

**И.В. Семченко¹, С.А. Хахомов¹,
Е.В. Наумова², В.Я. Принц², С.В. Голод², В.В. Кубарев³**

**¹УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь**

**²Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова СО РАН,
Новосибирск, Россия**

СИЛЬНЫЕ КИРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАМАТЕРИАЛОВ, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Введение

Принципиальная новизна и научное значение создания метаматериалов из трехмерных оболочек, формируемых из напряженных нанопленок [1–4], заключается в переходе от двумерных элементов-резонаторов к трехмерным, прецизионности размеров резонаторов (вплоть до атомарного уровня) с характерными размерами от микрометров до нанометров, разнообразии возможных форм и материалов элементов-резонаторов (диэлектрики, металлы, полупроводники). Принцип формирования оболочки из напряженной пленки иллюстрирует рисунок 1.

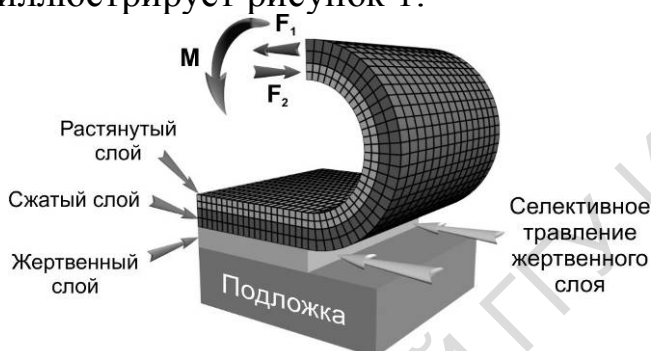


Рисунок 1 – Схема сворачивания двухслойной напряженной пленки при её отсоединении от подложки. Отсоединенная от подложки пленка изгибается под действием момента сил M , вызванного внутренними напряжениями в растянутом и сжатом слоях

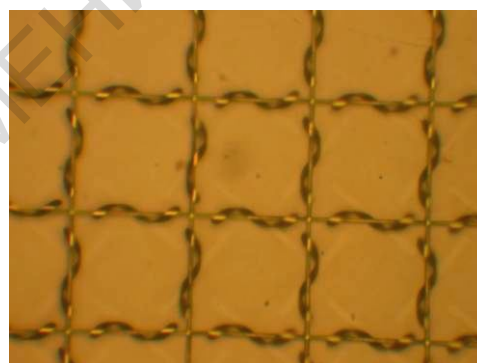


Рисунок 2 – Фотография массива спиралей (квадратная сетка на фото – негативный фоторезист из полимерного материала, толщина около 1 мкм)

С помощью трехмерных конструкций оболочек-резонаторов электромагнитный отклик метаматериала задается во всех трех измерениях, что является новым шагом в области метаматериалов для ТГц диапазона и позволяет создавать метаматериалы с принципиально новыми свойствами. Данная технология в настоящее время является единственной нанотехнологией, которая может обеспечить массовое

формирование ТГц-метаматериалов на основе гладких резонансных трехмерных спиралей, в том числе объемных метаматериалов.

1. Спиральная модель молекул вещества применительно к искусственной структуре с большой киральностью

При рассмотрении электромагнитной модели обычной (некиральной) среды предполагают, что она описывает свойства сплошной среды. Киральные же свойства связаны с проявлением дискретной структуры среды. Линейные размеры спирали могут быть малыми по сравнению с длиной волны, а длина проволоки, из которой изготовлена спираль, может быть порядка длины волны, что обеспечивает условие резонанса. В этом случае киральность уже не является малой величиной и свойства киральной среды могут кардинально отличаться от свойств зеркально симметричной среды не только за счет накопления малого эффекта, как в явлении оптической активности [5–9].

При изучении искусственных анизотропных структур с особыми свойствами, так называемых метаматериалов, важен не только феноменологический подход, базирующийся на основных физических положениях: законе сохранения энергии электромагнитного поля, принципе симметрии кинетических коэффициентов Онзагера-Казимира, учете кристаллографической симметрии среды. При анализе свойств метаматериалов возрастает роль микротeorии, которая позволяет рассматривать конкретные механизмы резонансного возбуждения элементов структуры.

В настоящее время наблюдается явная тенденция к созданию и исследованию метаматериалов для ТГц диапазона, поскольку в настоящее время техника ТГц диапазона активно развивается и вместе с тем ассортимент электромагнитных свойств существующих материалов в этом диапазоне очень небогат, например, отсутствуют материалы с эффективными нелинейными, киральными и др. свойствами, широко используемые в оптическом диапазоне. Поэтому концепция метаматериалов особенно востребована в ТГц диапазоне.

Нами определено комплексное входное сопротивление одновитковой спирали

$$Z_{ex} = \frac{U}{I} = -j \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \pi r^2 h \frac{1}{\alpha_{me}^{(11)}}, \quad (1)$$

где $U = E_x h$ – напряжение на концах спирали, h – шаг спирали, I – сила тока в спирали, j – мнимая единица, ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные соответственно, r – радиус спирали, $\alpha_{me}^{(11)}$ – компонента псевдотензора, характеризующего киральные свойства

спирали, индекс 1 обозначает ось ОХ, ориентированную вдоль оси спирали. Тогда коэффициент ослабления поля внутри металла τ может быть написан в следующей форме:

$$\tau = j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{\rho}{\pi r^2 S_{np} \sin \psi} \alpha^{(11)}_{me}, \quad (2)$$

где S_{np} – площадь сечения проводника, ψ – угол подъема спирали, ρ – удельное сопротивление проводника.

Можно определить циркулярный дихроизм структуры

$$D = \frac{1}{2} \frac{T_+ - T_-}{T_+ + T_-}, \quad (3)$$

где T_+ и T_- – коэффициенты прохождения правой и левой циркулярно поляризованных волн.

2. Сравнение экспериментальных результатов и численного моделирования

Экспериментальная реализация описанных метаматериалов на основе спиралей для терагерцового диапазона возможна с помощью недавно развитого российскими учеными метода точного 3D наноструктурирования [1–4].

В Институте физики полупроводников СО РАН были изготовлены образцы, которые представляют собой квадратную решетку из спиралей, закрепленных на подложке сеткой из резиста, спирали прилегают к подложке и резисту в центре, остальная часть спирали находится в воздухе (рисунок 2).

Параметры полосы в развернутом состоянии следующие: длина – 77 мкм, ширина – 6 мкм. Полоски сделаны из четырехслойной пленки $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Ti}/\text{Au}$ (16/40/3/65нм), в средней части спираль обращена к подложке стороной $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$. Угол подъема спирали – 52–53 градуса, диаметр – 11 мкм. Период структуры 84 мкм.

Используемый угол подъема спирали, равный 52–53°, является оптимальным для получения образцов с максимальными гиротропными свойствами, как показано в [10, 11].

Образцы изготовлены с разными размерами – максимальный 2 см на 3 см. Подложка GaAs нелегированная, толщина подложки 400 мкм.

В Институте ядерной физики СО РАН были проведены экспериментальные исследования свойств изготовленных образцов, результаты которых приведены на рисунках 3, 5. На рисунках 4–6 приведены результаты численного моделирования свойств искусственной анизотропной структуры.

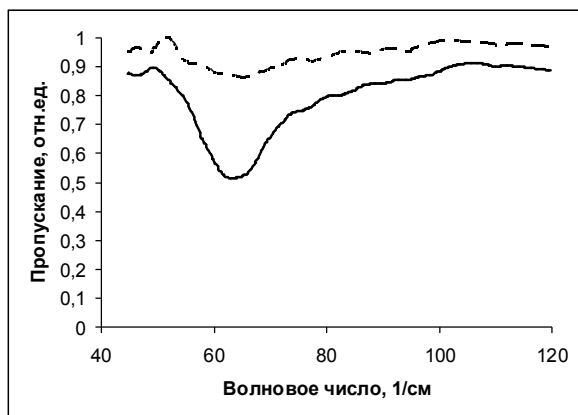


Рисунок 3 – Спектры пропускания массива левовинтовых спиралей в зависимости от типа поляризации излучения:

- левая круговая поляризация (сплошная линия);
- правая круговая поляризация (штриховая линия)

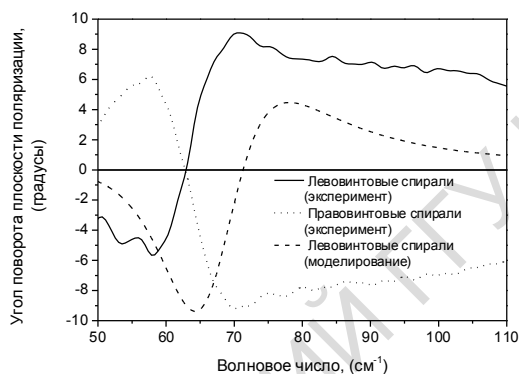


Рисунок 5 – Угол поворота плоскости поляризации проходящего излучения массивом левовинтовых (сплошная линия) и правовинтовых (точечная линия) спиралей.

Результаты моделирования для массива левовинтовых спиралей (штриховая линия).

Наблюдатель смотрит навстречу волне, положительный отсчет угла – по часовой стрелке

Заключение

На примере образца проведено численное моделирование свойств искусственной киральной структуры, а также сравнение с эксперимен-

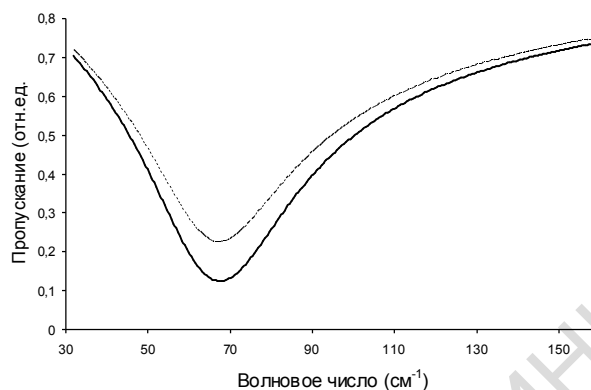


Рисунок 4 – Спектры пропускания массива левовинтовых спиралей в зависимости от типа поляризации излучения (моделирование):

- левая круговая поляризация (сплошная линия);
- правая круговая поляризация (штриховая линия)

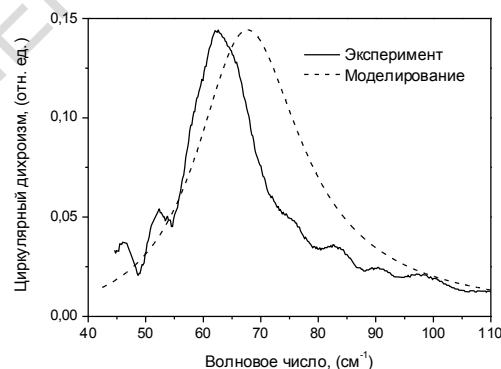


Рисунок 6 – Циркулярный дихроизм массива левовинтовых спиралей рассчитанный из эксперимента (см. рисунок 3) по формуле 3 (сплошная линия) и результаты моделирования (штриховая линия)

тальными результатами взаимодействия структуры с электромагнитным излучением в ТГц диапазоне.

В результате сравнения экспериментальных графиков и результатов моделирования можно сделать вывод, что предложенная модель удовлетворительно описывает свойства искусственной структуры с большой киральностью. Максимальные значения угла поворота плоскости поляризации волны и циркулярного дихроизма, рассчитанные на основании предложенной модели, соответствуют наблюдаемым в эксперименте. Частотная зависимость рассчитанных величин, характеризующих киральные свойства среды, вблизи резонанса качественно согласуется с экспериментальными данными [12].

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) – проект № Ф10Р-230, Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) – проекты 08-02-01434, 09-02-12303-офи_м, 10-02-90050-Бел_а, программы Сибирского отделения РАН – интеграционный междисциплинарный проект №24.

Литература

1. V.Ya. Prinz, V.A. Seleznev A.K. Gutakovsky [et al.] // Physica E. – 2000. – Vol. 6. – P. 828.
2. Наумова, Е.В. / Е.В. Наумова, В.Я. Принц // Патент РФ № 2317942. – 2008.
3. E.V. Naumova, V.Ya. Prinz, V.A. Seleznev [et. al.] // Proc. Metamaterials 2007. – Rome, Italy. – 2007. – P. 74.
4. E.V. Naumova, V.Ya. Prinz, S.V. Golod [et. al.] // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2009. – Vol. 45. – № 4. – P. 292.
5. Федоров, Ф.И. Теория гиротропии / Ф.И. Федоров. – Минск: Наука и техника, 1976. – 452 с.
6. Бокуть, Б.В. / Б.В. Бокуть, А.Н. Сердюков // ЖЭТФ. – 1971. – Т. 61. – № 5. – С. 1808.
7. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука, 1978. – 926 с.
8. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М., 1982. – 620 с.
9. Агранович, В.М. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов / В.М. Агранович, В.Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1979. – 432 с.
10. Semchenko, I.V. / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // *Bianisotropics' 2004, 10th International Conference on Complex Media and Metamaterials*, Het Pand, Ghent, Belgium. 22–24 September. – 2004. – P. 74.

11. Semchenko, I.V. / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // Electromagnetics. – 2006. – Vol. 26. – № 3–4. – P. 219.

12. И.В. Семченко, С.А. Хахомов, Е.В. Наумова, В.Я. Принц, С.В. Голод, В.В. Кубарев // Кристаллография. – 2011. – Т. 56. – № 3. – С. 404–411.