

07:08

Экспериментальное и теоретическое исследование массивов наностержней ZnO, покрытых пленкой серебра, как антенн оптического и ближнего ИК-диапазона

© *Е.М. Кайдашев, Н.В. Лянгузов, А.М. Лерер, Е.А. Распопова*

Южный федеральный университет, НИИ механики и прикладной математики, Ростов-на-Дону

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

E-mail: lerer@sfedu.ru

В окончательной редакции 3 декабря 2013 г.

Предложена новая конструкция оптической антенны — наностержень ZnO, покрытый тонкой металлической пленкой. Методами карботермического синтеза и магнетронного напыления получены решетки высокоориентированных перпендикулярно подложке наностержней оксида цинка, покрытых тонкой пленкой серебра. Решены задачи дифракции электромагнитных волн на одиночном металлодиэлектрическом нановибраторе, расположенном на границе раздела диэлектриков и на двумерно-периодической решетке нановибраторов. Проведено сравнение расчетов электродинамических характеристик оптических наноантенн различной длины с экспериментально полученными.

Оптические антенны (ОА) субмикронной (нано) размерности используются для повышения эффективности передачи энергии возбуждающего электромагнитного поля к полю локальному, и обратно. Это свойство ОА может быть использовано для повышения эффективности фотофизических процессов в светочувствительных структурах [1–5], определения структуры ДНК и обнаружения отдельных молекул [6,7]. В задачах микроскопии оптические антенны заменяют традиционные фокусирующие линзы или объективы, позволяя концентрировать излучение в размерах меньших, чем дифракционный предел [8]. Свойства ОА не аналогичны свойствам антенн радиодиапазона, имеющих большие линейные размеры, поскольку физическая основа происходящих в них процессов различна. Отсюда следует невозможность принципа масшта-

Таблица 1. Морфологические параметры синтезированных массивов стержней ZnO

№ образца	Средние параметры стержней		Плотность поверхностного распределения ρ , 10^8 cm^{-2}
	длина L , μm	диаметр d , nm	
1	0.7	170	4.7
2	1.8	130	5.6

бируемости при их физическом описании. Иной способ физического описания при переходе к субмикронным (нано) размерам обусловлен преобладанием свойств плазмы твердого тела над свойствами металлической проводимости ввиду наличия чувствительного к возбуждению на длинах волн оптического ИК-диапазона газа свободных электронов. Дополнительные отличия вызваны также отличием способов возбуждения ОА. В качестве ОА используются углеродные нанотрубки [9], металлические и металлодиэлектрические вибраторы и сферы [10–14].

Целью работы являются экспериментальное и теоретическое исследование предложенной нами оптической антенны на основе решетки высокоориентированных перпендикулярно подложке наностержней оксида цинка, покрытых тонкой пленкой серебра.

Массивы наностержней ZnO были получены методом карботермического синтеза на подложках плавленого кварца размером $5 \times 10 \text{ mm}$ с подслоем ZnO толщиной $\sim 200 \text{ nm}$, нанесенным методом импульсного лазерного напыления. Самоорганизованный рост наностержней ZnO без использования катализаторов проходил в вакуумируемой кварцевой трубе с внутренним диаметром 30 mm , помещенной в горизонтальную резистивную печь. Давление буферного газа (аргона) равнялось 50 Torr . Температура подложек при синтезе составляла $\sim 930^\circ\text{C}$, температура прекурсора — 950° , время нагрева — 35 min , а время выдержки рабочей температуры — 10 min . Так, были получены 2 экспериментальных образца массивов вертикально ориентированных относительно подложки стержней ZnO. Характерные морфологические параметры для них приведены в табл. 1. Далее методом магнетронного распыления в геометрии снизу вверх массивы стержней были покрыты слоем серебра

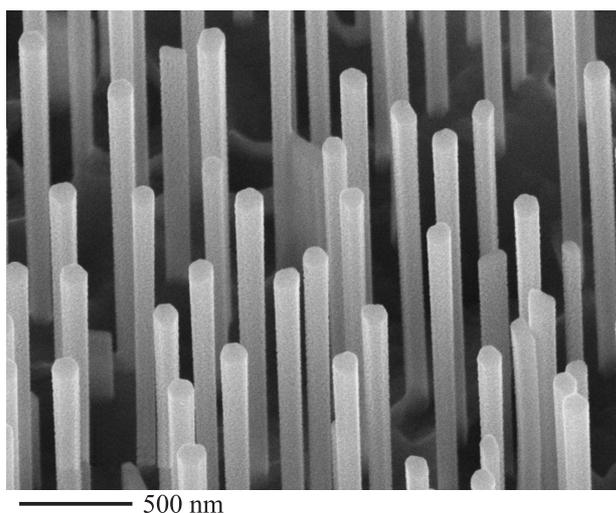


Рис. 1. SEM-микрофотография массива стержней ZnO средней длиной $1.8 \mu\text{m}$, покрытого слоем серебра толщиной 20 nm . Изображение выполнено под углом 30° к нормали.

толщиной 20 nm . Ток разряда составлял 100 mA при напряжении 300 V . Подложки с массивами стержней располагались под углом 15° относительно горизонтали на вращаемом держателе. Так было достигнуто однородное запыление стержней серебром по всей длине. На рис. 1 представлена характерная микрофотография одного из полученных образцов. Спектры оптической плотности — экстинкции ($D = -\ln(I/I_0)$) регистрировались на спектрофотометре УФ видимого ИК-диапазона Varian в интервале длин волн $0.2\text{--}3 \mu\text{m}$ в режиме вычитания оптической плотности подложки.

Теоретически исследована дифракция произвольно поляризованной электромагнитной волны на 2 видах нанокристаллов с металлической пленкой, расположенных на подложке из SiO_2 с подслоем из ZnO — одиночный нанокристалл и регулярная двухпериодическая решетка нанокристаллов. Сделано еще упрощение — полагалось, что нанокристаллы цилиндрические. Кроме того, не учитывалась дисперсия показателя преломления ZnO ($n = 1.95$). Для моделирования одиночного

нанокристалла использован метод, описанный в [15,16]. По сравнению с этими работами, в настоящей введена и использована функция Грина для многослойной среды.

Для теоретического исследования двумерной решетки нановибраторов (НВ) использовано решение объемного интегро-дифференциального уравнения (ОИДУ) для диэлектрических структур, описанное в работах [17,18]. Неизвестными в ОИДУ являются декартовы компоненты напряженности электрического поля $E_r(x, y, z)$ внутри диэлектрической неоднородности. ОИДУ имеют ряд преимуществ: они более простые, неоднородность и нелинейность диэлектрика не усложняет существенно решение, в результате решения непосредственно находится электрическое поле в диэлектрике.

В спектре экстинкции массива стержней средней длиной $0.7 \mu\text{m}$ после нанесения слоя Ag появляется до 5 дополнительных максимумов, отсутствующих в спектре экстинкции непокрытого массива, в спектральном диапазоне $400\text{--}2600 \text{ nm}$ (рис. 2, *a*). Эти спектральные особенности мы относим к плазмонным резонансам массива НВ. При этом уровень оптической плотности снижается приблизительно втрое. Спектр экстинкции массива стержней средней длиной $1.8 \mu\text{m}$ после нанесения слоя Ag приобретает до четырех дополнительных максимумов плазмонных резонансов массива НВ в вышеуказанном спектральном диапазоне, а уровень оптической плотности снижается приблизительно вчетверо (рис. 2, *b*). Максимумы для массива более длинных стержней намного более размытые и менее интенсивные, нежели для массива более коротких стержней.

На рис. 3 приведены результаты расчета коэффициента экстинкции для решетки при различных расстояниях между наностержнями s . При расчете учитывались, естественно, как отражение волны от решетки, так и потери в металле. Комплексный показатель преломления Ag взят из [19]. Вид кривых зависит от периода решетки, но резонансные длины волн, за исключением коротковолновой части, в основном меняются слабо и хорошо соответствуют наблюдаемым в эксперименте (табл. 2). На теоретических характеристиках для решетки НВ и при эксперименте для НВ длиной $0.7 \mu\text{m}$ число резонансов больше, чем число резонансов одиночного НВ. Некоторые резонансные длины решетки НВ близки к резонансам одиночного НВ [15,16]. Эти резонансы можно трактовать как резонансы самих НВ, т. е. резонансы волн, бегущих по НВ, другие — как резонансы волн, бегущих вдоль решетки перпендикулярно НВ. Для

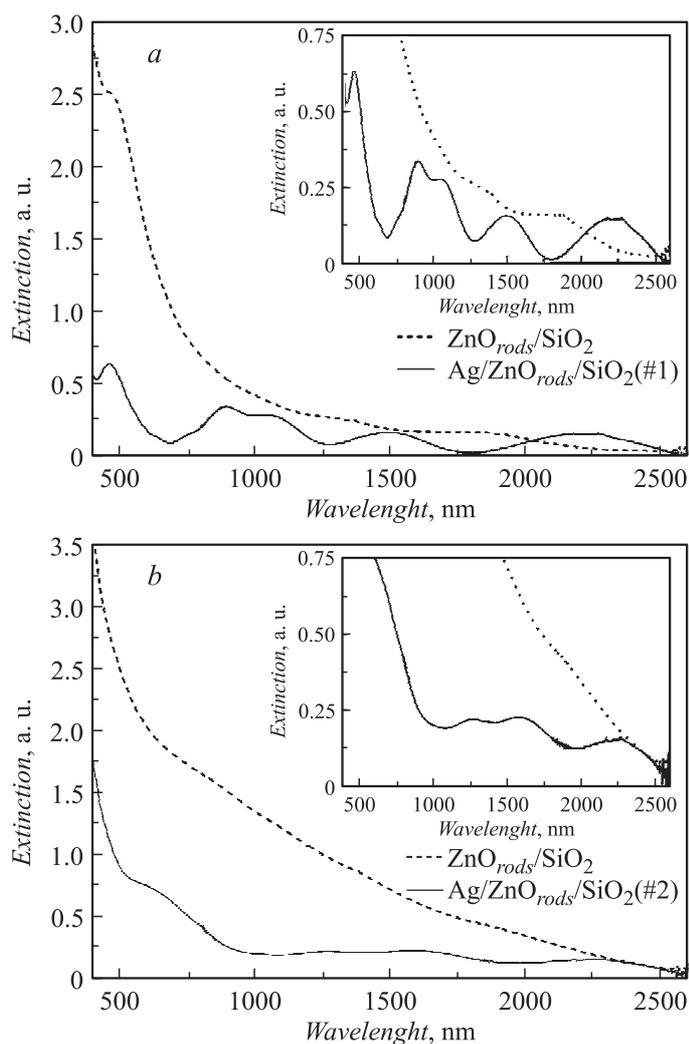


Рис. 2. Экспериментальные спектры экстинкции массивов стержней ZnO средней длиной $0.7\ \mu\text{m}$, образец #1 (a) и $1.8\ \mu\text{m}$, образец #2 (b) до и после нанесения слоя Ag. На вставках — экспериментальные кривые в большем масштабе.

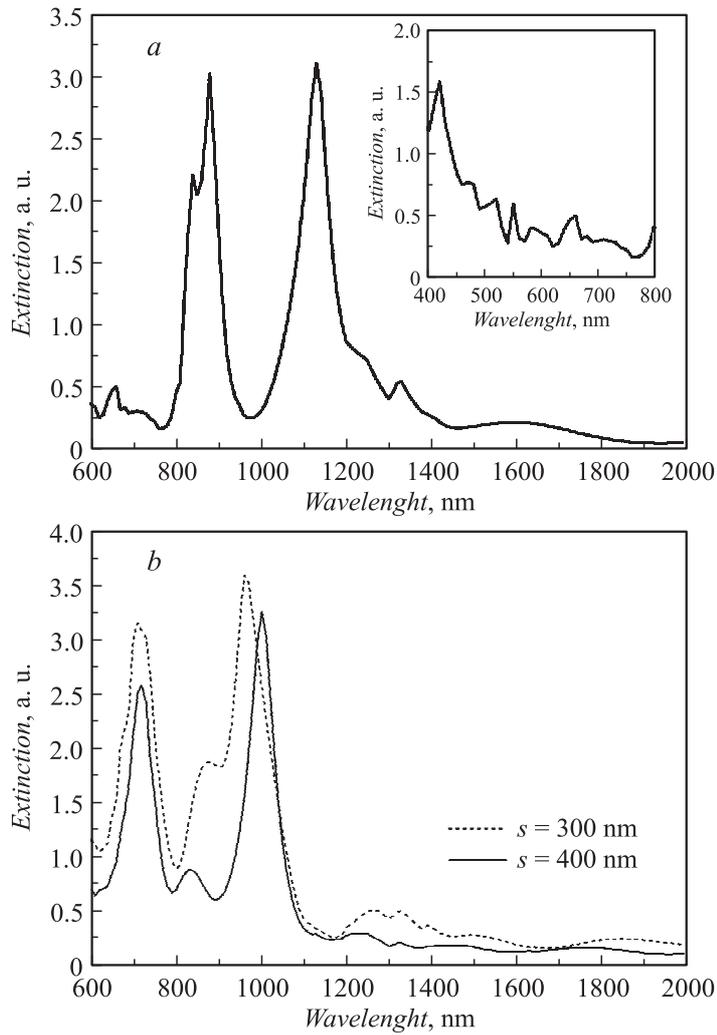


Рис. 3. Теоретические зависимости от длины волны оптической плотности массива нановибраторов длиной $0.7 \mu\text{m}$ (a) и $1.8 \mu\text{m}$ (b).

Таблица 2. Сравнение спектральных положений максимумов в теоретических и экспериментальных спектрах экстинкции

Длина волны	Спектральное положение максимума, nm		
	эксперимент	решетка НВ	одиночный НВ
$L = 0.7 \mu\text{m}$	500	550	–
	–	650	620
	890	900	880
	1060	1120	1100
	–	1340	1370
	1500	1600	–
$L = 1.8 \mu\text{m}$	640	–	620
	–	700	720
	–	820	800
	–	1000	1000
	–	–	1100
	1250	1250	1250
	1600	1720	1750

одиночного НВ и решетки НВ резонансные длины волн продольных резонансов отличаются из-за взаимодействия между НВ. Кроме того, электродинамическая модель для НВ менее строгая, чем для решетки. В коротковолновой области большое количество высокочастотных резонансов. Количество резонансов у длинного стержня больше, чем у короткого стержня, что справедливо для всех вибраторов, в том числе радиодиапазона. В эксперименте данная особенность не наблюдается. Это может быть обусловлено наложением близких резонансов из-за статистического распределения синтезированных стержней по длинам, диаметрам и форме сечения.

Таким образом, предложен новый тип ОА — массив наностержней ZnO, покрытых тонкой металлической пленкой. Экспериментально обнаружены максимумы в кривых коэффициента экстинкции. Установлено, что эти максимумы определяются плазмонными резонансами ОА.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки, тема № 2.5896 „Развитие методов получения и исследования свойств полупроводниковых наноструктур для создания элементов устройств нанофотоники“.

Список литературы

- [1] *Osgood R.* et al. // Proc. SPIE. 2009. V. 7394. P. 1L1.
- [2] *Minar V.* // Nanotechnology. 2013. V. 24. P. 042001.
- [3] *Mikovsky N.M.* et al. // Nanotechnology. 2012. ID 512379. P. 1.
- [4] *Lyvers D.P., Moon J.M., Kildishev A.V., Shalaev V.M.* // ACS NANO. 2008. V. 2. N 12. P. 2569.
- [5] *Imafidon O., Georgakopoulos S., Vabbina Ph.K., Pala N.* // Proc. SPIE. 2010. V. 5. P. 7679.
- [6] *Solomon L., Gillot F., Zayats A.V., Fornel F.* // Phys. Rev. Lett. V. 86. P. 1110.
- [7] *Garcia-Vidal F.J.* et al. // J. Lightwave Technology. 1999. V. 17. P. 2191.
- [8] *Климов В.В.* Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009. 480 с.
- [9] *Garcia-Vidal F.J., Martin-Moreno L., Pendry J.B.* // J. Optics. A. 2005. V. 7. P. S97.
- [10] *Martin-Moreno L.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 1114.
- [11] *Harries M.L., Summers H.D.* // IEEE Photonics Technology Lett. 2006. V. 18. P. 2197.
- [12] *Zhmakin A.I.* // Phys. Reports. 2011. V. 498. P. 189.
- [13] *Dintinger J.* et al. // Adv. Materials. 2006. V. 18. P. 1645.
- [14] *Padilla W.J.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 107401.
- [15] *Головачева Е.В., Лерер А.М., Пархоменко Н.Г.* // Вестник МУ. 2011. Сер. 3. № 1. С. 6.
- [16] *Головачева Е.В., Лерер А.М., Махно П.В., Синявский Г.П.* // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. № 5. С. 9.
- [17] *Лерер А.М.* // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 11. С. 1160.
- [18] *Лерер А.М., Цветянский Е.А.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 21. С. 77.
- [19] <http://www.luxprop.com>