

УДК 535

**КИРАЛЬНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА
НА ОСНОВЕ СПИРАЛЕЙ
ИЗ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОПЛЕНОК***

**Е. В. Наумова¹, В. Я. Принц¹, С. В. Голод¹, В. А. Селезнев¹,
В. А. Сейфи¹, А. Ф. Булдыгин¹, В. В. Кубарев²**

¹*Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: a.naumova@isp.nsc.ru*

²*Институт ядерной физики им. Г. И. Буджера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

Методом сворачивания напряженных нанопленок сформированы киральные метаматериалы терагерцового (ТГц) диапазона, структурными элементами которых являются металл-полупроводниковые микроспирали. Продемонстрирована резонансная оптическая активность новых метаматериалов в ТГц-диапазоне. Сформированы и исследованы в СВЧ-диапазоне массивы модельных проволочных спиралей.

Ключевые слова: метаматериалы, оптическая активность, нанопленки.

Введение. Электромагнитные метаматериалы — материалы с необычными электромагнитными свойствами, построенные из искусственных элементов с характерными размерами, существенно меньшими длины волны, привлекают широкое внимание благодаря беспрецедентным возможностям управления излучением [1]. На метаматериалах для радиодиапазона, элементы которых имеют макроскопические размеры (от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров) и не требуют применения нанотехнологий, было продемонстрировано разнообразие функциональных свойств [2]. Такие революционные новшества, как микроскопия с фокусировкой выше дифракционного предела, экраны невидимости, терабитная оптическая память, оптические компьютеры, оптическая нанолитография, нанобиосенсорные материалы и другие, ожидаются от применения метаматериалов в более высокочастотных диапазонах [3], что требует соответствующего уменьшения размеров элементов. Основной проблемой создания метаматериалов для терагерцового (ТГц) и оптического диапазонов является отсутствие универсальных технологий для формирования высокоточных трехмерных элементов микро- и наноразмеров.

В данной работе для формирования метаматериалов применен оригинальный подход, позволяющий формировать трехмерные элементы методом сворачивания напряженных нанопленок [4]. С помощью этого метода были изготовлены массивы спиралей, обладающие киральными электромагнитными свойствами [5]. Киральными (гиротропными) называют среды, неодинаково взаимодействующие с электромагнитными волнами левой и правой круговой поляризации [6]. Интерес к таким средам в первую очередь связан с широким применением киральных свойств жидкокристаллических (ЖК) структур для управления поляризацией и интенсивностью излучения оптического диапазона (ЖК-индикаторы и

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-02-01434), программы Президиума РАН (проект № 24), программы ОФН РАН (проект № 12-2) и госконтракта № 3003.

дисплей). Искусственные киральные метаматериалы, позволяющие управлять поляризацией терагерцового излучения, востребованы для исследования и идентификации сложных биологических комплексов, повышения плотности передачи информации в ТГц-связи (в частности, для кодирования спутниковой связи), повышения контраста ТГц-изображений в медицинской диагностике и системах безопасности и т. д.

В СВЧ-диапазоне было продемонстрировано, что киральные метаматериалы могут быть построены на основе спиралей [7]. В работах [8–10] теоретически были широко исследованы резонансы оптической активности искусственных сред на основе спиралей. Можно выделить три типа резонансов:

А. Спирали в идеализированном случае бесконечно длинные, оси спиралей параллельны друг другу и ориентированы вдоль направления распространения волны. В этом случае резонанс оптической активности наблюдается при длинах волн, близких к шагу спирали (например, [8]). Такие структуры относятся к фотонным кристаллам. Этот тип пространственного резонанса аналогичен брэгговскому и часто называется брэгговским киральным резонансом. Именно этот резонанс используется в наиболее распространенных в технике твист-нематических ЖК-структурах.

В. Спирали в идеализированном случае бесконечно длинные, оси спиралей параллельны друг другу и ориентированы перпендикулярно направлению распространения волны. Моделью такой среды является решетка из цилиндров с винтовой проводимостью, низкочастотные резонансы которой рассмотрены в [9].

С. Спирали одинаковой длины, оси ориентированы перпендикулярно направлению распространения волны либо хаотически. Главный резонанс оптической активности наблюдается при длинах волн, близких к удвоенной длине развернутой спирали (полуволновой резонанс); более слабые резонансы наблюдаются при длинах волн, близких к $3/2\lambda$, $5/2\lambda$ и т. д. Впервые резонансы такого типа исследовались при моделировании естественных оптически активных веществ с помощью массивов спиралей [7]. Была рассчитана геометрия полуволновых спиралей, обеспечивающая максимальную оптическую активность среды, построенной на их основе [10].

В СВЧ-диапазоне экспериментально исследованы метаматериалы из спиралей, выполненных из различных материалов (металлы, диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью) [11]. Наиболее высокая оптическая активность наблюдается в метаматериалах на основе металлических спиралей, поскольку эффект вращения плоскости поляризации связан с переизлучением волн спиральями.

Целью данной работы является формирование массивов спиралей и экспериментальное исследование всех трех перечисленных типов резонансной оптической активности в СВЧ- и ТГц-диапазонах.

Резонансы первых двух типов наблюдались в СВЧ-диапазоне на образцах из спиралей, изготовленных традиционным способом — путем навивки металлической проволоки на оправку. Полуволновой резонанс был исследован в ТГц-диапазоне на массивах металл-полупроводниковых спиралей, изготовленных оригинальным методом [4]. Наблюдаемая гигантская резонансная оптическая активность делает такие материалы перспективными для управления поляризацией излучения.

Формирование спиралей из напряженных нанопленок для ТГц-диапазона длин волн. Для формирования металл-полупроводниковых спиралей был использован метод изготовления массива трехмерных микро- и нанопленок из напряженных нанопленок [4]. Суть метода (рис. 1, а) состоит в следующем: на подложке выращивается бипленка, слой которой механически напряжены друг относительно друга; при отсоединении от подложки под действием внутренних напряжений бипленка изгибается, стремясь принять форму, соответствующую минимальной упругой энергии. При этом радиус изгиба задается с прецизионной точностью в пределах от единиц нанометров до сотен мик-

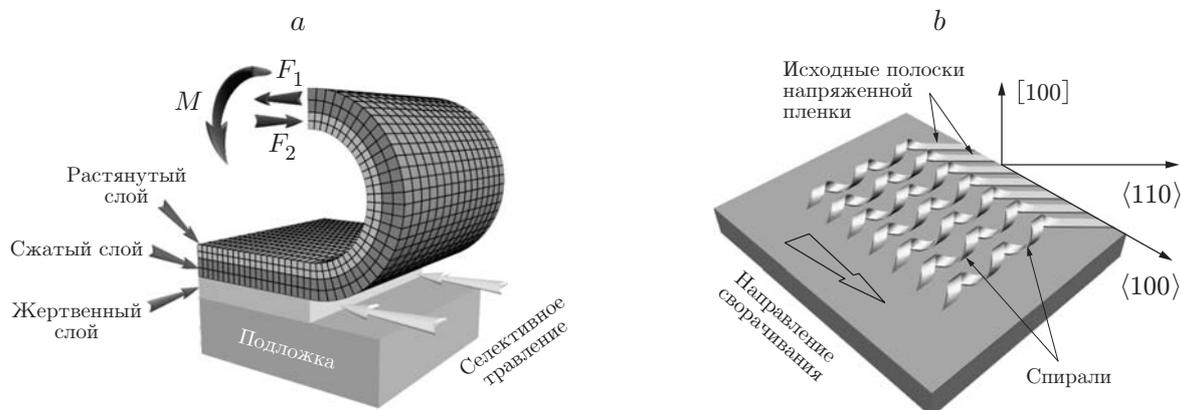


Рис. 1. Формирование трехмерных оболочек из напряженных гетеропленок: *a* — схематичное изображение процесса формирования трубок из двухслойной псевдоморфной напряженной пленки при ее отсоединении от подложки (отсоединенная пленка изгибается под действием момента сил M , вызванного внутренними напряжениями в растянутом и сжатом слоях); *b* — формирование массива объемных спиралей методом организованного сворачивания узких полосок напряженной полупроводниковой пленки в кристаллографическом направлении типа $\langle 100 \rangle$ с наименьшей жесткостью

рон упругими деформациями и толщинами напряженных слоев. Например, в простейшем случае бипленки толщиной d из двух слоев равной толщины радиус изгиба пропорционален $\frac{d}{\Delta a/a}$, где $\Delta a/a$ — параметр несоответствия постоянных решеток слоев, дополнительные ненапряженные слои пленки приводят к увеличению радиуса изгиба [4, 12]. В основе принципа формирования спиралей из напряженных гетероструктур лежит анизотропия механических свойств полупроводниковых монокристаллов. Энергия упругой деформации $W = \frac{E}{1-\nu} \varepsilon^2 d$ (W — энергия упругой деформации на единицу площади, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона, ε — деформация, d — толщина двухслойной пленки). Поскольку модуль Юнга в направлении $[100]$ меньше, чем в направлении $[110]$ (в случае Si и Ge в 1,3 раза), то ориентированная под углом к направлению $[100]$ узкая полоска напряженной двухслойной пленки (рис. 1, *b*), освобождаясь от связи с подложкой, сворачивается в одном из направлений $\langle 100 \rangle$, что приводит к формированию объемной спирали. Шаг между витками спирали определяется углом разориентации между полоской напряженной пленки и направлением сворачивания. Таким образом, диаметр спиралей задается на этапе выращивания пленки толщинами и механическими напряжениями слоев, а левовинтовое или правовинтовое направление сворачивания спирали, ее длина и шаг задаются размерами и ориентацией отсоединяемых от подложки полосок бипленки относительно кристаллографических направлений на этапе литографии.

На рис. 2 показаны массивы правых (*a*) и левых (*b*) микроспиралей, сформированные из гибридных тонких пленок металл—полупроводник нанометровых толщин. Два полупроводниковых слоя выполняют роль формообразующего каркаса спирали, а металлический слой обеспечивает в такой структуре эффективное взаимодействие с электромагнитным полем. Формирование массивов параллельных спиралей из металл-полупроводниковой нанопленки выполнено следующим образом. На подложках n -Si(100) и n -Si(110) с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии были выращены псевдоморфные напряженные двухслойные пленки $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}$, легированные бором (10^{20} см^{-3}). Нижний слой бипленки ($\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}$) сжат в соответствии с рассогласованием решетки на 1,6 % относительно подложки Si. Сверху полупроводниковой структуры термова-

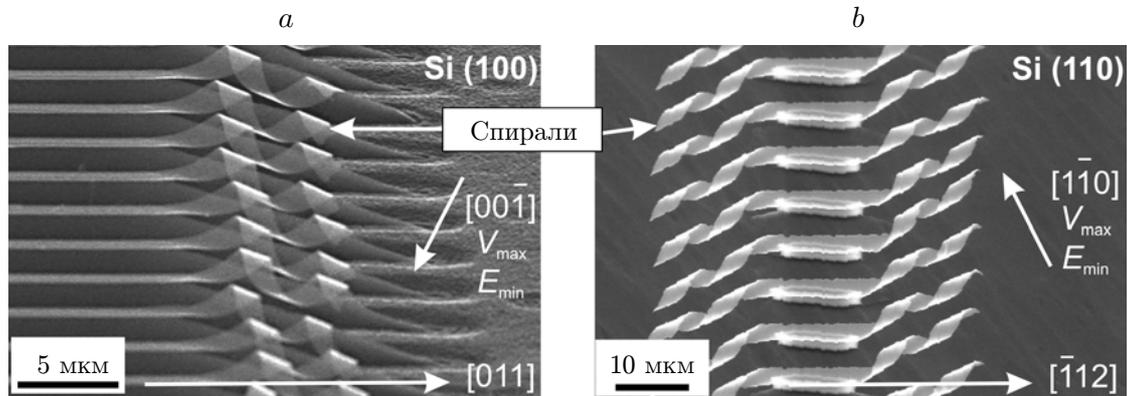


Рис. 2. Изображения, полученные с помощью электронного микроскопа (под углом к поверхности), массивов гибридных (металл—полупроводник) микроспиралей [12]: из пленок $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}/\text{Cr}$ (2,6/4/30 нм) (a) и $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}/\text{Cr}$ (10/7/20 нм) (b) на подложках с ориентацией (100) и (110) соответственно

кумным напылением наносился металлический Cr-слой. Массивы полосок из пленки $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}/\text{Cr}$ формировали методом оптической литографии и последующего травления металл-полупроводниковой пленки до кремниевой слабо легированной подложки. Затем структура помещалась в раствор аммиака, который обеспечивает анизотропное и селективное травление подложки n -Si относительно p^+ -легированной пленки SiGe/Si. За счет анизотропии травления подложки кремния процесс отсоединения полосок $\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}/\text{Cr}$ начинается с концов, и по мере удаления материала подложки полоски сворачиваются в объемные спирали (см. рис. 1, b и рис. 2). Сворачивание спиралей идет одновременно по всему массиву с высокой однородностью. Контроль процесса с помощью оптического микроскопа позволяет остановить травление на заданной стадии сворачивания спиралей, чтобы в центральной части каждая полоска осталась закрепленной на подложке, в то время как отделенные от подложки концы полоски висят над ямками травления. После жидкостного травления структуры были высушены в сверхкритической атмосфере CO_2 , что позволило избежать воздействия капиллярных сил на тонкопленочные микроспиралы и предотвратить их деформацию и залипание на подложке [13, 14].

Все спирали в представленных на рис. 2 массивах одинаковы, параллельны друг другу и точно позиционированы на подложке, а сам массив имеет ось симметрии 2-го порядка. Однако киральные электромагнитные свойства такой структуры существенно зависят от ориентации плоскости поляризации падающего излучения относительно осей спиралей. Для того чтобы исключить этот эффект анизотропии киральных свойств метаматериала, была спроектирована конфигурация в виде квадратной решетки точно позиционированных и ориентированных металл-полупроводниковых спиралей (рис. 3). Благодаря оси симметрии 4-го порядка данный массив микроспиралей обладает киральными свойствами, не зависящими от ориентации поляризации нормально падающего излучения, т. е. является изотропным.

Для формирования такого метаматериала на подложке GaAs (100) был сформирован массив полос из напряженной гетеропленки AlAs/ $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ /GaAs/Ti/Au, отклоненных от направления сворачивания $\langle 100 \rangle$ на 38° против часовой стрелки. При отделении от подложки путем высокоселективного травления жертвенного слоя AlAs такие полоски трансформируются в объемные спирали (см. рис. 3). Все спирали в массиве правовинтовые за счет того, что напряженная бипленка $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$ (001) имеет два равноправных энергетически выгодных направления сворачивания, перпендикулярных друг другу

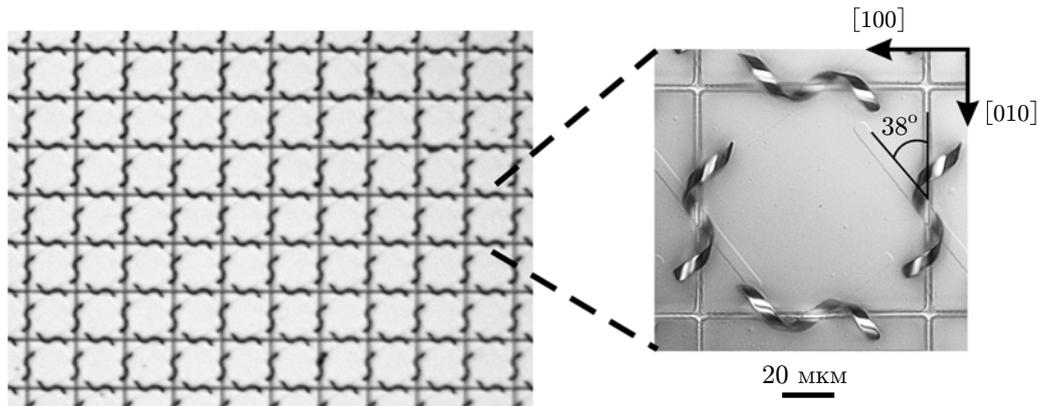


Рис. 3. Массив металл-полупроводниковых микроспиралей в виде квадратной решетки на подложке GaAs. Спирали сформированы из напряженной пленки InGaAs/GaAs/Ti/Au (16/16/3/50 нм). Период квадратной решетки 84 мкм, ширина полос, из которых сформированы спирали, 4 мкм, длина развернутой спирали 73,5 мкм

(направления типа $\langle 100 \rangle$), причем благодаря анизотропии механических свойств полоска напряженной бипленки, отклоненная от направления $\langle 100 \rangle$ по часовой стрелке (под углом меньше 45°), сворачивается, как левовинтовая спираль, а полоска, отклоненная от направления $\langle 100 \rangle$ против часовой стрелки, сворачивается, как правовинтовая спираль. Для закрепления спиралей на подложке использовался следующий способ: в средней части полосок напряженные слои InGaAs/GaAs, обеспечивающие трансформацию пленки в оболочку, были вытравлены, а жертвенный слой AlAs окислен. В пределах областей, где нет механически напряженных слоев, при травлении жертвенного слоя сворачивания пленки не происходит и она остается закрепленной на окисленном жертвенном слое. Сушка образцов после жидкостного травления производилась в сверхкритическом CO_2 [13, 14]. Структура демонстрирует высокую однородность спиралей по всей площади массива.

Как показали предварительные эксперименты, при запечатывании подобных массивов в свободную полимерную пленку нано пленочные спирали практически не деформируются. Наслаивание таких композитных пленок позволяет перейти к метаматериалам в виде трехмерных массивов с трехмерными элементами. Именно объемные метаматериалы с электромагнитными свойствами, контролируемые во всех трех измерениях, необходимы для большинства практических применений, и задача формирования таких материалов к настоящему времени решена только для СВЧ-диапазона, где характерные шаг и диаметр спиралей составляют порядка нескольких миллиметров и спирали могут быть изготовлены путем навивки металлической проволоки или ленты на оснастку ручную.

Использованный подход [4] позволяет масштабировать размеры спиралей (диаметры спиралей от единиц до сотен микрон, длины задаются литографически вплоть до нескольких нанометров), т. е. задавать резонансные киральные свойства метаматериалов на основе спиралей в широком диапазоне от СВЧ до оптического. Такие метаматериалы перспективны для создания функциональных устройств, предназначенных для управления поляризацией, интенсивностью и другими параметрами излучения. Наиболее востребованы киральные метаматериалы для ТГц-диапазона, где проблема трансформации поляризации очень актуальна, поскольку отсутствуют даже эффективные полуволновые пластинки.

Формирование спиралей для исследований в СВЧ-диапазоне длин волн. Метод сворачивания нанопленок позволяет формировать и спирали диаметром сотни микрон из напряженных металл-полупроводниковых нанопленок, резонансные в СВЧ-диапазоне и имеющие металлические слои с толщиной, на порядок превышающей толщину скин-

слоя. Вместе с тем в лабораторных условиях удобнее проводить модельные эксперименты в СВЧ-диапазоне на массивах из проволочных спиралей, поскольку из них легко конструировать трехмерные массивы различной конфигурации: закреплять на прозрачной подложке, ориентировать необходимым образом в прозрачной матрице и т. п. Полученные на массивах проволочных модельных спиралей результаты могут быть распространены на спирали из металл-полупроводниковых пленок той же геометрии с толщинами металлических слоев, существенно превышающими толщину скин-слоя в СВЧ-диапазоне. Оптическую активность массивов проволочных металлических спиралей измеряли в СВЧ-диапазоне (135–145 ГГц), массивов спиралей из металл-полупроводниковых нанопленок — в терагерцовом диапазоне (1,6–2,3 ТГц).

Измерение параметров киральных сред в СВЧ- и ТГц-диапазонах длин волн. Эксперименты в СВЧ- и ТГц-диапазонах проводились по одинаковой схеме (рис. 4 и 5). На образец с массивом спиралей падало линейно-поляризованное излучение, ориентация плоскости поляризации проходящего излучения находилась с помощью вращающегося поляризатора-анализатора и детектора излучения (рис. 5, *a*). Ориентация плоскости поляризации излучения определялась по синусоидальной зависимости интенсивности детектируемого излучения от угла ориентации поляризатора-анализатора до внесения образца (падающее излучение) и после внесения образца (проходящее излучение). Вращение плоскости поляризации образцом на угол α отображается на графике соответствующим сдвигом между синусоидами (рис. 4, *e* и рис. 5, *b*). В СВЧ-диапазоне измерения проводились на специально собранной квазиоптической лучевой установке (рис. 4, *a*). В ТГц-диапазоне измерения осуществлялись в свободном пространстве на базе экспериментальной станции лазера на свободных электронах Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Рабочий диапазон квазиоптической СВЧ-установки был недостаточно широк, чтобы исследовать форму резонансной зависимости оптической активности образцов от частоты проходящего излучения. Поиск пространственных резонансов оптической активности проводился путем исследования массивов спиралей, выполненных из одинаковой молибденовой проволоки, но имеющих различные геометрические параметры (диаметр от 0,3 до 2,0 мм, шаг спирали от 0,6 до 2,0 мм):

- массивы в виде плоских решеток из левовинтовых (правовинтовых) спиралей (рис. 4, *b*, *c*), ориентированных перпендикулярно оси волновода;
- массивы спиралей, ориентированных вдоль оси волновода (рис. 4, *d*).

Проведенные эксперименты подтвердили, что массивы левовинтовых и правовинтовых спиралей вращают плоскость поляризации излучения в противоположных направлениях, поворот плоскости поляризации массивами из равного количества левых и правых спиралей пренебрежимо мал — не более $1,5^\circ$, что вполне соответствует погрешности измерений и наличию разброса геометрических параметров спиралей. Максимальный угол поворота плоскости поляризации 90° был получен при падении волны вдоль осей спиралей (см. рис. 4, *d*), имеющих шаг, близкий к длине волны. Для решеток спиралей, оси которых ориентированы перпендикулярно направлению распространения волны, максимальный угол поворота плоскости поляризации 34° (см. рис. 4, *e*) был получен для решетки из 12 спиралей, выполненной из молибденовой проволоки диаметром 40 мкм (угол скрутки спирали $\psi = 40^\circ$, диаметр спирали $d = 480$ мкм, диаметр молибденовой проволоки 40 мкм), на длине волны $\lambda = 2,1$ мм, что хорошо согласуется с условием резонанса $\psi = \pi\lambda/d$, аналогичным условию резонанса для цилиндров с винтовой проводимостью [15]. Таким образом, эксперименты, проведенные на массивах спиралей с различной геометрией, выполненных из одинаковой молибденовой проволоки, показывают, что максимальная оптическая активность наблюдается при геометрии спиралей, близкой к реализации резонансов первых двух типов (см. введение).

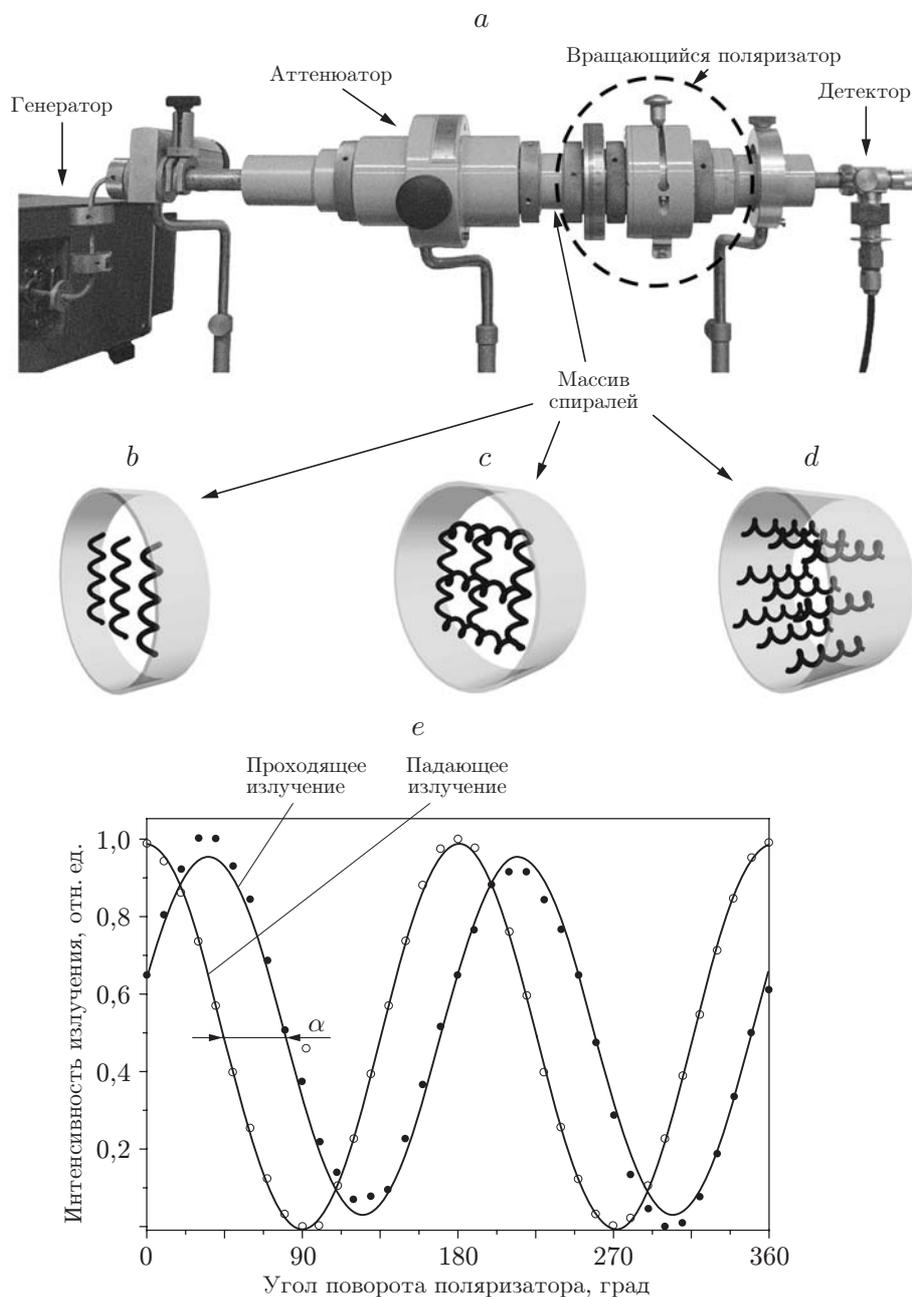


Рис. 4. Эксперимент по вращению плоскости поляризации СВЧ-излучения массивами спиралей: *a* — квазиоптическая волноводная СВЧ-линия и схема расположения массивов спиралей в волноводе; *b* — решетка параллельных спиралей (оси спиралей перпендикулярны оси волновода, $\alpha = 29^\circ$ — сильная зависимость оптической активности от ориентации плоскости); *c* — квадратная решетка спиралей (оси спиралей перпендикулярны оси волновода, $\alpha = 34^\circ$ — слабая зависимость оптической активности от ориентации плоскости поляризации); *d* — решетка параллельных спиралей (оси спиралей параллельны оси волновода, $\alpha = 90^\circ$ — киральный брэгговский резонанс); *e* — зависимости интенсивности проходящего излучения от угла ориентации поляризатора-анализатора (светлые кружки — без образца, черные — с образцом, $\alpha = 34^\circ$ — угол поворота плоскости поляризации образцом) (окончание на стр. 19)

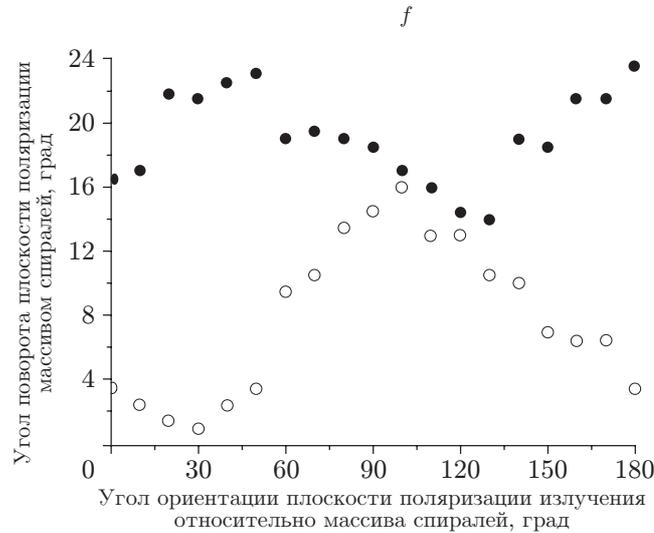


Рис. 4. Эксперимент по вращению плоскости поляризации СВЧ-излучения массивами спиралей: f — зависимости поворота плоскости поляризации от ориентации массива спиралей относительно плоскости поляризации падающего излучения (светлые кружки — решетка из параллельных спиралей (см. рис. 4, b), черные — квадратная решетка из спиралей (см. рис. 4, c))

Были определены зависимости поворота плоскости поляризации от направления поляризации падающей волны для решетки из параллельных спиралей и квадратной решетки спиралей (рис. 4, f), расположенных перпендикулярно оси волновода. При падении волны перпендикулярно плоской решетке из параллельных спиралей, схематически изображенной на рис. 4, b (шесть параллельных левых спиралей из молибденовой проволоки диаметром 40 мкм, $d = 0,7$ мм, $\psi = 45^\circ$, длина спиралей 1,5 см, расстояние между осями спиралей 2 мм), наблюдалась резкая зависимость угла поворота плоскости поляризации от ориентации осей спиралей (см. рис. 4, f). Совмещение двух таких решеток в виде квадратной решетки из спиралей (см. рис. 4, e) позволяет сгладить эту зависимость и получить существенный поворот плоскости поляризации при любой ориентации решетки в плоскости волнового фронта (см. рис. 4, f). В случае идеальной квадратной решетки спиралей с осью симметрии 4-го порядка вращение плоскости поляризации теоретически перестает зависеть от ориентации плоскости поляризации. Формирование подобных однородных массивов и массивов полуволновых микроспиралей, навитых из проволоки вручную, проблематично даже в СВЧ-диапазоне, где характерные шаг и диаметр спиралей составляют порядка нескольких миллиметров. Для получения метаматериалов, обладающих резонансными киральными свойствами в ТГц- и более высокочастотных диапазонах, размеры спиралей становятся слишком малыми для изготовления их с помощью традиционных технологий.

В ТГц-диапазоне вращение плоскости поляризации исследовалось на массиве микроспиралей из металл-полупроводниковой нанопленки InGaAs/GaAs/Ti/Au (8/45/3/50 нм). Спирали хаотически распределены на подложке из GaAs в виде монослоя и ориентированы параллельно подложке. Параметры спиралей: диаметр 14,5 мкм, шаг 58 мкм, ширина ленты спирали 3 мкм, длина спирали в развернутом состоянии 73 мкм, плотность спиралей в массиве 500 шт/мм². Измерения поворота плоскости поляризации осуществлялись в диапазоне 1,6–2,3 ТГц с помощью лазера на свободных электронах (см. рис. 5, a). На рис. 5, b видно, что внесение образца приводит к гигантскому повороту плоскости поляризации (17° для массива спиралей, расположенных монослоем), причем зависимость поворота плоскости поляризации от длины волны носит резко резонансный характер (при $\lambda = 142$ мкм угол поворота составляет 17°, а при $\lambda = 139$ мкм уменьшается до 3°). Макси-

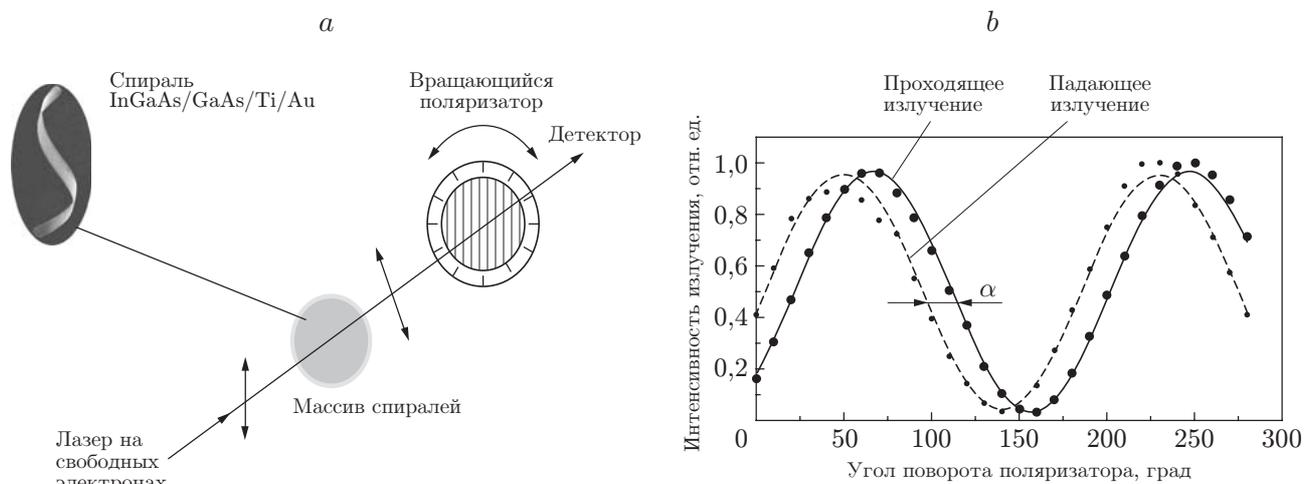


Рис. 5. Эксперимент по вращению плоскости поляризации ТГц-излучения массивом спиралей: *a* — схема эксперимента; *b* — зависимость интенсивности детектируемого излучения от угла поворота поляризатора ($\lambda = 142$ мкм, $\alpha = 17^\circ$)

мальная оптическая активность наблюдается вблизи полуволнового резонанса, т. е. когда длина спирали в развернутом виде близка к половине длины волны излучения. Технология изготовления позволяет сделать все спирали массива практически идентичными, т. е. настроить их на одну частоту, что и обеспечивает такой узкий резонанс. Один слой спиралей (толщина порядка $1/10$ длины волны) вращает плоскость поляризации на 17° , в то время как слой самых современных жидких кристаллов толщиной $1/10$ длины волны поворачивает плоскость поляризации оптического излучения менее чем на 1° .

Гигантская оптическая активность, низкие потери и резонансный характер вращения плоскости поляризации делают продемонстрированный эффект перспективным для практического применения. Размеры структуры легко масштабируются в широких пределах, и соответственно такие твердотельные «жидкие кристаллы» могут быть созданы для различных спектральных диапазонов: от СВЧ- до рентгеновского. Причем в отличие от жидкокристаллических эти структуры имеют стабильные свойства в широком диапазоне температур и давлений.

Заключение. В данной работе впервые созданы киральные метаматериалы с трехмерными элементами-резонаторами для ТГц-диапазона. Прецизионные электромагнитные элементы представляют собой гибридные металл-полупроводниковые спирали. Разработаны и оптимизированы технологические маршруты, обеспечивающие воспроизводимое формирование однородных массивов прецизионных спиралей-резонаторов (более 10000 на квадратный сантиметр) различной конфигурации. Исследования оптической активности таких метаматериалов в ТГц-диапазоне показали резонансный характер изменения плоскости поляризации проходящего излучения, что открывает широкие возможности для практических применений таких метаматериалов в целях управления поляризацией излучения (беспроводная ТГц-связь, ТГц-спектроскопия, биомедицинская диагностика, системы безопасности и другие). Эксперименты, проведенные на массивах модельных проволочных спиралей различной конфигурации в СВЧ-диапазоне, продемонстрировали вращение плоскости поляризации на 34° для спиралей, оси которых ориентированы перпендикулярно направлению распространения волны, и на 90° для спиралей с осями, параллельными направлению распространения волны.

Кроме оптически активных метаматериалов, исследованных в данной работе, на основе спиралей могут быть построены некиральные среды с отрицательным показателем

преломления [16], магнитные среды [16], киральные среды с отрицательным показателем преломления для одной круговой поляризации [17, 18] и так называемое «киральное ничто» — киральная среда с нулевым показателем преломления [19].

Подход к наноструктурированию, использованный в данной работе для формирования ТГц-метаматериалов на основе спиралей, обладает рядом преимуществ, принципиальных для формирования метаматериалов:

1) прецизионность и гладкие конфигурации трехмерных резонаторов, точное позиционирование и ориентация в массиве, воспроизводимость и однородность массивов — лучшие резонансные свойства метаматериалов (резкие резонансы, низкое рассеяние);

2) разнообразие конфигураций и материалов трехмерных оболочек-резонаторов, двух- и трехмерные архитектуры — шире диапазон получаемых электромагнитных свойств, создание трехмерных метаматериалов;

3) масштабирование размеров (характерные размеры вплоть до единиц нанометров) — метаматериалы от СВЧ- до видимого диапазона, высокая однородность метаматериала;

4) совместимость с технологией производства интегральных схем — возможности динамического управления свойствами метаматериалов (как показали предварительные эксперименты, благодаря упругости и высокой формоустойчивости нанопленочных оболочек, спирали можно упруго изгибать в широких пределах, а также менять их ориентацию с помощью электрического и магнитного полей, что также обеспечивает динамическое управление электромагнитными свойствами метаматериалов);

5) метод изготовления параллельный, все процедуры допускают автоматизацию — возможности промышленного производства.

Авторы выражают благодарность В. В. Преображенскому и А. И. Торопову за предоставление нескольких эпитаксиальных структур, М. М. Качановой за помощь при литографии и Р. А. Соотс за обсуждение технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пендри Д., Смит Д. В поисках суперлинзы // В мире науки. 2006. № 11. С. 15–21.
2. Lapine M., Tretyakov S. Contemporary notes on metamaterials // IET Microwave and Antennas Propagation. 2007. N 1. P. 3–11.
3. Shalaev V. M. Optical negative-index metamaterials // Nature Photonics. 2007. 1. P. 41–48.
4. Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovsky A. K. et al. Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays // Physica E. 2000. 6, N 1–4. P. 828–831.
5. Пат. № 2317942 РФ. Структура с киральными электромагнитными свойствами и способ ее изготовления /Е. В. Наумова, В. Я. Принц. Оpubл. 27.02.2008, Бюл. № 6.
6. Шевченко В. В. Киральные электромагнитные объекты и среды // СОЖ. 1998. № 2. С. 109–114.
7. Lindmann K. F. Rotation polarisation of electromagnetic waves generated by the isotropic system of spiral resonators // Annal. der Phys. 1920. 63. P. 621–644.
8. Robbie K., Brett M. J., Lakhtakia A. Chiral sculptured thin films // Nature. 1996. 384. P. 616.
9. Каценеленбаум Б. З., Коршунова Е. Н., Сивов А. Н., Шатров А. Д. Киральные электродинамические объекты // УФН. 1997. 167, № 11. С. 1201–1212.
10. Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Samofalov A. L. Polarization plane rotation of electromagnetic waves by the artificial periodic structure with one-turn helical elements // Electromagnetics. 2006. 26, N 3. P. 219–233.

11. **Guerin F.** Microwave chiral materials: a review of experimental studies and some results on composites with ferroelectric ceramic inclusions // Progress in Electromagnetics Research (PIER). Cambridge: EMW Publishing. 1994. Vol. 9. P. 219–263.
12. **Принц В. Я., Голод С. В.** Упругие наноболочки на основе кремниевых пленок: формирование, свойства и практическое применение // ПМТФ. 2006. **47**, № 6. С. 114–128.
13. **Seleznev V. A., Yamaguchi H., Hirayama Y., Prinz V. Ya.** Single-turn GaAs/InAs nanotubes fabricated using the supercritical CO₂ drying technique // Jap. Journ. Appl. Phys. 2003. **42**. P. L791–L794.
14. **Chehovskiy A. V., Prinz V. Ya.** Application of supercritical fluids for fabrication of free-standing nanoobjects // Intern. Journ. Nanoscience. 2004. **3**. P. 1.
15. **Сивов А. Н., Чуприн А. Д., Шатров А. Д.** Эффект низкочастотного резонанса в полем цилиндра круглого сечения с идеальной проводимостью поверхности вдоль винтовых линий // Радиотехника и электроника. 1994. **39**, № 10. С. 1534.
16. **Lagarkov A. N., Semenenko V. N., Kisel V. N., Chistyayev V. A.** Development and simulation of microwave artificial magnetic composites utilizing nonmagnetic inclusions // Journ. Magn. Magn. Mater. 2003. **258–259**. P. 161–166.
17. **Pendry J.** A chiral route to negative refraction // Science. 2004. **306**. P. 1353–1955.
18. **Tretyakov S., Sihvola A., Jylha L.** Backward-wave regime and negative refraction in chiral composites // Photonics and Nanostruct.: Fundam. and Appl. 2005. **3**. P. 107–115.
19. **Tretyakov S., Nefedov I., Sihvola A. et al.** Waves and energy in chiral nihility // Journ. Electromagn. Waves and Appl. 2003. **17**, N 5. P. 695–706.

Поступила в редакцию 19 мая 2009 г.
