нем. *Carl Auer von Welsbach*, 01.09.1858—04.08.1929) — изобрел и запатентовал газонакаливаемую сетку, многократно усиливающую светимость газового пламени, использовавшегося тогда для освещения — так называемый «ауэровский колпачок». После этого, он изобрел конструкцию газовой лампы накаливания (1886 г.), которая намного превосходила все другие источники света, известные в то время. Эта лампа была не только намного ярче свечи или сосновой щепы, но и дешевле, чем, например, другие конструкции газовых ламп или электрических угольных ламп накаливания. Таким образом, изобретение Вельсбаха стало коммерческим успехом.

ки влияет на свет, излучаемый горелкой Вельсбаха. В результате регулировки потоков воздуха и газа было получено условие, при котором свет легко реагировал на воздействие искры катушки. Форест доказал, что наблюдаемый необычный эффект является акустическим, а не электрическим. Восторг по поводу этого поразительного открытия пересилил его разочарование. Иллюзия достигла своей цели. Форест пришел к убеждению, что в газах, окружающих раскаленный электрод, присутствуют скрытые силы или нереализованные явления. Это наблюдение подтолкнуло Фореста на путь экспериментов с ионизированными газами, сначала в открытом пламени, а затем в герметичном стеклянном баллоне.

После экспериментов с горелкой Вельсбаха Форест стал искать такую конструкцию детектора для качественного приема радиоволн, за которую ему не пришлось бы платить роялти. С этой целью он провел серию экспериментов и пришел к выводу, что такой детектор должен содержать нагревательный элемент. В этой мысли он еще более укрепился, когда провел эксперименты с бунзеновской горелкой. Эта горелка была изобретена немецким химиком Робертом Вильгельм Бунзеном (нем. *Robert Wilhelm Bunsen*, 31(30).03.1811—16.08.1899) в 1850 г., рис. 2. Ее особенность была в том, что вводя воздух в газ в определенной пропорции перед его возгоранием получается чистое, почти бесцветное пламя без сажи. Горелки, которые разработал Бунзен, были сделаны его лаборантом Питером Десагой (*Peter Desaga*). Бунзен опубликовал конструкцию горелки в 1857 г., но не запатентовал ее. Он не хотел получать прибыль от науки, так как полагал, что интеллектуальных наград имеется более чем достаточно.



Рис. 2. Роберт Бунзен (1850 г.) и его горелка.

Fig. 2. Robert Bunsen (1850) and his burner

Конструктивно горелка Бузена представляет собой вертикальную трубку длиной 13 см, обычно латунную, подсоединенную к источнику газа. В ее основании имеется регулируемое входное отверстие для воздуха, которое позволяет изменять интенсивность пламени. Горелка не коптит, имеет регулировку пламени и способна дать температуру 650°C.

В 1903 году Ли де Форест проводил эксперименты в небольшой лаборатории на улице Темза 11 (*Thames Street*), в нижнем Манхэттене (*lower Manhattan*, район Нью-Йорка) и обнаружил, что детектором могут служить нагретые металлические электроды, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Во время эксперимента, в пламя бунзеновской горелки он поместили два электрода, в качестве которых были использованы медные пластинки. К одному электроду была подключена антенна, а к другому — земля, а параллельно электродам — наушники. В качестве источника радиоволн использовался маломощный искровой передатчик, находившийся в лаборатории. В экспериментах расстояние между отправляющей и принимающей точками не имело значения, так как главным являлось наличие сигнала в пространстве помещения, который способен был принять приемник с детектором пламени. При приеме антенной радиоволн в телефонах появлялся четко выраженный сигнал. В такой необычной схеме нагретые два электрода выполняли функцию детектора. На конструкцию этого радиоприемника Ли де Форест получил патент США US824638 от 26 июня 1906 г., рис. 3. В этом же патенте он привел также схему радиоприемника на двухэлектродном детекторе с нагревом газовой горелкой, который индуктивно связан с антенной и землей [4].

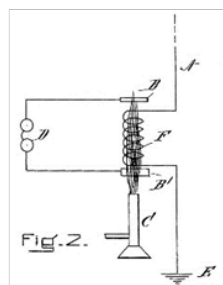
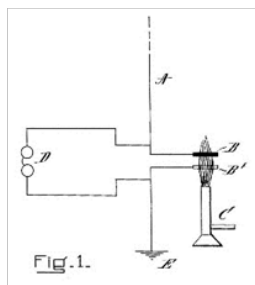
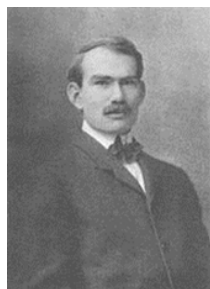


Рис. 3. Ли де Форест (1907 г.) и схемы радиоприемников с двухэлектродным детектором с подогревом газовой горелкой из его патента US824638 с приоритетом от 20 января 1906 г.

Fig. 3. Lee de Forest (1907) and circuits of radio receivers with a two-electrode detector heated by a gas burner from his patent US824638 with application field January 20, 1906

В патенте US824638 Форест указал, что его изобретение относится к устройствам для обнаружения слабых электрических токов или колебаний в целом и особенно таких токов или колебаний, которые происходят в системах приема сигналов беспроводных телеграфов. Целью настоящего изобретения явилась разработка детектора колебаний, который не требует для своей работы отдельной гальванической батареи. В описании патента Форест впер-

вые сформулировал требования к конструкции детектора с источником тепла, который способен реагировать на электрические колебания беспроводной телеграфии. Такой детектор должен иметь два отдельных электрода с чувствительной газопроводящей средой между ними и источник для их нагрева (газовая горелка), причем указанные электроды сконструированы таким образом, что способны создавать электродвижущую силу под действием нагрева. Проводимость указанной среды может изменяться электрическими колебаниями без пропуска через нее регистрируемых колебаний.

Сигналы от антенны изменяли проводимость пламени, которая, в свою очередь, воздействовала на возникающий электрический ток между электродами. Это приводило к появлению слышимого звука в наушниках приемника.



Рис. 4. Принципиальная схема радиоприемника Ли де Фореста с бунзеновской горелкой и гальванической батареей, на который принимались сигналы с кораблей в гавани Нью-Йорка (1893 г.). Карта района Нью-Йорка, показывающая расположение лаборатории Ли де Фореста (1903 г.) и гавани, откуда принимались сигналы беспроводной телеграфии.

Fig. 4. Schematic diagram of the Lee de Forest radio receiver with a Bunsen burner and galvanic batteries, which received signals from ships in the harbor of New York (1893). Map of the New York City area showing the location of Lee de Forest's laboratory (1903) and the harbor from which wireless telegraphy signals were received

В следующем эксперименте (рис. 4) зажигали обычную горелку Бунзена, настраивали ее на интенсивное голубое пламя и помещали в него два электрода из платины. Один электрод размещался в области пламени вблизи его центра, а второй электрод погружался в пламя на небольшую глубину. Электрод, который был помещен в пламя, имел относительно более высокую температуру, по сравнению с другим электродом. К концам электродов подключались последовательно соединенные телефонные наушники, и гальваническая батарея напряжением около 18 В. Сигналы от антенны изменяли проводимость пламени, что, в свою очередь, приводило к изменению протекающего в цепи тока батареи. Ток от гальванической батареи проходил от относительно холодного электрода к более горячему. При тщательной регулировке электродов удавалось услышать очень слабые сигналы, но, тем не менее, это были реальные воспроизведенные сигналы, по-

сланные через комнату. Детектор пламени фактически действовал наподобие реле с беспроводным сигналом, открывающимся для прохождения тока от батареи. Использование Ли де Форестом слова «реле», а не «выпрямитель» имело решающее значение в его будущих юридических битвах.

С помощью детектора пламени де Форест смог принять беспроводные телеграфные сигналы от нескольких кораблей, находившихся в гавани Нью-Йорка. В этом случае к одному из электродов был подключен антенный провод, выходящий из окна к вершине флагштока на крыше, а к другому электроду — провод от заземления, в качестве которого использовался водопровод (рис. 4).

В результате этого эксперимента были получены два важных результата: 1. Доказано, что тепло способствует эффективному обнаружению беспроводных волн. 2. Использование в схеме приемника «вспомогательной батареи» (англ. *booster battery*) или *B*-батареи, термин, который ввел де Форест. Значимость этого компонента трудно переоценить, потому что без этого простого дополнения наш сегодняшний уровень радиотехники и радиоэлектроники был бы невозможен.

Эксперименты Фореста были настолько тщательно продуманными и обширными, что он подал заявку на получение патента — не одного, а 12 патентов! Первые 5 патентов охватывали его эксперименты с открытым газовым пламенем. Нужно, заметить, что полученные патенты имели только научную ценность, так как ни один из них не показал на тот час своей коммерческой ценности. Сомнительно, чтобы какое-либо из запатентованных им устройств было использовано на станциях беспроводной телеграфии *American De Forest Wireless Telegraph Company*, которые устанавливались на востоке и среднем западе США.

Последовательность его патентных заявок показывает, насколько безошибочно он определил направление исследований по использованию тепла в детекторе беспроводной телеграфии. Стремление разработать чувствительный и стабильный детектор стало тем единственным путем, которое привело его к цели. Это очень важный исторический факт.

Работа детектора пламени сразу выявила две очевидные проблемы. Во-первых, влияние воздушных потоков на способность пламени обнаруживать сигналы. Во-вторых, два общих электрода, используемых как для тока антенны, так и для тока батареи, стали причиной появления обходного пути для сигнала вокруг пламени, что привело к снижению чувствительности приемника.

Решение первой проблемы было найдено в защите пламени от воздушных потоков. Вторая проблема была решена путем введения в пламя

четырех электродов. Одна пара набора электродов использовалась для антенны и заземления, в то время как второй набор использовался для локальной цепи батареи и телефона. Концы электродов были сделаны в виде колец разного диаметра, которые располагались одно поверх другого в виде горизонтальных сечений конуса. Диаметры электродов увеличивались сверху вниз. Каждый кольцевой вывод был плотно окружен пламенем. Путь высокочастотного тока, по мысли Фореста, должен был оставаться отдельным и свободным от пути местного телефонного тока. Схема детектора пламени с разделением радиочастотных и звуковых цепей представлена на рис. 5а. Именно этот эксперимент натолкнул де Фореста на мысль о том, что влияние высокочастотных импульсов исходит эффективнее, если воздействовать на проводящую среду с помощью третьего электрода. Этот третий электрод в дальнейшем получил название «сетка».

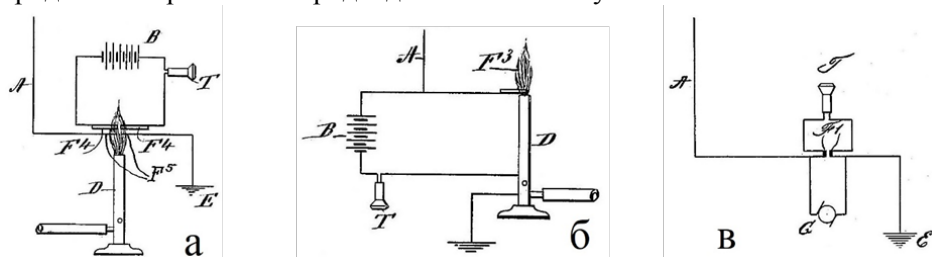


Рис. 5. Конструкции детектора пламени: а — с разделением радиочастотных и звуковых цепей, б — с нагревом одного электрода, в — с электрическим нагревом электродов.

Рисунки из патента Фореста US979275 с приоритетом от 2 февраля 1905 г. [6].

Fig. 5. Designs of the flame detector: a – with separation of radio frequency and sound circuits, b – with heating of one electrode, c – with electric heating of the electrodes.

Drawings from Forest's patent US979275 with priority dated February 2, 1905 [6]

Ли де Форест разработал большое количество конструкций двухэлектродных детекторов с газовой горелкой и детально их изучил [5]. Он исследовал нагреваемые детекторы с металлическими пластинами различного размера при их разнообразном расположении относительно друг друга, как самих пластин, так и пламени горелки. Радиоприемники не имели органа настройки на требуемую частоту и принимали радиосигналы в широком диапазоне радиочастот. Конструкции радиоприемников с нагреваемыми детекторами были далеки от совершенства — это понимал сам изобретатель. Вскоре де Форест установил, что нет нужды нагревать два электрода, достаточно нагревать один, а другой сохранять холодным, рис. 5б [6].

Во время экспериментов с детекторами пламени де Форест столкнулся с рядом непонятных проблем. Хотя он многое выяснил о действии тепла и его относительной важности для обнаружения сигналов беспро-

водной телеграфии, он ранее не заметил, что малейший порыв воздуха может вывести пламя из-под его тонкой настройки, тем самым изменив работу устройства и сделав прием нестабильным. Это наблюдение повергло де Фореста в уныние, поскольку убедило его в том, что какими бы успешными ни были его испытания детектора пламени и какие бы электроды он не использовал, практическое использование такого устройства, например, на борту корабля, невозможно. В этот раз именно дуновение воздуха повернуло все против него. Если в первый раз дуновение воздуха заставило слабо трепетать пламя горелки Вельсбаха и вдохновило де Фореста на эксперименты с детектором пламени, то в этот раз к нему пришло осознание того факта, что он зашел в тупик.

Заявка де Фореста на получение патента США US979275 на детектор пламени была подана 2 февраля 1905 г., причем спецификацию он фактически подписал 4 ноября 1904 г. Другими словами, это произошло за 12 дней до подачи Дж. А. Флемингом 16 ноября 1904 г. заявки на британский патент GB24850 пустотного клапана, и за несколько недель до подачи на то же устройство заявки на соответствующий американский патент US803684 19 апреля 1905 г. Эти даты оказались очень важными, когда де Форест утверждал, что детектор пламени, а не клапан Флеминга, вдохновил его на более позднюю конструкцию «аудиона» (вакуумированный триод с остаточным газом).

3. Практическое использование детектора пламени

Детектор пламени де Фореста (рис. 4), вероятно, был самой простой формой позже изобретенного вакуумного детектора или цимоскопа², «клапана Флеминга» и двухэлектродного «Аудиона». Конструкция детектора пламени Фореста (рис. 4 и патент US979275) использовалась в среде любителей беспроводной связи, в частности, американской, вплоть до начала 10-х годов XX века. Любители обнаружили, что лучшая форма цимоскопа пламени — это использование пламени Бунзена, получающееся от сжигания угольного газа и наличие в нем двух электродов определенной формы, рис. 7. Нижний электрод должен представлять собой небольшую платиновую ванну или чашку, а верхний — платиновое острие.

В чашеобразный или нижний электрод помещается определенная щелочная соль, которая располагается в пламени так, что находится в

² Цимоскоп (англ. *cymoscope*) — любое устройство для определения наличия электрических волн (эл. детектор, индикатор колебаний). Влияние электрических волн на сопротивление определенного типа электрической цепи, на намагничивание стали, на поляризацию электролитической ячейки или на электрическое состояние вакуума применялось в различных цимоскопах.

сравнительно прохладном его месте, но при этом остается достаточно горячей для непрерывного испарения соли. Электрод в виде острия помещен в самую горячую часть пламени и изготовлен из платиновой проволоки диаметром 0,001 дюйма (0,025 мм).

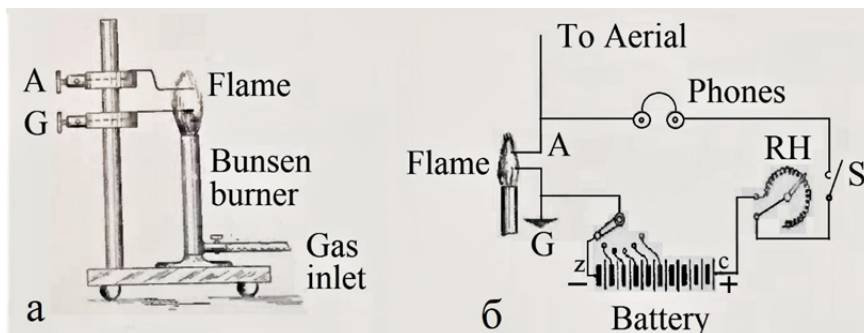


Рис. 6. Практическая конструкция детектора пламени (а), использовавшаяся до начала 10-х гг. XX в. любителями беспроводной телеграфии и принципиальная схема (б) телефонного приемника беспроводной телеграфии на детекторе пламени. 1913 г. [7].

Fig. 6. A practical design of a flame detector (б), used until the beginning of the 10s of the XX century by amateurs of wireless telegraphy and a schematic diagram (а) of a telephone receiver of wireless telegraphy on a flame detector. 1913 [7]

Расстояние острия от чашеобразного электрода по высоте составляет от 1/8 (3,2 мм) до 3/8 дюйма (9,5 мм). При выборе соли предпочтение было отдано гидроксиду калия. Пламя должно быть хорошо насыщено газом из испаряющейся соли в чашке нижнего электрода.

Принципиальная схема практического телефонного приемника беспроводной телеграфии на детекторе пламени приведена на рис. 6б [7]. В этом цимоскопе гальваническая батарея имеет многопозиционный переключатель для выбора напряжения от 6 до 35 или 40 В с шагом 1 В. Реостат включен последовательно с батареей и обеспечивает очень точное регулирование приложенного напряжения для установки критического или оптимального потенциала, при котором пламя является наиболее чувствительным, четко определенным. В работе [7] отмечено, что «этот детектор при правильной настройке является удивительно чувствительным, но не имеет никакого коммерческого значения по той причине, что пламя не может поддерживаться равномерным, особенно на судах в море, которые постоянно качаются и раскачиваются». Принцип работы этого детектора заключается в разрушении столба проводящего газа входящими волнами Герца, благодаря чему происходит изменение сопротивления проводящего пламени между двумя электродами. Этот эффект приводит к появ-

лению звукового сигнала в телефонных наушниках, имеющих сопротивление от 1000 до 2000 Ом.

4. Диодный аудион-детектор

Исследования Ли де Фореста с детекторами пламени показали, что газовая струя, на которой строится срабатывающее действие такого чувствительного устройства, позволяет обнаружить электромагнитные колебания в пространстве. Однако против практической эффективности такого детектора действует его нестабильность и высокая чувствительность. Это связано с тем, что пламя мгновенно реагирует не только на волны Герца, но и на воздушные потоки. В связи с этим такие детекторы не могут быть использованы в коммерческой беспроводной связи. Эти факты заставили де Фореста переключиться на другой тип теплопроизводящей среды, которая обладает необходимой стабильностью. Он перешел от экспериментов с ионизированными газами в открытом пламени к экспериментам в закрытом стеклянном баллоне и нагреве газа до ионизации с помощью внешней горелки Бунзена или путем пропускания электрического тока через углеродные или танталовые нити. Были опробованы оба метода нагрева. Ли де Форест сразу понял преимущества нагрева нити накала. Воздух внутри оболочки откачивали только до того уровня, при котором нить не окислялась при нагревании. Внутрь оболочки помещали натриевую или калиевую соль для увеличения ионизации. Де Форест утверждал, что это был логический шаг от детектора пламени к детектору в герметичном баллоне, в котором нагретая электричеством нить заменяла пламя Бунзена, а ионизированный газ содержится в стеклянном баллоне. Это несколько надуманное рассуждение имело решающее значение во время судебного процесса о приоритете изобретения де Форестом термоэмиссионной трехэлектродной лампы. Ли де Форест считал, что газы, ионизируемые пламенем, вызывают срабатывание реле (детектора пламени). Пламя само по себе было только механизмом для создания необходимой ионизации газа. Другие средства нагрева газов, достаточные для ионизации, привели бы к такому же действию детектора.

Во второй половине 1905 г. Клиффорд Бэбкок (*Clifford Dudley Babcock*, 09.1893—19??), один из помощников де Фореста, пришел к Генри МакКэндлессу (*McCandless Henry Wallace*, 1866—24.12.1957), владельцу *McCandless Incandescent Lamp Co.*³, с грубо изготовленной электрической лампой. Он спросил МакКэндлесса, сможет ли он скопировать этот

³ Н. W. McCandless & Company располагалась в Нью-Йорке (67—69 Park Place, New York City) и занималась производством электрических лампочек накаливания для новогодних елок.

образец и сделать 6 копий. Образец имел плоский анод, нить накала и был безцокольный. Можно предположить, что это был клапан Флеминга, так как других вакуумных двухэлектродных ламп в то время не было. Бэбкок рассказал о работе де Фореста над детектором беспроводного телеграфа и о том, что он уже опробовал экспериментальную форму детектора с использованием газового пламени и теперь хочет вместо него использовать для создания теплового потока электрическую нить накала в стеклянном баллоне. Два дня спустя Бэбкок вернулся и привел с собой де Фореста, чтобы обсудить конструкцию лампы [8]. Для выполнения заказа Бэбкока, МакКэндлесс разобрал образец на части и к концу 1905 года сделал с него требуемое количество копий двухэлектродной лампы [9]. Лампы имели углеродную нить накала на 4 В и винтовой цоколь E12 Edison. Контактный вывод от никелевого анода выходил из стеклянной колбы в нескольких миллиметрах от вершины стеклянной колбы, рис. 7. На рис. 7 также представлены некоторые образцы коммерческих клапанов Флеминга, которые производила в тот период времени компания Marconi. Учитывая тот факт, что де Форест внимательно следил за научными исследованиями в области беспроводной телеграфии, то не исключено, что конструкции этих вакуумных клапанов были ему известны.



Рис. 7. Клапан Флеминга, изготовленный для Клиффорда Бэбкока компанией *McCandless & Company* во второй половине 1905 г. [9] (слева) и четыре коммерческих образца клапана Флеминга производства компании *Marconi* [10].

Fig. 7. Fleming valve made for C. D. Babcock by *McCandless & Company* in latter part of 1905 [9] (left) and four commercial samples of Fleming valves manufactured by *Marconi Company* [10]

С 1905 г. МакКэндлесс стал ключевым звеном в истории электронных ламп, когда он начал выполнять заказы по их изготовлению для де Фореста. С 1910 по 1915 гг. МакКэндлесс производил все вакуумные лампы DeForest Audion. МакКэндлесс, который специализировался на производстве нестандартных ламп в небольших объемах, хорошо подходил для задачи производства аудионов.

В то время как первый заказ был дублированием, последующие заказы были уже на лампочки, которые изготовлялись по очень несовершенным эскизам Бэбкока или де Фореста. По сути, это были двухэлектродные устройства (нить накала и анод). У них вывод к аноду выводился через стенку стеклянной колбы, но иногда его делали вверх или сбоку.

После длительной серии испытаний Ли де Форестом было установлено, что горячая нить накала испускает поток ионов, который переносит ток от нити к аноду. Этот поток в точности аналогичен потоку в газовом пламени, но долгое время считалось, что его нельзя использовать в качестве почти идеального детектора волн. На основании этого была разработана двухэлектродная лампа под названием «аудион». Удивительно, что де Форест, знакомый с работами по термоэлектронной эмиссии, трактовал ее как поток ионов, а не электронов.

В течение первой половины 1906 г. Ли де Форест зарегистрировал несколько патентов на конструкцию двухэлектродного детектора в герметичном стеклянном баллоне под названием «Устройство регистрации колебаний» (англ. *Oscillation responsive device*), рис. 8 [11]. Однако чаще де Форест называл это устройство «аудион», хотя на данный момент это была электронная лампа с двумя электродами, а не та лампа, которая вскоре появилась с тремя электродами и получила такое же название. Патенты на эти аудионы были получены в том же 1906 г. Первоначально оба электрода в аудионе де Фореста были нитевидными, рис. 8а и 8б. Две нити, нагретые от отдельных батарей, одинаково хорошо производили желаемый детекторный эффект. Вскоре он устранил необходимость в одной батарее, заменив одну из нитей ненагреваемым пластинчатым электродом (холодный электрод), рис. 8в. Конструкция этой лампы вошла в два патента де Фореста: US824637 и US836070. Патент US836070 был отдельно ранее получен с приоритетом от 19 мая 1906 г.

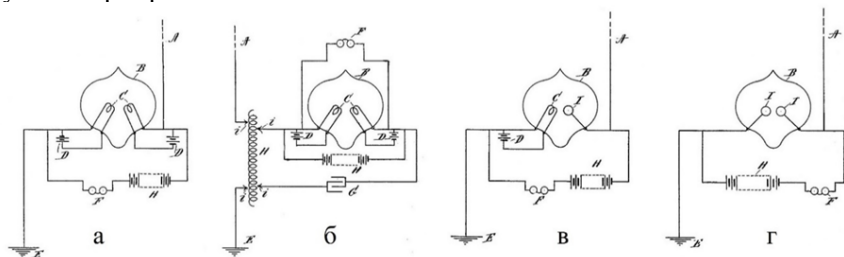


Рис. 8. Принципиальные схемы слуховых радиоприемников на двухэлектродной электронной лампе с анодным напряжением. Рисунок из патента Ли де Фореста US824637 с приоритетом от 18 января 1906 г. [11].

Fig. 8. Schematic diagrams of auditory radio receivers on a two-electrode electron tube with anode voltage. Drawings from Lee de Forest's patent US824637 with priority dated January 18, 1906 [11]

В дальнейших экспериментах он стал использовать конструкцию лампы с одним электродом в виде пластины (холодный анод) и электрической нитью накала, которая заменила второй электрод-пластину в предыдущих экспериментах. Вся конструкция помещалась в стеклянный баллон с невысоким вакуумом. Воздух внутри баллона откачивался только до точки, в которой нить не окислялась при нагревании. Внутрь стеклянной оболочки помещали натриевую или калиевую соль для увеличения ионизации.

Ли де Форест обнаружил, что полярность батареи «Н» в цепи (показанной на рис. 8в) заметно влияет на работу детектора. Из этого стало ясно, что эффект Эдисона (термоэлектронная эмиссия) участвует в работе аудиона. До этого де Форест был убежден, что ионизированные газы в стеклянном баллоне лампы ответственны за процессы, происходящие в ней. Эту конструкцию детектора с одной нитью накала де Форест так же назвал «аудионом». Она превосходила в работе все подобные устройства, с которыми он экспериментировал ранее.

5. Спор Дж. А. Флеминга с Ли де Форестом

Главное отличие двухэлектродного аудиона (патенты US824637 и US836070) от клапана Флеминга заключалось в том, что двухэлектродная лампа Фореста изначально предназначалась для создания приемного устройства сигналов беспроводного телеграфа на слух (наушники), рис. 9. Из стеклянного баллона аудиона газ был откачан лишь частично, де Форест ошибочно считал, что остаточный газ в баллоне необходим для работы устройства и целью нити накала было не испускание электронов, а нагрев газа для ионизации. Для усиления звука в схему была добавлена анодная батарея, которая в дальнейшем стала обозначаться как батарея «В». Отметим, что Дж. А. Флеминг тоже предложил схему слухового радиоприемника, но с вакуумным диодом и анодным питанием и получил на нее патент GB190813518A с приоритетом от 25 июня 1908 г., однако это произошло на 2 года позже после появления подобного изобретения американским радиотехником Ли де Форестом.

Дж. А. Флеминг на базе своего клапана разработал прибор «волномер», показания которого можно было наблюдать визуально на шкале гальванометра. Все это нашло отражение в названии полученных Флемингом британских и американских патентов:

- британский патент GB24850 *«Improvements in Instruments for Detecting and Measuring Alternating Electric Currents»* (Усовершенствование в устройствах для обнаружения и измерения переменных электрических токов) с приоритетом от 16 ноября 1904 г.;

- американский патент US803684 «*Instrument for converting alternating electric currents into continuous currents*» (Прибор для преобразования переменного электрического тока в постоянный) с приоритетом от 19 апреля 1905 г.

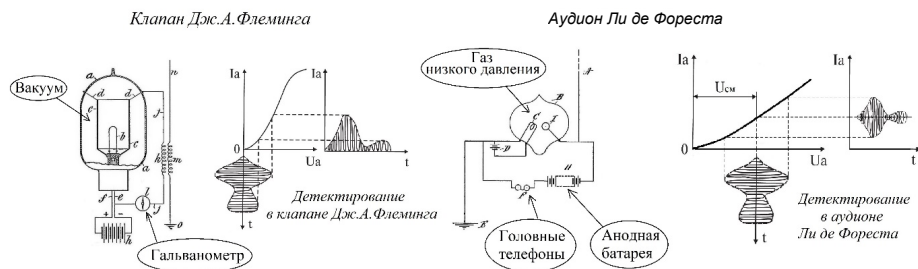


Рис. 9. Отличия аудиона Ли де Фореста от клапана Дж. А. Флеминга.

Fig. 9. Differences between Lee de Forest's audion and J.A. Fleming's valve

В патенте US836070 Ли де Форест, вероятно, чтобы отмежеваться от клапана Флеминга, указывает, что для работы двухэлектродного аудиона необходимо, чтобы внутри его баллона находился газ низкого давления. Это особо подчеркивается в восьми пунктах формулы изобретения. В качестве газа могут быть пары ртути, воздух и другие газообразные вещества.

Сегодня схема Де Фореста была бы классифицирована как «термоэмиссионный диодный выпрямитель с прямым смещением» [12]. На графиках рис. 9 представлен процесс обнаружения радиоволн клапаном Флеминга и аудионом Фореста. Кривая зависимости $I_a = f(U_a)$ показывает, как входное напряжение U_a связано с величиной выходного тока I_a . В клапане Флеминга только положительная половина каждой волны, приложенной к аноду, производит выходной ток, который затем «усредняется» механической инерцией диафрагмы или стрелкой измерительного прибора. В диоде Де Фореста «напряжение прямого смещения» сохраняет анод всегда положительным, но при этом асимметричное соотношение между входным напряжением и выходным током вносит искажения в выходной сигнал при усреднении обнаруживаемого сигнала.

Тот факт, что двухэлектродный аудион де Фореста был практически идентичен запатентованному пустотному клапану Флеминга, отметил даже сам Дж. А. Флеминг и патентные поверенные компании, которых наняла Marconi Company для разбирательства. К концу своей жизни де Форест утверждал, что устройство аудиона из двух электродов было логическим решением исключить из него газовое пламя и на это решение конструкция клапана Флеминга никак не повлияла. Ли де Форест, столкнувшись с обвинениями в том, что он скопировал не только вентиль Флемин-

га, но и еще ранее — электролитический детектор Фессендена, встал на защиту своего изобретения и своей репутации. Он отвечал на обвинения, настаивая на том, что диод аудион и клапан Флеминга имеют структурные различия и функционируют по-разному. Ли де Форест отрицал схожесть конструкций, даже зная, что пустотный клапан был изобретен раньше диода аудиона. Однако историки науки техники приводят весомые доказательства того, что Ли де Форест все же скопировал конструкцию пустотного клапана и проводил с ним эксперименты [9, с. 18].

Рассматривая патент (рис. 8в) де Фореста, можно предположить, что беспроводной сигнал от антенны к земле через диод может изменить условия внутри лампы и таким образом вызвать значительный ток от батареи через диод и телефон. Из анализа следует, что этого не происходит, и что устройство является чисто выпрямительным. Батарея только поддерживает напряжение смещения на пластине, переключая действие диода с выпрямления односторонней проводимости на выпрямление из-за кривизны характеристики. Отклик на положительные части сигнала больше, чем при нулевом смещении, что частично компенсируется обратным откликом на отрицательные части.

Дело в том, что термоэмиссионный диод обычно лучше всего обнаруживает небольшие сигналы, когда он не имеет смещения или даже при небольшом отрицательном смещении. Флеминг выбрал последнее условие, подключив свой пластинчатый электрод к отрицательной стороне нити накала. Более того, во всех простых выпрямительных детекторах, независимо от того, снабжены ли они прямым или обратным смещением, или вообще не имеют смещения, вся мощность сигнала, достигающая телефона или другого индикатора, поступает от входного сигнала с антенны. Таким образом, термоэлектронный диод с прямым смещением не имел практической ценности, и он никогда не использовался в коммерческих целях. Однако это имело историческое значение, несмотря на ошибочность рассуждений де Фореста.

6. Женитьба Ли де Фореста

Первая половина 1906 г. в жизни де Фореста ознаменовалась не только новыми исследованиями и разработкой чувствительного герметичного детектора с подогревом, но и событиями в личной жизни. В этот период времени Ли де Форест, помимо экспериментов, занимался устройством своей личной жизни. У него была ученица Люсиль Шеардаун (*Lucille Sheardown*), которую он обучал азбуке Морзе. Познакомились они

в октябре 1905 г. Люсиль получила образование во Франции и Швейцарии, а также говорила на пяти языках и, что удивительно, проявляла интерес к беспроводной телеграфии.

Все ухаживание пары, как сказал сам доктор де Форест, продвигалось с скоростью беспроводной телеграфии. Влюбленные жили на разных улицах Нью-Йорка. Дом Ли де Фореста находился на 315 *West 97th Street*, а Люсиль Шеардаун — на 560 *West End Avenue*. Расстояние между ними составляло около 900 м. Чтобы быть ближе к любимой, Ли де Форест для общения установил у себя дома и в ее будуаре систему беспроводного телеграфа.

После четырех месяцев ухаживания в дело вступил беспроводный телеграф. Доктор де Форест позвонил своей возлюбленной и сказал, что хочет сообщить ей нечто очень важное. У него предполагалась командировка в Европу, в которую не хотел ехать один. Отплытие было назначено на следующую субботу. Он спросил: «Ты можешь выйти сразу за меня замуж и поехать со мной в Европу?». Мисс Шеардаун, конечно, была ошеломлена — это было так неожиданно! Был достигнут компромисс, что, если де Форест отплывет через неделю, то он возьмет с собой невесту. Влюбленные достигли согласия благодаря беспроводному телеграфу. «Это правда, что у нас были свои правила», — сказала сегодня невеста, — «и мы часто разговаривали друг с другом. За мной действительно ухаживал беспроводный телеграф» [13].

О бракосочетании сообщила газета «*New York World*» от 17 февраля 1906 г. в статье под заголовком «Беспроводное ухаживание окончилось свадьбой», рис. 10 [13]. Жениху было 33 года, невесте — 24 года.

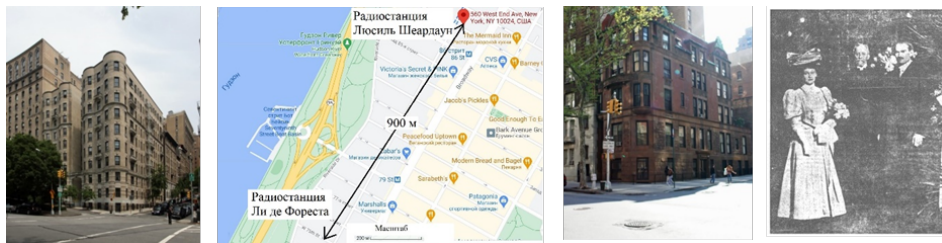


Рис. 10. Дом Ли де Фореста (слева) на 315 *West 97th Street*, карта с указанием расстояния между домами влюбленных, дом Люсиль Шеардаун (посередине) на 560 *West End Avenue*. Свадебная церемония Ли де Фореста и Люсиль Шеардаун.

17 февраля 1906 г. Нью-Йорк [13].

Fig. 10. Lee de Forest's home (left) at 315 *West 97th Street*, map showing the distance between the lovers' homes, Lucille Sheardown's home (in the middle) at 560 *West End Avenue*. The wedding ceremony of Lee de Forest and Lucille Sheardown. February 17, 1906. New York [13]

Церемония бракосочетания состоялась в зале *Louis Seize* отеля «*St. Regis*» в 9:30 в субботу 17 февраля 1906 г. Преподобный доктор Альфред Э. Мейерс (*Alfred E. Meyers*) из Мраморной коллегияльной церкви (*Marble Collegiate Church*) совершил богослужение. Присутствовали только родственники семьи. На красивой молодой невесте было свадебное платье (*going-away gown*), дорожный костюм в серую клетку, с плетеной юбкой и итонским жакетом (*Eton jacket*). Маленькая серая французская шляпка, отделанная затененными розовыми розами, тонкая талия с ручной вышивкой и длинные перчатки завершали наряд. Единственным украшением, которое она носила, была большая бриллиантовая булавка-подарок жениха. Невеста держала в руках букет роз.

На свадьбе помимо матери невесты и матери жениха были Чарльз де Форест, президент американской компании *De Forest Telegraph Company* Авраам Уайт, миссис Уайт и г-н Эдвард Хаммерсли (*Edward Hammersley*).

Медовый месяц молодая пара провела в поездке в Англию на борту лайнера *Lucania*. В Англии их пребывание было не очень веселым. Из-за психологической несовместимости они постоянно ссорились и воевали между собой. По прибытию в США Ли де Форест нашел утешение с женщиной по имени Анна, а Люсиль начала тайно встречаться с богатым человеком по имени де Витт Клинтон Фланаган (*DeWitt Clinton Flanagan*). Де Форест почувствовав измену супруги, нанял частного детектива, который и установил существование Фланагана. Де Форест в октябре подал на развод, а в декабре 1906 г. он уже был свободен [14]. Его первый брак с Люсиль *Sheardown* продлился всего несколько месяцев.

7. Эксперименты продолжаются

Последняя четверть 1906 г. принесла Форесту массу неприятностей, к краху семейного счастья добавился разрыв в ноябре контракта с компанией *American De Forest Wireless Telegraph*. Опять де Форест оказался в житейской ситуации, когда нет средств и необходимо полагаться на собственные силы. Анализируя ситуацию, он пришел к выводу, что его новое и более светлое будущее лежит в области беспроводной телефонии, а не в телеграфии. В этот период времени датский инженер Вальдемар Паульсен сконструировал дуговой передатчик незатухающих электромагнитных колебаний для передачи голосовых сигналов.

В конце 1906 г. де Форест смог спроектировать и сконструировать свой первый примитивный телефонный передатчик на угольной дуге с микрофоном, способный транслировать человеческую речь. Используя

этот «безыскровый» передатчик, де Форест впервые передал речь 31 декабря 1906 г. в пределах лабораторной комнаты в Паркер-билдинг (англ. *Parker Building, 19th Street and 4th Avenue, Manhattan*). В этом эксперименте принимал участие его первый лаборант, шестнадцатилетний школьник Джон Хоган-младший⁴, который в телефонной трубке аудионного приемника услышал слова, сказанные Форестом в микрофон дугового передатчика. Эта конструкция телефонного дугового передатчика использовалась Форестом до 1912 г. [1, с. 221]. Позже на эту конструкцию передатчика Форест получил патент US1123118 (рис. 11 [15]). Разработанный передатчик стал важной составной частью беспроводной телефонной системы де Фореста, однако в ее приемной части не доставало такого детектора, конструкция которого бы не нарушала чьих-то авторских прав.

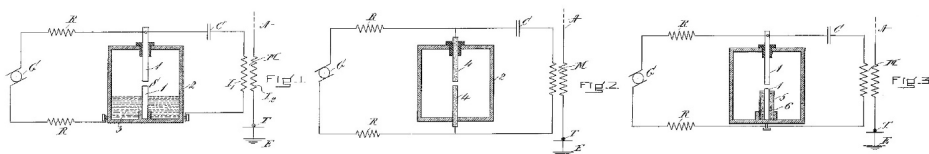


Рис. 11. Принципиальные схемы дуговых передатчиков голосовых сигналов конструкции де Фореста. На схемах микрофон Т включен в антенную катушку М.
Патент US1123118 с приоритетом от 8 июля 1907 г. [15].

Fig. 11. Schematic diagrams of arc transmitters of voice signals designed by de Forest. In the diagrams, the microphone T is included in the antenna coil M. Patent US1123118 with priority dated July 8, 1907 [15]

Ли де Форест, невзирая на неудачи в личной жизни, продолжал работать над поиском конструкции чувствительного детектора. Результаты его экспериментов с детекторами пламени стали основой для проведения серии испытаний ламповых детекторов с электрической нитью накала в той же последовательности, что и с пламенем. Это заняло больше времени, чем эксперименты с детекторами пламени, однако это дало возможность оценить два устройства путем их сравнения. Такой подход в дальнейшем позволил Форесту утвердиться в мысли, что нет ничего более удобного, практичного и многообещающего, чем электрическая лампа накаливания.

⁴ Джон Хоган-младший (*John Vincent Lawless Hogan Jr.*, 14.2.1890—29.12.1960) будучи школьником построил свою первую любительскую беспроводную станцию в 1902 г. С 1906 по 1907 гг. работал у Ли де Фореста в качестве лаборанта. Впоследствии он стал известным радиотехником и одним из основателей *IRE*, а потом его и президентом (1920 г.). Он получил 34 патента. Наиболее известной его разработкой является детекторный гетеродинный радиоприемник (1913 г.). Владелец коммерческой радиостанции *WQXR* в Нью-Йорке (1928—1944). Радиостанция вещала в 1929—1934 гг. на частоте 2100 кГц (142,7 м), а в 1934—1941 гг. на частоте 1550 кГц (193,4 м).

Перед тем как начать эксперименты, необходимо было решить, с каким питающим напряжением выбрать лампы, а также определиться с количеством и типом используемых в них электродов. Для экспериментов оказались наиболее подходящими лампы с маленьким цоколем-канделябром и низким напряжением, которые предназначались для елочных гирлянд. Этот тип ламп был приобретен у *McCandless Incandescent Lamp Co.* Однако покупка всего 2—3 образцов электрических ламп, которые, возможно, перегорели бы через нескольких минут после испытаний, представляла собой реальную финансовую проблему. Генри МакКэндлессу потребовалось необычное умение, чтобы сконструировать различные электроды и затем откачать лампу ручным насосом перед герметизацией, рис. 12.



Рис. 12. Генри МакКэндлесс — президент H. W. McCandless Co., завод компании H. W. McCandless Co. (Нью-Йорк), продукция завода — электрические лампы [8] и встреча Ли де Фореста с Генри МакКэндлессом (1949 г.).

Fig. 12. Henry McCandless – President of H. W. McCandless Co., a H. W. McCandless Co. (New York), plant products – electric lamps [8] and Lee de Forest's meeting with Henry McCandless (1949)

Компании МакКэндлесса после нескольких неудач удалось изготовить первую двухэлектродную лампу согласно патентам US836070 [16] и US824637 [17], рис. 8в. Затем были изготовлены лампы с учетом проведенных экспериментов с детекторами пламени. Результаты экспериментов с этими лампами оказались неоднозначными. После этого последовал тест с горизонтально расположенной лампой с жидким анодом (небольшая емкость с ртутью), рис. 13а [18]. В тексте патента US837901 де Форест отметил: «Я сделал еще одно открытие, что чувствительность детектора колебаний, содержащего два электрода, разделенных чувствительной газовой средой, может изменяться, например, под действием магнитного поля, при этом его чувствительность зависит от частоты электрических колебаний, воздействующих на него... Изменяя положение и силу магнитного поля Н, можно производить регулировку чувствительности детектора по отношению к частоте принимаемых волн, а выбор волн желаемой частоты позволяет его использовать в качестве устройства настройки» [18].

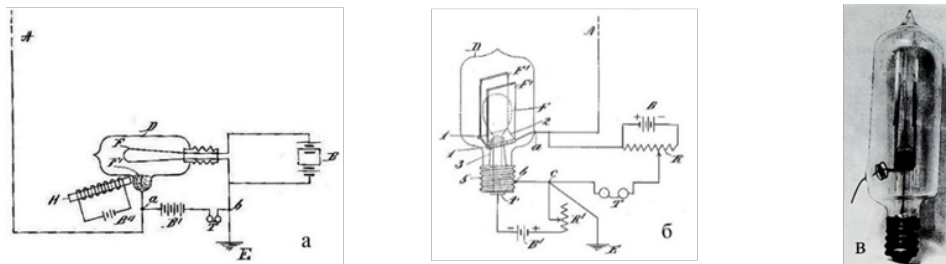


Рис. 13. Принципиальные схемы слуховых радиоприемников Ли де Фореста: а — с регулировкой чувствительности магнитным полем (патент US837901 с приоритетом от 14 февраля 1906 г.) [18], б — на двухэлектродной лампе «Audion» с двумя анодами (патент US841386 с приоритетом от 27 августа 1906 г.), в — двухэлектродный аудион, изготовленный компанией де Фореста для военно-морского флота США (сентябрь 1906 г.) [9, с. 64].

Fig. 13. Schematic diagrams of Lee de Forest's auditory radio receivers: a – with sensitivity adjustment by a magnetic field (patent US837901 with priority dated February 14, 1906) [18], b – on a two-electrode Audion tube with two anodes (patent US841386 with priority dated August 27, 1906), в – two-electrode audion manufactured by the de Forest company for the US Navy (September 1906) [9, p. 64]

Особенно важным оказался эксперимент с лампой, содержащей два анода F' и F'' , между которыми находилась нить накала F , рис. 13б. Этот оригинальный усилитель содержит анодную батарею B , которую в этой схеме можно рассматривать как своеобразную «С-батарею смещения», которая создает определенный электрический потенциал на аноде как на управляющем электроде. Это позволяет сделать вывод о том, что мысль об «отрицательном смещении на сетке» возникла у де Фореста раньше того момента времени, когда она посетила Левенштейна и зафиксировалась в его патенте.

В сентябре 1906 г. де Форест сделал свою первую продажу электронных ламп в рамках правительственного заказа для военно-морского флота Соединенных Штатов в виде полного приемного комплекта, оснащенного аудион-детекторами (рис. 13б, в) с канделябрным цоколем. Однако они были двухэлементного типа, только с пластиной и нитью накала. Эти, как и последующие конструкции, но уже трехэлектродные лампы, носили название «аудион».

Ли де Форест был убежден, что чувствительность его аудиона (рис. 13б) как детектора можно сделать еще больше. Помня об отдельной локальной цепи, внесенной в его детектор пламени, он решил установить дополнительную пластину, внешнюю по отношению к стеклянной оболочке. Для этого он наклеил полоску оловянной фольги (7) на стекло снаружи лампы (рис. 14а) [19]. Этот дополнительный электрод не оказал су-

щественного влияния на чувствительность устройства. Тогда Форест осторожно лезвием разрезал приклеенную фольгу в виде длинной спирали, похожей на пружину. В результате вместо плоской металлической пластины получилась плоская катушка индуктивности, рис. 14б.

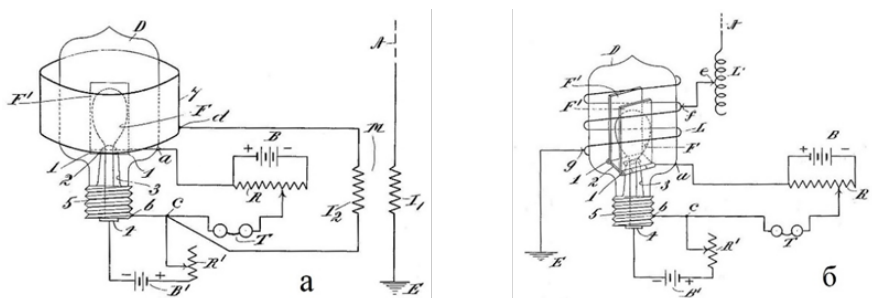


Рис. 14. Аудион с внешним электростатическим контролем на стекле снаружи баллона D: а — пластина 7, б — плоская катушка индуктивности L. Рисунки из патента Ли де Фореста US841386 с приоритетом от 27 августа 1906 г. [19].

Fig. 14. Audion with external electrostatic control on the glass outside the cylinder D: a — plate 7, b — flat inductor L. Drawings from Lee de Forest's patent US841386 with priority dated August 27, 1906 [19]

После подключения к катушке L (рис. 14б) заземления E и отвода f от антенной катушки L' были получены поразительные результаты, более громкий звук в наушниках T , чем в ранее трестировавшихся аудионах. В этом приемнике для питания нити накала использовалась 6-вольтовая аккумуляторная батарея B' с переменным сопротивлением R' . Величина анодного напряжения была установлена на уровне $22\frac{1}{2}$ В с помощью потенциометра R . Эти значения величин напряжений для нити накала и анода в дальнейшем были приняты в качестве стандартов и использовались в будущих радиосхемах в течение многих лет.

8. Дискуссия в Американском институте инженеров-электриков

26 октября 1906 г. на 210-м заседании Американского института инженеров-электриков (*American Institute of Electrical Engineers*, или сокращенно AIEE) в Нью-Йорке де Форест представил результаты своих разработок по двухэлектродным аудионам под названием «Аудион. Новый приемник для беспроводной телеграфии» (*The audion. A new receiver for wireless telegraphy*) [20]. Обзор, сделанный де Форестом, включал множество впечатляющих диаграмм, а также подробный отчет о каждом явлении, которое когда-либо наблюдалось при работе с аудионом или подоб-

ными устройствами. В нем не было четкого объяснения того, как работает аудион. Заявляя, что работа аудиона основана на совершенно новых принципах, де Форест признавал, что действительно не может полностью объяснить, что это за новые принципы. «Все они находятся в глубине обширного текста и диаграммах, что является подтверждением того, что я еще не пришел к полностью удовлетворительной теории в отношении того, как работает аудион» — сказал де Форест.

После окончания доклада состоялось его обсуждение, в котором приняли участие: Майкл И. Пупин (*Michael I. Pupin*), Перси Томас (*Percy H. Thomas*), Ли де Форест, Сивел Кэбот (*Sewall Cabot*), Дж. Тейлор (*J. B. Taylor*), Э. Томпсон (*Edward P. Thompson*) и Ф. Вриланд (*Frederik K. Vreeland*). Приведем некоторые фрагменты, которые прозвучали в процессе обсуждения доклада де Фореста [21].

Дискуссию открыл Майкл И. Пупин. В своем выступлении он выразил несогласие с введенным де Форестом названием «*audion*» для разработанных им детекторов: «Если у каждого нового детектора должно быть новое имя, то есть новое имя для всего, что появляется в ходе развития электрического искусства, то очень скоро наука электротехника превратится в лабиринт новых имен. Выучить имена будет намного труднее, чем изучить факты, связанные с искусством. По этой причине я против новых имен. Хотя доктор де Форест с большим энтузиазмом относится к элегантности имени «*audion*», я должен сказать, что он меня не очень впечатлил. Это смесь. Это латинское слово с греческим окончанием. Если бы он сказал «*acoion*» или «*ousticon*», это могло бы быть лучше, но произнести его было труднее» [21, p. 764].

Обсуждение, последовавшее за докладом, показало, что общий принцип работы устройства не был ясен не только присутствующим, но даже самому де Форесту. По этому поводу Пупин сказал: «Мне кажется, что это один из самых сложных моментов для понимания в докладе. Это камень преткновения в нашем понимании *modus operandi* (лат., образ действия) всего этого. Почему это работает? У меня нет объяснений. С моей стороны было бы самонадеянно предложить его, даже если бы у меня оно и было. Если доктор де Форест не может этого объяснить, то я тем более, тоже не могу» [21, p. 766].

В ходе дискуссии прозвучал вопрос Перси Томаса (*Percy H. Thomas*) [21, p. 766] о том, правильно ли он понимает предположение о том, что действие аудиона зависит от ионизации остаточных газов в вакууме, или вакуум настолько совершенен, что ионы или электроны исходят от самих электродов? На это де Форест сказал: «Я думаю, что это связано с иониза-

цией остаточных газов. Газы все еще существуют в лампе, потому что вакуум — это только то, что есть во всех лампах накаливания» [21, р. 769].

12 ноября 1906 г. заседание Американского института инженеров-электриков по докладу де Фореста было продолжено в филиале института в городе Филадельфия [22]. В этой дискуссии по «аудиону» приняли участие: К. Эрет (*Cornelius D. Ehret*), Ли де Форест, В. Темпел (*W. E. S. Temple*), Г. Снук (*H. C. Snook*), Эдвин Нортруп (*E. F. Northrup*), Джеймс Хейвуд (*James Haywood*) и Георг Брид (*Georg Breed*).

Первый вопрос был задан К. Д. Эретом⁵: «Доктор де Форест, пожалуйста, укажите принципиальную разницу в работе между этим аудионом и выпрямителем Флеминга, структурные схемы которого очень похожи на те, которые Вы разместили на доске» [22, р. 775]. На что Ли де Форест сказал: «...Одним словом, главное различие заключается в следующем: выпрямитель Флеминга представляет собой выпрямитель Герца, а аудион — реле» [22, р. 776].

Далее вопрос задал Э. Нортруп⁶ [22, р. 777]: «Не могли бы вы рассказать нам более подробно об этом релейном устройстве. Если происходит быстрое нажатие клавиши, как быстро можно заставить реле срабатывать? Потому что если вы заставите реле срабатывать быстро, вы сможете делать очень много вещей по управлению движением и т. д.» Ответ на него Ли де Форест сформулировал следующим образом [22, р. 777]: «Мы никогда не пробовали передавать сигналы быстрее, чем требуется в обычной практике телеграфа, примерно 35 слов в минуту. Конечно, можно заметить, что вольтметр с медленным откликом отклоняется даже при мгновенном подключении. Реле будет работать положительно на таких скоростях с очень небольшим усилием, и что касается аудиона, то он будет обеспечивать скорость, по крайней мере, 35 слов в минуту, и я предполагаю, что с осциллографом он будет идеально воспроизводить колебания очень высокой частоты».

Другой вопрос, заданный Г. Снуком⁷, звучал так [22, р. 777]: «Приводят ли остатки отработанного газа, остающиеся в баллоне лампы, к инерционности при работе аудиона?». Де Форест на него ответил [22,

⁵ К. Эрет (*Cornelius D. Ehret*) — сотрудник *Consolidated Wireless Telegraph and Telephone Company*. В 1905 г. получил первый патент US785804 на систему частотной модуляции (FM).

⁶ Эдвин Фитч Нортруп (*Edwin Fitch Northrup*, 23.02.1866–13.05.1940) — профессор физики в Принстонском университете с 1910 по 1920 гг. Был связан с *Leeds & Northrup Company* около семи лет. В 1937 г. опубликовал научно-фантастический роман «От нуля до восьмидесяти» (*Zero to Eighty*) под псевдонимом Аккад Псевдоман (*Akkad Pseudoman*).

⁷ Гомер Клайд Снук (*Homer Clyde Snook*, 25.03.1878–23.09.1942) — американский инженер-электрик и изобретатель. Разработал аппарат *Snook*, первое устройство без прерывания, созданное для работы с рентгеновскими лучами.

р. 778]: «Безусловно, газ имеет некоторое отношение к этому явлению. Если процесс истощения заходит слишком далеко, то аудион теряет чувствительность. Носителями являются частицы газа, а не частицы металлической пыли. Я вообще не верю, что частицы пыли контролируют процесс. Самое удивительное, что это отставание наблюдается при низком напряжении батареи «В». Вы не можете представить себе, как весь газ концентрируется в этом пространстве вокруг изолированного анода, в то время как колебания Герца проходят, но, похоже, происходит либо отвод ионов в это пространство и очень медленное восстановление их первоначального положения, либо иначе полная деионизация и очень медленная реионизация. Положительные и отрицательные ионы объединяются и перестают быть носителями. Тогда они ни что иное, как молекулы воздуха. Я так и не смог найти адекватного объяснения этого отставания».

Интересно отметить, что в выступлении Ли де Фореста ни слова не говорилось о его недавних экспериментах, сделанных до даты доклада, по воздействию на газосодержащую среду под низким давлением в трехэлектродной лампе. Статья с текстом доклада «*The audion – a new receiver for wireless telegraphy*» была также опубликована, но в двух частях в конце 1907 г. в журнале *Scientific American Supplement* [23, 24].

9. Аудионы с внутренним дополнительным электродом-пластиной

За день до выступления в Американском институте инженеров-электриков в Нью-Йорке (95 *Liberty St.*, NY) де Форест подал еще одну патентную заявку (патент US841387) на устройство под названием «Устройство для усиления слабых электрических токов» (англ. *Device for Amplifying Feeble Electrical Currents*) [25]. В этой заявке описывалась лампа с остаточным газом в виде вакуумированного баллона, в котором запаяны два параллельных вертикально расположенных ненагреваемых (холодных) металлических электрода (аноды) D и D' , в пространстве между которыми находится металлическая или углеродная нить накала, рис. 15а. Такая конструкция лампы с остаточным газом не была инновационной, в то время как внешние соединения анодов и способ использования устройства обладали элементами новизны. Каждый анод имел независимый вывод для включения в схему устройства. В баллоне лампы содержится «чувствительная проводящая газовая среда, поддерживаемая в состоянии молекулярной активности» [25]. Для нагрева нити накала E используется батарея B . Нить накала может быть выполнена из платины, тантала, углерода или другого подходящего материала.

Электроды D и D' находятся на разном расстоянии от нагреваемого электрода (нити накала). Расстояние между электродами ED' меньше, чем между ED . В лампе условно выделяются две цепи: цепь $BRDE$ — локальная приемная цепь и цепь F , которая представляет собой линейную цепь (цепь радиочастоты $R.F.$), передающую токи, которые необходимо усилить усилительным устройством. В локальной цепи происходит усиление электрического тока.

В формуле изобретения (пункт 5) впервые приводится разделение цепей, которое можно назвать разделением холодным электродом (англ. *split cold electrode*). Различное соединение этих двух цепей с горячим электродом легло в основу последующего патента на трехэлектродную усилительную лампу с реальным релейным действием. Во время судебного иска *Marconi Wireless Telegraph Company of America* к *De Forest Radio Telephone and Telegraph Company* ответчики отозвали возражение по пункту 5 формулы патента US841387, которое после этого было записано следующим образом: «Пункт 5. Устройство для усиления электрических токов представляет собой вакуумированный баллон, содержащий газообразную среду, средства поддержания указанной газообразной среды в состоянии молекулярной активности, отличные для принимаемой энергии, средства для воздействия усиливаемого тока на указанную газообразную среду и локальную приемную цепь, имеющую свои электроды внутри указанного сосуда» [26].

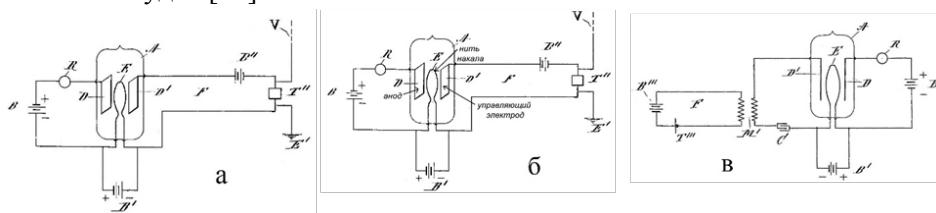


Рис. 15. Конструкции аудионов А для усиления слабых электрических токов с плоским сплошным управляющим электродом D' . Патент Ли де Фореста US841387 с приоритетом от 25 октября 1906 г. [25].

Fig. 15. Designs of audions A for amplifying weak electric currents with a flat solid control electrode D' . Lee de Forest's patent US841387 with priority dated October 25, 1906 [25]

В усилительном устройстве впервые в линейной цепи аудиона была использована третья гальваническая батарея B'' , которая в дальнейшем стала обозначаться буквой «С», как компонент для создания смещения на управляющем электроде D' . Форест упустил этот факт для оформления еще одного изобретения и поэтому не указал полярность включения батареи B'' на патентном чертеже, рис.15а, б. Это является неопровержимым

прямым доказательством того, что идея «отрицательного смещения на сетке» впервые возникла у де Фореста. Через 6 лет Фриц Левенштейн подал заявку для получения патента на изобретение усовершенствованной конструкции аудиона с батареей смещения. Это позволило не только ему, но тем, кто потом контролировал патент Левенштейна, компании *AT&T*, хорошо финансово обогатиться [27].

В тексте патента US841387 отмечено, что работа устройства зависит от электростатического притяжения между нитью накала и анодом D' , который соединен с антенной. Выходной ток управляется с помощью этого электрода D' при изменении его потенциала. Это фундаментальное свойство предложенного электронного усилителя. Из-за роли, которую играет электрод D' контроля тока, его стали называть «управляющим». Устройство, на которое распространяется эта патентная заявка, явилось первоначальной формой трехэлектродного аудиона. В этой конструкции аудиона (рис. 15) управляющий электрод в виде пластины D' установлен перед катодом и анодом. Такая компоновка электродов, как оказалась, способна усиливать электрический сигнал, но в меньшей степени, чем, когда позже в форме решетчатой конструкции его расположили между нитью накала (катодом) E и анодом D .

В патенте US841387 Ли де Форест приводит и другие возможные методы воздействия на «чувствительную проводящую газообразную среду» в стеклянном баллоне аудиона. При этом он всячески избегает употребление понятия электронный поток, летящий от катода к аноду, невзирая на то, что был знаком с работами Т. Эдисона, Дж. Дж. Томсона и Оуэна Ричардсона. Это говорит о том, что Форест вообще не понял природу термоэлектронной эмиссии.

Ли де Форест испытал влияние магнитного поля на «чувствительную проводящую газообразную среду», для этого он включил подковообразный электромагнит с двумя катушками в линейную цепь и установил его за стеклянным баллоном лампы, в котором располагались анод D и нить накала A , рис. 16. По мысли Фореста, усиливаемые токи, проходя через соленоид, окружающий магнит NS , изменяют его магнитное поле, которое, воздействуя на движущиеся ионы в газовой среде между электродами D и E , изменяет ток в локальной цепи. В результате такого воздействия магнитного поля происходит усиление электрического сигнала.

Патентное ведомство США выдало этот очень важный патент US841387 Ли де Форесту через 2,5 месяца после подачи заявки на изобретение, то есть 15 января 1907 г.

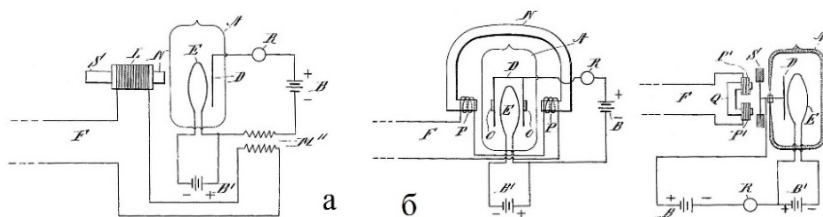


Рис. 16. Конструкции усилительных электронных ламп с магнитным управлением анодного тока. Рисунки из патента Ли де Фореста US841387 с приоритетом от 25 октября 1906 г. [25].

Fig. 16. Designs of amplifying electronic tubes with magnetic control of the anode current. Drawings from Lee de Forest's patent US841387 with priority dated October 25, 1906 [25]

10. Аудионы с внутренним дополнительным электродом-сеткой

Поиски наилучшего места для третьего электрода в расположении анода и катода внутри баллона аудиона не прекращались. Решение пришло к де Форесту в конце осени 1906 г., когда он завтракал со своим патентным юристом Джорджем К. Вудвортом (*George C. Woodworth*). Решение он набросал в виде рисунка на обратной стороне картонного меню. Форест предположил, что аудион мог бы работать лучше, если бы второй холодный электрод был помещен между нитью накала и анодом. Однако, он был в этом не до конца уверен, думая о том, что сплошной плоский электрод заблокирует поток «частиц» от нити накала к аноду. Чтобы этого не произошло, решено было сделать этот электрод несплошным. Для этого был использован одиночный провод, который он согнул несколько раз вперед и назад в форме зигзага. Ли де Форест дал название зигзагообразной (*zigzag*) проволоке управляющая «сетка» (*grid*) из-за ее внешнего сходства с линиями «*gridiron*» на игровых полях для американского футбола.

«У меня сложилось впечатление, — сказал де Форест, — что если мы возьмем эту зигзагообразную проволоку и поместим ее внутри, где она будет между горячей нитью накала и холодным анодом, то после этого мы должны заметить существенное улучшение. Я считаю, что чем ближе мы расположим друг к другу три элемента, тем эффективнее они будут действовать» [5].

25 ноября 1906 г. де Форест заказал у МакКэндлесса несколько ламп, которые содержали проволочную зигзагообразную сетку между нитью накала и анодом. В это время де Форест испытывал серьезные юридические и финансовые проблемы. Спустя один час после того, как он разместил этот заказ у МакКэндлесса, его компаньоны вынудили его уйти с

должности вице-президента и научного директора американской компании *De Forest Wireless Telegraph*. Ему выдали 1000 долларов, половину из которых взял его адвокат, и ожидающие рассмотрения патенты на audion (которые спонсоры сочли бесполезными) в качестве выходного пособия. Его озабоченность этой чрезвычайной ситуацией делает понятным тот факт, почему аудионы нового «сеточного типа» не тестировались до 31 декабря 1906 г.

Тестирование новой конструкции аудиона де Форест проводил со своим помощником Джоном Хоганом. От этой конструкции аудиона удалось получить усиление звукового сигнала, хотя и небольшое. Во время экспериментов Хоган впервые снял анодно-сеточную характеристику (график зависимости анодного тока от напряжения на сетке при неизменном напряжении на аноде лампы) трехэлектродной лампы (аудиона). Результаты экспериментов убедили Ли де Фореста в том, что он изобрел новый важный детектор радиоволн. В этот момент ему было 34 года.

В результате исследований Ли де Фореста была сконструирована усилительная радиолампа с низким содержанием остаточного газа, имеющая три электрода: анод, сетку и катод, рис. 17. Другими словами, была изобретена трехэлектродная лампа, в которой управление анодного тока осуществлялось с помощью изменения электрического потенциала сетки. Появление этой электронной лампы было связано с потребностью беспроводной телеграфии иметь при приеме более сильный сигнал радиостанций в сравнении с существовавшими тогда конструкциями детекторов. Заметим, что созданная ранее усилительная «лампа Либена» для радиоприема не задумывалась, а предназначалась исключительно для усиления звуковых сигналов телефонных линий.

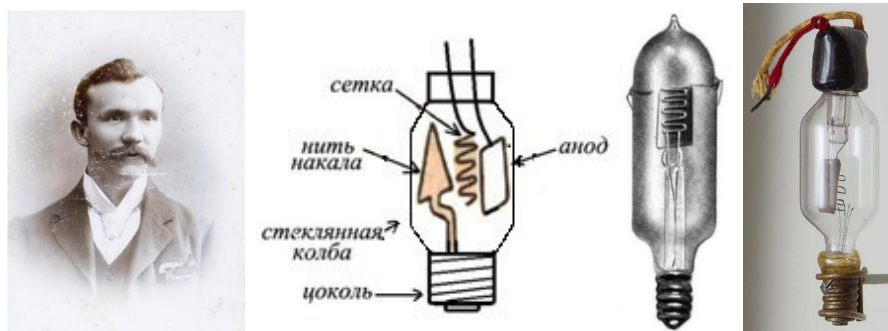


Рис. 17. Ли де Форест (1907 г.), устройство аудиона и его ранние конструкции. 1907 г.

Fig. 17. Lee de Forest (1907), the audion device and its early designs, 1907

Ли де Форест назвал изобретенную трехэлектродную вакуумную лампу по аналогии с двухэлектродным аудином (*Audion detector*) — «*Audion*» (от латинского слова «аудио» слушаю). Об этом он написал так: «Название «*Audion*» для этого устройства так же красиво, как и уместно. Этому я обязан моему помощнику, г-ну Клиффорду Бэбкоку, который принимал с самого начала непосредственное участие в разработке этого устройства» [24]. В дальнейшем, под «*Audion*» стали понимать только трехэлектродную лампу с сеткой между катодом и анодом.

11. Тестирование аудиона Stone Telegraph & Telephone Co.

Об изобретении нового чувствительного детектора Ли де Форест сразу сообщил своему другу Джону С. Стоуну⁸, владельцу компании *Stone Telegraph & Telephone Co.* и попросил его протестировать устройство. Компания Стоуна производила аппаратуру для беспроводного телеграфа, которую сдавала в аренду. *Stone Telegraph & Telephone Co.* располагалась в городе Кембридж⁹ (*Cambridge*) штат Массачусетс и Бостоне.

В Нью-Йорк к де Форесту был отправлен сотрудник компании Севал Кэбот (*Sewall Cabot*), чтобы получить схему (рис. 18) устройства и несколько аудинов для исследования. Севал Кэбот вернулся в лабораторию и начал исследование, чтобы попытаться улучшить полученную схему. Взятые для экспериментов аудионы имели различные параметры. Были лампы с жестким и мягким вакуумом. Первое, что он заметил, это то, что с некоторыми лампами сильный сигнал запирает на несколько секунд радиоустройство, особенно с лампами, содержащими высокий вакуум. Когда это происходило, то Кэбот касался пальцем вывода сетки и устройство снова возвращалось к работе. Это выглядело так, как будто заряд накапливался на конденсаторе C' , соединенным с сеткой. Для его разряда он прочерчивал на нем карандашом линию, соединяющую выводы конденсатора C' . Это был первый своеобразный вид утечки тока сетки.

Добавление утечки улучшило работу приемника с жесткими лампами, в то время как с мягкими лампами этого не требовалось, по всей видимости, утечка содержится внутри них. В результате было установлено, что лампы, которые чувствительны к величине потенциала на сетке, должны

⁸ *Stone Telegraph & Telephone Co.* была создана в середине 1902 г. С 1908 по 1910 гг. Стоун — президент и главный инженер этой компании. В последующие десять лет он работал консультантом и независимым экспертом в области патентного права. В 1914—1915 гг. Стоун занимал пост президента IRE.

⁹ Кембридж известен двумя образовательными и научно-исследовательскими центрами: Гарвардским университетом и Массачусетским технологическим институтом. Город находится в 304 км от Нью-Йорка.

иметь регулируемое смещение на ней. С этой целью был удален конденсатор C , рис. 18, а вместо него в цепь между сеткой и нитью накала подключена регулируемая батарея C , рис. 19.

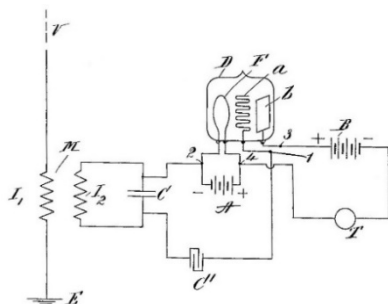


Рис. 18. Принципиальная схема аудионного радиоприемника Ли де Фореста на трехэлектродной лампе с управляющим электродом в виде сетки, которая была передана для тестирования *Stone Telegraph & Telephone Co.* Эта схема потом была включена Ли де Форестом в его патент US879532 с приоритетом от 29 января 1907 г.

Fig. 18. Schematic diagram of a Lee de Forest audion radio receiver based on a three-electrode tube with a gate in the form of a grid, which was submitted for testing to *Stone Telegraph & Telephone Co.* This scheme was then incorporated by Lee de Forest in his patent US879532 with priority dated January 29, 1907

Кэбот со Стоуном определили, что наилучшие результаты работы радиоприемника с мягкими триодами были получены, когда плюс батареи C был подключен к сетке. Кроме этого они установили, что во всех случаях необходимое смещение может быть достигнуто изменением накала нити реостатом, если для питания используется анодная батарея A с напряжением на 5—6 вольт и в этом случае отдельная батарея C не требуется. Что касается аудионов с жестким вакуумом, то было выявлено, что они могут работать при двух режимах сетки: когда ее потенциал положителен и когда он равен нулю. Последний режим соответствовал усилению электрических сигналов, но тогда это не было известно. Этот режим был определен только через 4 года Фрицем Левенштейном в его патенте, полученном на изобретение звукового усилителя.

По окончании исследования Стоун и Кэбот подали заявку на изобретение (рис. 19), в которой была приведена схема аудиона с батареей смещения и управляющим электродом в виде плоской сетки. Как указано в заявке, целью изобретения явилось повышение чувствительности детектора колебаний типа аудиона Ли де Фореста. Повышение чувствительности достигается включением в схему гальванического элемента, положительный вывод, которого соединен с управляющим электродом, а отрица-

тельный — с нитью накала и элементами колебательного контура. Авторы изобретения получили патент US884110 от 7 апреля 1908 года [28].

Стоун и Кэбот в дальнейшем не занимались разработкой трехэлектродных ламп и ограничились только полученным патентом.

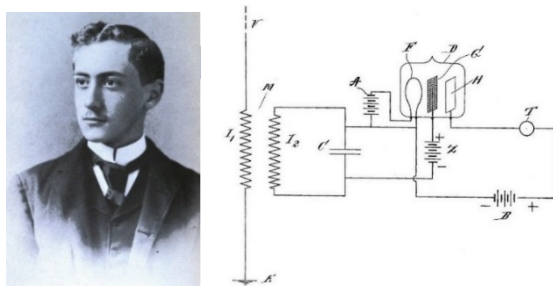


Рис.19. Джон С. Стоун и принципиальная схема аудиона с батареей смещения из патента Стоуна и Кэбота US884110 с приоритетом от 4 января 1907 г. [28].

Fig. 19. John S. Stone and the circuit diagram of the battery-bias audion from Stone and Cabot's patent US884110 with priority January 4, 1907 [28]

12. Патент Ли де Фореста на аудион с сеткой

Ли де Форест, узнав результаты тестирования аудиона и о поданной заявке Стоуна и Кэбота, немедленно связался со своим патентным поверенным и 29 января 1907 г. ускоренными методами подготовил и подал заявку на получение патента. В эту заявку он включил, кроме схемы аудиона (рис. 20а), которая была на тестировании у Стоуна, без изменений, еще и схему аудиона с плоским управляющим электродом (рис. 20б). Интересно, что Форест при составлении заявки не принял во внимание результаты исследований Стоуна и в дальнейшем продвигал свое изобретение с недостатками, которые были при этом выявлены. По всей видимости, это было связано с финансовыми затратами, так как Стоун и Кэбот подали заявку на изобретение раньше де Фореста, а он не хотел платить деньги за использование их патента.

Полученный Ли де Форестом в последствии патент US879532 от 18 февраля 1908 г. на новые комбинации трех электродов в электронной лампе назывался «Телеграфирование в пространстве» (англ. *Space Telegraphy*) [29]. Цель изобретения заключалась в повышении чувствительности детекторов колебаний, содержащих в своей конструкции газообразную среду, с помощью конструктивных элементов и схемных устройств.

В этом патенте управляющий электрод (сетка) был представлен в виде зигзагообразного провода и располагался между катодом и анодом,

рис. 20а. Этот патент, однако, описывает устройство только в качестве детектора. В патенте аудион, тем не менее, наряду с детектированием, работает и в режиме усиления радиосигнала. Приведенные две схемы аудионов (рис. 20) показывают, что в одном из них (рис. 20б) управляющий электрод имеет отрицательное смещение и может происходить усиление сигнала. В другом случае (рис. 20а) во внешнюю цепь управляющего электрода включен разделительный конденсатор. Эта схема, благодаря наличию газа в лампе, работает лучше, чем при использовании вакуумного триода с глубоким вакуумом.

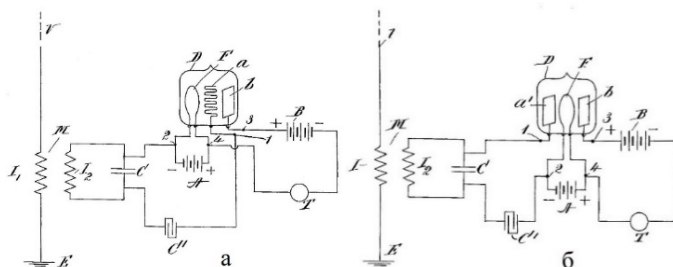


Рис. 20. Аудионный радиоприемник Ли де Фореста на трехэлектродной лампе с расположением третьего электрода (сетки) между катодом и анодом (а). Рисунки из патента US879532 с приоритетом от 29 января 1907 г. [29].

Fig. 20. Lee de Forest audion receiver based on a three-electrode lamp with a third electrode (grid) located between the cathode and the anode (a). Drawings from patent US879532 with priority dated January 29, 1907 [29]

Формула изобретения содержит 18 пунктов, в которых закреплены основные отличительные особенности конструкции аудионов в представленных усилительных устройствах. Интересно, что в тексте патента вместо объяснения принципа усиления изобретенных устройств дается ответ Фореста на то, почему он этого не сделал [29]: «Я экспериментально определил, что наличие проводящего элемента a , который, как было сказано ранее, может иметь форму сетки, увеличивает чувствительность детектора колебаний и, поскольку объяснение этого явления чрезвычайно сложно и в лучшем случае будет лишь предварительным. Я не считаю необходимым вдаваться в подробное изложение того, что, по моему мнению, является вероятным объяснением».

Конструкция аудиона была запатентована в ряде ведущих стран мира в области беспроволочной телеграфии. Рисунки во всех зарубежных патентах одни и те же, соответствуют рисункам американского патента US879532, рис. 20.

В Германии 23 января 1908 г. Форестом был получен патент DE217073A на аудион под названием «Индикаторы колебаний для электрических волн в беспроводной телефонии» (нем. *Schwingungsanzeiger für elektrische Wellen, insbesondere für die drahtlose Telephonie*). В этом патенте отмечено, что этот документ признается приоритетным при рассмотрении в соответствии с Решением Парижской конвенции по охране промышленной собственности от 20 марта 1883 г. (пересмотренной в Брюсселе 14 декабря 1900 г., в Вашингтоне 2 июня 1911 г.). Формула изобретения в патенте DE217073A содержит всего три пункта. В первом пункте отмечено, что в баллоне лампы имеется газ и три электрода (нить накала, сетка и анод), во втором указано, что нить накала находится между сеткой и анодом, в третьем — сетка находится между нитью накала и анодом.

В Великобритании Ли де Форест получил на аудион патент GB190801427A от 30 апреля 1908 г., который имел название: «Улучшения в пространственной телеграфии» (англ. *Improvements in Space Telegraphy*). В Британском патенте цели изобретения сформулированы следующим образом: «Цели моего изобретения заключаются в том, чтобы повысить чувствительность детекторов колебаний, содержащих в своей конструкции газообразную среду, с помощью конструктивных особенностей и схемных решений».

Изобретение аудиона было также зарегистрировано и в России, под названием «Вибрационный детектор для приемной радиотелеграфной станции», привилегия № 21046 от 29.02.1912. В русском патенте приводится только одна схема аудионного приемника (рис. 20а). Это связано, вероятно, с тем, что Форест уже к 1912 году окончательно определился с конструкцией аудиона, то есть зигзагообразная сетка должна находится между нитью накала и анодом.

Новые изобретения любой технической сложности обычно проходят через период трудностей роста. Аудион обратил на себя внимание в первую очередь способностью обнаруживать модулированные радиоволны значительно лучше, чем существовавшие в этот период времени для этой цели другие устройства.

Первые конструкции аудионов работали не особенно хорошо, они лишь немного усиливали принимаемый сигнал. Невзирая на это радиоприемники на их основе давали более громкий звук, чем с использованием «вентилля Флеминга». Более 800 электронных ламп типа аудион были изготовлены и проданы МакКэндлессом в период с 1907 по 1913 гг. Новый тип лампы еще пока не подходил для использования в радиопередатчиках. Аудионы имели малый срок службы и дорого стоили, что сначала сдерживало их внедрение в радиотехнику.

13. Спрос на аудионы

Де Форест, проведя эксперименты, сделал вывод о том, что качественно изготовленный аудион обладает высокой чувствительностью и поэтому хорошо подходит для беспроводной телефонии. Джон Хоган в 1908 году отметил [30]: «К сожалению, чувствительное состояние чрезвычайно трудно определить и еще труднее поддерживать. Некоторые лампы аудион сначала проявляют необычайную чувствительность, но при использовании быстро угасают. Другие лампы практически бесполезны с самого начала, и ни одна из них не остается чувствительной очень долго. Аудион может стать действительно эффективным детектором, но в его нынешних формах он весьма ненадежен и слишком сложен, чтобы с ним мог правильно обращаться обычный оператор беспроводной связи. Соответствующие правила его эксплуатации имеют первостепенное значение, но их применение не всегда происходит со знанием дела и системно».

Джон Хоган был ключевой фигурой на раннем этапе развития беспроводной телеграфии и радиовещания, сочетая изобретательство с практической инновационной деятельностью. Он проработал в компании Ли де Фореста около года и за это время успел разработать коммерческий приемник на аудионе с плавной настройкой на частоту радиостанции, рис. 21 [30].

В первые несколько лет после появления аудиона производители беспроводной телефонной аппаратуры обнаружили, что спроса на аудионы почти не существует, и поэтому поставляли вместе со своим оборудованием кристаллические и термоэлектрические детекторы.

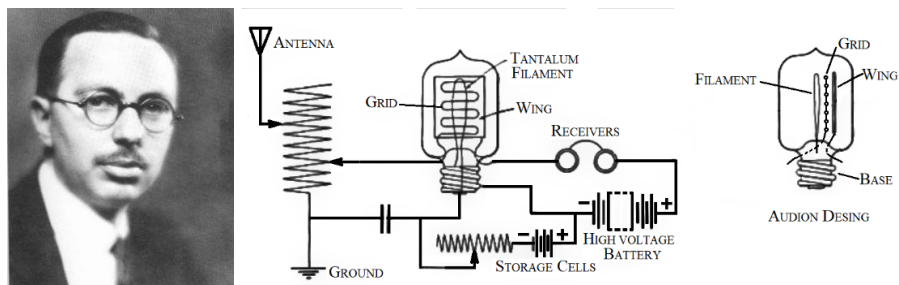


Рис. 21. Джон Хоган и разработанная им принципиальная схема приемника на аудионе с элементом настройки на частоту принимаемой радиостанции. 1908 г. [30].

Fig. 21. John V. L. Hogan and the schematic diagram of an audio receiver with an element of tuning to the frequency of the received radio station that he developed. 1908 [30]

В 1910 году испытания в Национальном бюро стандартов США (*National Bureau of Standards*, сокращено *NBS*) дали несколько более бла-

гоприятную оценку: триод был объявлен примерно на 50 процентов более чувствительным, чем электролитический детектор, а кристаллический выпрямитель и другие типы детекторов лишь немного отстали. В практических коммуникациях превосходство в 50 % едва заметно, но де Форест нашел результат достаточно благоприятным, чтобы спустя годы заявить об этом в своей рекламе.

14. Заключение

Трехэлектродный аудион, как и предыдущие модели под таким же названием, был устройством низкого давления. Поэтому называть его «вакуумной лампой» неверно. Однако важно понимать, что потенциальная полезность трехэлектродного (триодного) аудиона была не сразу обнаружена, что очевидно. Немногие, кроме Ли де Фореста, изначально были впечатлены его работой в качестве детектора.

Современные тестирования некоторых ранних аудионов (триодов) показывают, что в качестве детекторов они были ненамного лучше диодных выпрямителей. Если бы де Форест предпринял эксперименты с изменением размера, формы и расстояния между электродами, то он мог бы добиться больших улучшений в работе аудионов. Однако этого не произошло, похоже, что он считал трехэлектродный аудион 1906 г. по существу законченным изобретением и не внес никаких существенных изменений в его конструкцию, которые в конечном итоге были сделаны другими. Еще в 1916 г., когда потенциальный конкурент вывел на рынок триод с радикально иной, но невероятно неэффективной геометрией, не критичным ответом де Фореста было производство дубликата не очень эффективного трехэлектродного аудиона. Это, при том, что *Western Electric* и *General Electric Company* к тому времени разработали значительно улучшенные вакуумные триоды, основанные на лучшем понимании фундаментальных принципов их работы.

В начале двадцатого века, благодаря таланту, трудолюбию и непомерному честолюбию Ли де Фореста была создана новая трехэлектродная ламповая радиотехнология, которая коренным образом повлияла на развитие беспроводного телеграфа и электронные технологии.

Список литературы

1. Lee De Forest. Father of Radio. The Autobiography. 1st edition. Wilcox & Follett Co., Chicago, 1950. 502 p.
2. Lee De Forest. The Audion – Its Action and Some Recent Applications. Part I. A historical paper of unusual interest to the Radio fraternity // Radio News. 1920. No. 10. P. 208–210.

3. Lee De Forest. Audion was invented // Radio-craft. 1947. No. 1. P. 18–21.
4. Lee De Forest. Oscillation responsive device. Patent US824638. Patented June 26, 1906. Application filed January 20, 1906. 3 p.
5. Butler Frank E. Birth of the audion // Radio-craft. 1947. No. 1. P. 22–26.
6. Lee De Forest. Oscillation responsive device. Patent US979275. Patented Dec. 20, 1910. Application filed February 2, 1905. 5 p.
7. Secor H. Winfield. The Vacuum Detector // Electrical Experimenter. 1913. No. 05. P. 9–10.
8. Tyne Gerald F. J. How audions were built // Radio-craft. 1947. No. 1. P. 27.
9. Tyne Gerald F. J. Saga of the Vacuum Tube. Berkeley Heights, New Jersey, 1977. First edition third printing, 1994. P.55.
10. Marconi's wireless telegraph company, limited. Fleming valves. URL: <http://www.valve-radio.co.uk/literature/marconi-receiving-measuring-instruments/> (10.06.2021).
11. Lee De Forest. Oscillation responsive device. Patent US824637. Patented June 26, 1906. Application filed January 18, 1906. 5 p.
12. Chipman Robert A. De Forest and the Triode Detector // Scientific American. March 1965. Vol. 212, No. 3. P. 92–103.
13. Wireless wooing ends in a wedding // New York World. February 17, 1906. P. 5.
14. Kenneth C. Gardner Jr. “And All Our Yesterdays...” and Nine Other Stories. iUniverse LLC. Bloomington, 2014. P. 52.
15. Lee De Forest. Signaling system. Patent US1123118. Patented Dec. 29, 1914. Application filed July 8, 1907. 4 p.
16. Lee De Forest. Oscillation responsive device. Patent US836070. Patented Nov. 13, 1906. Application filed May 19, 1906. 3 p.
17. Lee De Forest. Oscillation responsive device. Patent US824637. Patented June 26, 1906. Application filed January 18, 1906. 5 p.
18. Lee De Forest. Wireless telegraphy. Patent US837901. Patented Dec. 4, 1906. Application filed February 14, 1906. 4 p.
19. Lee De Forest. Wireless telegraphy. Patent US841386. Patented Jan. 15, 1907. Application filed August 27, 1906. 8 p.
20. Lee De Forest. The Audion. A New Receiver for Wireless Telegraphy // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. January to December 1906. Vol. 25. Published by AIEE. New York. 1907. P. 735–763.
21. Discussion on “The Audion ; A New Receiver for Wireless Telegraphy,” New York, October 26, 1906 // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. January to December 1906. Vol. 25. Published by AIEE. New York. 1907. P. 764–774.
22. Discussion on “The Audion” at the Philadelphia Branch, November 12, 1906 // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. January to December 1906. Vol. 25. Published by AIEE. New York, 1907. P. 775–779.
23. Lee De Forest. The Audion. – I. A New Receiver for Wireless Telegraphy // Scientific American Supplement. November 30, 1907. No. 1665. P. 348–350.
24. Lee De Forest. The Audion. – II. A New Receiver for Wireless Telegraphy // Scientific American Supplement. December 7, 1907. No. 1666. P. 354–356.
25. Lee De Forest. Device for amplifying feeble electrical currents. Patent US841387. Patented Jan. 15, 1907. Application filed October 25, 1906. 4 p.
26. Fleming J. A. The thermionic valve and its developments in radiotelegraphy and telephony. London. The wireless press, LTD. 1919. P. 115.
27. Pestrikov Victor M. The invention of a tube audio amplifier // ITM Web of Conferences. Vol. 30, 16002 (2019). URL: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_16001.pdf (07.05.2021).

28. Stone J. S. & Cabot S. Space Telegraphy. Patent US884110A. Patented Apr. 7, 1908. Application filed Jan. 4, 1907. 3 p.
29. Lee De Forest. Space Telegraphy. Patent US879532A. Patented Feb. 18, 1908. Application filed Jan. 29, 1907. 4 p.
30. Hogan John L. The Audion : A Third Form of the Gas Detector // Modern electrics. 1908. No. 10. P. 232–233.

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 author

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.