

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.205

## Зависимость параметров локализации и рассеяния электромагнитной волны в частично поглощающей среде от геометрической конфигурации выводного тракта

<sup>1</sup>Кравченко Я.В., <sup>2,3</sup>Ципенюк Д.Ю., <sup>4</sup>Воропинов А.В.

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/>  
Москва 119991, Российская Федерация

<sup>2</sup>Московский политехнический университет, <https://new.mospolytech.ru/>  
Москва 107023, Российская Федерация

<sup>3</sup>Всероссийский институт научной и технической информации РАН, <http://www.viniti.ru/>  
Москва 125190, Российская Федерация

<sup>4</sup>Laser Graphic Art Ltd, <http://www.lasergraphicart.com/>  
Москва 105318, Российская Федерация

*E-mail: kravch@kapella.gpi.ru, dimat777@list.ru, avv@lasergraphicart.com*

*Поступила 09.05.2023, рецензирована 16.05.2023, принята 23.05.2023*

*Представлена действительным членом РАЕН А.В. Андреевым*

**Аннотация:** Приведены первые результаты, полученные на экспериментальной установке, созданной для изучения параметров локализации, рассеяния и поглощения СВЧ излучения мощностью 1-4 мВт на частоте 38 ГГц при распространении излучения в волноводах переменного сечения. Проведены исследования параметров локализации и рассеяния электромагнитной волны в частично поглощающей среде в зависимости от геометрической конфигурации выводного тракта. Интерпретация полученных первоначальных результатов проведена в рамках (1+4)D модели расширенного пространства (МРП). Модель расширенного пространства сформулирована в (1+4)-мерном пространстве время-координата-интервал действие. Дополнительной пространственной координатой в МРП служит интервал, имеющий физический смысл действия. В сопряженном (1+4)D пространстве энергия-импульс-масса интервалу (действию) в МРП соответствует масса. МРП рассматривает вопрос возникновения у фотона ненулевой переменной массы и его локализации под влиянием внешнего поля.

**Ключевые слова:** локализация и рассеяние электромагнитного поля, поглощение излучения, волновод переменного сечения, СВЧ-излучение, (1+4)D модель расширенного пространства  
PACS 11.10 КК, 03.50.-Z, 03.65. РМ

*Для цитирования:* Кравченко Я.В., Ципенюк Д.Ю., Воропинов А.В. Зависимость параметров локализации и рассеяния электромагнитной волны в частично поглощающей среде от геометрической конфигурации выводного тракта. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(3):205-214. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.205.

## Electromagnetic wave localization and scattering parameters investigation in a partially absorbing medium depending on the output tract geometric configuration

Yaroslav V. Kravchenko

Prokhorov Institute of General Physics, Russian Academy of Sciences, <http://www.gpi.ru/>  
Moscow 119991, Russian Federation

*E-mail: kravch@kapella.gpi.ru*

**Dmitry V. Tsipenyuk**

Moscow Polytechnic University, <https://new.mospolytech.ru/>

Moscow 107023, Russian Federation

All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of RAS, <http://www.viniti.ru/>

Moscow 125190, Russian Federation

E-mail: [dimat777@list.ru](mailto:dimat777@list.ru)

**Andrey V. Voropinov**

Laser Graphic Art Ltd, <http://www.lasergraphicart.com/>

Moscow 105318, Russian Federation

E-mail: [avv@lasergraphicart.com](mailto:avv@lasergraphicart.com)

Received May 9, 2023, peer-reviewed May 16, 2023, accepted May 23, 2023

**Abstract:** The paper presents first results obtained on an experimental setup designed to study the parameters of localization, scattering and absorption of microwave radiation with a power of 1-4 mW at the 38 GHz when radiation propagates in variable-section waveguides. The parameters of localization and scattering of an electromagnetic wave in a partially absorbing medium were studied depending on the geometric configuration of the output tract. The interpretation of the obtained initial results was carried out within the framework of the (1+4)D extended space model (ESM). The extended space model is formulated in (1+4)-dimensional space time-coordinate-interval action. An additional spatial coordinate in the ESM is the interval, which in the ESM has the physical meaning of the action. In the dual (1+4)D space energy-momentum-mass, the interval (action) in the ESM corresponds to the mass. ESM considers the question of the emergence of a non-zero variable mass for a photon and its localization under the influence of an external field.

**Keywords:** electromagnetic field localization and scattering, radiation absorption, variable cross section waveguide, microwave radiation, (1+4)D extended space model

**PACS 11.10 KK, 03.50.-Z, 03.65. PM**

*For citation:* Yuaroslav V. Kravchenko, Dmitry Yu. Tsipenyuk, Andrey V. Voropinov. Electromagnetic wave localization and scattering parameters investigation in a partially absorbing medium depending on the output tract geometric configuration. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(3):205-214e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.205.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. ВВЕДЕНИЕ (206)
  2. ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛЕЙ И ЧАСТИЦ В РАМКАХ ПОДХОДА МРП (207)
  3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ (210)
    - 3.1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ (210)
    - 3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ (211)
  4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ (213)
- ЛИТЕРАТУРА (213)**

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В работе [1], опубликованной нами в 2021 г, было описано создание и тестирование экспериментальной установки, предназначенной для изучения параметров локализации электромагнитного СВЧ излучения мощностью 0.001-0.004 Вт в диапазоне 36.0-79.0 ГГц при

распространении излучения в металлических волноводах переменного сечения, заполненных диэлектриками с различными показателями преломления.

Результаты измерений, проведенных на созданном экспериментальном стенде, мы будем сравнивать с расчетами электромагнитного поля для СВЧ антенн, проведенными с использованием программ, основанных на методе моментов (например, программ NEC2, MININEC3) или систем электродинамического моделирования и проектирования HFSS (High Frequency Structure Simulator), IE3D, Microwave Office, Microwave Studio [2-5]).

Кроме сравнения полученных экспериментальных результатов с общепринятыми моделями расчетов мы

планируем оценить возможность описания с помощью расчетов на основании Модели расширенного пространства (МРП), развитой ранее в работах [6-10]. МРП основана на физической гипотезе, заключающейся в том, что масса (масса покоя) и сопряженная ей величина – действие (интервал) являются динамическими переменными. Взаимодействие полей и частиц определяет величины этих переменных. Такая модель является обобщением Специальной теории относительности (СТО). В СТО интервал и масса покоя частиц являются инвариантами, а в предлагаемой МРП [6-10] они могут изменяться. Например, в МРП фотон может приобретать массу (как положительную, так и отрицательную). Такая масса может появляться и изменяться из-за электромагнитного взаимодействия и порождать гравитационные силы. Это позволяет рассматривать гравитацию и электромагнетизм как единое поле в МРП.

Необходимо отметить, что близкая к МРП пятимерная модель была разработана Paul Wesson с соавторами [11-14]. P.Wesson в своих работах предложил использовать в качестве пятой координаты "массу" в качестве координаты, дополнительной ко времени и трем пространственным координатам: [11] стр. 10 "мы ... рассматриваем массу на той же основе, что и время и пространство..." и [11] на стр. 191 уравнение (7.40) "Это означает, что роль незаряженной массы 4D в геометрии 5D играет дополнительная координата".

Такой подход к введению пятой координаты представляется нам нелогичным. Например, это приводит к трудностям при обобщении четырехмерного тензора энергии-импульса на пятимерный тензор энергии-импульса-массы в 5D пространстве. По нашему мнению, масса может рассматриваться как пятая координата, однако не в координатном пространстве. Массу надо рассматривать в пространстве импульсов, а именно как дополнительную величину к энергии и трем компонентам импульса. При этом в координатном пространстве пятая координата должна быть другим значением, которое связывают с массой. В результате рассмотрения массы в качестве пятой координаты помимо времени и пространства

в [11-13] было трудно установить связь массы с экспериментами. Недавно в работе [14] James Overduin (соавтор Paul Wesson) и R.C.Henry предложили такую же идею введения пятой координаты, что и Tsipenyuk D.Yu. and Andreev V.A. в 1999 году [10].

Обзор различных моделей по теме многомерных полей можно найти в книге [15]. Наиболее известные пионерские подходы к построению пятимерных моделей можно найти в работах Klein Felix [16], Einstein [17,22], Klein Oskar [18], Kaluza [19], Fock [20], Mandel [21].

В работах по 5-оптике Румера [23] также вводится пятая координата в виде действия и рассматривается 5-мерное пространство с метрикой (1;4). Однако Румер не рассматривает никаких преобразований в этом пространстве, которые перепутывали бы координату с другими четырьмя координатами пространства Минковского. Поэтому и в сопряженном к 5-мерному координатному пространству, масса в пятиоптике Румера остается постоянной и не преобразуется в энергию и импульс.

В данной работе мы представляем первые экспериментальные результаты измерения параметров локализации СВЧ излучения частотой 38 ГГц и мощностью 4 мВт при распространении в волноводах переменного сечения, заполненных диэлектрическим материалом с большим коэффициентом преломления. Также проводится сравнение между собой величин эффекта ослабления сигнала СВЧ излучения в диэлектрическом листовом поглотителе переменной толщины в зависимости от формы волнопроводов (сходящиеся или прямоугольные в сечении). Качественная интерпретация результатов проведена на основе ранее опубликованных работ о возможности преодоления кулоновского барьера в рамках МРП [24].

## 2. ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛЕЙ И ЧАСТИЦ В РАМКАХ ПОДХОДА МРП

Локализация полей и частиц, их преобразования в рамках подхода МРП подробно рассмотрены в работах [6-10,24]. Ниже коротко изложены некоторые результаты этих работ, относящиеся к теме настоящей статьи.

Модель расширенного пространства позволяет описать процесс локализации электромагнитного поля при попадании электромагнитной волны из вакуума во внешнее переменное в пространстве поле (например, электрона) или в сходящийся (расширяющийся) волновод.

В МРП рассмотрено обобщение специальной теории относительности Эйнштейна (СТО) на 5-мерное пространство, а точнее говоря на (1+4)-мерное пространство  $(T, X, Y, Z, S)$ , обладающее метрикой  $(+ - - - -)$ . Физическим основанием для такого обобщения служит тот факт, что в СТО массы частиц являются скалярами и не меняются при их упругих взаимодействиях.

Однако хорошо известно, что фотон можно считать безмассовой частицей и описывать плоской волной только в бесконечном пустом пространстве. Если же фотон попадает в среду или оказывается в ограниченном пространстве, например, в резонаторе или волноводе, то он приобретает ненулевую массу. Эта масса может появляться и меняться вследствие электромагнитного взаимодействия и порождать гравитационные силы. Именно данное обстоятельство и позволяет рассматривать гравитацию и электромагнетизм как единое поле.

МРП основано на предположении, что соотношение, связывающее энергию, импульс и массу является 5-мерным, если принять во внимание возможность изменения массы в физических процессах

$$E^2 - c^2 p_X^2 - c^2 p_Y^2 - c^2 p_Z^2 - m^2 c^4 = 0. \quad (1)$$

При этом в МРП длина Лоренц-ковариантного 5-вектора, соответствующего объектам, удовлетворяющим (1), равняется нулю:

$$(ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2 - s^2 = 0. \quad (2)$$

Представляется естественным расширить пространство параметров, характеризующих частицу, с учетом того, что при взаимодействии ее масса может меняться.

Приведем простую аналогию. Свободная частица движется по прямой, поэтому, чтобы описать ее поведение, можно ограничиться (1+1)-мерным пространством, образованным

временем  $T$  и направлением ее движения  $X$ , поскольку остальные координаты  $Y$  и  $Z$  остаются постоянными. Если же частица начинает взаимодействовать с другими объектами так, что может уйти с прямой и начать двигаться еще и в плоскости  $(YZ)$ , то такого пространства уже недостаточно и его приходится расширять до (1+3)-мерного. Точно также и в нашем случае, пока масса частицы не меняется, можно ограничиться пространством 4-мерным Минковского  $M(1,3)$ , но если она начинает меняться, пространство  $M(1,3)$  приходится расширять до 5-мерного  $G(T; X, Y, Z, S)$ .

В этом пространстве вводится изотропный 5-мерный вектор энергии-импульса массы:

$$\vec{p} = (E/c; p_X, p_Y, p_Z) \quad (3)$$

и 5-мерный изотропный вектор тока, порождающий единое электромагнитно-гравитационное поле:

$$\vec{\rho} = (\vec{j}_0, \vec{j}_1, \vec{j}_4) = \left[ \frac{emc}{\sqrt{1-\beta^2}}, \frac{em\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}, emc \right]. \quad (4)$$

Аналогично в МРП вводится 5-вектор-потенциал  $A$ :

$$A = (\varphi, \vec{A}, A_S) = (A_T, A_X, A_Y, A_Z, A_S). \quad (5)$$

Компоненты такого 5-мерного вектор-потенциала связаны в МРП системой уравнений:

$$\diamond_{(5)} A_T = -4\pi\rho, \quad (6)$$

$$\diamond_{(5)} \vec{A}_{X,Y,Z} = \frac{-4\pi}{c} \vec{j}, \quad (7)$$

$$\diamond_{(5)} A_S = \frac{-4\pi}{c} j_S, \quad (8)$$

$$\diamond_{(5)} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2}{\partial s^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}. \quad (9)$$

На основе вектор-потенциала (5) в МРП можно построить обычные электрическое и магнитное поля  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , а также два новых поля – скалярное  $Q$  и векторное  $\vec{G}$ , компоненты которых определяются аналогично построению полей в четырехмерном пространстве Минковского:

$$\|F_{ik}\| = \frac{\partial A_i}{\partial x_k} - \frac{\partial A_k}{\partial x_i}; \quad i, k = t, x, y, z, s, \quad (10)$$



$$\|F_{ik}\| = \begin{pmatrix} 0 & -E_x & -E_y & -E_z & -Q \\ E_x & 0 & -H_z & H_y & -G_x \\ E_y & H_z & 0 & -H_x & -G_y \\ E_z & -H_y & H_x & 0 & -G_z \\ Q & G_x & G_x & G_x & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Внешнее воздействие в МРП описывается с помощью поворотов трех гиперболических поворотов  $(T,X)$ ,  $(T,Y)$ ,  $(T,Z)$ , соответствующих преобразованиям Лоренца в четырехмерном пространстве Минковского  $M(1,3)$  и новых типов поворотов – одного гиперболического  $(T,S)$  и трех эвклидовых  $(X,S)$ ,  $(Y,S)$ ,  $(Z,S)$  в расширенном пространстве  $G(1,4)$ .

Повороты в  $G(1,4)$  имеют ясный физический смысл, так например, гиперболические повороты  $(T,X)$ ,  $(T,Y)$ ,  $(T,Z)$  это просто, согласно (1) и (2), изменение скорости частицы в соответствующем направлении  $X$ ,  $Y$  или  $Z$ .

В случае гиперболических поворотов в плоскости  $(TS)$  согласно (2) имеет место одновременное изменение массы и энергии частицы. Например, зависимость массы фотона от угла поворота  $\theta$  определяется формулой  $mc^2 = \hbar\omega sh\theta$  [6-10]. Выражение для параметра локализации  $l$  через угол  $\theta$ :

$$l = \frac{2\pi c}{\omega \cdot sh\theta}. \quad (12)$$

Для эвклидовых поворотов в плоскости  $(XS)$  зависимость массы фотона от угла поворота  $\psi$  определяется формулой  $mc^2 = \hbar\omega \sin\psi$ , откуда следует выражение для параметра локализации  $l$  через угол  $\psi$ :

$$l = \frac{2\pi c}{\omega \cdot \sin\psi}. \quad (13)$$

Скорость распространения волны  $c$  в вакууме связана с распространением скорости в среде или волноводе  $v$  и показателем преломления  $n$  соотношением  $v = c/n$ .

В случае поворотов  $(XS)$  фотон под воздействием внешнего поля приобретает массу, связанную с показателем преломления соотношением:

$$m_{(XS)} = \frac{\hbar\omega}{c^2} \cdot \sin\psi = \frac{\hbar\omega}{c^2 n}. \quad (14)$$

Поворот  $(XS)$  соответствует в МРП переходу из пространства с одной оптической

плотностью в пространство с другой оптической плотностью. При этом никаких временных процессов не происходит, всё рассматривается в один и тот же момент времени. Поэтому энергия частиц сохраняется, а все происходящие с ними процессы сводятся к внутренним перестройкам. Условно это можно понимать так, что частица, попадая в более плотную среду, деформируется упругим образом, а покидая ее, восстанавливает свои характеристики.

В случае гиперболических поворотов  $(TS)$  фотон под воздействием внешнего поля приобретает массу, связанную с показателем преломления соотношением:

$$m_{(TS)} = \frac{\hbar\omega}{c^2} \cdot sh\theta = \frac{\hbar\omega}{c^2} \sqrt{n^2 - 1}. \quad (15)$$

Физический смысл поворотов  $(TS)$  в том, что пространственных движений мы не совершаем, все время находимся в одной и той же точке, но оптическая плотность в этой точке с течением времени меняется. В данном случае преобразование  $(TS)$  означает переход к другому моменту времени и другой оптической плотности. Это можно интерпретировать так, что в пространстве возникает внешнее поле, которое, действуя на частицу и совершая работу, изменяет ее энергию и массу.

С точки зрения МРП переход из среды с одним показателем преломления в среду с другим показателем преломления можно интерпретировать как движение вдоль пятой координаты Расширенного пространства. Это  $(1+4)$ -мерное пространство можно понимать как набор  $1+3$ -мерных пространств Минковского, каждое из которых характеризуется некоторым параметром, типа показателя преломления  $n$ . И переход из среды с показателем  $n_1$  в среду с показателем преломления  $n_2$  можно интерпретировать как переход в  $(1+4)$ -мерном пространстве из одного  $(1+3)$ -мерного подпространства в другое  $(1+3)$ -мерное подпространство.

Таким образом, геометрия Расширенного пространства оказывается связанной с физикой тех процессов, которые мы изучаем в каждой конкретной задаче. А именно, с полями и средами, которые участвуют в этих процессах. Распределение этих сред и полей в нашем

обычном пространстве Минковского определяет распределение "показателя преломления" в Расширенном пространстве, т.е. его геометрию.

В работе [8] было найдено решение системы уравнений (6)-(8) в виде

$$U(s, x, y, z, t) = u(s, x, y, z) \cdot e^{-iks} \cdot e^{i\omega t}, k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (16)$$

предполагая, что искомая функция стационарна по времени и меняется медленно вдоль оси  $s$  по сравнению с изменением вдоль осей  $x, y, z$ . В этом случае решение имеет вид 3-мерной гауссовой волны

$$u = u_0 \left( \frac{w_0}{w} \right)^{3/2} \times \exp \left[ -i(ks + \varphi) - (x^2 + y^2 + z^2) \left( \frac{1}{w^2} + \frac{ik}{2R} \right) \right]. \quad (17)$$

Здесь  $w_0$  – минимальный радиус волны в точке  $s = 0$ ;  $w$  – диаметр волны в точке  $s_1$  и  $R$  – радиус кривизны волнового фронта в этой точке.

При попадании плоской электромагнитной волны в среду или внешнее поле МРП предсказывает, что в соответствии с (17) происходит с учетом сделанных выше предположений локализация плоской волны в сферу радиусом  $w_0$ .

Отметим также, что в работе [24] было показано, что поля (11) преобразуются друг в друга при поворотах в  $G(1,4)$ , что приводит к возможности преодоления кулоновского барьера в рамках МРП.

1) Гиперболические повороты в плоскости  $(T, X)$  приводят к следующему преобразованию полей:

$$\vec{E}' = \vec{E} + \frac{1}{c} [v, \vec{H}], \quad \vec{G}' = \vec{G} + \frac{v_s}{c} \vec{E}, \quad (18)$$

$$\vec{H}' = \vec{H}, \quad Q' = Q.$$

2) Гиперболические повороты в плоскости  $(T, S)$  приводят к:

$$\vec{E}' = \vec{E} + \frac{v_s}{c} \vec{G}, \quad \vec{G}' = \vec{G} + \frac{v_s}{c} \vec{E}, \quad (19)$$

$$\vec{H}' = \vec{H}, \quad Q' = Q.$$

3) Эвклидовы повороты в плоскости  $(X, S)$  приводят к:

$$\vec{E}' = \vec{E} - \vec{u}Q, \quad \vec{G}' = \vec{G} + [\vec{u}, \vec{H}], \quad (20)$$

$$\vec{H}' = \vec{H} + [\vec{u}, \vec{G}], \quad Q' = Q + \frac{1}{c} (\vec{u}, \vec{E}).$$

Здесь  $v, v_s, u$  – скорости, соответствующие движению вдоль соответствующей оси в  $G(1,4)$ .

В [24] показано, что в рамках МРП поле плоской электромагнитной волны  $\vec{E}, \vec{H}$  при поворотах в плоскостях  $\varphi^{YS} + \varphi^{ZS}$  на специально подобранные углы может полностью перейти в поля  $G$  и  $Q$ , что позволит преодолеть кулоновский барьер.

### 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

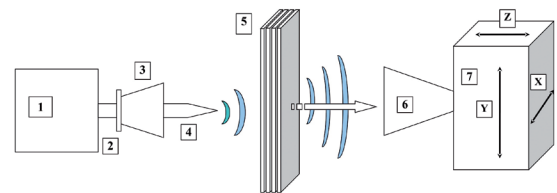
#### 3.1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Подробное описание созданной экспериментальной установки приведено в работе [1].

Полученные на установке результаты измерений будут сравниваться с результатами расчетов на основе существующих моделей распространения СВЧ излучения и предсказаний на базе МРП. На установке также предполагается измерение параметров локализации СВЧ при попадании излучения в диэлектрические среды с показателем преломления больше единицы.

Схема установки приведена на **Рис. 1**.

СВЧ излучение частотой 38 ГГц генерируется генератором 1 марки Г4-141 (область генерации 36-55 ГГц). Мощность выходного сигнала регулируется от 1 до  $4 \cdot 10^{-3}$  Вт, диапазон изменения уровня выходной мощности 30 дБ. Нестабильность частоты выходного не более  $10^{-3}$ . Предел нестабильности уровня выходной мощности  $\pm 0.3$  дБ. После генератора СВЧ излучение распространяется по медному посеребренному выходному волноводу 2 длиной



**Рис. 1.** Схема установки. 1 – генератор СВЧ излучения 38 ГГц, 2 – выходная рупорная антенна, 4 – тefлоновая диэлектрическая вставка постоянного или переменного сечения, 5 – диэлектрический листовый поглотитель СВЧ излучения переменной толщины 0-50 мм, 6 – приемный рупор с приемником СВЧ излучения, соединенный с АЦП и управляющим компьютером, 7 – система 3-мерного X-Y-Z позиционирования приемника.

30 мм, имеющему прямоугольное сечение  $a \times b = 5.5 \times 2.5$  мм.

Внутри волновода 2 устанавливается диэлектрический стержень 4, изготовленный из тефлона, полностью заполняющий волновод и выходящий из волновода на 135 мм наружу. Мы использовали два типа диэлектрических тефлоновых стержней различных профилей: №1 с сечением от  $5.5 \times 2.5$  мм в начале до  $0.1 \times 2.5$  мм в конце стержня длиной 180 мм и №3 с одинаковым сечением  $5.5 \times 2.5$  мм вдоль всего стержня длиной 200 мм.

На установке реализована возможность установки рупорной антенны 3 (выходной диаметр 45 мм и длина 75 мм), также как и волновод 2, имеющей толщину стенок 1.2 мм, изготовленный из меди и посеребренный изнутри.

Приемник 6, совмещенный с рупорной антенной (входной диаметр 35 мм, длина 55 мм), может прецизионно перемещаться в трех пространственных направлениях (точность перемещения 0.1 мм в диапазоне 0-140 мм) с помощью системы 3-мерного позиционирования приемника 7. Далее принятый СВЧ сигнал обрабатывался АЦП и передавался на управляющий компьютер.

Для изучения возможного различия поглощения СВЧ излучения в зависимости от степени локализации между излучателем 4 с установленным тефлоновым сердечником с постоянным профилем №1 или переменным профилем №3 и приемником 6, был установлен диэлектрический листовой поглотитель электромагнитного СВЧ излучения 5, состоящий из набора диэлектрических пластин толщиной от 2 до 16 мм. Максимальная толщина наборного листового диэлектрического поглотителя составила 55 мм. Измеренный коэффициент поглощения СВЧ излучения 38 ГГц при изменении суммарной толщины наборного листового диэлектрического поглотителя от 2 до 55 мм составил от 5 до 90% от величины выходного сигнала. При установке максимального уровня выходной мощности сигнала на уровне  $4 \cdot 10^{-3}$  Вт амплитуда регистрируемого полезного сигнала достигает уровня 350 мВ на расстоянии около 150 мм.

### 3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На Рис. 2 представлены первые результаты измерения формы вертикальных профилей СВЧ волны частотой 38 ГГц, выходящей из прямоугольного волновода сечением  $5.5 \times 2.5$  мм, совмещенного с выходным рупором диаметром 45 мм и длиной рупора 60 мм. Входной рупор, совмещенный с датчиком излучения, имел диаметр 35 мм и длину рупора 50 мм.

Вертикальные профили были измерены как посередине пучка в горизонтальном направлении, так и с отстройкой через каждые 5-10 мм от среднего сечения. Представленные на Рис. 2 вертикальные профили волны измерены на различных расстояниях 50, 100 и 150 мм между выходным и входным сечениями рупоров.

На Рис. 2 представлены для сравнения формы профиля волны на разных расстояниях без учета реальной величины принимаемого сигнала. Видно, что на расстоянии 50 мм волна еще не сформировалась окончательно, что соответствует ближней зоне дифракции Френеля для излучения частотой 38 ГГц (длина волны 7.89 мм). Уже на расстоянии 100 мм фронт волны практически сформирован, что соответствует дальней дифракционной зоне Фраунгофера.

Данные результаты хорошо соответствуют теоретическим представлениям о формировании волнового фронта при излучении электромагнитного излучения в зависимости от расстояния по направлению распространения излучения.

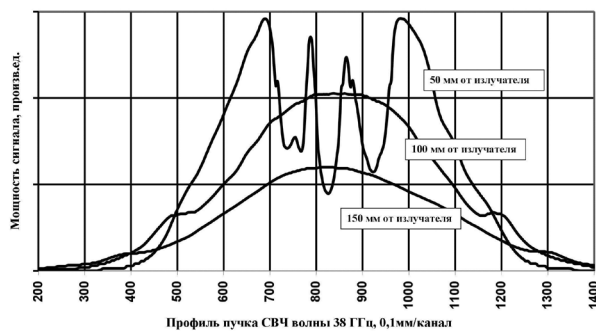


Рис. 2. Сравнение формы профилей пучков СВЧ 38 ГГц (без учета относительной величины сигнала), в зависимости от расстояния от излучателя до приемника 50, 100 и 150 мм. Выходной рупор диаметром 45 мм, длина рупора 60 мм и входной рупор 35 мм, длина рупора 50 мм.

На расстояниях, соответствующих ближней дифракционной зоне, теоретический расчет формы волнового фронта представляет существенные трудности, поэтому большинство измерений мы проводили на расстояниях более 100 мм между излучателем и приемником. В то же время мы были ограничены в возможности измерять волновой фронт на больших расстояниях, так как максимальное возможное прецизионное перемещение приемника 6, используемое на установке, было ограничено 140 мм с точностью позиционирования системы 7 в 0.1 мм, см. Рис. 1.

Для экспериментальной оценки наличия или отсутствия различий степени поглощения электромагнитных волн, обладающих различной степенью локализации в наборных диэлектрических поглотителях различной толщины, была собрана установка, представленная на Рис. 1. Различная форма излучаемой электромагнитной волны создавалась тефлоновыми поглотителями 4, имеющими постоянный или переменный профиль сечения. В зависимости от профиля тефлоновой вставки №1 или №3 в выходной волновод 2 формы волнового фронта излучения на уровне половины интенсивности были различными. На расстоянии 100 мм от внешнего среза тефлоновой вставки после прохождения диэлектрического поглотителя толщиной 18 мм величина вертикального профиля сигнала от прямоугольной вставки №1 составляет  $316 \pm 3$  мм на полувысоте от максимального значения. При этом от вставки №3, имеющей сходящийся профиль сигнала, величина на полувысоте составила  $424 \pm 3$  мм.

На Рис. 3 приведены результаты одного из проведенных экспериментов по поглощению СВЧ излучения частотой 38 ГГц в диэлектрическом поглотителе переменной толщины. В данном эксперименте тефлоновая вставка со сходящимся профилем №3 (от  $5.5 \times 2.5$  мм в начале до  $0.1 \times 2.5$  мм в конце) была вставлена в выходной волновод 2 и выступала из него на 125 мм, при этом выходной рупор 3 отсутствовал, см. Рис. 1. Входной рупор прямоугольного сечения  $36 \times 30$  мм длиной 60 мм, совмещенный с приемником 6, был установлен на расстоянии 100 мм от конца тефлоновой вставки. Наборный

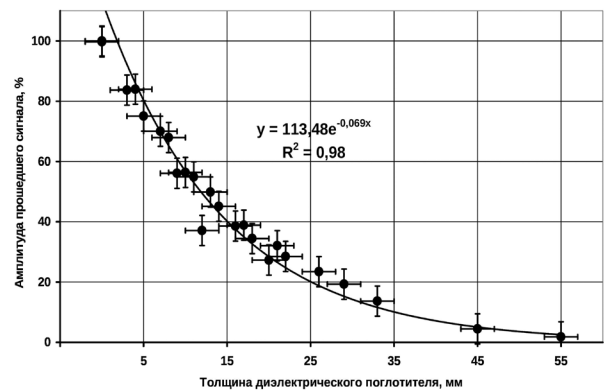


Рис. 3. Зависимость относительной величины прошедшего сигнала СВЧ излучения частотой 38 ГГц от толщины наборного диэлектрического поглотителя.

тефлоновый поглотитель толщиной от 2 до 55 мм юстировался в диапазоне 0.1-4 мм от окончания тефлоновой вставки таким образом, чтобы уровень сигнала в приемнике 6 от прошедшего через поглотитель излучения был максимальным. Для уменьшения уровня помех от рассеянных оборудованием установки СВЧ волн на выходе излучателя и входе приемника крепились специальные поглотители СВЧ излучения, что позволило существенно снизить уровень шума в приемном тракте.

На Рис. 3, кроме экспериментальных данных зависимости величины прошедшего сигнала при использовании тефлоновой вставки сходящегося профиля №3, приведена аппроксимация на основе экспоненциальной формулы полученных данных и величина достоверности данной аппроксимации  $R^2$ . Сравнение полученных формул аппроксимации для тефлоновых вставок №1 (прямоугольное сечение) и №3 (сходящееся сечение) показало различие в степенях показателей экспоненты на уровне 4-5% ( $-0.069$  против  $-0.074$ ). При этом показатель экспоненты в формуле тренда соответствующей поглощению локализованной волны, выходящей из сходящегося волновода №3, меньше чем показатель экспоненты, получающийся при аппроксимации экспоненциальным законом результатов тефлонового стержня №1, имеющим прямоугольный постоянный профиль.

Точность данных первых экспериментальных результатов и общий объем проведенных



измерений позволяет пока только оценить и ограничить величину полученного эффекта различия в поглощении электромагнитных СВЧ волн в районе 35-50 ГГц с различной степенью локализации сверху величиной около 3-4% для данной геометрии эксперимента.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Получены первые качественные результаты, позволяющие сравнить поглощение электромагнитных волн различной степени локализации в диэлектрическом поглотителе. В рамках МРП распространение электромагнитной волны вдоль оси  $Z$  в сходящемся по осям  $X$  и  $Y$  волноводе переменного сечения, заполненным диэлектриком с показателем преломления больше 1, соответствует случаю комбинации поворотов  $\varphi^{YS}$ ,  $\varphi^{XS}$  и  $\gamma^{ZS}$  в плоскостях  $XS$ ,  $YS$  и  $ZS$  [6,24]. При комбинации поворотов в различных плоскостях, согласно формализму МРП, плоская электромагнитная волна, состоящая только из компонент  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ , переходит частично (а при определенных условиях и полностью) в новые поля  $\vec{G}$ ;  $Q$ .

Так, например, при повороте  $\varphi^{YS}$  происходят следующие изменения компонент:

$$E'_y = \cos \varphi^{YS} E_y + Q \sin \varphi^{YS}; H'_x = H_x \cos \varphi^{YS} - G_z \sin \varphi^{YS};$$

$$Q = Q \cos \varphi^{YS} - \sin \varphi^{YS} E_y; G'_x = G_x \cos \varphi^{YS} - H_z \sin \varphi^{YS}.$$

При повороте  $\varphi^{XS}$  и  $\gamma^{ZS}$  в плоскостях  $XS$  и  $ZS$  согласно МРП также происходят аналогичные преобразования полей [6-7].

Согласно полученным в МРП качественным оценкам процессов, происходящих при прохождении плоской электромагнитной волны через сходящийся диэлектрический волновод переменного сечения (локализация волны), имеет место возникновение нового полевого объекта, в котором из-за частичного преобразования исходных полей  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  в новые поля возможно более эффективное преодоление кулоновского барьера в веществе. Как результат, в экспериментах, согласно МРП, должно наблюдаться менее эффективное рассеяние таких локализованных волн по сравнению с нелокализованным электромагнитным излучением [24].

В проведенной нами серии экспериментов получена оценка рассеяния СВЧ излучения

частотой 38 ГГц в диэлектрических поглотителях переменной толщины при различной форме волнового фронта падающей волны (различной степени локализации). В случае, если исходное СВЧ излучение от генератора проходит через сходящийся диэлектрический волновод, зафиксировано меньшее рассеяние излучения при распространении через диэлектрический поглотитель по сравнению с экспериментами, в которых СВЧ от генератора проходило через тefлоновый стержень постоянного сечения.

Для сравнения полученных экспериментальных данных с результатами модельных расчетов мы планируем провести вычисления на основе существующих пакетов программ, например, NEC2, MININEC3, а также HFSS (High Frequency Structure Simulator), IE3D, Microwave Office, Microwave Studio [2-5].

В целях более полного изучения предполагаемого эффекта будут проведены измерения с использованием силиконовых диэлектрических материалов, которые обладают существенно большим показателем преломления для электромагнитных волн в СВЧ диапазоне.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Циценко ДЮ, Державин СИ, Кравченко ЯВ, Богданов МР. Установка для исследования параметров локализации электромагнитной волны в волноводе переменного сечения в рамках предсказаний 5-D модели расширенного пространства. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2021, 13(4):407-418. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.407.
2. Описание базовой MMANA-GAL. Веб-сайт разработчика программы MMANA-GAL. DL2KQ & DL1PBD; <http://gal-ana.de/basicmm/ru/>.
3. Гончаренко ИВ. *Антенны КВ и УКВ. Часть 1. Компьютерное моделирование. MMANA*. М., ИП РадиоСофт, журнал "Радио", 2004. 126 с.
4. High Frequency Structure Simulation. *Manuals*, Agilent, 2000.
5. Сиркели АИ, Драч ВЕ. Обзор САПР моделирования СВЧ-устройств.

- Интерактивная наука*, 2017, 1(11):139-141; doi: 10.21661/r-116149.
6. Andreev VA, Tsipenyuk DYU. Electromagnetic field in the extended space 5-dimensional model, its localization and interaction with waveguide. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2019, 11(2):93-102; doi: 10.17725/rensit.2019.11.093.
  7. Andreev VA, Tsipenyuk DYU. The Mass and Size of Photons in the 5-Dimensional Extended Space Model. *Journal of Modern Physics*, 2016, 7(11):1308-1315; doi: 10.4236/jmp.2016.711116.
  8. Andreev VA, Tsipenyuk DYU. The 5-dimensional Extended space model. Localization of a plane wave and its interaction with a point charged particle. *Pramana-J. Phys.*, 2021, 95:196; doi: 10.1007/s12043-021-02233-7.
  9. Tsipenyuk DYU. Non-isotropic objects in extended space. *Engineering Physics*, 2017, 6:20-26; <http://infiz.tgizd.ru/en/arhiv/16434>.
  10. Tsipenyuk DYU, Andreev VA. Elektrodinamika v rasshirennom prostranstve [Electrodynamics in extended space]. *Preprint IOFAN*, 1999, 9:26; doi: 10.24412/FhITben9-y4 (in Russ.).
  11. Wesson PS. *Space, Time, Matter: modern Kaluza-Klein theory*. Singapore, World Scientific Publ., 1999, 209 p. Available: <https://archive.org/details/spacetimematterm0000wesson>.
  12. Wesson PS. *Five-Dimensional Physics. Classical and Quantum Consequences of Kaluza-Klein Cosmology*. Singapore, World Scientific Publ., 2006, 232 p.
  13. James Overduin, Paul Wesson. Kaluza Klein Gravity. *Physics Reports*, 1997, 283:303-378.
  14. Overduin J, Henry RC. *Physics and the Pythagorean Theorem*. arXiv:2005.10671v2; 2020.
  15. Владимиров ЮС. *Пространство-время: явные и скрытые размерности*. М., ЛИБРОКОМ, 2010, 208 с.
  16. Klein Felix. Über neuere englische Arbeiten zur Gesammelte matematische Abhandlungen. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 1901, 46:375.
  17. Einstein A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 1916, 49:769-822.
  18. Klein Oskar. Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie. *Zeitschrift für Physik*, 1926, 37(12):895-906; doi: 10.1007/BF01397481.
  19. Kaluza Th. Zum Unitätsproblem in der Physik. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, Berlin, 1921:966-972.
  20. Fock VA. Über die invariante Form der Wellen und der Bewegungsgleichungen für einen geladenen Massenpunkt. *Zeitschrift für Physik*, 1926, 39:226-232.
  21. Mandel H. Über den Zusammenhang zwischen der Einsteinschen Theorie des Fern. Parallelismus und der Fünfdimensionalen Fieldtheorie. *Zeitschrift für Physik*, 1926, 39:136-145.
  22. Einstein A, Bergmann P. Generalization of Kaluza's Theory of Electricity. *Ann. Math., Ser. 2*, 1938, 39:683-701.
  23. Румер ЮБ. *Исследования по пятимерной оптике*. М., URSS, 2010, 152 с.
  24. Andreev VA, Tsipenyuk DYU. Tunneling of the potential barrier and particle's size in the Extended Space Model. *Proc.Int.Conf. PIRT-2015*, 2015, 20-32. DOI: 10.18698/2309-7604-2015-1-20-32.

**Кравченко Ярослав Викторович**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

**Москва 119991, Россия**

**E-mail: [kravch@kapella.gpi.ru](mailto:kravch@kapella.gpi.ru)**

**Ципенюк Дмитрий Юрьевич**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

Московский политехнический университет

Москва 107023, Российская Федерация

Всероссийский институт научной и технической информации РАН

**Москва 125190, Россия**

**E-mail: [Dimat777@list.ru](mailto:Dimat777@list.ru)**

**Воропинов Андрей Васильевич**

*к.т.н.*

Laser Graphic Art Ltd.

**Москва 105318, Россия**

**E-mail: [avv@lasergraphicart.com](mailto:avv@lasergraphicart.com)**