

УДК 535-45, 621.37

А.В. Ляхнович (Институт физики НАН Беларуси, г. Минск);

В.И. Кодина (БГУ, г. Минск);

А.Л. Самофалов (ГГУ им. Франциска Скорины);

И.В. Семченко (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника  
и лазерная техника» НАН Беларуси, г. Минск);

Г.В. Сеницын (Институт физики НАН Беларуси, г. Минск);

М.А. Подалов; С.А. Хахомов (ГГУ им. Франциска Скорины);

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАМАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОМЕГА-ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ ТГц ИЗЛУЧЕНИИ ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ**

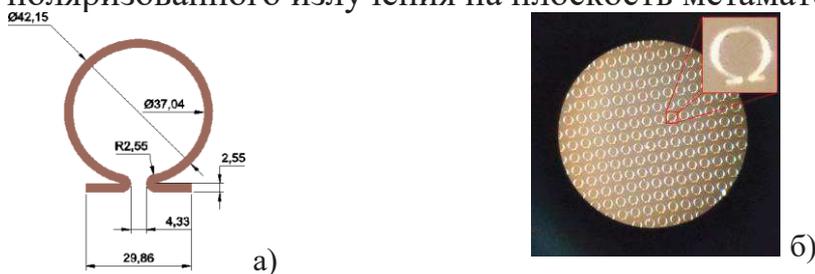
Как развитие систем скоростной связи нового поколения, называемого 6G, так и потребность в бесконтактных средствах диагностики на основе анализа спектров и изображений, вызывают интерес к прикладным аспектам использования излучения терагерцового (ТГц) частотного диапазона. Соответственно интенсифицируется разработка методов и устройств управления параметрами ТГц излучения. В качестве основы для таких устройств активно исследуются искусственные среды, обладающие отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей ( $\epsilon < 0$  и  $\mu < 0$ ) [1]. Возможными применениями таких метаматериалов являются полосовые фильтры и преобразователи поляризации электромагнитной волны [2].

Эти устройства могут иметь элементы различной формы, например, спирали с разным числом витков, разомкнутые кольца, а также омега-подобные элементы.

Ранее [3] авторами было выполнено моделирование одиночного омега-элемента, имеющего оптимальную форму, которая обеспечивает сбалансированность диэлектрических и магнитных свойств метаповерхности, образованной такими резонаторами, в поле терагерцовой волны. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования такого метаматериала.

Исследуемый метаматериал образован алюминиевыми элементами в форме греческой литеры  $\Omega$ , которые размещены с шагом 60 мкм на подложке из кремния. Параметры элемента и микроснимок материала представлены на рис. 1. Видно, что компонентами омега-элемента являются разрезной кольцевой резонатор (split ring resonator,) и линейный диполь, связанные электрически в единую систему. Исследовались изменения спектрального состава, отраженного от метаматериала ТГц излучения в зависимости от ориентации оси

симметрии омега-элемента относительно проекции электрического вектора поляризованного излучения на плоскость метаматериала.



**Рисунок 1 – Параметры омега-элемента для ТГц-диапазона (размеры указаны в микрометрах) (а), фотография метаматериала под микроскопом, вид отдельного элемента (б)**

Отсчёт угла поворота  $\varphi$  оси симметрии омега-элемента производится относительно вектора напряжённости электрического поля падающей волны. А именно, нулевому значению угла  $\varphi$  соответствует расположение оси симметрии в плоскости колебаний электрического вектора ТГц излучения, падающего на образец. Числовые значения в обозначениях зависимостей на рисунках ниже соответствуют углам поворота  $\varphi$  в градусах. Измерения проводились на импульсном спектрометре временной области (time-domain, TDS), разработанном в Институте физики НАН Беларуси на основе фотопроводящих антенн в качестве источников и приемников ТГц излучения. Спектрометр выполнен по традиционной схеме, его описание приведено в [4].

Важной особенностью фотоантенн является чувствительность к поляризации, что, с одной стороны, задает поляризацию терагерцового поля, а с другой – придает детектору функции анализатора.

В качестве опорного сигнала использовалось отражение от алюминиевой пластины. Семейства характерных спектров отражения изображены на рис. 2.



**Рисунок 2 – Спектры отражения метаматериала, образованного омега-элементами на подложке из кремния, для s- (слева) и p- поляризации (справа) падающей волны**

Результаты можно интерпретировать в рамках теории дипольного излучения электромагнитных волн [5], поскольку каждый омега-элемент имеет размеры, значительно меньшие, чем длина волны ТГц

излучения. В дипольном приближении напряжённость электрического поля волны, излучаемой омега-элементом, имеет вид

$$\vec{E}(\vec{R}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi R} \left( \left[ \left[ \ddot{\vec{p}}, \vec{n} \right] \vec{n} \right] + \frac{1}{c} \left[ \vec{n}, \ddot{\vec{m}} \right] \right), \quad (1)$$

где  $\vec{R}$  – радиус-вектор от центра омега-элемента в точку наблюдения;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\vec{n}$  – единичный вектор волновой нормали;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\vec{p}$  и  $\vec{m}$  – соответственно дипольный и магнитный моменты омега-элемента. Для оптимизированных по размерам элементов характерно одновременное возбуждение электрического дипольного момента и не менее значимого магнитного момента, абсолютные величины которых с некоторой точностью удовлетворяют соотношению

$$p = \frac{m}{c}. \quad (2).$$

Тогда омега-элемент можно рассматривать как бианизотропную частицу, проявляющую одновременно электрические и магнитные свойства. Наиболее эффективно омега-элемент возбуждается, когда его «плечи» лежат в плоскости колебаний вектора напряжённости электрического поля падающей волны, то есть в случае  $\varphi = 90^\circ$ . При этом одновременно индуцируются электрический дипольный момент и магнитный момент. Из рис.2 следует, что коэффициенты отражения волны принимают максимальные значения именно в случаях  $s_{90}$  и  $p_{90}$ . Определим компоненту  $E_l$  электрического вектора падающей волны, параллельную «плечам» омега-элемента, как  $E_l = E_s \sin \varphi$ ,  $E_l = E_p \cos \alpha \sin \varphi$ , где  $\alpha$  – угол падения волны на поверхность метаматериала. С уменьшением угла  $\varphi$  происходит уменьшение компоненты  $E_l$ , что в свою очередь вызывает снижение коэффициента отражения и соответствует приведенному на рис.2 поведению. Обозначения  $E_s$  и  $E_p$  для s- и p- компонент вектора электрического поля волны используются как общепринятые.

Резонансный характер спектров можно объяснить связью с геометрическими параметрами омега-элемента. Так, для случая, когда полная длина  $L_1$  омега-элемента равна половине длины волны ТГц поля, резонансная частота удовлетворяет соотношению

$$\nu_1 = \frac{c}{2L_1} = \frac{c}{2(2l + 2\pi r)}, \quad (3),$$

где  $l$  – длина плеча омега-элемента,  $r$  – радиус витка омега-элемента. Для оптимизированных размеров, приведенных на рис.1,  $\nu_1 = 1.0$  ТГц. Если же угол  $\varphi$  принимает значения  $< 20^\circ$ , то омега-элементы возбуждаются преимущественно магнитным полем падающей волны. При

этом электрический ток возникает в основном в витке омега-элемента, без участия его плеч, что описывается формулой

$$\nu_2 = \frac{c}{2L_2} = \frac{c}{4\pi r} \quad (4)$$

и приводит к значению резонансной частоты  $\nu_2 = 1,2$  ТГц. Таким образом, частотная зависимость коэффициентов отражения, представленная на рис.2, в том числе наличие двух главных максимумов, согласуется с результатами теоретического анализа.

Следует отметить важное различие между отражёнными волнами при s- и p- поляризации падающей волны. Как следует из формулы (1), при падении на метаматериал s-поляризованной волны отражённое излучение также поляризовано линейно и имеет только s-компоненту. В случае p-поляризации падающей волны отражённое излучение имеет эллиптическую поляризацию.

В результате исследования показано, что метаматериал на основе массива омега-элементов с оптимальной формой проявляет поляризационно-селективные свойства и может выполнять функции эффективного преобразователя поляризации электромагнитной волны в терагерцовом диапазоне. Это свойство совместно с сильной поляризационной анизотропией может быть использовано для управления параметрами ТГц излучение, в том числе относительно широкополосного, в системах беспроводных коммуникаций.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», задание 2.3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tao Xu, Yu-Sheng Lin. Tunable Terahertz Metamaterial Using an Electric Split-Ring Resonator with Polarization-Sensitive Characteristic // Appl. Sci. – 2020 – V.10 – P.4660–4668.
2. Zhengze Cheng, Yongzhi Cheng. A multi-functional polarization convertor based on chiral metamaterial for terahertz waves // Opt. Comm. – 2019. – V.435 – P.178–182.
3. Igor Semchenko et al. Omega-Structured Substrate-Supported Metamaterial for the Transformation of Wave Polarization in THz Frequency Range // Recent Advances in Technology Research and Education / Ed. by Dumitru Luca, Lucel Sirghi, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 660, Springer. – 2017. – P. 73–80.
4. М.А. Ходасевич, А.В. Ляхнович, Н. Eriklioglu. Классификация шоколада на основе анализа методом главных компонент предобработанных спектров пропускания терагерцового диапазона // Журнал Прикладной Спектроскопии – 2022. – Т. 89, № 2, С. 198–203.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. // Издание 7-е, исправленное / М.: Наука, 1988. – 512 с.