

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 539.216.1 535.016

СОЗДАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ АНТЕНН V-ОБРАЗНОЙ ФОРМЫ

© 2010 г. А. И. Денисюк, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: aidenisuk@gmail.com

В работе экспериментально показана возможность создания оптических антенн V-образной формы методом, основанным на осаждении углерода, управляемом сфокусированным электронным пучком. Созданные структуры состояли из пар близкорасположенных углеродных наностержней, покрытых слоем золота. Проведено теоретическое исследование электродинамики V-образных антенн методом конечных разностей во временной области. Показано, что данные структуры способны создавать сильное электромагнитное поле в области промежутка между наностержнями при падении световой волны видимого и инфракрасного диапазонов. V-образные антенны могут найти применение в качестве зондов в ближнепольной оптической микроскопии и спектроскопии.

Ключевые слова: оптическая антenna, металлические наноструктуры, поверхностный плазмонный резонанс, ближнепольные оптические зонды.

Коды OCIS: 220.4241, 240.6680.

Поступила в редакцию 05.03.2010.

Оптические антенны на основе металлических наноструктур являются новыми элементами нанооптики [1]. Подобно радиоволновой антенне, оптическая антenna способна эффективно концентрировать энергию падающего оптического излучения в субволновую область. Данное свойство оптических антенн основывается на явлении плазмонного резонанса, характерного для металлических наноструктур на оптических частотах. Оптические антенны могут найти применение в качестве зондов (антенн-зондов) в ближнепольной оптической микроскопии и спектроскопии для исследования одиночных биомолекул (нуклеиновые кислоты, протеины и другие) [2]. Предполагается также использование оптических антенн в качестве элементов будущих нанофотонных цепей [3].

К настоящему времени экспериментально создан целый ряд прототипов оптических антенн-зондов: стержни [4], антенны-бабочки [5], гибридные структуры [6]. Многие структуры, потенциально способные функционировать в качестве антенн-зондов, предложены и исследованы теоретически [7]. В частности, одной из

таких структур является V-образная оптическая антenna, состоящая из двух металлических стержней, расположенных в форме буквы "V" [8].

Для создания оптических антенн применяются методы ионно-лучевой фрезеровки в комбинации с осаждением из газовой фазы под управлением электронного пучка. Данные методы требуют наличия сложного и дорогостоящего оборудования, что затрудняет экспериментальные исследования оптических антенн. В то же время сравнительно доступный метод осаждения углерода, управляемого сфокусированным электронным пучком, позволяет создавать углеродные наноструктуры практически в любых электронно-лучевых микроскопах [9]. Процесс осаждения углерода основан на том, что в месте взаимодействия электронного луча с образцом происходит генерация вторичных электронов, которые, обладая малыми энергиями, разрывают химические связи в молекулах углеводорода и других углеродных соединений, присутствующих в вакуумной камере. С помощью данного метода традиционно получают

лишь одиночные стержнеобразные углеродные структуры, вырастающие вдоль электронного пучка [10]. В данной работе исследуется возможность применения метода осаждения углерода, управляемого сфокусированным электронным пучком, и последующей металлизации структуры для создания оптических антенн сложной формы, в частности V-образных антенн. Теоретическое исследование электродинамики V-образных антенн проведено с помощью метода конечных разностей во временной области.

Экспериментальные образцы V-образных антенн получены в сканирующем электронном микроскопе Quanta Inspect (фирмы "FEI", США). При давлении в вакуумной камере микроскопа 10^{-3} Па реализован метод осаждения углерода под действием электронного пучка. В частности применялась конфигурация выращивания углеродных наноструктур перпендикулярно падению электронного пучка [11].

В качестве основы для создания антенн использовались вольфрамовые стержни, заостренные с помощью электрохимического травления до радиуса скругления острия менее 0,5 мкм. Для создания углеродных наноструктур вольфрамовый стержень был расположен перпендикулярно оси падения электронного пучка. При сканировании электронным лучом с ускоряющим напряжением 30 кВ (ток 1 пА) области шириной 18 нм и длиной порядка 100 нм на границе острия вольфрамового стержня выросла углеродная "лопатка" (рис. 1а). Затем вольфрамовый стержень вместе с выращенной "лопаткой" поворачивался вокруг своей оси на угол 90° с тем, чтобы электронный луч падал

перпендикулярно плоскости "лопатки". В этой конфигурации на конце "лопатки" под действием электронного луча выращивалась пара близкорасположенных углеродных наностержней в форме буквы "V" с углом раскрытия 90° (рис. 1б). Стержни выращивались последовательно путем одиночного сканирования сфокусированным электронным лучом (с теми же параметрами) области шириной 18 нм. Длина области сканирования выбиралась исходя из требуемой длины выращиваемых стержней. Скорость роста наностержней в длину, определяемая скоростью вертикальной развертки электронного пучка, составляла 70 нм/с. Электронные изображения экспериментально полученных углеродных наноструктур представлены на рис. 2а, 2б.

Для металлизации созданные углеродные наноструктуры были покрыты слоем золота толщиной 10 нм (по показаниям датчика на основе кварцевых микровесов) в вакуумной установке катодного распыления SPI 12151EQ-AX. Получены три экспериментальных образца V-образных антенн, которые различаются длиной образующих их стержней (от 120 до 160 нм) и шириной промежутка между стержнями (от 10 до 20 нм). Электронные изображения созданных антенн представлены на рис. 2а, 2б.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что металлизированные наноструктуры сложной формы могут быть созданы с помощью осаждения углерода под управлением сфокусированного электронного пучка и последующего напыления металлического слоя. Точность создания углеродного стержня существенно различается в зависимости от направления. В плоскости, перпендикулярной электронному пучку, длина и толщина стержня определяются в основном размерами области сканирования и точность составляет порядка 10 нм (рис. 2а, 2б). Однако толщина стержня вдоль пучка является менее контролируемым параметром (рис. 2в), который тем не менее зависит от дозы электронного пучка. В данном случае доза определялась скоростью вертикальной развертки электронного луча. При увеличении скорости сканирования до 70 нм/с толщина углеродного стержня уменьшалась до 50 нм. Однако при большей скорости сканирования углеродный стержень не вырастал, что может быть объяснено недостаточным образованием углерода для условия роста стержня.

Как следует из электронных изображений рис. 2а, 2б, осажденный слой золота покрыл

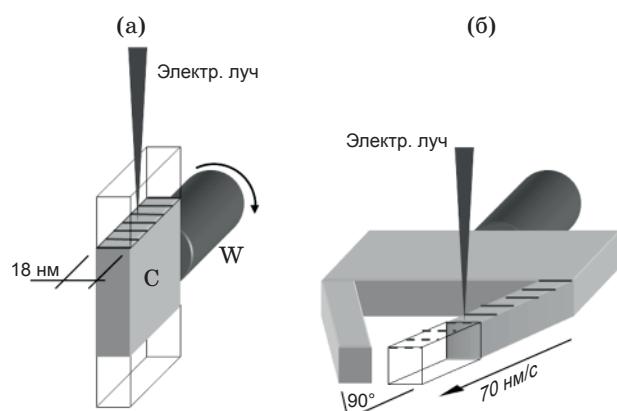


Рис. 1. Схематическая иллюстрация последовательности создания V-образной антенны. а – выращивание углеродной "лопатки", б – выращивание углеродных наностержней, образующих V-образную антенну. Пояснения в тексте.

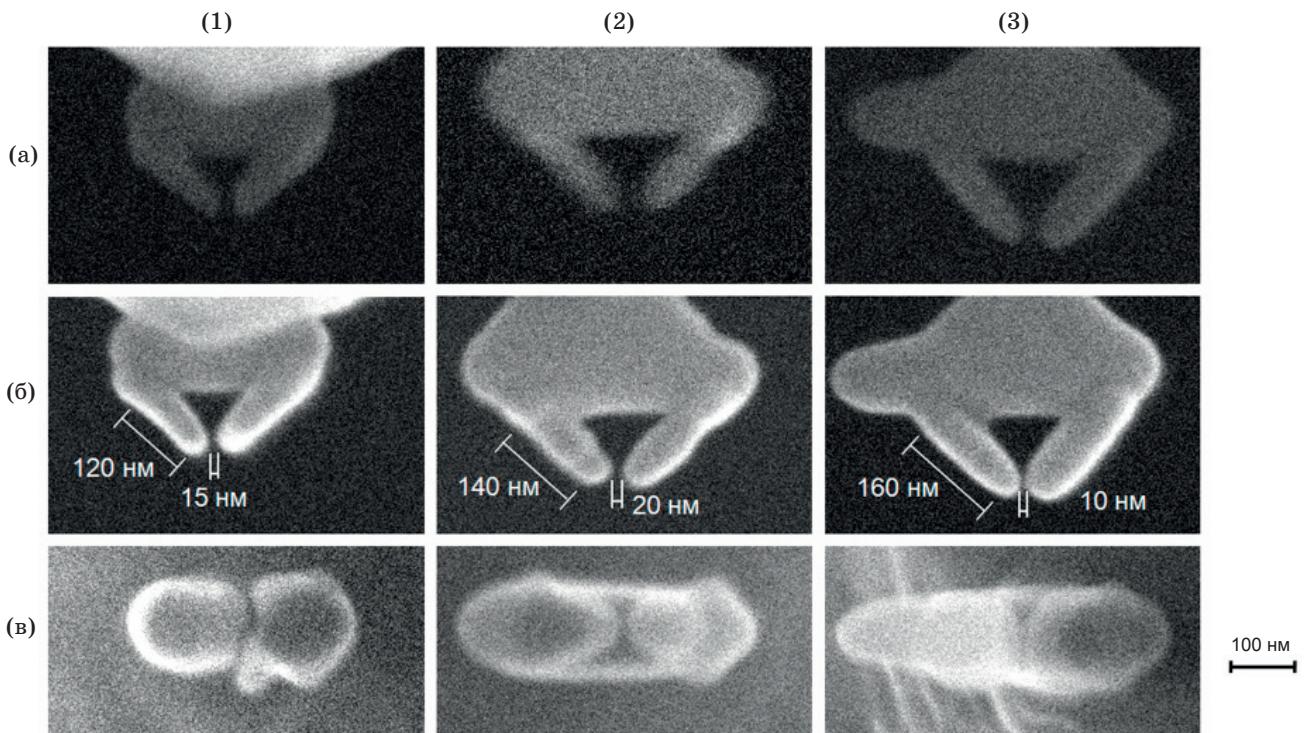


Рис. 2. Образцы созданных V-образных антенн. а – углеродные структуры, полученные с помощью сфокусированного электронного пучка, б – те же структуры после напыления слоя золота толщиной 10 нм, в – структуры после напыления золота (вид сверху).

углеродные структуры равномерным слоем со всех сторон: контуры структур после напыления повторяют контуры до напыления. Следует отметить, что толщина осажденного слоя золота 10 нм практически эквивалентна толщине скин-слоя золота в красном и инфракрасном диапазонах. Таким образом, для падающего света углеродный стержень, покрытый слоем золота такой толщины, практически идентичен полностью золотому стержню.

Наконец, наиболее важным вопросом является способность созданных V-образных структур функционировать в качестве оптических антенн. Как показано в теоретической работе [8], V-образная оптическая антenna, состоящая из двух металлических стержней, расположенных в форме буквы “V”, при падении световой волны создает сильное электромагнитное поле в области промежутка между стержнями. В данной структуре возможно возбуждение не только дипольного, но и квадрупольного резонанса.

Теоретическое исследование электродинамики V-образных антенн с углеродной сердцевиной и золотой оболочкой проведено методом конечных разностей во временной области.

Численное моделирование выполнено в программе EM Explorer. Геометрические параметры V-образных антенн, используемые при моделировании, определены по электронным изображениям экспериментально созданных nanoструктур. При моделировании исследовалось распределение амплитуды электрического поля E_x при падении на структуру линейно поляризованной световой волны (вектор электрического поля колеблется вдоль оси x с амплитудой $E_{x0} = 1$, волна распространяется вдоль оси z). Результаты моделирования (рис. 3а, 3б) показали, что V-образные антенные обладают двумя плазмонными резонансами – дипольным (рис. 3а) и квадрупольным (рис. 3б). При резонансе V-образные антенные создают сильное электромагнитное поле в области промежутка между стержнями. При увеличении длины стержней, образующих антенну, с 120 до 160 нм дипольная (квадрупольная) резонансная длина волны смещается в длинноволновую область – с 0,9 (0,58) до 1,15 (0,67) мкм. При уменьшении промежутка между стержнями с 20 до 10 нм происходит увеличение коэффициента усиления электрического поля (E_x/E_{x0}) от 12,5 до 25.

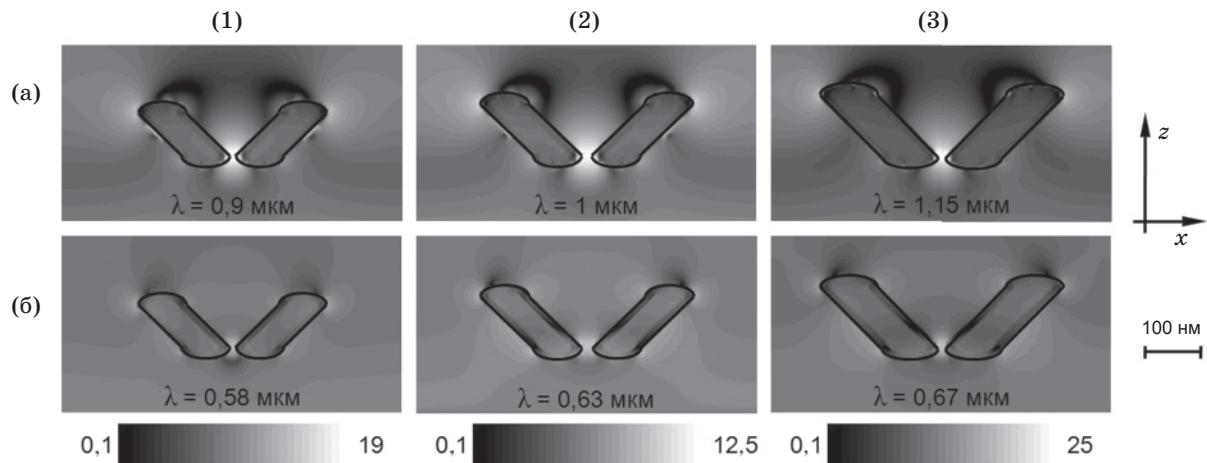


Рис. 3. Результаты численного моделирования распределения амплитуды электрического поля (E_x) при падении на V-образную антенну линейно поляризованной световой волны (логарифмический масштаб). а – дипольный резонанс, б – квадрупольный. Размеры моделируемых антенн соответствуют размерам экспериментально полученных структур. Значения длина стержня/ширина промежутка между стержнями: 120/15 – (1), 140/20 – (2), 160/10 – (3).

В то время как смещение резонанса в длинноволновую область при увеличении длины стержней, образующих V-образную антенну, – известное явление [8], эффект увеличения коэффициента усиления поля в промежутке между стержнями с уменьшением ширины промежутка нуждается в пояснении. Данное явление может быть объяснено взаимным притяжением электрических зарядов на противоположных концах стержней в промежутке. Это согласуется с аналогичным явлением, известным для оптической дипольной антенны, состоящей из близкорасположенных металлических наностержней с осевой симметрией [12].

В заключение необходимо отметить, что в данной работе представлен сравнительно доступный метод создания оптических антенн V-образной формы с помощью осаждения углерода под действием сфокусированного электронного пучка и последующего напыления слоя золота. Теоретическое исследование электродинамики V-образных антенн на основе углеродных наноструктур, покрытых слоем золота, показало, что данные структуры способны функционировать как оптические антенны. V-образные антенны могут найти применение в качестве зондов в ближнепольной оптической микроскопии и спектроскопии. Метод осаждения углерода под действием сфокусированного электронного пучка и последующая металлизация также могут быть использованы для создания

других металлических наноструктур в лабораторных условиях.

Работа выполнена в рамках реализации и при финансовой поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы (ГК № П1210 от 27.08.2009).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bharadwaj P., Deutsch B., Novotny L. Optical Antennas // *Adv. Opt. Photon.* 2009. V. 1. P. 438–483.
2. Brongersma M.L. Engineering optical nanoantennas // *Nature Photon.* 2008. V. 2. № 5. P. 270–272.
3. Zia R., Schuller J.A., Chandran A., Brongersma M.L. Plasmonics – the wave of chip-scale device technologies // *Materials Today*. 2006. V. 9. № 7–8. P. 20–27.
4. Taminiau T.H., Stefan F.D., Segerink F.B., Van Hulst N.F. Optical antennas direct single-molecule emission // *Nature Photon.* 2008. V. 2. № 4. P. 234–237.
5. Farahani J.N., Eisler H.J., Pohl D.W., Pavius M., Fluckiger P., Gasser P., Hecht B. Bow-tie optical antenna probes for single-emitter scanning near-field optical microscopy // *Nanotechnology*. 2007. V. 18. № 12. P. 125506.
6. De Angelis F., Patrini M., Das G., Maksymov I., Galli M., Businaro L., Andreani L.C., Di Fabrizio E. A hybrid plasmonic–photonic nanodevice for label-free detection of a few molecules // *Nano Lett.* 2008. V. 8. № 8. P. 2321–2327.

7. *Kappeler R., Erni D., Xudong C., Novotny L.* Field Computations of Optical Antennas// *J. Comput. Theor. Nanosci.* 2007. V. 4. № 3. P. 686–691.
8. *Zhang J., Yang J., Wu X., Gong Q.* Electric field enhancing properties of the V-shaped optical resonant antennas // *Opt. Express.* 2007. V. 15. № 25. P. 16852–16859.
9. *Van Dorp W.F., Hagen C.W.* A critical literature review of focused electron beam induced deposition // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 104. № 8. P. 081301.
10. *Wendel M., Lorenz H., Kotthaus J.P.* Sharpened electron beam deposited tips for high resolution atomic force microscope lithography and imaging // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 67. № 25. P. 3732–3734.
11. *Голубок А.О., Ковров А.В., Левичев В.В., Мухин И.С., Приходько О.А.* Формирование одиночных нановискеров на вершинах зондов сканирующего зондового микроскопа // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.* 2009. № 4(62). С. 82–87.
12. *Aizpurua J., Bryant G.W., Richter L.J., García de Abajo F.J.* Optical properties of coupled metallic nanorods for field-enhanced spectroscopy // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71. № 23. P. 235420.
-