

Севастопольский государственный университет

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infocommunications
and Radio Technologies

2021
Том 4
№ 3

2021
Vol. 4
No. 3

Sevastopol

Почетный главный редактор

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

Главный редактор

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Международный редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

Подписано к печати 17.12.2021

Формат 64×90/16. Усл. печ. л. 7,20. Уч.-изд. л. 7,1. Тираж 200 экз.

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

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

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

Отпечатано в типогр. Printex

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

Honorary Chief Editor

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

Editor in Chief

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

International Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

Address:

Sevastopol State University

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

E-mail: icrt.mail@gmail.com

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

Содержание — Contents

Физические науки (1.3) — Physical sciences

- M. V. Davidovich, G. N. Kolesov, and K. A. Sayapin**, Surface Plasmons and Diffraction of Plane Waves in Metallic Films and Graphene Structures
Давидович М. В., Колесов Г. Н., Саяпин К. А. Поверхностные плазмоны и дифракция плоских волн в металлических пленках и графеновых структурах 167

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

- Колосов С. В., Шатилова О. О.** Возможные варианты высокоорбитных giro-ЛБВ
S. V. Kolosov and O. O. Shatilova, Possible variants of high-orbit Gyro-TWT 183
- Синицын Е. А., Фридман Л. Б.** Пеленгация воздушных судов путем оценки частоты Доплера принимаемых радиосигналов
E. A. Sinitsyn and L. B. Friedman, Aircraft Direction Finding by Estimating the Doppler Frequency of Received Radio Signals 194
- Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И.** Моделирование волноводного полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS
I. B. Shirokov, P. A. Evdokimov, and E. I. Shirokova, Modeling of a Waveguide Bandpass Filter in the ANSYS HFSS Software Package 209

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

- Пестриков В. М.** Развитие однокаскадных аудионных технологий и патентные разбирательства
V. M. Pestrikov, Development of Single-Stage Audion Technology and Patent Litigation 218

Surface Plasmons and Diffraction of Plane Waves in Metallic Films and Graphene Structures

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 27, 2021

Peer-reviewed: September 16, 2021

Accepted: September 16, 2021

Abstract: *We consider the electric and magnetic surface plasmons in the structures with dielectric and metallic layers, or graphene sheets. The conditions of existence of backward and forward waves and the slow and fast plasmon-polaritons are obtained. We also consider the plasmons and plane wave diffraction for the layer of hyperbolic metamaterial.*

Keywords: *diffraction, metallic film, graphene, plasmons, hyperbolic metamaterial.*

For citation (IEEE): M. Davidovich, G. Kolesov, and K. Sayapin, “Surface Plasmons and Diffraction of Plane Waves in Metallic Films and Graphene Structures”, *Infocommunications and Radio Technologies*, 2021, vol. 4, no. 3, pp. 167–182.

УДК 547.022.1/4

Поверхностные плазмоны и дифракция плоских волн в металлических пленках и графеновых структурах

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

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

Получено: 27 апреля 2021 г.

Отрецензировано: 16 сентября 2021 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2021 г.

Аннотация: Рассмотрены электрические и магнитные поверхностные плазмоны в структурах с диэлектрическими и металлическими слоями или листами графена. Получены условия существования обратной и прямой волн, медленных и быстрых плазмон-поляритонов. Рассмотрены также плазмоны и дифракция плоских волн для слоя гиперболического метаматериала.

Ключевые слова: дифракция, металлическая пленка, графен, плазмоны, гиперболический метаматериал.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Давидович М. В., Колесов Г. Н., Саяпин К. А. Поверхностные плазмоны и дифракция плоских волн в металлических пленках и графеновых структурах // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 3. С. 167—182.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Давидович, М. В. Поверхностные плазмоны и дифракция плоских волн в металлических пленках и графеновых структурах / М. В. Давидович, Г. Н. Колесов, К. А. Саяпин // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2021. — Т. 4, № 3. — С. 167—182.

1. Introduction

The slow surface plasmons in metallic films and along metallic surfaces are usually considered without dissipation, so the dielectric constant of metal is real and negative. In this paper we consider the symmetric lossy plane-layered structures with metallic and dielectric layers and two-dimensional conductive films or two-dimensional electron gas with tensor conductivity. We use as example the graphene conductivity tensor, and for metallic layers we use the Drude-Lorentz model. We also introduce the surface conductivity for thin metallic and dielectric films. The goals of this paper are to get the conditions for existence of

forward and backward waves, to get the conditions for existence of fast and low surface plasmons (SPs) and to determine the connection of dispersion equation (DE) or SP existence with the plane wave diffraction without reflection.

2. Problem Statement

The forward and backward plasmons are possible in symmetrical structures without dissipation [1–3]. As in [1–3] the dissipation is not considered, here we show, that there are also in dissipative structures. If the phase and energy movement directions are matched, the plasmon is forward, but if the other case – backward. We take dielectric permittivity (DP) of metal in the form $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_L - \omega_p^2 / (\omega^2 - i\omega\omega_c)$, $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_L - \omega_p^2 / (\omega^2 - i\omega\omega_c)$, where interband transitions and the polarization of the lattice are taken into account in ε_L . We will continue to assume this value is real, characteristically up to optical frequencies. Then the metal model without dissipation corresponds to the zero frequency of collisions $\omega_c = 0$. The backward surface plasmon (SP) in this case corresponds to the anomalous negative dispersion. In the case $\omega_c \neq 0$ it is impossible to classify backward surface plasmon (BSP) by anomalous negative dispersion or negative group velocity (GV). In this case, the SP character (backward or forward) is determined by the direction of the Pointing vector relative to the movement of phase. We consider the DP ε_d as real, i.e. we not take into account the dispersion and therefore dissipation. There are the ratios: $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k_0^2 \varepsilon(\omega)$ in metal and $k_x^2 + k_y^2 + \tilde{k}_z^2 = k_0^2 \varepsilon_d$ in dielectric for the finite along the y -axis structures. If there is vacuum instead dielectric, that $\varepsilon_d = 1$, and we denote. We also consider the symmetric on y functions based on the type $\cos(k_y y)$ and use the decompositions

$$\begin{pmatrix} E_x(x, y, z) \\ H_x(x, y, z) \end{pmatrix} = A_{[e,m]}^{(e,h)} \exp(-ik_x x) \cos(k_y y) \begin{bmatrix} \sin(k_z z) \\ \cos(k_z z) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

The upper index “e” corresponds to E-SP (TM-waves), for which $H_x = 0$. The Superscript “h” corresponds to H-SP (TE-waves), for which $H_x = 0$. Subscript “e” corresponds to an electric wall at the center $E_x = 0$, i.e., the taking of the sine in (1). Subscript “m” corresponds to the magnetic wall, i.e. taking the cosine. For example, the amplitude A_m^e corresponds to even function E_x of z . Further, we use the value $k_y = \pi / w$. In the case $w \rightarrow \infty$ the relations are accurate, and the structure of the plane-layered. With a large but finite width we get some approximation working better than more w/t . Strictly, these structures can be

analyzed by the method of integral equations defined on the cross section, using the metal decomposition of type (1) for functions with different $k_{yn} = (2n-1)\pi/w$ and $k_{zn} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon - k_x^2 - k_{yn}^2}$. For completeness we should add the functions with $k_{zn} = (2n-1)\pi/t$ and $k_{yn} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon - k_x^2 - k_{zn}^2}$. We consider that $k_x = k'_x - ik''_x$. In dissipative structures the SP forward if $k'_x k''_x > 0$, and backward t , if $k'_x k''_x < 0$. We introduce normalized to the impedance of the vacuum $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ wave impedance $\rho^e = k_z/(k_0 \varepsilon)$ for the E-SP and $\rho^h = k_0/k_z$ for H-SP in the metal. For dielectric we do the substitution $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_d$ and denote impedances $\tilde{\rho}^e, \tilde{\rho}^h$. For vacuum we do the substitution $\varepsilon \rightarrow 1$ and denote ρ_0^e, ρ_0^h . The propagation constants also denoted by the symbols e and h . For SP with an electric wall in the center the normalized input impedance at the border of the metal film 1 is $\rho_{in}^{(e,h)}(t/2) = i\rho^{(e,h)} \tan(k_z t/2)$, therefore, the dispersion equations (DEs) are $\rho_0^{(e,h)} = i\rho^{(e,h)} \tan(k_z t/2)$ and correspond to even components (with respect to z -components) and odd with respect to one z -component. Typically, these SPs are classified as the even with respect to the transverse component E_z, H_y , and are called symmetric [1]. For SPs with magnetic wall in the center of the metal film 1 the normalized input impedances at the border are $\rho_{in}^{(e,h)}(t/2) = -i\rho^{(e,h)} / \tan(k_z t/2)$, and the are DEs $\rho_0^{(e,h)} = -i\rho^{(e,h)} / \tan(k_z t/2)$. This DEs are called antisymmetric. For structure 2 the input impedance $\rho_{in}^{(e,h)}(t/2)$ should be transformed to the thickness of the dielectric:

$$\rho_0^{(e,h)} = \rho_{in}^{(e,h)}(d+t/2) = \tilde{\rho}^{(e,h)} \frac{\rho^{(e,h)} [i \tan(k_z t/2)]^{\pm 1} + i \tilde{\rho}^{(e,h)} \tan(\tilde{k}_z d)}{\tilde{\rho}^{(e,h)} + i \rho^{(e,h)} [i \tan(k_z t/2)]^{\pm 1} \tan(\tilde{k}_z d)}. \quad (2)$$

The DEs (2) describe the odd (the sign “+”) and even (“-”) SPs. Des for structure 4 are obtained from (2) by substitutions of the parameters of metal on the dielectric parameters and vice versa. The DEs for hollow waveguide 3 without dielectric are resulted from the conditions $\rho^{(e,h)} = \rho_0^{(e,h)} [i \tan(k_{0z} t/2)]^{\pm 1}$. It is very interesting if there are the dielectric films on the wide walls of the waveguide 3. This case corresponds to DE (2) in which one must change the properties of a metal and vacuum. Let us denote the input impedance of all structures on the last partition of boundaries as $\rho_{in}^{(e,h)}$. If boundary is bordered by vacuum, the DE can be written as

$$k_x^{(e,h)} = k_0 \sqrt{1 - [\rho_{in}^{(e,h)}]^{\pm 2}} \quad (3)$$

The upper sign in (3) corresponds to E-SP and lower – to H-SP. If the boundary is bordered with metal, then

$$k_x^e = k_0 \sqrt{1 - [\varepsilon(\omega) \rho_{in}^e]^2}, \quad k_x^h = k_0 \sqrt{1 - [\rho_{in}^h]^2}. \quad (4)$$

Denoting $\rho_{in}^{(e,h)} = \rho' + i\rho''$, we see from (3) that that in the dissipative structures ($\rho' > 0$) the E-SP is forward if the input impedance is inductive ($\rho'' > 0$), and it is

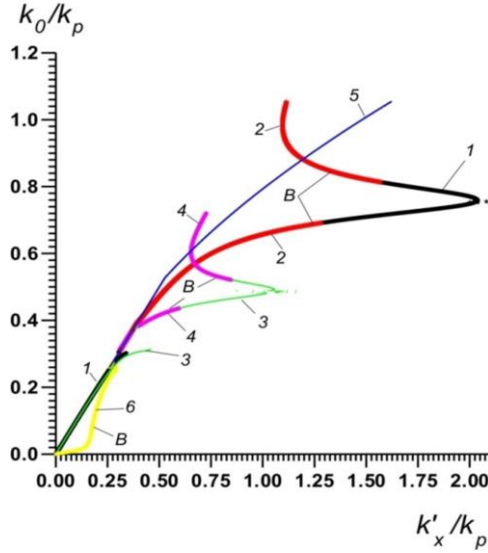


Fig. 1. Forward (curves 1, 3, 5) and backward (symbol B, curves 2, 4, 6) plasmon-polariton branches for electric antisymmetric (1, 2, 3, 4) and symmetric magnetic (5, 6) of the plasmons in the layer of 50 nm (1, 2), 100 nm (3, 4) and 10 nm (5, 6).

Рис. 1. Прямая (кривые 1, 3, 5) и обратная (символ В, кривые 2, 4, 6) плазмон-поляритонные ветви для электрических антисимметричных (1, 2, 3, 4) и симметричных магнитных (5, 6) плазмонов в слое 50 нм (1, 2), 100 нм (3, 4) и 10 нм (5, 6)

backward, if the impedance is capacitive ($\rho'' < 0$). Since the input impedance depends on the square of the wave number (3), the following inequality must be preserved for this type of E-SP. It is convenient to take the positive direction in the direction of the movement phase, i. e. $k_x^{(e,h)} > 0$. Then for forward E-SP $\rho'' > 0$ at $k_x^{(e,h)} > 0$, and for backward one $\rho'' < 0$ at $k_x^{(e,h)} < 0$. For H-SP (3) and the second of the relations (4) we see that H-SP is direct when $\rho'' < 0$ and backward when $\rho'' > 0$, because the impedances in they DEs are replaced by admittances. Indeed, for E-SP we input complex number $z = 1 - \rho'^2 + \rho''^2 - 2i\rho'\rho''$, which stands under the sign of the square root. The branch of root specified by condi-

tion $\text{Re}(\sqrt{z}) > 0$ yields the above conditions. For the first equation (4) we have

$$z = \left[1 - (\rho' \varepsilon' + \rho'' \varepsilon'')^2 + (\varepsilon' \rho'' - \rho' \varepsilon'') \right] - 2i(\rho' \varepsilon' + \rho'' \varepsilon'')(\varepsilon' \rho'' - \rho' \varepsilon'').$$

Here $\varepsilon' < 0$, $\varepsilon'' > 0$, $\rho' > 0$. Obviously, SP is forward, if $\text{Im}(z) < 0$, and backward if $\text{Im}(z) > 0$. Because $\varepsilon' \rho'' - \rho' \varepsilon'' < 0$, for a backward SP it is required $\rho' \varepsilon' + \rho'' \varepsilon'' > 0$, or $\rho'' / \rho' > |\varepsilon'| / \varepsilon''$. Let consider the simplest case of E-SP along the dielectric waveguide with metal plates. Here $\rho = \rho_{in}^e = \tilde{k}_z^e (\varepsilon_d k_0)^{-1} \left[i \tan(\tilde{k}_z^e t / 2) \right]^{\pm 1}$. We write $\tilde{k}_z^e t / 2 = i\tilde{\theta} = it \sqrt{(k_x^e)^2 - k_0^2 \varepsilon_d} / 2$ and consider the SP as slow, i. e. $k_x^e > k_0 \sqrt{\varepsilon_d}$, while the loss is small: $\tilde{\theta} = \tilde{\theta}' - i\tilde{\theta}''$, $\tilde{\theta}'' \ll \tilde{\theta}'$. Then in the odd case

$$\rho'' / \rho' = \frac{\tilde{\theta}' \sin(2\tilde{\theta}') - \tilde{\theta}'' \sinh(2\tilde{\theta}'')}{\tilde{\theta}' \sinh(2\tilde{\theta}') + \tilde{\theta}'' \sin(2\tilde{\theta}'')} \approx \frac{\tilde{\theta}' \sin(2\tilde{\theta}')}{(\tilde{\theta}' + \sin(2\tilde{\theta}')) \tilde{\theta}''}.$$

This condition is satisfied for the slow SP near the plasmon resonance at the frequency $\omega_s = \omega_p / \sqrt{\varepsilon_L + 1}$, for which the ratio $|\varepsilon'| / \varepsilon''$ is not very large, because at $\omega \approx \omega_s$ we have

$$\frac{|\varepsilon'|}{\varepsilon''} = \frac{\omega_p \omega_c (\varepsilon_L + 1)^{3/2}}{\omega_p^2 + \omega_c^2 (\varepsilon_L + 1)} \approx \frac{\omega_c (\varepsilon_L + 1)^{3/2}}{\omega_p}.$$

The typical values are $\varepsilon_L \sim 10 - 20$, $\omega_c / \omega_p \sim 10^{-2} - 10^{-3}$. In the even case

$$\frac{\rho''}{\rho'} = \frac{\tilde{\theta}' \sin(2\tilde{\theta}') + \tilde{\theta}'' \sinh(2\tilde{\theta}'')}{\tilde{\theta}' \sinh(2\tilde{\theta}') - \tilde{\theta}'' \sin(2\tilde{\theta}'')} \approx \frac{-\tilde{\theta}' \sin(2\tilde{\theta}')}{(\tilde{\theta}' - \sin(2\tilde{\theta}')) \tilde{\theta}''},$$

therefore, the inequality cannot be.

3. Results

Consider the DE for the metal strip waveguide. We have the DEs:

$$k_{ex}^e = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon^2 - \varepsilon \tanh^2(\theta)}{\varepsilon^2 - \tanh^2(\theta)}}, \quad k_{mx}^e = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon^2 \tanh^2(\theta) - \varepsilon}{\varepsilon^2 \tanh^2(\theta) - 1}}, \quad (5)$$

$$k_{ex}^h = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon - \tanh^2(\theta)}{1 - \tanh^2(\theta)}}, \quad k_{mx}^h = k_0 \sqrt{\frac{1 - \varepsilon \tanh^2(\theta)}{1 - \tanh^2(\theta)}}. \quad (6)$$

Here θ is following from the same formula, but with DP of metal. In the absence of dissipation we have $\varepsilon < 0$, and SP k_{mx}^e is infinitely slow at the frequency where $\varepsilon^2 \tanh^2(\theta) = 1$, i. e. at $\omega = \omega_{sm} < \omega_p / \sqrt{\varepsilon_L + 1}$. This frequency decreases with decreasing t . In pursuit of this frequency from below always

$\varepsilon^2 > \tanh^2(\theta)$. Above this frequency there is the forbidden band of bandgap. Behind her in the field $0 < \varepsilon < 1$ the polariton fast: $k_{ex}^e \approx k_0 \sqrt{\varepsilon} [1 - \varepsilon(1 - \varepsilon)/(2 \tanh^2(\theta))]$, and near the frequency of the plasmon resonance $\omega \approx \omega_s$ we have $k_{ex}^e \approx k_0 \sqrt{\varepsilon} = k_0 \sqrt{\omega_p^2 / \omega^2 - \varepsilon_L}$. SP is weak slow at low frequencies, where $k_{ex}^e < k_{mx}^e$. A strong slowdown beginning to emerge near the frequency $\omega_s = \omega_p / \sqrt{\varepsilon_L + 1}$ where $\tanh^2(\theta) = \varepsilon^2 = 1$. At the approach to it from below the dispersion is normal and performed $\varepsilon^2 > \tanh^2(\theta)$. It's made in the case $\omega > \omega_s$, but the dispersion is anomalous: the retardation decrease with the increase in frequency. Higher it the dispersion becomes anomalous and negative. At the frequency $\omega_p / \sqrt{\varepsilon_L - 1}$, where $\varepsilon = 1$, the polariton becomes fast. If you are not getting comprehensive, $\tilde{n}$ becomes leaky, there are radiation losses. At the condition $\omega > \omega_p / \sqrt{\varepsilon_L - 1}$ the term $\tanh^2(\theta)$ is complex, the polariton becomes leaky, and the losses arise. In the point ω_s the dispersion curve is not differentiable. Consideration of losses leads to its differentiability, the slowdown in the neighborhood of frequencies ω_s is finite, and GV goes through infinity and changes the sign. This is also the case for k_{mx}^e lower ω_s , and in the bandgap the propagation occurs for k_{mx}^e with anomalous negative dispersion. Polariton k_{ex}^h may not be slow and surface. SP is very slow k_{mx}^h at low frequencies, when $-\varepsilon \tanh^2(\theta) \gg 1$ and $\tanh^2(\theta) \ll 1$. However, at these frequencies one should take into account the dissipation. SP has forward and backward portions of the dispersion branches. It has no component E_x and does not interact with the longitudinal electron beams.

SP k_{mx}^e for structure 2 can be backward when the dielectric layer transforms the inductive impedance to the capacitive Fig. 1. A suitable analytical condition is quite cumbersome, so here it omitted. Really thin metal film waveguides of the type 1 and 2 should be considered in some dielectric medium with DP $\tilde{\varepsilon}$. To do this, in all relationships you should make the change $k_0 \rightarrow k = k_0 \sqrt{\tilde{\varepsilon}}$. Then the direct SP moving in the film 1 and greeting on your way the strip of section 2, when the waveguide 1 is overlaid with dielectric plates with a DP ε_d , can get the focusing if he becomes the backward. It should be noted that the initiation of SP by the finite source, e. g. a laser beam through a prism gives divergent SP, which, after such metalens will be converging. It should be noted that for the waveguide 3 the above obtained relations are exact in the approximation of perfectly conducting narrow walls.

4. Conductivity of 2D Structures

In thin metal layers (films) $|z| < d$ there are slow surface plasmons (SP) of the electric type in case of presence in the plane of symmetry $z = 0$ of the magnetic wall, and the slowdown increases with decreasing thickness d . For application the films with a thickness of a few nanometers are interesting. In the case of the plane of symmetry of the magnetic wall electric E-SP slower (lower frequency plasmon resonance ω_s) than E-SP electric wall in the center $z=0$ of the film [1, 5, 6]. In the approximation of absence of dissipation E-SP with electric wall has two branches, suitable to the frequency below (with normal dispersion) and the top (with the anomalous negative dispersion). The latter case corresponds to a backward wave [1]. However, when we have a dissipation, the branches are closed, and in the vicinity of the plasmon resonance ω_s both from the bottom and top SP are direct, and the loss during the motion along the x -axis high: $k_x''(\omega_s) \approx k_x'(\omega_s)$ [5, 6]. The polarization is always possible to choose so that $k_y = 0$. For forward SP $k_x'k_x'' > 0$, and for the backward one $k_x'k_x'' < 0$, i.e. the energy (attenuation of waves) moving back to phase because $k_x = k_x' - ik_x''$. We denote the film thickness $t = 2d$. A conductive film is two-dimensional, if its thickness is significantly less than the mean free path ($t \ll \lambda_c$) and penetration depth of the electromagnetic wave ($t \ll \delta$). Usually in this case also $t \ll \lambda$, where λ is the wavelength in vacuum. This structure is called two-dimensional electron gas (DEG) and describes a two-dimensional (surface) conductivity $\sigma = \zeta t$, where ζ is the bulk conductivity of the solid sample, which determines the current density $\mathbf{J} = \zeta \mathbf{E}$. In view of the above the DEG is described by the surface current density $\mathbf{J}_s$ is determined by the conditions $\mathbf{J}(\mathbf{r}_s, \nu) = \mathbf{J}_s(\mathbf{r}_s) \delta(\nu) = \sigma \mathbf{E}_s(\mathbf{r}_s, 0) \delta(\nu)$, where the index S indicates the projection of the vector on the surface of the film, and ν is the normal coordinate is counted from it. From the point of view of electrodynamics such film has not a finite transverse size, and the volume integral is reduced to surface one. The conditions for DEG depend on the temperature, frequency, purity of the sample, the surface of the film and are usually granted for good conductive metals with thicknesses from a few to tens of nanometers. Usually the DEG films are located between the dielectric layers or on such layer. The use of bulk materials conductivity or permittivity for estimation of DEG parameters is an approximation. A rigorous approach requires the solution of complex quantum tasks including borders and dielectric layers, because the density of states, frequency of collisions, the number of modes of conductivity, defining the conductivity σ , substantially change it at small thicknesses, so that the ratio $\sigma = \zeta t$ is strictly true for thick films. However, there is a natural

DEG structure, e. g., graphene [7–11], graphenes [12] and some others. For graphene σ is defined in several works [7–11] based on the approach of Kubo-Greenwood and the method of dynamic Green's functions. Tensor dynamic conductivity of graphene when exposed to a plane monochromatic wave is determined by the integral in momentum space [7–11]. His approximate evaluation on the part of the Brillouin zone in the vicinity of two Dirac points in the approximation of linear dispersion $E(\mathbf{p}) = \pm v_F |\mathbf{p}|$, $\mathbf{p} = \hbar \mathbf{q}$, $v_F \approx c/300$ leads to a simple formula Kubo [5]: $\sigma = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}$ where

$$\sigma_{intra}(\omega, \mu, \omega_c, T) = -2ie^2 k_B T [\pi \hbar^2 (\omega - i\omega_c)]^{-1} \ln(\cosh(\mu/(2k_B T))) \quad (7)$$

$$\sigma_{inter}(\omega, \mu, \omega_c, 0) = -ie^2 / (4\pi \hbar) \ln([2|\mu| - (\omega - i\omega_c)\hbar] / [2|\mu| + (\omega - i\omega_c)\hbar]) \quad (8)$$

For (7) and (8) the Fermi-Dirac function $f(E) = [\exp(E - \mu_c)/k_B T + 1]^{-1}$ is used in with μ_c is the chemical potential. To take into account the spatial dispersion in [11] under the approximation of Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) with account of drift current and the relaxation time approximation (RTA) model for tensor conductivity are given. The BGK model gives the conductivity tensor with account of spatial dispersion. The RTA model gives some differ results.

5. Plane Wave Diffraction

Let consider the located in vacuum conductive DEG film, the center of which is located at $z=0$. Let an electromagnetic wave $\mathbf{E}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \exp(i\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})$ in vacuum, in which $\mathbf{k}^2 = k_0^2$, falls at the considered film with tensor surface conductivity $\hat{\sigma} = \hat{\xi}/Z_0$ where $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi \Omega$. The magnetic field is determined by the same dependence with amplitude $\mathbf{H}_0 = \mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 / Z_0$. We solve the problem by two ways. The first is based on electrodynamic Green's function (GF). The second will use the mode matching technique. The wave creates in the film the surface current density $\mathbf{J}_s(x, y)$, which we write using the volumetric current density in the form $\mathbf{J}(x, y) = \mathbf{J}_s(x, y)\delta(x)$. We take the scalar GF [13], denoting $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$, $R = |\mathbf{R}| = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$, $X = (x - x')$, $Y = (y - y')$, $Z = (z - z')$, $k_z = \sqrt{k_0^2 - k_x'^2 - k_y'^2}$.

GF is the decomposition on non-uniform plane-wave, including evanescent ones in the case $k_x'^2 + k_y'^2 > k_0^2$. We have an electric vector-potential, equal to the integral over the surface from $G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s') \mathbf{J}_s(\mathbf{r}_s')$, where we have moved from the volume integration to a surface integral over the infinite plane (x, y) . In force of local link $\mathbf{J}_s(x, y) = \hat{\sigma} \mathbf{E}_s(x, y)$ the integral is calculated explicitly and has the form:

$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \hat{\sigma} \mathbf{E}_s g$, $g = \exp(-ik_x x - ik_y y - ik_z |z|)/(2ik_z)$. Here $\mathbf{E}_s$ is the amplitude of the total tangential electric field on the surface. Hence, we find the tangential electric $\mathbf{E}_d = (\nabla \nabla \cdot \mathbf{A} + k_0^2 \mathbf{A})/(i\omega \varepsilon_0)$ and magnetic fields $\mathbf{H}_d = \nabla \times \mathbf{A}$ of diffraction with amplitudes $E_{(x,y)d}(\mathbf{r}) = \bar{E}_{(x,y)d} \exp(-ik_x x - ik_y y - ik_z |z|)$, where

$$\bar{E}_{xd} = \frac{k_x^2(\sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y) + k_x k_y (\sigma_{yx} E_x + \sigma_{yy} E_y) - k_0^2(\sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y)}{2\omega \varepsilon_0 k_z},$$

$$\bar{E}_{yd} = \frac{k_y^2(\sigma_{yy} E_y + \sigma_{yx} E_x) + k_x k_y (\sigma_{xy} E_y + \sigma_{xx} E_x) - k_0^2(\sigma_{yy} E_y + \sigma_{yx} E_x)}{2\omega \varepsilon_0 k_z}.$$

Further we believe $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$. The amplitude of the full field on the tape is equal to the sum of the respective amplitudes of the incident and diffracted fields: $E_x = E_{0x} + \bar{E}_{xd}$, $E_y = E_{0y} + \bar{E}_{yd}$. These conditions lead to a system of linear algebraic equations (SLAE) with has two unknown amplitudes E_x and E_y : $\hat{A}E = E_0$, $E = (E_x, E_y)$, $E_0 = (E_{0x}, E_{0y})$, allowing to express the full amplitude using the amplitude of the incident field. As a result $E_x = A_{xx}^{-1} E_{0x} + A_{xy}^{-1} E_{0y}$, $E_y = A_{yx}^{-1} E_{0x} + A_{yy}^{-1} E_{0y}$, where we have introduced the matrix elements of the inverse matrix $\hat{A}$:

$$A_{xx} = [1 + (k_0^2 - k_x^2)\xi_{xx} - k_x k_y \xi_{xy}]/(2k_0 k_z), \quad A_{xy} = [(k_0^2 - k_x^2)\xi_{yy} - k_x k_y \xi_{xy}]/(2k_0 k_z).$$

For the rest of the coefficients matrix we should make the change $x \leftrightarrow y$. When choosing a polarization $E_{0y} = 0$, i. e. along the x axis and in the normalization $E_{x0} = 1$ we have the reflection coefficient $R = \bar{E}_{xd}$, transmission coefficient $T = 1 + R$, and the coefficient of transformation of the orthogonal polarization $Q = \bar{E}_{yd}$. The solution to the problem of diffraction takes place if the matrix of SLAE is not a special, i. e. $\det(\hat{A}) \neq 0$. We have the relations $R = -1 + A_{11}^{-1} = -1 + a_{22}/\det(\hat{A})$, $Q = A_{12}^{-1}$, which we can present or in the following forms:

$$R = \frac{k_x^2(\sigma_{xx} A_{xx}^{-1} + \sigma_{xy} A_{yx}^{-1}) + k_x k_y (\sigma_{yx} A_{xx}^{-1} + \sigma_{yy} A_{yx}^{-1}) - k_0^2(\sigma_{xx} A_{xx}^{-1} + \sigma_{xy} A_{yx}^{-1})}{2\omega \varepsilon_0 k_z},$$

$$Q = \frac{k_y^2(\sigma_{yy} A_{yx}^{-1} + \sigma_{yx} A_{xx}^{-1}) + k_x k_y (\sigma_{xy} A_{yx}^{-1} + \sigma_{xx} A_{xx}^{-1}) - k_0^2(\sigma_{yy} A_{yx}^{-1} + \sigma_{yx} A_{xx}^{-1})}{2\omega \varepsilon_0 k_z}.$$

The condition $\det(\hat{A}) = 0$ is the dispersion relation (DR) for surface plasmons along the film. It determines the dispersion $k_0 = f(k_x, k_y)$, or $\omega = \omega(\mathbf{k}_s)$ believing that DR resolved relative to the wave number k_0 . Because of the Fresnel equations we have $k_z = \sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}$. Because the frequency is real, we have the condition $\text{Im}(f(k_x, k_y)) = 0$. Therefore we have two real equations to determine the two complex quantities, for example, k_x and k_y (equation Fresnel allows you to

choose any pair components of vector $\mathbf{k}$). The goal is to get the dependencies $k_x = k_x(k_0)$, $k_y = k_y(k_0)$. However, in the DR these values relate and depend on directions of phase and energy. Let SP has the complex surface wave vector $\mathbf{k}_s = \mathbf{k}'_s - i\mathbf{k}''_s$, the real part of which (indicated by bar) forms an angle φ with the x axis. The direction of phase movement is determined by the unit vector $\mathbf{n}_{0p} = \mathbf{k}'_s / k'_s$, where $k'_s = |\mathbf{k}'_s| = \sqrt{k'^2_x + k'^2_y}$. Then $k'_x = k'_s \cos(\varphi)$, $k'_y = k'_s \sin(\varphi)$. The unit vector $\mathbf{n}_{0E} = \mathbf{k}''_s / k''_s$ defines the direction of motion of energy that moves in the direction of attenuation of the wave. Here $k''_s = |\mathbf{k}''_s| = \sqrt{k''^2_x + k''^2_y}$. Also we have $\mathbf{n}_{0E} = \tilde{\mathbf{S}} / |\tilde{\mathbf{S}}|$, where $\tilde{\mathbf{S}}$ is the integral of the Poynting vector along the transverse coordinate z . The specified relationship exists not only for the surface plasmon, and (as a limit) for deriving polariton. In the General case $\mathbf{k}_{0E} \neq \mathbf{k}_{0p}$ and $\mathbf{k}_{0E} \neq \mathbf{v}_g / |\mathbf{v}_g|$, where $\mathbf{v}_g = \nabla_{\mathbf{k}_s} \omega(\mathbf{k}_s)$ is the vector group velocity (GV). Because of dissipation the Leontovich–Lighthill–Rytov theorem [14] is not performed, and the GV does not define the movement of energy. Let the energy direction is determined by the angle ψ relative to the x axis. Then $k''_x = k''_s \cos(\psi)$, $k''_y = k''_s \sin(\psi)$. At the same time $\mathbf{k}_s = x_0 k_x + y_0 k_y$, and complex DR is splitting into two real ones: $\text{Re}(\det(\hat{A})) = 0$, $\text{Im}(\det(\hat{A})) = 0$. By setting the direction of the surface plasmon $\mathbf{n}_p = \mathbf{k}'_s / |\mathbf{k}'_s|$, calculating the Poynting vector $\mathbf{S}$ and adding these two real equations by the third $\mathbf{n}_E = \tilde{\mathbf{S}} / |\tilde{\mathbf{S}}|$, it is possible to define the k'_s , k''_s , and the complex wave vector $\mathbf{k}_s = k'_s \mathbf{n}_p - ik''_s \mathbf{n}_E$. Its real part k'_s is the phase constant along the motion direction, and a negative imaginary part k''_s determines the energy flow and attenuation in the direction $\mathbf{n}_E$. If $\mathbf{n}_p \mathbf{n}_E > 0$, then the direction of movement of phase and energy form an acute angle, and the plasmon is forward. If $\mathbf{n}_p \mathbf{n}_E < 0$, then the direction of movement of phase and energy form an obtuse angle, and the plasmon is backward. If $\varphi = \psi$ then SP is forward $k'_s k''_s > 0$. If $\psi = \varphi \pm \pi$, then $k'_s k''_s < 0$, and plasmon is backward. In this case σ is scalar, and you can always choose the x axis so that $k_y = 0$. Some results for E-SP are given in Fig. 2 for graphene film using the spatial dispersion model based on BGK approach and without one. Fig. 3 presents the reflection and transmittance for hyperbolic metamaterial (HMM) layer [15, 16] with different angle ϕ between normal and anisotropy axes.

For the problem of diffraction the values k_x and k_y are real and determine the angle φ of inclination of the plane falling to the axis x : $\varphi = \arctan(k_y / k_x)$.

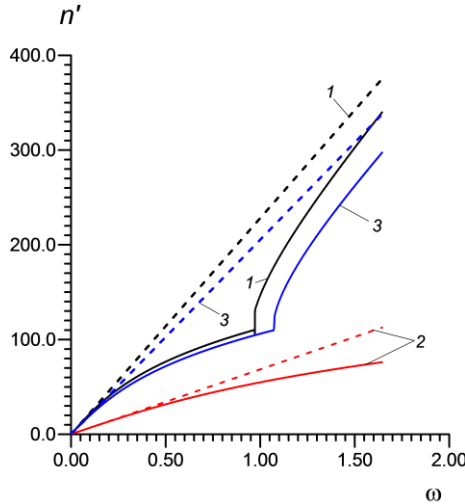


Fig. 2. Deceleration n' of E-SP for graphene film at $T=300$ K, depending on the circular frequency (eV): $\mu_c=0.3$ eV, $\varepsilon=1$ (curves 1); $\mu_c=1$ eV, $\varepsilon=1$ (2); $\mu_c=1$ eV, $\varepsilon=3$ (3) with spatial dispersion (solid curves) and without (dashed curves).

Рис. 2. Замедление n' Е-СП для графеновой пленки при $T = 300$ К в зависимости от круговой частоты (эВ): $\mu_c = 0,3$ эВ, $\varepsilon = 1$ (кривые 1); $\mu_c = 1$ эВ, $\varepsilon = 1$ (2); $\mu_c = 1$ эВ, $\varepsilon = 3$ (3) с пространственной дисперсией (сплошные кривые) и без нее (штриховые кривые)

While defining the scattered field value $k_z = \sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}$ is real, because $k_x^2 + k_y^2 \leq k_0^2$. When you go to task about free waves, since non-selfadjoint boundary value problem, the values k_x , k_y , k_z become complex. Such waves should be considered quasieigen and gliding [4, 17], since the leakage from dissipative two-dimensional film is impossible (the structure of the volume and there is no stored energy). The reliance of $\exp(-ik_z|z|)$ this means that $k'_z < 0$, i. e. the phase and the energy from both parties are moving from a vacuum to the film. This condition is necessary to impose for choice of branches of the root. Leakage is only possible from the active film, for example, from non-equilibrium (“pumped”) graphene with $\sigma' < 0$. Writing $k_z = \sqrt{k_0^2 - k_s^2} = \sqrt{w}$, $w = u + iv = k_0^2 + k_s'^2 - k_s''^2 + 2ik_s'k_s''$, we have $k'_z = -\sqrt{(\sqrt{u^2 + v^2} + u)/2}$, $k''_z = \pm\sqrt{(\sqrt{u^2 + v^2} - u)/2}$. For forward plasmon the point w lies in the upper half plane of complex plane, if so $u = k_0^2 + k_s'^2 - k_s''^2 < 0$ (slow plasmon) the root gives $k''_z > 0$ (surface plasmon). If

$u = k_0^2 + k_s'^2 - k_s'^2 > 0$ (fast plasmon) it is also surface: $k_z'' > 0$. In active film with forward plasmon (condition $k_s'k_s'' < 0$) the wave is leaky (with $k_z' = \sqrt{(\sqrt{u^2 + v^2} + u)/2} > 0$) and antisurface ($k_z'' < 0$) since the point w lies in the lower half-plane. The case of the backward surface plasmon in dissipative structure ($k_s'k_s'' < 0$) is characterized by the fact that energy flows into the stricter and phase is leaking. In this case $k_z' > 0$, and you should take the wave surface: $k_z'' > 0$. This case differs from the active one by change of sign k_z . The case of backward plasmon in active structure is characterized in that it emerges at an obtuse angle to the motion of the phase along the surface. In the paper [5] the relations for waves generated by external wave of surface current in the form of a plane are obtained. They imply that the slow wave current creates a surface electromagnetic wave and the fast wave of current – antisurface leaky one, i.e. only quick wave of current radiates. These ratios significantly differ from the above considered: the current is assumed to be specified (incident) and dissipation are not considered. In our case, the problem is self-consistent and with dissipation.

In a thin dielectric film with thickness t and the dielectric constant (DC) ε you can enter the current density of the polarization $\mathbf{J}_p = i\omega\varepsilon_0(\varepsilon(\omega) - 1)\mathbf{E}$ and the corresponded surface current density $\mathbf{J}_s = \mathbf{J}_p t$. This suggests that the film has electric conductivity $\sigma^e = i\omega\varepsilon_0 t(\varepsilon(\omega) - 1)$. The result does not depend on the nature of the film. In the case of metal it may be the DC of metal in the form of Drude-Lorentz $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_L - \omega_p^2 / (\omega^2 - i\omega\omega_c)$. The value $\varepsilon_L - 1$ describes the polarization of the crystal lattice and interband transitions. Similarly, a thin magnetic (e. g., ferrite) films can be described by the magnetic conductivity $\hat{\sigma}^m = i\omega\mu_0 t(\hat{\mu}(\omega) - I)$ and by surface current of magnetic polarization (magnetization) $\mathbf{J}_s^m = \hat{\sigma}^m \mathbf{H}_s$. For E-wave, we can neglect the transverse component and to calculate the field outside the film based on these formulas and surface current $\mathbf{J}_s = \mathbf{x}_0 J_{0x} \exp(-ik_x x)$ (consider the motion along the x -axis). Then the wave is surface, if $k_x > k_0$ (slow current wave), and it is leaky antisurface [17], if $k_x < k_0$, i. e., during the fast wave of current. These results, however, when dissipation is not quite accurate: you must enter the radiation dissipation $k_x'' > 0$ in accordance with what the objective should be self-consistent. Dissipation shifts the frequency of the transition from slow wave to the fast, which demonstrates the importance of dissipation for the classification of waves.

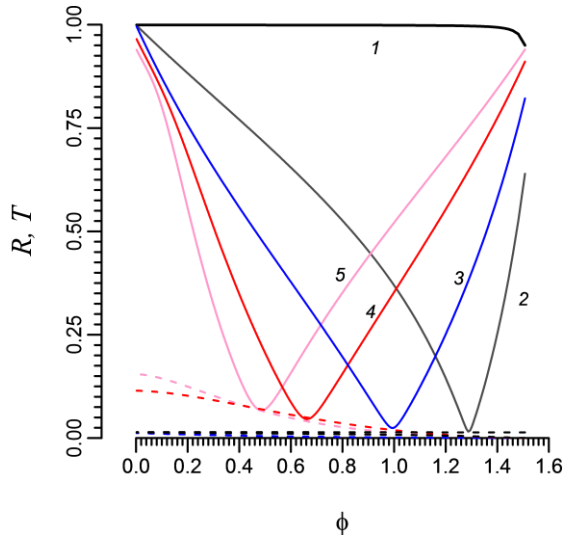


Fig. 3. Dependence of reflection coefficients R (solid curves) and transmission T (dashed curves) of the angle of incidence ϕ for the structure of the HMM with $d = 420$ nm, $t_m = t_d = 20$ nm, $\varepsilon_d = 3$ for different values of α : $\alpha = 0$ (curve 1), $\alpha = \pi/12$ (2), $\alpha = \pi/8$ (3), $\alpha = \pi/4$ (4), $\alpha = \pi/3$ (5).

Рис. 3. Зависимость коэффициентов отражения R (сплошные кривые) и пропускания T (штриховые кривые) от угла падения ϕ для структуры ГММ с $d=420$ нм, $t_m=t_d=20$ нм, $\varepsilon_d=3$ для различных значений α : $\alpha = 0$ (кривая 1), $\alpha = \pi/12$ (2), $\alpha = \pi/8$ (3), $\alpha = \pi/4$ (4), $\alpha = \pi/3$ (5)

For diffraction we choose the y axis perpendicular to the plane of incidence. In the incidence of the p -polarized wave (E-wave), it has a projection E_{0x} , and in the fall of the s -polarized wave it is E_{0y} . In the first case we put $E_{0x} = 1$, and then the reflection coefficient is equal to diffraction amplitude $R_p = \bar{E}_{xd}$ or has the form $R_p = T_p - 1 = -1 + a_{22} / \det(\hat{A})$, $R_s = T_s - 1 = -1 + a_{11} / \det(\hat{A})$.

6. Conclusions

We have discussed the symmetric and antisymmetric plasmon-polaritons in symmetric metal-dielectric and *graphene* structures. In contrast to the customary classification in this work it is carried out by the parity-odd longitudinal component (E_x for E-SP and H_x for H-SP). Accordingly, the even (symmetric) E-SP corresponds to the magnetic wall, and the odd one – to electric one. It is shown that the inductive input impedance at the border of the vacuum structure

leads to the forward SP, and a capacitive – to the backward SP. That allow one to synthesize the surface metalenses. Dissipation leads to the possibility of propagation of plasmon-polaritons in bandgap zones, and in this case the anomalous negative dispersion does not mean a backward plasmon [6, 7], Fig. 1. The SPs are very slow if the surface input impedance is highly reactive, what for E-SP (3) means: $1 - \rho_{in}'^2 + \rho_{in}''^2 \gg 2\rho_{in}'|\rho_{in}''|$, $\rho_{in}' \ll |\rho_{in}''|$, $|\rho_{in}''| \gg 1$. The impedance approach allows us to obtain DE for both singlet graphene [18] and layered graphene-dielectric structures.

Also we have considered the diffraction of a plane wave on the described by surface conductive films and plane-structures containing such films. The DEs and formulas for the parameters of the scattering have been received. In the general case of anisotropic conductivity the modes are hybrid.

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. Tournais P., Laude V., Negative group velocities in metal-film optical waveguides // Optics Communications. 1997. Vol. 137. P. 41–45.
2. Negative group velocity of surface plasmons on thin metallic films / Y. M. Liu [et al.] // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6323, P. 63231M–8.
3. Surface plasmon-polaritons with negative and zero group velocities propagating in thin metal films / D. Yu. Fedyanin [et al.] // Quantum Electron. 2009. Vol. 39, No. 8. P. 745–750.
4. Zuev V. S., Zueva G. Ya. Very slow surface plasmons : Theory and practice (Review) // Optics and Spectroscopy. 2008. Vol. 105. P. 852–859.
5. Davidovich M. V. Plasmons in multilayered plane-stratified structures // Quantum Electron. 2017. Vol. 47, No. 6. P. 567–579.
6. Davidovich M. V. Maximum deceleration and negative dispersion of plasmons along a metal layer // Technical Physics Letters. 2017. Vol. 43, No. 22. P. 55–62.
7. Electrodynamics of carbon nanotubes : Dynamic conductivity, impedance boundary conditions, and surface wave propagation / G. Ya. Slepyan [et al.] // Phys. Rev. 1999. Vol. B 60, No. 24. P. 17136–17149.
8. Hanson G. W. Dyadic Greens functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene // J. Applied Phys. 2008. Vol. 103. P. 064302(1–8).
9. Maksimenko S. A., Slepyan G. Ya. Electrodynamical properties of carbon nanotubes. In : Electromagnetic Fields in Unconventional Structures and Materials, Ed. by O. N. Singh and A. Lakhtakia. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2000. P. 217–255.
10. Falkovsky L. A. Dynamic properties of graphene // JETP. 2012. Vol. 115, No. 3. P. 496–508.
11. Semiclassical spatially dispersive intraband conductivity tensor and quantum capacitance of graphene / G. Lovat [et al.] // Phys. Rev. 2013. Vol. B 87, No. 11. P. 115429(1–11).
12. Brazhe R. A., Kochaev A. I., Miftahutdinov R. M. Graphens and their physical properties : a tutorial. Ulyanovsk, Russia : UISTU Press, 2016. 139 p. [In Russ.].

13. Markov G. T., Chaplin A. F. Excitation of electromagnetic waves. Moscow, Russia : Radio i Svyaz, 1983. 296 p. [In Russ.].
14. Rytov S. M. Certain theorems on the group velocity of electromagnetic waves // Zh. Eksper. Teoret. Fiz. 1947. Vol. 17, No. 10. P. 930–936.
15. Davidovich M.V. Polaritons and diffraction on the layer of asymmetric hyperbolic metamaterial // Proc. of SPIE. 2020. Vol. 11458. P. 1145813(1–7).
16. Davidovich M. V. Dyakonov plasmon-polaritones along a hyperbolic metamaterial surface // Computer Optics. 2021. Vol. 45, No. 1. P. 48–57.
17. Vainshtein L. A. Electromagnetic waves. Moscow, Russia : Radio i Svyaz, 1988. 440 p. [In Russ.].
18. Mikhailov S. A., Ziegler K. New electromagnetic mode in graphene // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 99. P. 016803(1–4).

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.

Infocommunications and Radio Technologies, 2021, vol. 4, no. 3, pp. 183–193.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 3. С. 183—193.

ISSN: 2587-9936

УДК 621.385.6

Возможные варианты высокоорбитных giro-ЛБВ

Колосов С. В., Шатилова О. О.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

ул. П. Бровки 6, Минск, 220013, Беларусь

kolosov@bsuir.by

Получено: 24 декабря 2021 г.

Отрецензировано: 28 декабря 2021 г.

Принято к публикации: 28 декабря 2021 г.

Аннотация: *Описываются и сравниваются различные варианты высокоорбитных giro-ЛБВ по эффективности, полосе усиления и мощности в результате их моделирования по программе Gyro-K. Определены возможности таких приборов по коэффициенту усиления, полосе усиления, КПД и частотному диапазону. Показано, что наилучшим вариантом является работа giro-ЛБВ на второй гармонике гирочастоты и моде волны TE_{21} , который обеспечивается хорошим коэффициентом связи этой волны с высокоорбитным электронным потоком и позволяет при коэффициенте усиления 40 дБ иметь полосу усиления ~12 % и средний волновой КПД 15 %.*

Ключевые слова: *гирорезонансные приборы, ЛБВ, миллиметровый диапазон волн.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Колосов С. В., Шатилова О. О. Возможные варианты высокоорбитных giro-ЛБВ // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 3. С. 183—193.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Колосов, С. В. Возможные варианты высокоорбитных giro-ЛБВ / С. В. Колосов, О. О. Шатилова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 3. — С. 183—193.

Possible variants of high-orbit Gyro-TWT

S. V. Kolosov and O. O. Shatilova

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

P. Brovki st., 6, Minsk, 220013, Belarus

kolosov@bsuir.by

Received: December 24, 2021

Peer-reviewed: December 28, 2021

Accepted: December 28, 2021

Abstract: Various variants of high-orbit Gyro-TWT in terms of efficiency, gain bandwidth and power are described and compared, as a result of their simulation using the Gyro-K program. The capabilities of such devices in terms of gain, gain band, efficiency and frequency range have been determined. It is shown that the best option is the operation of the Gyro-TWT at the second harmonic of the gyrofrequency and the TE_{21} wave mode, which is provided by a good coupling coefficient of this wave with the high-orbit electron beam and allows, at a gain of 40 dB, to have a gain band of $\sim 12\%$ and an average wave efficiency of 15%.

Keywords: generator, gyroresonant devices, TWT, millimeter wavelength range.

For citation (IEEE): S. V. Kolosov et al. "Possible variants of high-orbit Gyro-TWT," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 183–193, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Создание широкополосных усилителей в диапазоне частот близких к терагерцовому в настоящее время является актуальной задачей. Наиболее перспективными в этом смысле являются гирорезонансные приборы. Принцип работы таких приборов основан на гирорезонансном взаимодействии электронного потока с электромагнитными полями. А это предполагает наличие сильного магнитостатического поля, особенно при продвижении в более высокий частотный диапазон. Но даже использование сверхпроводящих электромагнитов не позволяет создавать усилители для терагерцового частотного диапазона. Одним из способов проникнуть в этот диапазон частот является работа на гармониках гирочастоты и использование высокоорбитных электронных пушек. Однако здесь имеются свои трудности. С увеличением номера гармоники гирочастоты увеличивается и азимутальный индекс синхронного типа TE -волны. При этом максимальное значение поперечной составляющей ВЧ поля все ближе приближается к внутренней поверхности волновода, а радиус вращения элек-

тронов в высокоорбитной giro-ЛБВ увеличивается в соответствии с увеличением номера гармоники гирочастоты, т. к. уменьшается значение магнитостатического поля. Но оказывается, что это приводит к необходимости увеличения тока электронного потока для эффективного взаимодействия его с вращающимся электромагнитным полем, т. к. коэффициент связи электронного потока с электромагнитными волнами уменьшается. Так при работе на 4-й гармонике гирочастоты [1, 2] величина тока составляет 86 ампер при напряжении 103 киловольт, что соответствует мощности электронного потока порядка 9 Мвт. Ожидается, что с уменьшением азимутального индекса ВЧ-поля будет уменьшаться и величина требуемого тока электронного потока.

2. Результаты расчетов

Для расчетов использовалась программа *Gyro-K* [3, 4], в которой уравнения возбуждения электронным потоком нерегулярного волновода строятся на основе метода преобразования координат А. Г. Свешникова, который основан на замене задачи возбуждения нерегулярного волновода задачей возбуждения регулярного волновода с единичным радиусом. Этот метод позволяет искать решение волновых уравнений в виде разложений по системе базисных функций регулярного цилиндрического волновода. Для решения уравнений Максвелла был использован метод Галеркина, который также называется методом ортогонализации. Коэффициенты разложения поля по собственным базисным функциям определяются в этом методе из условия ортогональности невязок уравнений собственным базисным функциям регулярно волновода. Граничные условия на открытых концах волновода определяются для каждой моды регулярного волновода отдельно, что устраняет некорректность задания граничных условий для полного поля, как это происходит при использовании «*pic*»-технологии.

В результате мы получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов разложения, зависящих теперь только от продольной координаты. Такой подход позволяет преобразовать трехмерную задачу возбуждения нерегулярного волновода в одномерную задачу. Омические потери в стенках волновода учитываются на основе граничных условий Шукина — Леонтовича. Для самосогласованного решения задачи возбуждения нерегулярного волновода электронном потоком использовался итерационный метод последовательной нижней релаксации.

В результате поиска оптимальной конструкции giro-ЛБВ для рабочей моды TE_{41} по значениям радиуса волновода, магнитостатического поля, тока электронного потока, питч-фактора и ускоряющего напряжения

были получены следующие параметры giro-ЛБВ: ускоряющее напряжение — 103 Кв ($\beta_0 = 0.5542$), электронный ток — 87 А ($\sigma = 0.0646$), питч фактор — 1.447, нормированный радиус волновода $g = \frac{2\pi b}{\lambda_0} = 5.4332$,

магнитостатическое поле $F = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1.7588 \cdot 10^{11} B_0 [T]}{2\pi f_0 [Hz]} = 0.28012$, ко-

эффициент усиления $K_{yc} = 34$ Дб. Интегральные характеристики данной giro-ЛБВ приведены на рисунке 1.

На кривой 2 (профиль волновода) серым цветом отмечены области волновода с поглощающим покрытием. Фрагментация поглощающего покрытия позволила повысить КПД giro-ЛБВ.

Из рисунка 2 следует, что полоса усиления данной giro-ЛБВ составляет 11 %, но при этом потери мощности достигают для заданной частоты 60 ГГц 5 % от мощности электронного потока.

На рисунке 3 показано, что максимальное значение напряженности электромагнитного поля наблюдается только в конце волновода.

Белым пунктирным цветом на рисунке 4 показана окружность начального распределения электронов в высокоорбитной ЛБВ.

При поиске оптимальной конструкции giro-ЛБВ на волне TE_{21} [5] был получен следующий результат. Величина тока электронного потока составляла 3.2 А $\left(\sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{c} I_0 = 0.73723 \cdot 10^{-3} I_0 [A] = 0.00235 \right)$, ускоряющее

напряжение составило 60Кв $\left(\beta_0 = \frac{v_0}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{(1.957 \cdot 10^{-6} V_0 [V] + 1)^2}} = 0.446 \right)$, питч

фактор $q = V_{\perp} / V_{\parallel} = 1.$, нормированный радиус волновода $g = \frac{2\pi R_w}{\lambda_0} = 3.0844$, нормированное значение магнитостатического поля

$F(z) = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1.748 \cdot 10^{11} \cdot B_0 [T]}{2\pi \cdot f_0 [Hz]} = 0.5251$, нормированная длина прибора

$l = \frac{2\pi L_w}{\lambda_0} = 277$, коэффициент усиления — 40 dB.

Мощность электронного потока при работе на моде TE_{21} составила 192 кВт, в то время как при работе на волне TE_{41} эта величина равнялась 9 МВт, что в 47 раз больше, чем требуется для работы на волне TE_{21} . Интегральные характеристики для рассчитанного варианта giro-ЛБВ показаны на рисунке 6.

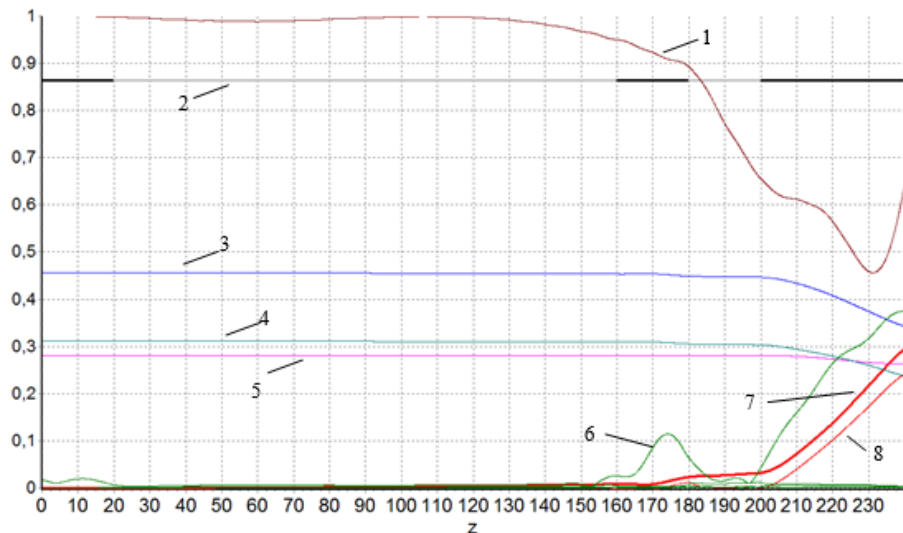


Рис. 1. Функция группировки по первой гармонике рабочей частоты, 2 – профиль волновода $g/(2\pi)$, 3 – среднее значение поперечной скорости электронов, 4 – среднее значение радиуса вращения электронов, 5 – нормированное значение магнитостатического поля, 6 – нормированное значение амплитуды электромагнитной волны H_{41} , 7 – электронный КПД, 8 – волновой КПД.

Fig. 1. Function of grouping by the first harmonic of the operating frequency, 2 – waveguide profile $g/(2\pi)$, 3 – the average value of the transverse electron velocity, 4 – the average value of the electron rotation radius, 5 – the normalized value of the magnetostatic field, 6 – the normalized value of the electromagnetic wave amplitude H_{41} , 7 – electronic efficiency, 8 – wave efficiency

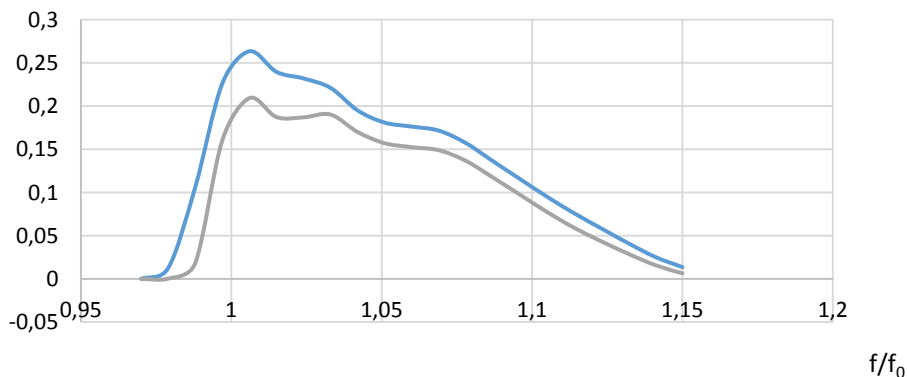


Рис. 2 Частотная характеристика Гирос-ЛБВ, верху — электронный КПД, внизу — волновой КПД.

Fig. 2. Frequency response of Gyro-TWT, top – electronic efficiency, bottom – wave efficiency



Рис. 3. Распределение модуля напряженности электромагнитного поля в продольном сечении волновода.

Fig. 3. Module distribution of electromagnetic field in the longitudinal cross section of the waveguide

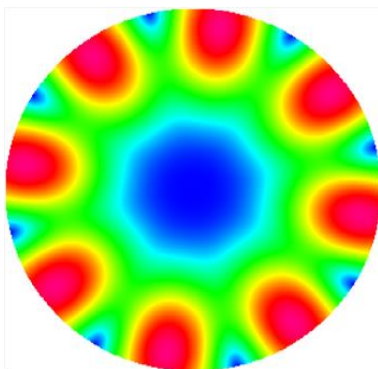


Рис. 4. Поперечное распределение модуля напряженности электромагнитного поля в конце волновода моды H_{41} .

Fig. 4. Transverse distribution of the electromagnetic field intensity modulus at the end of the waveguide mode H_{41}

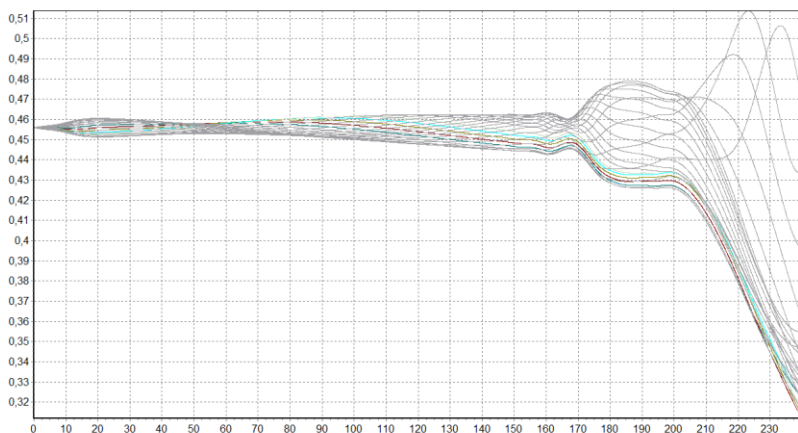


Рис. 5. Поперечные нормированные скорости электронов.

Fig. 5. The normalized transverse velocity of electrons

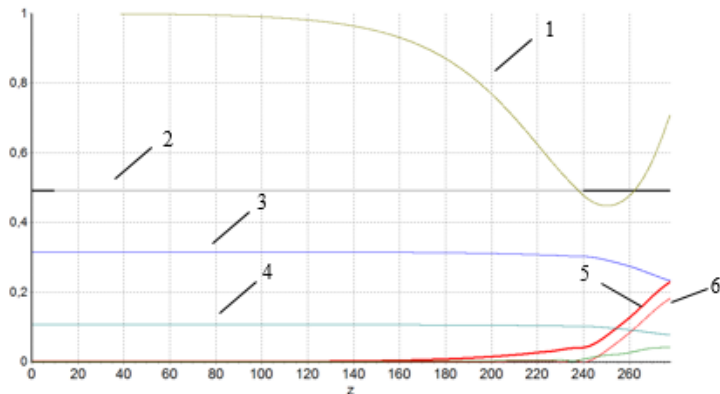


Рис. 6. Функция фазовой группировки электронов, 2 – радиус волновода, 3 – поперечная средняя скорость электронов, 4 – средний радиус вращения электронов, 5 – электронный КПД, 6 – волновой КПД.

Fig. 6. Electron phase bunching function, 2 - waveguide radius, 3 - average transverse velocity of electrons, 4 - average electron rotation radius, 5 - electronic efficiency, 6 - wave efficiency

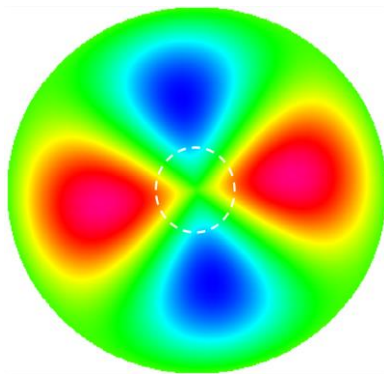


Рис. 7. Поперечное распределение модуля напряженности поперечной составляющей электромагнитного поля в конце волновода моды H_{21} .

Fig. 7. Transverse distribution of the modulus of the strength of the transverse component of the electromagnetic field at the end of the waveguide of the H_{21} mode

Из этого рисунка следует, что электронный КПД этой gyro-ЛБВ составляет 23 %. Заметим, что большая часть волновода (кривая 2) имеет поглощающее ВЧ поле покрытие. Оно отмечено серым цветом, в отличие от медной поверхности, которая на рисунке имеет черный цвет.

На рисунке 7 белым цветом отмечен радиус вращения электронного потока относительно оси прибора. Можно отметить, что электронный поток проходит в еще достаточно сильном электромагнитном поле, что и обеспечивает хорошее взаимодействие электронного потока с полем волны TE_{21} .

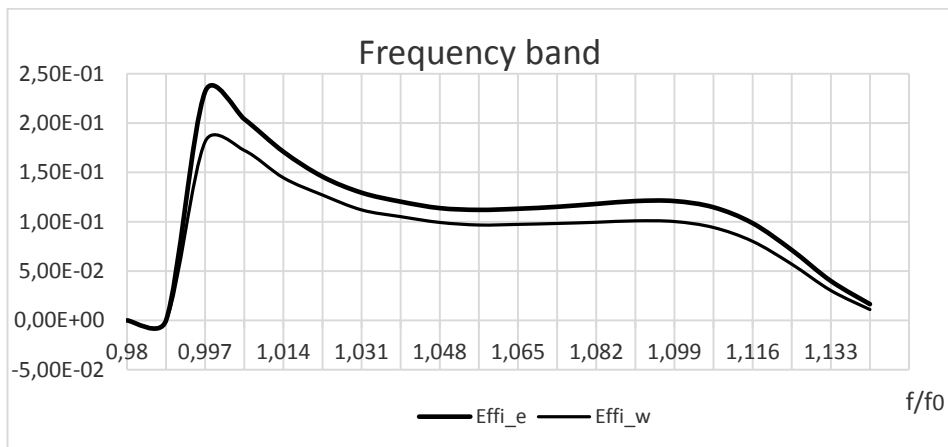


Рис. 8. Частотная характеристика gyro-ЛБВ, работающей на волне TE_{21} .

Fig. 8. Frequency characteristic of the Gyro-TWT operating on the TE_{21} wave

Полоса усиления данной ЛБВ составляет 12,6 %, что немного выше, чем при работе на TE_{41} , но средний КПД несколько меньше, т. к. здесь нет такой фрагментации поглощающего покрытия, как в предыдущем варианте gyro-ЛБВ.



Рис. 9. Распределение модуля напряженности электромагнитного поля в продольном сечении волновода.

Fig. 9. Module distribution of electromagnetic field in the longitudinal cross section of the waveguide

Интересным представляется сравнение gyro-ЛБВ, работающей на моде TE_{21} с ЛБВ, работающей на моде TE_{22} , что означает увеличения радиуса волновода почти в 2 раза.

Из рисунков 10, 11 следует, что на ларморовской орбите формируются два фазовых сгустка электронов, как и должно быть при работе на второй гармонике гирочастоты.

Исходя из рисунка 12 можно сделать вывод о том, что средний КПД почти такой же, что и при работе на моде TE_{21} , но полоса усиления существенно меньше и составляет 3.35 %.

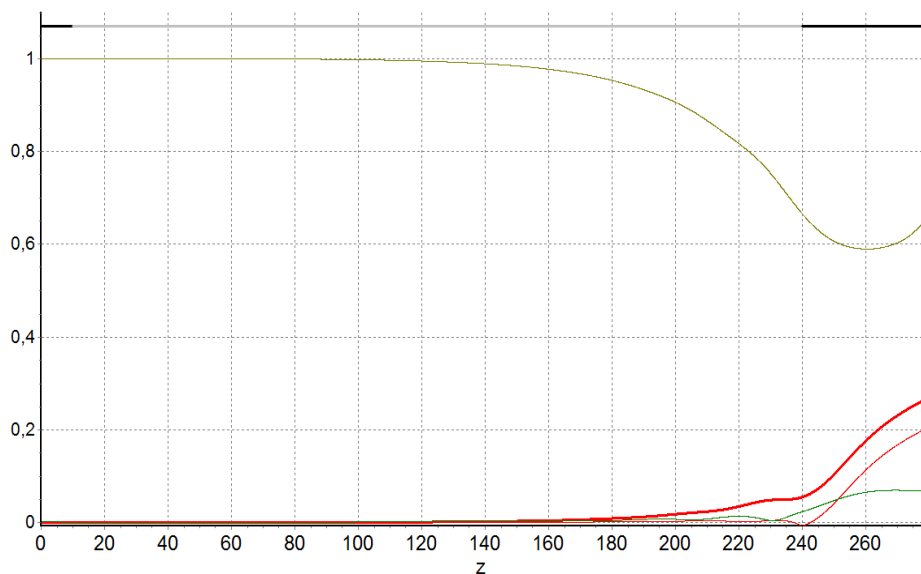


Рис. 10. Интегральные характеристики гирос-ЛБВ для моды TE_{22} .

Fig. 10. Integral characteristics of the Gyro-TWT for the TE_{22} mode

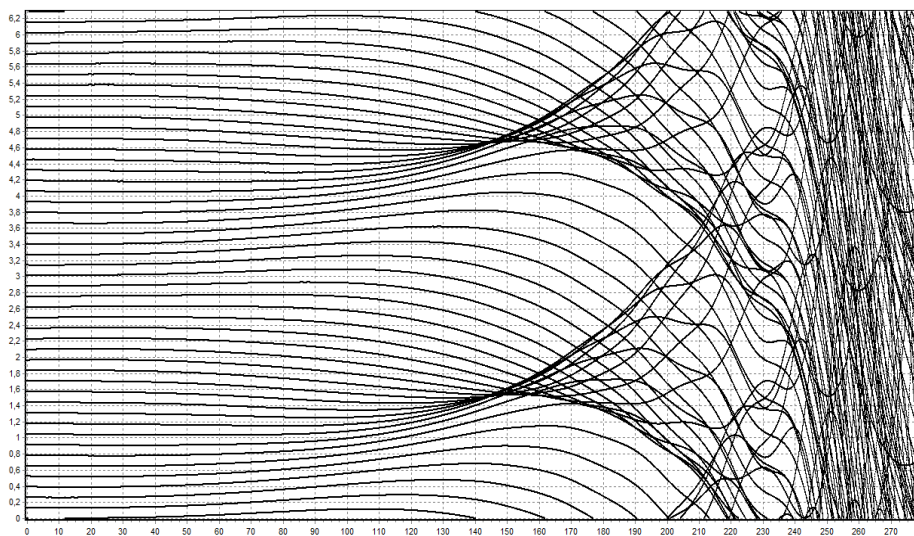


Рис. 11. Фазовые траектории электронов для Гирос-ЛБВ с модой TE_{22} .

Fig. 11. Phase trajectories of electrons for the Gyro-TWT with the TE_{22} mode

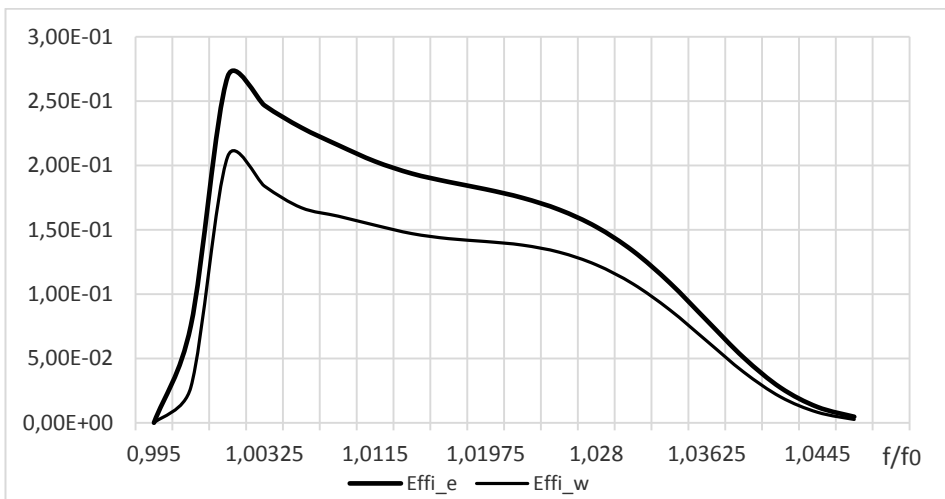


Рис. 12. Частотная характеристика Гиро-ЛБВ, работающей на волне TE_{22} .

Fig. 12. Frequency characteristic of the Gyro-TWT operating on the TE_{22} wave

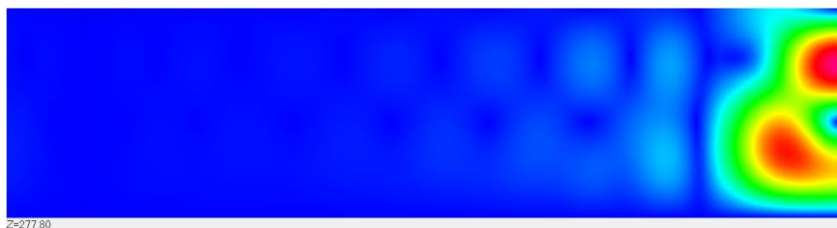


Рис. 13. Распределение модуля напряженности электромагнитного поля в продольном сечении волновода для волны TE_{22} .

Fig. 13. Module distribution of electromagnetic field in the longitudinal cross section of the waveguide for the TE_{22} wave

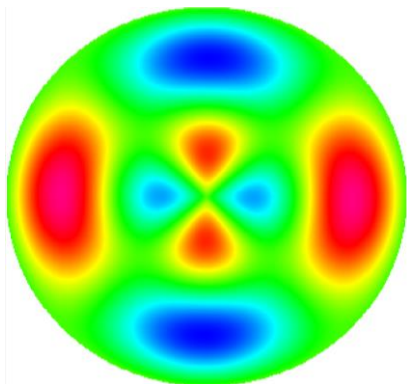


Рис. 14. Поперечное распределение модуля напряженности поперечной составляющей электромагнитного поля в конце волновода моды H_{22} .

Fig. 14. Transverse distribution of the modulus of the strength of the transverse component of the electromagnetic field at the end of the waveguide of the H_{22} mode

3. Заключение

Сопоставление полученных результатов расчетов трех вариантов Гирос-ЛБВ позволяет сделать следующие выводы.

1. Есть принципиальная возможность создания гирос-ЛБВ, работающих в области миллиметровых длин волн, за счет работы на гармониках гирочастоты.

2. Наилучшим вариантом является работа на второй гармонике гирочастоты и моде волны TE_{21} , что обеспечивается хорошим коэффициентом связи этой волны с высокоорбитным электронным потоком и позволяет при коэффициенте усиления 40 дБ иметь полосу усиления $\sim 12\%$ и средним волновым КПД 15 %.

3. Работа на более высоких радиальных модах, например, TE_{22} , уменьшает полосу усиления в данном случае более чем в 3 раза.

Список литературы

1. Колосов С. В., Батура М. П., Зайцева И. Е. Терагерцовая высокоорбитная ГИРО-ЛБВ // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 47—48.
2. Колосов С. В., Шатилова О. О. Мощная высокоорбитная гирос-ЛБВ // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 5. С. 45—51.
3. Колосов С. В., Зайцева И. Е. Компьютерная программа GYRO-K для разработки и проектирования гирорезонансных приборов СВЧ // СВЧ электроника. 2017. № 2. С. 46—48.
4. Kolosov S. V. Optimization of microwave devices with irregular waveguide. LAP LAMPERT Academic Publishing RU, 2019. 192 p.
5. Колосов С. В., Шатилова О. О. Высокоорбитная гирос-ЛБВ на волне TE_{21} // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 292—293.

Информация об авторах

Колосов Станислав Васильевич, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры «Вычислительные методы и программирование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь.

Шатилова Ольга Олеговна, старший преподаватель кафедры «Вычислительные методы и программирование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь.

Information about the authors

Stanislav V. Kolosov, Doctor of Phys.-Math. Sci., Professor of the Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.

Olga O. Shatilova, senior lecturer of the Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.

Пеленгация воздушных судов путем оценки частоты Доплера принимаемых радиосигналов

¹ Синицын Е. А., ² Фридман Л. Б.

¹ Научно-технический центр «Челябинский радиозавод “Полет”», АО
ул. Курчатова, д. 9, г. Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация
esinit@yandex.ru

² Научно-производственный комплекс «ТИМ», ООО
пр. Шаумяна, 4, корп. 1, лит. А, г. Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация
Lenya2002@bk.ru

Получено: 24 декабря 2021 г.

Отрецензировано: 28 декабря 2021 г.

Принято к публикации: 28 декабря 2021 г.

Аннотация: Рассмотрены особенности пеленгации воздушных судов путем оценки частоты Доплера, возникающей при периодическом круговом считывании радиосигналов, поступающих от радиостанций воздушных судов на кольцевую антенную решетку автоматического радиопеленгатора. Показаны возможности формирования и измерения частоты Доплера принимаемых радиосигналов, представлены основные исходные данные для построения предлагаемого варианта измерения пеленга воздушных судов с источниками радиоизлучений. Приведены результаты оценки допустимых величин расстояния между соседними элементами и радиуса кольца антенной решетки, а также чувствительности разности фаз и частоты Доплера радиосигналов соседних элементов к изменению направления на источник радиоизлучения.

Ключевые слова: автоматический радиопеленгатор, воздушное судно, доплеровский фильтр, источник радиоизлучения, когерентное накопление, пеленг, радиосигнал, станция радиосвязи, частота Доплера.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Синицын Е. А., Фридман Л. Б. Пеленгация воздушных судов путем оценки частоты Доплера принимаемых радиосигналов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 3. С. 194—208.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Синицын, Е. А. Пеленгация воздушных судов путем оценки частоты Доплера принимаемых радиосигналов / Е. А. Синицын, Л. Б. Фридман // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2021. — Т. 4, № 3. — С. 194—208.

Aircraft Direction Finding by Estimating the Doppler Frequency of Received Radio Signals

E. A. Sinitsyn¹ and L. B. Friedman²

¹Scientific and Technical Center of Chelyabinsk Radio Plant “Polyot”, JSC,
Kurchatov str., 9, St.-Petersburg, 194223, Russian Federation
esinit@yandex.ru

²Scientific and Production Complex “TIM”, LLC,
Shahumyan Ave., 4, build. 1, lit. A, St.-Petersburg, 195027, Russian Federation
Lenya2002@bk.ru

Received: December 24, 2021

Peer-reviewed: December 28, 2021

Accepted: December 28, 2021

Abstract: The features of aircraft direction finding are considered by estimating the Doppler frequency that occurs during periodic circular reading of radio signals coming from aircraft radio stations to the annular antenna array of an automatic direction finder. The possibilities of forming and measuring the Doppler frequency of received radio signals are shown, the basic initial data for constructing the proposed variant of measuring the bearing of aircraft with radio emission sources are presented. The results of estimating the permissible values of the distance between neighboring elements and the radius of the antenna array ring, as well as the sensitivity of the phase difference and the Doppler frequency of the radio signals of neighboring elements to a change in direction to the radio source are presented.

Keywords: automatic direction finder, aircraft, Doppler filter, radio emission source, coherent accumulation, bearing, radio signal, radio communication station, Doppler frequency.

For citation (IEEE): E. A. Sinitsyn et al. “Aircraft Direction Finding by Estimating the Doppler Frequency of Received Radio Signals,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 194–208, 2021. (In Russ.).

1. Введение

На гражданских и государственных аэродромах РФ и за рубежом для оперативной оценки направления движения воздушных судов (ВС) широко используются автоматические радиопеленгаторы (АРИ)¹.

¹ Федеральные авиационные правила. Радиотехническое обеспечение полетов и авиационная электросвязь. Сертификационные требования. М.: 1999 г. <https://docload.ru/Basesdoc/6/6495/index.htm>

При помощи АРП определяется угол в горизонтальной плоскости между направлением расположения ВС в воздушном пространстве и направлением на магнитный Север относительно точки стояния АРП (пеленг ВС). Пеленг ВС оценивается путем радиопеленгации источников радиоизлучения (ИРИ), установленных на ВС и излучающих радиосигналы в диапазоне ультракоротких волн (УКВ), приемными каналами АРП.

Существующие автоматические радиопеленгаторы обеспечивают измерение пеленга ВС, оборудованных станциями радиосвязи (СР), работающих в диапазонах УКВ 100—150 МГц и 220—400 МГц².

Пеленги ВС, измеренные АРП, отображаются на индикаторе кругового обзора комплекса средств руководства полетами (КСРП), находящегося на рабочем месте (РМ) руководителя полетов на командном диспетчерском пункте (КДП) аэродрома. Величины пеленгов ВС диспетчером или руководителем полетов передаются с КДП аэродрома на борт соответствующих ВС при помощи средств радиосвязи РМ КСРП КДП³.

В основу принципа действия наиболее широко распространенных АРП положен прием радиосигналов, излучаемых бортовыми СР ВС, на элементы (вибраторы) антенны, имеющие ненаправленные свойства в горизонтальной плоскости и расположенные по кольцу и в центре антенны АРП, с последующим анализом фазовых соотношений принятых сигналов [1]. Анализ фазовых соотношений принятых сигналов в АРП может выполняться, например, путем реализации корреляционного интерферометра. Основной недостаток такого подхода — возможная неоднозначность оценки фаз, низкая помехоустойчивость, а также обычно невысокая точность измерения величины пеленга.

В работе предлагается выполнять однозначную точную радиопеленгацию ВС, оборудованных СР, путем оценки частоты Доплера, возникающей при быстром периодическом круговом считывании сигналов, принимаемых ненаправленными элементами кольцевой антенной решетки, без необходимости использования центрального элемента.

2. Основные исходные данные

Предлагаемый вариант измерения пеленга ВС основан на оценке частоты Доплера сигнала ИРИ, принимаемого элементами приемной антенны АРП, возникающей вследствие двух причин:

² DF 2000. Автоматический радиопеленгатор. https://img.artlebedev.ru/everything/azimut/booklets/DF2000_rus.pdf

³ Авиационные правила. Часть 170. Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс (АП-170). Том II. Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс. 3-е изд., 2013. 216 с.

— наличие разности фаз между сигналами, излучаемыми удаленным ИРИ и принятыми в двух разнесенных точках пространства, в частности, разности фаз $\Delta\phi$ между двумя соседними элементами кольцевой антенной решетки АРП;

— переключение принимаемых сигналов в ходе кругового циклического дискретного опроса выходов элементами с круговой скоростью вращения Ω обор/с и периодом полного оборота $T_0 = 1$ обор/ Ω .

Исходные данные для предлагаемого варианта измерения пеленга определяются следующими основными типовыми требованиями, предъявляемыми к АРП^{1,3}:

— измерение пеленга на ИРИ ВС должно выполняться в пределах от 0 до 360° в горизонтальной плоскости и от 0 до ~45° в вертикальной плоскости;

— среднеквадратическая ошибка (СКО), характеризующая погрешность измерения пеленга β ВС, должна быть не более $\delta_\beta = 1^\circ$.

Основные исходные данные:

а) Вид антенны АРП — типовая кольцевая антенная решетка с N приемными антенными элементами, например, вертикальными вибраторами B_i ($i = 1 \div N$), которая имеет радиус R и может не содержать центральный элемент (рисунок 1).

Обычно количество приемных антенных элементов выбирается в пределах $N = 9 \div 16$.

Выходные сигналы N антенных элементов подаются на N приемных каналов или через высокочастотный (ВЧ) антенный коммутатор на один приемный канал аппаратуры АРП (рисунок 1).

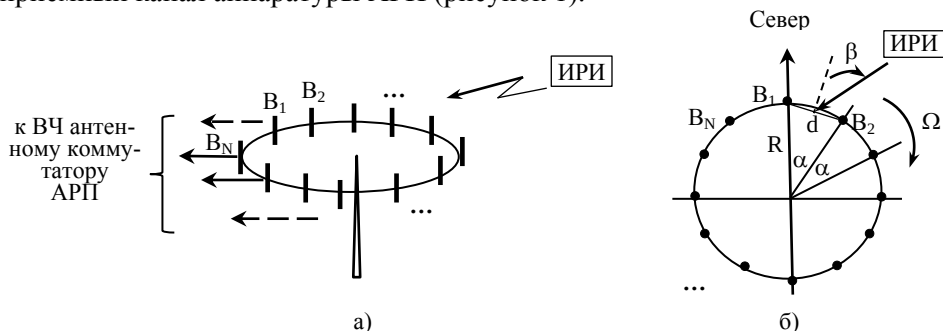


Рис. 1. Типовая приемная кольцевая антенная решетка автоматического радиопеленгатора (β — угол между нормалью к базе первых двух элементов антенны и направлением на источник радиоизлучения).

Fig. 1. A typical receiving ring antenna array of an automatic direction finder (β is the angle between the normal to the base of the first two elements of the antenna and the direction to the source of radio emission)

б) Минимальная длина волны:

— $\lambda_1 = 2 \text{ м}$ — для 1-го УКВ диапазона частот 100—150 МГц;

— $\lambda_2 = 0,75 \text{ м}$ — для 2-го УКВ диапазона частот 220—400 МГц.

в) Типовое количество элементов $N = 9—16$. Примем

$$N = 12.$$

г) Угол в горизонтальной плоскости между направлениями из центра окружности на границы элементов антенны

$$\alpha = 360^\circ/N.$$

При $N = 12$ получим

$$\alpha = 360/12 = 30^\circ.$$

д) Угловая скорость вращения Ω последовательного считывания выходных сигналов элементов антенны.

Величина Ω и соответствующий ей период T_o одного полного оборота считывания всех сигналов N элементов антенны выбираются с учетом:

— минимального допустимого периода считывания (выборки) $T_{сч}$ ВЧ сигналов соседних элементов антенны, примем для количественного примера $T_{сч} = 70 \text{ мкс}$;

— минимального возможного времени (быстродействия) T_K переключения выходных ВЧ сигналов N элементов в антенном коммутаторе, устанавливаемом на выходе антенны и предназначенном для использования одного канала приема и последовательной обработки сигналов от N элементов. Полагаем $T_K = 10 \text{ мкс}$.

Минимальный период одного полного оборота при считывании сигналов N элементов антенны определим по выражению

$$T_{o\min} = (T_{сч} + T_K) \times N. \quad (1)$$

Из выражения (1) для $T_{сч} = 70 \text{ мкс}$, $T_K = 10 \text{ мкс}$ и $N = 12$ получим

$$T_{o\min} = 960 \text{ мкс}. \quad (2)$$

Вводя для величины $T_{o\min}$ некоторый запас по времени, с учетом выражения (2) можно принять

$$T_o = 1000 \text{ мкс} = 1 \text{ мс}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует значение для скорости вращения последовательного считывания выходных сигналов элементов антенны

$$\Omega = 1/T_o = 1000 \text{ обор/с}.$$

Величины Ω и T_0 уточняются в зависимости от количества элементов антенны и выборок сигналов N , а также времени последующей обработки, выполняемой в приемном канале АРП.

С целью использования для радиопеленгации ИРИ в качестве информационного признака частоты Доплера, а также повышения энергетического потенциала АРП по обнаружению ВС путем когерентного накопления (КН) выборок принимаемых сигналов, в приемном канале АРП целесообразно обеспечить параллельную обработку принимаемых сигналов в наборе узкополосных доплеровских фильтров (ДФ). Характер относительного изменения частоты Доплера сигналов, попадающих в ДФ элементов антенны, позволяет дополнительно оценить направление перемещения ВС.

Отметим, что благодаря КН N выборок пакета принимаемых сигналов энергетический потенциал АРП можно увеличить в N раз.

3. Оценка величины допустимого расстояния между соседними элементами и радиуса кольца антенны

Расстояние между соседними элементами, расположенными на кольце антенны, определяется радиусом R кольца антенны и величиной угла α

$$d = 2R\sin(\alpha/2) = 2R\sin(180^\circ/N). \quad (4)$$

При $N = 12$ согласно выражению (4) получим

$$d = 2R\sin 15^\circ \approx 0,52R. \quad (4')$$

С целью обеспечения корректной оценки пеленга ИРИ расстояние d между соседними элементами антенны должно быть таким, чтобы разность фаз $\Delta\varphi$ между сигналами двух соседних элементов определялась однозначно. Для выполнения этого условия величина $\Delta\varphi$ должна находиться при любых направлениях расположения ИРИ, соответствующих изменению угла $\beta = -180^\circ \div 180^\circ$, в пределах

$$\begin{aligned} -\pi < \Delta\varphi < \pi, \\ -\pi < 2\pi \times d \times \sin\beta / \lambda < \pi. \end{aligned} \quad (5)$$

В диапазоне углов $\beta = -180^\circ \div 180^\circ$ величина $\Delta\varphi$ принимает максимальное значение для углов $\beta = 90^\circ$ или $\beta = -90^\circ$. Выражение (5) при $\beta = 90^\circ$ или $\beta = -90^\circ$ можно записать в виде

$$2\pi d / \lambda < \pi. \quad (6)$$

Из выражения (6) определим требование к величине d

$$d < \lambda/2. \quad (7)$$

Из выражения (4) с учетом условия (7) определим требование к максимально допустимой величине R

$$2R \times \sin(180^\circ/N) < \lambda/2,$$

из которого получим ограничение на величину радиуса кольца антенны

$$R < (\lambda/4)/\sin(180^\circ/N). \quad (8)$$

Из выражения (8) при $N = 12$ и $\lambda_1 = 2$ м для первого УКВ диапазона АРП получим условие

$$R_1 < 0,5/\sin 15^\circ = 1,94 \text{ м}. \quad (9')$$

С учетом требования (9') примем для первого УКВ диапазона АРП

$$R_1 = 1,8 \text{ м}. \quad (9)$$

Из выражения (8) при $N = 12$ и $\lambda_2 = 0,75$ м для второго УКВ диапазона АРП получим условие

$$R_2 < 0,1875/\sin 15^\circ = 0,485 \text{ м} \quad (10')$$

С учетом требования (10') примем для второго УКВ диапазона АРП

$$R_2 = 0,45 \text{ м}. \quad (10)$$

Для величин (4'), (9) и (10) при $N = 12$ определим значения максимально допустимого расстояния d между элементами антенны для первого и второго УКВ диапазонов частот АРП соответственно

$$d_1 = 0,52 \times 1,8 = \sim 0,94 \text{ м}, \quad (11)$$

$$d_2 = 0,52 \times 0,485 = \sim 0,25 \text{ м}. \quad (12)$$

4. Чувствительность разности фаз сигналов соседних элементов антенны к изменению направления ИРИ

С учетом ограничений, установленных в пп. 1 и 2, оценим требуемую чувствительность измерительного канала АРП в части изменения разности фаз между сигналами соседних элементов к изменению угла при различных направлениях ИРИ.

Как следует из выражения (5), разность фаз между последовательными выборками сигналов двух соседних элементов антенны определяется выражением

$$\Delta\varphi = 2\pi \times d \times \sin\beta / \lambda. \quad (13)$$

Из выражения (13) определим крутизну зависимости $\Delta\varphi$ от угла β по выражению

$$\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial \beta} = 2\pi \times d \times \cos\beta / \lambda. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует:

— величина изменения $\Delta\varphi$ при одном и том же изменении величины угла β зависит от текущей величины угла β ;

— максимальная чувствительность $\Delta\varphi$ к изменению угла β (крутизна) соответствует углам $\beta = 0$ и $\beta = \pm 180^\circ$;

— минимальная чувствительность $\Delta\varphi$, близкая к нулю, к изменению угла β соответствует углам $\beta = -90$ и $\beta = 90^\circ$.

Оценим максимальное изменение величины $\Delta\varphi$ в случае минимального изменения угла β , соответствующего допустимой погрешности измерения пеленга $\delta_\beta = 1^\circ$ град., с использованием выражения (13) при $\beta = 0$, например, для случая 2-го УКВ диапазона частот АРП при $d_2 = 0,25$ м (12)

$$\Delta\varphi = 2\pi \times d \times \sin(\beta + \delta_\beta) / \lambda = 2\pi \times 0,25 \times \sin(0 + 1^\circ) / 0,75 = 2\pi \times 0,0173 = \sim 0,035 = \sim 2^\circ. \quad (15)$$

Как следует из выражения (15), изменение $\Delta\varphi$ мало даже в случае максимальной крутизны зависимости $\Delta\varphi$ от угла β .

Можно показать, что такое же малое изменение фазы будет наблюдаться при минимальном изменении угла β , равном $\delta_\alpha = 1^\circ$, для случая первого УКВ диапазона частот АРП при $d_1 = 0,94$ (11).

Таким образом, даже при максимальной чувствительности $\Delta\varphi$ к изменению угла β (при $\beta = 0$) при малых изменениях β изменение $\Delta\varphi$ крайне мало.

При минимальной чувствительности $\Delta\varphi$ к изменению угла β (при $\beta = \pm 90^\circ$) при таких же малых изменениях $\beta = 1^\circ$ изменение $\Delta\varphi$ будет еще меньше.

Измерить и провести разрешение таких малых изменений $\Delta\varphi$ для точной оценки пеленга ВС с ИРИ практически невозможно.

Поэтому использование чисто фазового метода для точного измерения пеленга ИРИ путем оценки изменений разности фаз между сигналами соседних элементов, а также между сигналами разнесенных по кольцу крайних элементов, в зависимости от направления расположения ИРИ, практически невозможно.

5. Чувствительность частоты Доплера сигналов соседних элементов к изменению направления ИРИ

С учетом результатов п. 2 оценим чувствительность измерительного канала АРП в части изменения частоты Доплера сигналов соседних элементов к различным изменениям направления ИРИ.

Частота Доплера F_d сигнала элемента относительно сигнала соседнего элемента возникает при наличии фазового сдвига между сигналами элементов, выборки которых снимаются через интервалы времени, соответствующие периоду одного оборота T_o , и определяется с учетом (13) выражением

$$F_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} \bigg|_{\partial t=T_o} = \frac{1}{2\pi} \left[2\pi \times d \times \frac{\sin\beta}{\lambda} \right] / T_o. \quad (16)$$

Отметим, что величина частоты F_d в приемных каналах АРП между соседними элементами антенны, в отличие от классической частоты Доплера, не зависит от радиальной скорости движения ИРИ и определяется, как отмечено в п. 1, только величиной $\Delta\varphi$, зависящей от параметров d , β и λ , и величиной T_o .

В случае минимального изменения угла β , соответствующего допустимой погрешности измерения пеленга $\delta_\alpha = 1^\circ$, для второго УКВ диапазона частот АРП при $d_2 = 0,25$ м с учетом минимальной разности фаз $\Delta\varphi_{\min} = 0,035 = 2^\circ$ (15) для $T_o = 1$ мс (п. 1) получим требуемый шаг (дискрет) оценки частоты Доплера, который не должен быть превышен:

$$\Delta F_d = \frac{1}{2\pi} \Delta\varphi_{\min} / T_o = \frac{1}{2\pi} 0,35 / 10^{-3} = \sim 55 \text{ Гц}. \quad (17)$$

В ситуации, когда базы соседних элементов антенны будут находиться в плоскости электромагнитной волны, идущей от ИРИ, получим минимальную величину частоты Доплера

$$F_{d\min} = 0 \text{ Гц}. \quad (18)$$

Максимальное изменение разности фаз между соседними элементами определяется выражением (13) при величине $\beta = -90$ или $\beta = 90^\circ$.

Для $\beta = 90^\circ$ согласно (13) при расстоянии d меньшем, но близком к $\lambda/2$, получим максимально возможное однозначное изменение фазы между соседними элементами

$$\Delta\varphi_{\max} = 2\pi \times d \times \sin\beta / \lambda \text{ при } \beta=90^\circ = \sim \pi. \quad (19)$$

При $\beta = 90^\circ$ для второго УКВ диапазона частот АРП и $d_2 = 0,25$ с учетом максимальной разности фаз $\Delta\varphi_{\max} = \pi$ (19) для $T_o = 1$ мс (п. 1) получим

$$F_{D_{max}} = \frac{1}{2\pi} \Delta f_{max} / T_0 = \frac{1}{2\pi} \pi / 10^{-3} = 500 \text{ Гц.} \quad (20)$$

Из выражений (18) и (20) следует, что измерение пеленга (произвольного угла β) на ИРИ можно выполнить путем измерения частоты Доплера, находящейся для рассмотренного случая в пределах

$$F_{D_{min}} \div F_{D_{max}} = 0 \div 500 \text{ Гц.}$$

Отметим, что точное (СКО не более 1°) измерение пеленга на ИРИ можно выполнить с дискретным шагом не более 55 Гц (17) путем измерения частоты Доплера при использовании, например, набора узкополосных доплеровских фильтров с полосой пропускания каждого не более $\Delta f = \Delta F_D = 55 \text{ Гц}$.

6. Оценка частоты Доплера и соответствующего пеленга (угла β) на ИРИ

Для оценки частоты Доплера с учетом знака в пределах от минус $F_{D_{max}}$ до $+F_{D_{max}}$, т. е. для рассматриваемого случая от минус 500 Гц до +500 Гц, и соответствующего пеленга (угла β) на ИРИ можно рекомендовать реализацию обработки выборок сигнала при помощи алгоритма дискретного преобразования Фурье (ДПФ), имеющего частоту выборок (дискретизации) F_B сигнала с каждого элемента не менее чем $2F_{D_{max}} = 1.000 \text{ Гц}$.

Для предельного случая минимальной частоты выборок можно считать

$$F_B = 1.000 \text{ Гц,}$$

что соответствует периоду оборота $T_0 = 1 \text{ мс}$ и $\Omega = 1.000 \text{ оборот/с}$.

Точная оценка частоты Доплера (угла β с погрешностью $\sim 1^\circ$) возможна при реализации в ДПФ набора узкополосных доплеровских фильтров с полосой пропускания не более $\Delta f = \Delta F_D = 55 \text{ Гц}$.

Примем $\Delta f = 50 \text{ Гц}$.

Тогда количество узкополосных фильтров ДПФ должно быть не менее

$$K = F_B / \Delta f = 1.000 / 50 = 20.$$

При величине $K = 20$ ДПФ имеет 20-й порядок.

Для реализации ДПФ 20-го порядка необходимое количество выборок сигнала с каждого элемента относительно соседнего должно быть $K = 20$.

Время, необходимое получения и обработки $K = 20$ выборок сигнала с каждого элемента относительно соседнего, должно быть

$$T_H = T_0 \times K = 1 \text{ мс} \times 20 = 20 \text{ мс.}$$

Отметим:

— точность пеленгования путем оценки частоты Доплера принимаемых сигналов может быть существенно увеличена посредством повышения круговой скорости вращения Ω опроса элементов (уменьшения T_0), увеличения порядка ДПФ и времени наблюдения T_H , позволяющих уменьшить величину Δf фильтров ДПФ;

— за время $T_H = 20$ мс ИРИ, перемещающийся с максимальной скоростью $V_{\max} = 300$ м/с в поперечном направлении относительно АРП, критичном для точной оценки пеленга, переместится на расстояние не более

$$S = V_{\max} \times T_H = 300 \times 20 \times 10^{-3} = 6 \text{ м.}$$

Величина $S = 6$ м практически не скажется на ухудшении точности оценки пеленга ИРИ даже на близких удалениях ВС с ИРИ относительно АРП.

7. Структурная схема канала приема сигналов, оценки частоты Доплера и измерения пеленга (угла β) на ИРИ

С учетом изложенного для оценки пеленга ИРИ предлагается структурная схема АРП, основанная на измерении частоты Доплера выборок сигнала ИРИ, снимаемых с соседних элементов антенны АРП (рисунок 2).

АРП состоит из антенны и аппаратного блока (рисунок 2а). Приемный модуль антенны помимо кольцевой антенной решетки с элементами $B_1 \div B_N$ и ВЧ коммутатора содержит стандартный набор устройств: полосовой фильтр, малошумящий усилитель (МШУ), приемник, цифровой фазовый детектор (рисунок 2б).

Особенность построения модуля цифровой обработки сигналов (ЦОС) аппаратного блока АРП состоит в использовании набора делителей комплексных огибающих сигналов пар соседних элементов S_2/S_1 , $S_3/S_2, \dots$, S_N/S_{N-1} , S_1/S_N для оценки текущих величин разности фаз между соседними элементами $\Delta\varphi_{2-1}$, $\Delta\varphi_{3-2}, \dots$, $\Delta\varphi_{N-(N-1)}$, $\Delta\varphi_{1-N}$ и соответствующих модулей ДПФ K -го порядка для измерения частоты Доплера (рисунок 2в).

Каждый модуль ДПФ K -го порядка эквивалентен набору K параллельно включенных доплеровских фильтров, имеющих K выходов, полосу пропускания Δf и перекрывающих диапазон частот от минус $F_{\text{дmax}}$ до $+F_{\text{дmax}}$.

В модулях обнаружения и оценки пеленга (всего N модулей), подключенных к K выходам ДФ модулей ДПФ, выполняется обнаружение сигнала. По номеру ДФ, где обнаруживается сигнал, принимается решение о величине частоты Доплера и соответственно угла β относительно нормали к базе раскрыва каждой пары соседних элементов.

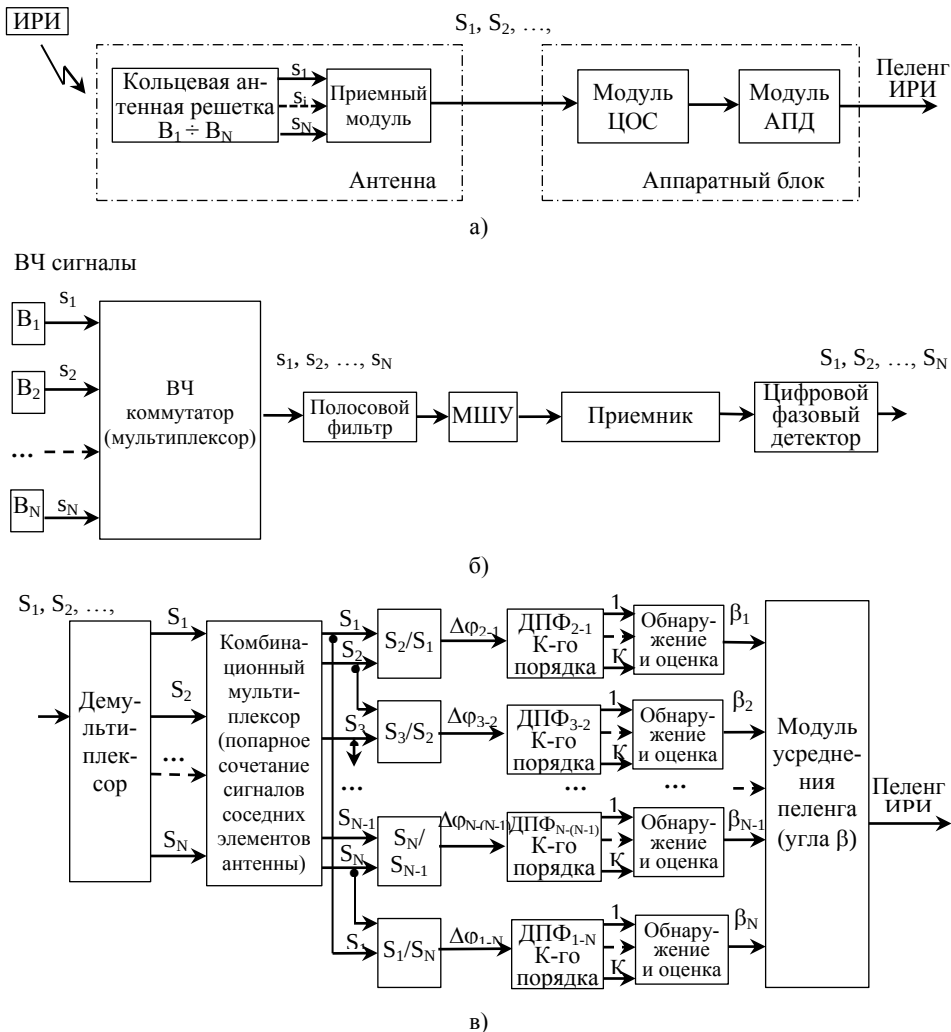


Рис. 2. Автоматический радиопеленгатор:

а) блок-схема автоматического радиопеленгатора; б) структурная схема антенны автоматического радиопеленгатора; в) структурная схема модуля цифровой обработки сигналов аппаратного блока автоматического радиопеленгатора (цепи управления, синхронизации и опорных колебаний не показаны).

Fig. 2. Automatic radio direction finder:

а) block diagram of an automatic radio direction finder; б) block diagram of the automatic radio direction finder antenna; в) block diagram of the digital signal processing module of the hardware unit of the automatic radio direction finder (control, synchronization and reference circuits are not shown)

Решение о величине пеленга ВС с ИРИ принимается с учетом известной ориентации нормалей баз набора пар соседних элементов относительно Севера.

Усредненное значение пеленга ИРИ, сглаживающее случайные ошибки измерений, вырабатывается в модуле усреднения пеленга по частным значениям пеленгов одного и того же ИРИ, оцененным в N каналах обнаружения и оценки пеленга, по выражению

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_i. \quad (21)$$

При совместной обработке согласно выражению (21), реализующей метод повышения точности, основанный на информационной избыточности (Приложение 1), обеспечивается более точный результат оценки пеленга, чем одной парой соседних элементов антенны АРП.

8. Заключение

1. Для измерения пеленга воздушных судов с источником радиоизлучений УКВ диапазона целесообразно проводить оценку частоты Доплера выборок сигналов, принимаемых соседними элементами антенны АРП, разнесенных на расстояние меньше половины длины волны и расположенных в кольцевой антенной решетке с диаметром, который может быть больше длины волны радиоизлучений.

2. При выполнении условия расположения элементов антенны (п. 1) разность фаз выборок принимаемых сигналов соседних элементов антенны для произвольной величины пеленга ВС является однозначной величиной. При этом обеспечивается однозначная оценка частоты Доплера (с учетом знака) выборок сигналов и величины пеленга ВС.

3. Точность пеленгования ВС с ИРИ по изменению разности фаз выборок сигнала соседних элементов является низкой.

4. Повышенную точность пеленгования ВС с ИРИ целесообразно получать путем оценки частоты Доплера, оцениваемой по разности фаз выборок сигналов соседних элементов за время одного оборота опроса с использованием процедуры ДПФ.

5. С целью повышения точности пеленгования ВС с ИРИ целесообразно повышать частоту опроса элементов антенны и соответственно частоту Доплера путем увеличения угловой скорости вращения опроса элементов.

6. Увеличение количества элементов антенны позволяет, используя совокупность независимых измерений пеленгов при помощи пар соседних элементов, получить более точный результат оценки пеленга ВС с ИРИ.

Например, при 12 элементах, расположенных в пределах апертуры антенны, получается набор из 12 пар измерителей, которые при совместной обработке благодаря применению метода повышения точности, основанного на информационной структурной избыточности [2, 3], обеспечат уменьшение погрешности оценки пеленга в ~ 12 раз по сравнению со случаем, когда используется одна пара соседних элементов антенны (Приложение 1).

Приложение 1

Для повышения точности оценки пеленга в АРП предлагается воспользоваться одним из известных методов повышения точности измерений.

Методом повышения точности измерений может служить известный метод использования информационной структурной избыточности [2, 3]. Под информационной избыточностью понимают такое состояние измерительной информации, получаемой в процессе измерений параметра, при котором ее объем формально превышает количество информации, необходимое для суждения о состоянии параметра.

Под структурной информационной избыточностью принято понимать включение в измерительную систему дополнительных средств измерений (СИ), измеряющих одну и ту же физическую величину. Сущность рассматриваемого метода выявляется на примере выполнения 12 измерений одной и той же величины $N = 12$ однотипными СИ (для случая АРП на базе 12 пар соседних элементов), причем в погрешности измерений доминирует систематическая или случайная составляющие, для которых установлены допускаемые граничные значения.

Пусть результаты измерений величины x оказались равными

$$x_1, x_2, \dots, x_{11}, x_{12},$$

а неизвестные погрешности 12 СИ (пар элементов) равны соответственно

$$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_{11}, \Delta x_{12},$$

Тогда для среднего из $N = 12$ результатов измерений величины x можно записать:

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^{N=12} x_i) / 12 = x + (\sum_{i=1}^{N=12} \Delta x_i) / 12,$$

где x — истинное значение физической величины,

$x_i = x + \Delta x_i$ — значение величины x , измеренное i -м СИ с погрешностью Δx_i .

Отсюда видно, что в зависимости от абсолютной величины, распределения и знака погрешностей Δx_i , средний результат будет характеризоваться значительно меньшей погрешностью (в ~ 12 раз), чем каждый из результатов $x_1, x_2, \dots, x_{11}, x_{12}$.

Этот вывод справедлив, если погрешности всей совокупности СИ данного типа можно рассматривать как случайные величины с тем или иным распределением плотностей вероятностей (например, с равномерным распределением).

Список литературы

1. Саидов А. С., Тагилаев А. Р., Алиев Н. М., Асланов Г. К. Проектирование фазовых автоматических радиопеленгаторов. М. : Радио и связь, 1997. 160 с.
2. Брюханов В. А. Методы повышения точности измерений в промышленности. М. : Изд-во стандартов, 1991. 108 с.
3. Шубинский И. Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. М. : Журнал «Надежность», 2016. 546 с.

Информация об авторах

Синицын Евгений Александрович, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника Научно-технического центра (СПб) по научно-исследовательской работе АО «Челябинский радиозавод “Полет”», Санкт-Петербург, Челябинск.

Фридман Леонид Борисович, доктор технических наук, главный специалист ООО «Научно-производственный комплекс «Технологии, инвестиции, менеджмент», Санкт-Петербург.

Information about the authors

Evgeny A. Sinitsyn, Dr. Sci., Prof., Deputy Head of the Scientific and Technical Center (St. Petersburg) for research work of Chelyabinsk Radio Plant “Flight” JSC, St.-Petersburg, Chelyabinsk.

Leonid B. Fridman, Dr Sci., Chief specialist of Scientific and Production Complex “Technologies, Investments, Management”, LLC, St.-Petersburg.

Моделирование волноводного полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS

Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И.

*Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053., Российская Федерация
shirokov@ieee.org*

Получено: 30 ноября 2021 г.

Отрецензировано: 28 декабря 2021 г.

Принято к публикации: 28 декабря 2021 г.

Аннотация: В работе представлены результаты моделирования волноводного настраиваемого полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS. Описан алгоритм анализа структуры исследуемого объекта методом конечных элементов и рассмотрены программные возможности реализации метода в HFSS. Также было проведено исследование влияния изменения размеров ширины стандартного волновода 23×10 мм на характеристики фильтра.

Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, волновод, микроволновые колебания, метод конечных элементов, параметрический анализ.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И. Моделирование волноводного полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 3. С. 209—217.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Широков, И. Б. Моделирование волноводного полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS / И. Б. Широков, П. А. Евдокимов, Е. И. Широкова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 3. — С. 209—217.

Modeling of a Waveguide Bandpass Filter in the ANSYS HFSS Software Package

I. B. Shirokov, P. A. Evdokimov, and E. I. Shirokova

Sevastopol State University

33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

shirokov@ieee.org

Received: November 30, 2021

Peer-reviewed: December 28, 2021

Accepted: December 28, 2021

Abstract: *The paper presents the results of modeling a waveguide adjustable bandpass filter in the ANSYS HFSS software package. An algorithm for analyzing the structure of the object under study by the finite element method is described and the software capabilities of implementing the method in HFSS are considered. A study was also carried out on the effect of changing the dimensions of the width of a standard waveguide of 23×10 mm on the filter characteristics.*

Keywords: *band-pass filter, waveguide, microwave oscillations, finite element method, parametric analysis.*

For citation (IEEE): I. B. Shirokov et al. "Modeling of a Waveguide Bandpass Filter in the ANSYS HFSS Software Package," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 209–217, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Задача по проектированию полосно-пропускающего фильтра является частью проекта по разработке устройства контроля изменения состава воздушной среды [1—3].

В разрабатываемом устройстве фильтр размещается в блоке ретранслятора и предназначен для увеличения уровня возможного усиления и предотвращения самовозбуждения усилителя за счет неидеальности циркулятора, который также является частью ретранслятора. Использование фильтра позволит увеличить расстояние между микроволновыми блоками устройства, следовательно, увеличить длину измерительной трассы. Рабочая частота измерительной системы около 9,4 ГГц.

На сегодняшний день известно множество конструкций СВЧ-фильтров: на полосковых, микрополосковых и волноводных линиях. Волноводные фильтры также различаются между собой по структуре и могут быть штыревыми, с диафрагмами или комбинированными.

При этом для корректировки работы блока ретранслятора и универсальности применения фильтра в целом необходимо предусмотреть возможность настройки его частотных характеристик.

На основе анализа литературы [4—6] был сделан вывод, что для X -диапазона конфигурацией фильтра с наименьшими потерями будет волноводно-штыревая структура.

2. Метод конечных элементов для анализа структуры фильтра

Волноводный фильтр имеет сложную трехмерную структуру и для его расчета необходимы численные алгоритмы дискретизации дифференциальных уравнений электромагнитного поля [7].

Для численного анализа такой структуры использован метод конечных элементов.

Суть метода конечных элементов заключается в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области.

В общем случае непрерывная величина заранее не известна и нужно определить значение этой величины в некоторых внутренних точках области. Дискретную модель достаточно легко построить, если предположить, что главные значения этой величины в каждой внутренней точке области известны.

Решение задач электродинамики методом конечных элементов основывается на некотором общем алгоритме [8—9].

Первоначально формулируется основное уравнение, решение которого будет находится методом конечных элементов, и устанавливаются необходимые граничные условия.

После этого производится деление расчетной области на непересекающиеся подобласти — конечные элементы, вершины которых являются узлами тетраэдральной сетки и предназначены для задания неизвестных компонентов решения. Возможно также разбиение и на другие трехмерные конечные элементы.

Далее выбирается набор базисных функций для описания неизвестной функции в каждом конечном элементе. Как правило, в качестве базисных функций выступают полиномы различного порядка. Например, линейные, квадратичные, кубические и т. д.

Осуществляется переход от функциональных уравнений с бесконечно большим числом неизвестных к СЛАУ конечной размерности с помощью метода Рунге или метода Галёркина.

Полученная система уравнений решается одним из методов численного расчета относительно параметров аппроксимации, что в конечном итоге дает приближенное решение задачи.

Используя решение СЛАУ, определяют параметры проектируемой структуры.

3. Моделирование фильтра в программном пакете ANSYS HFSS

Анализ структуры разрабатываемого фильтра осуществлялся в программном пакете ANSYS HFSS.

В отличие от программы Microwave Office, в которой расчет геометрических размеров и частотной характеристики фильтра возможен только для линий передачи планарного типа, программный пакет ANSYS HFSS позволяет рассчитать параметры трехмерных структур [10].

HFSS использует трехмерный векторный вариант метода конечных элементов в частотной области. Это позволяет определить параметры — S -, Y -, Z -матрицы и визуализировать результаты.

HFSS обладает автоматической технологией построения сетки, которая требует задания геометрии и свойств материала. В качестве элемента используется тетраэдр, что дает возможность довольно точно описать объекты сложной геометрической формы. Сеточная технология позволяет уменьшить затраты машинной памяти и времени вычислений.

Модель разработанного полосно-пропускающего фильтра представлена на рис. 1.

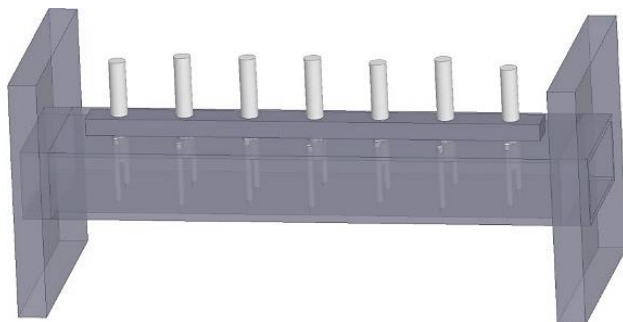


Рис. 1. Модель волноводного полосно-пропускающего фильтра.

Fig. 1. Waveguide bandpass filter model

Фильтр выполнен на отрезке прямоугольного волновода сечением 23×10 мм и длиной 100 мм. Разработанный фильтр является настраиваемым и может работать в частотном диапазоне от 8,5 до 12 ГГц.

В качестве регулируемых элементов для настройки фильтра используются 7 штырей. Они расположены вдоль волновода и выполняют роль емкостной неоднородности.

Также волноводный фильтр имеет внутри 14 припаянных серебряных цилиндрических стержня диаметром 1 мм, которые сопротивление которых носит индуктивный характер. Настройка частотных характеристик фильтра осуществляется за счет изменения длины емкостных штырей в волноводе.

Разбиение модели фильтра на конечные элементы (тетраэдры) представлено на рис. 2.

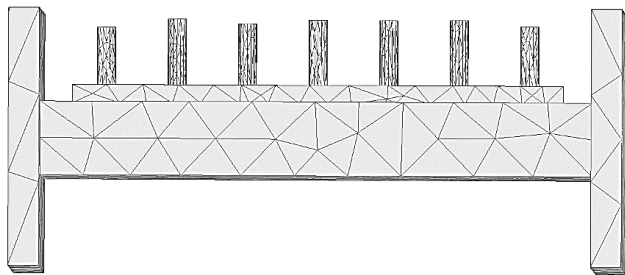


Рис. 2. Модель фильтра разделенная тетраэдральной сеткой.

Fig. 2. Filter model divided by tetrahedral mesh

Функции статистики программного пакета HFSS позволяют оценить необходимое количество конечных элементов для решения задачи. Согласно отчету о решении задачи тетраэдральная сетка модели фильтра состоит из 40271 элемента.

Настройка частотных параметров фильтра для моделирования осуществлялась при помощи встроенного программного модуля ANSYS Optimetrics. Предварительный параметрический анализ позволяет моделировать множество вариантов длины каждого из 7 емкостных штырей в волноводе, используя только одну начальную модель фильтра. После чего при помощи оптимизационных расчетов методом последовательного нелинейного программирования достигается оптимальное значения целевой функции частотных характеристик модели.

Результаты моделирования частотных характеристик модели фильтра представлены на рис. 3.

На рис. 3 по оси абсцисс всех графиков отложена частота в ГГц. Параметр S_{21} в децибелах показан на рис. 3 а. Параметр S_{11} в децибелах показан на рис. 3 б.

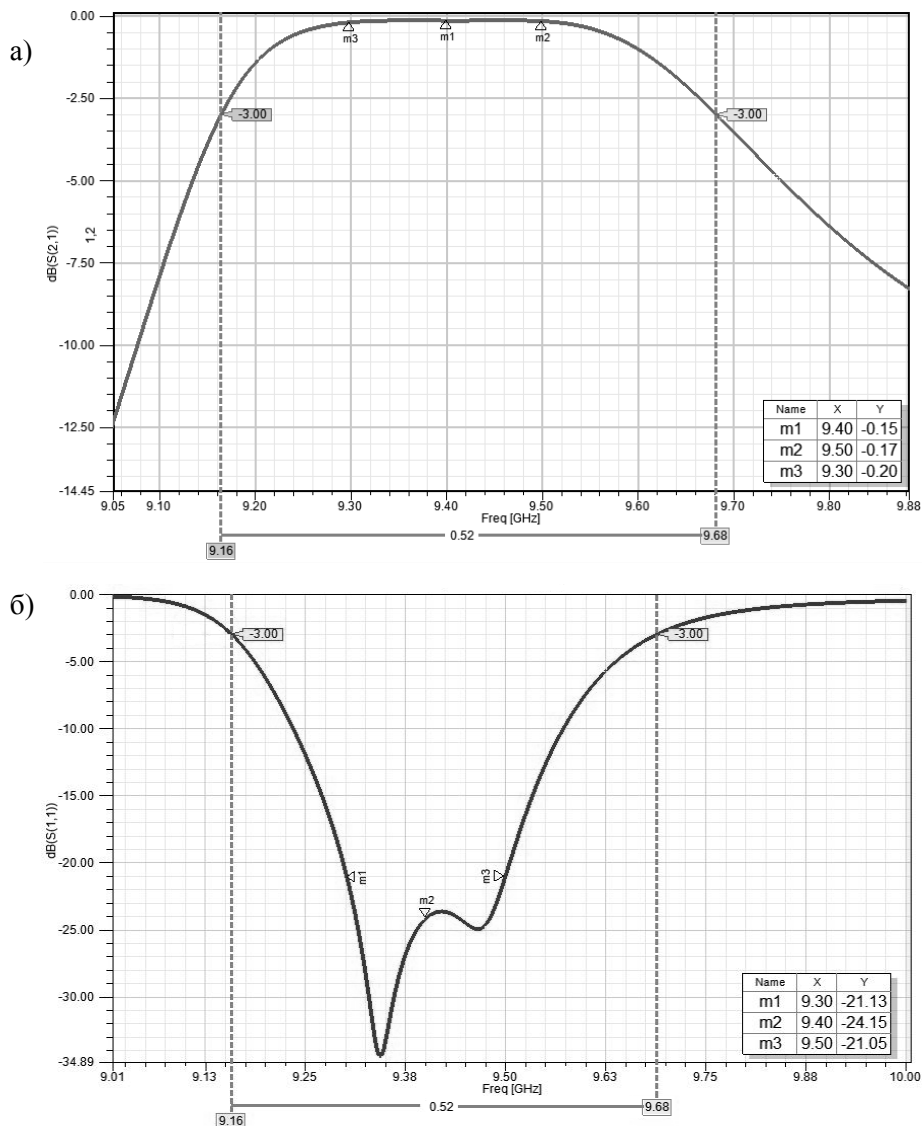


Рис. 3. Результаты моделирования частотных характеристик модели фильтра.

Fig. 3. Results of modeling the frequency characteristics of the filter model

Анализ графиков показывает, что значение параметров S_{21} и S_{11} на центральной частоте 9,4 ГГц соответственно равны: -0,15 дБ и -24,15 дБ. Полоса пропускания по уровню -3 дБ составляет около 520 МГц.

4. Влияние изменения размеров волновода на характеристики фильтра

При изготовлении СВЧ аппаратуры важным аспектом является точное соблюдение заданных размеров волновода, так как за отклонениями в размерах следует изменение частотных параметров устройства.

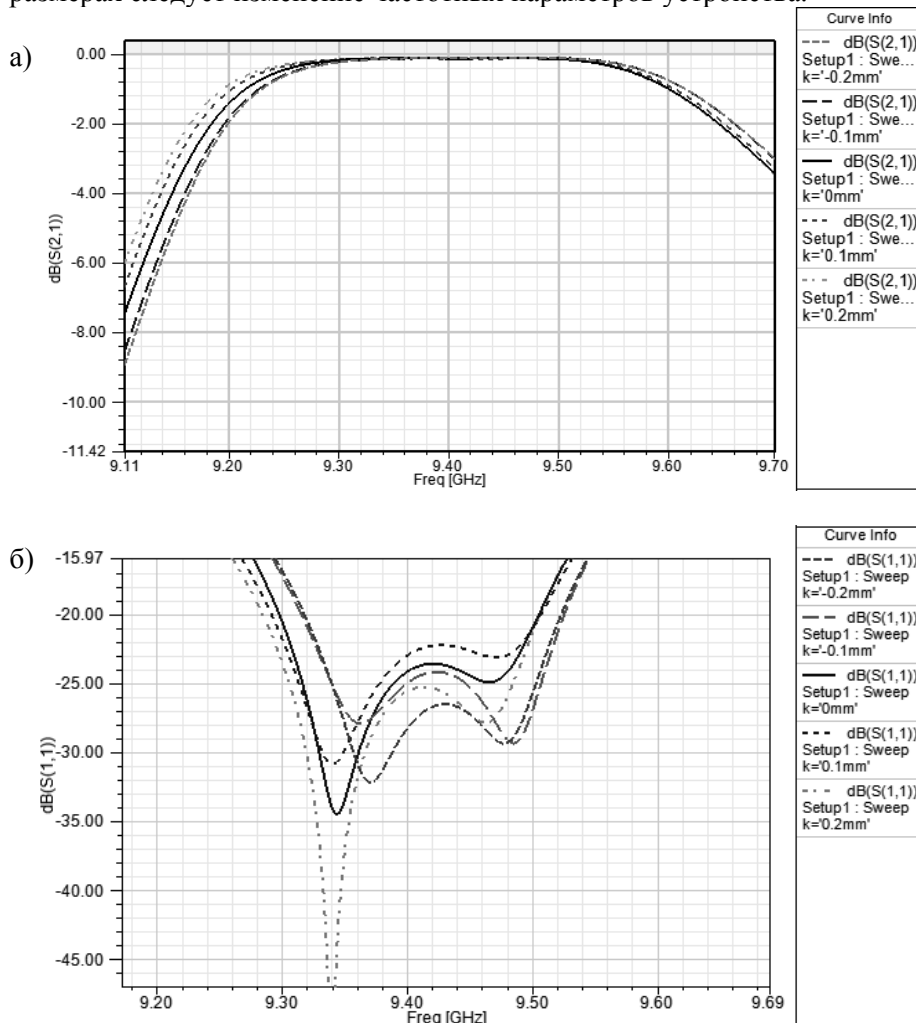


Рис. 4. Результаты моделирования влияния изменения размеров волновода на характеристики фильтра.

Fig. 4. Results of modeling the effect of changing the waveguide size on the filter characteristic

Путем моделирования было установлено влияние изменения размеров волновода на характеристики фильтра.

Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Значения параметров S_{21} , S_{11} и ширины полосы пропускания при различных отклонениях k в размерах стандартного волновода 23×10 мм, полученные в результате моделирования, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования влияния изменения размеров волновода на характеристики фильтра

Ширина a (мм)	Высота b (мм)	S_{21} (дБ) на частоте 9,4 ГГц	S_{11} (дБ) на частоте 9,4 ГГц	Ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ (МГц)
22,8 ($k = -0,2$)	10	$-0,1443$	$-28,2019$	516,1
22,9 ($k = -0,1$)	10	$-0,1510$	$-24,9611$	518,8
23 ($k = 0$)	10	$-0,1520$	$-24,1500$	515,4
23,1 ($k = 0,1$)	10	$-0,1535$	$-22,9620$	532,2
23,2 ($k = 0,2$)	10	$-0,1432$	$-25,5492$	534,4

Влияние отклонений в высоте волновода в табл.1 не представлены, так как они оказывают значительно меньшее влияние на характеристику фильтра, чем отклонения ширины [11].

4. Заключение

В работе представлены результаты моделирования волноводного настраиваемого полосно-пропускающего фильтра в программном пакете ANSYS HFSS. Описан алгоритм анализа структуры исследуемого объекта методом конечных элементов и рассмотрены программные возможности реализации метода в HFSS.

Полученная частотная характеристика фильтра является оптимальной для поставленной задачи по разработке устройства контроля изменения состава воздушной среды.

Также было проведено исследование влияния изменения размеров ширины стандартного волновода 23×10 мм на характеристики фильтра.

Стоит отметить, что даже небольшие отклонения ширины волновода от стандартных размеров вносят заметные изменения в характеристики фильтра. Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что отклонения в ширине стандартного волновода оказывают более сильное влияние на параметр S_{11} , чем на параметр S_{21} , а также, что независимо от уменьшения или увеличения ширины волновода в указанных пределах, ширина полосы пропускания фильтра только увеличивается.

Так, при увеличении ширины волновода на 0,2 мм ширина пропускания увеличилась на 18,9 МГц, при этом значения параметра S_{21} увеличилось на 0,0088 дБ, а значение параметра S_{11} уменьшилось на 1,399 дБ.

Список литературы

1. Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И. Контроль содержания вредоносных газов в воздухе с использованием микроволнового канала связи // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 4. С. 389—398.
2. Широков И. Б., Евдокимов П. А., Широкова Е. И. Система контроля изменения состава воздушной среды // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 1. С. 68—78.
3. Евдокимов П. А., Широкова Е. И., Соколова М. И., Широков И. Б. Экологический контроль атмосферы вблизи транспортных магистралей и промышленных предприятий городов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1–2. С. 392—393.
4. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Пер с англ. под ред. Л. В. Алексеева и Ф. В. Кушнира. М. : Связь, 1971. Т. 1. 440 с. Т. 2. 496 с.
5. Шаров Г. А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. М. : Горячая линия — Телеком. 2016. 640 с.
6. Морозов А. В., Наумов П. Н., Нырцов А. Н. Устройства сверхвысоких частот и антенны. М. : Радиотехника, 2009. 432 с.
7. Григорьева А. Д. Методы вычислительной электродинамики. М. : Физмаилит, 2012. 432 с.
8. Курушин А. А., Титов А. П. Проектирование СВЧ структур с помощью HFSS. Учебное пособие. М. : МГИЭМ, 2003. 176 с.
9. Банков С. Е., Курушин А. А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М. : 2008. 276 с.
10. Банков С. Е., Гутцайт Э. М., Курушин А. А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. М. : ООО «Оркада», 2012. 250 с.
11. Методика проектирования волноводных фильтров с параллельными индуктивными связями резонаторов для выходных каскадов мощных СВЧ усилителей / И. М. Аболдуев, А. С. Аверкин, А. М. Зубков [и др.] // Электронная техника. Серия 2 : Полупроводниковые приборы. 2010. № 2 (225). С. 3—7.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Евдокимов Павел Алексеевич, студент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Широкова Елена Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Information about the authors

Igor B. Shirokov, Professor of Sevastopol state University, Sevastopol, Russian Federation.

Pavel A. Evdokimov, student of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Elena I. Shirokova, student of Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Infocommunications and Radio Technologies, 2021, vol. 4, no. 3, pp. 218–274.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 3. С. 218—274.

ISSN: 2587-9936

УДК 621.37-621.39(091)

Развитие однокаскадных аудионных технологий и патентные разбирательства

Пестриков В. М.

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

Получено: 2 октября 2021 г.

Отрецензировано: 21 ноября 2021 г.

Принято к публикации: 22 ноября 2021 г.

Аннотация: Рассмотрены конструкции первых аудионов и технологии по улучшению их конструктивных и электрических характеристик. Отмечены коммерческие особенности реализации аудионов. Представлено производство коммерческих радиоприемников на одном аудионе и некоторые схемные решения этих устройств, а также их маркетинг. Исследована ситуация вокруг аудиона перед судебными исками к *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company*. Подробно показаны патентные разбирательства между *Marconi Wireless Telegraph Company of America* и *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company*.

Ключевые слова: *Ли де Форест, трехэлектродный аудион, маркетинг аудионов, патентные споры, De Forest Radio Telephone & Telegraph Company, Marconi Wireless Telegraph Company of America.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Развитие однокаскадных аудионных технологий и патентные разбирательства // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2021. Т. 4, № 3. С. 218—274.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Развитие однокаскадных аудионных технологий и патентные разбирательства / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2021. — Т. 4, № 3. — С. 218—274.

Development of Single-Stage Audion Technology and Patent Litigation

V. M. Pestrikov

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

Received: October 2, 2021

Peer-reviewed: November 21, 2021

Accepted: November 22, 2021

Abstract: *The designs of the first audions and technologies to improve their design and electrical characteristics are considered. The commercial features of the implementation of audions are noted. The production of commercial radio receivers on one audion and some circuit solutions of these devices, as well as their marketing are presented. The situation around the audion before the lawsuits against the De Forest Radio Telephone & Telegraph Company was investigated. The patent litigation between the Marconi Wireless Telegraph Company of America and the De Forest Radio Telephone & Telegraph Company is shown in detail.*

Keywords: *Lee de Forest, three-electrode audion, audion marketing, patent litigation, De Forest Radio Telephone & Telegraph Company, Marconi Wireless Telegraph Company of America.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov “Development of Single-Stage Audion Technology and Patent Litigation,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 218–274, 2021. (In Russ.).

1. Введение

Данная статья продолжает историческую хронологию, изложенную в работах [1, 2], от зарождения до продвижения радиоламповых технологий на рынке услуг в начале 20 века. В статье [1] подробно представлены описания экспериментов американского радиотехника Ли де Фореста и его методы научно-технического познания, которые привели к изобретению вакуумной трехэлектродной лампы с небольшим содержанием газа (аудиона). На этом пути де Форест сконструировал и запатентовал двухэлектродную электронную лампу, похожую на вентиль Дж. А. Флеминга, что стало предметом длительного спора между учеными о приоритете изобретения вакуумного диода.

В статье [2] этого цикла исследована история создания Ли де Форестом инновационной системы беспроводного телефона, в которой для приема был использован аудиона, а в передатчике — конденсатор Мосцицкого. Эта разработка позволила де Форесту провести первые эксперименты в области радиовещания. Его радиотрансляция 13 января 1910 г. ознаменовала начало века радиовещания.

В настоящей статье рассмотрено мелкосерийное производство первых конструкций аудионов-детекторов и их коммерческая реализация. Приводятся конструктивные и электрические характеристик различных типов аудионов, которые позволяют оценить их параметры с сегодняшней точки зрения и сравнить их с современными вакуумными триодами. Продвижение трехэлектродного аудиона на радиорынке услуг вызвало противодействие со стороны конкурентов, в частности, компании *Marconi*. Эта конкурентная борьба вылилась в судебные патентные разбирательства между компаниями, которые далее описаны подробно, с привлечением архивных материалов того периода времени.

Де Форест, как ни странно, не придавал должного внимания технологии изготовления аудиона. Производитель аудионов МакКэндлесс использовал различные материалы при их изготовлении, что приводило к большим конструктивным различиям как в размерах, так и в устройстве производимой продукции. Несмотря на то, что трехэлектродный аудион был изобретен Ли де Форестом в 1906 г., десять лет спустя качество ламп, производимых его компанией, все еще оставляло желать лучшего, так как по-прежнему наблюдался большой разброс их основных электрических параметров. Тестировать и оценивать аудионы приходилось индивидуально и «очень редко бывало, чтобы две лампы имели абсолютно одинаковые параметры»¹. Оглядываясь назад, можно сказать, что в целом де Форест не очень хорошо понимал, как работает его изобретение. В частности, он верил в то, что в лампах необходим остаточный газ, а слишком высокий вакуум представляет опасность. Более поздние исследования, как известно, показали, что потоки электронов, которые функционируют в аудионе, обычно лучше всего работают в условиях высокого вакуума. В связи с этим более поздние аудионные лампы были намного более вакуумированными и, следовательно, более стабильными и надежными [4]².

Появившийся на рынке беспроводной телеграфии ламповый трехэлектродный аудион сначала не представлял собой конкуренции другим

¹ Cole A. B. Practical pointers on the audion // QST. 1916. No. 3. P. 41–44.

² Пестриков В. М. Эволюция радиоламповых систем передачи информации : монография. Санкт-Петербург : СПбГИКиТ, 2018. 151 с.

видам детекторов. К 1912 г., благодаря кипучей деятельности де Фореста, направленной на его внедрение в различные технические отрасли, аудион стал заметным радиокомпонентом. Это привело де Фореста и его компанию к конфликту интересов в бизнесе радиотехнической отрасли, в частности, с компанией *Marconi Wireless Telegraph Company of America*. Этот конфликт интересов разрешился только после 29 лет судебных разбирательств.

2. Особенности конструкций аудионов

Ранние конструкции аудионов имели одну сетку и один анод (*single wing*). В первых коммерческих аудионах анод изготовлялся в виде узкой тонкой никелированной пластины или из платины, которая располагалась вблизи нити накала. Нить изготавливалась в виде двух петель из углерода, тантала или вольфрама. Танталовая нить была нестабильной, во время эксплуатации, как правило, деформировалась, и часто замыкалась на сетку. В некоторых образцах аудионов нить накала изготавливалась из чистого вольфрама, подобно электрическим лампочкам накаливания.

Между анодом и нитью накала была установлена сетка, выполненная из толстой проволоки, изогнутой в виде зигзага. Анод и сетка поддерживались на проводах, вплавленных в стекло колбы. Изготавливала эти аудионы для де Фореста все та же компания *H. W. McCandless & Company*.

Нить накала подключалась к резьбовому цоколю конструкции Эдисона, известного как канделябрный колпачок. Контакты сетки и анода присоединялись в верхней части баллона к проводам в шелковой изоляции. Стекланный баллон был выполнен в виде цилиндра высотой примерно $3\frac{3}{4}$ дюйма (9,5 см), рис. 1.

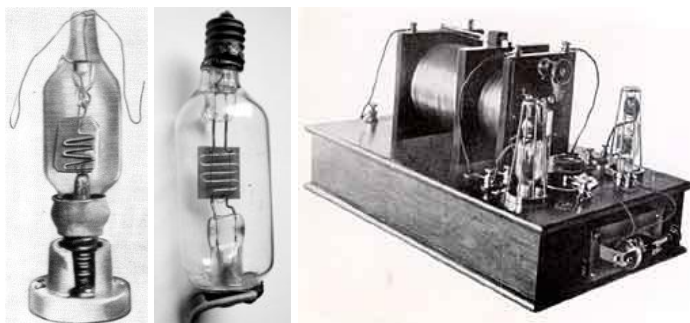


Рис. 1. Аудионы цилиндрической формы и радиоприемник на лампах этого типа. 1907 г.

Fig. 1. Cylindrical audions and a radio receiver on this type of tube. 1907

В 1908 г., по просьбе МакКэндлесса аудионы стали изготавливать сферической формы, рис. 2. Сферическая колба допускала менее трудоемкий монтаж деталей лампы. Для изготовления колб использовались автомобильные стеклянные фонари. Аудион сферической формы имел диаметр 48 мм, а высоту с цоколем — 90 мм.



Рис. 2. Аудион сферической формы с одной нитью накала. 1908 г.

Fig. 2. Spherical audion with one filament. 1908

С 1908 г. с целью увеличения срока службы аудиона в него стали устанавливать две нити накала [3]. Это позволяло продлить срок службы лампы, если перегорала одна из нитей, то использовалась вторая нить. В некоторых более поздних конструкциях аудионов, предназначенных для использования в усилителях большей мощности, обе нити работали одновременно в параллельном включении, рис. 3.

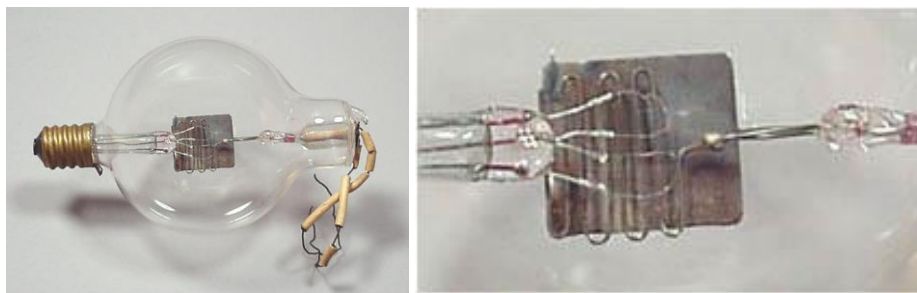


Рис. 3. Аудион сферической формы с двумя нитями накала в виде петель.

Fig. 3. Spherical audion with two filaments in the form of loops

В 1909 г. устройство аудиона несколько изменили, в нем появились соединенные параллельно два анода, а также соединенные параллельно две сетки, рис. 4.

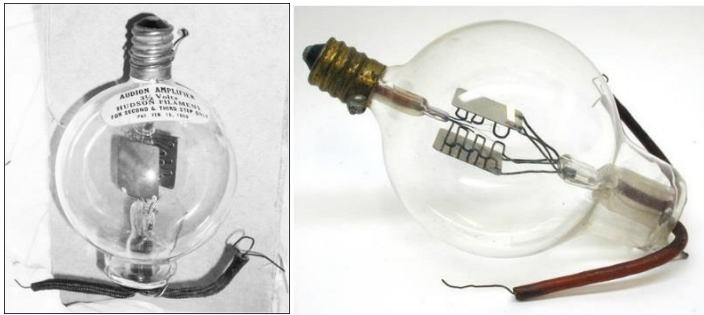


Рис. 4. Двойной аудион сферической формы конструкции де Фореста с двумя нитями накала и двумя анодами. 1909 г.

Fig. 4. DeForest Double-Wing Spherical Audion with two filaments and two anodes. 1909

Это было сделано с целью эффективного использования электронного потока, идущего от нити накала, и повышения коэффициента усиления аудиона табл. 1. Такой аудион получил название «двойной аудион» (*DeForest Double-wing Spherical Audion*).

Табл. 1. Основные характеристики двойного аудиона Ли де Фореста
Table 1. Basic characteristics DeForest Double-wing Spherical Audion

Характеристика аудиона	Значение
Напряжение нити накала (одна нить или параллельное соединение двух нитей)	4,0—4,5 В
Ток одной нити накала	1,0—1,1 А
Напряжение на аноде	~22 В
Анодный ток	меньше 1,0 мА
Напряжение на сетке	–0,15 В

Двойной аудион (*DeForest Double-wing Spherical Audion*) пользовался спросом и продавался по более высокой цене, чем одинарный аудион, табл. 2.

Табл. 2. Прайс-лист продаж аудионов за декабрь 1914 г.
Table 2. Price list of sales of audions for December 1914

Тип нити накала	Сорт качества	Материал нити накала	Цена
Type X Extra Sensitive (selected)	Особо чувствительная (отборная)	Тантал	\$5.00
Type S Regular Grade	Обычный сорт	Тантал	\$3.50
Type X Extra sensitive (selected)	Особо чувствительная (отборная)	нить Хадсона	\$7.50
Type S Regular grade	Обычный сорт	нить Хадсона	\$5.00

Дальнейшим усовершенствованием аудиона стало увеличение термоэлектронной эмиссии нити накала за счет использования для ее изготовления другого материала. Для этого углеродное волокно заменили на тантал, который позволял изготавливать нити накала методом штамповки. Внедрение этого материала в производство было сделано в несколько этапов. В начале МакКэндлесс попытался использовать танталовые нити накала от автомобильных ламп, рассчитанных на низкое напряжение (2 В). Для этого он получил из Германии электрическую лампу с нитью накала из тантала, рассчитанную на питание 110 В. Нить была разрезана на мелкие фрагменты с целью питать нить более низким напряжением. При креплении нити из тантала возникли проблемы, так как материал при нагреве иногда вступал в контакт с другими стержневыми элементами лампы, и, помимо этого, он был очень хрупким.

Примерно в это время (1912 г.) МакКэндлесс пытался изготавливать нити накала из вольфрама. Вольфрам, хотя и имел большую работу выхода электронов (4,52 эВ), чем тантал (4,07 эВ), обладал хорошей механической прочностью и длительным сроком службы. В связи с этим МакКэндлесс попытался совместить преимущества обоих материалов, обернув круглую проволочную вольфрамовую нить мелкими кусочками тантала. Такая композиция материалов работала довольно хорошо, но осуществить подобный технологический процесс было очень сложно.

Однажды в магазин МакКэндлесса зашел его постоянный покупатель аудионов доктор (PhD) Вальтер Хадсон (*Walter G. Hudson*). В беседе с ним МакКэндлесс поделился своими проблемами по конструированию нитей накала. В тот же день Хадсону пришла в голову идея измельчения тантала до порошка, который необходимо смешать со связующим, а затем этим пастообразным составом покрыть вольфрамовую нить. Это было одно из самых удачных практических предложений, направленных на улучшение работы аудиона. Новый тип нити накала для аудионов стал известен как «*Hudson filament*» (нить накала Хадсона) и использовался в течение многих лет де Форестом. Благодаря такой конструкции нить накала имела лучшую термоэлектронную эмиссию и отсутствие коробления танталовой проволоки.

После 1914 г. в аудионах нить накала стали изготавливать из вольфрама; они были более долговечными, чем из тантала. В процессе исследований было выявлено, что вольфрамовые нити накала обладают такими важными свойствами, как постоянство эмиссии при изменении рабочих условий и способностью противостоять бомбардировке положительных ионов, которые всегда, хотя бы в небольшом количестве, присутствуют в

лампах. Последнее обстоятельство оказалось весьма важным при высоких напряжениях между анодом и катодом.

Использование аудиона в коммерческой практике в течение многих лет после его появления в 1906 г. было ограничено. Предпочтение отдавалось карборундовому детектору. Это при том, что при приеме радиостанций аудион был на 50 % более эффективным, чем кристаллический детектор. В семи основных фундаментальных научно-технических монографиях по радиотехнике, опубликованных до 1914 г., общим объемом более 3000 страниц, аудиону было уделено менее одной страницы [4]!

Такая ситуация продолжалась до 1912 г. Лидирующие позиции трехэлектродная лампа аудион заняла после того, как был разработан усилительный каскад на аудионе и открыта обратная связь в ламповом усилительном каскаде.

3. Особенности эксплуатации аудионов

Аудионы стоили очень дорого, имели непривлекательный вид, большой разброс параметров и сложность в эксплуатации. В этот период времени лучше конструкций трехэлектродных ламп, кроме аудиона, не было, и с их недостатками приходилось мириться. Аудионы устанавливались в радиоустройствах цоколем вверх, чтобы при прогибе нити накала предотвратить ее замыкание на сетку или на анод.

Эксплуатация аудиона имела несколько особенностей, о которых говорилось в руководстве по его использованию [5]. Когда нить накала аудиона горит особенно ярко и через цепь наушников проходит ток критической величины, в лампе появляется синее свечение. Свечение указывало на то, что через пустое пространство лампы протекает слишком большой ток. Аудион в этом случае перестает работать. Его рабочее состояние можно было восстановить до чувствительного состояния, если уменьшить ток нити накала или снизить анодный ток, проходящий через цепь наушников. Эти процессы внутри лампы пользователи иногда называют «переливанием через край» (англ. *spilling over*). Аудион может «протекать» (англ. *spill over*), когда работает мощная станция рядом с принимаемой станцией. В такой ситуации от владельца приемника требовался большой опыт, чтобы правильно манипулировать аудионом, а наилучшие результаты могли быть получены только тогда, когда имелись практические навыки. Исходя из приведенного, аудион устанавливался на передней панели радиоустройства для того чтобы радиослушатель мог видеть, как горит нить накала, и при необходимости регулировать ее ток по яркости накала.

Аудион был довольно чувствительным детектором, однако в работе он вел себя нестабильно. Основной причиной этого была некачественная откачка, после которой в колбе оставалось значительное число молекул газа. Электронные лампы с содержанием остаточного газа, как известно, получили название «мягких» ламп. Ли де Форест считал, что наличие газа является необходимым условием для хорошей работы лампы.

На рис. 5 приведена анодная характеристика аудиона [6]. Из нее видно, что при определенном напряжении на аноде происходит быстрое увеличение анодного тока, которое связано с началом ионизации остаточного газа. Наличие гистерезиса также объясняется низким качеством вакуума. Из-за газового разряда чувствительность аудиона уменьшалась с течением времени, из-за чего приходилось перенастраивать режим его работы. При этом лампа иногда светилась ярким синим или фиолетовым цветом.

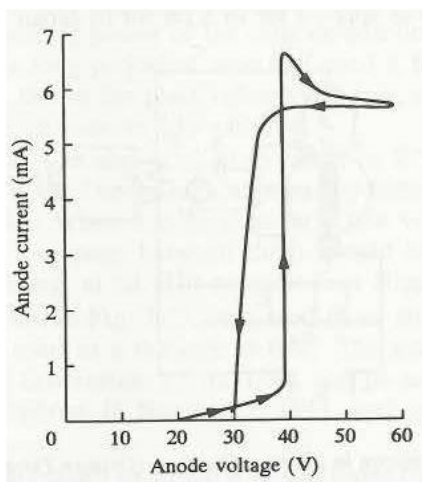


Рис. 5. Анодная характеристика аудиона [6].

Fig. 5. Anode characteristic of the audion [6]

Аудион, кроме плохой откачки воздуха, имел и другие недостатки. Конструктивное расположение электродов в нем было далеко неидеальным. Большая часть электронного потока в этой лампе попадала не на анод, а на стеклянный баллон, заряжая последний и уменьшая тем самым величину анодного тока. Управляющее влияние сетки было недостаточным. Из-за плохой откачки в баллоне лампы содержалось большое количество молекул газа. Молекулы газа подвергались интенсивной ионизации и в виде положительных ионов непрерывно бомбардировали нить накала, что оказывало на нее сильное разрушительное воздействие.

Из-за особенностей аудиона нельзя было повысить его усиление путем увеличения анодного напряжения, которое практически не могло пре-

вышать 50 В. При значительном анодном напряжении в лампе возникала интенсивная ионизация, быстро выводившая из строя ее электроды. Применение в схеме радиоприемника жестких ламп, в свою очередь, наталкивалось на новые трудности, заключавшиеся в том, что вылетающие из нити накала электроны частично оседали на сетке, создавали на ней отрицательный потенциал и в конце концов запирали лампу. И если в мягких лампах этот отрицательный сеточный заряд снимался в результате бомбардировки сетки положительными ионами находившегося в лампе газа, то в лампах с высоким вакуумом это явление отсутствовало, и их дальнейшая эксплуатация становилась невозможной.

Последнюю трудность де Форесту удалось преодолеть путем соединения сетки с катодом большим (порядка 1 МОм) сопротивлением, служившим для отвода отрицательных зарядов и названным «сопротивлением утечки сетки» (англ. *grid-leak*).

4. Производство и продажа аудионов

В 1909 г. компания де Фореста (*De Forest Radio Telephone Company*) выпустила для рынка первую коммерческую трехэлектродную вакуумную лампу (*Audion*) для детектирования и усиления беспроводного электрического сигнала. Эта лампа имела хорошую нить накала и оригинальную этикетку на стеклянной колбе, рис. 6 [7]. На этикетке была надпись: «Запатентована 18 февраля 1908 г.». Покупка нового аудиона осуществлялась взамен вышедшего из строя, и только при условии возвращения сгоревшего аудиона.

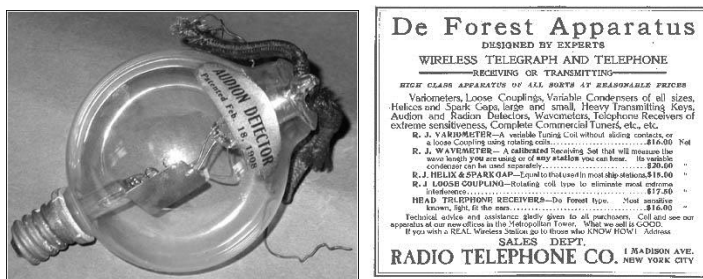
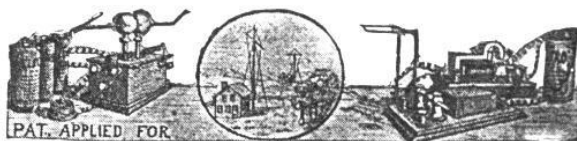


Рис. 6. Первая коммерческая трехэлектродная вакуумная лампа *Audion* и ее реклама в журнале «*Modern-Electrics*» 1909 г. [8]

Fig. 6. Audion's first commercial three-electrode vacuum tube and its advertisement in *Modern-Electrics* magazine in 1909 [8]

Производством аудионов занимался старый знакомый Ли де Фореста — Генри МакКэндлесс из Нью-Йорка, а их продажей с 1911 по 1913 гг. —

Хьюго Гернсбек (*Hugo Gernsback*, 16.08.1884—19.08.1967). Его компания *Electro Importing Company* (Нью-Йорк) продавала по каталогу общедоступные приемо-передающие наборы *Telimco Wireless Telegraph Outfits* (название *Telimco* было аббревиатурой названия компании — *The Electro Importing Company*), специально предназначенные для радиолюбителей, рис. 7. Набор помимо радиодеталей содержал статьи по теории радиотехники и руководство, как самому построить радиоустройство. Это оказалось настолько успешным бизнесом, что в 1908 г. электрический каталог *Electric Import Company* стал первым журналом, посвященным радио и электронике, под названием «*Modern Electrics*» (выходил в 1908—1913 гг.). Девизом журнала было «*The Electrical Magazine for Everybody*» (Электрический журнал для всех).



WIRELESS TELEGRAPH

The "Telimco" Complete Outfit, comprising 1 inch Spark Coil, Strap Key, Sender, Sensitive Relay, Coherer, with Automatic Decoherer and Sounder, 4 Ex. Strong Dry Cells, all necessary wiring, including send and catch wires, with full instructions and diagrams, \$8.50. Guaranteed to work up to one mile. Send for Illust. Pamphlet & 64-page catalogue. **ELECTRO IMPORTING CO., 32 Park Place, New York**

Рис. 7. Хьюго Гернсбек (*Hugo Gernsback*) и реклама *Telimco Wireless Telegraph Outfits*, опубликованная в журнале *Scientific American* 25 ноября 1905 г. [9].

Fig. 7. Hugo Gernsback and an advertisement for Telimco Wireless Telegraph Outfits published in *Scientific American* on November 25, 1905. [9]

Хьюго Гернсбек не просто продавал лампы, как их тогда называли. Электронные изделия были представлены в оригинальной упаковке. Лампа устанавливалась в гнездо, которое крепилось к изоляционной плите. К клеммам на плате подводились провода от электродов лампы, рис. 8. Баллон лампы представлял собой стеклянный шар диаметром 48 мм, а ее высота с цоколем составляла около 90 мм. Такая полная ламповая сборка в то время стоила \$500. Это были ранние конструкции аудионов, которые использовались в радиоприемниках в качестве детектора. И только в 1912 г. де Форест продемонстрировал аудион для усиления электрического сигнала. Потребовалось еще нескольких лет исследований *Western Electric Co.* и другим компаниям, чтобы превратить «мягкий» аудион в вакуумный триод с высоким вакуумом.



Рис. 8. Набор для самостоятельной сборки аудиона компании *Electro Importing Co.* 1911 г.

Fig. 8. A set for self-assembly of an audion by *Electro Importing Co.* 1911

Рекорды продаж *Electro Importing Co.* Аудионов, произведенных компанией МакКэндлесс, составил: в 1911 г. — 104 шт., в 1912 г. — 156 шт. и в 1913 г. — 211 шт. МакКэндлесс в это же время изготавливал аудионы и для компании де Фореста.

Наличие на рынке различных конструкций аудионов позволило наладить выпуск коммерческих конструкций радиоприемников как законченных конструкций, так и наборов для их самостоятельного изготовления.

Один из первых радиоприемников был собран по схеме, приведенной де Форестом в его патенте US879532A от 18 февраля 1908 г. Схема работала в режиме анодного детектирования. Поступавшие из антенной цепи на сетку радиосигналы, продетектированные лампой, прослушивались в телефоне. Схема была далеко не совершенной и обладала, с современной точки зрения, множеством дефектов. К главнейшим из них можно было отнести отсутствие правильно выбранного режима работы лампы и слабое усиление, происходившее оттого, что нужное смещение на сетку не подавалось и рабочий участок ламповой характеристики оказывался выбранным случайно. Батарея анода и телефонные трубки дополнительными емкостями не шунтировались, и на этих элементах создавалось напряжение высокой частоты, снижавшее усиление. Попытки использовать эту схему для последующего усиления продетектированных сигналов также не приносили желаемого результата.

5. Производство коммерческих радиоприемников на аудионе

Одной из первых компаний, выпустивших для продажи в США приемники на аудионе, была *Wallace & Co.* из Нью-Йорка. Компания *Wallace & Co.* была основана Полем Уоллесом (*Paul E. Wallace*) и его компаньоном Мерритт Мошером (*Merritt D. Mosher*). В приемниках *Wallace*

Valve Detector, появившихся в 1911 г., использовался аудион в форме стеклянной трубки с одной анодной пластиной (*Tubular-Single-Plate*), рис. 9.



ANOTHER OPPORTUNITY



TO PROCURE A Wallace Valve Detector AT ONCE Special Bargain Price

For the benefit of those who wished to avail themselves of the REDUCED PRICE of \$12 or \$17, with 4-40 storage battery, but who were not yet prepared to send in the money, we have extended our offer in the July issue to Sept. 15th.
POSITIVELY NO ORDERS filled at the REDUCED PRICE after Sept. 15th.
Folder for 2 cent stamp. (No postals.)
WALLACE & CO.
59 FIFTH AVENUE New York

Рис. 9. Общий вид радиоприемника Wallace Valve Detector, аудион *Tubular-Single-Plate* (1911 г.). Вид радиоприемника без аудиона. Реклама радиоприемника Wallace в журнале *Modern Electrics* 1913 г. [10]

Fig. 9. General view of the Wallace Valve Detector radio, Audion Tubular-Single-Plate (1911). View of a radio receiver without audion. Wallace radio advertisement in *Modern Electrics* magazine 1913 [10]

В декабре 1913 г. Ли де Форест организовал *Radio Telephone & Telegraph Company*, но через 10 месяцев, 3 октября 1914 г., он изменил ее название и компания стала *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company*. Под последним названием компания проработала до 1924 г., после чего стала называться *De Forest Radio Co.*

В конце 1913 г. *Radio Telephone & Telegraph Co.* выпустила свой первый коммерческий радиоприемник *RJ4* в виде конструктора «сделай сам», который представлял собой комплект с трехэлектродной лампой «аудион». Аудион использовался в качестве детектора вместо более распространенного в то время кристаллического детектора. Буквы *RJ* расшифровывались как *Radio Junior*. Первые лампы, проданные с *RJ4 Detector*, были сферическими и содержали двойные подковообразные нити накала, одну сетку и анод в виде одной металлической пластины типа “wing” (крыло).

Набор предназначался для радиолюбителей, а также для экспериментальных исследований. Это была копия подобного радиоприемника компании *Wallace & Co.*, которая к этому моменту перестала существовать.

Набор *RJ4* не был полноценным приемником, а представлял собой деревянный ящик, в котором размещались батареи *A&B* для аудиона и переключатель с контактами для подключения необходимого напряжения от гальванической батареи.

В этой ранней конструкции приемного радиоустройства *RJ4* на аудионе для подбора напряжения на его управляющей сетке использовался трехпозиционный переключатель, который подключался к анодной батарее. Позже, в усовершенствованной конструкции *RJ4*, для этих целей использовался уже переключатель на 5 положений. Еще более поздняя версия этого приемника *RJ4* содержала еще один переключатель на пять положений для регулировки высокого напряжения на аноде лампы.

На передней части корпуса устанавливался аудион ранней конструкции либо трубчатый аудион, а позже — сферический аудион. Корпус и трехэлектродная лампа продавались вместе. Внутри корпуса выходная лампа соединялась проводами с контактами антенны и наушников. Во второй версии *RJ4*, вышедшей в начале 1914 г., реостат нити накала был размещен справа от встроенного переключателя. Более поздняя версия имела гнездо для лампы сферического аудиона и получила название: «улучшенный тип *RJ4* детектора», рис. 10.



Рис.10. Общий вид конструктора для самостоятельной сборки детекторного радиоприемника типа *RJ4* на аудионе и его принципиальная схема. 1913 г.

Fig. 10. General view of the designer for self-assembly of the *RJ4* type detector radio receiver on audion and its schematic diagram. 1913

В 1914 г. завод *De Forest Radio Telephone & Telegraph Co.* выпустил первый коммерческий радиоприемник типа *RJ6* на одном *Audion De Forest*, рис. 11. В радиоприемнике аудион был установлен вершиной стеклянной колбы вниз. Это было сделано с целью не допустить провисания нити накала и предотвратить ее касание с управляющей сеткой лампы. Аудион одновременно выполнял функции детектора и усилителя радиосигнала.

Нужно отметить, что чувствительность приемного устройства *RJ6*, ввиду несовершенства конструкции вакуумного триода, сильно зависела от

величины приложенного анодного напряжения. Поэтому на передней панели приемника в верхней ее части посередине находился многопозиционный переключатель для корректировки анодного напряжения в пределах около 20—30 В. Другой переключатель, в нижней части приемника, использовался для установки требуемого тока нити накала при напряжении 4—6 В. Аккумуляторной батареи на 4 В и емкостью 40 А×ч обычно было достаточно для работы нити накала аудиона. Одной зарядки батареи хватало для питания нити накала в течение 100 часов. Справа на лицевой панели находилась большая шкала настройки с ручкой для поиска радиостанций в диапазоне от 200 до 1600 м. Для прослушивания радиостанций использовались наушники.

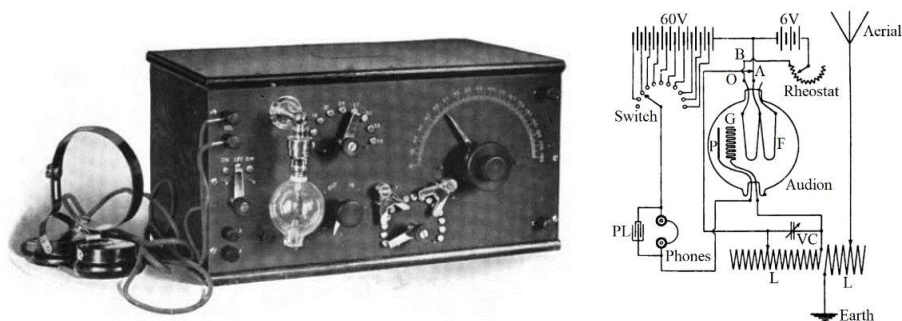


Рис. 11. Детекторный радиоприемник типа *RJ6* на аудионе и его принципиальная схема. 1914 г.

Fig. 11. A detector radio receiver of the *RJ6* type on Audion and its schematic diagram. 1914

Радиоприемник *De Forest Audion RJ6* стоил около \$20 в 1915 г., в сегодняшних деньгах его стоимость составила бы \$500! [7]. Это был лучший коммерческий приемник, произведенный в то время. Его дороговизна объясняется по-видимому тем, что он выпускался в небольшом количестве. Используемые в нем аудионные лампы требовали деликатного с ними обращения, были ненадежными и очень капризными в работе. Покупателями приемника *RJ6* были радиолюбители, экспериментаторы, сотрудники университетов и военные. Многие любители той эпохи использовали лампу *Audion* в самодельных регенеративных приемниках по схеме Армстронга.

В 1916 г. компания де Фореста с целью снижения стоимости устройства начала продажи сборок радиоприемника *RJ9* в виде панели без корпуса, рис. 12. Невзирая на это, приемник типа *RJ9* стоил \$28. Это было очень дорогое радиоприемное устройство. Все элементы управления этого приемника располагались на передней панели размером 33 × 12,7 см. Для изготовления панели использовался материал из красного дерева. Все металлические части приемника имели покрытие из латуни.

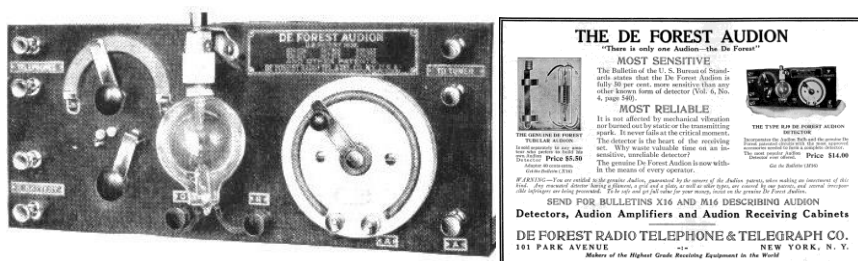


Рис. 12. Детекторный радиоприемник типа RJ9 на аудионе (1916 г.) и реклама вакуумной лампы Audion в журнале *The Electrical Experimenter*. 1916 г. [11].

Fig. 12. A detector radio of the RJ9 type on the Audion (1916) and an advertisement for the Audion vacuum tube in *The Electrical Experimenter* magazine. 1916 [11]

Лицензия на продажу радиоприемника RJ9 была зарегистрирована только для любительского и частного использования. К этому времени Ли де Форест продал патентные права на аудион для использования его в коммерческих радиоприемниках на территории США. Тем не менее, компания де Фореста сохранила за собой право на продажу аудионов для некоммерческого использования, хотя изначально предполагалось ограничить их продажу для увеличения прибыли.

Продажа первых радиоприемников Ли де Фореста имела некоторые особенности. Покупатель должен был сначала купить блок, который включал вакуумную лампу Audion (анодное напряжение 50 В, напряжение накала катода 6 В), а потом уже детекторный приемник для аудиона типа RJ9, рис. 12. В рекламе вакуумной лампы Audion в августе 1916 г. [11] указано, что он может использоваться экспериментаторами-любителями, а также коммерческими компаниями для создания первых усилительных радиоприемников, рис. 12. Ко времени появления этой рекламы улучшенные версии трехэлектродной радиолампы продавались *General Electric* и другими производителями, благодаря усилиям де Фореста по рекламе особенностей своего продукта.

Приемники Ли де Фореста на одном аудионе работали удовлетворительно только в том случае, если удавалось с помощью регулировок подобрать требуемые напряжения на аноде, нити накала и смещение на сетке лампы. Со сложностью эксплуатации аудионных приемников приходилось мириться, так как тогда еще не было альтернативных устройств. Один каскад на аудионе не имел достаточной звуковой мощности, необходимой для подключения громкоговорителя, поэтому для прослушивания радиостанций использовались наушники.

Сначала вакуумный триод использовался в качестве детектора и усилителя, но в дальнейшем стал основой генераторов высокой частоты. На аудионах были сделаны первые усилители электрических токов. Благодаря аудионному усилителю удалось подключить к радиоприемнику громкоговоритель и слушать передачи целой аудитории, в то время как детекторный приемник позволял слушать на наушники и только при полной тишине.

6. Ситуация вокруг аудиона перед судебными исками к *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company*

В 1897 г. итальянский радиотехник Гульельмо Маркони (*Guglielmo Giovanni Maria Marconi*, 26.04.1874—20.07.1937) вскоре после получения британского патента GB189612039 на свою беспроводную технологию основал в Лондоне компанию *Wireless Telegraph & Signal Company*, рис. 13. В целях расширения своей деятельности по всему миру был создан список дочерних компаний, обладающих региональными правами на патенты Г. Маркони. Компания *Marconi Wireless Telegraph Company of America* (сокращенно *MWTCA*, или обычно называемая *American Marconi*) была зарегистрирована в Нью-Джерси (*New Jersey*) 8 ноября 1899 г. как первая дочерняя компания. Этой компании было предоставлено «исключительное право использовать и эксплуатировать патенты Маркони в Соединенных Штатах Америки, на Гавайских островах, Филиппинских островах, Кубе, Пуэрто-Рико, Аляске и Алеутских островах». Сначала приоритетом компании была организация беспроводной связи между кораблями на море и с берегом.

По мнению руководителей компаний Маркони, они были единственными законными поставщиками радиосвязи, поскольку они утверждали, что все их конкуренты предоставляли услуги связи низкого качества, которые к тому же нарушали патенты Маркони. Следуя стандартной политике Маркони, до 1912 г. его компании не продавали оборудование, а сдавали в аренду, поставляя его только тем операторам, сотрудники которых лояльно относились к компании. Самым противоречивым правилом компании на раннем этапе было следование положению, согласно которому береговые и судовые станции Маркони, за исключением чрезвычайных ситуаций, отказывались общаться с судами, использующими радиооборудование, произведенное другими компаниями. Это нежелание связываться с другими системами радиосвязи в конечном итоге было запрещено.

После ухода из *United Wireless Telephone Co.* в 1907 г. де Форест остался владельцем патентов на аудион и создал новое предприятие *De*



Рис. 13. Гульельмо Маркони. Сертификат акций *Marconi Wireless Telegraph Company of America*. Беспроводная станция Маркони возле гостиницы, Белмар, Нью-Джерси (1914 г.).

Fig. 13. Guglielmo Marconi. Marconi Wireless Telegraph Company of America – Stock Certificate. Hotel at Marconi Wireless Station, Belmar, NJ (1914)

*Forest Radio Telephone Company*³. Основным конкурентом новой компании была компания *American Marconi*, которая не имела доступа к патентам де Фореста. У компании де Фореста не было достаточных средств, чтобы составить ей конкуренцию на рынке беспроводной телефонии. Более того, аудион был капризным, хрупким и дорогим устройством. Хотя в целом он считался наиболее чувствительным из доступных детекторов, но его иногда также рассматривали как лабораторную диковинку, непригодную ни для коммерческих, ни для промышленных целей.

В статье инженера *American Marconi* Элмера Бухера (*Elmer E. Bucher*) [12] отмечалось:

«Хотя клапан *Fleming* не так чувствителен, как *Audion*, то есть не позволяет получить такую же интенсивность сигналов, которую производит *Audion* в аналогичных условиях, — тем не менее его не так сложно отрегулировать, и он, по-видимому, имеет более длительный срок службы. Следовательно, с точки зрения коммерческой практики, клапан Флеминга является более предпочтительным из этих двух ламп». Ламповый усили-

³ *De Forest Radio Telephone Co.* просуществовала до декабря 1913 г., потом была преобразована в *Radio Telephone & Telegraph Co.* Через 10 месяцев, 3 октября 1914 г., название компании изменили, и она стала называться *De Forest Radio Telephone & Telegraph Co.* Под последним названием компания проработала до 1924 г., после чего стала называться *De Forest Radio Co.*

тель, по мнению Элмера Бухера, является более или менее «лабораторным» устройством, представляющим значительный научный интерес. При этом он отметил, что коммерческое оборудование не должно быть загромождено подобными «лабораторными» приборами, так как аппарат должен обеспечивать простоту обращения, быструю настройку и защиту от потери чувствительности.

American Marconi не видела в аудионе угрозу для своего основного бизнеса и не считала его подходящим для коммерческой эксплуатации и поэтому не предпринимала никаких действий для защиты своих интересов в течение почти восьми лет после его изобретения.

MWTC была не единственной компанией, которая пренебрегала использованием аудиона в своих радиоустройствах. Даже в руководстве по беспроводной телеграфии для военно-морских электриков США, выпущенному в 1911 г., упоминается об аудионе как не основном детекторе для всех военных приемников [13]: «В настоящее время широко используются только два типа детекторов: кристаллические или выпрямительные детекторы и электролитические. Когереры и микрофоны практически устарели, и было установлено сравнительно немного магнитных и аудионных или клапанных детекторов. Все типы используемых детекторов являются самовосстанавливающимися. Вообще говоря, все они должны быть включены в разомкнутую цепь до подачи сигнала, чтобы уберечь их от поломок из-за наведенных потенциалов и токов».

К 1914 г. *American Marconi* начала замечать изменение ситуации вокруг аудиона, в частности, продвижение его на рынке услуг в области радиовещания и дальней проводной телефонной связи. Это заставило компанию Маркони действовать, и в середине 1914 г. она подала иск в суд на *De Forest Radio Telephone Company* за нарушение патента Флеминга. Судебный процесс против де Фореста, возможно, должен был стать естественной эволюцией в новой и агрессивной политике судебных исков против потенциальных нарушителей, инициированной Годфри Айзексом⁴ (*Godfrey Charles Joseph Isaacs*, 22.07.1866—17.04.1925), когда он стал управляющим директором *British Marconi* в январе 1910 г., рис. 14.

До прихода Годфри Айзекса политика *British Marconi* была сформулирована его предшественником Катбертом Холлом (*Henry Cuthbert Hall*, 1879—1938) и представляла собой сочетание секретности, патентования, осторожного раскрытия экспериментальных результатов и отчетов об экс-

⁴ Годфри Айзекс приумножил финансовое состояние компании и проработал управляющим директором дольше, чем кто-либо другой, более четырнадцати лет, пока в ноябре 1924 г. он был вынужден уйти в отставку из-за слабого здоровья.

периментальных площадках и деятельности. [14] Эта политика защищала компанию от судебных разбирательств в течение примерно десяти лет. Холл отдавал приоритет важности эксклюзивных контрактов с государством, а не стремлению к монополистическим режимам с помощью основных патентов [14, р. 99]. Он настаивал на том, что тесные отношения с Почтовым ведомством и британским военно-морским флотом обеспечат компании место как на британском рынке, так и в колониях. Это его видение разделял и Г. Маркони [15].

Сменивший К. Холла новый управляющий директор поставил во главу политики компании создание монополий посредством юридических действий по защите корпоративной интеллектуальной собственности. Именно под влиянием Годфри Айзекса первым действием *British Marconi* стала подача иска в суд Англии к *British Radio Telegraph and Telephone Company* за нарушение патента GB19007777A⁵ [16], выданного *Marconi's Wireless Telegraph Company* 26 апреля 1901 г. В патенте была представлена система беспроводного телеграфа с элементами настройки на принимаемую частоту, в которой использовались контуры с переменной индуктивностью на передающей и приемной антеннах.

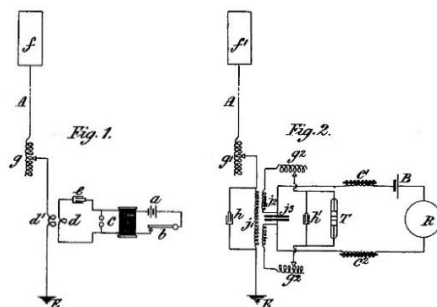
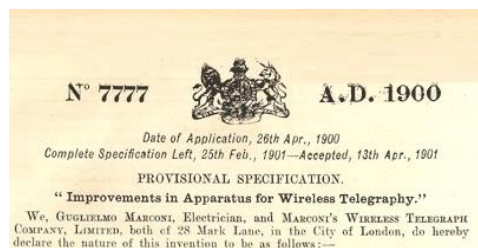


Рис. 14. Патент Маркони GB7777A. Принципиальная схема системы беспроводной телеграфии, приведенная в этом патенте. Гульемо Маркони и Годфри Айзекс.

Fig. 14. Marconi Patent GB7777A. A schematic diagram of a wireless telegraphy system shown in this patent. Gulemo Marconi and Godfrey Isaacs

⁵ Американской версией патента GB7777 1904 г. является патент США № 763772, который был признан недействительным в знаменитом решении Верховного суда 1943 г.

Успешный исход этого судебного процесса побудил Маркони подать в суд на *United Wireless Telephone Co.* в США в 1911 г. за нарушение того же патента. У *United Wireless* не было защиты, и, ослабленная уголовным преследованием ключевых должностных лиц, она была вынуждена признать себя виновной. Активы *United Wireless* были поглощены *American Marconi* в 1912 г., что сделало ее крупнейшей беспроводной компанией в Америке.

Судебный процесс против Национальной электрической сигнальной компании (*National Electric Signal Company*, сокращенно *NESCO*) начался 3 мая 1912 г., за которым быстро последовал второй иск 23 мая 1912 г. Решение было вынесено 19 марта 1914 г., в котором законность патентов Маркони была подтверждена [17]. Маркони охарактеризовал это решение как «величайшую победу» (*sweeping victory*). Сообщая акционерам результаты этого судебного разбирательства на годовом собрании 20 апреля 1914 г., Маркони сделал следующее заявление: «Я могу заявить далее от имени директоров, что сейчас активно ведутся дела, чтобы привести всех нарушителей к условиям, которые будут отвечать наилучшим интересам акционеров этой компании». Поскольку в то время *De Forest Radio Telephone and Telegraph Company* была единственной значимой беспроводной компанией в Америке, то это заявление стало предвестником иска против де Фореста в конце 1914 г.

В 1913 г. Армстронг открыл схему регенеративного детектора, для которой требовался вакуумный триод типа аудиона. Использование регенеративного детектора позволило значительно повысить чувствительность приемника на одном аудионе при небольшом его усложнении и незначительных дополнительных денежных затратах. Радиолюбители начали собирать приемники по схеме Армстронга с использованием аудиона еще до выдачи самого патента 6 октября 1914 г. Этот факт был хорошо известен *American Marconi*. Об этом говорит собственная публикация Маркони о любительской станции, использующей схему Армстронга (рис. 15), для записи сигналов со станции Сейвилл (*Sayville*) в интересах правительства США в середине 1915 г. [18].

Для *American Marconi* стало очевидным, что компания может оказаться в очень невыгодном положении, если ее коммерческие конкуренты по беспроводной связи получают доступ к аудиону и цепи Армстронга. Предотвратить использование регенеративного приемника Армстронга конкурентами уже было бы достаточно веской причиной для того, чтобы *American Marconi* инициировала судебный иск против аудиона как важной составляющей части цепи Армстронга в то время.

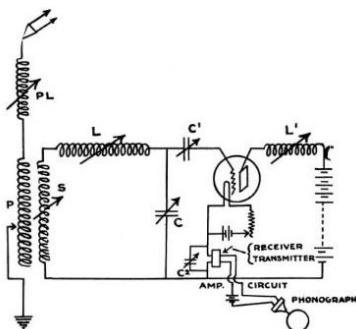


Рис. 15. Принципиальная схема регенеративного приемника Армстронга для записи сигналов со станции Сейвилле [18].

Fig. 15. Schematic diagram of Armstrong's regenerative receiver for recording signals from the Sayville station [18]

шения радиоприема, достигаемого с помощью использования различных аудионных схем.

В начале 1914 г. в статье, опубликованной в журнале *The Wireless Age* Элмер Бухер отметил [19], что может существенно увеличить эффективную дальность действия передатчика мощностью 2 кВт в море до 900 миль с двумя аудионами, один из которых действует как *детектор*, а другой как *усилитель звука*. Примерно в это же время компания *American Marconi* начала использовать аудион в своих коммерческих приемниках и при этом нарушила патенты де Фореста, что было позже признано ими в суде. Вполне возможно, что Маркони надеялся, что судебный процесс против де Фореста за нарушение патента Флеминга предоставит ему права на трехэлектродный аудион через переговоры о возмещении ущерба, причиненного восьмилетним нарушением прав, который мог оказаться значительным.

7. Marconi Wireless Telegraph Company of America против De Forest Radio Telephone & Telegraph Company

Маркони после почти восьмилетнего затишья в отношении соответствующих патентных прав на аудион, решил лишить прав *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company* по его использованию. Агрессивные действия Маркони начал летом 1914 г. с того, что нанял адвокатов из юриди-

К тому же судебный процесс мог быть косвенным результатом поглощения Маркони активов *United Wireless Telephone Co.*, в том числе ряда судовых станций беспроводной связи. Использование аудиона позволило бы значительно увеличить радиус действия многочисленных судовых станций, унаследованных Маркони от *United Wireless*, и, несомненно, уменьшило бы количество береговых станций, необходимых для связи с этими новыми станциями. В подтверждение этого предположения следует отметить, что вскоре после приобретения активов *United Wireless* компания *American Marconi* отправил своего сотрудника Элмера Бухера в море для количественной оценки улуч-

ческой конторы *Sheffield & Betts* и отправил их к руководству *De Forest Radio Telephone & Telegraph Co.* Адвокаты предложили компании де Фореста предоставить компании Маркони неограниченную лицензию по патентам аудиона в обмен на лицензию по патенту Флеминга на клапан. Предложенное соглашение о перекрестном лицензировании указывало на то, что Маркони был больше заинтересован в получении прав на использование аудиона, и его мало беспокоила конкуренция со стороны *De Forest* с его аудионом в коммерческих разработках или государственных контрактах. Это не особенно удивляет, поскольку большая часть бизнеса де Фореста заключалась именно в продаже аудионов как компонентов детектора или приемника, в то время как большая часть бизнеса Маркони заключалась в аренде и эксплуатации коммерческих каналов связи, а не в продаже радиоламп или оборудования.

Компания Маркони вскоре после отвергнутого предложения о перекрестном лицензировании подала первый иск к компании де Фореста в Федеральный суд Южного округа Нью-Йорка⁶ (*District Court, S. D. New York*). Иск касался нарушения патентов Маркони US763772 и Лоджа US609154 для беспроводного телеграфного аппарата. В нем были претензии не только к компании де Фореста, но и к компании *Standard Oil* из Нью-Йорка. Компания де Фореста поставила беспроводную аппаратуру для морских судов компании *Standard Oil*, которая содержала цепи селекции сигнала в приемнике и передатчике. Эти цепи были построены по схемам, приведенным в патентах Маркони (рис. 14) и Лоджа, что и стало поводом для подачи судебного иска компанией Маркони. Рассмотрение иска состоялось 12 ноября 1914 г. Заслушав истца и ответчика, окружной судья Хаф (*Hough*) [20] сказал: «Мне кажется, что было бы (в известных случаях) уместно дать здесь предварительный судебный запрет только на том основании, что аппаратура, продаваемая и используемая ответчиками, способна нарушить авторские права, в частности, при обычном использовании операторами она может быть настроена таким образом, что произойдет нарушение». В результате ходатайства компании Маркони о предварительном судебном запрете было удовлетворено. После этого де Форест быстро подал апелляцию, которая 12 мая 1915 г. была отклонена судьей П. Курином (*P. Curiam*): «Мы не считаем необходимым добавлять что-

⁶ Федеральный окружной суд Южного округа Нью-Йорка (англ. *United States District Court for the Southern District of New York, S.D.N.Y.*) — федеральный окружной суд США, рассматривающий по первой инстанции дела в южном судебном округе штата Нью-Йорк. Будучи в числе первых созданных федеральных судов, Федеральный окружной суд Южного округа Нью-Йорка считается одним из старейших и самых значимых окружных судов страны.

либо к обсуждению на данном этапе дела. С учетом имеющихся фактов, судья Хаф совершенно правильно удовлетворил предварительный судебный запрет» [20, р. 273]. Суд оставил в силе решение о возмещении де Форестом финансового ущерба компании Маркони из-за неправомерного использования ее американских патентов US763772 и US609154.

Маркони, узнав об удачных сделках де Фореста по маркетингу аудиона, решил подать очередной судебный иск к компании *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company* и Ли де Форесту в нарушении патента Флеминга US803684 по двум пунктам. Заседание Федерального суда Южного округа Нью-Йорка по рассмотрению иска Маркони и встречных исков де Фореста состоялось 20 сентября 1916 г. [21].

8. Судебные разбирательства между *Marconi Wireless Telegraph Company of America* и *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company*

По словам правительственного аналитика Патентного отдела ВМС США Карла А. Ричмонда (*Carl A. Richmond*) и Маркони, и де Форест быстро согласились с тем, что схема де Фореста потенциально нарушающая авторские права, имеет вид, показанный на рис. 16. Согласно запискам Маркони, эта схема соответствовала той, которую де Форест продавал с его приемниками и блоками управления на аудионах.

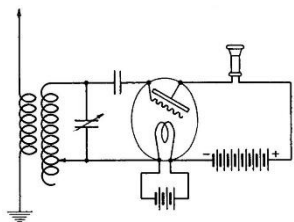


Рис. 16. Маркони утверждал, что трехэлектродный аудион де Фореста с сеткой нарушал права на клапан Флеминга, когда он использовал аудион в качестве детектора в конфигурации, показанной здесь.

Fig. 16. Marconi argued that de Forest's three-electrode Audion with grid violated the Fleming valve when he used the Audion as a detector in the configuration shown here

Претензии по нарушению патентных прав, поданные истцом *American Marconi* как против де Фореста как физического лица, так и против его компании, были относительно простыми — нарушение пунктов 1 и 37 патента Флеминга US803684 со стороны аудиона при использовании его в качестве детектора [21, р. 950—951]:

«1. Комбинация вакуумного сосуда, двух проводников, расположенных рядом, но не соприкасающихся друг с другом в сосуде, средства для нагрева одного из проводников и цепи вне сосуда, соединяющей два проводника.

37. На приемной станции в системе беспроводной телеграфии, использующей электрические колебания высокой частоты, детектор содержит вакуумный сосуд, два проводника, расположенных рядом, но не соприкасающихся друг с другом в сосуде, средство для нагрева одного из проводников, цепь снаружи сосуда, соединяющую два проводника, средство обнаружения, постоянный ток в цепи и средство для воздействия на цепь принятых колебаний».

Де Форест отверг все обвинения в нарушении прав, и, чтобы противостоять нападению Маркони, ответил встречным иском, который позже апелляционный судья охарактеризовал как «практически отдельное действие». Судебный процесс набирал обороты, пути назад уже были отрезаны, а о переговорах никто не помышлял.

9. Апелляция *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company*

De Forest Radio Telephone & Telegraph Company без особых трудностей обнаружила, что трехэлектродный аудион широко, но тайно, используется в сверхчувствительных приемниках на различных важных станциях Маркони. После этого де Форест быстро подал встречный иск к компании Маркони, утверждая, что клапан Флеминга нарушает девять его патентов.

В начале судебного разбирательства адвокаты Маркони признали законность иска и судебное решение в соответствии с патентами на трехэлектродный аудион, но, тем не менее, *American Marconi* продолжала их производить и использовать. Маркони признал решение по некоторым претензиям двух патентов на трехэлектродный аудион де Фореста (US841387 и US879532), а де Форест отказался от выдачи патента на двухэлектродный аудион US837901.

Из семи оставшихся патентов встречные иски, относящиеся к четырем патентам на детекторы пламени (US979275 и отдельные патенты US867876, US867877 и US867878), были гораздо более обширными, чем два патента на двухэлектродный аудион (US824637 и отдельный патент US836070) и один патент на трехэлектродный аудион (US841386), табл. 1.

Маркони признал правоту Фореста в отношении некоторых претензий в патентах на три электрода, и они были исключены из судебного разбирательства.

Особую озабоченность у Маркони должен был вызывать пункт 18 патента де Фореста US867876: «Устройство, реагирующее на колебания, содержащее емкость, два отдельных электрода, заключенных в указанную емкость, электрические средства, посредством которых газовая среда,

находящаяся между электродами, поддерживается в состоянии молекулярной и ионной активности и средства для создания электрических колебаний в указанной газовой среде».

Табл. 1. Патенты де Фореста, которые были нарушены компанией *American Marconi* [21, p. 943].

Table 1. De Forest's patents infringed by *American Marconi* [21, p. 943]

№	Номер патента и наименование	Пункты претензий в формуле изобретения	Дата приоритета и подача дополнительной заявки	Дата публикации
1.	US979275 «Устройство, реагирующее на колебания»	8,16,20,29,35	02.02.1905	20.12.1910
2.	US867876 «Устройство, реагирующее на колебания»	3,4,5,6,7,14,18	Первоначальная заявка 02.02.1905 Дополнительная заявка 04.04.1906	08.10.1907
3.	US867877 «Устройства обнаружения колебаний»	4	Первоначальная заявка 02.02.1905 Дополнительная заявка 12.06.1907	08.10.1907
4.	US867878 «Детектор колебаний»	2	Первоначальная заявка 02.02.1905 Дополнительная заявка 12.06.1907	08.10.1907
5.	US824637 «Устройство, реагирующее на колебания»	8	18.01.1906	26.06.1906
6.	US836070 «Устройство, реагирующее на колебания»	5,6,7,8	Первоначальная заявка 18.01.1906 Дополнительная заявка 19.05.1906	13.11.1906
7.	US841386 «Беспроводная телеграфия»	1,2,3,13,15,20,21	27.08.1906	15.01.1907

Встречные иски, относящиеся к более поздним патентам де Фореста US824637, US836070 и US841386, были по большей части ограничены использованием Маркони клапана Флеминга в цепи с внешней батареей «В» между электродами, чего не было в патенте Флеминга. Схема с клапаном Флеминга, использованная Маркони, который, как утверждал де Форест, нарушала его патенты, представлена на рис. 17. Эта схема использовалась в приемниках с клапаном Флеминга, которые стали обычным оборудованием на большинстве важных наземных станций Маркони и которые также устанавливались, начиная с 1912 г., на трансатлантических пароходах [19].

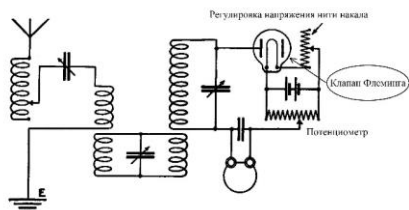


Рис. 17. Де Форест утверждал, что Маркони нарушал права на аудион де Фореста, когда он использовал клапан Флеминга в показанной здесь конфигурации.

Fig. 17. De Forest argued that Marconi violated de Forest's Audion rights when he used the Fleming valve in the configuration shown here

American Marconi Co. была явно обеспокоена содержанием патента Флеминга US803684 из-за его чрезмерно широких притязаний, которые

включали не только выпрямление радиочастот, что было реальной сущностью и целью изобретения, но также выпрямление низких частот, что дублировало текст, содержащийся в оригинальном патенте Эдисона.

В попытке исправить эту ситуацию *American Marconi Co.* подала заявление об отказе от ответственности в патентное ведомство до того, как началось испытание, чтобы ограничить область действия патента детектором радиочастотных волн следующим образом [22]:

«К комбинации элементов, изложенных в пунктах 1—6 включительно и 10—15 включительно соответственного указанного Патентного письма, за исключением случаев, когда они используются в связи с высокочастотными переменными электрическими токами или электрическими колебаниями, использующимися в передаче волн Герца, и к словам в спецификации: «будь то низкочастотны или» (*whether of low frequency or*) на странице 2, строки 32 и 33; «либо» (*either*), на странице 2, строка 98; и «или низкочастотные переменные токи» (*or low-frequency alternating currents of*) на странице 2, строки 98 и 99».

Сам судебный процесс длился очень долго и был беспрецедентным в истории науки и техники. Во время него был рассмотрен большой объем экспертных показаний и демонстраций различных конструкций аудионов по патентам де Фореста, которые специально для этого были изготовлены. Судья был возмущен «запутыванием экспертов, которые в некоторой степени запутались, так что можно было, выбрав замечания, сделанные экспертами с обеих сторон, достаточно убедительно выступить против этой стороны». Ключевой технический вопрос заключался в том, принципиально ли отличается принцип работы аудиона от принципа работы клапана Флеминга. Де Форест убеждал в том, что для аудиона требуется газ, который ионизируется при нагревании, тогда как клапан Флеминга нуждается только в вакуумном пространстве, через который электроны пролетают от накаливаемого излучателя на собирающую пластину — анод. Маркони настаивал на том, что принцип работы аудиона такой же, как у клапана Флеминга, и что он работает вопреки газу, а не благодаря ему.

Готовясь к судебному разбирательству, инженеры Маркони провели большое количество экспериментов, которые включали широкий спектр конфигураций и материалов нагреваемых электродов, солей для пламени, конфигураций вакуумных ламп, ламповых электродов и нитей накала, типов газов и уровней вакуума по патентам де Фореста. В феврале 1916 г. часть из этого материала была представлена Суду в виде довольно насыщенной демонстрации «аудионов пламени», двухэлектродных аудионов и трехэлектродных аудионов с внешней контрольной сет-

кой для доказательства своих утверждений о нарушении патентов Маркони. Эти демонстрации, безусловно, повлияли на исход судебных решений и представляют даже сейчас большой интерес для специалистов беспроводных технологий и историков науки и техники, потому что они, по видимому, были единственными когда-либо реально произведенными для количественной оценки и прямого сравнения чувствительности многочисленных конфигураций аудиона. Во время демонстрации клапан Флеминга также сравнивали с чувствительным беспроводным кристаллическим детектором типа перикон (*perikon*) при тех же условиях, что и для аудионов Фореста. Результаты этих демонстраций никогда не регистрировались и не публиковались, но они задокументированы в стенограмме судебного разбирательства [22, р. 47].

Во всех случаях основной подход заключался в том, чтобы: 1) генерировать РЧ-сигнал с помощью схемы зуммера того типа, который используется для настройки кристаллического детектора в коммерческих приемниках, 2) передавать сигнал на входной настраиваемый колебательный контур части радиосхемы, которую можно настроить на частоту возбуждения, 3) подключить тестируемый детектор к клеммам, предусмотренными для этой цели, и количественно определить результирующий выпрямленный сигнал, появляющийся в наборе стандартных наушников параллельно с измерителем слышимости, и 4) при необходимости варьировать параметры для количественной оценки изменений чувствительности детектора.

Согласно показаниям главного инженера *American Marconi Co.* Роя Виганта (*Roy Alexander Weagant*, 29.03.1881—23.08.1942), самый громкий сигнал зуммера соответствовал очень сильному сигналу с уровнем, соответствующим типичному реально принимаемому сигналу от станции, удаленной на расстоянии около 200 миль при мощности ее передатчика больше 100 кВт.

10. Результаты тестов аудионов пламени по патенту US979275

Все конфигурации аудиона пламени, на которые распространялись действия патентов де Фореста, были определены по исходному патенту US979275. Тесты проводились на *Duane Street 57* в Нью-Йорке, магазине *Marconi Company*. Для Суда демонстрационные испытания были выполнены для аудионов пламени, приведенных в патенте US979275 Fig. 1, 3, 4, 5, кроме Fig. 2 и 6, рис. 18. Демонстрации не проводились в зале суда, так как отсутствовал источник газа для горелки Бунзена. Причину, по которой не тестировались конфигурации Fig. 2 и 6, озвучил Рой Вигант:

«Так как, я не смог придумать какой-либо способ построения устройства, а также не мог представить себе какое-либо расположение элементов, которое имело бы хоть малейшую возможность работать и поэтому я не стал это делать».

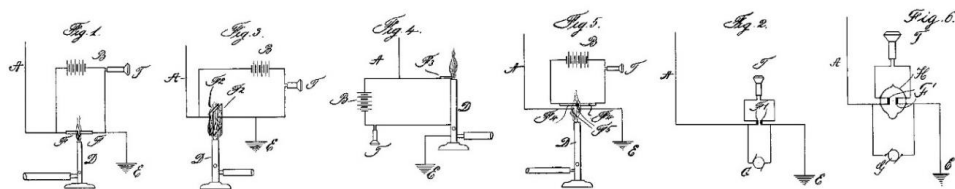


Рис. 18. Конструкции аудионов пламени из патента де Фореста US979275.

Fig. 18. Flame Audion designs from de Forest patent US979275

Вигант показал, что были проведены тесты, включающие очень большое количество вариаций параметров, и лучшие из результатов должны были быть представлены Суду. Варианты параметров включали: материалы электродов (медь, латунь, серебро и платина), размеры и геометрию электродов (от небольшого провода диаметром № 24 до большой пластины), расположение электродов, напряжение батареи (от 0 до 500 вольт) и тип соли, которая использовалась для увеличения проводимости пламени.

Результаты этих тестов для аудионов пламени можно резюмировать следующим образом:

1. Слышимость для всех конфигураций аудионов пламени без солей составляла приблизительно 1, то есть едва слышно, даже при самых сильных сигналах зуммера.
2. Слышимость может быть увеличена максимум до 10 с введением солей для увеличения проводимости газа.
3. На слышимость не влиял нагрев электродов до накала.
4. Слышимость была умеренно чувствительной к внешнему напряжению.
5. Максимальная слышимость для эталонного кристаллического детектора WSA (*Wireless Specialty Apparatus Company*), использующего ту же схему возбуждения, но без внешней батареи, составляла 1000. Согласно показаниям, Г. Пикарда⁷ (*Greenleaf W. Pickard*), слышимость была бы в 2—4 раза выше, если бы для регулировки точки смещения использовалась батарея.

⁷ Гринлиф Пикард в 1906 г. изобрел детектор на основе кристаллов кремния, так называемый *Perikon*, что означает *perfect Pickard contact* (идеальный контакт с Пикардом). Один из организаторов *Wireless Specialty Apparatus Company* в 1907 г. для производства детекторов *Pickards*.

Судом были сделаны два важных замечания по поводу результатов этих испытаний. Во-первых, чувствительность всех аудионов пламени была чрезвычайно низкой. Сигналы от бессолевого детектора пламени были на три порядка менее чувствительны, чем сигналы кристаллического детектора, и они были едва слышны — эксперты регистрировали «1» на измерителе слышимости, несмотря на сильный сигнал зуммера. Солевое пламя было чуть более чувствительным, самое большее в десять раз, но все же недостаточно чувствительное для использования в беспроводной системе. Сторона Маркони подчеркнула низкую чувствительность детекторов пламени, указав, что практически любой другой проводящий материал даст примерно те же близкие результаты. Затем Рой Вигант продемонстрировал, что, зажимая электроды пальцами, он может использовать их в качестве детектора радиочастотных сигналов, которые регистрируют ту же слышимость на измерителе, что и любой из аудионов пламени без добавления в него соли!

Во-вторых, было установлено, что чувствительность всех детекторов пламени абсолютно не зависит от того, были ли электроды нагреты до накала или нет. Этот момент, особо отмеченный судьей Майером, был важен, потому что клапан Флеминга требовал накаливания для работы, в то время как накаливание не вызывало никакого эффекта в работе аудионов пламени. В противоположность этому ламповый аудион требовал накаливания, что позволило предположить, что действие аудиона пламени в качестве детектора значительно отличается от работы лампового аудиона, что совершенно противоречит утверждению де Фореста.

Де Форест никогда не заявлял ни в одном из своих патентов на аудионы пламени, что для них требуется накал электродов, и, действительно, Вигант свидетельствовал, что электроды, показанные в патентах на аудионы пламени де Фореста, были слишком большими, чтобы их можно было нагреть до накала пламенем. Рой Вигант смог добиться накаливания только с помощью тонких платиновых электродов, которые не могли быстро отводить тепло, а также, в одном случае, когда небольшая платиновая чашка с солями была помещена в центр пламени. Несмотря на то, что нет никаких доказательств того, что де Форест когда-либо нагревал электроды аудиона пламени до накала, и в его патентах на эти аудионы нет упоминания о накале. К середине 1906 г. (вскоре после патента Флеминга, выданного 19 апреля 1905 г.), де Форест начал утверждать, что электроды в его предыдущем эксперименте были нагреты до накала [23].

11. Результаты тестов двухэлектродных аудионов по патенту US824637

Четыре из шести двухэлектродных конфигураций аудионов, представленных на Fig. 1, 2, 3, 4 исходного патента US824637 были использованы в тестах, проведенных сотрудниками *Marconi Company*, рис. 19.

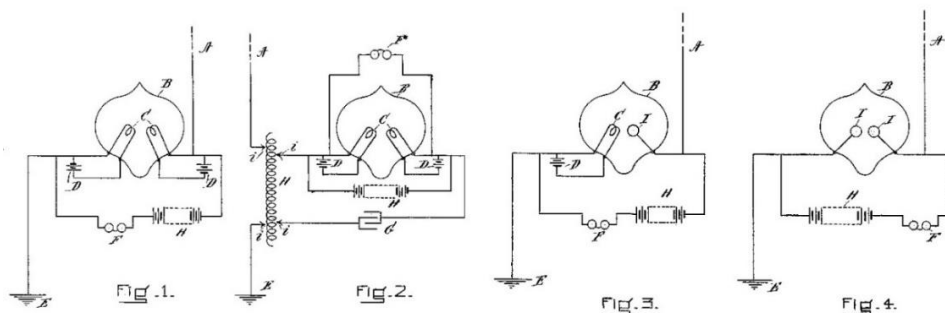


Рис. 19. Патент US836071 де Фореста на конфигурации двухэлектродных аудионов, протестированных компанией Маркони.

Fig. 19. De Forest's US836071 patent for the two-electrode Audions configurations tested by the Marconi Company

Конфигурация по Fig. 2 в патенте US836071 подобна Fig. 4 (рис. 19), поэтому не тестировалась, поскольку инженеры *Marconi* засвидетельствовали, что она даст те же результаты, что и устройство Fig. 4 патента. Результаты для четырех конфигураций аудионов оказались следующими. Конфигурация, представленная на Fig. 4 патента, не работала ни при каких обстоятельствах, что неудивительно, поскольку не было источника тепла ни для электрода, ни для газа в трубке. Результаты для остальных трех конфигураций (Fig. 1, 2 и 3 патента) были практически идентичны независимо от того, были ли нагреты один или два электрода:

1. Ни одна из трех конфигураций не работала как детектор ни при каких условиях давления, если хотя бы один из двух электродов не был нагрет до накала (т. е. в наушниках не было звукового сигнала).

2. Ни одна из конфигураций не работала как детектор, когда давление газа было значительно выше, чем у ламп накаливания. Кроме того, нити быстро перегорели. Испытания при более высоких давлениях были возможны только с газообразным азотом, который предотвращал выгорание нитей, но никогда не давал обнаружения сигнала.

3. Три конфигурации работали как детектор только при низких давлениях газа, когда один или два электрода были нагреты до накала.

Примечательно, что единственная сработавшая двухэлектродная конфигурация звукового сопровождения была практически идентичной конфигурации клапана Флеминга. Парадоксально и то, что Маркони не переключил полярность батареи на электродах, чтобы подчеркнуть, что обнаружение было связано с эффектом Эдисона. По какой-то причине уровни слышимости не были записаны в показаниях под присягой для этих четырех конфигураций.

Суду было абсолютно ясно, что физические процессы, происходящие в аудионах пламени, значительно отличались от таковых в аудионах с двумя электродами. Во-первых, накаливание не было обязательным в аудионах пламени, в то время как двухэлектродные аудионы не могли функционировать без накаливаемых электродов. Во-вторых, двухэлектродные аудионы не могут функционировать при давлении газа, значительно превышающем уровни вакуума, используемые для ламп с электродами накаливания, в то время как аудионы пламени были разработаны и испытаны исключительно при атмосферном давлении.

12. Результаты тестов трехэлектродного аудиона с внешним электродом по патенту US841386

Заключительный демонстрационный тест Маркони был проведен для конфигурации Fig. 3 патента US841386 (рис. 20), единственного патента на трехэлектродные аудионы, в отношении которого Маркони не признал решения суда. Эта конфигурация была по существу двухэлектродной конфигурацией клапана Флеминга с третьим электродом в виде фольги, обернутой снаружи трубки, как показано на рис. 20. В этом патенте де Форест утверждал, что в дополнение к обычным функциям детектора этот аудион без отдельной схемы настройки (именуемый в патенте и испытании как «детектор как таковой») может быть сделан чувствительным к определенным частотам, то есть функционировать как устройство настройки, не требуя обычных катушек индуктивности и конденсаторов, используемых в обычных схемах настройки.

Рой Вигант сконструировал для суда довольно сложную конструкцию демонстрационной доски, чтобы напрямую сравнить работу этой конфигурации аудиона как с конфигурацией клапана Флеминга, показанной в его патенте, так и с эталонным кристаллическим детектором, изготовленным компанией *Wireless Specialty*.

Эта демонстрация отличалась от предыдущих тем, что не было изменений параметров и не было попытки показать, как работают две схемы.

Вместо этого было прямое сравнение трех конструкций: аудиона с внешним электродом, клапана Флеминга и кристаллического детектора. Эта демонстрация явно была разработана с целью поддержать утверждение о том, что аудионы де Фореста нарушили патент клапана Флеминга. Де Форест совершил ошибку, засвидетельствовав, что все его аудионы (пламени, двухэлектродный и трехэлектродный) были чувствительными детекторами и все работали по одному и тому же принципу. Следовательно, Маркони мог выбрать практически любую конфигурацию аудиона для целей этого сравнения. Аудион внешнего электрода был особенно привлекательным, потому что он имел три электрода и очень похож на аудион с сеткой, который больше всего интересовал Маркони. Помимо этого, этот аудион имел только два внутренних электрода и почти идентичен клапану Флеминга. Эта конфигурация также имела то преимущество, что фактически это был чуть менее чувствительный детектор, чем клапан Флеминга, и поэтому вряд ли представлял собой улучшение в данной области техники.

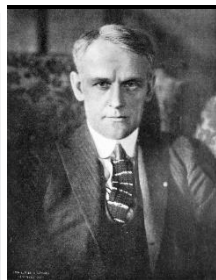
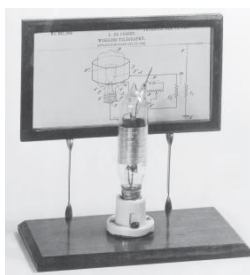
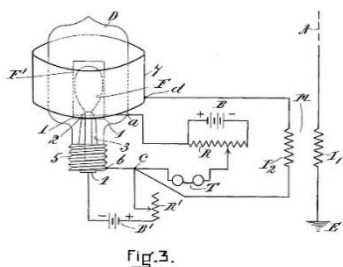


Рис. 20. Аудион (Fig. 3) по патенту US841386. Конструкция трехэлектродного аудиона де Фореста, используемого Маркони в демонстрационных испытаниях для Суда, по сути, представляла собой клапан Флеминга с металлической фольгой, обернутой снаружи стеклянной колбы (воспроизведено с Fig. 3 патента де Фореста US841386). Источник: Архивный центр, Национальный музей американской истории, Беринг-центр, Смитсоновский институт. Рой Вигант (1922 г.).

Fig. 20. De Forest's three-element Audion used by Marconi in the demonstration tests for the Court was essentially a Fleming valve with a metal foil wrapped around the exterior of the glass bulb (reproduced here from Fig. 3 of De Forest's patent US841386). Archives Center, National Museum of American History, Behring Center, Smithsonian Institution. Roy Weagant (1922)

Рой Вигант впервые засвидетельствовал и сначала попытался заставить детектор аудион функционировать как настраивающее устройство, согласно описанию в формуле патента US841386. Де Форест утверждал, что аудион как таковой можно настроить, изменяя ток нагрева и/или потенциал между нитью накала и пластиной. Вигант свидетельствовал, что аудион настроить предложенным способом нельзя, и только перемещая внеш-

ний экран возможно производить небольшие изменения постоянных времени схемы. Однако, этого было недостаточно для настройки приемника.

Затем он продемонстрировал суду сравнение чувствительности аудиона с клапаном Флеминга и кристаллическим детектором с привлечением демонстрационной доски. Принципиальная схема тестовой платы была представлена в протоколе испытаний и точно соответствовала демонстрационной плате. Вигант смог перейти от одной конфигурации к другой, используя переключатели на демонстрационной плате, так что суд мог напрямую сравнить три конфигурации. Основные результаты демонстрационных испытаний можно резюмировать следующим образом:

1. Клапан Флеминга всегда был немного более чувствительным, чем трехэлектродный аудион с третьим электродом на внешней стороне лампы.

2. Сигналы, полученные на клапане Флеминга, были «даже сильнее», чем сигналы, полученные с помощью кристаллического детектора.

Хотя суд использовал в этих демонстрациях измеритель слышимости, количественные результаты для трех конфигураций не были записаны в протоколе показаний.

Удивительно, что де Форест⁸ не пытался объяснить или продемонстрировать, как его аудион может быть использован для настройки, и в стенограмме судебного разбирательства явно указано, что он даже не делал для этого попыток (факт, отмеченный позже апелляционным судом [24]). Судью Майера, очевидно, настолько впечатлила эта демонстрация, что он в своих выводах заявил: «Сам по себе так называемый избирательный патент US841386 настолько бесполезен, что его вполне можно было бы признать недействительным...». Очевидно, что апелляционный суд согласился с судьей Майером, поскольку он предпринял необычный шаг, фактически признав этот патент недействительным: «Из вышеизложенного следует, что мы считаем патент US841386 недействительным...» [24].

Эта и другие демонстрации Маркони, очевидно, были неутешительными для де Фореста. Де Форест охарактеризовал аудион по патенту US841386, в частности, как «чрезвычайно более чувствительный», чем другие детекторы, включая клапан Флеминга [23]. На самом деле, ни один из аудионов, использованных Маркони в своих экспериментах и демонстрациях, не оказался таким чувствительным, как клапан Флеминга, и ни один из них не был способен к усилению. Мало того, что чувствительность всех этих ранних аудионов была меньше, чем у клапана Флеминга, и при этом при де-

⁸ Де Форест отказался от всех претензий к патенту US841386, утверждая, что в аудионах этого патента электроды представляют собой металлические нити (по определению они были лампами накаливания), которые находятся в «вакуумированном сосуде».

монстрации оказалось, что влияние накаливания электрода, электрического поля и давления газа на работу и чувствительность аудиона противоречит как утверждениям де Фореста, так и его теории работы аудиона.

На заседании было продемонстрировано, что работа аудиона пламени практически не зависит от накаливания электрода, в то время как для работы двухэлектродных аудионов требуется накаливание электрода. Аудионы пламени работали при атмосферном давлении, в то время как для работы двухэлектродных аудионов требовалось пониженное давление, типичное для электрических ламп накаливания. Внешняя батарея «В», как было продемонстрировано, оказывает лишь минимальное влияние на пламя, а ее основной эффект проявляется для двухэлектродного аудиона в установке рабочей точки на характеристической кривой. Работа двухэлектродных аудионов не отличалась от работы клапана Флеминга, а трехэлектродные аудионы с внешней сеткой были не такими чувствительными, как клапан Флеминга.

13. Судебные решения

20 сентября 1916 г. судья Майер вынес свои решения в обоснованном заключении судебных заседаний [21, р. 942—955]. Его мнение касалось трех ключевых вопросов, стоящих перед судом: обоснованность патента Флеминга, нарушение патентов де Фореста клапаном Флеминга, который использовал Маркони в цепи детектора с батареей «В», и нарушение патента Флеминга со стороны трехэлектродного аудиона де Фореста при использовании в качестве детектора.

Нарушение Маркони патентов де Фореста. В своем встречном иске де Форест утверждал, что патент Флеминга должен быть признан недействительным с учетом уровня техники, а также четырех патентов де Фореста на детектор пламени с датой вступления в силу, предшествующей дате вступления в силу патента Флеминга. Судья Майер вынес решение против де Фореста по его аргументу о признании недействительным патента Флеминга на основе предшествующего уровня техники и других аргументов, заявив, в частности: «Ничто в предшествующем уровне техники, на который ссылаются ответчики в отрицании изобретения [клапан Флеминга], не требует расширенного обсуждения. Патент Тесла (US645576) и патенты Фессендена (US706742, US706743 и US706744) были далеки от лампы накаливания и были коммерчески бесполезны, как и ничего нельзя было извлечь для этой цели из ламп Вальбрёза (*Valbreuze tubes*) и Цендера (*Zehnder tubes*)».

Судья далее признал, что детекторы пламени были совершенно непрактичными и никогда не использовались в качестве детекторов. Он постановил, что ничто в экспериментах де Фореста с пламенем не является предшествующим уровнем техники по сравнению с патентом Флеминга, и поэтому признал патент Флеминга действительным.

Помимо вопроса о действительности патента Флеминга, де Форест утверждал, что Маркони нарушил его патент, используя батарею «В» во внешней цепи, которая фигурирует в патентах де Фореста, но не в патенте Флеминга (см. Рис. 17). Де Форест утверждал, что именно батарея «В» привнесла в аудион элемент, сделавший его настоящим реле (то есть усилителем), а не просто выпрямителем.

Две проблемы с аргументом де Фореста заключались в том, что, во-первых, батарея «В», используемая Маркони в схеме Флеминга, предназначалась только для установки рабочей точки на характеристической кривой клапана с целью получения максимальной чувствительности, а не для усиления. Точно так же де Форест использовал эту батарею в своих двухэлектродных конфигурациях аудионов. Во-вторых, для этих же целей батарея «В» использовалась в других конструкциях детекторов колебаний еще до того, как де Форест получил патенты на аудион.

По сути де Форест пытался заявить, что батарея, используемая в цепи Флеминга, была его изобретением, хотя было ясно, что это не так. Судья Майер быстро опроверг аргумент де Фореста, сославшись на патент Фредерика Вриланда (*Frederick K. Vreeland*) US780842 (с датой приоритета 1 августа 1904 г., предшествующей дате вступления в силу самого раннего патента де Фореста 4 ноября 1904 г.), в котором батарея была включена через реостат в цепь электролитического детектора для установки наиболее чувствительной рабочей точки на его характеристической кривой.

Судья постановил, что, используя батарею «В» во внешнем контуре клапана Флеминга, Маркони не нарушил патенты де Фореста. Верно то, что батарея обеспечивала дополнительную энергию в схеме трехэлектродного аудиона с сеткой, что привело к изобретению. Однако это не относится к двухэлектродному аудиону, где батарея «В» использовалась только для поиска рабочей точки на его характеристической кривой. Де Форест перепутал функцию второй батареи в своем двухэлектродном аудионе с трехэлектродным и, заявил, что все его аудионы работают по одному и тому же принципу, чем обрек свое дело на проигрыш.

Нарушение патента Флеминга со стороны де Фореста. Маркони утверждал, что аудион, хоть и являлся запатентованным усовершенствованием, которое увеличивало эффективность обнаружения при использо-

вании его в качестве детектора, но все же он нарушил патент Флеминга, потому что была использована базовая структура клапана Флеминга (лампа накаливания, анод и откачанный сосуд), а также эффект Эдисона, заявленный в патенте Флеминга. Де Форест возражал, утверждая, что аудион работает по совершенно отдельному принципу, включающему нагрев промежуточных газов в сочетании с внешней батареей, которая заставляет аудион действовать как реле, а не как выпрямитель.

Судья Майер заслушал противоречивые показания и демонстрации с обеих сторон и в конце концов поверил, что объяснение, данное Армстронгом в журнале *Electrical World*, которое судья отметил в своем письменном решении, «можно рассматривать как отраженное его мнения по данному вопросу» [25]. В этой статье Армстронг утверждал, что лампа работает для притяжения электронов, испускаемых нитью, сеткой и анодом, и действует как выпрямитель (из-за эффекта Эдисона) и реле (усилитель) из-за сетки. Армстронг прямо заявил [25, р. 1152]: «Видно, что фундаментальное обнаруживающее действие лампы представляет собой выпрямление высокочастотных колебаний между нитью и сеткой, что вызывает накопление заряда на сетке и сеточном конденсаторе. Заряженная сетка тогда срабатывает как реле или триггер, реагирующий на ток анода, так что аудион является одновременно выпрямителем и усилителем».

Судья правильно пришел к выводу, что аудион работает, несмотря на наличие газа, а не из-за его присутствия. Кроме того, судья признал, что, хоть сетка привела к изобретению аудиона, но при его использовании в качестве детектора трехэлектродный аудион скорее является развитием клапана Флеминга, чем совершенно новым изобретением. В результате этого судья Майер постановил, что аудион при использовании в качестве детектора нарушает патент клапана Флеминга.

Что касается нарушения де Форестом пунктов 1 и 37 патента Флеминга US803684, то суд в результате проведенного обсуждения пришел к выводу, который зафиксирован в стенограмме судебного разбирательства [21, р. 955]: «Пункты 1 и 37 патента истца действительны и нарушены компанией-ответчиком. Встречный иск ответчиков будет отклонен, а поскольку нет никаких доказательств против де Фореста индивидуально, то требование возмещения с него финансовых издержек не применяется».

Следует отметить, что большинство утверждений и теорий де Фореста о работе аудиона, представленных во время судебных слушаний, а также содержащихся в статье в журнале *Scientific American* в 1907 г. [23], были надуманными. И это несмотря на то, что после публикации этой статьи о работе электронных ламп накопился большой объем знаний, показы-

вающих, что эти теории ошибочны. Де Форест же цеплялся за них практически всю свою жизнь. В своей автобиографии, опубликованной в 1950 г., он пишет [26]: «Аудион, даже в его самой грубой форме [двухэлектродная версия], по сути был намного больше, чем простой выпрямитель высокочастотного тока. Добавление анодной батареи сильно повлияло на интенсивность принимаемых сигналов, поскольку я использовал высокочастотную энергию не для того, чтобы приводить в действие телефонную диафрагму, как это сделал Флеминг, а для того, чтобы контролировать гораздо большие количества энергии от местной батареи».

Очевидно, в 1950 г. де Форест все еще ошибался. По неизвестной причине он цеплялся за свои ошибочные теории об аудионе почти всю свою жизнь, тогда как остальной научный мир давно понял и разобрался в работе аудиона. Очевидно, он не мог заставить себя признать, что был неправ, и в то же время хотел отделить свое изобретение от клапана Флеминга.

Судья Майер принял решение полностью в пользу Маркони и полностью против де Фореста. Маркони запретили нарушать права на трехэлектродный аудион, в которых он признался, а де Форесту запретили нарушать патент Флеминга, то есть использовать аудион в качестве детектора. Решение против де Фореста было приостановлено до рассмотрения апелляции при условии, что он внесет залог в размере \$10000. Де Форест подал прошение об уменьшении суммы залога до \$5000, которое было удовлетворено. Однако примерно 16 марта 1917 г., до того, как дело было рассмотрено в апелляционном порядке, де Форест предоставил *Western Electric Co.* полную лицензию на многие из своих патентов, включая трехэлектродный аудион [22, р. 59]. Маркони попытался привлечь де Фореста к ответственности за неуважение к суду, утверждая, что это было отчуждение собственности, которое может потребоваться для удовлетворения судебного решения по множеству нарушений. Судья Майер отказался вводить санкции, но увеличил сумму залога до 10 000 долларов. Де Форест должен был предоставлять суду ежемесячные отчеты и выполнять несколько других условий, но он не выполнил эти условия, и судебный запрет вступил в силу.

14. Ошибки судей и истца

Рассмотрим, основные моменты в ходе судебного разбирательства, которые требуют некоторого разъяснения.

Ошибки судей. Инженеры *Marconi Company* сделали умную презентацию, которая показала эквивалентность работы в радиосхеме клапана Флеминга и сеточного аудиона де Фореста. Судья был явно впечатлен этой

эквивалентностью, что сыграло свою роль в обосновании принятого решения по двум схемам, показанным на рис. 21 и 22. Ссылаясь на эти две схемы, судья процитировал аргумент об их эквивалентности авторитетного инженера-консультанта по патентам в области электротехники Франка Уотермана⁹ (*Frank N. Waterman*, 30.10.1865—19.01.1948) [21, p. 953]: «Устройство ответчика представляет собой детектор высокочастотных колебаний лампы накаливания для целей беспроводного телеграфа и состоит из лампы накаливания с обычным высоким вакуумом, нити накала и холодного элемента, который в конкретной конструкции, показанной здесь, разделен на две части, одна из которых представляет собой анод, а другая — сеточную конструкцию, расположенную между анодом и нитью накала, обе из которых имеют выводы, выведенные через стекло для внешнего подключения... На диаграмме патента Флеминга отсутствует сетка, имеющаяся в конструкции де Фореста... В схеме де Фореста при такой конструкции устройства используются две цепи, и холодный элемент соответственно разделен. Это две хорошо известные стандартные эквивалентные схемы. Вы можете использовать любое устройство в любой цепи».

Конечно, две показанные схемы (рис. 21) не эквивалентны, и можно только гадать, о чем думал судья, когда делал заключение об их эквивалентности.

Проблема в том, что в исходном аргументе *Marconi Company* на самом деле было четыре схемы, как показано на рис. 22, и сравнение должно

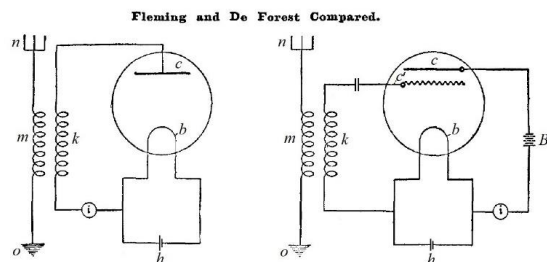


Рис. 21. Схемы приемных устройств на клапане Флеминга (слева) и трехэлектродном аудионе де Фореста, приведенные в материалах судебного заседания 20 сентября 1916 г., по которым было сделано экспертами ошибочное заключение об их эквивалентности [21, p. 953].

Fig. 21. Diagrams of receiving devices on the Fleming valve (left) and de Forest's three-electrode Audion, given in the materials of the court session on September 20, 1916, according to which the experts made an erroneous conclusion about their equivalence [21, p. 953]

⁹ Возможно, самым крупным делом Ф. Уотермана было то, когда он действовал от имени компании *Westinghouse* при покупке у Николы Теслы многофазного патента, который сделал возможным производство электродвигателей переменного тока и за который изобретателю заплатили миллион долларов.

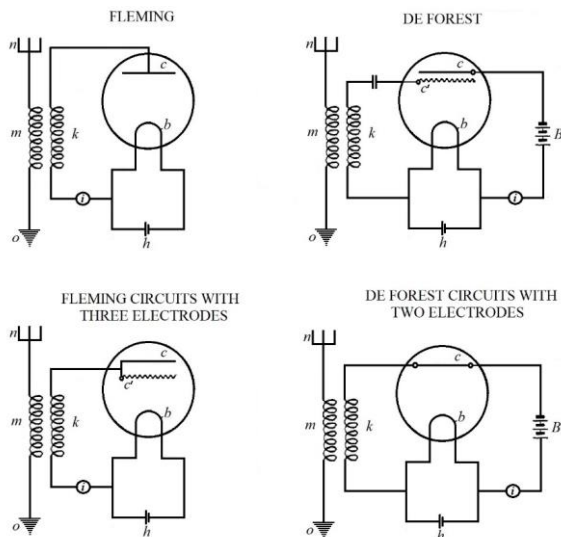


Рис. 22. Аргумент Маркони состоял том, что клапан Флеминга и аудион основывался на предположении, что они эквивалентны, тогда ламповое устройство может быть использовано по схеме Флеминга, как показано в верхнем и нижнем левом углу, либо их можно использовать так же хорошо в схеме де Фореста, как показано в верхнем и нижнем правом углу [22, p. 56].

Fig. 22. Marconi's argument was that the Fleming valve and the Audion were based on the assumption that they were equivalent, then the tube arrangement could be used in a Fleming arrangement as shown in the upper and lower left corner, or they could be used just as well in a De Forest arrangement as shown in the upper and lower right corner [22, p. 56]

было производиться между верхней и нижней схемами, а не между схемами слева направо [22, p. 56]. Очевидно, для краткости судья опустил две схемы, показанные в нижней части этого рисунка, и тем самым навсегда запутал историков одного из самых важных решений о нарушении прав в истории радио. Следует также отметить то, что предложение Ф. Уотермана использовать любое устройство в любой схеме имеет смысл в контексте всех четырех схем, но это не означает, что два устройства являются эквивалентными или что они работают одинаково хорошо.

Ошибка № 1 де Фореста. Де Форест настаивал на том, что все его аудионы были одинаковыми и работали по одному и тому же принципу. Эта позиция, которая оказалась неверной, была самой большой ошибкой де Фореста и, несомненно, была главной причиной неблагоприятного исхода судебного разбирательства.

Де Форест показал, что все его аудионы, включая пламенные и двух- и трехэлектродные ламповые, были эквивалентны и работали по одному и

тому же принципу, то есть принципу, отличному от клапана Флеминга. Очевидно, что он преследовал следующие цели: отличить свое изобретение от клапана Флеминга, а также подтвердить свое утверждение о том, что аудион был получен из его детектора пламени, предшествующего клапану Флеминга, а не из клапана Флеминга. Поступая таким образом, он надеялся не только избежать заявлений Маркони о нарушении прав, но и поддержать свое утверждение о том, что клапан Флеминга нарушает аудион.

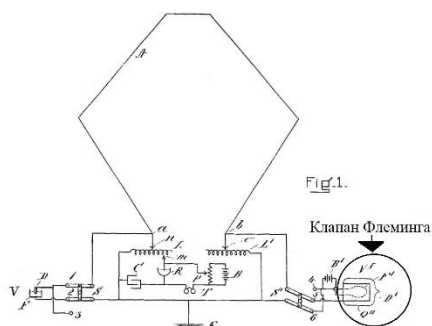
Утверждение о том, что все три типа аудионов работают по одному и тому же принципу, было ошибочным и чрезмерным. Аудионы пламени работали без электродов накаливания, в то время как аудионы с двумя электродами требовали электродов накаливания и вакуума, как и те, что использовались в лампе Флеминга. Это наглядно показали экспериментальные результаты, представленные Маркони суду. Фактически, единственный двухэлектродный аудион, который фактически функционировал как детектор, был тот, который дублировал конфигурацию клапана Флеминга. Этот факт апелляционный судья специально отметил в более поздней апелляции. Ни аудионы пламени, ни аудионы с двумя электродами и даже с внешней батареей, не могли действовать как реле (то есть усилитель), как утверждал де Форест.

Трехэлектродные аудионы с внешними электродами на самом деле были клапанами Флеминга с внешней фольгой или проволоочной катушкой, размещенной вокруг стеклянного корпуса. Трехэлектродный аудион с внутренней сеткой был единственным, который действительно мог усиливать сигналы, и был единственным, который представлял собой более чувствительный детектор, чем клапан Флеминга, за счет усиления принимаемых сигналов энергией от внешней батареи. Маркони мудро признал такую конструкцию и этот иск не стал предметом спора. Три аудиона де Фореста работали по разным принципам: аудион пламени, двухэлектродный аудион и трехэлектродный сеточный аудион.

Ошибка № 2 де Фореста. Де Форест настаивал на том, что он совершенно не знал о ламповом клапане Флеминга в то время, когда изобрел свои ламповые аудионы, основанные исключительно на экспериментах с горелкой Бунзена. Это утверждение судья Майер опроверг. Свидетельства в суде показали, что он был хорошо осведомлен о клапане Флеминга в то время, когда разработал свой первый двухэлектродный аудион. Конструкции де Фореста были очень похожи на клапан Флеминга и сильно отличались от аудионов пламени. Подтверждением этого факта явилось письмо его поверенному от 25 декабря 1905 г., в котором он давал указание «искать недавний патент Флеминга», предположительно, со ссылкой на его

первый патент на два электрода (US824637A) с датой подачи заявки 16 января 1906 г. [27]. Другим ударом для де Фореста стал его патент US823402A «Статический клапан для беспроводных телеграфных систем» (*Static valve for wireless-telegraph systems*) с датой подачи 9 декабря 1905 г., в котором он фактически использовал клапан Флеминга в своем изобретении для минимизации статического электричества в системе беспроводного телеграфа, рис. 23. Следующий текст содержится в описании этого патента: «Устройство V^1 (показанное на рис. 1), подключенное между антенной в точке b и землей, представляет собой асимметричное сопротивление или электрический клапан, который был полностью описан Дж. А. Флемингом в статье, опубликованной в *Proceedings of the Royal Society of London* 16 марта 1905 г., на которую можно при необходимости сослаться для более полного описания, чем это изложено здесь», рис. 23 [27].

Из рис. 23 понятно, что де Форест знал о клапане Флеминга задолго до того, как он подал заявку на свой патент на двухэлектродный детектор 18 января 1906 г. К этому следует добавить то, что в тот период времени он методично исследовал научную литературу в поисках свежих идей в конструировании детекторов, о чем говорит в своих воспоминаниях, изданных в 1950 г. [26, р. 105]: «И вот я начал серьезный систематизированный поиск по *Science Abstracts*, *Wiedemann's Annalen*, *Comptes Rendus* и другим журналам по физике, пытаюсь найти какой-нибудь намек или предложение, которое могло бы стать ключом к разработке нового устройства, которое можно было бы использовать в качестве детектора для приема беспроводных сигналов».



The device V^1 , (shown in Fig. 1,) connected between the antenna at the point b and earth, is an asymmetric resistance or electric valve which has been fully described by J. A. Fleming in a paper published in the *Proceedings of the Royal Society of London*, March 16, 1905, to which reference may be had for a more complete description thereof than need be set forth herein Suffice it to say that the ex-

Рис. 23. Рисунок из патента US823402A де Фореста с указанием на нем клапана Флеминга и текст из этого патента с подтверждением того, что де Форест был знаком с работами А. Флеминга.

Fig. 23. A drawing from de Forest's patent US823402A showing the Fleming valve and the text of this patent confirming that de Forest was familiar with the works of A. Fleming

Далее он вспоминает [26, р. 213]: «В то время, когда я разрабатывал двухэлектродный аудион, я никогда не слышал о клапане Флеминга и поэтому был удивлен, когда позже узнал, что мое изобретение путают с ним. Клапан Флеминга был всего лишь устройством для выпрямления переменного тока, генерируемого в приемной антенне входящими высокочастотными волнами. Он не делал и не мог ничего сделать для увеличения энергии принимаемых беспроводных сигналов. Следовательно, это был очень слабый детектор».

Почему де Форест придерживался этой неблагоприятной позиции, несмотря на неопровержимые доказательства обратного, не ясно. Не было реальной правовой выгоды от искажения этого иска, и судьи, возможно, были бы более склонны к позиции де Фореста, если бы он этого не сделал. И судья Майер, и судьи апелляционной инстанции явно обиделись на его иск, что почти наверняка способствовало отрицательным решениям, которые де Форест получил как в окружных, так и в апелляционных судах [24, р. 560—567].

15. Патентные споры продолжают между *Marconi Wireless Telegraph Company of America* и *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company*

В январе 1917 г. судья Майер открыл судебное разбирательство, инициированное компанией *American Marconi*, с целью выяснить: распространяется ли раннее вынесенное им постановление на аудион, когда он используется в качестве усилителя и генератора, причем аудион как генератор был обозначен де Форестом как *oscillion* [22, р. 60]. По мнению суда, патентообладатель имел право на все преимущества своего изобретения, независимо от того, были ли они ему известны или он их предвидел. В связи с этим, если бы Маркони мог продемонстрировать функционирование клапана Флеминга в схеме усилителя и генератора, то он тем самым обеспечил бы прочную правовую основу для решения вопроса в свою пользу.

Маркони действительно сумел продемонстрировать суду реальную способность клапана Флеминга усиливать слабые сигналы. Методы, с помощью которых клапан Флеминга можно заставить работать в качестве усилителя, до судьи Майера упоминались в выводах Апелляционного суда: «с помощью ионизации остаточного газа в лампе» и «посредством внешнего контролирующего воздействия магнитного поля на поток электронов в лампе особой формы» [28]. Парадоксально, что последний метод указал сам де Форест в своем патенте US841387, озаглавленном «Устрой-

ство для усиления слабых электрических токов». В патенте приведено несколько вариантов воздействия на электронный поток в двухэлектродной лампе, в одном из которых использовалась катушка индуктивности с металлическим сердечником, размещенная снаружи лампы, рис. 24. В этой ситуации де Форесту было трудно опровергнуть утверждение Маркони о том, что двухэлектродная лампа может усиливать сигнал, поскольку в собственном патенте де Фореста утверждалось, что такая лампа, в отличие от клапана Флеминга, обладает способностью к усилению электрического сигнала. В своей автобиографической книге де Форест отметил, что «Рой Вигант, главный инженер компании *Marconi*, легко убедил судью, что вентиль Флеминга может быть усилителем. (Каждый радиоинженер знал, что это не так.)» [26, р. 325].

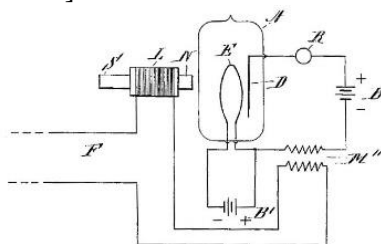


Fig. 5.

Рис. 24. Де Форесту было трудно опровергнуть утверждение Маркони о том, что двухэлектродная лампа может усиливать сигнал, поскольку в собственном патенте де Фореста US841387 утверждалось, что такая лампа, в отличие от клапана Флеминга, обладает способностью к усилению электрического сигнала.

Fig. 24. De Forest found it difficult to refute Marconi's claim that a two-electrode lamp can amplify a signal, since de Forest's own patent US841387 claimed that such a lamp, unlike Fleming's valve, has the ability to amplify an electrical signal

Еще один аргумент, который привел Маркони, заключался в том, что приемник ультра-аудион¹⁰ (англ. *ultra-audion*), который де Форест продавал в то время, содержал схему, которая, как утверждал де Форест, была просто усилителем, но на самом деле это был детектор, запрещенный судебным постановлением Майера [22, р. 60]. Де Форест утверждал, что рассматриваемый усилитель содержал экранированный трансформатор на железном сердечнике и, следовательно, не мог передавать радиочастоты, и

¹⁰ Ультра-аудион — название, которое иногда применяют к вакуумной лампе, однако, под этим названием чаще понимают схему радиоприемника, в который используется создание регенерации без включения в схему вспомогательной катушки индуктивности. В типовой схеме ультра-аудиона один конец вторичной обмотки катушки настраиваемого входного контура подключается к сетке, другой ее конец, который обычно подсоединяется к нити накала, в этом случае подключается к аноду.

поэтому он не мог функционировать как детектор. Однако Маркони возразил, что связь была по существу электростатической (в обход сердечника трансформатора), так что радиочастотные сигналы могли достигать усилителя, который фактически действовал как детектор.

Поскольку в этом радиоприемном устройстве де Фореста не было других известных компонентов, которые могли бы действовать как детектор, было довольно очевидно, что одна из ламп должна была выполнять функцию обнаружения радиоволн. Де Форест в конечном итоге признал, что его радиоприемник *ultra-audio* попадает под действие судебного запрета. Он также признал, что это было нарушением так же патента на гетеродин Фессенда.

К такому нарушению судебного запрета судья Майер отнесся со всей строгостью закона. Он, безусловно, знал о неоднократных нарушениях де Форестом судебных постановлений, связанных с более ранними судебными разбирательствами в том же окружном суде Соединенных Штатов (Южного округа Нью-Йорка) в отношении нарушения патентов на электролитический детектор Фессендена. Это стало причиной наложения на него штрафа за неуважение к суду. Маркони также об этом был осведомлен и существует вероятность того, что он во время судебного заседания сказал о том, что де Форесту нельзя доверять.

Судья постановил, что аудион подпадает под действие основного постановления, и его использование в качестве усилителя также запрещено патентом Флеминга. Это решение было скорее карательным, чем оправданным доказательствами, но, возможно, судья Майер был предрасположен к этой позиции, потому что ему надоел де Форест и его история игнорирования постановлений суда.

Однако судья постановил, что вопрос об генерировании электрических колебаний (*oscillation*), нарушающий патент Флеминга, должен быть решен другим судебным разбирательством, а не промежуточным разбирательством и показаниями под присягой в соответствии с основным постановлением судебного разбирательства по детектору.

16. Апелляция *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company*

Апелляция де Фореста на решение судьи Майера была рассмотрена окружным апелляционным судом судьями Хафом (*Hough*), Коксом (*Cox*) и Роджерсом (*Rogers*) в начале 1917 г. Де Форест вспоминает свою первую встречу с судьей Хафом в начале судебного разбирательства: «Когда дело, наконец, дошло до суда в сентябре 1916 г., Филип Фарнсворт, теперь восхитительно одетый в утренний сюртук, полосатые брюки и белые гетры,

должно быть, оказал на сварливую старую судью Чарли Хафа такое же раздражающее воздействие, как и на Майера, когда предстал перед ним в менее нарядном виде. Как бы то ни было, этот благородный «герцог Язва» (*Duke of Ulcer*) обиделся на него полностью и во всем, а также выказывал неимоверную враждебность ко мне» [22, p. 325].

Де Форест утверждал, что *American Marconi* не может логически признать решение по двум патентам, как это было в первом судебном разбирательстве, а также отрицать нарушение самых ранних изобретений, потому что все они «представляли собой связное, логичное, последовательное развитие единой изобретательской мысли о применении научной теории». Суд не согласился с этим аргументом, указав, что де Форест начал с «теории нагретого газа», а закончил трехэлектродным аудионом, использующим «коммерческий вакуум». По словам эксперта по патентам военно-морского флота Карла Ричмонда (*Carl A. Richmond*), де Форест меньше беспокоился о защите своих патентов в этой апелляции, а скорее думал о том, чтобы избежать нарушения патента Флеминга [22, p. 61]. Главный аргумент де Фореста заключался в том, что он использовал внешнюю батарею, которая вызывала срабатывание «реле», тогда как Флеминг этого не сделал. Однако суд установил, что двухэлектродный аудион был не чем иным, как клапаном Флеминга с внешней цепью, включая батарею, что было не ново и для де Фореста.

Наконец, де Форест утверждал, что какими бы ни были достоинства патента Флеминга, отказ от ответственности, поданный Маркони непосредственно перед судебным разбирательством, был незаконным, и, следовательно, аннулировал патент Флеминга. Судьи постановили, что этот аргумент не имеет смысла, отметив, что отказ от ответственности отбросил то, что было не нужно, не добавив ничего, чтобы расширить претензии.

Неудивительно, что заключение, написанное судьей Хафом от 18 мая 1917 г., подтвердило решение суда низшей инстанции, и при этом явно критиковало де Фореста. Высказанное мнение было особенно убедительным [24, p. 566].

17. Последний иск *Marconi Wireless Telegraph Company of America* к *De Forest Radio Telephone & Telegraph Company*

Вскоре после решения судьи Майера о включении сеточного аудиона в качестве усилителя в рамках основного постановления *American Marconi* подал иск о нарушении патента Флеминга на аудион, используемый в качестве генератора. Однако к этому времени Соединенные Штаты всту-

пили в первую мировую войну (6 апреля 1917 г.), когда вся радиолобительская деятельность была запрещена, а все коммерческие радиостанции были взяты под контроль правительства.

В результате де Форест ответил показаниями под присягой, показывающими, что он не мог заставить кого-либо выступить в качестве свидетеля-эксперта от его имени, потому что все компетентные свидетели-эксперты и испытательные лаборатории были заняты работой для военного ведомства. После продолжительного спора с адвокатом Маркони Л. Беттсом (*L. F. H. Betts*, рис. 25) 24 октября 1917 г. судья Майер безапелляционно назначил 6 февраля 1918 г. датой следующего судебного разбирательства [22, р. 62].

Маркони, де Форест и другие беспроводные компании были вынуждены отложить в сторону свои разногласия, чтобы поддержать военные силы, поставляя оборудование правительству, не обращая внимания на патентные позиции. Ущерб за нарушения со стороны производителей, поставляющих беспроводное оборудование правительству во время войны, был рассмотрен Межведомственным советом по радиосвязи и оплачен военно-морским и военным ведомством после войны.

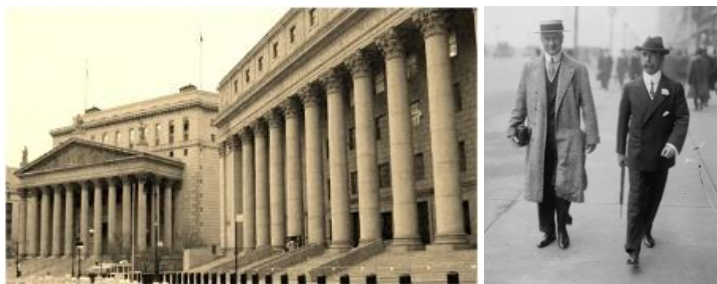


Рис. 25. Здание Федерального суда Южного округа Нью-Йорка (*District Court, S. D. New York*). Адвокат *American Marconi Co.* Л. Беттс (слева) и американский финансист Кларенс Маккей. 1915 г. [29].

Fig. 25. District Court, S. D. New York. Attorney at American Marconi Co. L. F. H. Betts (left) and American financier Clarence Mackay. 1915 [29]

Война затянулась, поэтому судебное разбирательство 6 февраля 1918 г. было отложено. Фактически судебное разбирательство не проводилось до начала 1919 г. На состоявшемся судебном процессе позиция судьи Майера по-прежнему заключалась в том, что патентообладатель имел право на все преимущества своего изобретения, были ли они известны или предвидены им, или неизвестны. Ключевой вопрос в проведении демонстрации эксперимента заключался в том, будет ли на самом деле

колебаться клапан Флеминга. Судья Майер потребовал, чтобы Маркони доказал в суде, что клапан Флеминга можно заставить колебаться, и это, по-видимому, было в центре внимания судебного разбирательства.

Рой Вигант разработал методику эксперимента и подготовился к его первой демонстрации. В записке генеральному директору *American Marconi* Э. Налли (*Edward J. Nally*), датированной 18 октября 1915 г., Вигант изложил метод, с помощью которого вакуумный клапан можно заставить колебаться. [22, р. 62]. По иронии судьбы описанная им методика была основана на двух патентах, полученных ни кем иным, как де Форестом: US943969A и US979276A. В своей записке Вигант обратил внимание на рис. 5 в патенте US943969A, рис. 26. В патенте клапан используется в RC-цепи для создания повторяющихся дуговых разрядов каждый раз, когда напряжение нарастает до точки, превышающей порог пробоя клапана. Однако Вигант в своей записке квалифицировал этот подход следующим образом: «Я мог бы сказать, что действие, посредством которого, как ожидается, будут создаваться колебания в соответствии с инструкциями этого патента, принципиально отличается от того, которое сегодня используется в успешно работающих вакуумных генераторных лампах».

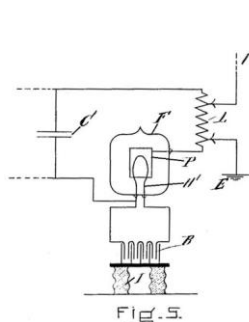


Рис. 26. Для демонстрации того, как можно заставить колебаться клапан Флеминга, Рой Вигант позаимствовал идею из патента де Фореста US943969, в частности, из рис. 5 с изображением LC-цепи с диодом (изображен слева). В этой схеме повторяющиеся дуговые разряды происходят каждый раз, когда напряжение достигает точки, превышающей порог пробоя диода.

Fig. 26. To demonstrate how a Fleming valve can be made to oscillate, Roy Weagant borrowed an idea from De Forest's patent US943969, in particular from Fig. 5 depicting an LC circuit with a diode (reproduced left). In this circuit, repetitive arc discharges occur every time the voltage reaches a point above the diode breakdown threshold

То, что Рой Вигант использовал эту технологию в эксперименте, чтобы продемонстрировать колебания клапана Флеминга, подтверждается воспоминаниями де Фореста: «Затем он утверждал, что клапан также был генератором. (Каждый студент-радист знает, что это неправда, за исключением того, что в газообразном состоянии с цепью высокого сопротивления эффект «RC» может превратить его в управляемый высокочастотный прерыватель)» [26, р. 325].

Опираясь на демонстрации в зале суда и ссылаясь на принцип, что «патентообладатель имеет право на все преимущества своего изобретения, независимо от того, известно ему или нет, или предусмотрено им», судья

Майер в очередной раз вынес решение в пользу Маркони, постановив, что аудион де Фореста, функционирующий как генератор, нарушил патент Флеминга. Следует отметить, что мнение судьи было основано на его убеждении в том, что «двухэлектродный клапан по своей сути обладает такой же способностью генерировать радиоволны, как и трехэлектродное устройство ответчика». В ретроспективе этот вывод явился ошибкой, о которой хорошо знал Вигант, исходя из своей записки, упомянутой выше.

18. Разрешение ситуации с патентом Фореста на аудион

В июне 1919 г., незадолго до того, как 17 июля 1919 г. судья Майер вынес свое решение по судебному разбирательству о генерировании электрических колебаний клапаном Флеминга, Маркони и де Форест достигли соглашения, которое позволяло третьей стороне, Moorhead Laboratories из Сан-Франциско, производить аудионы только для любительского и экспериментального использования, как детекторы и усилители. По соглашению Маркони стал единственным агентом по их продажам и распространению. [30]

Через 4 месяца после подписания соглашения по аудионам между Маркони и де Форестом, 20 ноября 1919 г. было подписано соглашения между недавно созданной *Radio Corporation of America (RCA)* и *American Marconi Co.* о присоединении одной части компании *Marconi* к *RCA*, а другой ее части к *GE*.

Правительство полностью поддерживало создание *RCA* и приобретение *Marconi*, с целью помешать *American Marconi Co.* превратиться в беспроводную монополию в США, которую военно-морской флот (*U.S. Navy*) считал иностранной организацией.

На самом деле у военно-морского флота (*ВМФ*) были скрытые мотивы для их действий: крайнее неприятие к персоналу и политике *Marconi*, но главным было желание объединить патенты на беспроводную связь в рамках одной компании, чтобы избежать проблем с нарушением патентов, особенно в отношении вакуумных ламп [22. P.64].

Сразу после образования *RCA* и слияния с *American Marconi* военно-морской флот обратился к *GE* и *AT&T* с просьбой, чтобы *RCA*, *GE* и *AT&T* объединили свои патенты на беспроводную связь, чтобы можно было продавать беспроводное оборудование, не опасаясь нарушения наиболее важных патентов. Выдержки из письма исполняющего обязанности начальника Бюро паровой техники (*Bureau of Steam Engineering*) контр-адмирала А. Дж. Хепберна (*Adm. A. J. Hepburn*), *USN*, от 3 января 1920 г. в *GE* и *AT&T* с копией в *Western Electric*, гласят:

«Ссылаясь на многочисленные недавние совещания в связи с ситуацией с патентами в области радиосвязи и, в частности, с областью, связанной с вакуумными лампами, бюро неизменно придерживалось мнения, что все интересы будут наилучшим образом удовлетворены посредством некоего соглашения между несколькими держателями соответствующих патентов, в результате чего на рынок можно будет свободно поставлять лампы, и практически рассматривать пожелания, указывающие на это конкретными примерами» [31].

«В прошлом причины для желания заключить какое-либо соглашение были в основном из-за денежных соображений. Теперь ситуация стала такой, что это общественная необходимость, чтобы такая договоренность была достигнута без дальнейшего промедления, и это письмо может рассматриваться как призыв, на благо общественности, для исправления ситуации».

Не случайно военно-морской флот обратился к AT&T, поскольку у них были эксклюзивные лицензии на патенты де Фореста на аудион для радиоприложений, которые они приобрели у него по соглашениям 1914 и 1917 гг., не говоря уже об их собственных патентах, базирующихся в основном на исследованиях, проведенных вовремя войны.

Интересно отметить, что соглашение 1917 г. с де Форестом специально включало право AT&T предоставлять лицензию компании *Marconi* (англ. *To grant a license for use to the Marconi Company*) [32]. Предвидя эти соглашения о перекрестном лицензировании, RCA немедленно проинструктировала *Marconi* отменить свое соглашение с *De Forest*, которое из-за шестимесячного положения об уведомлении вступит в силу только 30 июля 1920 г. Соглашение о перекрестном лицензировании было подписано 1 июля 1920 г., всего за месяц до даты прекращения действия соглашений *Marconi* с *De Forest*, и в результате *General Electric* получила односторонние права на производство триодов без необходимости одобрения де Форестом, а RCA получила эксклюзивные права на использование или продажу триодов для коммерческой радиосвязи.

19. Неожиданный конец истории спора из-за патента на аудион

Спор из-за патента на аудион должен был закончиться незаметно с истечением срока действия патентов в начале-середине 1920-х гг.: 7 ноября 1922 г. срок окончания патента US803684 на клапан Флеминга, а 18 февраля 1925 г. срок окончания патента US841387 на аудион с сеткой де Фореста. Счастливого окончания спора, однако, не произошло, по иронии ситуационных случайностей, все закончилось только через 10 лет. Препятствия для него были созданы уже 1 июля 1918 г., когда Конгресс

США принял закон, в котором указывалось, что правительство будет нести ответственность за нарушения патентов другими производителями, которые поставляли оборудование правительству, и, кроме того, что это — единственное средство правовой защиты. Производители, оспаривающие выводы правительства, должны были быть рассмотрены в Претензионном суде¹¹ США. В результате принятия этого закона был создан Межведомственный радиовещательный совет (*Interdepartmental Radio Board*) для определения компенсации за нарушение патентов на радиооборудование.

По словам историка ВМС США Линвуда Ховета (*Linwood S. Howeth*), семь фирм после первой мировой войны подали иски на общую сумму \$14860000 за нарушения, предположительно имевшие место как до, так и во время войны, а еще 17 фирм запросили денежное вознаграждение без указания сумм [31, р. 376]. *American Marconi Co.* была одной из семи фирм, которая добивалась более \$5000000. Однако это происходило задолго до того, как Межведомственный совет по радиосвязи выпустил свои рекомендации в докладе от 12 февраля 1921 г. и компания завершила слияние с *RCA*. За компанией *Marconi* осталось право предъявлять иски к США, связанные с использованием без лицензии патентов Маркони, выданных правительством до слияния.

Доходы от любых таких претензий должны были быть переданы *RCA* в обмен на привилегированные акции, равные сумме переданных денежных средств. Общая сумма акций должна была быть ограничена \$5000000 или несколько меньше, в зависимости от типа завода в Олдене (*Aldene*). *American Marconi Co.* предъявила свидетельство о роспуске 2 августа 1920 г., до того, как был опубликован отчет *Board*, однако, небольшое подразделение *Marconi* осталось на месте с целью предъявления претензий правительству, а также другим организациям.

В докладе Межведомственный совет по радиосвязи рекомендовал выплатить всем компаниям всего \$2869700, что намного меньше суммы, которую, по мнению Маркони, они должны были получить. В частности, было четыре патента, с которыми Маркони оспорил в выводах Совета: US763772, переиздание US11913, US609154 и US803684, причем последний являлся патентом клапана Флеминга.

В деле *American Marconi Co.*, как и во всех других, Межведомственный совет подробно изучил всю ситуацию с патентами на радиостанциях в Соединенных Штатах и, в некоторой степени, за рубежом. Он рассмотрел

¹¹ Претензионный суд (U.S. Court of Claims) был федеральным судом, который рассматривал иски против правительства США. Основан в 1855 г.

вопрос о том, является ли конкретное изобретение общим по своему характеру и, следовательно, связано ли оно с работой всей системы, или же его можно заменить без материального ущерба или последствий. Межведомственный совет рассмотрел также предыдущие решения Претензионного суда, чтобы понять, что представляет собой обычное роялти [31, р. 376].

Маркони не согласился с выводами и рекомендациями Межведомственного совета и решил подать апелляцию на его решение в Претензионный суд США. Маркони ранее, 29 июля 1915 г., еще до того, как судья Майер принял решение о нарушении прав на аудион, подал иск против правительства в Претензионный суд США с требованием выплатить 1 миллион долларов в качестве компенсации за предполагаемые нарушения четырех вышеупомянутых патентов, включая патент Флеминга [33].

Весь этот процесс затянулся во времени очень надолго в связи с тем, что дело не рассматривалось в Апелляционном суде до 5 марта 1935 г., а решение не было вынесено до 21 июня 1935 г. [22, р. 67].

Достаточно сказать, что дела у Маркони в целом шли не очень хорошо, в частности, с патентом Флеминга. Общая сумма, присужденная Маркони, составила всего \$42984 плюс проценты, к тому же суд установил, что патент Флеминга не был нарушен правительством. Хуже того, суд признал патент Флеминга недействительным по той технической причине, что Флеминг требовал больше, чем он изобрел, не ограничивая претензию высокими частотами.

Маркони хорошо знал, что патент Флеминга преувеличил изобретение тем, что не ограничил его высокими частотами, поэтому Маркони подал заявление об отказе от ответственности до первого судебного разбирательства. Хотя закон предусматривал такой отказ от ответственности, чтобы избежать признания недействительным всего патента. По положению заявление о недействительности могло быть сделано по неосторожности, в результате несчастного случая или ошибки и без каких-либо мошеннических намерений, а также могло быть сделано без необоснованного пренебрежения или задержки. Суд по претензиям постановил, что патент недействителен, поскольку требование Флеминга о «большем, чем он изобрел», не было случайным, и задержка более чем на 10 лет с отказом от ответственности была необоснованной. В опубликованном заключении суд заявил: «Мы считаем, что, если когда-либо и имел место случай необоснованной задержки с заявлением об отказе от ответственности, то он представлен в том виде, в котором сейчас находится перед нами, и что патент Флеминга должен быть признан недействительным по этой причине».

Вывод о том, что правительство не нарушало патент Флеминга, был по существу излишним выводом о том, что он недействителен. Возможно,

суд сделал оба вывода на случай, если тот или иной вывод будет отменен по апелляции. Тем не менее, обоснование их решения относительно нарушения заслуживает внимания. Суд по искам установил, что правительство при использовании трехэлектродного аудиона не нарушило патент Флеминга из-за «принципиальной разницы в способе функционирования двухэлектродного и трехэлектродного аудионов». Кроме того, суд заявил в своем заключении, что он не связан предыдущим решением судьи Майера, поскольку это решение было основано на ошибочном выводе, подтвержденном показаниями как Маркони, так и де Фореста, о том, что двухэлектродные и трехэлектродные аудионы обладают «одинаковыми присущими им свойствами» [22, р. 68].

Претензионный суд установил, что трехэлектродный аудион при использовании в качестве усилителя и генератора работал по принципу, отличному от клапана Флеминга, и имел достаточно отличий, чтобы избежать нарушения патента, в котором защищен клапан Флеминга. Суд также указал, что Флемингу не приходила в голову идея использовать клапан Флеминга в качестве усилителя или генератора, и что, как специалист в этой области, он не мог понять из своего патента, как заставить клапан работать в этих устройствах. Похоже, что суд по искам поступил правильно, потому что, хотя изобретатель имеет иметь право на непредвиденные применения своего изобретения, в данном случае изобретение заключалась не в эффекте Эдисона, а в применении этого эффекта к радиочастотному обнаружению, а не к усилению или генерации колебаний.

Сложнее была ситуация с нарушением трехэлектродного аудиона при использовании его в качестве детектора. Проблема, стоявшая перед судьей Майером в более раннем судебном разбирательстве, была ограничена потенциальным нарушением патента, в котором аудион представлен как простой нерегенеративный детектор (см. схему на рис. 15), а не аудиона в цепи регенеративного детектора, потому что де Форест не использовал детектор в регенеративной цепи. Однако к концу первой мировой войны правительство широко использовало трехэлектродный аудион в своих регенеративных приемниках, поэтому Претензионный суд должен был рассмотреть его использование в качестве регенеративного детектора в дополнение к схеме детектора, первоначально рассмотренной в более раннем судебном разбирательстве.

Суд принял к сведению тот факт, что аудион при использовании в простой схеме детектора давал отклик примерно на 50 % больше, чем кристаллический детектор, а также ненамного больше, чем клапан Флеминга. В то время, как аудион при использовании в схеме регенеративного детек-

тора давал сигнал в 20—30 раз сильнее кристаллического детектора. Решение суда о том, что регенеративный детектор работает принципиально иначе, чем детектор Флеминга, имело большое значение и, несомненно, было верным. Отличительной особенностью регенеративного детектора была его способность (в которой использовался другой принцип, чем у клапана Флеминга) к усилению, тогда как наиболее важной характеристикой трехэлектродного аудиона как нерегенеративного детектора была его способность выпрямления, но с относительно небольшим усилением. Клапан Флеминга работал только в режиме выпрямления, в основном на эффекте Эдисона, и не обладал способностью усиления сигнала

Однако, вопреки выводам суда по искам, трехэлектродный аудион при использовании в качестве нерегенеративного детектора работал по совершенно тому же принципу, что клапан Флеминга. Трехэлектродный аудион не был бы великим изобретением, если бы это был всего лишь немного более эффективный детектор, а не усилитель, которым он позже оказался. Поскольку совершенно ясно, что де Форест просто изменил конструкцию клапана Флеминга, добавив третий электрод, чтобы получить немного более эффективный детектор. Суд, вероятно, ошибся, обнаружив, что аудион при использовании в простой схеме детектора не нарушает патент на детектор клапана Флеминга.

Маркони обжаловал это решение в Верховном суде США (*U. S. Supreme Court*). Это дело было рассмотрено в суде 9—12 апреля 1943 г. Верховный суд оставил в силе решение суда низшей инстанции, согласившись с тем, что отказ от ответственности был недействителен, а также с тем, что, поскольку отказ от ответственности был произведен несвоевременно, а только через 10 лет после подачи заявки, то весь патент считается недействительным [22, р. 69].

Далее суд заявил, что ему не нужно было определять, нарушает ли использование правительством радиооборудования патент Флеминга, поскольку он был признан недействительным из-за неправильного отказа от ответственности. Таким образом, в конце концов Верховный суд (*Supreme Court*) согласился с судом по искам (*Court of Claims*) в том, что патент Флеминга был недействительным, но только по той технической причине, что недействительный отказ от ответственности сделал недействительным весь патент.

По иронии судьбы отказ от ответственности, поданный в 1914 г., предназначенный для сохранения патента, который требовал больше, чем следовало, в конечном счете сыграл свою роль в его признании недействи-

тельным в 1943 г., по прошествии длительного времени после истечения срока его действия. Примерно в это же время сэр Джон Флеминг, все еще полный сил в свои 92 года, опубликовал статью, в которой не отметил проделанные до него исследования с выпрямительным клапаном Присом (Preece) и Хауэллом (Howell), заявив даже об открытии так называемого «эффекта Эдисона», но не сделал при этом ни одного упоминания имени Эдисона. Статью прочитал де Форест, и за эти упущения он высказал Флемингу справедливый упрек, попутно обратив его внимание на недавнее решение Верховного суда. В ответе Флеминга было выражено глубокое пренебрежение к тому, что простой американский суд смог подумать о своем любимом ребенке [26, p. 457].

По правде говоря, признание патента Флеминга недействительным практически никак ни на что не повлияло, за исключением, возможно, интересов Маркони, которые не смог получить компенсацию за предполагаемые нарушения как до, так и во время первой мировой войны.

Первоначальный патент Флеминга, впервые поданный в Англии, остался нетронутым, и научное сообщество и историки приписывали и до сих пор приписывают Флемингу изобретение современной вакуумной лампы, а в Англии вакуумную лампу до сих пор называют клапаном (англ. *valve*). Презрение Флеминга к решению американского суда понятно и, вероятно, будет таким же, как презрение американского изобретателя с патентом США, которое могло бы проявиться, если бы его патент в другой стране был признан недействительным при аналогичных обстоятельствах — особенно по техническим причинам.

20. Заключение

На протяжении всей жизни де Фореста оригинальность его наиболее важных изобретений горячо оспаривалась как учеными, так и патентными поверенными. Со временем, осознав, что он не сможет добиться успеха в бизнесе или производстве, де Форест неохотно продал свои патенты крупным коммуникационным компаниям для коммерческого развития. Некоторые из наиболее важных продаж были сделаны по очень низким ценам, в частности, Американской телефонной и телеграфной компании (AT&T), которая использовала аудион в качестве важного компонента в ретрансляторах усиления электрического сигнала в телефонных линиях большой протяженности.

Список литературы

1. Пестриков В. М. Генезис аудиона Ли де Фореста // Инфокоммуникационные и радио-электронные технологии. 2021. Т. 4, № 1. С. 42—79.
2. Пестриков В. М. Продвижение Ли де Форестом инноваций беспроводного телефона на рынке услуг // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 2. С. 107—146.
3. Erb E. Double Audion von de Forest. 1909. URL: https://www.radiomuseum.org/forum/double_audion_von_de_forest_1909.html#1 (дата обращения: 25.09.2021).
4. Armstrong E. H. The Audion and De Forest. From Letters to the editor // Wireless World. January 1954. P. 17.
5. Butcher E. E. How to Conduct a Radio Club. Article II // The Wireless Age. 1914. No. 1. P. 275.
6. Okamura S. History of Electron Tubes. IOS Press, 1994. 233 p.
7. Fuhring J. The Coherer and Other Early Radio Detectors. URL: <http://www.geojohn.org/Radios/MyRadios/Coherer/Coherer.html> (дата обращения: 25.09.2021).
8. De Forest apparatus // Modern-Electrics. 1909. No. 11. P. 391.
9. Wireless telegraph // Scientific American. November 25, 1905. Vol. 93, No. 22. P. 427.
10. Another opportunity to procure Wallace Valve Detector at our Special Bargain Price // Modern Electrics. 1913. No. 8. P. 519.
11. The De Forest Audion // The Electrical Experimenter. 1916. Vol. 4, No. 4. P. 228.
12. Butcher E. E. How to Conduct a Radio Club. Article III // The Wireless Age. 1914. No. 4. P. 525.
13. Robison S. S. Manual of wireless telegraphy for the use of naval electricians. Annapolis, Md., The United States Naval Institute. 1911. P. 138—139.
14. Arapostathis Stathis. Marconi's legal battles : Discursive, textual, and material entanglements // History of Science. 2019. Vol. 57 (1). P. 99.
15. Satia P. War, Wireless, and Empire : Marconi and the British Warfare State, 1896—1903 // Technology and Culture. October 2010. Vol. 51, No. 4. P. 829—853.
16. Improvements in Apparatus for Wireless Telegraphy /Marconi G. and Marconi's wireless telegraph company. Patent GB7777. Complete Specification Left, 25th Feb., 1901 – Accepted, 13th Apr, 1901. Date of Application, 26th Apr., 1900.
17. Marconi wireless telegraph Co. of America v. National Electric signaling Co. (two cases) // Federal reporter with key-number annotations. Vol. 213. Permanent edition cases argued and determined in the circuit courts of appeals and district courts of the United States. June—July 1914. St. Paul West publishing Co., 1914. P. 815—863.
18. Apgar C. E. Making the Records from Sayville // The Wireless Age. September 1915. Vol. 2, No. 12. P. 877—880.
19. Butcher E. E. How to Conduct a Radio Club. Article II // The Wireless Age. 1914. No. 14. P. 280.
20. Marconi wireless telegraph Co. Of America v. De Forest radio telephone & telegraph Co. et al. // Federal reporter with key-number annotations. Vol. 225. Permanent edition cases argued and determined in the circuit courts of appeals and district courts of the United States. October—November 1915. St. Paul West publishing Co., 1915. P. 65—67.
21. Marconi wireless telegraph Co. of America v. De Forest radio telephone & telegraph Co. et al. // Federal reporter with key-number annotations. Vol. 236. Permanent edition cases argued and determined in the circuit courts of appeals and district courts of the United States. December 1916 – January 1917. St. Paul West publishing Co., 1917. P. 942—955.
22. Wenaas E. P. Marconi vs. De Forest Audion Infringement Litigation Revisited // AWA Review. 2007. Vol. 20. P. 47.

23. Forest de Lee. The Audion – I: A New Receiver for Wireless Telegraph // Scientific American Supplement. November 30, 1907. No. 1665. P. 349.
24. Marconi wireless telegraph Co. of America v. De Forest radio telephone & telegraph CO. et al. // Federal reporter with key-number annotations. Vol. 243. Permanent edition cases argued and determined in the circuit courts of appeals and district courts of the United States. September – October 1917. St. Paul West publishing Co., 1917. P. 566.
25. Armstrong E. H. Operating Features of the Audion // Electrical World. December 12, 1914. Vol. 64, No. 24. P. 1149–1152.
26. Forest de Lee. Father of Radio. The Autobiography. 1st edition. Chicago : Wilcox & Follett Co., 1950. P. 213–214.
27. Forest de Lee. Static Valve for Wireless Telegraph System. Patent US823402. Application filed Dec. 9, 1905. Patented June 12, 1906.
28. Marconi Wireless Telegraph Company of America v. The United States, No. 33642, United States Court of Claims (Nexis Lexis, 81 Ct. Cl. 671 ; 1935 U. S. Ct. Cl. LEXIS 189), November 4, 1935, Decided.
29. L. F. H. Betts and Clarence Mackay. 1915. URL: <https://www.loc.gov/item/2014701985/> (дата обращения: 26.09.2021).
30. Radio vacuum – Tube Litigation is Settled // Radio Amateur News. August 1919. Vol. 1. No. 2. P. 77.
31. Howeth L. S. History of Communications-Electronics in the United States Navy. Washington : Government Printing Office, 1963. P. 377.
32. Tyne G. F. J. Saga of the Vacuum Tube. First edition. Prompt Publications, 1994. P. 115.
33. Marconi Company asks Millions Dollars' Damages from the U. S. // The Wireless Age. October 1916. Vol. 4, No. 1. P. 21.

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.