

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ ДВОЙНОЙ ДНК-ПОДОБНОЙ СПИРАЛИ КАК ЭЛЕМЕНТА МЕТАМАТЕРИАЛОВ И МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

И. В. Семченко^{1,2*}, С. А. Хахомов², И. С. Михалко², А. Л. Самофалов², П. В. Сомов²

УДК 535.51:547.963.32

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-2-329-337>

¹ ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”, Минск, Беларусь;

e-mail: semchenko@oelt.basnet.by

² Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

(Поступила 30 января 2023)

Посредством моделирования подтверждена поляризационная селективность двойной ДНК-подобной спирали относительно волн с левой и правой циркулярной поляризацией при резонансе, характерном для периодической структуры. В качестве примера рассмотрены спирали различной длины, состоящие из двух с половиной и двадцати с половиной витков, при этом длина волны падающего поля приблизительно равна длине витка спирали. Эффект состоит в кардинально различной способности двойной ДНК-подобной спирали отражать волны с правой или левой циркулярной поляризацией при рассматриваемом резонансе. Преобладающую интенсивность имеет отраженная волна с таким направлением циркулярной поляризации, при котором электрический вектор закручен в пространстве в противоположном направлении относительно двойной спирали. На основе двойной ДНК-подобной спирали может быть создан поляризатор электромагнитных волн, преобразующий падающую линейно поляризованную волну в отраженную волну с циркулярной поляризацией. Рассчитаны электромагнитные силы взаимодействия между спиральными нитями при трех состояниях поляризации падающей волны, чем также подтверждается поляризационная селективность двойной ДНК-подобной спирали как элемента метаматериалов и как объекта с большими возможностями использования в оптике.

Ключевые слова: ДНК-подобная спираль, поляризация, поляризационная селективность, метаматериал, метаповерхность.

The polarization selectivity of a double DNA-like helix with respect to waves with left and right circular polarization at a resonance characteristic of the periodic structure is confirmed by modeling. As an example, helices of various lengths consisting of two and a half and twenty and a half turns are considered, while the wavelength of the incident field is approximately equal to the length of the helix turn. The effect consists in a radically different ability of a double DNA-like helix to reflect waves with right or left circular polarization at the resonance under consideration. The predominant intensity is a reflected wave with such a direction of circular polarization, in which the electric vector is twisted in space in the opposite direction relative to the double helix. Consequently, on the basis of a double DNA-like helix, an electromagnetic wave polarizer can be created that converts an incident linearly polarized wave into a reflected wave with circular polarization. The electromagnetic forces of interaction between helix strands at three states of polarization of the incident wave are calculated, which also confirms the polarization selectivity of a double DNA-like helix as an element of metamaterials and as an object with great possibilities of use in optics.

Keywords: DNA-like helix, polarization, polarization selectivity, metamaterial, metasurface.

POLARIZATION SELECTIVITY OF A DOUBLE DNA-LIKE HELIX AS AN ELEMENT OF METAMATERIALS AND METASURFACES

I. V. Semchenko^{1,2*}, S. A. Khakhomov², I. S. Mikhalka², A. L. Samofalov², P. V. Somov² (¹ SNPO “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”, Minsk, Belarus; e-mail: semchenko@oelt.basnet.by;

² F. Skaryna Gomel State University, Gomel, Belarus)

Введение. Современная оптика не только исследует природные кристаллы, продолжая традиции классической науки, но и одновременно проектирует свойства новых типов искусственных сред. Среди искусственных структур важное место занимают метаматериалы (ММ), название которых обусловлено их особыми свойствами, экзотическими для природных веществ. Термин “мета” в переводе с греческого означает “вне”, что отражает экстраординарные свойства ММ и их невхождение в круг естественных объектов. К необычным свойствам ММ относятся отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей, проявляющиеся одновременно, отрицательный показатель преломления, сильные киральные свойства и др. Поскольку речь идет о материале, для характеристики его строения по аналогии с кристаллами можно использовать термин “мета-атомы”. Это микрорезонаторы с желательными и проектируемыми свойствами в оптическом, терагерцовом и микроволновом диапазонах. В отличие от фотонных кристаллов элементы ММ расположены достаточно плотно в пространстве, что позволяет рассматривать их в некотором приближении как сплошные среды. В последние годы особое значение приобрели предельно тонкие ММ, или метаповерхности, состоящие только из одного слоя искусственных частиц (мета-атомов). Этого слоя микрорезонаторов достаточно для получения проектируемых свойств, что повышает эффективность метаповерхностей без снижения их функциональности [1, 2].

Теоретическое обоснование. Управление поляризацией света является одной из классических задач оптики, которая приобрела новое звучание после создания лазеров. Например, в книге под редакцией академика АН БССР Б. И. Степанова и доктора физико-математических наук А. А. Богуша [3] одна из глав посвящена поляризации излучения, генерируемого растворами сложных молекул (авторы В. А. Пилипович, А. А. Ковалев). Метаматериалы, а в последние годы и метаповерхности создают новые возможности управления электромагнитными волнами различных частотных диапазонов, включая преобразование поляризации [4—10].

Со времени открытия структуры молекулы ДНК Дж. Уотсоном и Ф. Криком [11] объектом интереса исследователей являются механизмы хранения и передачи генетической информации этой молекулой [12]. Однако возможности применения молекулы ДНК не исчерпываются генетическим аспектом. В работах [13—18] показано, что двойная ДНК-подобная спираль в силу особенных электромагнитных свойств имеет хорошие возможности применения в качестве элемента ММ и метаповерхностей. В частности, при соответствующем масштабировании двойная ДНК-подобная спираль может играть роль поляризатора электромагнитных волн различных частотных диапазонов, преобразуя падающую линейно поляризованную волну в отраженную волну с циркулярной поляризацией. В настоящей работе посредством моделирования на очередном этапе подтверждается поляризационная селективность двойной ДНК-подобной спирали относительно волн с левой и правой циркулярной поляризацией при резонансе, характерном для периодической структуры.

При теоретическом исследовании поляризационной селективности двойной ДНК-подобной спирали используется универсальный подход, основанный на уравнениях Максвелла и потенциалах электромагнитного поля. Такой метод позволяет рассматривать ДНК-подобные спирали в любом диапазоне электромагнитных волн при условии взаимно согласованного масштабирования размеров спирали и резонансной длины волны.

На рис. 1 схематически изображена двойная ДНК-подобная спираль в поле падающей линейно-поляризованной электромагнитной волны с волновым вектором \mathbf{k} и вектором напряженности электрического поля \mathbf{E} , распространяющаяся навстречу оси Z . Спираль имеет радиус r , шаг h , угол подъема α и взаимное смещение X_s двух нитей вдоль их общей оси X . Участки спирали с максимальной плотностью индуцированных электрических зарядов обозначены dq , dq_1 и токов — $Id\mathbf{l}$, $I_1d\mathbf{l}_1$. Направление токов в двух спиральных нитях зависит от способа возбуждения двойной спирали. Для возбуждаемой моды колебаний, когда длина волны приблизительно равна периоду спирали, электрические токи в двух нитях проходят в одном направлении относительно оси спирали. Сила $d\mathbf{F}$, действующая на элемент второй нити, направлена вдоль радиуса двойной спирали и свидетельствует о взаимном отталкивании двух нитей. Отраженная волна с левовращающей поляризацией характеризуется волновым вектором \mathbf{k}_r и вектором напряженности электрического поля \mathbf{E}_r и распространяется вдоль оси Y .

Важной особенностью ДНК-подобных спиралей, приводящей к их поляризационной селективности, является сбалансированность, или оптимальность таких спиралей в плане сравнения их диэлектрических и магнитных свойств. Это свойство означает, что при рассматриваемом резонансе, характерном для периодической структуры, в каждой половине витка ДНК-подобной спирали под дей-

ствием падающей волны одновременно возникают электрический дипольный момент p и магнитный момент m , удовлетворяющие соотношению

$$p = m/c, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме. Эти индуцированные моменты являются одинаково значимыми, т. е. вносят равный по абсолютной величине вклад в отраженную волну. Фаза излучаемых полей отличается на $\pm\pi/2$ для полей, создаваемых электрическим дипольным моментом и магнитным моментом половины витка двойной спирали. Это свойство баланса диэлектрических и магнитных моментов отдельной ДНК-подобной спирали является перспективным и приводит к преимуществу ДНК-подобных спиралей при создании ММ и метаповерхностей. Указанная сбалансированность диэлектрических и магнитных моментов спиральных ДНК-подобных микрорезонаторов может привести, например, к равенству диэлектрической и магнитной проницаемостей ММ или метаповерхности в целом. Если при создании ММ используются в равной концентрации ДНК-подобные спирали с правосторонним и левосторонним закручиванием, то в спроектированном образце хиральные свойства являются скомпенсированными. Выполнение равенства $\varepsilon = \mu$ означает, что такой ММ характеризуется волновым сопротивлением, равным импедансу свободного пространства, что приводит к отсутствию волны, отраженной от его поверхности. Это свойство подавления отраженной волны от ММ, рассматриваемого в качестве сплошной среды, аналогично эффекту Керкера для частиц с равными ε и μ . Указанный эффект описан в теории рассеяния Ми и проявляется отсутствием волны, отраженной частицей назад [19].

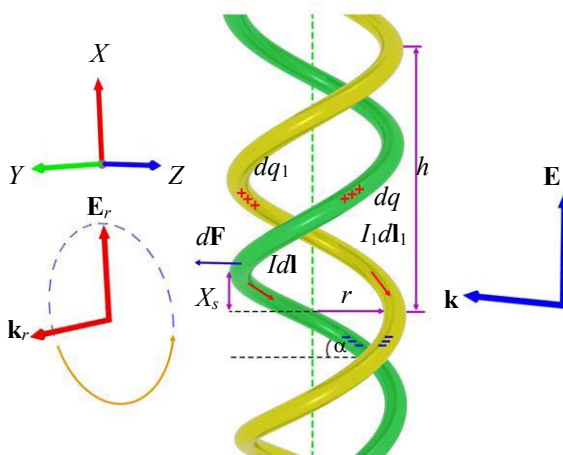


Рис. 1. Двойная ДНК-подобная спираль в поле падающей линейно поляризованной электромагнитной волны

Введем угол подъема спирали α как угол, образованный касательной к спиральной линии и плоскостью, ортогональной оси спирали (рис. 1). Расчеты показывают, что угол подъема является универсальной характеристикой электромагнитных свойств спирали, поскольку именно его значение фигурирует в формулах для электромагнитных сил, а не радиус r и шаг спирали h в отдельности. Это свойство универсальности угла подъема спирали упрощает изучение спиралей, которые проявляют резонансные свойства в различных диапазонах длин волн, включая нанометровый диапазон. В этом случае спирали, имеющие разные радиусы и периоды (шаги), но одновременно характеризующиеся одинаковым углом подъема, схожи не только в геометрическом, но и в электродинамическом смысле. Это облегчает изучение и применение спиралей, в том числе ДНК-подобных, в устройствах, работающих в различных частотных диапазонах электромагнитного поля.

Угол подъема спирали ДНК не измеряется непосредственно в эксперименте, однако может быть рассчитан на основе экспериментальных данных для радиуса и шага спирали. Например, в работе [11] угол подъема $\alpha_{\text{exp}} = 28.4^\circ$. В других публикациях угол подъема спирали ДНК $22\text{—}32^\circ$. Теоретический подход, согласно трем независимым методам классической электродинамики, дает оптимальное значение $\alpha_{\text{opt}} = 24.5^\circ$, при котором проявляются сбалансированность и поляризационная селективность двойной спирали. Это значение получено в [13—18] тремя способами: в рамках теории дипольного излучения, согласно энергетическому подходу и в соответствии со спиральной моделью молекул

кирального вещества [20]. Такая повторяемость результатов указывает на обоснованный характер значения угла подъема спирали α_{opt} .

Нами рассматривается ДНК-подобная спираль при резонансе, характерном для периодической структуры, когда длина волны электромагнитного поля приблизительно равна периоду спирали P :

$$\lambda_{\text{res}} \approx P, \quad (2)$$

где $P = \sqrt{(2\pi r)^2 + h^2}$. Спираль активируется циркулярно поляризованной электромагнитной волной, падающей ортогонально ее оси (рис. 1). Существуют два разных определения знака (направления волны) с циркулярной (круговой) поляризацией. Согласно обычно используемому в радиофизике определению, волна имеет правую круговую поляризацию, если вектор \mathbf{E} вращается по часовой стрелке с течением времени для наблюдателя, смотрящего вслед волне. В оптике и физической химии принято другое определение: волна имеет правую циркулярную поляризацию, если вектор \mathbf{E} образует правую спираль в пространстве. Преимуществом второго определения является его независимость от позиции наблюдателя. Используем второе определение знака волны с циркулярной поляризацией, более распространенное в оптике.

Напряженность электрического поля право- (+) и левоциркулярно (–) поляризованных волн, распространяющихся в вакууме вдоль оси OZ , можно записать в виде

$$E_{\pm} = E_0 \frac{\mathbf{x}_0 \mp i\mathbf{y}_0}{\sqrt{2}} \exp(i(kz - \omega t)), \quad (3)$$

где E_0 — амплитуда волны; $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0$ — единичные векторы, направленные вдоль осей OX и OY ; i — мнимая единица; коэффициент $\sqrt{2}$ введен для нормировки вектора циркулярной поляризации; $k = \omega/c$ — волновое число; ω — циклическая частота.

В работах [13–18, 21] показано, что двойные ДНК-подобные спирали обладают избирательными (селективными) свойствами для право- и левоциркулярно поляризованных электромагнитных волн, если выполняется условие резонансного взаимодействия (2). В этом случае двойная ДНК-подобная спираль с правым направлением закручивания сильно взаимодействует с левоциркулярно поляризованной волной. При этом она практически не взаимодействует с волной, имеющей противоположную (правую) циркулярную поляризацию. Таким образом, по отношению к волне с правоциркулярной поляризацией спираль можно считать “прозрачной”. Что касается излучаемой или отраженной волны, то двойные ДНК-подобные спирали при рассматриваемом резонансе могут создавать такие волны только с левоциркулярной поляризацией.

Таким образом, как показано в [13], ключевыми моментами для эффекта поляризационной селективности являются определенный угол подъема спирали, близкий к $\alpha_{\text{opt}} = 24.5^\circ$, условие резонансного взаимодействия (2) и двухнитевая форма спирали, которая приводит к более высокой симметрии свойств при вращениях вокруг оси спирали. Важным, но не обязательным условием для наблюдения эффекта поляризационной селективности является электропроводность спиралей. Эффект более выражен для тока проводимости, однако он может проявляться и для тока поляризации.

Моделирование двойной ДНК-подобной спирали, состоящей из двух с половиной витков, в микроволновом диапазоне. Относительно короткие (2.5 витка) ДНК-подобные спирали представляют интерес в первую очередь как элементы ММ и метаповерхностей. Однако результаты моделирования существенно не изменяются для различного числа витков.

Угол наклона спирали α при условии резонанса (2) — универсальная характеристика электромагнитных свойств двойной ДНК-подобной спирали. Это позволяет масштабировать спираль с углом подъема $\alpha_{\text{exp}} = 28.4^\circ$, характерным для реальной спирали ДНК, для моделирования ее электромагнитных свойств в миллиметровом диапазоне длин волн электромагнитного поля. При наличии электропроводности спирали и резонанса (2), когда длина волны электромагнитного поля приблизительно равна периоду спирали, моделируемая спираль подобна двойной спирали ДНК не только в геометрическом, но и в электродинамическом смысле.

Представлены результаты моделирования проводящей двойной ДНК-подобной спирали, состоящей из 2.5 витков и имеющей параметры $r = 1$ мм, $h = 3.4$ мм, $P = 7.14$ мм, $x_s = 0.5$ мм и угол подъема $\alpha_{\text{exp}} = 28.4^\circ$. Частично используются результаты [21], представленные в более компактной форме. Исследуемая спираль находится в поле падающей электромагнитной волны (3), которая попеременно имеет левую или правую циркулярную поляризацию. Волновой вектор падающей волны направлен ортогонально оси двойной спирали, т. е. рассматривается случай нормального падения. Длина волны

падающего электромагнитного поля удовлетворяет условию резонанса (2). Следовательно, частота падающей волны близка к $\nu_{\text{res}} \approx 42$ ГГц.

Согласно расчетам, когда на спираль падает волна с левовращающейся поляризацией, длина волны которой удовлетворяет условию (2), в спиральных нитях возникают электрические токи, проходящие в одном направлении относительно оси спирали. Такое распределение токов и зарядов схематически представлено на рис. 1. В альтернативном случае, если на спираль падает волна с правовращающейся поляризацией, электрические токи примерно в два-три раза слабее, чем токи в первом случае. Кроме того, во втором случае для правовращающейся поляризованной падающей волны электрические токи, возбуждаемые в двух нитях, проходят в противоположных направлениях относительно оси спирали. Поля, создаваемые взаимно противоположными токами, практически полностью компенсируются. Следовательно, двойная ДНК-подобная спираль, рассматриваемая как единое целое, как система двух спиральных нитей, сильно взаимодействует с волной, имеющей левовращающую поляризацию, и практически не взаимодействует с волной с правовращающейся поляризацией.

Кардинально различное возбуждение токов в двойной ДНК-подобной спирали под действием падающих волн с лево- и правовращающейся поляризацией приводит к существенно различным свойствам волны, отраженной двойной спиралью. На рис. 2 показаны интенсивность и эллиптичность отраженной волны в зависимости от частоты, если двойная спираль находится в поле падающих волн с лево- или правовращающейся поляризацией. Вблизи резонансной частоты $\nu_{\text{res}} \approx 42$ ГГц интенсивность отраженной волны значительно преобладает в случае падения волны с левовращающейся поляризацией. При этом эллиптичность отраженной волны принимает значения, близкие к единице. Это указывает на сильную отраженную волну с левовращающейся поляризацией, такой же, как у падающей волны.

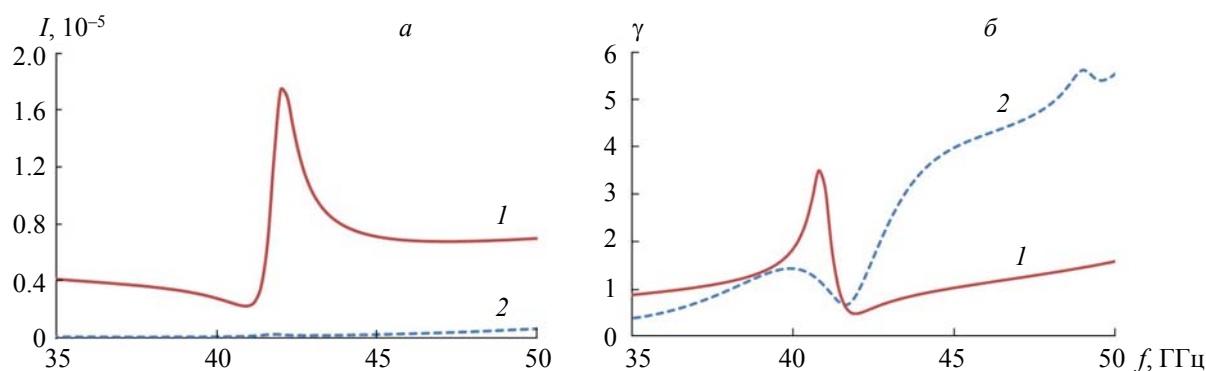


Рис. 2. Частотная зависимость интенсивности I (а) и эллиптичности γ (б) отраженной волны для двойной ДНК-подобной спирали в случаях падения волн с лево- (1) и правовращающейся (2) поляризациями

В другом случае, когда двойная спираль находится в поле падающей волны с правовращающейся поляризацией, имеет место слабое взаимодействие между волной и спиралью. Отраженная волна в диапазоне частот 35–50 ГГц в ~ 25 –80 раз слабее по интенсивности, чем при падении волны с левовращающейся поляризацией. Эллиптичность отраженной волны также может быть близка к единице вблизи резонансной частоты, что подтверждает циркулярную поляризацию отраженной волны, такую же, как у падающей волны. Однако это свойство не имеет существенного значения из-за очень низкой интенсивности отраженной волны.

Особый интерес вызывает сравнение отраженных волн для двойной и одинарной (однонитевой) спирали с углом подъема (28.4°). Как показано в [21], резонансный характер отражения волны с левовращающейся поляризацией исчезает для однонитевой спирали. Интенсивность отраженной волны для одинарной спирали в диапазоне 35–50 ГГц в ~ 3 –5 раз меньше, чем для двойной спирали. При этом отраженная волна для однонитевой спирали имеет эллиптическую поляризацию. Если одинарная спираль находится в поле падающей волны с правовращающейся поляризацией, интенсивность отраженной волны в рассматриваемом диапазоне частот остается очень низкой, примерно такой же, как для двойной спирали. При этом отраженная волна для одинарной спирали имеет эллиптическую поляризацию в этом диапазоне частот. Указанное исчезновение эффекта поляризационной селектив-

ности в случае односторонней спирали можно объяснить более низким порядком симметрии такой спирали по сравнению с двухсторонней спиралью.

Моделирование более длинной двойной ДНК-подобной спирали, состоящей из 20.5 витков. Проведено моделирование для более длинной двойной ДНК-подобной спирали, содержащей 20.5 витков. Остальные параметры спирали такие же, как в случае 2.5 витков. Такие ДНК-подобные спирали с большей длиной по сравнению с рассмотренными выше представляют интерес не только как элементы ММ и метаповерхностей, но и как модели реальных молекул ДНК. Рассмотрим не только поляризационную селективность двойной ДНК-подобной спирали, но и равновесие такой спирали. С этой целью рассчитаем силы взаимодействия нитей в различных областях спирали при падении волн с различными поляризациями — линейной, лево- и правоциркулярной. Результаты моделирования сил взаимодействия существенно не изменяются для другого количества витков спирали.

Рассмотрим центр двойной спирали. Поскольку двойная спираль состоит из нечетного числа полувитков (содержит 41 полувиток), в ее центре расположен максимум плотности электрических токов, проходящих в двух нитях. Следовательно, центральная область двойной спирали интересна в плане рассмотрения магнитного взаимодействия двух нитей, т. е. взаимодействия токов в этих нитях.

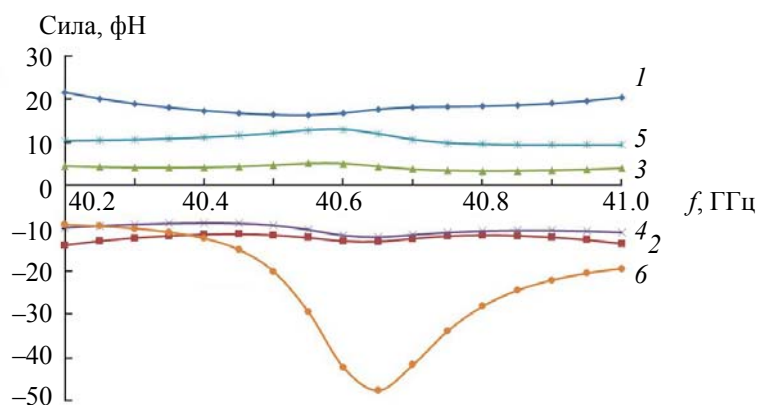


Рис. 3. Силы радиального отталкивания, действующие на нити спирали в ее центре (в области с максимальной плотностью электрических токов) при падении волн с различными поляризациями: 1-я нить, правая поляризация (1); 2-я нить, правая поляризация (2); 1-я нить, линейная поляризация (3); 2-я нить, линейная поляризация (4); 1-я нить, левая поляризация (5); 2-я нить, левая поляризация (6)

На рис. 3 показана частотная зависимость радиальных компонент сил, действующих на единичные элементы двух нитей спирали в ее центре при падении волн с различной поляризацией. Знаки сил с учетом выбора системы координат свидетельствуют о взаимном отталкивании двух нитей. Резонансная частота составляет ~ 40.65 ГГц, т. е. меньше по сравнению со спиралью, состоящей из 2.5 витков, для которой $\nu_{\text{res}} \approx 42$ ГГц. Такое снижение резонансной частоты можно объяснить более значительным замедлением электромагнитных волн в длинной ДНК-подобной спирали. Имеет место резонансное взаимное отталкивание двух спиральных нитей, наиболее выраженное при падении на спираль левоциркулярно поляризованной волны. В этом случае радиальные силы имеют наибольшую величину. Если спираль находится в поле волны с линейной или правоциркулярной поляризацией, то резонанс проявляется слабее, силы отталкивания уменьшаются в 2.5—5 раз.

Интересной особенностью является взаимное отталкивание токов, проходящих в двух спиральных проводниках в одном направлении относительно оси двойной спирали. Из классической электродинамики известно, что параллельные токи с одинаковым направлением взаимно притягиваются. Это свойство справедливо для прямолинейных токов. Наши расчеты показывают, что для токов, проходящих в спиральных проводниках с общей осью, возможно как взаимное притяжение, так и отталкивание. Направление радиальных сил зависит от угла подъема двойной спирали [22]. Если угол подъема спирали $< 38^\circ$, в том числе значения 28.4 и 24.5° , характерные для ДНК-подобных спиралей, имеет место взаимное отталкивание токов. Такое отталкивание одинаково направленных спиральных токов показано ранее в [22] для полуволнового резонанса, при котором длина волны электромагнитного поля приблизительно равна полной длине одной нити двойной ДНК-подобной спирали. Сейчас такое взаимное отталкивание одинаково направленных спиральных токов в двойной ДНК-подобной

спирали подтверждено в условиях другого, более высокочастотного резонанса. Такой резонанс характерен для длинных периодических структур и проявляется, когда длина волны электромагнитного поля приблизительно равна длине витка двойной ДНК-подобной спирали.

При резонансе, рассматриваемом в данной работе, в двойной ДНК-подобной спирали чередуются области максимальных плотностей электрического тока и заряда. Для случая взаимодействия зарядов в двух спиральных нитях рассмотрим область ниже центра спирали на четверть витка. В этой области плотность электрического заряда максимальная. При возбуждаемой моде колебаний, когда токи в двух нитях проходят в одном направлении относительно оси двойной спирали, заряды в этих нитях имеют одинаковые знаки в точках, лежащих симметрично относительно оси спирали. Таким образом, область двойной спирали ниже ее центра на четверть витка важна для рассмотрения электрического взаимодействия двух нитей, т. е. взаимодействия зарядов в этих нитях.

На рис. 4 показаны радиальные компоненты сил, действующих на единичные элементы двух нитей спирали, в области ниже ее центра на четверть витка при падении волн с различными поляризациями в зависимости от частоты волны. Знаки сил с учетом выбранной системы координат подтверждают взаимное отталкивание двух нитей. Как и для центральной области спирали, из графиков следует резонансное взаимное отталкивание двух спиральных нитей, сильнее проявляющееся при падении на спираль волны с левозакрученной поляризацией. Для такой волны радиальные силы имеют наибольшую величину. Если на спираль падают волны с линейной или правозакрученной поляризацией, то резонансные силы отталкивания уменьшаются в 5—10 раз.

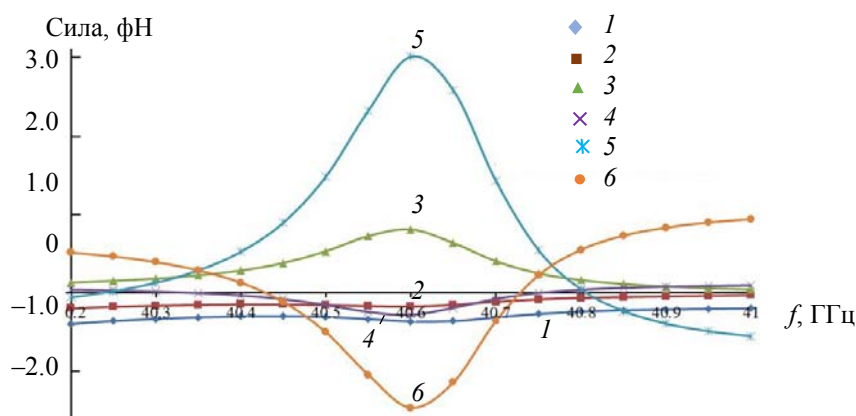


Рис. 4. Силы радиального отталкивания, действующие на нити спирали ниже ее центра на четверть витка (в области с максимальной плотностью электрических зарядов) при падении волн с различными поляризациями: 1-я нить, правая поляризация (1); 2-я нить, правая поляризация (2); 1-я нить, линейная поляризация (3); 2-я нить, линейная поляризация (4); 1-я нить, левая поляризация (5); 2-я нить, левая поляризация (6)

Таким образом, моделирование сил взаимодействия нитей в двойной ДНК-подобной спирали подтверждает поляризационную селективность такой спирали и существенно более сильную подверженность спирали действию волны с левозакрученной поляризацией.

Рассмотренный эффект поляризационной селективности по отношению к волнам с левой и правой циркулярной поляризацией может проявляться в полной мере именно для двойной ДНК-подобной спирали. Этот эффект связан с прозрачностью двойной ДНК-подобной спирали по отношению к волне с циркулярной поляризацией определенного знака, если длина волны электромагнитного поля приблизительно равна длине витка спирали. Одновременно спираль сильно взаимодействует с волной, имеющей циркулярную поляризацию другого знака. Для этой сильно влияющей волны электрический вектор закручен в пространстве в противоположном направлении относительно самой спирали. Следовательно, двойная ДНК-подобная спираль может быть использована в качестве преобразователя поляризации из линейной в циркулярную при отражении волны. Эффект подтверждается не только исследованием волн, отраженных спиралью, но и моделированием сил взаимодействия спиральных нитей под действием волн с различными поляризациями.

Эффект поляризационной селективности может быть достигнут в различных частотных диапазонах электромагнитного поля путем масштабирования спирали с сохранением ее угла подъема. Масштабированием спиралей с учетом электродинамического подобия с помощью доступных технологий можно получать метаматериалы и метаповерхности, резонансные для различных частот, в том числе для микроволн, терагерцовых частот и оптического диапазона. ДНК-подобные спирали для микроволнового диапазона изготавливались путем механического закручивания проволоки, затем они помещались в пластину пенопласта, который играл роль радиопрозрачной подложки. Если такие спирали соединялись в трехмерные структуры, необходимая прочность достигалась с помощью картонных цилиндров, на которые были намотаны спирали [13—18]. ДНК-подобные спирали, имеющие резонансные свойства в терагерцовом диапазоне, могут быть изготовлены в рамках импринт-нанолиитографии с помощью уникального метода трехмерного наноструктурирования, разработанного под руководством академика РАН В. Я. Принца и известного как принц-технология. В [23, 24] изложены результаты исследования метаматериала для терагерцового диапазона на основе парных одновитковых спиралей с правосторонним и левосторонним закручиванием. Использование самих молекул ДНК при их металлизации позволяет повысить резонансную частоту метаматериалов и метаповерхностей вплоть до глубокого (экстремального) УФ-диапазона. Электропроводность реальной молекулы ДНК в настоящее время еще изучается, а современные исследования показывают, что молекула ДНК близка по своим свойствам к нелинейному полупроводнику. В то же время электропроводность ДНК-подобных спиралей может быть увеличена путем металлизации, что расширяет возможности их использования, в том числе в нанометровом диапазоне длин волн. Интерес именно к ДНК-подобным спиральям, занимающим важное место среди других возможных микрорезонаторов для метаматериалов и метаповерхностей, обусловлен также развитием природоподобных технологий и междисциплинарных исследований. Кроме того, молекулы ДНК обладают способностью к самосборке и упорядочению в двумерных и трехмерных структурах [25]. В связи с этим метаматериалы и метаповерхности на основе ДНК-подобных спиралей в силу сбалансированности их диэлектрических и магнитных свойств могут служить хорошим инструментом управления интенсивностью, фазой, поляризацией и направлением распространения электромагнитных волн различных диапазонов.

Заключение. Проведено моделирование двойных ДНК-подобных спиралей различной длины, состоящих из двух с половиной и двадцати с половиной витков, при этом длина волны воздействующего электромагнитного поля приблизительно равна длине витка спирали. Рассчитаны интенсивность и эллиптичность отраженной волны в случае падения на двойную ДНК-подобную спираль волн с лево- и правоциркулярной поляризацией. Вычислены силы радиального отталкивания, действующие на нити спирали при падении волн с различной поляризацией: линейной, лево- и правоциркулярной. При моделировании сил рассмотрены две области двойной спирали, в которых максимальную плотность имеют либо электрические токи, либо электрические заряды. Подтверждена поляризационная селективность двойной ДНК-подобной спирали относительно волн с лево- и правоциркулярной поляризацией при рассматриваемом резонансе, характерном для периодической структуры. Двойная ДНК-подобная спираль наиболее сильно взаимодействует с левоциркулярно поляризованной волной, для которой электрический вектор закручен в пространстве в противоположном направлении относительно спирали. Исследуемая поляризационная селективность спирали проявляется как при отражении волн, так и при взаимодействии спиральных нитей. Следовательно, на основе двойных ДНК-подобных спиралей при их масштабировании могут быть созданы поляризаторы электромагнитных волн для различных частотных диапазонов электромагнитного поля. В более широком плане двойные ДНК-подобные спирали с учетом сбалансированности их диэлектрических и магнитных свойств имеют хорошие перспективы использования в оптике, в том числе как элементы метаматериалов и метаповерхностей.

Работа выполнена в рамках ГПНИ “Конвергенция-2025” (подпрограмма “Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии”) и частично в рамках проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Ф22КИТГ-021 и Ф23КИ-027.

[1] V. S. Asadchy, A. Díaz-Rubio, S. A. Tretyakov. *Nanophotonics*, 7, N 6 (2018) 1069—1094, doi: 10.1515/nanoph-2017-0132

[2] V. S. Asadchy, M. Albooyeh, S. N. Tsvetkova, A. Díaz-Rubio, Y. Ra'di, S. A. Tretyakov. *Phys. Rev. B*, 94 (2018) 075142

- [3] Проблемы современной оптики и спектроскопии, под ред. акад. АН БССР Б. И. Степанова и д-ра физ.-мат. наук А. А. Богуша, Минск, Наука и техника (1980) 173—186
- [4] **Y. Li, J. Zhang, S. Qu, J. Wang, L. Zheng, Y. Pang, Z. Xu, A. Zhang.** *J. Appl. Phys.*, **117** (2015) 044501, doi: 10.1063/1.4906220
- [5] **C. Wu, H. Li, X. Yu, F. Li, H. Chen, C. T. Chan.** *Phys. Rev. Lett.*, **107** (2011) 177401, doi: 10.1103/PhysRevLett.107.177401
- [6] **J. K. Gansel, M. Thiel, M. S. Rill, M. Decker, K. Bade, V. Saile, G. von Freymann, S. Linden, M. Wegener.** *Science*, **325**, N 5947 (2009) 1513—1515, doi: 10.1126/science.1177031
- [7] **J. Kaschke, L. Blume, L. Wu, M. Thiel, K. Bade, Z. Yang, M. Wegener.** *Adv. Opt. Mater.*, **3**, N 10 (2015) 1411—1417, doi: 10.1002/adom.201500194
- [8] **S. J. Li, Y. B. Li, H. Li, Z. X. Wang, C. Zhang, Z. X. Guo, R. Q. Li, X. Y. Cao, Q. Cheng, T. J. Cui.** *Ann. Phys.*, **532**, N 5 (2020) 2000020, doi: 10.1002/andp.202000020
- [9] **Z. Y. Li, S. J. Li, B. W. Han, G. S. Huang, Z. X. Guo, X. Y. Cao.** *Adv. Theory Simul.*, **4**, N 8 (2021) 2100117, doi: 10.1002/adts.202100117
- [10] **B. Han, S. Li, Z. Li, G. Huang, J. Tian, X. u Cao.** *Opt. Express*, **29**, N 13 (2021) 19643—19654, doi: 10.1364/OE.425787
- [11] **J. D. Watson, F. H. C. Crick.** *Nature*, **171** (1953) 737—738, doi: 10.1038/171737a0
- [12] **J. D. Watson, T. A. Baker, S. P. Bell, A. A. F. Gann, M. Levine, R. M. Losick.** *Molecular Biology of the Gene*, Pearson, London, UK (2013) 77—105
- [13] **И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. П. Балмаков.** *Радиотехника и электроника*, **52**, № 9 (2007) 996—1001
- [14] **И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. П. Балмаков.** *Биофизика*, **55**, № 2 (2010) 227—232
- [15] **И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. П. Балмаков.** *Кристаллография*, **55**, № 6 (2010) 979—984
- [16] **I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakov.** *Telecommun. Radio Eng.*, **70**, N 20 (2011) 1871—1882, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i20.70
- [17] **S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, A. P. Balmakou, M. Nagatsu.** *Proc. 6th Int. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics — Metamaterials-2012, St.-Petersburg* (2012) 309—311
- [18] **И. В. Семченко, С. А. Хахомов.** *Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах*, Минск, Беларуская навука (2019) 219—245
- [19] **M. Kerker, D. S. Wang, C. L. Giles.** *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 765—767
- [20] **A. Serdyukov, I. Semchenko, S. Tretyakov, A. Sihvola.** *Electromagnetics of Bi—Anisotropic Materials. Theory and Applications: Electrocomponent Science Monographs*, Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers (2001) 245—249
- [21] **I. V. Semchenko, I. S. Mikhalka, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov, A. P. Balmakou.** *Front. Nanotechnol.*, **4** (2022) 794213, doi: 0.3389/fnano.2022.794213
- [22] **I. V. Semchenko, I. S. Mikhalka, I. A. Faniayeu, S. A. Khakhomov, A. P. Balmakou, S. A. Tretyakov.** *Photonics*, **7**, N 4 (2020) 83, doi: 10.3390/photonics7040083
- [23] **И. В. Семченко, С. А. Хахомов, В. С. Асадчий, Е. В. Наумова, В. Я. Принц, С. В. Голод, А. Г. Милехин, А. М. Гончаренко, Г. В. Синицын.** *Кристаллография*, **59**, № 4 (2014) 544—550
- [24] **I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, V. S. Asadchy, S. V. Golod, E. V. Naumova, V. Y. Prinz, A. M. Goncharenko, G. V. Sinitsyn, A.V. Lyakhnovich, V. L. Malevich.** *J. Appl. Phys.*, **121**, N 1 (2017) 015108
- [25] **N. C. Seeman.** *Ann. Rev. Biochem.*, **79** (2010) 65—87