

УДК 535.015

СУБВОЛНОВОЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ МАРШРУТИЗАТОР С ИЗМЕНЯЕМОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

А. Д. Кондорский, А. В. Мекшун

Выполнены численные расчеты диаграмм рассеяния наноантенн, состоящих из близкорасположенных параллельных золотой и серебряной наноплиток. Продемонстрировано, что такая система разнонаправленно рассеивает свет в зависимости от длины волны падающего излучения. Установлено, что изменение ширины и длин наноплиток позволяет в широких пределах изменять величину длины волны, при которой преимущественное направление рассеяния света изменяется на противоположное. Предложен удобный способ подбора размеров наноплиток для получения наноантенны с заданной величиной указанной длины волны переключения.

Ключевые слова: наноантенны, color routing, наноплазмоника, локализованные плазмонные резонансы.

Введение. Одной из важных задач нанофотоники является создание разного рода наноантенн для управления рассеянным светом (см. обзор [1] и ссылки в нем). Одним из перспективных направлений в области разработки наноантенн является создание устройств субволновых размеров, способных направленно рассеивать свет в зависимости от длины волны – т. н. субволновых спектральных маршрутизаторов (nanoscale color routing) [2–4]. В настоящее время существует два примера реализации таких устройств: биметаллические наноантенны [2, 3] и наностержни [4]. Общий принцип работы таких наноантенн состоит в подборе их физических параметров таким образом, чтобы падающий свет наводил в их частях дипольные моменты, разность фаз колебаний которых зависит от длины волны падающего излучения. Интерференция вкладов этих диполей в рассеянное излучение приводит к тому, что свет преимущественно рассеивается в различных направлениях, в зависимости от длины волны.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kondorskiy@lebedev.ru.

Наиболее показательным примером субволнового спектрального маршрутизатора являются биметаллические наноплитки. В настоящее время такие структуры получены в виде дисков золото-серебро [2] и платина-золото [3]. Значения длин волн света, при которых происходит переключение между направлениями рассеяния света в таких наноплитках, определяются материалами, из которых синтезированы нанодиски. Соответственно отсутствует возможность гибкой подстройки спектрального диапазона, в котором наноплитка рассеивает в том или ином направлении.

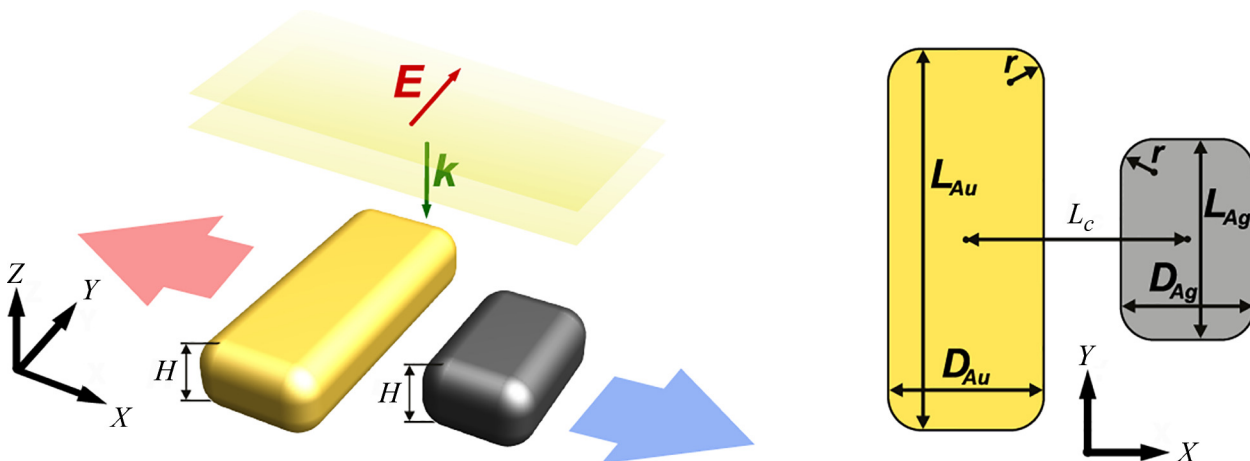


Рис. 1: Схематическое изображение исследуемых биметаллических наноплиток, состоящих из пары прямоугольных наноплиток из золота и серебра.

В настоящей работе предлагается способ настройки длины волны переключения направления преимущественного рассеяния биметаллических наноплиток, состоящий в использовании вместо нанодисков вытянутых (или сжатых) наноплиток (см. рис. 1). Идея основана на особенностях геометрии такой наноплитки. Если поляризация падающего излучения перпендикулярна линии, соединяющей центры наноплиток (т. е. вдоль оси Y), то в этих наноструктурах будут возбуждаться продольные плазмонные колебания с направлением наведенных диполей вдоль оси Y . Интерференция этих диполей создает эффект разнонаправленного рассеяния в направлении вдоль оси X (розовая и голубая стрелки на левом рис. 1) [2]. Поскольку длина волны продольных резонансов в вытянутых структурах монотонно зависит от соотношения продольного и поперечного размера [5–7], амплитуды и фазы наведенных в наноплитках диполей можно изменять, варьируя размеры наноплиток. Таким образом изменяются и спектральные характеристики рассеяния такой системы.

Цель работы и методика расчетов. Целью работы является проведение численных расчётов диаграмм направленности света, рассеянного биметаллическими наноплитками, состоящими из пар прямоугольных наноплиток из золота и серебра (см. рис. 1). Расчеты выполнены методом FDTD. Предполагалось, что наноплитки расположены на подложке, однако для упрощения расчетов использовалось приближение эффективной диэлектрической проницаемости окружающей среды [8, 9]. Эта величина представляет собой усредненное значение диэлектрических проницаемостей подложки и окружающей среды. В наших расчетах она взята равной $\epsilon_h = 1.6$, что позволяет количественно описывать результаты работы [2].

В рассматриваемой биметаллической наноплитке золотая и серебряная наноплитки параллельны друг другу и их центры располагаются вдоль оси X (см. рис. 1). Свет падает нормально к большим граням наноплиток и поляризован перпендикулярно линии, соединяющей их центры (вдоль оси Y). Конкретная задача работы состоит в выяснении влияния горизонтальных размеров наноплиток, их ширин D_{Au} , D_{Ag} , и длин L_{Au} , L_{Ag} , на параметры разнонаправленного рассеяния света. Остальные размеры наноплитки брались одинаковыми для всех проведённых расчетов: высоты обеих плиток равны $H = 40$ нм, радиусы закруглений на ребрах и углах $r = 15$ нм, расстояние между центрами наноплиток $L_C = 120$ нм.

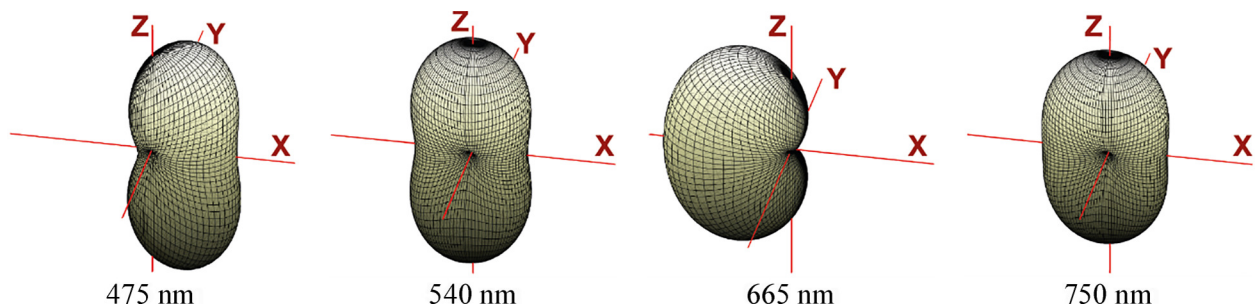


Рис. 2: Четыре диаграммы направленности света, рассеянного парой золотой и серебряной наноплиток при различных длинах волн падающего излучения. Размеры наноплиток (см. рис. 1): $D_{Au} = L_{Au} = 100$ нм, $D_{Ag} = L_{Ag} = 100$ нм.

Результаты расчетов и обсуждение. Аналогично случаю нанодисков [2], рассматриваемые биметаллические наноплитки разнонаправленно рассеивают свет на различных длинах волн. На рис. 2 представлены диаграммы рассеяния света парой золотого и серебряного квадратов одинакового размера $100 \text{ нм} \times 100 \text{ нм}$. Видно, что при длине волны падающего излучения около 475 нм данная наноплитка преимущественно рас-

сеивает свет в *правую сторону*, вдоль оси X по направлению возрастания координаты. При длине волны около 665 нм рассеяние света происходит преимущественно в *левую сторону*, по направлению уменьшения координаты вдоль оси X . Переключение между преимущественными направлениями рассеяния происходит постепенно. При длине волны 540 нм происходит переключение между преимущественными направлениями рассеяния. Эффект также исчезает в пределе больших длин волн.

Для оценки эффективности направленного рассеяния света системой проведены расчеты сечений рассеяния излучения вправо σ^+ , и влево σ^- . Эти величины определялись путем интегрирования дифференциальных по телесному углу сечений рассеяния света. Интегрирование проводилось по элементам телесного угла, лучи которых составляют к направлению оси X углы от 0 до 90° (σ^+), и от 90° до 180° (σ^-), соответственно. На рис. 3 представлены зависимости (σ^+) и (σ^-) от длины волны света для трех биметаллических наноплиток. Результаты, представленные на рис. 3(a), получены для пары золотого и серебряного квадратов одинакового размера 100 нм \times 100 нм. Диаграммы рассеяния такой системы приведены на рис. 2. Как видно из рис. 3(a) для длины волны $\lambda = 475$ нм (первая слева диаграмма на рис. 2), мощность, рассеянная в правую часть пространства, оказывается в $\sigma^+/\sigma^- = 2.5$ раза больше, чем в левую. При длине волны $\lambda = 665$ нм (третья слева диаграмма на рис. 2), наоборот, мощность, рассеянная в левую часть пространства, в $\sigma^-/\sigma^+ = 4.3$ раза превышает мощность, рассеянную вправо.

На рис. 3(b) представлены результаты для вытянутой вдоль оси Y золотой наноплитки и сжатой вдоль оси Y серебряной наноплитки. На рис. 3(c) представлены результаты для одинаково вытянутых вдоль оси Y золотой и серебряной наноплиток. При этом площади (и объемы) наноплиток во всех трех случаях, представленных на рис. 3, равны. Как видно из результатов, представленных на рис. 3, изменение соотношения длин и ширин наноплиток приводит к существенному сдвигу длины волны, на которой происходит переключение преимущественного направления рассеяния справа налево. Сдвигаются и длины волн, на которых достигаются наибольшие отношения мощностей, рассеянных вправо и влево. На рис. 3(b): при $\lambda = 430$ нм, $\sigma^+/\sigma^- = 2.0$; при $\lambda = 580$ нм, $\sigma^-/\sigma^+ = 2.5$. На рис. 3(c): при $\lambda = 440$ нм, $\sigma^+/\sigma^- = 3.0$; при $\lambda = 740$ нм, $\sigma^-/\sigma^+ = 4.3$.

Анализ показывает, что указанная длина волны переключения слабо зависит от соотношения сторон золотой наноплитки. Единственным необходимым условием является то, что плазмонный резонанс золотой наноплитки должен располагаться с длинноволновой стороны от плазмонного резонанса серебряной наноплитки. Для подтверждения этого вывода были проведены расчеты для систем, в которых размеры золотой на-

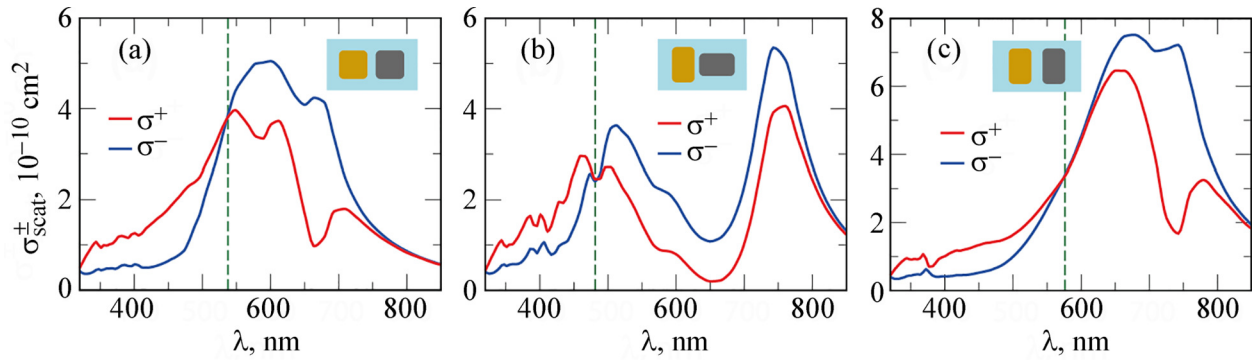


Рис. 3: Дифференциальные сечения рассеяния, проинтегрированные по направлениям в диапазоне углов к оси X от 0 до 90° и от 90° до 180° (обозначены σ^+ и σ^- , соответственно) в зависимости от длины волны света. Результаты представлены для пар прямоугольных наноплиток из золота и серебра с размерами: (a) $D_{Au} = L_{Au} = 100$ нм, $D_{Ag} = L_{Ag} = 100$ нм; (b) $D_{Au} = 80$ нм, $L_{Au} = 125$ нм, $D_{Ag} = 125$ нм, $L_{Ag} = 80$ нм; (c) $D_{Au} = 125$ нм, $L_{Au} = 125$ нм, $D_{Ag} = 80$ нм, $L_{Ag} = 80$ нм. Вертикальный зеленый пунктир отмечает длину волны, на которой происходит переключение преимущественного направления рассеяния справа налево.

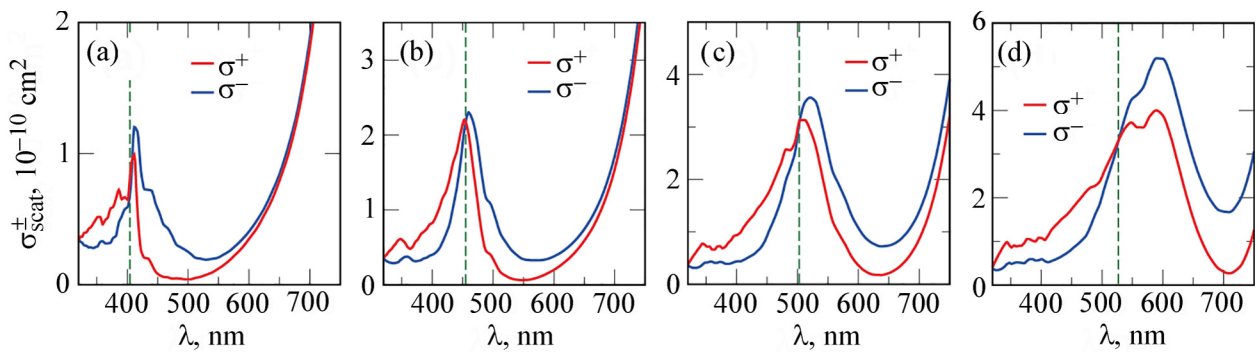


Рис. 4: То же, что на рис. 3. Размеры золотых наноплиток одинаковы во всех четырех случаях: $D_{Au} = 70$ нм, $L_{Au} = 140$ нм. Размеры серебряных наноплиток: (a) $D_{Ag} = L_{Ag} = 45$ нм; (b) $D_{Ag} = L_{Ag} = 60$ нм; (c) $D_{Ag} = L_{Ag} = 80$ нм; (d) $D_{Ag} = L_{Ag} = 100$ нм.

ноплитки были зафиксированы и составляли: $D_{Au} = 70$ нм, $L_{Au} = 140$ нм, а серебряная наноплитка представляла собой квадрат со сторонами $D_{Ag} = L_{Ag} = 45$ нм, 60 нм, 80 нм, и 100 нм. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 3(b), 3(c) и 4(a)–4(d), положение длины волны переключения преимущественного направления рассеяния может изменяться в достаточно широких

пределах (от 400 нм до 580 нм). На рис. 4(a): при $\lambda = 380$ нм, $\sigma^+/\sigma^- = 1.9$; при $\lambda = 425$ нм, $\sigma^-/\sigma^+ = 3.6$. На рис. 4(b): при $\lambda = 410$ нм, $\sigma^+/\sigma^- = 2.2$; при $\lambda = 480$ нм, $\sigma^-/\sigma^+ = 2.6$; при $\lambda = 540$ нм, $\sigma^-/\sigma^+ = 6.3$. На рис. 4(c): при $\lambda = 430$ нм, $\sigma^+/\sigma^- = 2.4$; при $\lambda = 570$ нм, $\sigma^-/\sigma^+ = 2.0$; при $\lambda = 625$ нм, $\sigma^-/\sigma^+ = 4.0$. На рис. 4(d): при $\lambda = 470$ нм, $\sigma^+/\sigma^- = 2.0$; при $\lambda = 665$ нм, $\sigma^-/\sigma^+ = 2.4$; при $\lambda = 760$ нм, $\sigma^-/\sigma^+ = 6.1$.

Выводы. Продемонстрировано, что биметаллическая наноплитка, представляющая собой пару прямоугольных наноплиток из золота и серебра, разнонаправленно рассеивает свет в зависимости от длины волны падающего излучения. Изменение ширины и длин наноплиток позволяет гибко изменять величину длины волны, при которой преимущественное направление рассеяния света изменяется на противоположное. Продемонстрировано, что эта длина волны переключения может изменяться в достаточно широких пределах. Наиболее удобным способом управления величиной длины волны переключения является изменение спектрального положения плазмонного резонанса серебряной наноплитки путем изменения её размеров. При этом размеры золотой наноплитки должны быть подобраны так, чтобы соответствующий плазмонный резонанс всегда находился с длинноволновой стороны спектра относительно плазмонного резонанса серебряной наноплитки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-79-30086).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] N. Li, Y. Lai, S. H. Lam, et al., Adv. Optical Mater. **9**(1), 2001081 (2020). <https://doi.org/10.1002/adom.202001081>.
- [2] T. Shegai, S. Chen, V. Miljković, et al., Nat. Commun. **2**(2), 481 (2011). <https://doi.org/10.1038/ncomms1490>.
- [3] T. Shegai, P. Johansson, C. Langhammer, et al., Nano Lett. **12**(5), 2464 (2012). <https://doi.org/10.1021/nl300558h>.
- [4] X. Zhuo, H. K. Yip, X. Cui, et al., Light Sci. Appl. **8**(1), 39 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0150-1>.
- [5] A. D. Kondorskiy, K. S. Kislov, N. T. Lam, V. S. Lebedev, J. Russ. Laser. Res. **36**(2), 175 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10946-015-9491-2>.
- [6] А. В. Мекшун, С. С. Моритака, А. Д. Кондорский, В. С. Лебедев, Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(9), 34 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068335620090031>.

- [7] А. В. Мекшун, С. С. Моритака, А. Д. Кондорский, Краткие сообщения по физике ФИАН **48**(12), 3 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068335621120046>.
- [8] A. D. Kondorskiy, V. S. Lebedev, Opt. Express **27**, 11783 (2019). <https://doi.org/10.1364/OE.27.011783>.
- [9] X. Niu, X. Hu, C. Lu, et al., Nanophotonics **9**, 4609 (2020). <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0420>.

Поступила в редакцию 31 августа 2022 г.

После доработки 4 сентября 2022 г.

Принята к публикации 5 сентября 2022 г.