

Севастопольский государственный университет

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infocommunications
and Radio Technologies

2021
Том 4
№ 4

2021
Vol. 4
No. 4

Sevastopol

Почетный главный редактор

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

Главный редактор

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Международный редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

Дата выхода в свет 31.03.2022

Формат 64×90/16. Усл. печ. л. 5,20. Уч.-изд. л. 4,2. Тираж 200 экз. Цена свободная

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

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

M. Davidovich, G. Kolesov, and K. Sayapin, Analysis of a Vacuum Resonant-Tunneling Triode	
Давидович М. В., Колесов Г. Н., Саяпин К. А. Анализ вакуумного резонансно-туннельного триода	279
Матвеев О. В., Морозова М. А. Особенности формирования брэгговских запрещенных зон в периодических ферромагнитных структурах, управляемых спин-поляризованным током	
O. V. Matveev and M. A. Morozova, Features of the Bragg Band Gap Formation in Periodic Ferromagnetic Structures, Controlled by Spin-Polarized Current	292
Кукушина К. Г., Еремин Е. Н., Тищенко Н. М., Кохнюк Д. Д. Влияние титаната бария на электрофизические характеристики термореактивного материала	
K. G. Kukushina, E. N. Eremin, N. M. Tishchenko, and D. D. Kokhniuk, The influence of barium titanate on the electrophysical characteristics of a thermosetting material	301
Березная С. А., Кобцев Д. А., Саркисов С. Ю. Фотопроводящие дипольные антенны на основе полупроводников с высоким и низким временем жизни носителей заряда для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового излучения	
S. A. Bereznaya, D. A. Kobtsev, and S. Yu. Sarkisov, Photoconductive Dipole Antennas Based on Semiconductors with Long and Short Charge Carrier Lifetimes for Pulsed and CW Terahertz Generation and Detection	308
 <i>История науки и техники (5.6.6) — History of science and technology</i>	
Пестриков В. М. Конкуренты аудиона на рынке радиотехнологий	
V. M. Pestrikov, Audion Competitors in the Radio Technology Market	322

Analysis of a Vacuum Resonant-Tunneling Triode

M. V. Davidovich, G. N. Kolesov, and K. A. Sayapin

Institute of physics, Saratov State University

83, Astrakhanskaya str., Saratov, 410012, Russian Federation

davidovichmv@info.sgu.ru

Received: April 25, 2021

Peer-reviewed: September 16, 2021

Accepted: September 16, 2021

Abstract: *Stationary and non-stationary models are proposed for calculating the tunneling current of a vacuum resonant-tunneling triode with a control grid. The stationary model is based on the solution of the stationary Schrodinger equation by the matrix method with the calculation of the potential profile in a structure having several electrodes by the method of multiple images.*

Keywords: *tunneling, field emission, resonant tunnel transistor, Schrodinger equation, Poisson equation.*

For citation (IEEE): M. Davidovich, G. Kolesov, and K. Sayapin, “Analysis of a Vacuum Resonant-Tunneling Triode”, *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 279–291, 2021.

Анализ вакуумного резонансно-туннельного триода

Давидович М. В., Колесов Г. Н., Саяпин К. А.

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

Получено: 25 апреля 2021 г.

Отрецензировано: 16 сентября 2021 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2021 г.

Аннотация: Предложены стационарная и нестационарная модели расчета туннельного тока вакуумного резонансно-туннельного триода с управляющей сеткой. Стационарная модель основана на решении стационарного уравнения Шрёдингера матричным методом и методом множественных изображений с расчетом профиля потенциала в конструкции, имеющей несколько электродов.

Ключевые слова: туннелирование, автоэлектронная эмиссия, резонансный туннельный транзистор, уравнение Шрёдингера, уравнение Пуассона.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Давидович М. В., Колесов Г. Н., Саяпин К. А. Анализ вакуумного резонансно-туннельного триода // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 4. С. 279—291.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Давидович, М. В. Анализ вакуумного резонансно-туннельного триода / М. В. Давидович, Г. Н. Колесов, К. А. Саяпин // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2021. — Т. 4, № 4. — С. 279—291.

1. Introduction

The vacuum tunnel triodes are very interesting objects of research for vacuum microelectronics, since they do not require incandescence for operation, and the emission structure can be very compact and at the same time create very large currents necessary for the operation of devices. Such resonant tunnel transistors (RTTs) can be used as emission sources with a high current density. For this purpose, triodes with a double grid and a grid in the form of several conducting layers separated by vacuum gaps are interesting. Such grids are able to create a multi-humped quasi-periodic potential barrier that can be transparent in a certain energy band. In addition to resonant tunnel diodes (RTDs), the multi-barrier (multi-hump) resonant tunnel heterostructures also are used in nanoelec-

tronics, for example, in quantum cascade lasers. In contrast, vacuum RTTs in the form of heterostructures are convenient for current control. In this paper, for these purposes, the vacuum RTT is studied under stationary consideration. The stationary Schrodinger equation (SE) is solved and the VAC is calculated.

According to the Fowler–Nordheim formula, field or autoelectronic emission (AE) is theoretically capable of providing gigantic current densities of the order of $J \sim 10^{15}$ A/m² or more (depending on the concentration of free electrons in the cathode), but under the action of very strong fields [1, 2]. At such fields, the potential barrier practically disappears, and almost all the electrons tunnel that run into the cathode surface. However, very strong fields lead to a number of negative effects, such as reverse bombardment of the cathode, heating of the cathode, explosive emission, ponderomotor forces. Therefore, a promising direction is to increase the current density at not too strong fields. This is possible with resonant tunneling. Another effect that increases the current is associated with the penetration of the field deep into the cathode and with a change in the shape and thickness of the barrier in the cathode region. This can be achieved by making a thin dielectric or semiconductor film with a thickness of several nanometers on the cathode surface, or by making a cathode with a porous carbon structure from various allotropic carbon modifications [3-9]. As the latter, carbon nanoclusters made of diamond and graphite phases are convenient [3-9]. The field penetrates into the considered structures with a weakening, as a result of which the barrier thickness decreases by an order of magnitude of the film thickness. Its height is also slightly reduced. These are dimensional effects. The penetration of the field into the cathode to a depth of several nm leads to an acceleration of the electrons incident on its surface, an increase in their energy and better tunneling. In addition, when using clusters with dielectric and metallic (semiconductor) phases, Tamm levels appear on their surfaces, which promote tunneling. Their presence manifests itself as a hysteresis when the applied voltage changes over time [8].

Resonant tunnel structures based on semiconductors are performed by doping. The semiconductor resonant-tunnel transistor (RTT) and RTD can form a double-humped potential barrier and a VAC with incident sections, and are widely used as amplifiers and generators of the THz range. For vacuum RTT, it is necessary to isolate the grid from the cathode with a vacuum gap. If such a grid is in contact with the cathode, Fig. 1, then another insulated grid is required. If both meshes are isolated and are under certain potentials, such a structure can be considered as a tetrode. If one of the grids is grounded (contacts the cathode), or two grids are connected, then it is a triode. Two additional electrodes to the cathode and anode make it possible to create a three-humped po-

tential barrier with local levels between the humps, providing resonant tunneling Fig. 2. A barrier of several identical humps allows you to get how close the energy levels are, which leads to a transparency band, thereby increasing the integral current. Since the area of the usual barrier for metals is on the order of a few nanometers, the grid electrodes must have the same length, i.e. be transparent to electrons. The structures of carbon nanotube (CNT) and n-layer graphene sheets are very strong and meet all the requirements. It is convenient to use a grid of CNTs with a metallic type of conductivity, arranged collinearly in the plane, or to build grids of CNTs of the woodpile type. In the construction of grids, their fasteners are required fig. 1. In a triode structure with two grids, the first grid can be attached directly to the cathode, providing contact and the desired cathode potential on it. The second grid should be isolated and the specified voltage U_g applied to it. In this case, a three-humped potential barrier is formed. By placing several grids at the cathode potential, a quasi-periodic barrier can be formed. However, the “lowered” barrier is more promising, when several grids have the same pulling potential Fig. 2. Such a barrier can be transparent for some energies, Fig. 3, whereas for a two-hump barrier with a single grid, incomplete resonant tunneling usually occurs [8]. It is also convenient to consider the possibility of controlling the voltage of two grids at once, i.e., consider the tetrode and enter the potentials U_{1g} and U_{2g} .

2. Calculating the current density for an arbitrary barrier

Let the barrier be described by an arbitrary potential function $V(x)$. This function has a value $V(0) = -eU_0$ equal to the energy of the electrons at the bottom of the conduction band of the cathode. At the anode $V(d) = -e(U_0 + U_a)$ is the energy of the electron at the bottom of the conduction band of the anode. The profile $V(x)$ has all negative values, while the free electron in a vacuum corresponds to zero kinetic energy. We also introduce the electron energy in the regions of two grids: $V_{1g}(x) = V(0)$ at $x_{1g} < x < x_{1g} + S_1$ and $V_{2g}(x) = -e(U_0 + U_g)$ at $x_{2g} < x < x_{2g} + S_2$. In the intervals between the electrodes, the function changes continuously, but for the numerical solution of the SE, we divide these intervals by discrete points and use a stepwise representation of the potential function

$$V(x) = \sum_{j=1}^N V_j u_j(x). \quad (1)$$

It is convenient to use unequal intervals to determine the unit step functions $u_j(x)=1$ at $x_{j-1} < x < x_j$, where V_j are the values of the potentials at the central points $\bar{x}_j = (x_{j-1} + x_j)/2$ of the steps defining the barrier. Namely, each grid electrode is described by a single step function. Each function corresponds to a transfer matrix

$$\hat{T}_j = \begin{bmatrix} \cos(k_j \Delta x_j) & -ik_j^{-1} \sin(k_j \Delta x_j) \\ -ik_j \sin(k_j \Delta x_j) & \cos(k_j \Delta x_j) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

in which $k_j = \sqrt{2m_e(E - V_j)}/\hbar$ for the above-barrier areas and $k_j = i\sqrt{2m_e(V_j - E)}/\hbar$ for the sub-barrier areas. Here m_e is the mass of the electron. Next, it is convenient to enter the designation $\mu = 2m_e$. The program for solving SE consists in constructing a complete matrix $\hat{T} = \hat{T}_1 \hat{T}_2 \dots \hat{T}_N$ by multiplying the matrices of the regions and calculating the transmission coefficient from a system of equations $1 + R = (T_{11} - iT_{12}/k)T$, $1 - R = ik_0(T_{21} - iT_{22}/k)T$. Adding them together, we get the result $T = 2/[T_{11} + T_{22}(k_0/k) + i(k_0 T_{21} - T_{12}/k)]$, $R = 1 - k_0(T_{21} - iT_{22}/k)T$. Since we have $Z = (1 + R)/(1 - R) = (kT_{11} - iT_{12})/(ik_0 k T_{21} + k_0 T_{22})$, we can find the reflection coefficient from the barrier in another way: $R = (Z - 1)/(Z + 1)$. The calculated barrier transparency (tunneling) coefficient $D^+(E) = |T|^2$ depends on the kinetic energy E of the electron in the cathode region. The notations $k_0 = \sqrt{\mu E}/\hbar$ and $k = \sqrt{\mu(E + eU_a)}/\hbar$ are used above, i.e. the values and are proportional to the electron pulses at the cathode and anode. The momentum of the electrons at the anode increases due to acceleration during the above-barrier movement. The incident flow of particles is determined by function $\exp(ik_0 x)$, and the past flow is determined by function $\exp(ik_0 x)$. Naturally, the hit of an electron on the anode leads to the relaxation of the additional pulse at about the free path length and to the heating of the anode. Usually, the electron energy is counted from the bottom of the conduction band, so the maximum kinetic energy (at zero temperature) is equal to the Fermi energy E_F . In this case, the depth of the cathode conduction band $V_c = eU_0 = E_F + W_0$, and W_0 is the electron output work. Such barriers are constructed in Fig. 2. If the energy of the free electron is taken as the zero of the energy reference, then all the values of the energies and potentials will be negative. It is convenient to take the energy at the bottom of the conduction band of the anode as zero. Then the bottom of the conduction band of the cathode has a positive value eU_a , the maximum energy of the electron takes a

value $eU_a + E_F$, and all values V_j become positive and are counted from the “zero” potential of the anode. Such a potential profile is conveniently described by a sequence of rectangular steps. In all matrix elements there are differences that do not change due to a change in the reference frame. Either k_0 and k do not change. To calculate the current, we take into account study the electron energy distribution from the bottom of the conduction band to E_F , as well as the number of electrons incident with the corresponding normal component of the pulse on the barrier [2, 10]. Given this, the result for the current density at the cathode temperature T can be written as

$$J_e^+ = \frac{em_e^2 k_B T}{4\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty D^+(E) \ln \left(1 + \exp \left(\frac{m_e}{2k_B T} (v_F^2 - v^2) \right) \right) v dv,$$

and at zero temperature as

$$J_e^+ = \frac{em_e}{4\pi^2 \hbar^3} \int_0^{E_F} D^+(E) (E_F - E) dE. \quad (3)$$

At a low temperature, the expression (3) can be converted to the form

$$J_e^+ = \frac{em_e}{4\pi^2 \hbar^3} \int_0^{E_F + k_B T} D^+(E) (E_F + k_B T - E) dE. \quad (4)$$

3. Determining the barrier profile

The barrier profile is constructed by the method of multiple images [4–10], taking into account the fact that at a small distance δ from the conducting electrode and in the small region δ_g around the dielectric boundary, the image forces do not act. These dimensions of the order of Å can be associated with the work of the metal and dielectric exit [5–9]. The image method is suitable for barriers between two electrodes, taking into account the dielectric layers on their surfaces, i.e. images are used relative to several surfaces [4–9]. In the presence of a dielectric film on the cathode, there are three such surfaces, and, accordingly, the number of images is triple. For images relative to the surface of the dielectric, for the effective charge $q = -e/\varepsilon$ inside the dielectric, take the charge $q = e/\varepsilon$ of the image relative to the surface of the metal and $-e(\varepsilon - 1)/(\varepsilon^2 + \varepsilon)$ relative to the surface of the dielectric. For an electron $-e$ in a vacuum, the image relative to the surface of the dielectric is given by the charge $e(\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 1)$. The image method immediately shows that the work on moving the charge in the film is about a factor ε less than the similar work without the

film (in a vacuum). The results of barrier modeling for structures with a film are given in [4–6]. The work on the transfer of a electron between the infinite plates of a flat capacitor with a size formed by the cathode and the first grid is determined by the potential function $W(x, \delta, \delta_g, g_1)$ [8-10]. It is

$$W = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{x+\delta} \left(1 + \frac{2xg_1}{(g_1-x+\delta_g)(g_1+x)} \right) - \frac{2}{g_1} + \frac{2x^2}{g_1^3} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{(n^2 - (x/g_1)^2)n} \right\}. \quad (5)$$

4. Emission control

Fig. 2 shows the profiles of a number of barriers, and Fig. 3 shows the calculations of the tunneling coefficient for the Fermi energy. For simple barriers, formula (9) and similar ones show that the maximum current is obtained for a cathode with a large concentration of electrons (Fermi energy) and a large transparency. Transparency can be adjusted by creating complex barriers. A large concentration of electrons is important for obtaining emission structures that can give off a large current density in extremely strong fields. All other things being equal, the emission current in the RTT depends on the grid potential. In fig. 3 shows the results of calculating the tunneling coefficient $D^+(E_F)$ from the grid voltage U_g . However, the maximum for resonance tunneling can be at lower energies, so it is important to calculate the total current density taking into account the energy distribution. This calculation is shown in Fig. 4 using formula (3). In this case, the integral was calculated numerically from 100 points of the quadrature formula of the averages, which required the calculation of 100 values $D^+(E_n)$.

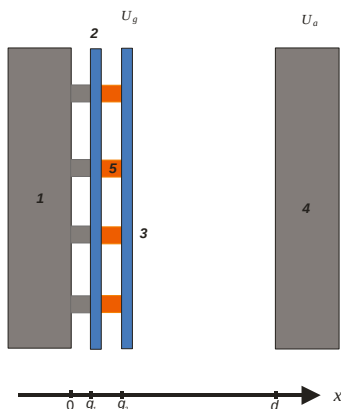


Fig. 1. Configuration in the form of a flat cathode 1, two grids 2, 3 of thickness s and a flat anode 4. The grid 2 contacts the cathode, 5 – dielectric fasteners of the insulated grid.

Рис. 1. Конфигурация в виде плоского катода 1, двух сеток 2, 3 толщиной s и плоского анода 4. Сетка 2 контактирует с катодом, 5 – диэлектрические крепления изолированной сетки

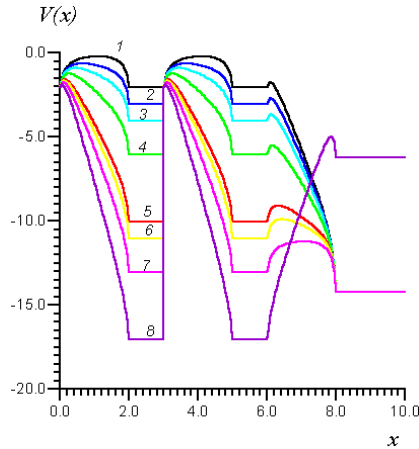


Fig. 2. Profiles of complex barriers in structures with two grids under the same potential (B): $V_g = 0$ (curve 1); 2 (2); 4 (3); 5 (4); 8 (5); 9 (6); 11 (7); 15 (8). $V_a = 11$ eV, $d_1 = d_2 = d_3 = 2$, $s_1 = s_2 = 1$, $\delta = 0.1$, $\delta_g = 0.15$ (dimensions in nm). For curves 1–7 $V_a = 11$ eV, for curve 8 $V_a = 5$ eV.

Рис. 2. Профили сложных барьеров в структурах с двумя сетками при одном потенциале (B): $V_g = 0$ (кривая 1); 2 (2); 4 (3); 5 (4); 8 (5); 9 (6); 11 (7); 15 (8). $V_a = 11$ эВ, $d_1 = d_2 = d_3 = 2$, $s_1 = s_2 = 1$, $\delta = 0.1$, $\delta_g = 0.15$ (размеры в нм). Для кривых 1—7 $V_a = 11$ эВ, для кривой 8 $V_a = 5$ эВ

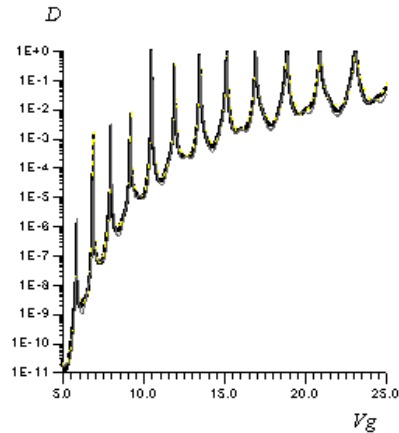


Fig. 3. The tunneling coefficient for the structure $d_1 = d_2 = d_3 = 2$, $s_1 = s_2 = 1$, $\delta = 0.1$, $\delta_g = 0.15$ (nm) depending on the grid potential V_g (eV). $V_a = 11$ (eV).

Рис. 3. Коэффициент туннелирования для структуры $d_1 = d_2 = d_3 = 2$, $s_1 = s_2 = 1$, $\delta = 0.1$, $\delta_g = 0.15$ (нм) в зависимости от потенциала сетки V_g (эВ). $V_a = 11$ (эВ)

Although tunneling is usually described by a single-particle SE, in the sense there are particles falling on the barrier $N(E) = \psi^+(x, E) \psi^{*+}(x, E)$ with a density

in the flow at $x < 0$, where the incident flow is described by a wave function $\psi^+(x, E) = a(E)\exp(ik_0x)$, and the reflected flow is described by a function $\psi^-(x, E) = Ra\exp(-ik_0x)$. Here also $k_0 = \sqrt{\mu E} / \hbar$. The flow that passed into the anode is described by the function $Ta\exp(-ikx)$. The probability flows themselves have an expression $j(x, t) = \hbar(2m_e i)^{-1}(\psi^*(x, t)\partial_x \psi(x, t) - \psi(x, t)\partial_x \psi^*(x, t))$. Due to the fact that the flow has an energy distribution, its wave function should be considered as a wave packet, represented as an energy integral. Formally, it is possible to construct static anode VAC and grid VAC and solve a non-stationary problem, considering the RTT in the circuit or as a concentrated element of a certain circuit. This problem for RTD is solved in [11]. The non-stationary dynamic problem is set as follows: until the moment $t = 0$ of tunneling, the tunneling is stationary, while the grid potential is constant (i.e., the barrier profile does not change), and the function $V(x)$ is determined as indicated above. If the flux density $j dE = m_e (2\pi^2 \hbar^3)^{-1} (E_F - E) dE$ is high, the barrier profile may be affected by the electron density in the barrier region $\rho(x, E) = -e\psi(x, E)\psi^*(x, E)$, which should be determined from the solution of the one-dimensional Poisson equation (PE). If is the profile $V(x)$ obtained for a single electron, then the profile obtained taking into account the charge density will be denoted $\tilde{V}(x)$. The function can be determined based on the matrix approach given above, as well as by directly solving the SE $\partial_x^2 \psi(x) = \mu \hbar^{-2} (V(x) - E) \psi(x)$. You can search for a similar solution in the barrier area in the form

$$\psi(x, E) = a(E) \left[(1 + R(E)) \left(1 - x/d \right) + T(E) x/d \right] + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \left(\frac{n\pi x}{d} \right) \quad (8)$$

Substituting it in the SE, we get the equation for the coefficients

$$a_n(E) = \tilde{a}_n(E) + \left(E - \left(\frac{n\pi \hbar^2}{\mu d} \right)^2 \right)^{-1} \sum_{m=1}^{\infty} V_{nm} a_m, \quad (9)$$

in which

$$\tilde{a}_n(E) = \frac{2a \int_0^d \left[\left(1 + R \right) \left(1 - \frac{x}{d} \right) + T \frac{x}{d} \right] (V(x) - E) \sin \left(\frac{n\pi x}{d} \right) dx}{d \left(E - \left(n\pi \hbar^2 \right)^2 / (\mu d)^2 \right)^{-1}},$$

$$V_{nm} = \frac{2}{d} \int_0^d V(x) \sin \left(\frac{n\pi x}{d} \right) \sin \left(\frac{m\pi x}{d} \right) dx.$$

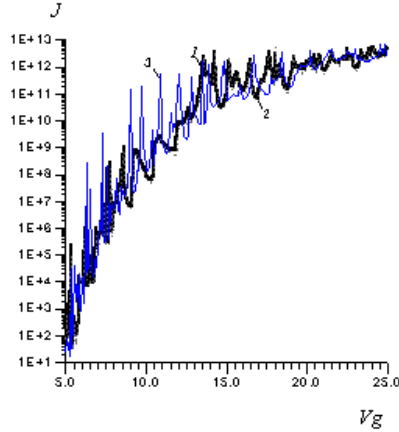


Fig. 4. Voltage-grid characteristics for the structure of Fig. 2 at different grid potential V_a : 11 eV (curve 1); 15 eV (2); 5 eV (3).

Рис. 4. Вольт-сеточные характеристики для структуры рис. 2 при различных потенциалах сетки V_a : 11 эВ (кривая 1); 15 эВ (2); 5 эВ (3)

The wave function is continuous ("cross-linked") with the corresponding function outside the domain. However, you must also stitch the derivatives:

$$[1 + ik_0(E)d]a(E) + a(E)R(E)[1 - ik_0(E)d] = a(E)T(E) - \pi \sum_{n=1}^{\infty} na_n,$$

$$-a(E)(1 + R(E)) + \pi \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n na_n = a(E)(1 + ik_0(E)d)T(E).$$

These are additional conditions on the expansion coefficients. The given relations and the representation of the total wave function in the form of a spectral integral allow us to define the total fluxes of the probability density $j(x, t) = \hbar(\mu i)^{-1}(\psi^*(x, t)\partial_x \psi(x, t) - \psi(x, t)\partial_x \psi^*(x, t))$. The input stream $j(0, t)$ is stationary.

Let the grid voltage $U_g(t)$ begin to change at the moment $t=0$. Generally speaking, this leads to a change in the entire profile $V(x, t)$, and the wave function must satisfy the non-stationary SE. The nonstationary SE solution should be consistent with the boundary conditions at the cathode. Inside the cathode, the electrons are free, and the wave function is a wave packet

$$\psi(x, t) = \int_0^{E_F} a(E) [\exp(ik_0 x) + R(E) \exp(-ik_0 x)] \exp(-iEt/\hbar) dE.$$

Calculating the probability flow, we have

$$j(x, t) = \frac{\hbar}{m_e} \int_0^{E_F} k_0(E) a^2(E) (1 - |R(E)|^2) dE.$$

For incoming electrons $a^2(E) = m_e^2(E_F - E)/(2\pi^2\hbar^4k_0)$. The input current is stationary and is equal to $J = -ej(0, t) = -ej(0, 0)$. We define a function $\tilde{V}(x) = V(x) - e\tilde{U}(x)$ where the potential $\tilde{U}(x)$ satisfies the PE $\partial_x^2\tilde{U}(x) = -\rho(x)/\varepsilon_0$ with zero boundary conditions at the cathode and anode. We are looking for the specified solution in the form

$$\tilde{U}(x) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin(n\pi x/d),$$

where do we get the expansion coefficients from

$$u_n = \frac{-2ed}{\varepsilon_0 n^2 \pi^2} \int_0^d |\psi(x)|^2 \sin\left(\frac{n\pi x}{d}\right) dx.$$

In the non-stationary case time-dependent wave function $\psi(x, t)$ and potentials $V(x, t)$, $\tilde{V}(x, t)$ and $\tilde{U}(x, t)$ should be used. We assume that at the moment $t = 0$ the initial conditions of the type $\psi(x, 0) = \psi(x)$, $V(x, 0) = V(x)$, etc. are satisfied. For each moment of time, it is necessary to jointly solve the SE with the function $\tilde{V}(x, t)$ and the PE with the charge density $-e|\psi(x, t)|^2$. It is convenient to assume that $U_g(t) = U_{g0} + \Delta U_g(t)$ at $t > 0$ and $V(x, t) = V(x)$ off the grid, for example, $U_g(t) = U_{g0}(1 + k \sin(\omega_0 t))$. Then $V(x, t) = V(x) - e\Delta U_g(t)$. A change in the potential function in a small region leads to a change in the wave function in the entire region: $\psi(x, t) = \psi(x) + \delta\psi(x, t)$. Substituting this function in the SE with replacement $V(x)$ by $\tilde{V}(x)$ and taking into account the stationary SE, which satisfies $\psi(x)$, we obtain

$$i\hbar\partial_t\delta\psi(x, t) = \left(-\frac{\hbar^2\partial_x^2}{\mu} + \tilde{V}(x)\right)\delta\psi(x, t) - e\Delta U_g(t)\psi(x, t), \quad (10)$$

As a result of solving SE in the first approximation, we have (see [11])

$$J(d, t) = J(d, 0) + 2e\hbar\left(d - g_2 - \frac{s}{2}\right)\alpha \int_0^t \frac{\cos\left(\frac{\mu(x - g_2 - s/2)^2}{2|t - t'|} + \varphi_0 - \varphi_d - \frac{3\pi}{4}\right)}{(t - t')^{3/2}} \Delta U_g(t') dt', \quad (11)$$

Here $\varphi_0 = \varphi(g_2 + s/2)$, $\varphi_d = \varphi(d)$ are the phases of wave function.

5. Conclusions

Stationary and non-stationary RTT models are proposed in this paper. To create a potential barrier profile with several maxima, including quasi-periodic profiles, it is proposed to use additional grid electrodes. Part of the grid elec-

trodes can be located at the cathode potential. Then the introduction of the control electrode implements RTT. The complex profile of the barrier in the work is determined by the method of multiple images. The matrix method is used to solve the SE, and the series method is proposed, which allows us to solve both the SE and the PE together. It is shown that there is a grid potential at which the barrier is transparent, and that there is a falling section of the grid characteristic. A non-stationary RTT model is proposed, which allows calculating the dynamic current-voltage characteristics. In this case, a linear approximation and a non-linear equation of the current-voltage dependence on the label are obtained.

Fig. 3 and 4 show that the grid current-voltage characteristics when performing resonant tunneling (at a high voltage on the grid) are weakly dependent on the anode voltage. Performing the anode in the form of a grid in this mode and using an accelerating electrode behind it, it is possible to obtain a high-current electron beam of high density, which is orders of magnitude higher than the usually achievable densities for planar cathodes with coatings of diamond-graphite clusters.

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. Fursey G. N. Field emission in vacuum micro-electronics. NY : Kluwer Academic Plenum Publishers ; Springer, 2005. 205 p.
2. Проскуровский Д. И. Эмиссионная электроника. Томск : ТГУ, 2010. С. 154–233.
3. Forbes R. G., Xanthakis J. P., Low-macroscopic-field electron emission from carbon films and other electrically nanostructured heterogeneous materials : hypotheses about emission mechanism // Solid-State Electronics. 2001. Vol. 45, No. 6. P. 779–808.
4. Davidovich M. V., Yafarov R. K., Doronin D. M. Electron tunneling in the presence of dielectric film on the cathode. In : 2011 21st International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2010). Sevastopol, 2010. P. 733–734.
5. Davidovich M. V., Bushuev N. A. Field Emission in Diode and Triode Vacuum Nanostructures. In : 2014 Tenth International Vacuum electron Sources Conference and Second International Conference on Emission Electronics. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University, 2014. P. 58–59.
6. Davidovich M. V., Bushuev N. A., Yafarov R. K. Tunnel Current in the Presence of Nanosized Film at the Cathode. In : 2014 Tenth International Vacuum electron Sources Conference and Second International Conference on Emission Electronics, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University, 2014. P. 67–68.
7. Davidovich M. V., Bushuev N. A. The field emission electron gun with wide and thin ribbon bean. In : 25th Int. Crimean Conf. “Microwave and Telecommunication Technology” (CriMiCo’2015). Sevastopol, 2015. P. 145–146.
8. Davidovich M. V., Yafarov R. K. Pulse and static field emission VAC of carbon nanocluster structures: experiment and its interpretation // Technical Physics. 2019. Vol. 64, No. 8. P. 1210–1220.

9. Davidovich M. V., Yafarov R. K. Field-emission staggered structure based on diamond-graphite clusters // *Technical Physics*. 2018. Vol. 63, No. 2. P. 274–284.
10. Simmons J. G. Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film // *J. Appl. Phys.* 1963. Vol. 34, No. 6. P. 1793–1803.
11. Davidovich M. V. Time-dependent resonant tunneling in a double-barrier diode structure // *Jetp Lett.* 2019. Vol. 110. P. 472–480.

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.

Kirill A. Sayapin, Engineer, Institute of Physics, Saratov National Research State University n. a. N. G. Chernyshevsky.

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.

Саяпин Кирилл Александрович, инженер Института физики Саратовского национально-исследовательского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

УДК 537.87, 537.622.4

Особенности формирования брэгговских запрещенных зон в периодических ферромагнитных структурах, управляемых спин-поляризованным током

¹ Матвеев О. В., ^{1,2} Морозова М. А.

¹Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012, Российская Федерация
olvmatveev@gmail.com

²Московский физико-технический институт
Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, 141701, Российская Федерация
tamorozovama@yandex.ru

Получено: 19 января 2022 г.

Отрецензировано: 25 января 2022 г.

Принято к публикации: 25 января 2022 г.

Аннотация: Представлены результаты теоретического исследования формирования запрещенных зон в периодических структурах двух типов: «ферромагнитная пленка с периодической системой канавок, нагруженная слоем нормального металла» и «ферромагнитная пленка с периодической системой полосок нормального металла». Продемонстрирована возможность динамического управления характеристиками запрещенных зон с помощью спин-поляризованного тока в нормальном металле.

Ключевые слова: спиновые волны, ферромагнетики, магнетонный кристалл, спин-поляризованный ток.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Матвеев О. В., Морозова М. А. Особенности формирования брэгговских запрещенных зон в периодических ферромагнитных структурах, управляемых спин-поляризованным током // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 4. С. 292—300.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Матвеев, О. В. Особенности формирования брэгговских запрещенных зон в периодических ферромагнитных структурах, управляемых спин-поляризованным током / О. В. Матвеев, М. А. Морозова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 4. — С. 292—300.

Features of the Bragg Band Gap Formation in Periodic Ferromagnetic Structures, Controlled by Spin-Polarized Current

O. V. Matveev¹ and M. A. Morozova^{1,2}

¹ *Saratov State University*

83, Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation

olvmatveev@gmail.com

² *Moscow Institute of Physics and Technology*

9, Institutskiy per., Dolgoprudny, 141701, Russian Federation

mamorozovama@yandex.ru

Received: January 19, 2022

Peer-reviewed: January 25, 2022

Accepted: January 25, 2022

Abstract: *The results of theoretical study of band gaps formation in periodic structures of two types are presented: “ferromagnetic film with a periodic system of grooves loaded with a layer of normal metal” and “ferromagnetic film with a periodic system of strips of normal metal”. The possibility of dynamic control of the band gaps characteristics using a spin-polarized current in a normal metal is demonstrated.*

Keywords: *spin waves, ferromagnetics, magnonic crystal, spin-polarized current.*

For citation (IEEE): O. V. Matveev and M. A. Morozova, “Features of the Bragg Band Gap Formation in Periodic Ferromagnetic Structures, Controlled by Spin-Polarized Current”, *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 292–300, 2021.

1. Введение

Важной современной задачей СВЧ микроэлектроники является исследование способов управления спиновыми волнами в ферромагнитных структурах. Одним из таких направлений исследований является магنونная спинтроника [1—3], занимающаяся изучением взаимодействия спиновых волн со спин-поляризованным током. Спин-поляризованный ток — это направленное движение спинов электрона, которые могут находиться в одном из двух состояний — либо «спин — вверх», либо «спин — вниз». Указанное взаимодействие является наиболее эффективным в слоистых тонкопленочных структурах типа ферромагнетик / нормальный металл, если металлический слой имеет большое значение угла Холла, а также толщины металлических и ферромагнитных пленок имеют значения по-

рядка единиц или десятков нанометров. Электрический ток в нормальном металле за счет обратного спинового эффекта Холла генерирует спиновый ток в перпендикулярном направлении [4]. Спиновый ток, в свою очередь, за счет передачи крутящего спинового момента на интерфейсе ферромагнетик / нормальный металл приводит к усилению либо ослаблению спиновой волны [5].

В настоящей работе в качестве ферромагнитного материала рассматривались супертонкие пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), в качестве нормального металла — платина. Построена теоретическая модель для исследования особенностей формирования запрещенных зон для спиновых волн в структурах двух типов: «ферромагнитная пленка с периодической системой канавок, нагруженная слоем нормального металла» (рис. 1а) и «ферромагнитная пленка с периодической системой полосок нормального металла» (рис. 1б).

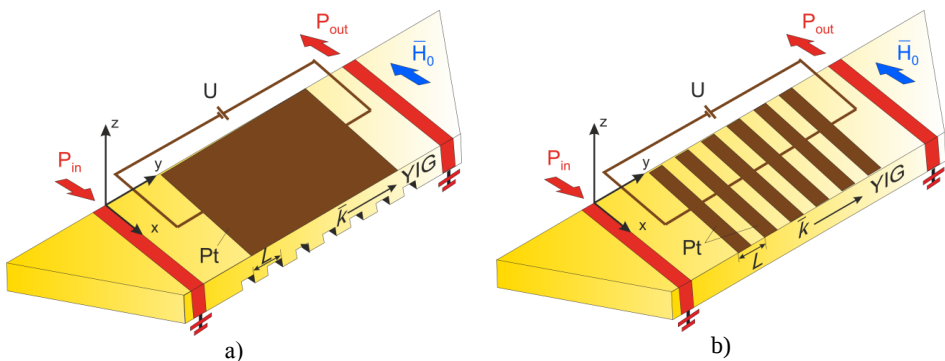


Рис. 1. Схемы структур на основе супертонкой пленке ЖИГ с периодической поверхностью в виде (а) системы канавок и слоя платины, (б) платиновых полосок.

Fig. 1. Schemes of structures based on a ultrathin YIG film with a periodic surface in the form of (a) a system of grooves and a layer of platinum, (b) platinum strips

2. Ферромагнитная пленка с периодической системой канавок, нагруженная слоем нормального металла

Рассмотрим структуру первого типа на основе пленки ЖИГ с периодической системой канавок [6], нагруженную слоем платины (схема структуры представлена на рис. 1а). При построении модели предполагалось, что толщина слоя платины меньше толщины скин-слоя, таким образом, металлизация пленки ЖИГ не создает дополнительных потерь на прохождение спиновой волны. Если в слое платины вдоль оси y течет электрический ток, то за счет спинового эффекта Холла в направлении оси z проис-

ходит разделение электронов с противоположным направлением спинов — течет спиновый ток. В зависимости от направления спиновый ток может усиливать или ослаблять спиновую волну в ферромагнитном слое.

Для построения модели использовалось уравнение Ландау — Лифшица — Гилберта, описывающее эволюцию намагниченности в однородном ферромагнетике, а также граничные условия в форме Слончевского на интерфейсе ферромагнитного слоя и слоя платины [7]. В результате было получено уравнение движения вектора намагниченности в виде:

$$\frac{\partial^2 m}{\partial t^2} + \omega_{\perp}^2 m + js \frac{\omega_M^2 d}{2} \frac{\partial m}{\partial y} + 2\omega_H (\alpha + r) s \frac{\partial m}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

где $s = +1$ для волны, распространяющейся в положительном направлении оси y , $s = -1$ — в отрицательном направлении y , $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$, $\omega_H = \gamma H_0$.

$\omega_{\perp} = \sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)}$, H_0 — внешнее постоянное магнитное поле, направленное по касательной к плоскости пленки, M_0 — намагниченность насыщения ферромагнетика, γ — гиромагнитное соотношение, d — толщина ферромагнитных пленок. Параметр α описывает потери в ФП, r описывает действие спинового тока, которые имеют вид:

$$r = r_0 (\omega_H + \omega_M/2), \quad r_0 = \text{sgn}(\bar{M}_0 \bar{p}) \frac{\bar{\tau}_{st} \gamma}{\mu_0 M_0 d}, \quad (2)$$

где $\bar{p}$ — направление спинов электронов, $\bar{\tau}_{st}$ — спиновый крутящий момент, $J_S = \theta_H J_C$ — плотность спинового тока в металле, θ_H — угол спинового эффекта Холла в металле, J_C — плотность электрического тока.

Дисперсионное соотношение для спиновой волны в структуре ферромагнитная пленка — нормальный металл имеет вид:

$$\Omega_0^{\text{HM}} = \Omega_0 + 2js\omega(\alpha + r) = 0, \quad (3)$$

где параметр Ω_0 , приравненный к нулю, представляет собой дисперсионное соотношение для спиновых волн в одиночной ферромагнитной пленке [7].

Периодическая толщина структуры учитывалась в виде [6]:

$$d = d_0 \left[1 + \delta_d \cos\left(\frac{2\pi}{L} y\right) \right], \quad (4)$$

где $\delta_d = \frac{2\Delta}{\pi d_0} \sin \frac{\pi c}{L}$, $d_0 = b + \frac{\Delta c}{L}$ — эффективная толщина магнетонного кристалла, L — период структуры.

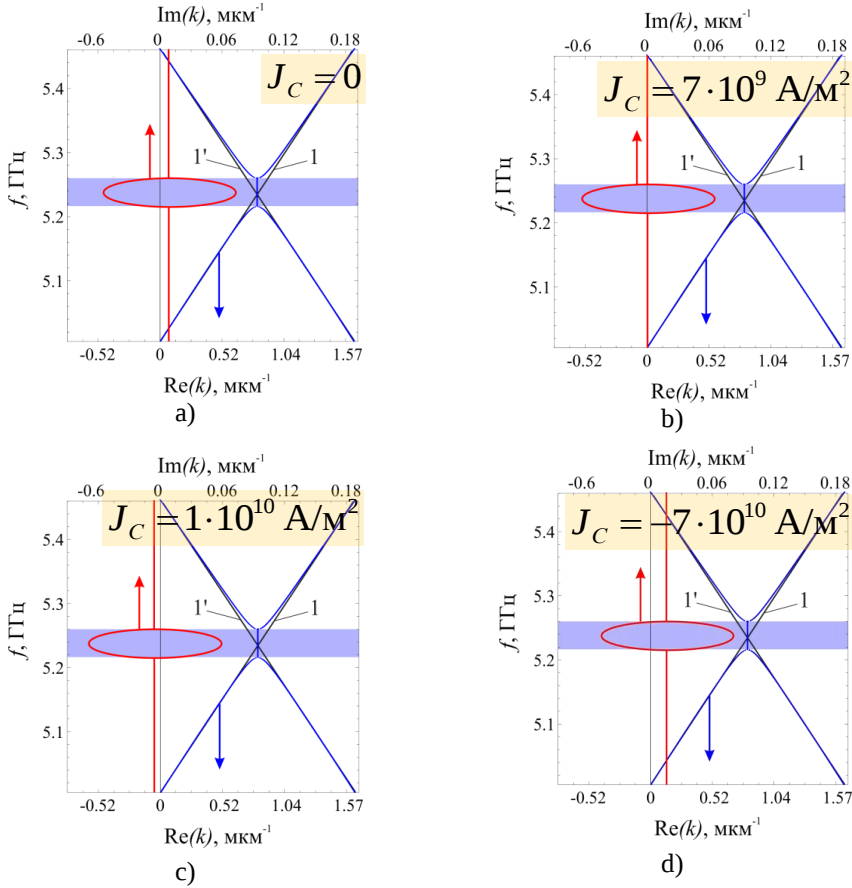


Рис. 2. Дисперсионные характеристики спиновой волны в структуре на основе ЖИГ с периодической системой канавок, нагруженной слоем платины, при различных значениях электрического тока в платине, который связан со спиновым током соотношением (2):

(a) $J_C = 0$, (b) $J_C = 7 \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$, (c) $J_C = 1 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, (d) $J_C = -7 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$.

Fig. 2. Dispersion characteristics of spin waves in the structure based on YIG film with a periodic system of grooves loaded on of platinum layer at various values of the electric current in platinum layer, which is related to spin-polarized current by Eq. (2): (a) $J_C = 0$, (b) $J_C = 7 \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$,

(c) $J_C = 1 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, (d) $J_C = -7 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$

В результате было получено дисперсионное соотношение для спиновой волны в исследуемой структуре в виде:

$$\begin{vmatrix} \eta_0^{HM} & \kappa_0 \\ \kappa_{-1} & \eta_{-1}^{HM} \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

где $\eta_{0,-1}^{HM} = \frac{\Omega_{0,-1}^{HM}}{2\omega}$, $\kappa_{0,-1} = \frac{\delta_d}{2} V k_{-1,0}$, V — групповая скорость, $k_{0,-1}$ — волновые числа прямых и отраженных волн, связанные условием Брэгга $k_0 + k_{-1} = 2k_B$, где $k_B = \pi/L$ — волновое число Брэгга.

Результаты расчета дисперсионных характеристик спиновых волн показаны на рис. 2, синими кривыми показаны действительные части волнового числа, красными — мнимые, мнимая часть волнового числа характеризует затухание волны в среде, причем в центре запрещенной зоны оно максимально.

Видно, что в отсутствие тока (рис. 2а) во всей полосе для прямой волны мнимая часть волнового числа положительна (красные кривые), что связано с затуханием спиновой волны в ферромагнитной среде. При этом формируется запрещенная зона (показана заливкой) — область частот, на которых затухание спиновой волны увеличивается. Введение спинового тока положительной полярности приводит к усилению спиновой волны в области частот вне запрещенной зоны и частичной компенсации потерь в области запрещенной зоны (рис. 2б, с). Изменение направления спинового тока приводит к дополнительному затуханию (рис. 2д).

3. Ферромагнитная пленка с периодической системой полосок нормального металла

Для исследования особенностей формирования запрещенных зон в структуре на основе супертонкой пленки ЖИГ с периодической поверхностью в виде платиновых полосок (рис. 1б) был произведен расчет спектральных характеристик спиновых волн. Для построения модели использовался метод матриц передач [8]. Предполагалось, что электрический ток в слое платины течет вдоль оси y , а толщина слоя платины меньше толщины скин-слоя. Для расчета волновых чисел в металлизированной и не металлизированной ферромагнитной пленке использовалось уравнение (3). Матрицы передачи и отражения соответствующих чередующихся слоев вычислялись по формулам (6):

$$T_1(\omega) = \begin{bmatrix} \exp[(-jk_m + k_m'') \frac{L}{2}] & 0 \\ 0 & 1 / \exp[(-jk_m + k_m'') \frac{L}{2}] \end{bmatrix}, \quad (6a)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1/(1-G) & G/(1-G) \\ G/(1-G) & 1/(1-G) \end{bmatrix}, \quad (6б)$$

$$T_3(\omega) = \begin{bmatrix} \exp[(-jk_f + k_f'')\frac{L}{2}] & 0 \\ 0 & 1/\exp[(-jk_f + k_f'')\frac{L}{2}] \end{bmatrix}, \quad (6b)$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} 1/(1+G) & -G/(1+G) \\ -G/(1+G) & 1/(1+G) \end{bmatrix}. \quad (6r)$$

где k_f и k_m — волновые числа волн в ненагруженном слое ферромагнетика и ферромагнетика, нагруженного нормальным металлом соответственно, $k_{f,m}'' = \gamma \Delta H / (2V_{f,m})$ — параметры затухания спиновой волны, ΔH — ширина линии ферромагнитного резонанса, $V_{f,m}$ — групповые скорости, $G = ((k_m + jk_{m'}) - (k_f + jk_{f'})) / ((k_m + jk_{m'}) + (k_f + jk_{f'}))$ — коэффициент отражения, L — период структуры.

Результирующая матрица передачи структуры будет иметь вид:

$$T = (T_1(\omega) \cdot T_2 \cdot T_3(\omega) \cdot T_4)^N, \quad (7)$$

где N — количество периодов структуры.

Тогда коэффициент отражения будет иметь вид:

$$R = |T_{21}|/|T_{11}|, \quad (8)$$

где T_{21} , T_{11} — элементы матрицы T (7).

На рис. 3 приведена частотная зависимость коэффициента отражения спиновой волны в ЖИГ-волноводе с периодической системой в виде платиновых полосок. Видно, что в отсутствие спинового тока в платиновых полосках (красная кривая) коэффициент отражения равен нулю во всем диапазоне частот, т. е. структура не проявляет свойств магнитного кристалла. При введении спинового тока, компенсирующего затухание ($r = -\alpha$, черная кривая), формируются три максимума коэффициента отражения. Данные максимумы соответствуют первому брэгговскому резонансу на частоте $f_1 = 3.94$ ГГц, второму брэгговскому резонансу — при $f_2 = 4.22$ ГГц и третьему брэгговскому резонансу при $f_3 = 4.48$ ГГц.

Запрещенные зоны формируются и в случае неполной компенсации затухания ($r = -0.5\alpha$, синяя кривая на рис. 3), в данном случае величина коэффициента отражения оказывается существенно ниже, следовательно, глубина запрещенных зон уменьшается, при этом их положение не изменяется. В случае если платиновые полоски усиливают затухание спиновой

волны ($r = \alpha$, зеленая кривая на рис. 3), также создается периодическая вариация параметра затухания и формируются запрещенные зоны, их глубина оказывается меньше относительно случая компенсации затухания.

Таким образом, исследуемая структура представляет собой динамический магнитный кристалл [9], в котором введение спинового тока приводит к формированию запрещенных зон в спектре спиновых волн.

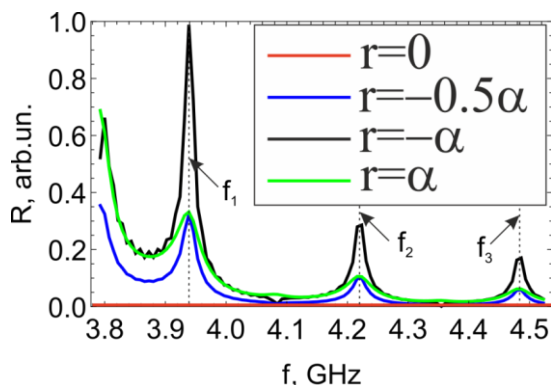


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения спиновой волны в ЖИГ-волноводе с периодической структурой в виде платиновых полосок в отсутствие спинового тока в полосках (красная кривая), при введении спинового тока, компенсирующего затухание в ЖИГ-волноводе (черная кривая). Расчеты выполнены при следующих параметрах:

$$H_0 = 735 \text{ Э}, M_0 = 140 \text{ Гс}, \Delta H = 0.5 \text{ Э}, d = 12 \text{ мкм}, L = 200 \text{ мкм}.$$

Fig. 3. Reflection coefficient dependence on spin wave frequency in the YIG-waveguide with structure of platinum stripes in the absence of spin current (red curve), in the presence of spin current which compensate the spin wave damping in the YIG-waveguide (black, blue and green curves). Calculations were performed with the following parameters:

$$H_0 = 735 \text{ Oe}, M_0 = 140 \text{ Gs}, \Delta H = 0.5 \text{ Oe}, d = 12 \text{ }\mu\text{m}, L = 200 \text{ }\mu\text{m}$$

4. Заключение

Таким образом, в данной работе показано, что в периодических композитных структурах на основе ферромагнитных материалов и нормальных металлов возможно управление усилением/ослаблением спиновых волн в ферромагнитных пленках при взаимодействии со спин-поляризованным током, а также формированием и параметрами брэгговских запрещенных зон для спиновых волн.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-03049-мк).

Список литературы

1. Chumak A. V. [et al.] Magnon spintronics // *Nature Physics*. 2015. V. 11. P. 453–461.
2. Hoffmann A., Bader S. D. Opportunities at the Frontiers of Spintronics // *Phys. Rev. Applied*. 2015. V. 4. P. 047001.
3. Brataas A., Kent A. D., Ohno H. Current-induced torques in magnetic materials // *Nature Materials*. 2012. V. 11. P. 372–381.
4. Liu L. [et al.] Spin-Torque Ferromagnetic Resonance Induced by the Spin Hall Effect // *Phys. Rep. Lett*. 2011. V. 106. P. 036601.
5. Pirro P. [et al.] Spin-wave excitation and propagation in microstructured waveguides of yttrium iron garnet/Pt bilayers // *Appl. Phys. Lett*. 2014. V. 104. P. 012402.
6. Morozova M. A. [et al.] Band gap formation and control in coupled periodic ferromagnetic structures // *Journal of Applied Physics*. 2016. V. 120. P. 223901.
7. Гуревич А. Г. Магнитные колебания и волны. Москва : Наука, 1994. 464 с.
8. Chumak A. V. [et al.] Spin-wave propagation in a microstructured magnonic crystal // *Applied Physics Letters*. 2009. V. 95. P. 262508.
9. Устинова И. А., Никитин А. А., Устинов А. Б. Динамический магнонный кристалл на основе феррит-сегнезлектрической слоистой структуры // *ЖТФ*. 2016. Т. 86. С. 155—158.

Информация об авторах

Морозова Мария Александровна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, лаборатория терагерцовой спинтроники, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация; доцент кафедры нелинейной физики, Саратовский государственный университет, г. Саратов, Российская федерация. ORCID 0000-0003-4442-2443.

Матвеев Олег Валерьевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории «Магнитные метаматериалы», Саратовский государственный университет, г. Саратов, Российская федерация. ORCID 0000-0003-2320-907X.

Information about the authors

Maria A. Morozova, PhD in physics and mathematics, senior researcher, Terahertz Spintronics Laboratory, Dolgoprudny, Russian Federation, associate professor of department of nonlinear physics, Saratov State University, Saratov, Russian Federation. ORCID 0000-0003-4442-2443.

Oleg V. Matveev, PhD in physics and mathematics, senior researcher, Laboratory “Magnetic Metamaterials”, Saratov State University, Saratov, Russian Federation. ORCID 0000-0003-2320-907X.

УДК 621.315.611

Влияние титаната бария на электрофизические характеристики терморезистивного материала

^{1,2} Кукушина К. Г., ² Еремин Е. Н., ¹ Тищенко Н. М., ¹ Кохнюк Д. Д.

¹ Центральное конструкторское бюро автоматики
г. Омск, 644027, Космический пр., 24а, Российская Федерация
KukushinaKG@ckba.net

² Омский государственный технический университет
г. Омск, 644050, пр. Мира, 11, Российская Федерация

Получено: 28 декабря 2021 г.

Отрецензировано: 12 января 2022 г.

Принято к публикации: 14 января 2022 г.

Аннотация: Исследовано влияние введения титаната бария на электрофизические характеристики композиционного материала. Приведена технология получения композиционного материала. Представлены физико-механические и диэлектрические свойства наполненного материала. Установлено, что наполнение 30 % масс. титаната бария повышает диэлектрическую проницаемость в 1,5 раза.

Ключевые слова: титанат бария, эпоксидные реактопласты, диэлектрическая проницаемость, наполнители.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Влияние титаната бария на электрофизические характеристики терморезистивного материала / К. Г. Кукушина [и др.] // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 4. С. 301—307.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Влияние титаната бария на электрофизические характеристики терморезистивного материала / К. Г. Кукушина, Е. Н. Еремин, Н. М. Тищенко, Д. Д. Кохнюк // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 4. — С. 301—307.

The Influence of Barium Titanate on the Electrophysical Characteristics of a Thermosetting Material

K. G. Kukushina^{1,2}, E. N. Eremin², N. M. Tishchenko¹,
and D. D. Kokhniuk¹

¹ Central Design Bureau of Automatics
24a Kosmicheskoy pr., Omsk, 644027, Russian Federation
KukushinaKG@ckba.net

² Omsk State Technical University
11 Mira ave., Omsk, 644050, Russian Federation

Received: December 28, 2021

Peer-reviewed: January 12, 2022

Accepted: January 14, 2022

Abstract: The influence of the barium titanate insertion on the electrophysical characteristics of the composite material is investigated. The technology of obtaining a composite material is presented. The physicomechanical and dielectric properties of the filled material are presented. It was found that the filling is 30 % of the mass. barium titanate increases the dielectric constant by 1.5 times.

Key words: barium titanate, epoxy thermosets, dielectric constant, fillers.

For citation(IEEE): K. G. Kukushina et al. "The influence of barium titanate on the electrophysical characteristics of a thermosetting material," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 301–307, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Создание новых материалов с заданными функциональными свойствами продолжает оставаться одним из важнейших направлений при разработке современной радиоаппаратуры. Это обусловлено повышением технических требований к СВЧ-устройствам. Так, например, к антеннам предъявляют требования максимальной широкополосности при минимальных габаритах. Одним из вариантов решения данной тактико-технической задачи является применение материалов, обладающих повышенной диэлектрической проницаемостью. Кроме того, данные материалы должны обеспечивать заданный интервал рабочих температур, влагостойкость, обладать достаточной механической прочностью и ударостойкостью, а также иметь значительный ресурс эксплуатации [1, 2].

Традиционно для изготовления корпусов спиральных антенн применяются реактопласты на основе эпоксидной смолы [3]. Благодаря этому антенные эле-

менты обладают хорошими механическими свойствами, низким водопоглощением и усадкой. Однако относительная диэлектрическая проницаемость данного материала равна 4,2—4,4. Для увеличения данной характеристики материала можно использовать различные способы, например, введение наполнителя с более высокой диэлектрической проницаемостью [4, 5]. В качестве такого наполнителя можно использовать титанат бария, так как богатые Ti соединения в системе $BaO - TiO_2$ показывают высокую относительную диэлектрическую проницаемость и низкие диэлектрические потери. Следовательно, введение титаната бария в материал должно позволить получить композиционные материалы с высокими радиотехническими характеристиками (РТХ). Кроме того, соединения титана повышают прочность, ударостойкость и теплостойкость композита [6].

Для определения диэлектрической проницаемости смеси используют соотношение Лихтенекера [7]. Оно связывает диэлектрическую проницаемость компонентов и их доли в системе и позволяет рассчитать предполагаемую диэлектрическую проницаемость композита.

В работе [8] представлены результаты использования титаната бария в качестве наполнителя для композита на основе полиметилсилоксана. Показано, что максимальное введение $BaTiO_3$ в полимерную основу способствовало повышению диэлектрической проницаемости на 20 %. Однако для изготовления корпусных элементов используют более прочные конструкционные материалы, работающие в условиях вибрационных нагрузок.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы была проверка возможности повышения диэлектрической проницаемости конструкционного эпоксидного реактопласта путем введения титаната бария. Также необходима оценка возможности изготовления антенных элементов из композиционного материала с улучшенными РТХ.

2. Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлся композиционный материал на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-8. В качестве отвердителя — диаминодифенилметан, а также краситель и ускоритель УП-0632. Наполнителем являлся титанат бария марки ТБК-1 с мольным соотношением BaO/TiO_2 , равным 0,95. Средний размер частиц наполнителя 0,5 мкм.

Композиционный материал изготавливался смешением компонентов в лабораторной мельнице с шарами из нержавеющей стали диаметром 15 мм в течение 5 мин. Таким образом, были изготовлены экспериментальные образцы композиционного материала с содержанием титаната бария 7, 15 и 30 % масс. Дальнейшее введение наполнителя в материал было нетехнологично в связи с неравномерной пропиткой композита.

Далее методом литьевого прессования из полученных образцов композита были изготовлены пластины, а затем и антенные элементы. Режимы изготовления представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы изготовления образцов.

Table 1. Modes of molding samples

Параметры	Значение
Температура прессования, °C	125—145
Удельное давление, МПа	20—35
Количество подпрессовок, шт	2—3
Выдержка под давлением, мин	
— пластина	14
— антенный элемент	25
Термическая обработка:	
— время, ч	8
— температура, °C	155—165

Измерения диэлектрической проницаемости образцов композиционных материалов проводили в X -диапазоне СВЧ. Для измерения использовался измеритель модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-18 в режиме измерения КСВН, согласованная нагрузка, волновод 10×23 мм. Были изготовлены плоские образцы размером $(5—7) \times 23 \times 10$ мм.

Твердость плоских образцов измеряли твердомером ТН 210 на испытательном стенде *TIME High Technology Ltd*. Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 24621-2015 (ISO 868:2003) «Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору)», нагрузка — 4,5 кгс.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований была проведена с применением программного продукта *STATIC-2* [9].

3. Результаты исследования

Итогами проведенной экспериментальной работы по проверке влияния введения титаната бария в эпоксидный материал явились следующие результаты.

Диэлектрические и физико-механические свойства полученных образцов композиционных материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Диэлектрические и физико-механические свойства композиционных материалов.

Table 2. Dielectric and physico-mechanical properties of composite materials

Показатели	Содержание наполнителя BaTiO ₃ , масс. %			
	0	7	15	30
Внешний вид и цвет	Порошок зеленого цвета	Порошок светло-зеленого цвета	Порошок кремowego цвета со светло-зеленым оттенком	
Диэлектрическая проницаемость, частота 10^{10} Гц	4,4	5,1	6,5	7,6
Твердость по Шору, HD	80	82	84	87
Усадка, %	0,5	0,2	0,1	0,1

Из полученных данных следует, что при введении диэлектрического наполнителя в композиционный материал наблюдается повышение твердости образцов — при содержании 30 % масс $BaTiO_3$ твердость максимальна и равна 87 HD.

Из данных таблицы 2 видно, что при введении титаната бария в композиционный материал диэлектрическая проницаемость существенно возрастает с 4,4 до 7,6 (при максимальном наполнении). Измеренные значения диэлектрической проницаемости образцов соответствуют рассчитанным по формуле Лихтенекера. Соответствие значений диэлектрической проницаемости образцов, рассчитанных и полученных экспериментально, представлено на рис. 1.

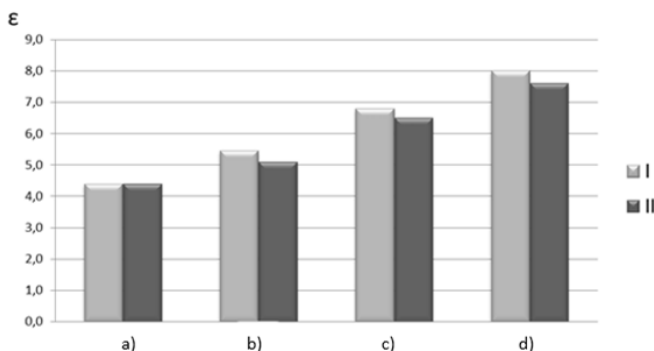


Рис. 1. Диэлектрическая проницаемость образцов:
 I — уравнение Лихтенекера; II — экспериментальные данные
 а) УП-284С; б) УП-284С + 7 % масс. $BaTiO_3$;
 в) УП-284С + 15 % масс. $BaTiO_3$; д) УП-284С + 30 % масс. $BaTiO_3$.

Fig. 1. The dielectric constant of samples:
 I – Lichtenecker equation; II – experimental data
 а) UP-284 S; б) UP-284 S + 7 % of the $BaTiO_3$ mass;
 в) UP-284 S + 15 % of the $BaTiO_3$ mass; д) UP-284 S + 30 % of the $BaTiO_3$ mass

Затем из полученного композиционного материала методом литьевого прессования были изготовлены корпусные элементы антенны. Технологические режимы указаны в таблице 1. Полимерная основа композиционного материала диановая смола ЭД-8 пропитывает наполнитель $BaTiO_3$, тем самым обеспечивает отличную текучесть композита и равномерное заполнение пресс-формы.

Усадка образцов уменьшается при увеличении содержания титаната бария до 0,1 %, что оказывает положительный эффект при изготовлении элементов конструкционного назначения. Были изготовлены корпусные элементы спиральных антенн в количестве 5 образцов. Все детали полностью соответствовали техническим требованиям нормативных документов и не имели дефектов.

Таким образом, результаты данной исследовательской работы показывают, что путем введения титаната бария возможно создание нового технологичного композиционного материала с повышенной диэлектрической проницаемостью. Следует отметить, что данный композит пригоден для изготовления деталей конструкционного назначения методом литьевого прессования.

4. Заключение

В результате проведенной исследовательской работы рассмотрено влияние титаната бария на электрофизические характеристики композита.

Установлено, что введение титаната бария позволило увеличить относительную диэлектрическую проницаемость композиционного материала на 50 % при содержании наполнителя 30 % масс.

Список литературы

1. Корякова З. В. Керамические материалы в СВЧ-технике // Компоненты и технологии. 2011. № 5. С. 184—186.
2. Филатова Т. Н., Гиренко Т. Н. Повышение физико-механических свойств полимерных материалов путем введения нанодисперсных наполнителей // Вопросы радиоэлектроники, серия общетехническая. 2009. № 4. С. 73—79.
3. Патент 2293406 (РФ). МКП H01Q 1/36. Антенный элемент и способ его изготовления / Короткова Л.А., Коробейников Г. В., Зайцева Н. В. Заявитель и патентообладатель АО «ЦКБА». Заявлено 2005111490/09, 18.04.2005, Опубл. 10.02.2007. Бюл. № 4.
4. Володько К. Л., Ястребов А. С. Расчет диэлектрической проницаемости композиционных материалов на основе статических смесей диэлектриков // Проектирование и технология электронных средств. 2003. № 3. С. 38—39.
5. Nayak S., Chaki T., Khastgir D. Dielectric relaxation and viscoelastic behavior of polyurethane-titania composites : dielectric mixing models to explain experimental results // Polymer Bulletin. 2016. Vol. 74. P. 369—392.
6. Ксантос М. Функциональные наполнители для пластмасс. СПб. : Научные основы и технологии, 2010. 462 с.
7. Гуртовник И. Г., Соколов В. И., Трофимов Н. Н., Шалгунов С. И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М. : Мир, 2002. 368 с.
8. Овсов Д. А., Соловьев Е. В., Строганов К. А., Сучков Е. С. Исследование диэлектрических свойств композиционного материала на основе полиметилсилоксана (ПМС) с добавлением порошка титаната бария BaTiO₃ // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. С. 73—78.
9. Вершинин В. И., Перцев Н. В. Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента. Омск : Изд-во ОмГУ, 2005. 216 с.

Информация об авторах

Кукушина Ксения Геннадьевна, инженер-технолог I кат. сектора новых материалов и технологий Центрального конструкторского бюро автоматики, г. Омск, Российская Федерация; аспирант III курса Омского государственного технического университета, г. Омск, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-9959-5670.

Еремин Евгений Николаевич, д. т. н., профессор Омского государственного технического университета, г. Омск, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-7357-8194.

Тищенко Наталья Михайловна, ведущий инженер-технолог сектора новых материалов и технологий Центрального конструкторского бюро автоматики, г. Омск, Российская Федерация.

Кохнюк Данил Данилович, ведущий инженер Центрального конструкторского бюро автоматики, г. Омск, Российская Федерация.

Information about the authors

Ksenia G. Kukushina, process engineer I cat. of the sector of new materials and technologies of Central Design Bureau of Automatics, Omsk, Russian Federation; graduate student III courses of Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation. ORCID 0000-0001-9959-5670.

Evgeniy N. Eremin, Dr. Tech. Sc., Professor of Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation. ORCID 0000-0001-7357-8194.

Natalia M. Tishchenko, lead process engineer of the sector of new materials and technologies of Central Design Bureau of Automatics, Omsk, Russian Federation.

Danil D. Kokhniuk, lead engineer of Central Design Bureau of Automatics, Omsk, Russian Federation.

УДК 621.382

Фотопроводящие дипольные антенны на основе полупроводников с высоким и низким временем жизни носителей заряда для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового излучения

Березная С. А., Кобцев Д. А., Саркисов С. Ю.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
пр. Ленина 36, г. Томск, Российская Федерация*

atom@mail.tsu.ru, danbers27@gmail.com, sarkisov@mail.tsu.ru

Получено: 27 февраля 2022 г.

Отрецензировано: 12 марта 2022 г.

Принято к публикации: 14 марта 2022 г.

Аннотация: *Исследованы процессы генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового излучения фотопроводящими дипольными антеннами на основе полупроводниковых материалов с малым и большим временем жизни носителей заряда. Проведено моделирование процессов генерации импульсного и непрерывного терагерцового излучения. Изучено влияние параметров активной полупроводниковой среды на генерационные и детектирующие характеристики фотопроводящих дипольных антенн на основе LT-GaAs и SI-GaAs:Cr.*

Ключевые слова: *терагерцовая спектроскопия, GaAs, время жизни, фотопроводящая дипольная антенна, фотомиксер.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Березная С. А., Кобцев Д. А., Саркисов С. Ю. Фотопроводящие дипольные антенны на основе полупроводников с высоким и низким временем жизни носителей заряда для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового излучения // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 4. С. 308—321.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Березная, С. А. Фотопроводящие дипольные антенны на основе полупроводников с высоким и низким временем жизни носителей заряда для генерации и детектирования импульсного и непрерывного терагерцового излучения / С. А. Березная, Д. А. Кобцев, С. Ю. Саркисов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 4. — С. 308—321.

Photoconductive Dipole Antennas Based on Semiconductors with Long and Short Charge Carrier Lifetimes for Pulsed and CW Terahertz Generation and Detection

S. A. Bereznya, D. A. Kobtsev, and S. Yu. Sarkisov

National Research Tomsk State University
Lenin ave. 36, Tomsk, Russian Federation
atom@mail.tsu.ru, danbers27@gmail.com, sarkisov@mail.tsu.ru

Received: December 28, 2021

Peer-reviewed: January 12, 2022

Accepted: January 14, 2022

Abstract: *CW and pulsed terahertz generation and detection by photoconductive dipole antennas based on semiconductor materials with short and long charge carrier lifetimes has been studied. The modeling of pulsed and CW terahertz generation has been carried out. The influence of the parameters of the active semiconductor medium on the generation and detection characteristics of photoconductive dipole antennas has been studied.*

Key words: *terahertz spectroscopy, GaAs, charge carrier lifetime, photoconductive dipole antenna, photomixer.*

For citation(IEEE): S. A. Bereznya et al. “Photoconductive Dipole Antennas Based on Semiconductors with Long and Short Charge Carrier Lifetimes for Pulsed and CW Terahertz Generation and Detection,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 308–321, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Фотопроводящие полупроводниковые структуры широко используются для генерации импульсного и непрерывного терагерцового излучения при возбуждении их лазерным излучением, как импульсным, так и непрерывным. Фотопроводящие дипольные антенны (ФДА) на основе таких структур начали применяться в качестве источников терагерцового излучения в схемах импульсной терагерцовой спектроскопии 30 лет назад [1]. К настоящему времени полученные результаты исследований влияния свойств активной среды и конфигурации дипольных антенн на их рабочие характеристики позволили создать коммерческие ФДА с высокими характеристиками.

Процессы, наблюдаемые в дипольной антенне, являются быстропротекающими и оказывают комплексное влияние на эффективность генерации и детектирования. Характеристики дипольных антенн зависят от параметров активной полупроводниковой среды, параметров фотовозбуждающего лазерного излучения, геометрии металлической дипольной структуры, приложенного напряжения смещения и фокусирующей оптики [2—4].

Важнейшими параметрами полупроводниковой среды являются ее удельное сопротивление, время жизни неравновесных носителей заряда и их подвижность [4—6]. Время жизни влияет на детектирующую способность антенн, и, в меньшей мере, на способность к генерации и должно быть достаточно малым для обеспечения резкого спада фототока. Большая величина фототока наблюдается в материалах с высокой подвижностью носителей заряда. Также в некоторых случаях высокая подвижность способствует экстракции носителей зарядов в металлическую структуру через контактный зазор. Параметр темнового сопротивления определяет предельное напряжение смещения. Геометрия металлических контактов должна обеспечивать максимальное значение напряженности поля смещения в контактном зазоре при отсутствии пробоя полупроводникового материала.

Способность генерировать непрерывное терагерцовое излучение является важным свойством фотопроводящей дипольной антенны. В этом случае возбуждение активной среды происходит с помощью двух непрерывных лазерных источников. Частоты этих лазеров должны отличаться на величину до нескольких терагерц. При таком способе фотовозбуждения фотопроводящую дипольную антенну называют фотомиксером. В настоящее время генераторы непрерывного терагерцового излучения на основе фотомиксеров имеют небольшие размеры и используют в качестве накачки лазерные диоды [7].

2. Фотопроводящие дипольные антенны

Фотопроводящая дипольная антенна представляет собой оптоэлектронный ключ Астона [8], который конструктивно состоит из полупроводникового материала с нанесенной на его поверхность металлической дипольной структурой определенной формы с контактными зазорами порядка 1—5 мкм. В настоящей работе в качестве основы для антенн были выбраны два типа высокоомных арсенид-галлиевых структур: *LT-GaAs* и полужолирующий *SI-GaAs:Cr*. Запрещенная зона обоих материалов составляет 1,42 эВ, что позволяет использовать для фотовозбуждения импульсные и непрерывные лазерные источники с длиной волны ~780 нм. Исполь-

Fig. 1. Topologies of the investigated photoconductive dipole antennas: (a) – photoconductive dipole antenna in the form of a logarithmic spiral, (b) – photoconductive dipole antenna in the form of a periodic spiral, (c) – stripe photoconductive dipole antenna. Dimensions are in micrometers

ПФДА были изготовлены в конфигурациях с различным длинами антенны от 176 до 23 мкм. Фотовозбуждение в контактном зазоре в импульсном режиме осуществляется фемтосекундным лазерным импульсом с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны. В засвеченной области возникает резкое увеличение концентрации неравновесных носителей заряда. Носители заряда разделяются и ускоряются приложенным к металлической структуре напряжением смещения, и в зазоре образуется переменный ток $j(t)$. При соответствующей скорости изменения фототока в пространство излучается электромагнитный импульс в терагерцовом диапазоне частот.

В режиме детектирования на металлическую структуру ФДА не подается напряжение смещения, но регистрируется протекающий через нее ток. Фототок возникает под действием электрического поля падающей на антенну терагерцовой волны. Измерение тока происходит подключенным к металлической дипольной структуре синхронным токовым измерителем-усилителем.

3. Импульсный режим генерации ФДА

Исследование спектров генерации изготовленных фотопроводящих дипольных антенн из *SI-GaAs:Cr* и *LT-GaAs* производилось с использованием установки импульсной терагерцовой спектроскопии во временной области (ИТС) [6]. Фотовозбуждение активной среды производилась импульсным лазерным излучением с длиной волны 780 нм и длительностью импульса 100 фс. Средняя оптическая мощность составляла 100 мВт. На антенну подавалось напряжение смещения, равное 9, 18 и 27 В. Регистрация временной формы терагерцового импульса производилась электрооптическим детектором на основе балансных фотодиодов и электрооптического кристалла *ZnTe*. Для увеличения эффективности детектирования использовалась модуляция терагерцового сигнала на частоте 1,5 кГц. Далее из временной формы сигнала при помощи преобразования Фурье получался спектр генерации ФДА (рис. 2).

Для всех изготовленных ФДА характерным является увеличение мощности генерации при увеличении подаваемого напряжения смещения. Полосковые ФДА как на основе *SI-GaAs:Cr*, так и на основе *LT-GaAs* показали тенденцию к увеличению мощности генерации и к расширению спектра генерации при уменьшении длины антенны (Рис. 2). ПФДА с максимальной длиной, равной 176 мкм, имеет ширину спектра генерации до 2 ТГц (Рис 2а, 2б). Напротив, антенна длиной 33 мкм генерирует терагерцовое излучение с частотой уже до 2,8 ТГц. Далее с уменьшением длины антенны происходит только увеличение мощности генерируемого излучения без расширения спектра генерации.

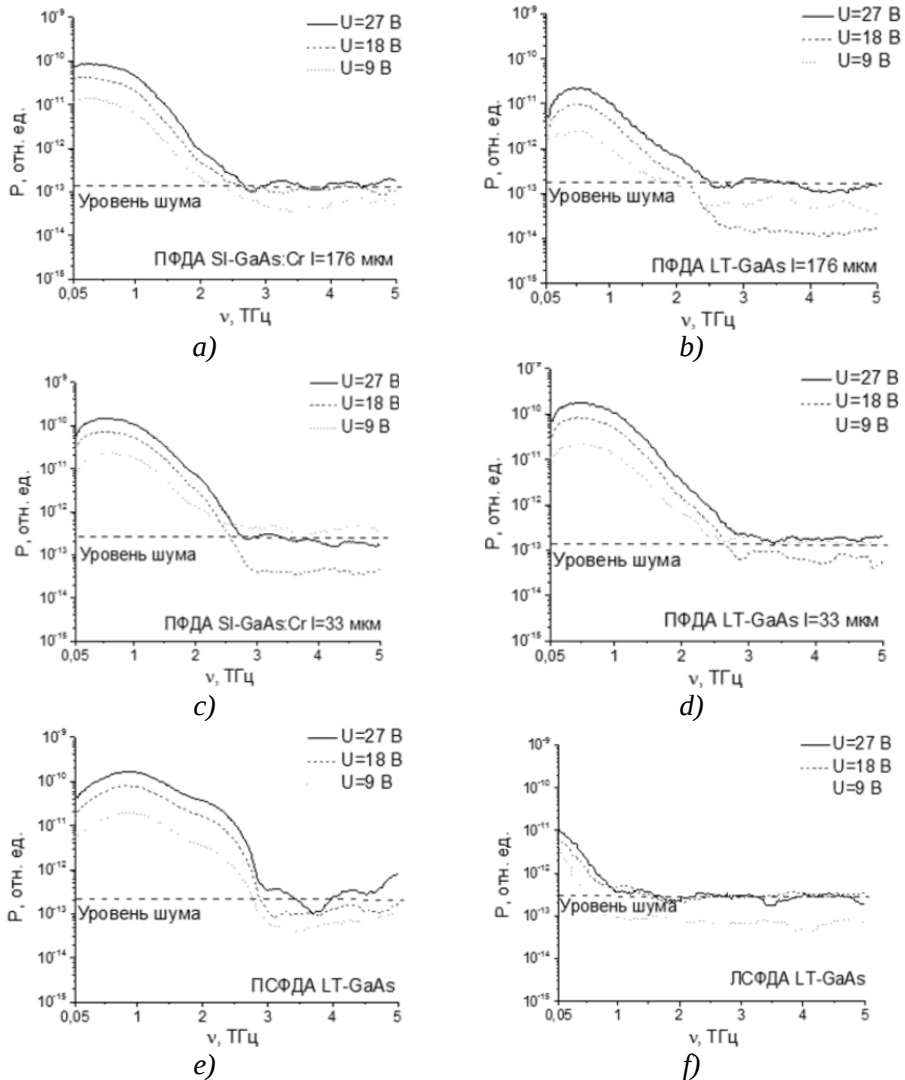


Рис. 2. Спектры терагерцового излучения, генерируемого ПДА на основе SI-GaAs:Cr (a, c) и LT-GaAs (b, d) длиной 176 мкм (a), (b) и 33 мкм (c), (d), ПСДА (e) и ЛСДА (f) на основе LT-GaAs при возбуждении лазерными импульсами длительностью 100 фс при различных приложенных напряжениях.

Fig. 2. Spectra of terahertz radiation generated by a stripe photoconductive dipole antenna based on SI-GaAs:Cr (a, c) and LT-GaAs (b, d) with a length of 176 μm (a), (b) and 33 μm (c), (d), a photoconductive dipole antenna in the form of a periodic spiral (e) and a photoconductive dipole antenna in the form of a logarithmic spiral (f) based on LT-GaAs when excited by laser pulses with a duration of 100 fs at various applied voltages

Самый широкий спектр генерации наблюдается для ПСФДА на основе *LT-GaAs* (Рис 2e). Сигнал в этом случае существенно превышает уровень шума до самого края генерации. Напротив, для ЛСФДА на основе обоих материалов получены наиболее узкие спектры генерации. Край спектра генерации едва доходит до 1 ТГц. Отчасти, такой результат объясняется круговой поляризацией терагерцовой волны, притом, что схема электрооптического детектирования оптимизирована для линейно поляризованного излучения.

4. Генерация непрерывного терагерцового излучения фотомиксерами на основе фотопроводящих дипольных антенн

Схема для исследования генерации непрерывного терагерцового излучения фотомиксерами на основе *SI-GaAs:Cr* и *LT-GaAs* ФДА схожа со схемой для генерации импульсного терагерцового излучения. В этом случае импульсный источник лазерного излучения заменяется на два непрерывных лазерных диода, частоты которых отличались на 0,36 ТГц и 1,22 ТГц. Излучение диодов совмещалось с помощью системы зеркал и светоделительной пластины. Светоделительная пластина делила мощность падающего лазерного излучения на две части в соотношении 1:1. Одна из частей использовалась для возбуждения ПСФДА-генератора на основе *LT-GaAs*, т. к. эти антенны имели самый широкий спектр генерации импульсного терагерцового излучения. Вторая часть использовалась для накачки ПФДА-детектора на основе *LT-GaAs* длиной 23 мкм. В результате чего в антенне-генераторе возникали биения интенсивности засветки с частотой, равной разностной частоте лазерных источников. Сканирование производилось при смещении линии задержки с шагом 10 мкм. Таким образом, были получены временные формы терагерцовой волны. Далее при помощи преобразования Фурье получались спектры генерации непрерывного терагерцового излучения фотомиксеров (рис. 3).

Выяснено, что изготовленные ФДА на основе *SI-GaAs:Cr* не подходят для создания фотомиксеров. Большое значение времени жизни неравновесных носителей зарядов не позволяет обеспечить необходимый для генерации спад тока в контактном зазоре, который должен повторять огибающую интенсивности оптической засветки.

5. Детектирование терагерцового излучения

Для исследования детектирующих характеристик в качестве генератора использовался кристалл *InAs*, а сама генерация происходила от поверхности кристалла при его возбуждении фемтосекундными лазерными

импульсами. В качестве детекторов использовались изготовленные антенны, включенные в схему с синхронным токовым измерителем-усилителем SR-830 (*Stanford Research*, США).

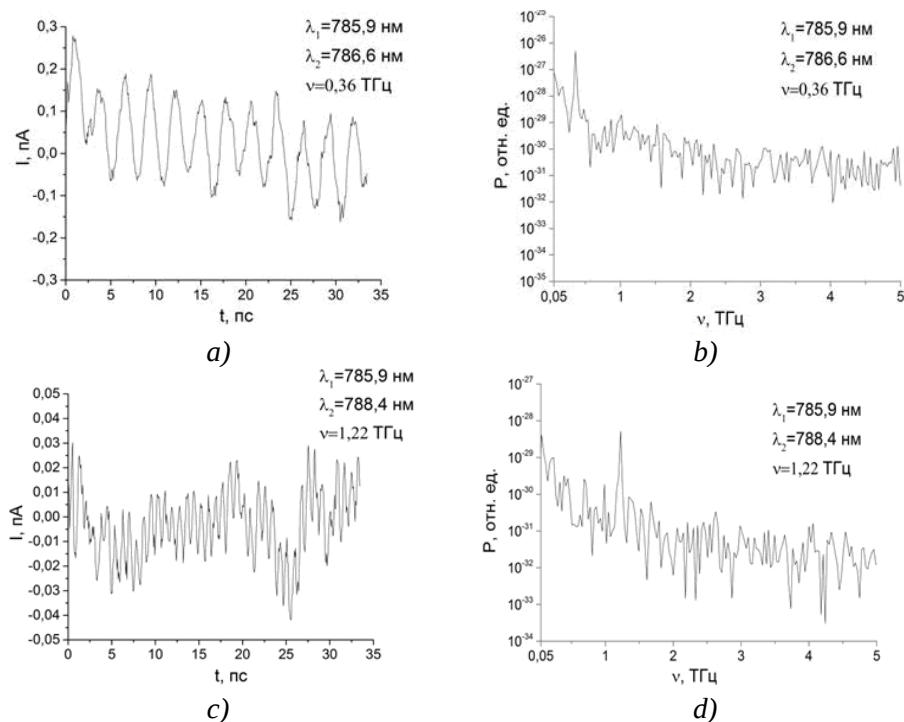


Рис. 3. Временные и спектральные формы терагерцового излучения, генерируемого ПСФДА в режиме фотомиксера при поданном напряжении смещения 45 В при возбуждении излучением лазерных диодов на длинах волн $\lambda_1 = 785.9$ нм и $\lambda_2 = 786.6$ нм (a) и (b); $\lambda_1 = 785.9$ нм и $\lambda_2 = 788.4$ нм (c) и (d). Детектирование осуществлялось ПФДА на основе *LT-GaAs* длиной 23 мкм.

Fig. 3. Temporal and spectral forms of terahertz radiation generated by a photoconductive dipole antenna in the form of a periodic spiral in the photomixer mode at a bias voltage of 45 V when excited by laser diode radiation at wavelengths $\lambda_1 = 785.9$ nm and $\lambda_2 = 786.6$ nm (a) and (b); $\lambda_1 = 785.9$ nm and $\lambda_2 = 788.4$ nm (c) and (d). Detection was carried out by a stripe photoconductive dipole antenna based on *LT-GaAs* with a length of 23 μ m

Обнаружено, что наиболее эффективным детектором терагерцового излучения является полосковая ФДА на основе *LT-GaAs* длиной 23 мкм — уровень сигнала, регистрируемого токовым измерителем, в этом случае составил 56 пА (максимальный ток, соответствующий главному максимуму детектируемого терагерцового импульса). Для антенн наибольшей длины регистрируемый сигнал падает до 15 пА. Для ЛСФДА и ПСФДА на

основе LT-GaAs регистрируемые сигналы составляли 13 пА и 30 пА соответственно.

Обнаружено, что изготовленные на основе *SI-GaAs:Cr* антенны не пригодны для работы в качестве детекторов терагерцового излучения. Большое значение времени жизни неравновесных носителей зарядов, порядка 10 нс, не позволяет в полной мере рекомбинировать электронно-дырочным парам до прихода на детектор следующего возбуждающего лазерного импульса. В связи с этим при фиксированном времени задержки падающих на антенну терагерцового и оптического импульсов наблюдаются осцилляции тока через антенну. Это делает невозможным регистрацию временных форм терагерцовых импульсов.

6. Моделирование генерации импульсного и непрерывного терагерцового излучения

Моделирование проводилось в среде *MathCad*. Модель являлась упрощенной и не учитывала диффузию. Материал помещался в постоянное ускоряющее электрическое поле, генерация неравновесных носителей заряда была обусловлена лазерным импульсом. Упрощение также заключалось в пренебрежении наличием контактных барьеров и исключением уменьшения неравновесной концентрации за счет ухода носителей заряда через контакты.

Напряженность терагерцового поля $E_{\text{ТГц}}(t)$ пропорциональна скорости изменения плотности тока $j(t)$:

$$E_{\text{ТГц}}(t) \sim \frac{\partial j(t)}{\partial t} \quad (1)$$

Плотность тока под действием ускоряющего электрического поля $E(t)$ записывается следующим образом:

$$j(t) = en(t)v(t) \quad (2)$$

где $v(t)$ — скорость носителей заряда, $n(t)$ — концентрация неравновесных носителей заряда, e — заряд электрона.

Ввиду различных источников фотовозбуждения в непрерывном и импульсном режимах работы, концентрация носителей заряда определялась уравнениями непрерывности с различными генерационными членами. Для импульсного режима использовался импульсный лазерный источник и уравнение непрерывности имеет вид

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau_c} + G(t) \quad (3)$$

где $G(t)$ — скорость генерации носителей заряда, пропорциональная временному профилю интенсивности лазерного импульса длительностью 100 фс, τ_c — время жизни неравновесных носителей заряда

$$G(t) = \exp\left(-4 \frac{(t-100-\tau/2)^2}{\tau^2}\right) / \int_0^\infty \exp\left(-4 \frac{(t-100-\tau/2)^2}{\tau^2}\right) dT \cdot \frac{\lambda \cdot P_{\text{лаз}} \cdot 4}{N_{\text{имп}} \cdot h \cdot c \cdot \pi \cdot d^2 \cdot d_\alpha} \quad (4)$$

В случае непрерывного режима генерации для накачки использовалось два непрерывных лазерных источника, вследствие этого уравнение непрерывности имеет вид

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau_c} + \frac{N_{ph}(t)}{S d_\alpha} \quad (6)$$

где, $N_{ph}(t)$ — число носителей заряда, генерируемых в единицу времени

$$N_{ph}(t) = \frac{S c \varepsilon_0 E^2(t)}{h \nu} \quad (7)$$

Здесь $E(t)$ — напряженность поля суммарного лазерного излучения двух непрерывных лазерных источников с длинами волн λ_1 и λ_2 , и мощностями P_1 и P_2 .

$$E(t) = \sqrt{\frac{2P_1}{c d^2 \varepsilon_0}} \sin\left(\frac{2\pi c t}{\lambda_1}\right) + \sqrt{\frac{2P_2}{c d^2 \varepsilon_0}} \sin\left(\frac{2\pi c t}{\lambda_2}\right) \quad (8)$$

Уравнение для скорости носителей заряда записывается в виде

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{v(t)}{\tau_s} + \frac{e}{m^*} E_{эл}(t), \quad (9)$$

где $E_{эл}$ — напряженность электрического поля в контактном зазоре:

$$E_{эл} = \frac{U}{d} - \frac{P(t)}{\varepsilon} \quad (10)$$

Здесь ε — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, U — напряжение смещения, d — величина контактного зазора, g — геометрический фактор. Также учтено экранирование встроенного поля за счет поляризации среды $P(t)$:

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\frac{P(t)}{\tau_c} + n(t) \cdot v(t) \cdot e. \quad (11)$$

Система уравнений и (3—11) решалась численно при различных значениях параметров τ_c (500, 1000, 2000, 5000, 500000 пс), τ_s (3, 30, 57, 100, 1500 фс), U (8, 18 и 27 В), $P_{\text{лаз}}$ (2, 20, 200, 2000 мВт). В расчетах использовались параметры лазерного излучения ($N_{\text{имп}} = 84 \cdot 10^6$, $\lambda = 780$ нм). Полученные зависимости $v(t)$ и $n(t)$ использовались для расчета плотности тока по формуле (2). Полученные зависимости дифференцировались, далее проводилось преобразование Фурье, что давало временной и спектральный профиль электрического поля терагерцовой волны $E_{T\text{Гц}}(t)$.

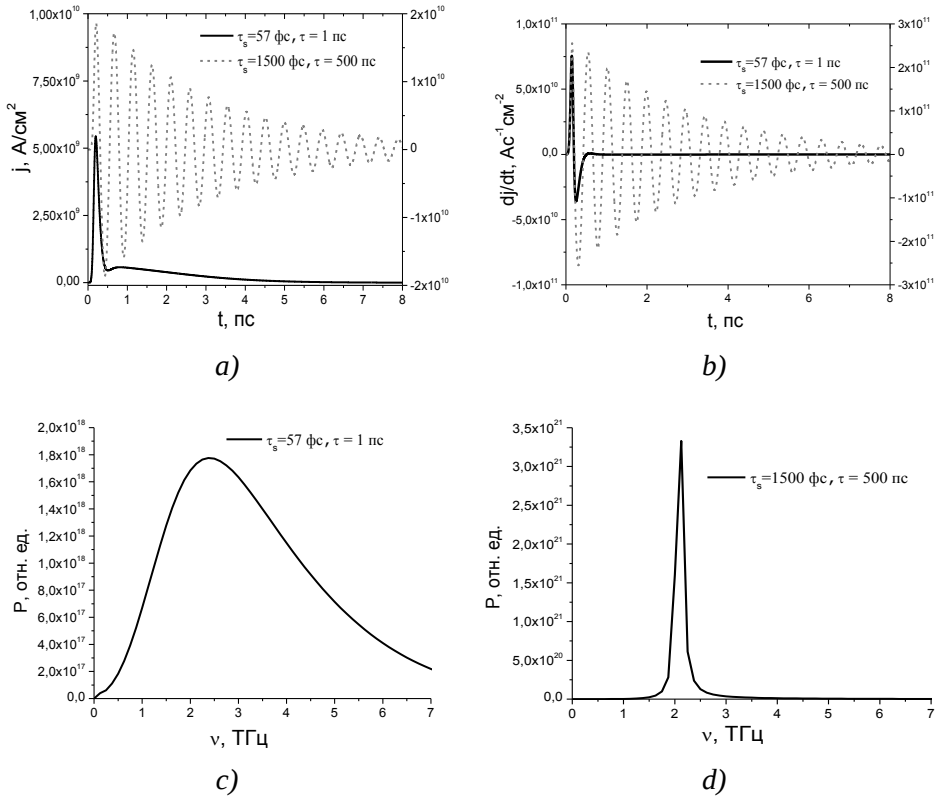


Рис. 4. Результаты моделирования генерации импульсного терагерцового излучения: (a) плотность тока, (b) — производная плотности тока по времени, (c) и (d) — спектр генерируемого терагерцового излучения.

Fig. 4. Simulation results of generation of pulsed terahertz radiation: (a) current density, (b) time derivative of current density, (c) and (d) spectrum of generated terahertz radiation

Для антенн, работающих в импульсном режиме, при больших значениях времени релаксации для тока ($\tau_s = 1500$ фс) и времени жизни носителей заряда $\tau_c = 500$ пс возникают осцилляции скорости носителей заряда, т. е. носители в процессе рекомбинации успевают менять направление движения несколько раз. Это приводит и к осцилляции плотности тока (рис. 4). Данное явление связано с тем, что собственное поле разноименно заряженных частиц при удалении друг от друга экранирует внешнее поле смещения. Данные осцилляции затухают относительно долго из-за большого значения времени жизни носителей заряда.

При уменьшении значения времени жизни до 1 пс эффект экранирования быстро исчезает и происходит увеличение скорости носителей заряда. Влияние на спектр генерации заключается лишь в появлении более остро выраженного спектрального максимума при уменьшении параметра τ_c .

При генерации непрерывного терагерцового излучения в материале с малым времени жизни носителей заряда ($\tau_c = 1$ пс) профиль концентрации носителей заряда повторяет профиль биений интенсивности фотовозбуждения. Это и обуславливает спектр излучения. На частотные характеристики генерации антенны, в данном случае, изменение подвижности носителей заряда в материале влияния не оказывает.

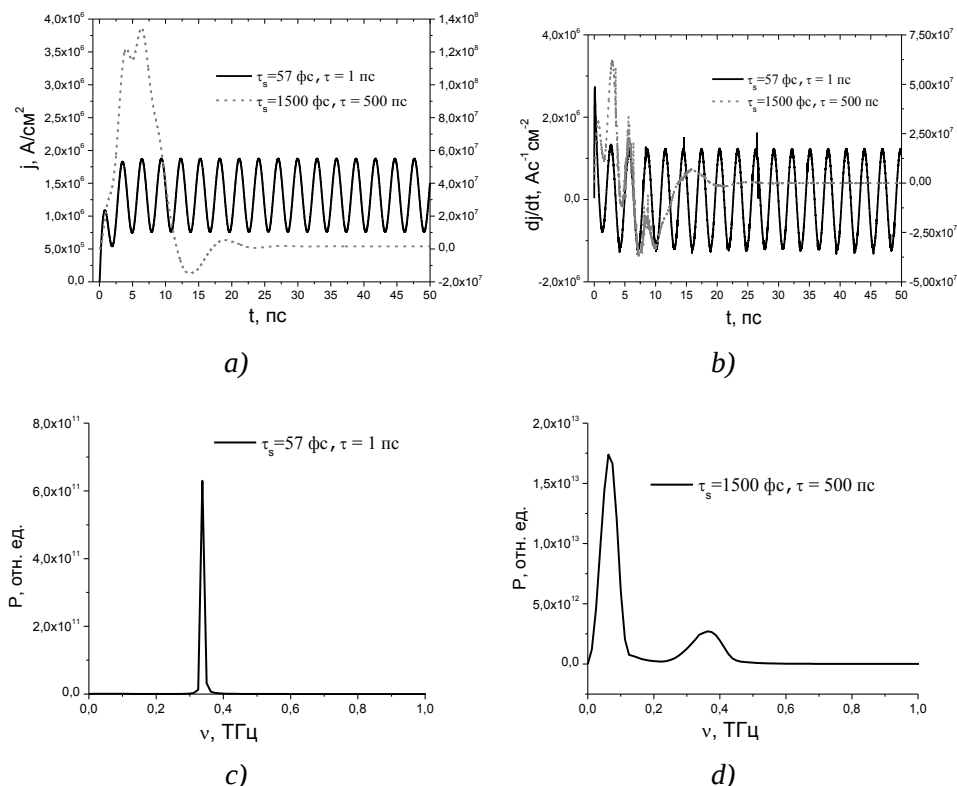


Рис. 5. Результаты моделирования генерации непрерывного терагерцового излучения: (a) плотность тока, (b) — производная плотности тока по времени, (c) и (d) — спектр генерируемого терагерцового излучения.

Fig. 5. Simulation results of generation of continuous terahertz radiation: (a) current density, (b) time derivative of current density, (c) and (d) spectrum of generated terahertz radiation

Для материала с большим временем жизни носителей заряда, равным 500 пс, наблюдается линейное увеличение концентрации носителей заряда, модулированной (с малой амплитудой) частотой биений интенсивности фотовозбуждения (Рис. 5). В начальный момент времени (при включении лазеров и попадании на кристалл переднего фронта световых волн) наблюдаются переходные процессы, сопровождаемые осцилляцией (с периодом около 20 пс) скорости носителей заряда, амплитуда которых растет с увеличением подвижности (эффект экранировки приложенного поля приводит к смене знака скорости). В сочетании с изменением концентрации носителей заряда это приводит к формированию всплеска тока, похожего по форме на наблюдаемый при возбуждении антенны фемтосекундным лазерным импульсом.

7. Заключение

Изготовленные фотопроводящие дипольные антенны на основе *SI-GaAs:Cr* и *LT-GaAs* позволяют получить спектры генерации в диапазоне от 0,05 до 2,8 ТГц. Время жизни носителей заряда в полупроводниковом материале имеет решающее значение при работе ФДА в качестве детекторов терагерцового излучения, а также фотомиксеров. Для корректной работы ФДА-детектора значение времени жизни не должно превышать десятки пикосекунд, как и для работы в режиме фотомиксера. По этой причине ФДА на основе *SI-GaAs:Cr* не могут применяться в качестве детекторов импульсного и генераторов непрерывного терагерцового излучения. В случае ПФДА, основанных на *LT-GaAs*, эффективность детектирования терагерцового излучения растет с уменьшением длины антенны. Продемонстрирована работоспособность фотомиксеров, созданных на основе ФДА на *LT-GaAs* при детектировании и генерации непрерывного терагерцового излучения как в области низких (0,36 ТГц), так и в области высоких (1,22 ТГц) терагерцовых частот. Обнаружено, что существенное влияние на процессы генерации оказывает эффект экранирования внешнего напряжения смещения. Этот эффект обеспечивает возможность использования материала с большим временем жизни носителей заряда в качестве генераторов терагерцового излучения. Эффект увеличивается при увеличении подвижности носителей заряда и мощности лазерного излучения.

Благодарности

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0038.

Список литературы

1. Auston D. H., Smith P. R. Generation and detection of millimeter waves by picosecond photoconductivity // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 43. P. 631–633.
2. Huang C. I., Li S. S. Injection dependence of the excess carrier lifetimes in Cr doped n type GaAs // Journal of Applied Physics. 1973. Vol. 44. P. 4214–4215.
3. A Comparison of Photoconductive Semiconductors with Long and Short Charge Carrier Lifetimes for Pulsed and CW Terahertz Generation and Detection / D. A. Kobtsev, I. I. Kolesnikova, R. A. Redkin, Yu. S. Sarkisov // IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference. (Munich, Germany, Jun. 23–26, 2019). 2 p. URL: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8872412 (date of access: 27.02.2022).
4. Dipole antennas based on SI-GaAs:Cr for generation and detection of terahertz radiation / S. Yu. Sarkisov, F. D. Safiullin, M. S. Skakunov [et al.] // Russ. Phys. J. 2013. Vol. 53, No 8, P. 890–898.
5. SI-GaAs<Cr> photoconductive dipole antennas for terahertz generation : the influence of antenna length and shape / S. Yu. Sarkisov, M. S. Skakunov, O. P. Tolbanov [et al.] // 25th Int. Crimean conf. “Microwave & Telecommunication Technology” – CriMiCo’2015 (Sevastopol, September 6–12, 2015). P. 455–456.
6. Bereznaya S. A., Kobtsev D. A., Sarkisov S. Yu. Photoconductive dipole antennas based on semiconductors with long and short charge carrier lifetimes for pulsed and cw terahertz generation and detection // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 409—410.
7. First Demonstration of Continuous Wave Terahertz Radiation from Semi-Insulating GaAs Photomixer with Nanowire / S. Al-Daffaie, O. Yilmazoglu, A. Jumaah, F. Küppers // 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2018. 2 p. URL: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510294 (date of access: 27.02.2022).
8. Auston D. H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon // Appl. Phys. Lett. 1975. Vol. 26. P. 101–103.

Информация об авторах

Березная Светлана Александровна, ведущий технолог Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Кобцев Даниил Александрович, аспирант Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Саркисов Сергей Юрьевич, к. ф-м. н., старший научный сотрудник Томского государственного университета, г. Томск, Российская Федерация.

Information about the authors

Svetlana A. Bereznaya, leading technologist, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Daniil A. Kobtsev, postgraduate student, junior researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Sergey Yu. Sarkisov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

УДК 621.37-621.39(091)

Конкуренты аудиона на рынке радиотехнологий

Пестриков В. М.

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

Получено после доработки: 24 марта 2022 г.

Отрецензировано: 30 марта 2022 г.

Принято к публикации: 30 марта 2022 г.

Аннотация: В статье исследована новаторская работа по разработке электронной лампы, проделанная немецкими радиотехниками Робертом фон Либеном, Евгением Рейсом и Зигмундом Штраусом в 1910—1914 гг. в лабораториях в Вене и Берлине. Результаты их исследований привели в Германии к разработке реле LRS, так называемой «Lieben Tube». Результаты работы этих лабораторий сравниваются с разработками по ламповым триодам американского радиотехника Ли де Фореста. Показана значимость технологии триода LRS в истории радиоэлектроники. На этом триоде был собран первый практический генератор высокочастотных колебаний.

Ключевые слова: электронная лампа, газоразрядная лампа, лаборатория Либена, Рейса и Штрауса, Lieben Tube, Ли де Форест, Реле LRS, консорциум Либена, лампа LRS Relay.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Конкуренты аудиона на рынке радиотехнологий // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 4. С. 322—352.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Конкуренты аудиона на рынке радиотехнологий / В. М. Пестриков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2021. — Т. 4, № 4. — С. 322—352.

Audion Competitors in the Radio Technology Market

V. M. Pestrikov

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

Received after completion: March 24, 2022

Peer-reviewed: March 30, 2022

Accepted: March 30, 2022

Abstract: *The article examines the pioneering work on the development of the vacuum tube, done by German radio technicians Robert von Lieben, Eugene Reis and Sigmund Strauss in 1910–1914 in laboratories in Vienna and Berlin. The results of their research led to the development of the LRS relay, the so-called “Lieben Tube”, in Germany. The results of the work of these laboratories are compared with the developments on tube triodes of the American radio engineer Lee de Forest. The significance of the LRS triode technology in the history of radio electronics is shown. The first practical high-frequency oscillator was assembled on this triode.*

Keywords: *vacuum tube, gas discharge tube, Lieben, Reis and Strauss laboratory, Lieben Tube, Lee de Forest, LRS relay, Lieben consortium, LRS Relay tube.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov “Audion Competitors in the Radio Technology Market,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 322–352, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Основные разработки усилителей электрических сигналов с использованием трехэлектродных вакуумных ламп (аудионов) проводились в США [1]. Усилительное устройство на аудионе не удавалось построить длительное время. Проблема была решена в 1911 г., когда было осознано Фрицем Левенштейном, что режим работы аудиона зависит от знака и величины электрических потенциалов на его электродах [2]. Ему первому удалось построить работающий усилитель звуковой частоты, в котором небольшое отрицательное смещение на сетку аудиона осуществлялось гальваническим элементом. К этому изобретению его, по всей видимости, подтолкнула информация о работах австрийского физика Роберта фон Либена.

В настоящей статье рассматриваются исследования Роберта фон Либена, которые сыграли заметную роль в разработке усилителя звуковой частоты на ламповом газонаполненном парамагнетитовом триоде *LRS*. Показано, что этот триод явился в некоторой степени конкурентом аудиона Ли де Фореста, но проигрывал ему в технологичности. Все это привело к доминированию аудиона в радиоустройствах и отказа от триода *LRS*.

В 1906 г. австрийский физик Роберт фон Либен (нем. *Robert von Lieben*) получил немецкий патент DE179807A на вакуумную лампу с управлением электронных потоков внешним магнитным полем. Эта первая усилительная электронная лампа предназначалась для усиления телефонных сигналов [3]. Достигнутый на тот момент этап развития технологии усиления электрических сигналов отвечал уровню вакуумной техники со всеми её достоинствами и недостатками. Вакуумный насос должен был постоянно подключен к лампе для поддержания необходимого уровня разрежения воздуха в её колбе. Несмотря на практическую направленность, лампа фон Либена оставалась устройством, представляющим только научный интерес, поскольку его невозможно было превратить в коммерческий продукт из-за сложности изготовления вогнутого катода и поддержания постоянной степени разреженности. К этому следует добавить, что кроме сложности конструкции электронно-лучевое реле представляло определённые трудности при его практическом использовании. Генерация мощного электронного пучка и его фокусировка вогнутым зеркальным катодом оставались недостаточными для удовлетворительной работы устройства. Электронно-лучевое реле имело большие габариты и работало не очень стабильно. Эти соображения побудили фон Либена и сотрудников его лаборатории использовать другие принципы при построении реле. Поэтому с 1907 г. Роберт фон Либен предпринял дальнейшие усилия, чтобы довести первую конструкцию усилительной лампы до практического внедрения в телекоммуникационные системы.

2. Особенности патентов на трехэлектродную радиолампу фон Либена

Научно-исследовательские работы Роберта фон Либена, проведенные в течение четырех лет совместно с Евгением Рейсом (*Eugen Reisz*) и Зигмундом Штраусом (*Siegmond Strauss*), позволили значительно улучшить усилитель на катодном реле. В марте 1910 г. сотрудниками «*Laboratorium Reisz und Strauss*» (*LRS*¹) был оформлен австрийский патент

¹ Сокращенно *LRS* может также быть расшифровано как *Lieben, Reisz, Strauss*.

AT48172B «Реле для переменных токов» (нем. *Relais für undulierende Ströme*), в котором по-прежнему использовались катодные лучи и, исходя из этого, он не представлял собой новацию на пути создания коммерческой усилительной лампы. Роберт фон Либен, Евгений Рейс (*Eugen Reisz*) и Зигмунд Штраус (*Siegmund Strauss*) все ещё находились в плену катодных технологий, что и привело их в научный тупик. Выход из ситуации был найден в изучении патентов Ли де Фореста на трехэлектродные аудионы с управляющим электродом. Весной 1910 г. Р. Либен сообщил в письме к специалисту по катодам доктору Ричарду Лейзеру, который ранее у него работал, что вместе с доктором Е. Рейсом и инженером З. Штраусом, он обнаружил новый метод управления электронным током, испускаемым горячим катодом с помощью металлической сетки, рис.1 [4, s. 244].

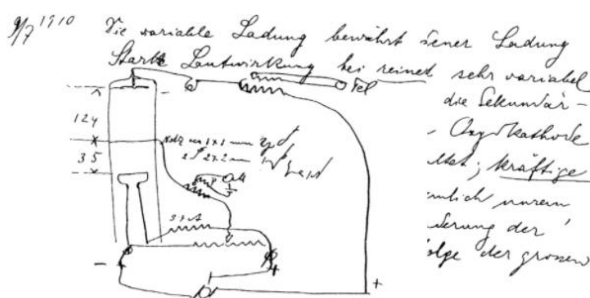


Рис. 1. Рисунок усилительной вакуумной лампы, содержащей сетку, который сделал Роберт фон Либен в лабораторном журнале. Июнь/июль 1910 г. [4, s. 244].

Fig. 1. Drawing of an amplifying vacuum tube containing a grid, which was made by Robert von Lieben in a laboratory journal. June/July 1910 [4, s. 244]

В связи с серьезными изменениями в конструкции лампы потребовалось оформление нескольких дополнительных патентных заявок. После оформления дополнительной заявки 7 декабря 1910 г. был получен патент AT54011B с тем же названием, что и патент AT48172B. Новый патент представлял собой дополнение к предыдущему и его часто называют «патентом на сетку». В патенте AT54011B предложено три конструкции ламп с управляющим электродом в виде сетки с различным типом воздействия на поток заряженных частиц, испускаемых горячим катодом: две лампы с управлением анодного тока электростатическим способом (рис. 2, Fig. 1 и Fig. 2), а также электромагнитным (рис. 2, Fig. 3) [5]. В частности, патентом AT54011B была узаконена оригинальная конструкция триода, отличающегося от конструкции Ли де Фореста.

В начале текста патента AT54011B рассматриваются принципы работы нескольких известных реле для усиления слабых переменных токов, в которых используется ртутная лампа [5]. В реле конструкции американских изобретателей Петера Хьюитта (*Peter Cooper Hewitt*) и Джона Тейлора (*John B. Taylor*) из компании GE, использовалось воздействие магнитно-

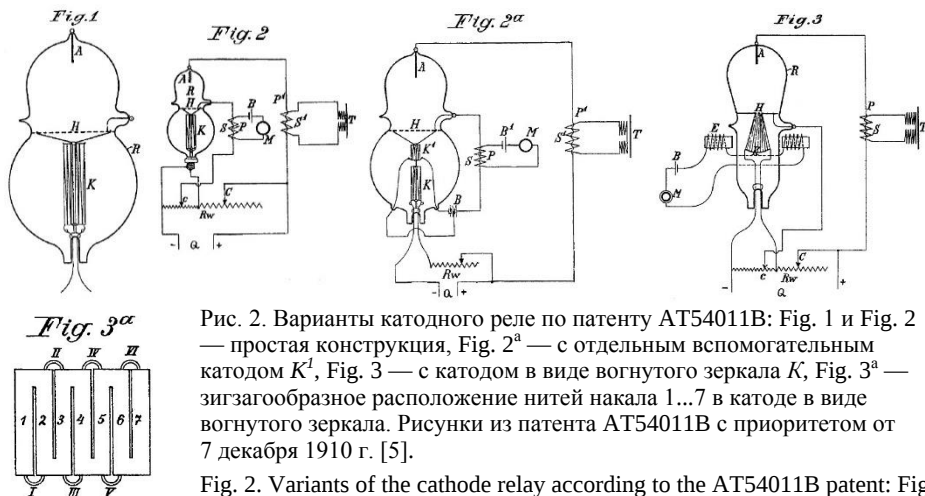


Рис. 2. Варианты катодного реле по патенту AT54011B: Fig. 1 и Fig. 2 — простая конструкция, Fig. 2^a — с отдельным вспомогательным катодом K', Fig. 3 — с катодом в виде вогнутого зеркала K, Fig. 3^a — зигзагообразное расположение нитей накала 1...7 в катode в виде вогнутого зеркала. Рисунки из патента AT54011B с приоритетом от 7 декабря 1910 г. [5].

Fig. 2. Variants of the cathode relay according to the AT54011B patent: Fig. 1 and Fig. 2 — a simple design, Fig. 2^a — with a separate auxiliary cathode K', Fig. 3 — with a cathode in the form of a concave mirror K, Fig. 3^a — a zigzag arrangement of filaments 1...7 in the cathode in the form of a concave mirror. Figures from patent AT54011B with priority dated December 7, 1910 [5]

го поля на электрическую дугу [3]. В другой конструкции реле, также сотрудника компании GE, И. Вайнтрауба², для управления электрическим током дуги в баллон ртутной лампы был введен дополнительный электрод. Устройство Вайнтрауба (рис. 3) предназначалось для работы в качестве приемника или детектора электромагнитных волн в системе беспроводного телеграфа [6]. Пришедшая на антенну 10 электромагнитная волна вызывала протекание тока во входном контуре 8-7, который создавал условия для появления искры между дополнительным электродом 5 и ртутью 4. Эта искра производила ионизацию поверхности ртути таким образом, что возникала проводимость в пространстве между анодом 6 и поверхностью ртути 4, которая способствовала зажиганию дуги с помощью электрического тока от источника 11. Свечение дуги являлось своеобразным индикатором о приеме сигнала. Дуга во время приема электромагнитных волн то зажигалась и гасла, то опять зажигалась и гасла, как только возникала искра между дополнительным электродом 5 и ртутью 4. В этом устройстве усиливаемые токи подавались на дополнительный электрод

² Езекииль Вайнтрауб (Ezechiell Weintraub, 04.07.1874—19??), российско-американский химик. Родился в Российской империи городе Могилев. В 1901 г. присоединился к исследовательской лаборатории Уиллиса Уитни (Willis Whitney) в General Electric Co., в которой занимался разработкой конструкций ртутных ламп. В 1909 г. использовал водород для восстановления галогенидов бора, чтобы получить 99 % чистый бор. Автор около 200 патентов на изобретения.

трод 5, а затем накладывались на электрический ток дуги. Таким образом получали усиление колебаний тока.

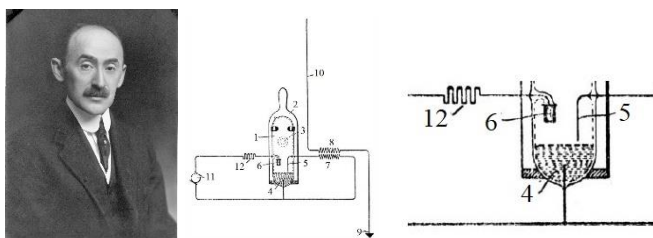


Рис. 3. Иезекииль Вайнтрауб и его приемник электромагнитных волн для системы беспроводного телеграфа [6]. 1903 г.

Fig. 3. Ezechiel Weintraub and his receiver of electromagnetic waves for the wireless telegraph system [6]. 1903

Далее в патенте [5] приводится сравнительный анализ принципов работы первой лампы Либена и аудиона де Фореста:

«Фон Либен ранее предлагал устройство, основанное на другом принципе. В газоразрядной трубке с откачанным газом (трубка Венельта) генерировался пучок катодных лучей, на который влияло электромагнитное поле токов, которые необходимо усилить, и, таким образом, он мог достигать пропорциональных изменений тока... Другой метод воздействия на электронный поток был предложен де Форестом, он разместил в газоразрядной трубке вспомогательный электрод, который изолирован от источника постоянного тока конденсатором и выполнен в виде сетки или сита. Усиливаемые токи пропускались через катод и вышеупомянутый электрод. Ионизация в разрядной трубке, которая была приблизительно пропорциональна этим токам, вызывала соответствующие изменения в токах, идущих от анода к катоду».

Авторы патента увидели недостаток конструкции лампы де Фореста в расположении её электродов. В этом случае из-за вентильного действия раскаленного катода только полуволны могут проходить между катодом и другими электродами, поэтому невозможно выделить переменные токи той же частоты и формы волны, что и усиливаемые токи. Помимо этого, могут быть преобразованы только очень слабые токи, так как при большей плотности тока вокруг вспомогательного электрода образуется побочное дугообразное замыкание, что делает невозможным любое пропорциональное усиление.

В реле, описанном в патенте АТ54011В, изменение ионизации пространства, расположенного между двумя электродами (например, с помощью катодных лучей), влияет на сопротивление цепи, подключенной к

электроду, что вызывает пропорциональные колебания для усиливаемых переменных токов.

Нужно заметить, что патент на «Реле для переменных токов» был оформлен фон Либеном и его коллегами не только в Австрии (AT54011B), но и в Германии (DE249142A), Великобритании (GB191101482A), США (US1038910A), Франции (FR13726E) и других странах. Только в австрийском и немецком патентах упоминается имя де Фореста и его аудион с сеткой. Тексты всех патентов отличаются незначительно, за исключением некоторых формулировок, в то время как формула изобретения везде одна и та же. В патентах, полученных в Австрии, Германии, Великобритании и Франции авторами изобретения указаны Либен, Рейс и Штраус. Только в патенте, полученном в США указано два автора, Либен и Рейс, а Штраус отсутствует.

В немецком патенте DE249142A чётко сформулирован предмет изобретения [7]: «Предметом настоящего изобретения является еще одно воплощение вышеупомянутого принципа, в котором на сопротивление в главной цепи воздействуют прямо, а не косвенно, с помощью ионизатора, а именно с помощью вспомогательного электрода, на который подаются токи, которые надо усилить».

Для этой цели, вспомогательный электрод имеет форму решётки или сетки. Он устроен таким образом, что полностью разделяет пространство между катодом и анодом в разрядной трубке. Этот электрод, кроме того, подключен к источнику постоянного тока таким образом, что имеет точно определенный потенциал, соответствующий желаемому усилению в каждом случае. Для установки соответствующего потенциала между электродом и источником питания необходимо подключить переменный резистор. Этим в первую очередь достигается цель, которая заключается в устранении вентильного действия раскаленного катода, поскольку усиливаемый переменный ток накладывается на постоянный ток, в результате чего он становится переменным.

Расположение сетки между катодом и анодом необходимо выбирать с учетом постоянной величины её потенциала, который вызывает образование искусственного темного пространства у катода, то есть ионов вокруг отверстий вспомогательного электрода по направлению к аноду, что приводит к увеличению сопротивления главной цепи, а отсюда к значительному повышению воздействия на неё. Это перемещение наибольшего градиента потенциала в окрестностях и отверстиях вспомогательного электрода, а также тот факт, что этот сеточный электрод полностью заполняет поперечное сечение разрядных трубок, позволяют использовать токи практически любой силы, поскольку дуговое соединение за предела-

ми сетки здесь невозможно, а создание искусственного темного пространства на катоде чрезвычайно затрудняет работу в отверстиях сетки.

Отверстия или сужения, как хорошо известно, образуют сопротивление для газового разряда, и, как обнаружили авторы изобретения, оно может быть изменено очень значительно. Для этого надо приложить постоянное (регулируемое) напряжение между катодом и сеткой. При этом сопротивление может оказаться маленьким или большим даже при очень небольшом увеличении или уменьшении разности напряжений. В этом случае усиливаемые токи влияют на сопротивление вспомогательного электрода, в результате чего токи, проходящие через катод и анод, изменяются пропорционально этому сопротивлению. Эксперименты авторов, для обеих схем ламп, приведённых в патенте, показали, что отверстия в сетке должны быть разного размера для пропорционального воспроизведения переменных токов.

Описанное выше катодное реле для переменных токов может использоваться в качестве усилителя звука, в реле в проводной и кабельной телефонии, в местном и междугороднем трафике, а также в телеграфии и телефонии, во вспомогательном устройстве для телеграфона и в устройствах связи, в фотоэлементах для передачи электрического изображения и т. д.

Формула изобретения патента AT54011B содержит 5 пунктов, приведем формулировку первого пункта, основного в этом патенте [5]: «Реле для переменных токов по патенту № 48172, в котором изменение электропроводности, вызванное ионизатором, происходит с помощью вспомогательного электрода в форме сетки или сита, отличающееся тем, что вспомогательный электрод полностью разделяет пространство между катодом и анодом, подключён к постоянному, но регулируемому напряжению, так, что создается область обеднения ионов (темное пространство катода), которое зависит от этого напряжения, в результате чего токи, которые должны усиливаться, влияют на эту область обеднения, так, что в результате изменения сопротивления усиливаемый ток претерпевает изменения, пропорциональные изменениям сопротивления».

Заметим, что в приведенном выше тексте австрийского патента AT54011B отмечается факт приоритета изобретения триода Ли де Форестом, если бы этого не было, то патент не мог бы быть выдан и дальнейшие претензии на изобретение были беспочвенными. Таким образом, авторы используют более обширные патентные притязания, чем Ли де Форест, с целью дальнейшего оправдания в получении патента. Группа фон Либен — Рейс — Штраус получила немецкий патент DE249142A только 12 июля 1912 г. В этом патенте, на самом деле, содержится совершенно

другая идея, больше относящаяся к лампе Либена (Ли де Фореста), чем к лампе *Lieben-Relais* (реле: нем. *relais*, англ. *relay*), которая имела габариты, сравнимые с ростом человека (1906 г.) [3], а её конструкция значительно отличалась от лампового реле по патенту DE48172A.

3. Конструкция трехэлектродной радиолампы LRS

Новая усилительная лампа фон Либена представляла собой стеклянный баллон высотой около 22 см, верхняя половина которого имела форму стеклянной крышки, а нижняя часть была выполнена в виде сферы. В качестве сетки триода использовался лист алюминия с отверстиями 3,5 мм в форме круга, установленный в центре баллона. Баллон делился сеткой на две части. В верхней части лампы находился анод, а в нижней — нить накала. Такое расположение сетки позволяло усиливать ее управляющее действие, так как через нее проходил весь электронный поток. Она служила также некоторой защитой для нити накала, предохраняя ее от разрушительной бомбардировки положительными ионами.

На сетку подавался входной электрический сигнал. Здесь прослеживается знакомство разработчиков с работами Ли де Фореста. При такой конструкции, как известно, отрицательный заряд на сетке уменьшал анодный ток, так как она отталкивала электроны, вылетевшие из катода, в то время как, положительный заряд его увеличивал, Fig. 1, Fig. 2, Fig. 2a на рис. 2.

В лампе анод сделан в виде спирали из алюминиевой проволоки. Катод представлял собой зигзагообразную полосу из вольфрама, покрытую слоем окиси бария для увеличения тока эмиссии. Его крепление было сделано на стеклянной ножке, подобно осветительным лампам того времени.

Из стеклянного баллона был выкачан воздух и он был наполнен парами ртути при давлении 0,001 мм рт. ст. при температуре 20 °С. Это по замыслу авторов изобретения должно было создавать дополнительную ионизацию и увеличивать тем самым анодный ток. Выбор паров ртути в качестве газового наполнителя лампы связан с их лучшей ионизируемостью или проводимостью. Ионизация увеличивается с ростом плотности рассеянного поля и, таким образом, рассеяние еще более усиливается, и небольшое изменение напряжения на сетке приводит к большим изменениям тока разряда (рис. 4) [8]. Замеченная зависимость напряжения на сетке от значений тока разряда через газ и привела к созданию газового реле, которое по своей простоте и высокой чувствительности намного превосходило все предыдущие подобные устройства.

Контроль поддержания постоянного давления паров ртути, необходимого для стабильной работы усилительной лампы, осуществлялся двумя

способами. По первому способу на стеклянный баллон с помощью гравировки, несколько выше плоскости сетки, наносилась вертикальная шкала миллиметрового типа. По шкале определялась оптимальная высота темного пространства, которое находилось под голубым ионизированным газом. Второй способ заключался в размещении лампы в специальном термостате, изготовленном по патенту DRP293460. В термостате в качестве указателя выбора оптимальных условий эксплуатации служила вертикальная шкала.

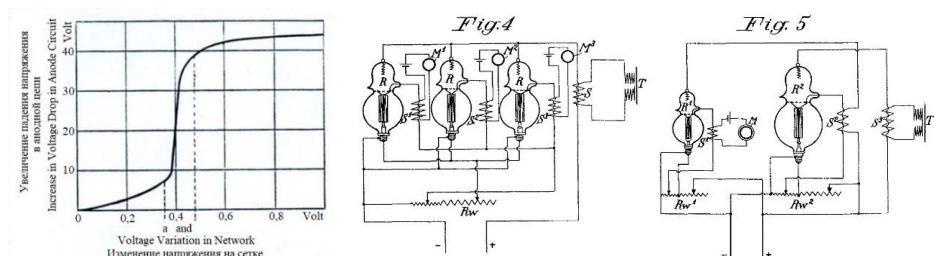


Рис. 4. Зависимость изменения анодного напряжения от напряжения на сетке лампы LRS [8].
 Варианты каскадного включения ламп LRS с целью получения большой мощности усиления звукового сигнала по патенту FR13726E (1910 г.) [9].

Fig. 4. Dependence of the change in the anode voltage on the voltage on the grid of the LRS tube [8].
 Variants of cascading switching of LRS tube, in order to obtain high power amplification of the sound signal according to patent FR13726E (1910) [9]

Во второй конструкции (лампы с электромагнитным управлением) возле катода были установлены катушки индуктивности с магнитным сердечником (рис. 2, Fig. 3), подобно тому, как это сделано в патенте Фореста (US841387A с приоритетом от 25.10.1906). Оригинальность такой конструкции лампы заключалась в том, что сетка располагалась между катодом и анодом и предназначалась для увеличения усиления лампы за счет ослабления влияния поля анода на катод. Для тех же целей это было сделано позже немецким физиком В. Шоттки, который в 1915 г. ввел вторую экранную сетку в трехэлектродную лампу.

Ламповые усилительные устройства, представленные в патенте AT54011B (рис. 2) — это еще не электронные лампы с высоким вакуумом, разработанные позже в США (в 1913 г.), а электронные усилительные лампы, для работы которых все еще нужны были электроны, генерируемые ударной ионизацией атомов ртути. В новой лампе Либена электронный поток управлялся электростатически, с помощью сетки, расположенной между катодом и анодом, при этом вакуум все еще содержал следы паров ртути. В настоящее время ламповое усилительное устройство (рис. 2, Fig. 1, Fig. 2) известно как, трехэлектродная лампа конструкции

Либена — Рейса — Штрауса или сокращенно триод *LRS*. Впечатляют технические характеристики триода *LRS*: длина 22 см; диаметр 8,5—10,5 см; коэффициент усиления 3,5—4; срок службы около 400 часов.

Во французском патента FR13726E [9] показано несколько вариантов получения большого усиления от лампы *LRS*, в частности, за счет увеличения напряжения в её главной цепи и путем параллельного или последовательного соединения нескольких газоразрядных трубок, рис. 4 Fig. 4.

Другой способ повышения усиления лампы показан на рис. 4 Fig. 4. В этом варианте используется предварительный каскад усиления на лампе R^1 , с которого усиленные электрические колебания передаются на сетку лампы R^2 выходного каскада мощности.

К концу 1910 г. конструкция усилительной лампы *LRS* была значительно усовершенствована и оставалось только найти заинтересованные в её производстве компании.

4. Создание консорциума

При поддержке профессора Вальтера Нернста 3 августа 1911 г. Роберт фон Либен устроил демонстрацию первого лампового усилителя звуковой частоты на триоде *LRS* перед представителями немецкой промышленности в Институте физической химии в Берлинском университете (нем. *Institut für Physikalische Chemie der Universität Berlin*), расположенном на Доротиенштрассе (нем. *Dorotheenstrasse*) в Берлине. На демонстрации присутствовали представители *Siemens & Halske AG*, *Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (AEG)*³, *Felten & Guillaume Carlswerk AG*, *Gesellschaft für drahtlose Telegraphie GmbH u. Telefunken* [10].

Проведение презентации лучше всего можно описать словами Штрауса [11]:

«Для этой демонстрации мы сделали два дорожных чемодана. Первый чемодан (рис. 5), содержал с обеих сторон две трубки Либена, каждая с железоводородным балластным резистором. Он был устроен так, чтобы лампы могли быть включены в цепь с помощью многополюсного переключателя. Таким образом можно было подвести ток от микрофона непосредственно к головному телефону или путем переключения через обе усилительные лампы последовательно с громкоговорителем, имеющим деревянный рупор от фонографа.

³ AEG (нем. *Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft*, англ. *General Electric Company*, рус. Всеобщая электрическая компания — немецкая компания, специализировавшаяся в области электроэнергетики и машиностроения. В 1903 г. вместе с *Siemens & Halske* основали компанию *Gesellschaft für drahtlose Telegraphie System Telefunken* (хорошо известную как *Telefunken*).

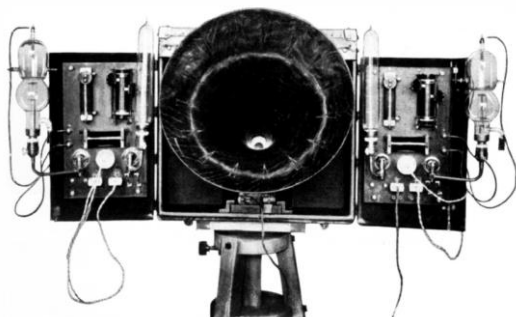


Рис. 5. Ламповый усилитель Либена в «дорожном чемодане» во время демонстрации в Берлине [4, s. 253]. Роберт фон Либен и Анна Шиндлер (1911 г.).

Fig. 5. Lieben tube amplifier in a "travel suitcase" during a demonstration in Berlin [4, s.253]. Robert von Lieben and Anny Schindler (1911)

Во втором чемодане мы установили ящик сопротивлений и коробку рядом с источником питания для микрофона. Таким образом мы могли бы пошагово переключать блок сопротивлений и постепенно уменьшать ток микрофона от нормальной громкости до почти неслышимой. Но с помощью многополюсного переключателя эти неслышимые голосовые сигналы усиливались через две лампы. Затем вдруг речь послышалась с полной ясностью, так громко, что ее поняли в последнем ряду большой аудитории Института физической химии. Демонстрация произвела потрясающее впечатление. Все присутствующие были поражены, можно даже сказать, что они были вне себя!»

Благодаря проведенной демонстрации усилительным ламповым устройством заинтересовались немецкие радиотехнические и электротехнические фирмы.

21 октября 1911 г. Либен женился на дочери венского купца актрисе Анне Шиндлер (*Anna Schindler*), внучке местного австрийского поэта Юлиуса фон дер Трауна (*Julius von der Traun*), который также некоторое время работал в Бургтеатре⁴ (нем. *Burgtheater*), рис. 5. Штраус писал по этому поводу [6]: «Он нашел красивую жену, когда взошел на пик своей жизни и добился успеха в своей работе, как только она появлялась в известном Бургтеатре в Вене».

⁴ Бургтеатр находится в самом центре Вены, по соседству с дворцовым комплексом Хофбург. Этот старейший драматический театр Австрии был учрежден в 1748 году и изначально назывался «Королевский театр при дворце». Современный театральный зал вмещает 1340 зрителей. Сцену от зала отделяет тяжелый железный занавес весом около 16 тонн. Такая система способна в случае непредвиденной ситуации отделить сцену от зрительного зала меньше, чем за полминуты.

В 1912 г. лабораторные испытания лампы Либена показали, что она имеет технические параметры, которые удовлетворяют требованиям практического её использования. Роберт фон Либен сначала хотел передать свое изобретение небольшой компании для коммерческого использования, но профессор Нернст не советовал это делать и рекомендовал обратиться к владельцам крупной промышленности.

В феврале 1912 г. Нернст пригласил г-на Эмиля Ратенау⁵, Вильгельма фон Сименса⁶ и близкого друга графа Арко⁷ в Институт физической химии Берлинского университета, который в то время находился под руководством Нернста, чтобы ознакомить их с изобретением Роберта фон Либена. В этом случае было продемонстрировано усилительное устройство с громкоговорителем, показанное на рис. 5.

Во время демонстрации микрофон находился в отдельной комнате и был соединен проводами со звуковым усилителем Либена, установленным в большом лекционном зале института. Обычный разговор и пение воспроизводились настолько громко, что его было слышно во всем зале. Поразительно, что речь, временами сильно ослабленная входными резисторами, могла быть снова слышна на том же уровне громкости без искажений после переключений регулятора громкости при включенном усилителе. Граф Арко вспоминал об этой демонстрации [12]: «При посредничестве профессора Нернста нам показали усилитель на катодной лампе Роберта фон Либена, предназначенный для усиления звуковых частот в телефонных линиях. Нам сразу стало ясно, что лампа должна быть намного более надежной и эффективной для таких целей, чем только что представленная конструкция».

Вскоре, 12 февраля 1912 г., было подписано соглашение между присутствовавшими на презентации 3 августа 1911 г. компаниями о создании консорциума, получившего название «Консорциум Либена» (*Lieben consortium*). Соглашение предусматривало передачу прав, принадлежавших физiku Роберту фон Либену, на изобретенную им усилительную лампу по немецкому патенту DRP249142 созданному консорциуму.

⁵ Эмиль Мориц Ратенау (нем. *Emil Moritz Rathenau*, 11.12.1838—20.06.1915) — немецкий предприниматель и машиностроитель. Основатель компании AEG. Считается первым предпринимателем-менеджером, который с самого начала завоевывал новые перспективные рынки на основе приобретаемых патентов, рисковал и применял агрессивные сбытовые стратегии.

⁶ Карл Вильгельм Сименс (нем. *Carl Wilhelm Siemens*, 04.04.1823—19.11.1883) — немецкий предприниматель. Член Лондонского королевского общества. Связал две области, в которых он вел исследования — металлургическую и электрическую.

⁷ Георг фон Арко (нем. *Georg Wilhelm Alexander Hans Graf von Arco*, 30.08.1869—05.05.1940) — немецкий радиотехник и электротехник, один из основателей, инженер и технический директор «Telefunken».

Роберт фон Либен продал консорциуму свои патенты за 100000 рейхсмарок. Согласно договору, эти патенты позволялось использовать только в европейских странах.

Консорциум Либена также согласился выделить финансы на дальнейшие необходимые исследования и разработки прототипа, а также связанные с ним схемы, предоставленные венской группой Либена. Соглашение было заключено в пропорции 45 % : 45 % : 10 % (*AEG-Telefunken* : *Siemens und Halske* : *Guilleaume Karlwerk AG*).

Альянс компаний, вошедших в консорциум, был высоко оценен и поддержан правительством Германской империи, так как это позволяло ей занять более прочные позиции среди ведущих мировых держав. Продвижение науки и промышленности имело решающее значение в получении политического, экономического и военного превосходства.

Компании, входившие в консорциум, имели свои определенные интересы в дальнейшем совершенствовании и использовании триода *LRS*.

Siemens & Halske была в основном заинтересована в разработке электронных усилителей звуковых сигналов. К этому моменту времени у нее был опыт эксплуатации механических телефонных реле, а также задел в научных исследованиях собственной физико-химической лаборатории, аналога лаборатории *General Electric*, по материалам для нитей накала электрических ламп. Это позволило компании сосредоточиться на разработке конструкции катодов вакуумных триодов с использованием материалов типа тантал и вольфрам. Разработчики знали, что технология создания высокого вакуума в баллоне триода гораздо сложнее, чем у ламп накаливания. Исходя из этого, они пошли по пути максимально возможного повышения коэффициента усиления триода *LRS* за счет эффектов ионизации.

Компания *AEG* только недавно начала конкурировать с *Siemens & Halske* на рынке техники телефонной проводной связи. И поэтому она была в первую очередь заинтересована в разработке телефонных усилителей на триодах *LRS*, чтобы отказаться от технологии пупинизации кабелей, патентными правами на которую владела *Siemens & Halske*. Техническим совершенствованием триода *LRS* должна была заниматься, в основном, ее дочерняя компания *Telefunken*.

С другой стороны, интересы компании *Telefunken* лежали в области беспроводной телеграфии, и ей был необходим хороший высокочастотный усилитель. До этого компания провела испытания клапанов Флеминга и некоторых устройств Ли де Фореста, но решила от них отказаться из-за их нестабильной работы и недолговечности. Компания, тем не менее, занялась усовершенствованием триода *LRS*, рассматривая его в качестве

альтернативы построения многокаскадных электронных высокочастотных усилителей, чтобы избежать покупки патентов де Фореста.

5. Производство триодов *LRS Relay*

Разработка реле *LRS* (*Liebenröhre*) для промышленного производства производилась в Берлине в двух местах. С одной стороны, на кабельной фабрике *AEG* в Оберспрее (нем. *Kabelwerk Oberspree*). Недалеко от Берлина компании *Felten & Guillaume* и *Telefunken* основали лабораторию, которую возглавил Евгений Рейс. Штраус остался в венской лаборатории, чтобы поддерживать тесную связь с фон Либеном, который из-за болезни был прикован к постели. С другой стороны, *Siemens & Halske* начала свою работу в собственной *Pupin Laboratorium*.

AEG до начала производства реле *LRS* (*Liebenröhre*) несколько видоизменила её конструкцию и получила на новый вариант лампы патент DE264554A «Газоразрядная лампа с накаливаемым катодом и закрытым пароотводящим корпусом» (нем. *Entladungsröhre mit glühender Kathode und eingeschlossenem, dampfpflieferndem Körper*) от 15 октября 1912 г. Эта лампа со временем стала известна как *LRS Relay* или *LRS Repeater*, рис. 6. Главное отличие лампы *LRS Relay* от *LRS* (*Liebenröhre*) в том, что ней все выводы от анода, сетки и нити накала сделаны на цоколь, в то время как в прототипе у анода был отдельный вывод в верхней части стеклянного баллона лампы. Другая её особенность была отмечена в формуле изобретения [13]: «Разрядная лампа с накаливаемым катодом и закрытым пароотводящим корпусом, отличающаяся тем, что все подводящие провода к различным электродам вплавлены в общей точке на стеклянной стенке, нагретой током разряда или катодом, во избежание поверхностной конденсации пара».

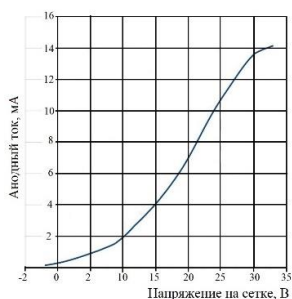


Рис. 6. Анодно-сеточная характеристика лампы *LRS Relay Groß* (1913 г.), снятая с коллекционного образца в 2018 году [14].

Fig. 6. Anode-grid characteristic of the *LRS Relay Groß* tube (1913), taken from a collection sample in 2018 [14]

В 1912 г., 1 марта, компания *AEG* начала подготовку к серийному производству триодов *LRS Relay*, но потребовалось ещё несколько месяцев, прежде чем была изготовлена первая серия ламп. Фактическое же производство ламп *LRS Relay* было запущено осенью того же года. Всего было произведено около 3000 ламп *LRS Relay*. В табл. 1 приведены основные технические параметры лампы *LRS Relay*, а на рис. 6 — анодно-сеточная характеристика лампы *LRS Relay Groß* (1913 г.), снятая с коллекционного образца в 2018 г. [14]. Кривая на рис. 6 снята при следующих условиях: температура в помещении 22 °С, напряжение на аноде 250 В, сопротивление нагрузки анодной цепи 10 кОм, сопротивление нити накала 5,6 кОм, напряжение питания нити накала 30—32 В.

Табл. 1. Основные технические параметры триодной радиолампы *LRS Relay* с содержанием паров ртути

Table 1. Main technical parameters of *LRS Relay* triode radio tube containing mercury vapor

Параметр	Значение параметра
Производитель:	<i>AEG</i> (Германия)
Материал нити накала	платиновая лента, оксидное покрытие <i>BaO</i> и <i>CaO</i>
Напряжение накала (постоянное)	30 В
Ток накала (постоянный)	2 А
Напряжение анода (постоянное)	200 В
Ток анода (постоянный)	10—11 мА
Давление паров ртути	≈0,01 мм рт. ст.
Коэффициент усиления	≈33
Рабочая температура	15—30 °С
Время работы (срок службы)	1000—3000 часов
Габариты	≈ длина 300 мм, диаметр 100 мм

Анодно-сеточная характеристика лампы *LRS Relay Groß* (рис. 6) может быть использована практически только для этой лампы, так как разброс параметров у ламп этого типа очень большой, и они чувствительны к изменениям температуры окружающей среды. Помимо этого, важную роль играет качество ртутных паров.

Через некоторое время электронные усилители на триодах *LRS Relay* (рис. 7) производства *AEG*, предназначенные для проводной телефонии, были установлены на Императорском почтамте Берлина. Компания *Telefunken* рекламировала эти устройства как «универсальные усилители», у которых главным компонентом была электронная лампа *LRS Relay*. Триоды, выпускавшиеся компаниями *AEG* и *S & H*, имели некоторые отличия.

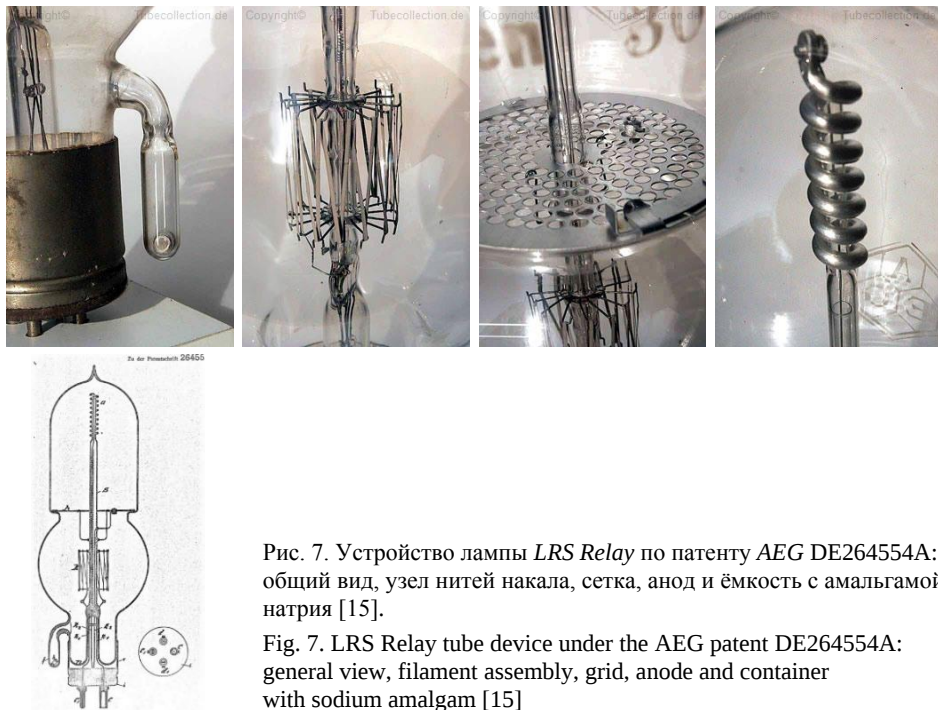


Рис. 7. Устройство лампы *LRS Relay* по патенту AEG DE264554A: общий вид, узел нитей накала, сетка, анод и ёмкость с амальгамой натрия [15].

Fig. 7. LRS Relay tube device under the AEG patent DE264554A: general view, filament assembly, grid, anode and container with sodium amalgam [15]

Компания *Siemens*, независимо от *AEG*, под руководством профессора Марчелло Пирани⁸ (*Marcello Stefano Pirani*, 01.07.1880—11.01.1968) усовершенствовала лампу Либена — Рейса — Штраусса. Эта лампа отличалась от модели *AEG* только конструкцией цоколя и большими габаритами. Обе лампы работали с положительным смещением на сетке, рис. 8. Наилучшее усиление триода достигалось тогда, когда синие ионизированные пары ртути находились над сеткой на высоте около 1,59 дюймов (около 4 см). Для лучшего визуального контроля процесса усиления в лампе на отдельных их сериях были выгравированы на стеклянной колбе миллиметровые шкалы над сеткой.

Иногда в рабочем состоянии лампы для улучшения ее работы приходилось поднимать давление паров ртути внутри стеклянной колбы. Для этого нагревалась амальгама натрия (сплав натрия с ртутью), которая находилась в стеклянном отростке в нижней части колбы.

⁸ М. Пирани был с 1904 по 1915 гг. главным инженером компании *Siemens & Halske AG* в Берлине. В 1906 г. изобрел устройство для измерения давления в вакуумных системах (вакуумметр Пирани). Работа вакуумметра Пирани основана на том, что коэффициент теплопроводности убывает с уменьшением давления, а сопротивление металлов прямо пропорционально температуре.

В поздних моделях ламп *LRS Relay* сетки стали изготавливать из проволоки вместо перфорированной алюминиевой пластины. Лампы с сеткой из листового металла носили название «усилитель мощности» (нем. *Kraftverstärker*). Оба варианта ламп *LRS Relay* были выпущены в уменьшенной версии и имели высоту около 195 мм, что несколько меньше прототипа.

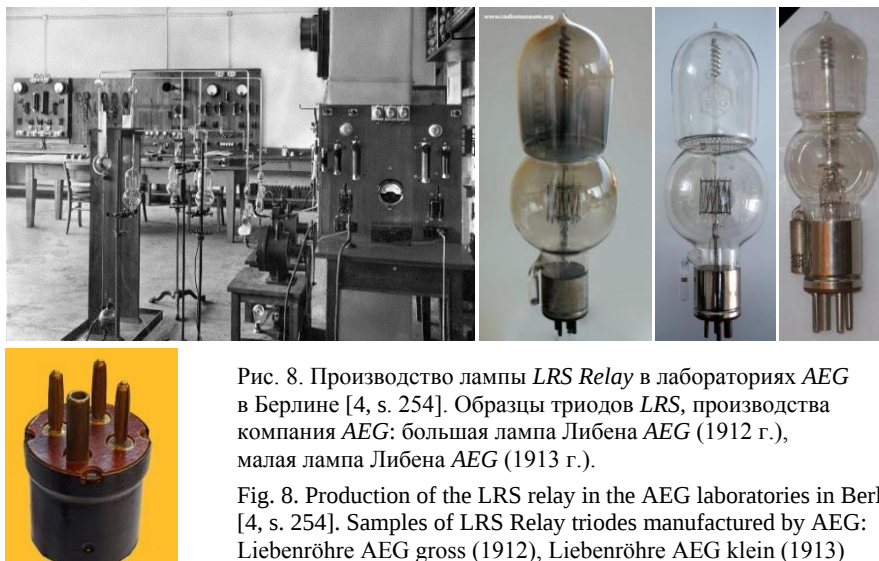


Рис. 8. Производство лампы *LRS Relay* в лабораториях AEG в Берлине [4, s. 254]. Образцы триодов *LRS*, производства компания AEG: большая лампа Либена AEG (1912 г.), малая лампа Либена AEG (1913 г.).

Fig. 8. Production of the LRS relay in the AEG laboratories in Berlin [4, s. 254]. Samples of LRS Relay triodes manufactured by AEG: Liebenröhre AEG gross (1912), Liebenröhre AEG klein (1913)

В апреле 1912 г. произошло крушение океанского лайнера «Титаник», которое имело далеко идущие последствия для политики в области телекоммуникаций. В июне 1912 г. в Лондоне открылась Третья Международная радиотелеграфная конференция, которая положила конец монополии *Marconi Company*, введя принцип взаимосвязанности между радиотелеграфами. На этой конференции *Telefunken* смог продемонстрировать свое новое радиотехническое оборудование, в частности, усилители на лампе *LRS Relay*, разработанные AEG. Лампы привлекли всеобщее внимание участников своей эффектной расцветкой, темно-красным свечением катода и небесно-голубым свечением паров ртути, а также своим дизайном, позволяющим использовать их в качестве украшения стола. Немецкие усилительные лампы произвели впечатление на представителей *Marconi Company*, которая отставала в этой области. Через несколько месяцев *Marconi Co.* и *Telefunken* подписали соглашение о совместной разработке ламп и оборудования. Сотрудник *Marconi Co.* капитан Раунд должен был сосредоточиться на разработке приемных ламп, а *Telefunken* — на разработке передающих ламп. Заключенным соглашением компании также уре-

гулировали судебные тяжбы по патентным правам между ними во всех странах, кроме США. Это соглашение просуществовало недолго из-за начала Первой мировой войны [16].

Через два года после свадьбы в груди Либена была обнаружена опухоль, и, несмотря на оперативное лечение рентгеновскими лучами, 20 февраля 1913 г. он скончался. Роберту фон Либену, как выдающемуся ученому и человеку, посвятили некрологи такие известные личности того времени, как Гуго фон Хофмансталь⁹ (нем. *Hugo von Hofmannsthal*), Вальтер Нернст (нем. *Walter Nernst*) и Альберт Эйнштейн (нем. *Albert Einstein*).

6. Применение триодов *LRS Relay* в радиоаппаратуре

В *AEG Werk Oberspree* в Берлине Евгений Рейс и Александр Мейснер вскоре разработали схемы, подходящие для практического применения лампы *LRS Relay* в двухсторонних телефонных ретрансляторах.

С 1913 г. *LRS Relay* выпускалась компанией *Osgam*, которая являлась дочерней компанией *Siemens Corporation*, а позже производством этой лампы занималась компания *TeKaDe*, дочерняя компания *Felten & Guillaume Karlwerk*.

Когда США вступили в Первую мировую войну, они захватили немецкий пароход *Vaterland*¹⁰ (рис. 9) и обнаружили на нем беспроводное оборудование с высокочастотными усилителями и гетеродинными генераторами на лампах *LRS Relay*.

В 1913 г. компания *Telefunken* смогла установить радиоприемники на триодах *LRS Relay* на радиостанциях *Nauen* (Германия) и *Sayville*, находившейся на атлантическом побережье США. Приемники были построены по схеме с обратной связью, что позволяло осуществлять прием слабых сигналов, которые передавались из США через Атлантику, с хорошей слышимостью.

Во время Первой мировой войны лампы *LRS Relay* успешно использовались немецкими сухопутными войсками в проводной телефонной связи, а также в качестве усилителей для перехвата информации с наземной

⁹ Гуго фон Гофмансталь — австрийский писатель, поэт, драматург, выразитель идей декадентства в австрийской литературе конца XIX века — начала XX века.

¹⁰ Океанский лайнер «*Vaterland*» отправилась в свой первый рейс из Куксхафена - Нью-Йорк 14 мая 1914 года. В тот период времени он был самым большим в мире кораблем. 6 апреля 1917 года лайнер «*Vaterland*» стоял на рейде в Нью-Йорке, когда США объявили войну Германии. Совет по судопроизводству Соединенных Штатов захватил лайнер «*Vaterland*» и превратил его в военный корабль под именем «*Leviathan*». «*Leviathan*» совершил девятнадцать переходов между Америкой и Европой во время Первой мировой войны. В 1917 году в американских портах было захвачено около 30 других немецких кораблей, которые были использованы в войне против Германии.

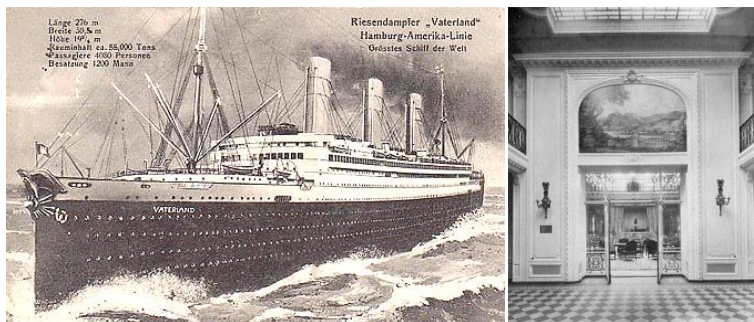


Рис. 9. Океанский лайнер *Vaterland*, на котором была установлена радиоаппаратура на лампах *LRS Relay*. Вход в *Grand Salon*. 1914 г.

Fig. 9. Ocean liner “Vaterland” on which radio equipment was installed on LRS Relay tubes. Entrance to the Grand Salon. 1914

телеграфии. Устройства на лампах *LRS Relay* с 1913 г. в течение нескольких лет войны позволяли успешно вести переговоры между штабами немецкой армии на западе Германии в Кобленце¹¹ (нем. *Koblenz, Coblenz*) и на востоке в Мариенбурге¹² (нем. *Marienburg*), что составляло примерно 920 км. Это участок связи являлся важным стратегическим звеном в управлении войсками Германии. В сентябре 1914 г. телефонный ретранслятор, использующий лампу фон Либена, обеспечил хороший прием на расстоянии 1200 км на линии, соединявшей штаб-квартиру вооруженных сил германской империи (*German Imperial HQ, Headquarters*) и Восточную Пруссию. На рис.10 представлена принципиальная схемы: усилителя звуковой частоты на лампе *LRS Relay* и детекторного приемника с каскадом усиления по радиочастоте [17]. Усилитель радиочастоты собран на триоде *LRS Relay*.

AEG продолжала производить лампы *LRS Relay* для использования в гражданских и военных телефонных сетях почти до конца первой мировой войны. С появлением триодов с высоким вакуумом компания *Telefunken* в 1914 г. произвела замену ламп *LRS Relay* новыми электронными вакуумными устройствами. То же сделала и компания *Siemens* в 1916 г.

¹¹ В центре города Кобленц стоит колонна из черного камня, которую воздвигли в 1812 г., когда Наполеон пошел войной на Россию. Над чашей из белого мрамора есть надпись на французском языке: «Год 1812. Мемориал в честь похода против русских. Префект Жюль Дозан». Через полтора года, когда русские войска освободили город от французов, колонну предлагали снести. Однако начальник гарнизона города русский генерал французского происхождения Сен-При распорядился иначе. Ниже на постаменте появилась ироничная надпись (также на французском): «Осмотрел, одобрил. Русский комендант города Кобленца. 1 января 1814 г.»

¹² Немецкий город Мариенбург после 1945 г. отошел к Польше и получил название Мальборк. Расположен на севере Польши в дельте Вислы (на протоке Ногат), в 80 км от границы с Калининградской областью России.

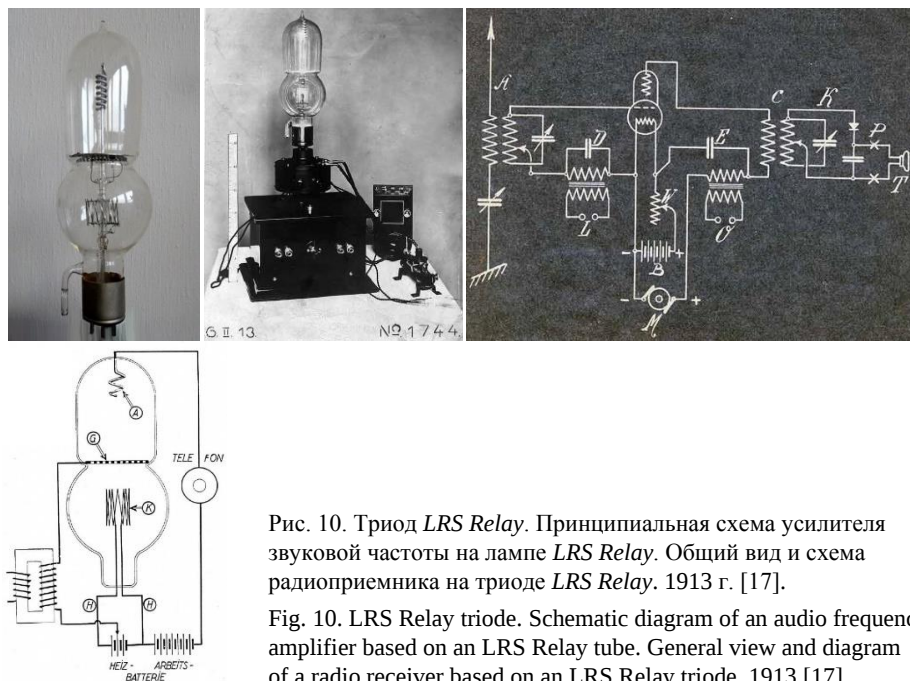


Рис. 10. Триод *LRS Relay*. Принципиальная схема усилителя звуковой частоты на лампе *LRS Relay*. Общий вид и схема радиоприемника на триоде *LRS Relay*. 1913 г. [17].

Fig. 10. LRS Relay triode. Schematic diagram of an audio frequency amplifier based on an LRS Relay tube. General view and diagram of a radio receiver based on an LRS Relay triode. 1913 [17]

Производство ламп *LRS* компанией *Siemens* на заводах *Osram* было прекращено в 1920 г. Переход от наполненных газом триодов к вакуумным электронным лампам был также связан с нестабильностью работы ламп *LRS Relay*, которая зависела от изменения температурных условий эксплуатации.

7. Попытка маркетингового хода за океаном

В начале 1913 г., всего через год после образования Консорциума, Рейс и Штраус прибыли в Нью-Йорк для встречи с представителями компании AT&T, с предложением продажи патентных прав на лампу *LRS Relay* [16, p.60]. По прибытии они получили телеграмму о смерти фон Либена. Предположительно, миссия проводилась от имени или с ведома членов Консорциума. Эта поездка может показаться необычной, учитывая близкие отношения между *Siemens* и *General Electric*, которая также разрабатывала электронные лампы, кроме того, *Reichspost* и все другие телефонные компании крупных стран находились в тесном контакте и, вероятно, обменивались патентами.

Рейс и Штраус, продвигая в США лампу *LRS Relay*, не имели информации о том прогрессе, который произошел в совершенствовании аудиона Ли де Фореста в последние два года. Главным было то, что де Форест провел демонстрацию своего аудиона 30—31 октября 1912 г. для *Western Electric* и *AT&T*, и в июле 1913 г. *AT&T* приобрела некоторые патентные права у де Фореста и начала дорабатывать аудион до коммерческого продукта. При этом инженеры *Western Electric* и *AT&T* имели представление о лампе *LRS Relay*. Лаборатория *Western Electric* впервые услышала о ней из статьи, опубликованной в августе 1912 г. и полученной ими 10 сентября. Они сразу же обратились к менеджеру завода *Bell Telephone Manufacturing Co.* в Антверпене с просьбой получить и переслать копии трех соответствующих патентов.

AT&T перед приездом Рейса и Штрауса уже определилась с выбором конструкции усилительной лампы и поэтому они были приняты в рамках визита вежливости¹³. Немецкие инженеры посчитали, что их приняли претенциозно, и были очень разочарованы тем, что не смогли продать все патентные права и технологию *LRS*. Их образцы ламп *LRS Relay* хранились в *Western Electric* в течение шести недель и были тестированы без разрешения авторов. Это позволило *AT&T* оценить предлагаемую лампу *LRS Relay* и сравнить её с аудионом де Фореста.

Состоявшиеся патентные переговоры между Е. Рейсом и З. Штраусом, с одной стороны, и Н. Арнольдом и его группой из *AT&T*, с другой, в феврале/марте 1913 г., в ходе которых была продемонстрирована трубка Либена, не привели, как писал Зигмунд Штраус, к положительным результатам. По-видимому, эти переговоры необходимы были, в частности, для *Western Electric* и *AT&T* для того, чтобы ориентироваться в контексте исследований *LRS Relay*. Рейс и Штраус чувствовали, что их патентные претензии на сетку в усилительной лампе будут невыполненными. Они не подозревали, что *AT&T* уже в то время проводила переговоры с де Форестом. Есть свидетельства того, что в последующие годы между патентными претензиями де Фореста и *LRS Relay* на сетку в усилительной лампе происходили юридические конфликты. По крайней мере, в Германии они были урегулированы в пользу фон Либена.

8. Письмо Ли де Фореста в редакцию журнала *Die Naturwissenschaften*

В январе 1914 г. в немецком журнале «Природные науки» (нем. *Die Naturwissenschaften*) была опубликована статья доктора Фрица Шульца

¹³ Визит вежливости (протокольный визит) — это как бы ответ на встречу гостя при его приезде.

(нем. *Fritz von Schulze*) под названием «Расширение телефонных границ через реле Либена и Рейса» (нем. *Die Erweiterung der Fernsprech-grenzen durch das Relais von Lieben und Reiß*) [18]. Статья представляла собой обзор технических решений по осуществлению телефонной связи на большие расстояния. В ней рассматривались вопросы увеличения телефонного трафика на большие расстояния за счет увеличения диаметра проводов, реле Брауна, ртутных дуговых ламп, но главное внимание было уделено возможностям использования усилителей на лампах Либена. Представленные в ней все разработки лаборатории Либена с 1906 по 1913 гг., по существу, повторяли статью Рейса [8].

В статье трехэлектродная лампа Ли де Фореста представлена как газоразрядная лампа со вспомогательным электродом, при этом главный упор делался на её недостатках. Перечисленные автором недостатки лампы Фореста представляли собой пункты из патентов Либена AT54011B [5] и DE249142A [7], а также из статьи [8].

Ли де Форест увидел в статье Фрица Шульца неправильно расставленные акценты в приоритете изобретения трехэлектродной лампы с управляющим электродом в виде сетки и 8 июня 1914 г. написал по этому поводу письмо в редакцию журнала *Die Naturwissenschaften* [19]. Он отметил, что устройство Либена и Рейса в его нынешней и практической форме ничем не отличается от формы, запатентованной им в Соединенных Штатах в 1907 г. (патент US841387).

Далее отметим основные замечания де Фореста. При этом он пишет: «Несомненно, я был первым, кто показал сетку или промежуточный электрод в откачанном детекторе с горячей нитью в качестве электрода, и получил широкое одобрение патентных претензий как в Германии в 1908 г., так и в Соединенных Штатах, на эту ключевую особенность. Все замечательные свойства основаны на этом сеточном электроде и двух независимых цепях (одна для сетки и одна для анода), которые делают аудион детектором, усилителем тока и генератором, и он в любой форме обладает бесспорным превосходством над другими формами детекторов и механических реле».

Далее де Форест указывает на то, что автор публикации (Ф. Шульц), по-видимому, совершенно не понимает, что происходит в аудионном усилителе и приводит цитату из статьи: «Метод (де Фореста) имел недостаток, заключающийся в том, что в результате эффекта клапана катод нагревается, чтобы уменьшить внутреннее сопротивление разрядной трубки до тех пор, пока она не загорится красным, только полуволны могут проходить между катодом и другими электродами, поэтому невозможно выделить переменные токи той же частоты и формы волны, что и токи, кото-

рые необходимо усилить. Кроме того, можно использовать только очень слабые токи... Я бы списал это совершенно ошибочное заявление на полное незнание того, что происходит в аудионе, если бы ваш автор позже правильно не описал эффект в трубке Либена в своем эссе, которое содержит в точности три основных элемента моего изобретения и использует их в практически идентичных схемах».

В конце письма де Форест подчеркивает, что правда: «реле было изобретено для телефонной связи», но оно было изобретено и запатентовано за много лет до того, как началась работа Либена и Рейса.

9. Ответ Фрица Шульца на письмо Ли де Фореста

23 июня 1914 г. Фриц Шульц ответил на замечания Ли де Фореста. Его ответное письмо написано в виде 5 пунктов [20]:

1. Г-н де Форест цитирует предложение из моего эссе, объявляет его полностью ошибочным, но не говорит о том, что он считает неправильным.

2. По мнению г-на де Фореста, реле Либена — Рейса в своей нынешней практической реализации ничем не отличается от *Audion*. В качестве доказательства он цитирует американский патент № 841387. Следует отметить существенные фундаментальные различия между двумя устройствами, которые также влияют на режим работы и чувствительность.

Audion работает со свободными электронами, испускаемыми светящейся вольфрамовой проволокой, т. е. с катодными лучами; реле Либена — Рейса, с другой стороны, имеет световой разряд, то есть движение частиц газа или пара в замкнутом пространстве, вызванное ударной ионизацией. Эти два устройства также отличаются друг от друга своими катодами, соотношением потенциалов и количеством выделяемой энергии — особенностями, которые настолько ясны и очевидны для любого эксперта, что они не должны были ускользать от мистера де Фореста.

3. Г-н де Форест подчеркивает, что его аудион усиливает токи значительно ниже предела слышимости без искажений, и что он может использовать каскадные соединения, в которых 10-кратное, 60-кратное 500-кратное усиление достигается на одном-трех уровнях. Само по себе это не является преимуществом перед реле Либена — Рейса, оно также усиливает токи намного ниже предела слышимости, также можно включать несколько реле каскадом, только вы получите значительно большее усиление, потому что у вас получается примерно 30-кратное усиление на каждом каскаде. Однако г-н де Форест забывает упомянуть, что усиление его реле значительно уменьшается, если кто-то хочет усилить токи, которые не ослабляются или ослабляются; в этом отношении реле Либена — Рейса

значительно превосходит аудион, поскольку он способен поглощать гораздо больше энергии, что г-н де Форест всегда называет недостатком.

4. Г-н де Форест заявляет, что он обходится без большей формы и, следовательно, без большего усиления звука в пользу удобства. Я заявляю здесь, что увеличение газового пространства во время прослушивания не увеличивает усиление. Мистер де Форест, вероятно, сможет добиться более высокого энергопотребления на один аудион с более крупными габаритами, но он не может при этом увеличить относительно низкий коэффициент усиления 10. С другой стороны, реле Либена — Рейса может иметь точно такие же размеры, что и аудион, но и без малейшего уменьшения размера, получить коэффициент усиления 30.

5. В конце своего письма г-н де Форест говорит, что его реле было изобретено и запатентовано за годы до того, как началась работа Либена и Рейса. Это не соответствует общеизвестным фактам. Г-н де Форест подал заявку на патент на свое реле 25 октября 1906 г. (американский патент № 841 387), а г-н фон Либен — его *DRP* № 179 807 от 4 марта 1906 г. В последней публикации впервые было описано электронно-лучевое реле. Мне совершенно необъяснимо, как господин де Форест может претендовать на приоритет в этой ситуации.

В конце ответа Фриц Шульц пишет: «Оценивая факты по делу, общественность может придерживаться только того, что им было передано, то есть в данном случае существующей литературы, и из этого следует, что г-н де Форест не был первым в рассматриваемой области».

10. Использование лампы *LRS Relay* в телефонии

Весной 1913 г. в Берлине, вскоре после ранней смерти Роберта фон Либена, Е. Рейс устроил презентацию триода *LRS Relay* перед широкой национальной и международной аудиторией. В то время считалось, что лампу Либена можно будет использовать только как усилитель голоса. На рис. 11 представлен телефонный усилитель типа *Telefunken* EV72 на лампе *LRS Relay* производства *Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft* (AEG) [21]. Устройство усиливало сигнал в 20—25 раз при напряжении на аноде 220 В и напряжении нити накала 32 В. В комплект этого усилителя, изготовленного в 1913 г., входило: блок питания, лампа *LRS Relay*, высокочастотный адаптер, блок предохранителей и кабели.

Однако крупным компаниям требовался ламповый аппарат для телефонных линий. Такой аппарат с учетом специфики и условий эксплуатации телефонных сетей должен обладать высокой стабильностью работы. Проблему не удалось решить в короткие сроки из-за температурной неста-

бильности в работе лампы *LRS Relay*, причиной которой явилась зависимость давления паров ртути от внешней температуры. Лишь в августе 1914 г., после изобретения термостата для этой лампы, получилось осуществить задуманное и получить на него патент DE293460 рис.12 [22]. Согласно изобретению, необходимо было лампу установить в термостат, после чего автоматически обеспечивалось поддержание её температуры за счет охлаждающего эффекта воздушного потока. После этого лампа *LRS Relay* стала относительно стабильным устройством, пригодным для практического использования в качестве телефонного усилителя.

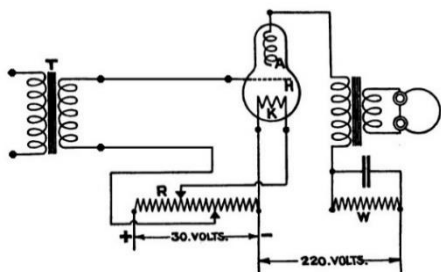


Рис. 11. Телефонный усилитель *Telefunken* EV72: принципиальная схема, общий вид лампы *LRS Relay* на фоне современных радиоламп, общий вид усилителя (1913 г.) и монтаж усилителя.

Fig. 11. Telephone amplifier *Telefunken* EV72: schematic diagram, general view of the *LRS Relay* tube against the background of modern radio tubes, general view of the amplifier (1913) and installation of the amplifier

На рис.12 представлена разработанная Е. Рейсом схема ретранслятора для повышения громкости речи между двумя удаленными абонентами [8, р. 726]. Ретранслятор устанавливался не на абонентской станции, а на АТС.

Евгением Рейсом было предложено дуплексное телефонное устройство на лампе *LRS Relay* (рис. 12 [8, р. 728]). Если сопротивления двух линий равны, то взаимоиндуктивный эффект токовых цепей реле невозможен. Если линии на обеих сторонах реле достаточно длинные, то есть если их показатели затухания превышают единицу, то сопротивления добавляемых линий не обязательно должны быть одинакового значения. По этой причине даже кажущееся сопротивление абонентского оборудования в случае длинных линий не влияет на работу реле.

Было обнаружено, что с помощью этого дуплексного устройства (рис. 12) можно добиться хорошей передачи звука по обычным проводам, даже если они обладают разными характеристиками. Усиление, произведенное вставкой реле в телефонную линию, соответствовало уменьшению показателя затухания βl от 2 до 2,4.

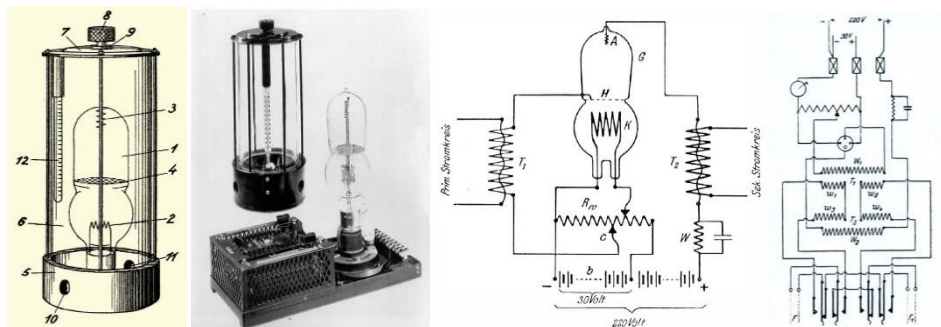


Рис. 12. Общий вид термостата для лампы *LRS Relay* (патент DE293460).

Принципиальная схема ретранслятора телефонной линии.

Принципиальная схема дуплексного телефонного устройства.

Fig. 12. General view of the thermostat for the *LRS Relay* tube (patent DE293460).

Schematic diagram of a telephone line repeater. Schematic diagram of a duplex telephone device

Нужно отметить, что, хотя и были разработаны схемные решения устройств телефонной трансляции (англ. *repeater*), но они остались только на бумаге и не были внедрены в реальные телефонные линии. В то время как высоковакуумные лампы уже производились в США, и было удивительно, что даже представители ведущих компаний — по крайней мере, тогда — так мало знали о подобных разработках на этих лампах в других странах.

11. Дальнейшие разработки на основе технологии *Lieben Tube*

В Германии высоковакуумные лампы начали использовать позже, чем в США. Немецкие ученые считали, что для хорошей работы трубки необходимо определенное давление газа. Летом 1914 г. компания *Telefunken* под руководством Ганса Рукопа (*Hans Rukop*, 27.02.1883—03.08.1958) начала интенсивные исследования по разработке «жесткого» триода (лампы с высоким вакуумом). Несмотря на это сотрудники лаборатории *Lieben Consortium* Евгений Рейс и Александр Мейснер продолжали разработки радиоустройств с использованием технологии *Lieben Tube* и с учётом их оригинальности получать соответствующие патенты на изобретения как в Германии, так и за рубежом.

В 1913 г. AEG произвела экспериментальный двойной триод на лампах Либена (нем. *Lieben-Zweifachröhre*), рис. 13 [23]. Лампа *Lieben-Zweifachröhre* не пошла в серийное производство, но с ней были проведены различные эксперименты.

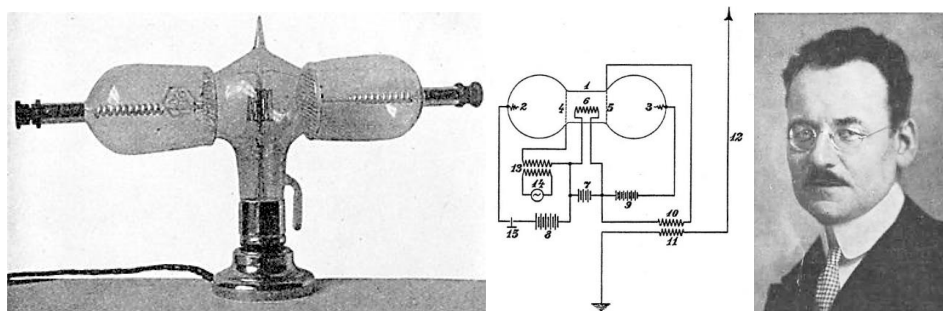


Рис. 13. Общий вид двойного триода Либена производства AEG (1913 г.).
 Принципиальная схема радиоприемника по патенту А. Мейснера DE334675A
 (приоритет от 23 апреля 1914 г.) Александр Мейснер (1929 г.).

Fig. 13. General view of the Lieben double triode manufactured by AEG (1913).
 Schematic diagram of a radio receiver according to A. Meissner's patent DE334675A
 (priority dated April 23, 1914) Alexander Meissner (1929)

В 1914 г. А. Мейснер разработал и запатентовал гетеродинный радиоприёмник на лампе *Lieben-Zweifachröhre* [24]. Другие названия этого типа радиоприемника: гомодин, синхродин, приемник нулевого или прямого преобразования. Принципиальная схема приемника Мейснера приведена на рис. 10. Она содержит два каскада на триоде типа Либена. Радиосигнал, принятый антенной 12, приходит на первый каскад (триод, правая половина лампы), где происходит его усиление. После усиления радиосигнал подается на второй триод, где он смешивается с сигналом внешнего генератора 14 (гетеродин), в результате возникают биения f_{36} , т. е. колебания с частотой $f_{36} = f_c - f_c$ (f_c — частота принимаемого сигнала, f_c — частота гетеродина). Биения имеют звуковую частоту, которая может быть прослушана на головные телефоны (15). Формула изобретения в немецком патенте содержит три пункта, в её первом пункте особенность приемника отмечена следующим образом [24]:

«1. Приемное устройство для беспроводной телеграфии, отличающееся тем, что на электронно-лучевое реле воздействуют с помощью переменного тока, генерируемого в точке приема, таким образом, что захваченная высокочастотная энергия одновременно преобразуется и усиливается».

А. Мейснер получил патент на гетеродинный радиоприёмник (рис. 10) не только Германии, но ещё и в США. В формуле этого изобретения содержится всего два пункта [25]:

«1. В радиоприёмной схеме источник переменного тока звуковой частоты, термоэмиссионная лампа (англ. *thermionic tube*), имеющая два анода и две сетки, средство для наложения принятых колебаний на одну из сеток и средство для наложения колебаний звуковой частоты на другую сетку.

2. Способ работы радиоприёмной схемы, содержащей термоэмиссионную лампу, имеющую два анода и две сетки, который включает в себя наложение на одну сетку принимаемых высокочастотных колебаний и наложение на другую сетку колебаний звуковой частоты».

В формуле изобретения американского патента, в отличие от немецкого, отмечена особенность конструкции лампы, используемой в радиоприемнике.

12. Заключение

Газонаполненный параами ртуты триод *LRS* был изобретен через четыре года после аудиона, в 1910 г. Это был прорыв немецких технологий в области электронных усилителей, который имел целью обойти патенты Ли де Фореста и отказаться от их покупки. Трехэлектродные вакуумные лампы *LRS* конструкции фон Либена всего несколько лет использовались в телефонных проводных системах и беспроводной телеграфии, в основном Германии, а также некоторых других странах, в том числе России. Триод *LRS* и конструкции на его основе оставили заметный след в истории радиоэлектроники. Первый практический генератор высокочастотных колебаний был собран на этом триоде и на его схемное решение получен патент.

Невзирая на это конструкция трехэлектродного аудиона Ли де Фореста оказалась более технологичная и перспективная. Радиолампа американского изобретателя стала элементной базой первой «электронной революции».

В первой немецкой высоковакуумной лампе использовались технологии, изобретённые по этому направлению в США, другими словами, в ней не использовались разработки, сделанные сотрудниками *LRS*. Однако разработки сотрудников *LRS* все же принесли свою пользу. *Telefunken*, как компания-разработчик и маркетинговая компания консорциума, смогла противостоять важным патентным искам против США и, таким образом, полностью доминировать на немецком рынке. Де Форест не смог заплатить за свои немецкие патенты и подал заявку только на детектор (*Audion*), а не на усиление, упомянутое в тексте его патента.

Несмотря на то, что в дальнейшем предпочтения были отданы лампам с высоким вакуумом, производство *LRS*-ламп в компании *TeKaDe* продолжалось с перерывами до 1920 г., после чего было прекращено.

Список литературы

1. Пестриков В. М. Развитие однокаскадных аудионных технологий и патентные разбирательства // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 3. С. 218—274.
2. Пестриков В. М. Изобретение электронного лампового усилителя звуковой частоты // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 4. С. 433—455.
3. Пестриков В. М. Применение катодно-лучевых технологий для усиления электрических сигналов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 2. С. 360—383.
4. Skowronnek K. Zur Entwicklung der Elektronenverstärker-Röhre (Lieben-Röhre). In : Archiv für geschichte der mathematik, der naturwissenschaften und der technik. Februar 1931. Band 13. Heft 3/4. Neue Folge IV. S. 225—276.
5. Lieben von R., Reisz E., Strauss S. Relais für undulierende Ströme. Zusatzpatent zum Patente Nr. 48172. Patente AT54011B Angemeldet am 7. Dezember 1910. Beginn der Patentdauer : 1. Februar 1912. Längste mögliche Dauer : 30. November 1925.
6. Weintraub E. Vapor electric apparatus. Patent US925060. Patented June 15, 1909. Application filed December 21, 1903.
7. Lieben von R., Reisz E. und Strauss S. Relais für undulierende Ströme. Zusatz zum Patent 236716 vom 4. September 1910. Patentschrift DE249142. Patentiert im Deutschen Reiche vom 20. Dezember 1910 ab. Längste Dauer : 3. September 1925.
8. Reisz E. A new method of magnifying electric currents // The Electrician. February 6, 1914. Vol. LXXI, No. 18. P. 726.
9. Lieben von R., Reisz E., Strauss S. Relais pour courants ondulatoires. Brevet principal pris le 20 janvier 1911. Brevet FR13726. Demandée le 20 janvier 1911. Délivrée le 3 avril 1911. — Publiée le 17 juin 1911. (Demande de brevet déposée en Autriche le 7 décembre 1910. Déclaration des déposants).
10. Pichler F. Elektronen zur Signalverstärkung : Die Pionierarbeiten im Laboratorium “Lieben–Reisz–Strauss” in Wien 1905–1913 // e&i elektrotechnik und informationstechnik. Mai 2004. Heft 5. S.180–186.
11. Strauss S. Aus der Geschichte der Lieben Röhre (On the History of the Lieben Tube), Der Radioamateur. Vienna : ERB Verlag, Mar. 1938. S. 125–128.
12. Arco von G. Wege und Werden. 25 Jahre Telefunken. Festschrift der Telefunken-Gesellschaft 1903–1928. Berlin : Telefunken AG, 1928. S. 39.
13. Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin. Entladungsröhre mit glühender Kathode und eingeschlossenem, dampflieferndem Körper. Patentschrift DE264554A. Patentiert im Deutschen Reiche vom 15. Oktober 1912 ab.
14. PaSos Virtuelles Röhrenmuseum – Kennlinie der Liebenröhre mit der Seriennummer “Ss 990” und Bilder der Röhre im Betrieb. URL: <https://patric-sokoll.de/R%C3%B6hrenmuseum/Kennlinie%20Liebenr%C3%B6hre/Kennlinie%20Liebenr%C3%B6hre.html>. (date of access: 28.08.2021).
15. Tube Collection Udo Radtke. Germany. Robert von Lieben. Liebenröhre. URL: https://www.tubecollection.de/ura/von_lieben.htm. (date of access: 28.08.2021).

16. Thomas H., Briggs I. The triode that predated de Forest: Robert von Lieben and the LRS relay // The Awa Review. 1990. Vol. V. P. 45–61.
17. Jung E. Lieben-Röhre – Versuche vom Jahr 1913. Web Site “Radio Museum”. URL: http://www.radiomuseum.org/forum/lieben_roehre_versuche_vom_jahr_1913.html?language_id=5. (date of access: 28.08.2021).
18. Schulze F. Die Erweiterung der Fernsprech-grenzen durch das Relais von Lieben und Reiß // Die Naturwissenschaften. 2. Januar 1914. Heft 1. S. 7–14.
19. De Forest, L. Das Gasrelais von Lieben und Reiß // Die Naturwissenschaften. 1914. Vol. 2, Iss 29. S. 716.
20. Schulze F. Erwiderung auf das Vorstehende // Die Naturwissenschaften. 1914. Vol. 2. Iss 29. S. 716–717.
21. Stanley R. Text Book on Wireless Telegraphy. London : Longman’s, Green and Co., 1914. P. 297–299.
22. Gesellschaft für drahtlose telegraphie M. B. H. in Berlin. Anordnung für Kathodenstrahlröhren, die als Verstärkungsrelais wirken. Patentschrift DE293460. Patentiert im Deutschen Reiche vom 23 August 1914 ab.
23. Schmidt H.-T. Die Liebenröhre. LUR: <http://www.hts-homepage.de/Lieben/Lieben.html>. (date of access: 28.08.2021).
24. Gesellschaft für drahtlose Telegraphie m. b. H. in Berlin. Empfangsanordnung für drahtlose Telegraphie. Patentschrift DE332581. Patentiert im Deutschen Reiche vom 10. April 1914 ab.
25. Meissner A. Receiving arrangement for wireless telegraphy. Patent US1454328. Application, filed September 3, 1921. Patented May 8, 1923.

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.