

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.407

Установка для исследования параметров локализации электромагнитной волны в волноводе переменного сечения в рамках предсказаний 5-D модели расширенного пространства

^{1,2}Ципенюк Д.Ю., ¹Державин С.И., ¹Кравченко Я.В., ²Богданов М.Р.

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

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

E-mail: tsip@kapella.gpi.ru, derzb@kapella.gpi.ru, kravch@kapella.gpi.ru, bogdanov_mr@mail.ru

Поступила 24.08.2021, рецензирована 14.09.2021, принята 27.09.2021

Представлена действительным членом РАЕН А.В. Андреевым

Аннотация: В работе описано создание и тестирование экспериментальной установки 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. Также будут проведены измерения в условиях заполнения волновода диэлектрическими материалами с показателями преломления от 1.46 до 4.0 для СВЧ излучения указанного диапазона. Установка предназначена для измерений параметров локализации СВЧ излучения при его прохождении через волновод переменного сечения, заполненный материалами с различными показателями преломления. Интерпретация результатов будет проведена в рамках 5-D модели расширенного пространства (МРП). Модель расширенного пространства сформулирована в (1+4)-мерном пространстве время-координата-интервал. Дополнительной пространственной координатой в МРП служит интервал. В сопряженном 5-D пространстве энергия-импульс-масса интервалу в МРП соответствует масса. В формализме МРП изучается вопрос о возникновении у фотона ненулевой переменной массы и его локализации под влиянием внешнего поля.

Ключевые слова: локализация электромагнитного поля, волновод, СВЧ-излучение, (1+4)D модель расширенного пространства, переменная масса фотона, интервал

PACS: 11.10.Kk, 03.50.-Z, 03.65.Pm

Для цитирования: Ципенюк Д.Ю., Державин С.И., Кравченко Я.В., Богданов М.Р. Установка для исследования параметров локализации электромагнитной волны в волноводе переменного сечения в рамках предсказаний 5-D модели расширенного пространства. РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(4):407-418. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.407.

Installation for studying the parameters of localization of an electromagnetic wave in a waveguide of variable cross-section in the framework of the predictions of the 5-D extended space model

^{1,2}Dmitry Yu. Tsipenyuk, ¹Sergey I. Derzhavin, ¹Yaroslav V. Kravchenko

¹Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, <http://gpi.ras.ru/>
Moscow 119991, Russian Federation

²Moscow Polytechnic University, <https://new.mospolytech.ru/>
Moscow 107023, Russian Federation

E-mail: tsip@kapella.gpi.ru, derzb@kapella.gpi.ru, kravch@kapella.gpi.ru

Mikhail R. BogdanovMoscow Polytechnic University, <https://new.mospolytech.ru/>

Moscow 107023, Russian Federation

E-mail: bogdanov_m_r@mail.ru

Received August 24, 2021, peer-reviewed September 14, 2021, accepted on September 27, 2021

Abstract: The paper describes the creation and testing of an experimental setup for studying the parameters of localization of electromagnetic microwave radiation with a power of 0.001-0.004 W in the range of 36.0-79.0 GHz when propagating radiation in metal waveguides of variable cross-section. Measurements will also be carried out under conditions of filling the waveguide with dielectric materials with refractive indices from 1.46 to 4.0 for microwave radiation of the specified range. The installation is designed to measure the parameters of the localization of microwave radiation when it passes through a waveguide of variable cross-section, filled with materials with different refractive indices. Interpretation of the results will be carried out within the framework of the 5-D extended space model (ESM). The extended space model is formulated in (1+4)-dimensional space time-coordinate-interval. An additional spatial coordinate in the ESM is the interval. In the conjugate 5-D space, the energy-momentum-mass interval in the ESM corresponds to mass. In the ESM formalism, the question of the appearance of a nonzero variable mass in a photon and its localization under the influence of an external field is studied.

Keywords: localization of the electromagnetic field, waveguide, microwave radiation, (1+4)D extended space model, variable photon mass, interval

PACS: 11.10.Kk, 03.50.-Z, 03.65.Pm

For citation: Dmitry Yu. Tsipenyuk, Sergey I. Derzhavin, Yaroslav V. Kravchenko, Mikhail R. Bogdanov.

Installation for studying the parameters of localization of an electromagnetic wave in a waveguide of variable cross-section in the framework of the predictions of the 5-D extended space model. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, 13(4):407-418. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.407.

Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies, 2021, 13(4):407-418. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.407.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (408)
 2. ПОТЕНЦИАЛЫ И ТОКИ В РАМКАХ ПОДХОДА МРП (410)
 - 2.1. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОЛЕЙ И ЧАСТИЦ В РАМКАХ ПОДХОДА МРП (411)
 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ (413)
 4. РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВОЧНЫХ И ТЕСТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ (415)
 5. ВЫВОДЫ (416)
- ЛИТЕРАТУРА (417)

1. ВВЕДЕНИЕ

В современной науке активно дискутируется проблема объединения гравитационного и электромагнитного полей в одно. Исторически данная тема обсуждается более 100 лет. Большинство попыток построения модели, объединяющей поля, реализуются путем построения геометрических моделей физических взаимодействий и

интерпретации физики в рамках геометрии в пространствах большего числа измерений. Обзор литературы на тему многомерных теорий можно посмотреть, например в [1].

В самом начале 20 века Феликс Клейн [2] рассмотрел теорию Гамильтона-Якоби как оптику в пространствах большего числа измерений. Идеи Клейна не получили дальнейшего развития в момент создания. Интерес к проблеме геометризации физики был повторно вызван созданием Общей теории относительности (ОТО) [3]. Исследователями были предприняты усилия по описанию электромагнетизма в геометрических терминах по аналогии с гравитацией. Авторы этих работ старались расширить различными способами уже созданную схему ОТО вместо создания новых моделей.

Известность получили модели Клейна [4] и О. Калуцы [5]. Можно также упомянуть

работы Фока [6] и Мандела [7]. Отметим, что для построения этих моделей было использовано 5-мерное пространство. Тем не менее, ясной физической интерпретации пятой координаты в этих работах не было сделано. В дальнейшем попытки развить 5-мерные модели были предприняты многими учеными, среди которых Эйнштейн, де Бройль, Гамов и Румер [8,9], однако каких-то интересных результатов не получилось.

Мы считаем, что причиной относительного неуспеха данных подходов послужило отсутствие новых физических гипотез и основ на формальное обобщение уже имеющихся моделей.

Интересно мнение о причинах неудач в создании единой теории поля Фока из его письма к Румеру 14 февраля 1950 г.: "Успех идеи геометризации в Эйнштейновской теории тяготения основан на том, что тяготение, и только оно одно, является универсальным, в том смысле, что все незаряженные тела, обладающие достаточно малой массой, движутся по одинаковому закону. Движение же заряженных тел в электромагнитном поле зависит от отношения заряда к массе. Поэтому геометризация соответствующих понятий может удалась только для одной частицы. В этом же лежит причина полнейшей неудачи всех «единых» теорий поля» [10, стр.78]".

Отметим также мнение Эйнштейна относительно недостатков 5-мерной теории Румера (модель расширенного пространства, МРП [14-18] близка к идее Румера, но существенно отличается от нее тем, что в МРП рассматривается интервал S как некомпактифицированная 5-я координата), высказанное в письме Эйнштейна М.Борну от 14.12.1929: «Господин Румер мне очень понравился. Его идея привлечения многомерных множеств оригинальна и формально хорошо осуществлена. Слабость коренится в том,

что найденные таким образом законы не полны и пути для логического обеспечения и полноты не предвидятся» [10, стр.163, 11].

Хотя в 5-оптике Румера и введена пятая координата в виде действия, и рассматривается 5-мерное пространство с метрикой $(+, -, -, -, -)$, но никаких преобразований в этом пространстве, которые перепутывали бы координату с другими четырьмя координатами пространства Минковского, он не рассматривает. Соответственно, и в сопряженном 5-мерном пространстве с координатами, масса также остается постоянной и не преобразуется в энергию и импульс.

Необходимо также отметить теорию калибровочных полей, в рамках которой электромагнетизм, гравитация и другие взаимодействия рассматриваются с единой геометрической точки зрения [12]. В работе Ландау [13] получены оценки величины "радиуса" элементарных частиц, исходя из предела применимости электродинамических представлений в квантовой механике. Отметим, что "радиус" электрона при этом оказался равным нулю.

Предложенный в МРП [14-18] подход принципиально отличается от всех указанных и аналогичных им теорий. В основе МРП лежит физическая гипотеза, состоящая в том, что масса (масса покоя) и сопряженная ей величина – действие (интервал) являются динамическими переменными. Величины этих переменных определяется взаимодействием полей и частиц. В этом отношении такая модель является непосредственным обобщением Специальной теории относительности (СТО). В СТО интервал и масса покоя частиц являются инвариантами, а в МРП они могут меняться. В частности, фотон может приобретать массу, причем как положительную, так и отрицательную. Эта масса может появляться и меняться вследствие электромагнитного

взаимодействия и порождают гравитационные силы. Именно данное обстоятельство и позволяет рассматривать в МРП гравитацию и электромагнетизм как единое поле.

Аналогичная МРП 5-мерная модель была разработана Paul Wesson с соавторами [19-22]. Р. Wesson предложил использовать "массу" в качестве пятой координаты, дополнительной ко времени и трем пространственным координатам: "Мы ... рассматриваем массу на той же основе, что и время и пространство..." [19, стр. 10]. "Это означает, что роль незаряженной массы 4D в геометрии 5D играет дополнительная координата" [19, стр. 191, уравнение (7.40)].

Этот подход кажется нам нелогичным. В этом случае это приводит к трудностям при обобщении тензора 4D энергии-импульса на тензор 5D энергии-импульса-массы в 5-мерном пространстве.

Конечно, масса может быть использована в качестве пятой координаты, но не в координатном пространстве. Массу следует рассматривать в пространстве импульсов, т.е. как дополнительную величину к энергии и трем компонентам импульса. А в координатном пространстве пятая координата должна быть другим значением, связанным с массой. В результате рассмотрения массы в качестве пятой координаты помимо времени и пространства в [19-22] было трудно установить связь m с реальными экспериментами.

Недавно James Overduin (соавтор Paul Wesson) и R.C. Henry в [23] предложили такую же идею введения 5-й координаты, что и Tsipenyuk D.Yu. and Andreev V.A. в 2000 году [14].

Настоящая работа посвящена описанию созданной нами экспериментальной установки и ее последующему тестированию. Установка предназначена 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. Данные параметры установки должны позволить экспериментально протестировать предсказание МРП в области локализации электромагнитных волн при попадании в среды с большим показателем преломления.

2. ПОТЕНЦИАЛЫ И ТОКИ В РАМКАХ ПОДХОДА МРП

В рамках модели расширенного пространства был описан процесс локализации электромагнитного поля при попадании электромагнитной волны из вакуума во внешнее поле (например, электрона) или в сходящийся волновод.

В МРП делается предположение, что соотношение, связывающее энергию, импульс и массу является 5-мерным, если принять во внимание возможность изменения массы в физических процессах:

$$E^2 - c^2 p_x^2 - c^2 p_y^2 - c^2 p_z^2 - m^2 c^4 = 0. \quad (1)$$

Рассматривается обобщение специальной теории относительности Эйнштейна (СТО) на (1+4)D-мерное пространство (T, \vec{X}, S) с метрикой $(+ - - -)$, где в качестве пятой координаты выступает интервал S , имеющий физический смысл действия. Основанием для такого обобщения служит то, что в СТО массы частиц являются скалярами и не меняются при их упругих взаимодействиях. 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 (в резонаторе или волноводе), то он приобретает ненулевую массу.

Длина Лоренц-ковариантного 5-вектора, соответствующего объектам, удовлетворяющим (1) в МРП равна нулю:

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

В отличие от (1+3)D пространства Минковского, где частице сопоставлен 4-мерный изотропный для безмассовых частиц и неизотропный для массивных частиц вектор энергии-импульса $(E/c; P(x), P(y), P(z))$, в (1+4)D МРП частице сопоставляется изотропный Лоренц-ковариантный для всех частиц 5-мерный вектор энергии-импульса-массы $(E/c; P(x), P(y), P(z), mc)$ длина которого равна нулю.

5-мерный вектор тока, порождающий единое электромагнитно-гравитационное поле, имеет вид:

$$\vec{\rho} = (j_0, \vec{j}, j_4) = \left[\frac{emc}{\sqrt{1-\beta^2}}, \frac{em\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}, emc \right]. \quad (3)$$

Это изотропный вектор $\vec{\rho}^2 = 0$.

Уравнение непрерывности, как и в обычном случае, выражается равенством нулю 5-дивергенции 5-тока

$$\sum_{i=0}^4 \frac{\partial j_i}{\partial x_i} = 0. \quad (4)$$

Если заряд покоится, то уравнение непрерывности принимает вид

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x_4} = 0. \quad (5)$$

Ток (3) порождает электромагнитно-гравитационное поле в расширенном пространстве $G(1,4)$. Это поле задается 5-вектор-потенциалом A :

$$A = (A_t, A_x, A_y, A_z, A_s) = (A_0, A_1, A_2, A_3, A_4). \quad (6)$$

Здесь и ниже мы пользуемся обозначениями $t = x_0, x = x_1, y = x_2, z = x_3, s = x_4$.

Компоненты этого вектор-потенциала определяются уравнениями

$$\Pi_{(5)} A_0 = -4\pi\rho, \quad (7)$$

$$\Pi_{(5)} \vec{A} = \frac{-4\pi}{c} \vec{j}, \quad (8)$$

$$\Pi_{(5)} A_5 = \frac{-4\pi}{c} j_s. \quad (9)$$

Здесь

$$\Pi_{(5)} = \frac{\partial^2}{\partial s^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}. \quad (10)$$

Отметим, что в том случае, когда зависимость от координаты s отсутствует и масса m , входящая в компоненты тока (3), является постоянной величиной, система уравнений (7)-(9) распадается на две независимые части. Уравнения (7), (8) задают обычные потенциалы электромагнитного поля, а уравнение (9) задает потенциал скалярного гравитационного поля. Эти поля существуют независимо друг от друга. Они объединяются в одно поле только тогда, когда масса m становится переменной и возникает зависимость от переменной s [18].

2.1. Локализация полей и частиц в рамках подхода МРП

Локализация полей и частиц в рамках подхода МРП подробно рассмотрена в [17,18]. Ниже изложены некоторые результаты этих работ. Отметим, что подход основан, на аналогии при сравнении дисперсионного соотношения свободной частицы

$$E^2 = (c\vec{p})^2 + m^2c^4. \quad (11)$$

и дисперсионным соотношением волны в моде полого металлического волновода

$$\omega^2 = \omega_{kr}^2 + (c\xi)^2. \quad (12)$$

Здесь ω_{kr} – критическая частота волноводной моды, а ξ – постоянная распространения волны. На сходство соотношений (11) и (12) обращали внимание де Бройль, Фейнман и другие авторы. С критической частотой ω_{kr} связывается параметр, который имеет размерность массы

$$m = \frac{\hbar\omega_{kr}}{c^2}, \quad (13)$$

массы, которую приобретает электромагнитное поле, когда оно попадает в волновод.

В частности, если волновод имеет квадратную форму со стороной размером a , то эта связь имеет вид

$$a = \frac{\sqrt{2\pi\hbar}}{mc}. \quad (14)$$

Эту величину мы предлагаем считать линейным параметром, который ассоциируется с безмассовой частицей, когда она приобретает массу m . Мы считаем, что одновременно с тем, как при попадании во внешнее поле безмассовая частица приобретает ненулевую массу, отвечающая ей бесконечная плоская волна сжимается до конечных размеров. И этот конечный размер характеризуется параметром локализации

$$l = \frac{2\pi\hbar}{mc}. \quad (15)$$

По виду величина (15) напоминает комптоновскую длину волны электрона, однако физический смысл у нее совсем другой. В формуле для комптоновской длины волны электрона параметр m – масса покоя электрона, а в формуле (15) m – это та масса, которую приобретает фотон, когда он подвергается внешним воздействиям.

В МРП внешнее воздействие описывается с помощью поворотов в расширенном пространстве $G(1,4)$. Поскольку линейный параметр l выражается с помощью формулы (15) через массу фотона, то с ее помощью можно найти зависимость этого параметра от величин, задающих эти повороты.

Так, в случае гиперболических поворотов в плоскости (TS) зависимость массы фотона от угла поворота θ определяется формулой $mc^2 = \hbar\omega sh\theta$. Подставляя это выражение в формулу (15), получаем выражение для параметра l через угол θ

$$l = \frac{2\pi c}{\omega \cdot sh\theta}. \quad (16)$$

В случае евклидовых поворотов в плоскости (XS) зависимость массы фотона от угла поворота ψ определяется формулой $mc^2 = \hbar\omega sin\psi$.

С ее помощью получаем выражение для параметра l через угол ψ

$$l = \frac{2\pi c}{\omega \cdot sin\psi}. \quad (17)$$

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 (TS) фотон под воздействием внешнего поля приобретает массу, связанную с показателем преломления соотношением

$$m_{(TS)} = \frac{\hbar\omega}{c^2} \cdot sh\theta = \frac{\hbar\omega}{c^2} \sqrt{n^2 - 1}. \quad (18)$$

Физический смысл поворотов (TS) состоит 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. Таким образом, 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. Все движения происходят по конусам и гиперболоидам и имеют транзитивный характер. Поскольку пространственных движений не совершается, импульсы частиц должны сохраняться.

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

$$m_{(XS)} = \frac{\hbar\omega}{c^2} \cdot sin\psi = \frac{\hbar\omega}{c^2 n}. \quad (19)$$

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, все 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. При этом не происходит обмена энергией и импульсом между средой и частицей.

Итак, 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. Иначе говоря, 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 [36] найдено решение системы уравнений (7)-(10) в виде

$$U(s, x, y, z, t) = u(s, x, y, z) \cdot e^{-iks} \cdot e^{i\omega t}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (20)$$

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

$$u = u_0 \left(\frac{w_0}{w} \right)^{3/2} \exp[-i(ks + \varphi) - (x^2 + y^2 + z^2) \left(\frac{1}{w^2} + \frac{ik}{2R} \right)]. \quad (21)$$

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 (21), с учетом сделанных выше предположений, происходит локализация плоской волны в сферу радиусом w_0 .

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

Для экспериментальной проверки корректности предсказаний МРП о параметрах локализации электромагнитной волны в волноводе переменного сечения нами была собрана специализированная экспериментальная СВЧ установка. На данной установке предполагается также измерение параметров локализации СВЧ при попадании излучения в диэлектрические среды с показателем преломления больше единицы.

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

Излучение в области СВЧ частот от 36 до 79 ГГц генерируется взаимозаменяемыми генераторами 1 марки Г4-141 (область генерации 36-54 ГГц) или Г4-142 (область генерации 53-79 ГГц). Нестабильность частоты выходного не более 10^{-3} , регулируемая мощность выходного сигнала до $4 \cdot 10^{-3}$ Вт, диапазон регулирования уровня выходной мощности не менее 30 дБ.

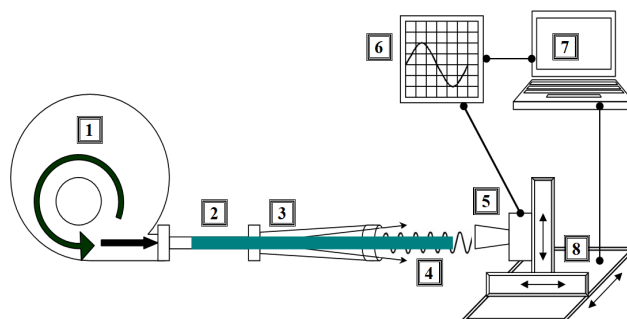


Рис. 1. Схема установки. 1 – генератор СВЧ излучения 36-79 ГГц, 2- прямоугольный волновод, 3 – выходная рупорная/секторальная антенна, 4 – тefлоновая или силиконовая диэлектрическая вставка переменного сечения, 5 – приемник СВЧ излучения, 6 – цифровой осциллограф, 7 – компьютер, 8 – система 3-мерного позиционирования приемника.

Предел нестабильности уровня выходной мощности ± 0.3 дБ. Штатные режимы работы генераторов: 1) непрерывная генерация; 2) внутренняя модуляция прямоугольными симметричными импульсами с частотой следования (1 ± 0.2) кГц и скважностью 2 ± 0.4 ; 3) электрическая дистанционная перестройка частоты цифровым кодом.

После генератора СВЧ излучение распространяется по медному посеребренному волноводу, имеющему прямоугольное сечение $a \times b = 5.5 \times 2.5$ мм для случая генератора Г4-141 (вариант 3.8×1.9 мм при использовании генератора Г4-142) длиной $l =$ от 30 до 50 мм.

Внутри волновода 2 может при необходимости устанавливаться диэлектрический стержень 4, изготовленный из тефлона или силикона, и полностью заполняющий волновод, и при необходимости выходящий из волновода на 150-200 мм наружу. При этом нами было изготовлена серия диэлектрических стержней, имеющих как неизменное сечение по длине, так и сходящихся равномерно в одном или двух направлениях. Например, для работы с генератором Г4-141 (область генерации 36-54 ГГц, что приблизительно соответствует длине волны СВЧ излучения от 8.32 до 5.55 мм) были изготовлены тефлоновые стержни различных профилей: №1 с сечением от 5.5×2.5 мм в начале до 2.2×1.6 мм в конце стержня длиной 200 мм; №2 с сечением от 5.5×2.5 мм в начале до 0.5×2.5 мм в конце стержня длиной 180 мм и №3 с одинаковым сечением 5.4×2.4 мм вдоль всего стержня длиной 200 мм.

Далее, на установке реализована возможность установки рупорной антенны 3, также как и волновод 2 имеющей толщину стенок 1.2 мм, изготовленной из меди и посеребренной изнутри. Мы имеем возможность устанавливать на выход 3 или на вход приемника 5 различных рупорных антенн. Рупорные антенны мы имеем

следующих видов и размеров: 1) рупорные антенны пирамидального типа, имеющие размеры длина рупора - 90 или 75 мм и размер выходной апертуры 45×45 мм или 40×40 мм; 2) рупорные антенны с круглым выходным сечением с размерами (длина \times выходной диаметр): 55×36 ; 110×44 ; 116×51 и 160×50 мм.

Принятый модулированный низкой частотой 1 кГц СВЧ сигнал от приемника 5 после оцифровки его параметров на осциллографе DS-1052 передается для записи и дальнейшей обработки на компьютер 7. Приемник 5 может прецизионно перемещаться в трех пространственных направлениях с помощью системы 3-мерного позиционирования приемника 8.

Прямое измерение параметров высокочастотного сигнала в режиме непрерывной генерации с разрешением в области 36-79 ГГц на собранной установке невозможно. По этой причине было принято решение измерять параметры СВЧ сигнала, получающегося при внутренней модуляции прямоугольными симметричными импульсами с частотой следования 1 ± 0.2 кГц и скважностью 2 ± 0.4 . Модулированный низкой частотой СВЧ сигнал уверенно регистрируется приемником, сопряженным с цифровым осциллографом на расстоянии 10-800 мм от выходного волновода. При установке максимального уровня выходной мощности сигнала на уровне $4 \cdot 10^{-3}$ Вт амплитуда регистрируемого полезного сигнала достигает уровня 700 мВ на расстоянии около 100 мм.

Измерение полезного сигнала с точностью менее 0.1 мВ на созданной установке представляется нецелесообразным. Этот вывод сделан по результатам экспериментально измеренных флуктуаций сигнала, вызываемых суммарно различными факторами. Такими факторами могут выступать нестабильность сигнала от генератора (уровень паразитной амплитудной

низкочастотной модуляции выходного сигнала составляет около 1% согласно техническому описанию), механические вибрации установки, воздушные потоки и т.д.

Таким образом, мы имеем диапазон полезного сигнала порядка 10^4 , что представляется достаточным для целей нашего эксперимента. Точность позиционирования приемника нашей установки не хуже 0.1 мм достаточна с учетом характерных расстояний, на которых происходит существенное изменение сигнала для СВЧ волн диапазона 3-8 мм.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВОЧНЫХ И ТЕСТОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На созданном экспериментальном стенде в период с апреля по июнь 2021 г. нами проведены несколько серий тестовых и калибровочных измерений, результаты которых описаны ниже.

Мощность выходного сигнала генераторов Г4-141 и Г4-142 можно изменять специальным регулятором, при этом стрелочный индикатор уровня сигнала показывает изменения тока в диапазоне 0-100 мВ. Было проведено измерение связи показаний стрелочного индикатора и реального уровня выходного сигнала. На Рис. 2 приведены данные, показывающие измененную связь показаний стрелочного

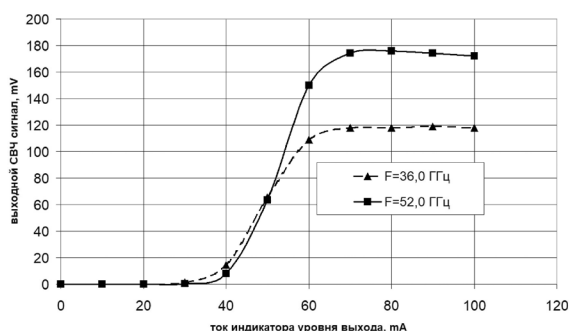


Рис. 2. Уровень линейности измеренного выходного СВЧ сигнала на расстоянии 200 мм от выходного волновода в зависимости от показаний стрелочного индикатора уровня выхода, установленного на генераторе Г4-141.

индикатора, установленного на генераторе Г4-141, с уровнем регистрируемого на расстоянии 200 мм СВЧ сигнала. Измерения проведены на двух частотах 36 и 52 ГГц.

Изменения линейности связи показаний индикатора с реальным уровнем выходного сигнала были проведены для двух частот 36 и 52 ГГц. Видно, что изменения выходного сигнала происходят при изменениях тока регулятора в диапазоне 30-70 мА. Точность измерения СВЧ сигнала от 0.1 до 2.0 мВ при различных амплитудах сигнала.

На Рис. 3 приведено изменение сигнала при линейном сдвиге приемника вдоль направления распространения СВЧ сигнала на 50 мм относительно тефлоновой вкладки.

Приемник перемещается в сторону излучателя относительно тефлоновой вкладки длиной 200 мм постоянного сечения, частично вставленной в выходной волновод (см. Рис.1). Частота излучателя в двух сериях измерений составила 36.0 и 52.0 ГГц, ток установленный на регуляторе выходной мощности 70 мА, что соответствует максимальной выходной мощности (см. Рис. 2). Точность измерения амплитуды СВЧ в данной серии сигнала составила 0.5-2.0 мВ.

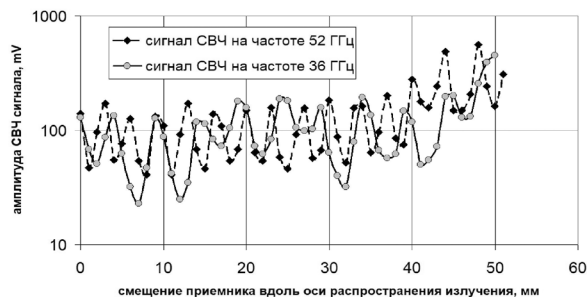


Рис. 3. Структура стоячих волн, образующихся в волноводе, присоединенном к входу приемника при перемещении приемника в сторону излучателя на 0-51 мм. Измерения проведены на двух частотах излучения 36.0 и 52.0 ГГц.

Видно, что число периодов стационарных СВЧ волн, установившихся в приемном волноводе, пропорционально частотам исходного излучения: отношение исходных частот $52.0/36.0 = 1.44$ совпадает с учетом точности проведенных измерений с отношением числа периодов, измеренных при перемещении приемника на длину 51 мм: $16/11 = 1.45$.

Нами также было проведено измерение числа максимумов установившейся СВЧ волны в воздухе при отсутствии диэлектрического стержня. При этих измерениях датчик перемещался вдоль оси распространения волны на расстояние 70 мм. Диапазон частот, для которых исследовано число максимумов в воздухе - от 37 до 52 ГГц. Результаты приведены на **Рис. 4**.

Достигнутая точность измерения в данном эксперименте оценена в 0.4 мм и отображена на графике. Мощность излучения СВЧ в данной серии составила $2 \cdot 10^{-3}$ Вт, расстояние источника до приемника от 100 до 180 мм.

Из результатов, приведенных на Рис. 4, видно, что достигнуто хорошее качественное и количественное соответствие между расчетными и экспериментально измеренными графиками изменения длин СВЧ волн в зависимости от частоты.

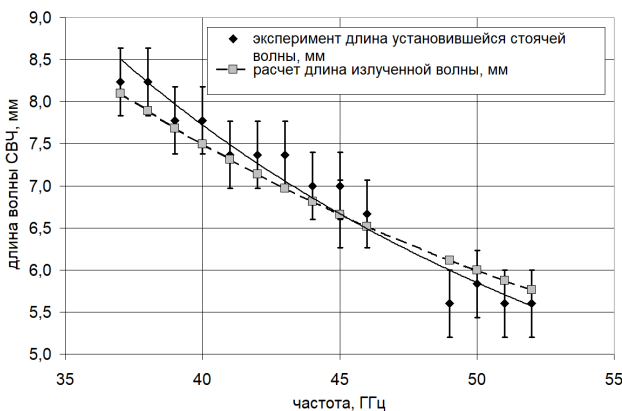


Рис. 4. Длины установившейся СВЧ волны в воздухе, полученные путем счета числа максимумов, измеряемых при сдвиге приемника на 70 мм, в зависимости от частоты 36-52 ГГц. Также для сравнения приведен расчетный график излучаемой генератором длины волны от частоты.

Результаты измерений, проведенных на созданном экспериментальном стенде, мы планируем сравнивать с расчетами электромагнитного поля для СВЧ антенн, проведенными с использованием программ, основанных на методе моментов. Например, распространенных программ NEC2 и MININEC3. Возможно также использование и более современной программы для моделирования MMANA-GAL – это программа для расчета и анализа антенн. Любых антенн, которые можно представить как произвольный набор тонких проводов. Вычислительной основой программы является MININEC3 (переработанный и модифицированный под современные средства) [32,33]. Будет изучена возможность применения также системы электродинамического моделирования и проектирования HFSS (High Frequency Structure Simulator), IE3D, Microwave Office, Microwave Studio [34,35].

5. ВЫВОДЫ

Сформулируем основные положения МРП, которые приводят к локализации фотона и возникновению у него новых полей. Согласно МРП, фотон, попадая в среду или во внешнее поле, приобретает массу. Одновременно с этим происходит его локализация. В пустом пространстве Минковского фотону сопоставляется бесконечная плоская волна, которая содержит компоненты и электрического, и магнитного полей. После того, как фотон подвергается внешнему воздействию, он локализуется, приобретает массу и, в дополнение к полям, у него появляются новые полевые компоненты: векторное поле и скалярное поле. Эти 10 полей образуют единый объект, они удовлетворяют расширенной системе уравнений Максвелла и могут переходить друг в друга. Каждое из них по-своему взаимодействует со средой и, благодаря наличию дополнительных

компонент, они могут проникать через такие барьеры, которые недоступны для обычного электромагнитного поля. При этом важную роль играет тот факт, что у фотонов появляется масса, и в дополнение к электромагнитному взаимодействию возникает и гравитационное взаимодействие между фотонами и внешней средой.

Возникновение ненулевой массы у фотона и одновременное изменение массы других частиц приводит к изменению картины их взаимодействия. Развитый формализм МРП позволяет учесть эти изменения.

Созданная установка для измерения параметров СВЧ поля при попадании излучения в волноводы переменного сечения или во внешнее поле позволит сравнить экспериментальные результаты с предсказаниями, сделанными в рамках МРП. Экспериментальные данные, которые мы планируем получить на созданной установке, позволят сравнить предсказания (1+4)D МРП со стандартными расчетами, сделанными в рамках классических вычислений, проведенных в (1+3)D пространстве Минковского.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владимиров Ю.С. *Пространство-время: явные и скрытые размерности*. М., ЛИБРОКОМ, 2010, 208 с.
2. Klein Felix. Über neuere englische Arbeiten zur Gesammelte matematische Abhandlungen. *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 1901, 46:375.
3. Einstein A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 1916, 49:769-822.
4. Klein Oskar. Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie. *Zeitschrift für Physik*, 1926, 37(12):895-906; doi: 10.1007/BF01397481.
5. Kaluza Th. Zum Unitätsproblem in der Physik. *Sitzungsberichte der Koniglich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 1921:966-972.
6. Fock VA. Über die invariante Form der Wellen und der Bewegungsgleichungen für

- einen geladenen Massenpunkt. *Zeitschrift für Physik*, 1926, 39:226-232.
7. Mandel H. Über den Zusammenhang zwischen der Einsteinischen Theorie des Fern-Parallelismus und der Fünfdimensionalen Fieldtheorie. *Zeitschrift für Physik*, 1926, 39:136-145.
8. Einstein A, Bergmann P. Generalization of Kaluza's Theory of Electricity. *Ann. Math., Ser. 2*, 1938, 39:683-701.
9. Румер ЮБ. *Исследования по пятимерной оптике*. М., URSS, 2010, 152 с.
10. Крайнева ИА и др. *Юрий Борисович Румер. Физика. XX век*. Новосибирск, Арта, 2013, 592 с.
11. Франкфурт УИ (ред.). *Эйнштейновский сборник-1972*. М., Наука, 1974, с. 15.
12. Рубаков ВА. *Классические калибровочные поля. Бозонные теории*. М., КомКнига, 2005, 296 с.
13. Ландау ЛД. О "радиусе" элементарных частиц. *ЖЭТФ*, 1940, 10:718-722.
14. Ципенюк ДЮ, Андреев ВА. Расширенное пространство и модель объединенного взаимодействия. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 2000, № 6:23-34; arXiv:gr-qc/0106093, 2001; doi: 10.24412/0455-0595-2000-6-23-34.
15. Ципенюк ДЮ, Андреев ВА. Электродинамика в расширенном пространстве. *Препринт ИОФРАН, № 2, 1999*, 26 с.; doi: 10.24412/FhITben9-y4.
16. Ципенюк ДЮ, Андреев ВА. Оболочечные объекты в модели расширенного пространства и механизм образования темной материи. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 2004, № 9:13-25; arXiv:physics/0506002.
17. 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.
18. Андреев ВА, Ципенюк ДЮ. Электромагнитное и гравитационное поля в 5-мерной модели расширенного пространства, их локализация и взаимодействие с веществом. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2019, 11(2):93-102; doi: 10.17725/rensit.2019.11.093.
19. Wesson PS. *Space, Time, Matter: modern Kaluza-Klein theory*. Singapore, World Scientific Publ., 1999, 209 p. Available: <https://archive.org/details/spacetimeatterm0000wess>.

20. Wesson PS. *Five-Dimensional Physics. Classical and Quantum Consequences of Kaluza-Klein Cosmology*. Singapore, World Scientific Publ., 2006, 232 p.
21. Wesson PS. *Int. J. Mod. Phys. D*, 2015, 24:1530001.
22. James Overduin, Paul Wesson. *Kaluza-Klein Gravity. Physics Reports*, 1997, 283:303-378.
23. Overduin J, Henry RC. *Physics and the Pythagorean Theorem*. arXiv:2005.10671v2; 2020.
24. Andreev VA, Tsipenyuk DYU. Properties of the 5-Dimensional Extended Space Model with Variable Photons Mass and Size. *New Insights into Physical Science*, 2020, 7(12); doi: 10.9734/bpi/nips/v7.
25. Tsipenyuk DYU. Non-isotropic objects in extended space. *Engineering Physics*, 2017, 6:20-26; <http://infiz.tgizd.ru/en/arhiv/16434>.
26. Ципенюк Д.Ю., Беляев В.В. Оболочечные структуры в микрофизических объектах в 5-D модели расширенного пространства. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2019, 11(3):249-260; doi: 10.17725/rensit.2019.11.249.
27. Tsipenyuk DYU, Belayev WB. Dependence of universe deceleration parameter on cosmological constant: mechanism of vacuum pressure excitation by matter. *Romanian Reports in Physics*, 2020, 72:113; <http://www.rrp.infm.ro/2020/AN72113.pdf>.
28. Tsipenyuk DYU, Belayev WB. Astrophysical and microcosm's applications of 2h ν photon gravitational mass. *Indian J. Phys*, 2021; doi: 10.1007/s12648-021-02104-2.
29. Voropinov AV, Tsipenyuk DYU, Shevchenko MA et.al. *Laser Phys. Lett.*, 2021, 18:075301; doi: 10.1088/1612-202X/ac063a.
30. Pshirkov M, Vasilyev V, Postnov K. Fermi bubbles around the M31 galaxy. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 125:03010; doi: 10.1051/epjconf/201612503010.
31. Predehl P, Sunyaev RA, Becker W. Detection of large-scale X-ray bubbles in the Milky Way halo. *Nature*, 2020, 588:227-231; doi: 10.1038/s41586-020-2979-0.
32. Программа MMANA-GAL, описание базовой версии. *Веб-сайт разработчика* MMANA-GAL, DL2KQ & DL1PBD; <http://gal-ana.de/basicmm/ru/>.
33. Гончаренко ИВ. *Антенны КВ и УКВ. Часть 1. Компьютерное моделирование. MMANA*. М., ИП РадиоСофт, Журнал "Радио", 2004, 128 с.
34. *High Frequency Structure Simulation*. Manuals, Agilent, 2000.
35. Сиркели АИ, Драч ВЕ. Обзор САПР моделирования СВЧ-устройств. *Интерактивная наука*, 2017, 1(11):139-141; doi: 10.21661/r-116149.
36. 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, in press; <https://www.ias.ac.in/Journals/Pramana> %E2%80%93 Journal of Physics.

Ципенюк Дмитрий Юрьевич

к.ф.-м.н., с.н.с.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Москва 119991, Россия
Московский политехнический университет
Москва 107023, Россия
tsip@kapella.gpi.ru

Державин Сергей Игоревич

к.ф.-м.н.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Москва 119991, Россия
derzh@kapella.gpi.ru

Кравченко Ярослав Викторович

к.ф.-м.н.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Москва 119991, Россия
kravch@kapella.gpi.ru

Богданов Михаил Рифкатович

к.ф.-м.н.

Московский политехнический университет
Москва 107023, Россия
bogdanov_m_r@mail.ru