

*Лерер А.М., Тимошенко П.Е., Головачева Е.В.,  
Кайдашев Е.М., Пузанов А.С.  
Южный федеральный университет*

## **Оптические наноантенны на новых плазмонных материалах на основе оксида цинка**

*Решена задача методом разделения переменных в цилиндрической системе координат о распространении электромагнитных волн в двумерно-периодической решетке нановолноводов, состоящих из новых плазмонных материалов на основе ZnO. Изучены характеристики двумерно-периодических структур, образованных бесконечно длинными слоистыми цилиндрами на основе ZnO. Выполнено сравнение результатов расчетов с результатами конечноэлементного моделирования.*

**Ключевые слова:** Оптические наноантенны, ZnO наностержни, фотонно-кристаллические структуры, дифракция, конечноэлементное моделирование.

На границе раздела «плазма – диэлектрик» возможно распространение поверхностной ТМ-волны (поверхностного плазмон-поляритона) с большим коэффициентом замедления. В частности, в оптическом диапазоне такая волна может распространяться на границе «металл – диэлектрик». Это явление открывает возможность создания плазмонных наноантенн, проводящих световые сигналы в объемах меньше дифракционного предела, что позволяет значительно уменьшить размеры и увеличить эффективность оптических интегральных схем. Основным недостатком плазмонных волноводов — большие потери, обусловленные поглощением в металле. Однако металлические нановолноводы обеспечивают большой коэффициент замедления при длинах волн, меньших одного микрона. Поэтому для разработчиков нанофотонных устройств является актуальным расширение рабочего диапазона плазмонных волноводов и достижение оптимального баланса локализации и потерь в них. В работе [1] предложена и исследована конструкция оптической антенны, состоящей из ZnO наностержня, покрытого тонкой металлической пленкой. Однако в последнее время появились новые плазмонные материалы [2] на основе ZnO (ZO), такие как AZO, GZO и AGZO. Целью настоящей работы является теоретическое исследование свойств в оптическом и инфракрасном диапазоне нановолноводов, образованными слоями из этих материалов.

Объекты исследования — нановолноводы трех типов: полубесконечные структуры «диэлектрик – xZO-материал»; планарные нановолноводы, образованные плоскопараллельными слоями диэлектрика и xZO-материалов; планарные нановолноводы, образованные пленками xZO-материалов конечной ширины, лежащих на многослойной диэлектрической подложке; бесконечно длинные слоистые цилиндры ZnO, покрытые материалами, в которых может распространяться поверхностный плазмон-поляритон (Ag, Au, xZO). В расчетах учитывалась дисперсия диэлектрической проницаемости материалов [3] (как известно, металлы и диэлектрики в оптическом диапазоне имеют конечную комплексную диэлектрическую проницаемость).

При исследовании первого типа нановолноводов использовано аналитическое выражение [4, 5] для расчета длины волны и постоянной затухания поверхностного плазмон-поляритона. Определены диапазоны длин волн, оптимальные для

распространения поверхностного плазмон-поляритона. Результаты расчетов были использованы для исследования нановолновода второго типа.

Для второго типа нановолновода получено и численно решено дисперсионное уравнение [5], содержащее произвольное число слоев. Этот волновод является прототипом волновода третьего типа, который может быть практически реализован. Предложен и обоснован простой способ нахождения комплексной постоянной распространения волноведущих структур с малыми потерями. Исследованы свойства поверхностных волн, распространяющихся в исследуемых структурах, которые легли в основу анализа свойств нановолноводов третьего типа.

Методом Галеркина [6] получено строгое решение векторного интегро-дифференциального уравнения, описывающего распространение электромагнитных волн в нановолноводах, содержащих плазмонные пленки конечной ширины. Показана возможность распространения поверхностного плазмон-поляритона с большим коэффициентом замедления.

В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены характеристики поверхностного плазмон-поляритона, распространяющегося на границе «AZO – диэлектрик с показателем преломления  $n_{\text{sub}}$ ».

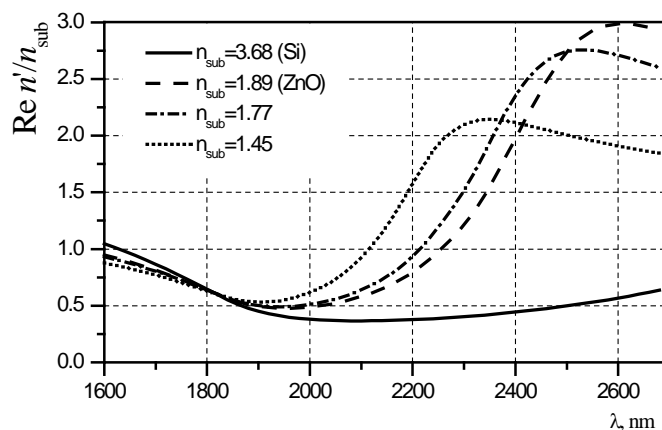


Рис. 1. Действительная часть коэффициента замедления.

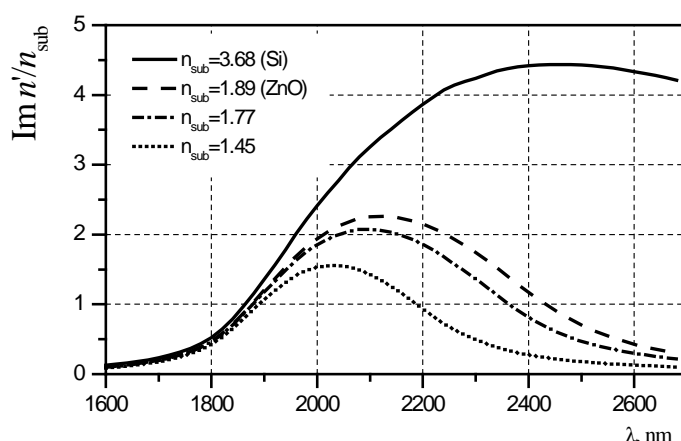


Рис. 2. Мнимая часть коэффициента замедления.

При распространении электромагнитных волн в средах с упорядоченными неоднородностями существуют зоны пропускания и запрещенные зоны в оптическом и инфракрасном диапазоне. В работе исследованы двумерные электромагнитные кристаллы,

образованные бесконечно длинными слоистыми цилиндрами оксида цинка, покрытые материалами, в которых может существовать поверхностный наноплазмон (Ag, Au, xZO).

Решение краевой задачи о распространении волн в ФЛ сведено к решению интегро-дифференциального уравнения (ИДУ) относительно напряженности поля внутри цилиндров

$$\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_{ext}} \left\{ k^2 \varepsilon_{ext} \mu + \text{grad div} \right\} \int_S v(r) \vec{E}(x', y') g(x, x', y, y') ds'$$

где  $v(r) = \varepsilon(r) - \varepsilon_{ext}$ ,  $\varepsilon(r)$  и  $\varepsilon_{ext}$  — диэлектрические проницаемости слоистого цилиндра и окружающей их среды,  $g(x, x', y, y')$  — функция Грина фотонного кристалла.

$$g(x, x', y, y') = \frac{1}{d_x d_y} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} F_{pq} \exp[i(\alpha_p \bar{x} + \beta_q \bar{y})], \quad F_{pq} = \frac{1}{\rho_{pq}^2 - k^2 \varepsilon_{ext}},$$

$$\alpha_p = \frac{2p\pi}{d_x} + k_x, \beta_q = \frac{2q\pi}{d_y} + k_y, \rho_{pq}^2 = \alpha_p^2 + \beta_q^2.$$

В цилиндрической системе координат (ЦСК) ИДУ было преобразовано и сведено к решению относительно функций  $E_{\mp} = [E_r \mp iE_{\varphi}] / 2$ , представленных в следующем виде:

$$E_{\pm}(r, \varphi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} X_m e^{im\varphi} P(r),$$

где  $P(r)$  — решение уравнения Гельмгольца в ЦСК внутри слоистого цилиндра,  $X_m$  — неизвестные коэффициенты, которые могут быть найдены из решения ИДУ методом Галеркина. В результате преобразований была получена однородная система линейных алгебраических уравнений с быстрой внутренней сходимостью.

Результаты расчетов дисперсионных характеристик фотонных кристаллов с широкой запрещенной зоной представлены на рис. 3 и 4.

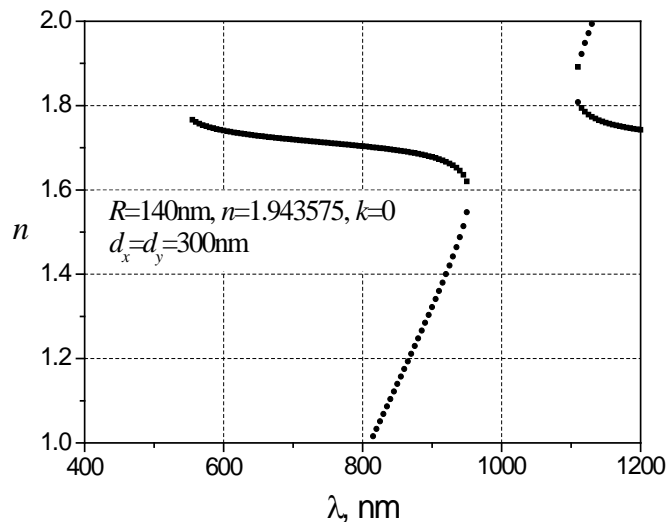


Рис. 3. Дисперсионные кривые фотонного кристалла, состоящего стержней ZnO радиусом 140 нм. без учета потерь.

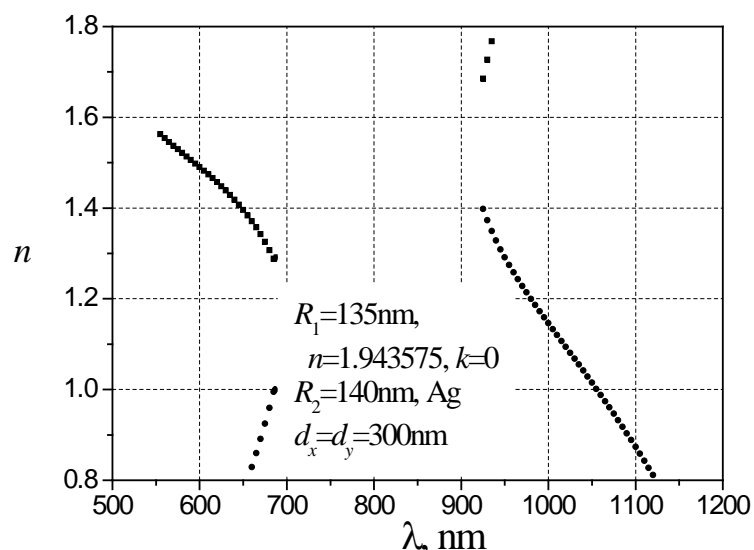


Рис. 4. Дисперсионные кривые фотонного кристалла, состоящего стержней ZnO радиусом 140 нм. без учета потерь, покрытых серебряной пленкой толщиной 5 нм.

Конечноэлементным методом получено решение в пакете COMSOL Multiphysics™ задачи распространения электромагнитных волн в нановолноводах, содержащих плазмонные пленки конечной ширины. В качестве достоинств использования этого метода для численного расчета характеристик оптических структур [7] можно выделить его консервативность, устойчивость, возможность решения задач, имеющих сложную геометрию, делая сетку более редкой в тех местах, где особая точность не требуется. Сложность дискретизации геометрии и большие затраты машинного времени являются существенным недостатком данного метода. Сравнивая полученные результаты расчетов с решением методом Галеркина, можно убедиться, что они хорошо согласуются. Дисперсионные характеристики, рассчитанные методом конечных элементов, имеют незначительные расхождения в области длин волн, близким к критической длине волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектной части внутренних грантов ЮФУ 2014 – 2016 гг. (№ 213.01.-07.2014/08ПЧВГ) и Министерства образования и науки, тема №16.219.2014/К «Развитие методов синтеза, теоретическое и экспериментальное исследование наноструктур на основе оксида цинка для создания элементов фотоприемников, оптических наномантенн, пьезо- и хемосенсоров».

#### Библиографический список

1. Кайдашев Е.М., Лянгузов Н.В., Лерер А.М., Распопова Е.А. // ПЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 7. С. 79.
2. Lina Y.C., Chena T.Y., Wanga L.C., Lien S.Y. // J. Electrochem. Soc. 2012. V. 159 No. 6 pp. H599-H604.
3. Rakic A.D., Djuricic A.B., Elazar J.M., Majewski M.L. // Appl. Opt. 1998. V. 37. PP. 5271.
4. Лерер А.М., Донец И.В., Калинин Г.А., Махно П.В. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. № 9. С. 005-013.
5. Lerer A.M., Donets I.V., Kalinchenko G.A., Mahno P.V. // Proc. ICATT-2013. 2013. PP. 184-186.
6. Лерер А.М., Тимошенко П.Е., Кайдашев Е.М., Пузанов А.С. // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2015». 2015. С. 149-153.
7. Hoffmann J., Hafner C., Leidenberger P., Hesselbarth J., Burger S. // Proc. SPIE 7390, Modeling Aspects in Optical Metrology II, 73900J (June 15, 2009).