

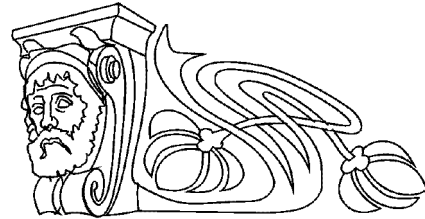


УДК 535.345.1

РАСЧЕТ ДИСПЕРСИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЯЕМЫХ МОД ЩЕЛЕВОГО ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

А. С. Пластун, А. И. Конюхов

Саратовский государственный университет
E-mail: plastun_alex@mail.ru



Рассмотрены дисперсионные характеристики щелевого фотонно-кристаллического волновода. С помощью численного моделирования на основе уравнений Максвелла для ТМ-волн построено распределение поля на выходе из волокна. Показано, что щелевые фотонно-кристаллические волокна можно использовать для управления дисперсией.

Ключевые слова: фотонный кристалл, волновод, дисперсия, численное моделирование, уравнения Максвелла.

Dispersion Characteristic Calculation of Photonic Crystal Fiber Guided Modes

S. Plastun, A. I. Konyukhov

Dispersion characteristic of photonic crystal fiber guided mode is calculated. Numerical modeling based on the Maxwell equation for magnetic components for field of the photonic crystal is obtained. It is shown, that slot photonics crystal waveguides can be used to tailor dispersion.

Key words: photonic crystal, waveguide, dispersion, numerical modeling, Maxwell equation.

Введение

Для повышения эффективности нелинейных устройств могут быть использованы оптические стекла, обладающие большой нелинейностью третьего порядка [1]. Халькогенидные стекла, состоящие в основном из тяжелых элементов S, Se, Te с добавками Ge, As, Ga, Sb и Pb, имеющие узкую запрещенную зону ($E_g < 2.5$ эВ) и слабо связанные электроны на внешних оболочках, могут обеспечивать сильную нелинейную модуляцию светового пучка [2]. Значения нелинейного показателя преломления у халькогенидных стекол могут быть больше, чем у кварцевого стекла, в 100–1200 раз и более. Разнообразие состава халькогенидных стекол является основой для разработок новых материалов и волноводных структур, обладающих заданными нелинейными и дисперсионными свойствами.

Являясь пока невостребованными в оптических телекоммуникационных сетях (рабочие окна в области 1.3–1.5 мкм) в качестве пассивной среды для передачи излучения, халькогенидные стекла представляются идеальным материалом для разработки волоконно-оптических лазеров

и усилителей, дистанционных датчиков, быстродействующих переключателей и других устройств, работающих в ИК диапазоне длин волн от 1 до 10 мкм. Для стекла с воздушными отверстиями был получен нуль дисперсии на длине волны 1.55 мкм [3].

Перечисленные выше особенности оптических свойств халькогенидных стекол определяют интерес к их исследованию в качестве материала для устройств, позволяющих управлять параметрами оптических импульсов, в частности, для компрессии импульсов, уширения их спектра в среднем ИК диапазоне длин волн. В зависимости от назначения устройства для его функционирования необходимо, чтобы дисперсия групповой скорости была близка к нулю или, наоборот, была бы достаточно большой в заданной спектральной области. Так, в работе [4] большая нормальная дисперсия групповой скорости и нелинейность стекла As_2Se_3 используются для создания линейного чирпа в 4-метровом отрезке волокна в схеме компрессии импульсов на центральной частоте 1.55 мкм. Смещение нуля дисперсии в область менее 2 мкм в микроструктурированном волокне из халькогенидного стекла As_2S_3 обеспечивает уширение спектра импульсов с пиковой мощностью 1 кВт на длине волны 2 мкм в области 3–5 мкм [5]. Существенно, что показатель преломления халькогенидных стекол значительно больше, чем у плавленого кварца ($n(SiO_2) \sim 1.46$), а длина волны λ_0 , соответствующая нулю дисперсии групповой скорости ($D = 0$), смещена в средний ИК диапазон (у плавленого кварца $\lambda_0 \sim 1.3$ мкм).

В спектральной области 1–2 мкм дисперсия групповой скорости в халькогенидных стеклах значительно больше, чем в плавленом кварце, и, являясь нормальной ($D < 0$), составляет величины порядка нескольких сотен пс/(нм км). Поэтому до последнего времени халькогенидные световоды не рассматривались как среда для передачи информации в стандартных волоконных телекоммуникационных сетях.



Для управления дисперсией групповой скорости может быть использовано структурирование стекла, а именно создание волноводных структур с однородной или периодической оболочкой. Профиль показателя преломления волноводной структуры определяет знак и величину волноводной дисперсии [6]. Для управления полной дисперсией структуры необходимо, чтобы в рассматриваемой спектральной области волноводная дисперсия была сравнима по величине с материальной. Поэтому в задачах компенсации большой материальной дисперсии халькогенидного стекла в области 1–2 мкм необходимо использовать структуры с большим контрастом профиля показателя преломления. Таковыми являются, например, фотонно-кристаллические волокна (ФКВ) с воздушным заполнением [3, 7, 8]. В работе исследуются возможности управления дисперсией групповой скорости оптических импульсов в ИК диапазоне длин волн путем создания структур с большим или малым контрастом показателя преломления из халькогенидных стекол различного состава. В модельной задаче полагаем, что показатель преломления среды меняется вдоль одной пространственной координаты. Такой режим реализуется в планарных интегрально-оптических устройствах [9].

Метод плоских волн

Рассчитаем дисперсионные характеристики направляемых мод щелевого волновода с фотонно-кристаллической оболочкой. В планарном волноводе световую волну можно представить как суперпозицию ТЕ- и ТМ-поляризованного излучения. Представим волновые уравнения для ТЕ- (1) и ТМ- (2) мод:

$$-\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{n^2} \frac{dH_y}{dx} \right) + \frac{\beta^2}{n^2} H_y = k^2 H_y \quad (1)$$

$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} + k^2 \varepsilon(x) E_y = \beta^2 E_y, \quad (2)$$

где $E_y - y$ – компонента электрического поля, $H_y - y$ – компонента магнитного поля.

Уравнения (1), (2) представляют собой в общем виде уравнения Гельмгольца. Суть метода плоских волн состоит в следующем. Для нахождения и расчета мод волновода поля H_y или E_y раскладывают в пространственный ряд Фурье. Как для ТЕ-, так и для ТМ-волн данное разложение представляет собой суперпозицию плоских волн, распространяющихся под углом к плоскости ($y-z$):

$$H_y = \sum_m h_m e^{i(s_x m)x}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{n^2} = \sum_n \kappa_n e^{i(s_x n)x},$$

$$E_y = \sum_j a_j e^{i(s_x j)x}, \quad (4)$$

$$n^2 = \sum_l \eta_l e^{i(s_x l)x},$$

где $h_m, \kappa_n, a_j, \eta_l$ – соответствующие коэффициенты разложения в ряд Фурье.

После подстановки (3), (4) в (1), (2) получаем матричное уравнение относительно неизвестных коэффициентов h_m, a_j . Решением матричного уравнения является набор ТЕ- или ТМ-мод ФКВ. Из всего набора решений можно выбрать определенную моду, распространяющуюся в структуре.

Результаты

На рис. 1 представлено поперечное распределение интенсивности ТЕ-волны, распространяющейся в области центрального дефекта щелевого фотонно-кристаллического волокна, полученное методом плоских волн.

На рис. 2 показано поперечное распределение интенсивности основной ТМ-моды щелевого фотонно-кристаллического волновода. Основной особенностью ТМ-моды является наличие скачка интенсивности на границе разделов диэлектриков. За счет данной особенности формируется центральный пик с высоким значением интенсивности. Размер скачка зависит от разности показателей преломления соседних слоев. Для демонстрации данного эффекта была выбрана структура с большим контрастом показателя преломления (показатель преломления сердцевины 1.5 (кварц), показатель преломления соседних слоев – 3.5 (кремний)). Центральный пик интенсивности формируется в нанометровом зазоре. Локальное увеличение интенсивности способствует усилению нелинейных эффектов (керровская нелинейность, многофотонное поглощение, комбинационное рассеяние, параметрическое преобразование частоты). Мода, показанная на рис. 2, формируется в основном за счет полного внутреннего отражения. Поэтому её дисперсия определяется в первую очередь дисперсией материала.

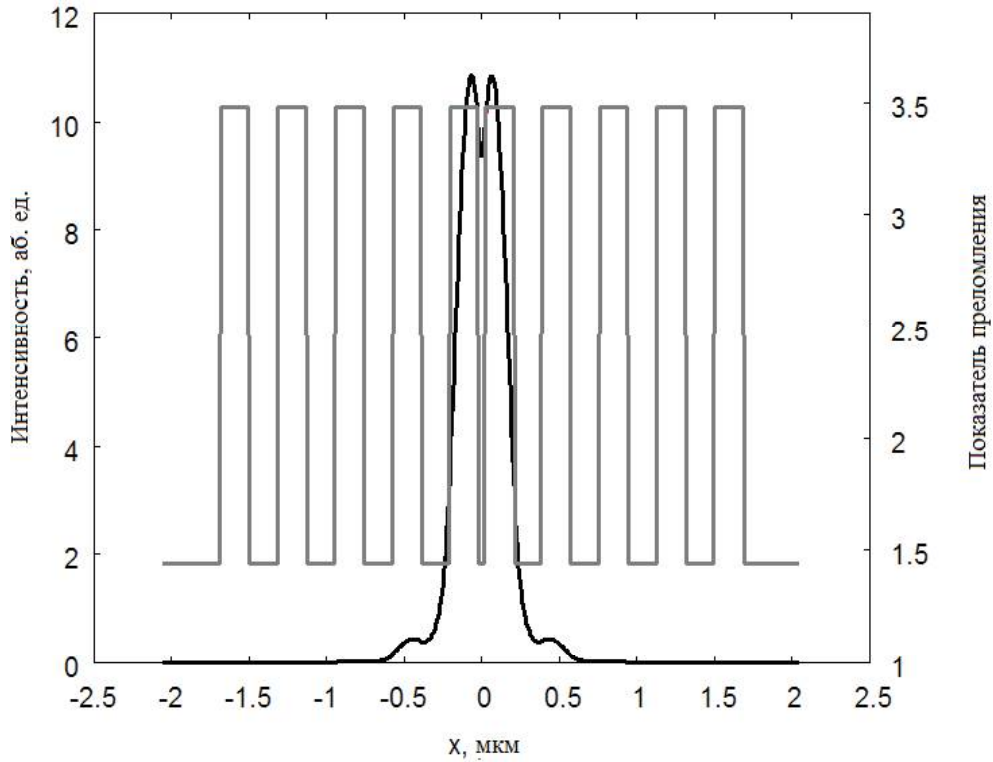


Рис. 1. Поперечное распределение напряженности электрического поля моды щелевого ФКВ и показателя преломления. Эффективный показатель преломления 3.025. Длина волны 1.5534 мкм

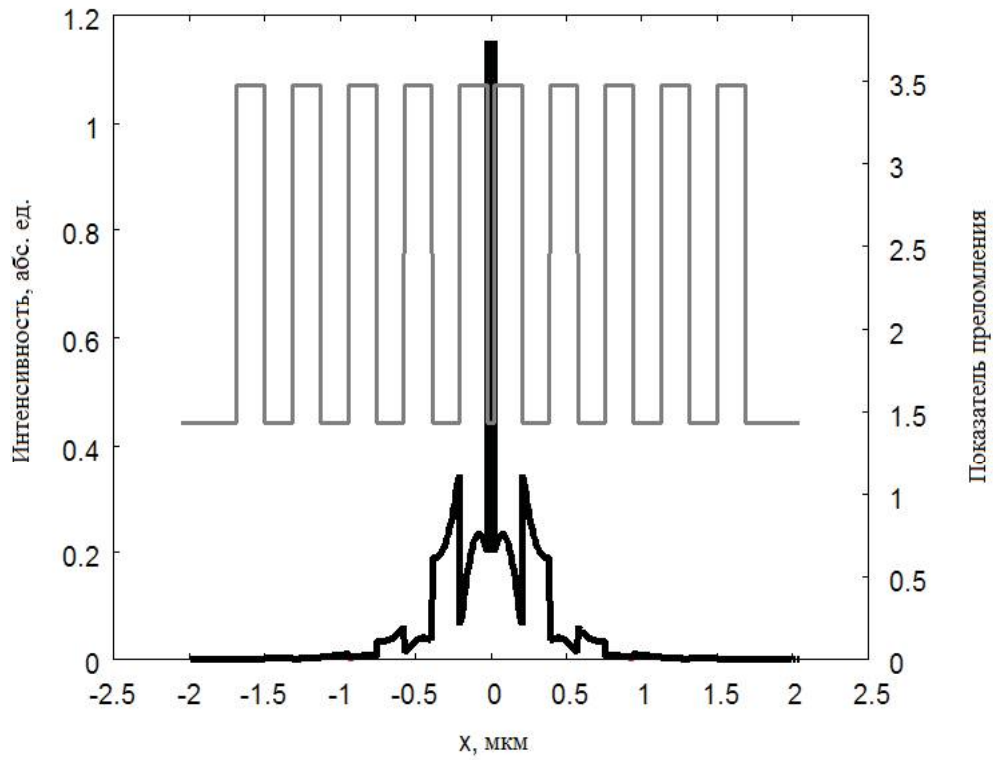


Рис. 2. Поперечное распределение напряженности электрического поля моды щелевого ФКВ и показателя преломления. Длина волны 1.5534 мкм, эффективный показатель преломления 2.3636



Фотонно-кристаллическая оболочка позволяет управлять локализацией моды, однако для компенсации дисперсии необходимо использовать моды, формирующиеся за счет брэгговского отражения.

На рис. 3, *а* представлено поперечное распределение интенсивности основной моды щелевого фотонно-кристаллического волновода, составленного из слоев халькогенидных стекол. Такая структура обладает небольшим контрастом. По

сравнению со структурой, показанной на рис. 2, разница показателей преломления соседних слоев составляет всего 0.3, однако такой величины хватает для формирования центрального пика с высоким значением интенсивности. Основной особенностью данной моды является то, что она формируется за счет брэгговского отражения. В теории фотонно-кристаллических структур необходимым условием существования такой моды является наличие фотонной запрещенной зоны.

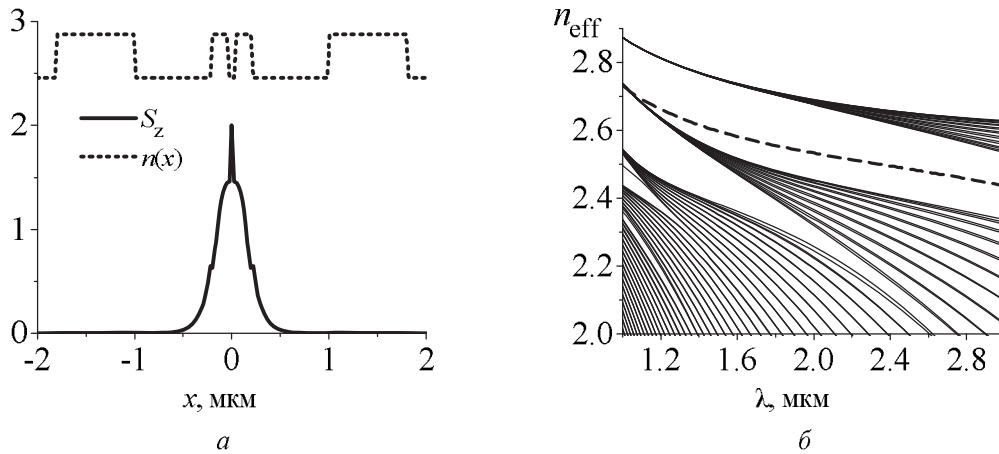


Рис. 3. Распространение ТМ-моды в дефекте: *а* – интенсивность в отн. ед. и показатель преломления структуры (пунктир); *б* – пунктиром выделена мода, распространяющаяся в дефекте

Для волноводов, изготовленных на основе халькогенидных стекол, контраст между показателями преломления меньше, как следствие – пик интенсивности меньше. Тем не менее, использование подобной составной структуры щелевого волновода с фотонно-кристаллической оболочкой позволяет повысить локальную интенсивность с одновременной компенсацией дисперсии. На рис. 3, *б* показана зависимость эффективного показателя преломления от длины волны. Область параметров, внутри которых отсутствует решение, соответствует запрещенной зоне. В пределах первой запрещенной зоны существует решение, соответствующее моде, показанной на рис. 3, *а*.

На рис. 4 показана дисперсия данной моды и халькогенидных стекол, из которых изготовлен волновод.

Ноль дисперсии основной моды находится на длине волны 2.4 мкм. Для длины волны больше 2.4 мкм дисперсия является аномальной. Халькогенидные стекла обладают большой нелинейностью, поэтому возможно формирование солитонных импульсов со сравнительно малой

энергией. Ключевым моментом для формирования солитонов является наличие аномальной дисперсии. На основании расчетов авторов статьи можно сделать вывод, что щелевой фотонно-кристаллический волновод позволяет компенсировать дисперсию халькогенидного стекла с одновременным увеличением локальной интенсивности.

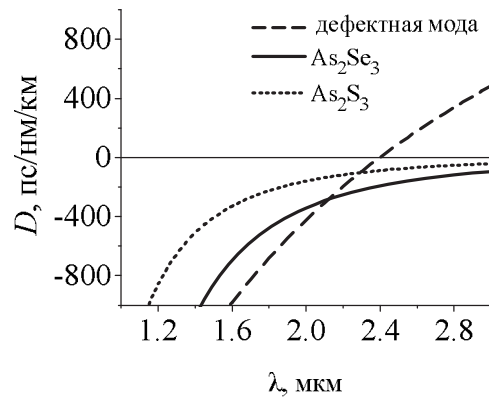


Рис. 4. Дисперсии различных материалов и дефектная мода щелевого ФКВ



Выводы

Рассчитаны характеристики мод, направляемых дефектом фотонно-кристаллической структуры. Показано, что щелевые фотонно-кристаллические волноводы могут направлять ТМ-волны, локализованные в нанометровом зазоре. Предложено использовать фотонно-кристаллическую оболочку для управления полем в щелевых волноводах. Показано, что щелевые волноводы с фотонно-кристаллической оболочкой можно использовать для локального повышения интенсивности и управления дисперсией.

Список литературы

1. Ergin T., Höner zu Siederdisen T., Giessen H., Lipitz M. Ultrafast time-resolved spectroscopy of 1D metal-dielectric photonic crystals // Phys. Rev. 2009. Vol. 79. P. 24–29.
2. Snopatin G. E., Shiryaev V. S., Plotnichenko G. E., Dianov E. M., Churbanov M. F. High-Purity Chalcogenide Glasses for Fiber Optics // Inorganic Materials. 2009. Vol. 45, № 13. P. 1439–1446.
3. Желтиков А. М., Коротеев Н. И., Магницкий С. А., Тарасишин А. В. Считывание информации с помощью однофотонной и двухфотонной люминесценции в устройствах трехмерной оптической памяти на ос-

нове фотохромных материалов // Квант. электроника. 1998. Т. 25, № 10. С. 885–889.

4. Sanghera J. S., Florea C. M., Shaw L. B. Progress of Chalcogenide Glass Fibers // J. Non-Cryst. Solids. 2008. Vol. 354. P. 462–465.
5. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 665 с.
6. Troles J., Brilland L., Smektala F., Houizot P., Desevedavy F., Coulombier Q., Traynor N., Chartier T., Nguyen T. N., Adam J. L., Renversez G. Linear and Nonlinear Characterizations of Chalcogenide Photonic Crystal Fibers // Fiber and Integrated Optics. 2009. Vol. 28. №1. P.11–18.
7. Liao M., Chaudhari Ch., Qin G., Yan X., Kito Ch., Suzuki T., Ohishi Y., Matsumoto M., Misumi T. Supercontinuum generation in a chalcogenide-tellurite composite microstructure fiber // Opt. Express. 2009. Vol. 17. P. 21608–21619.
8. Oya K., Nakazawa T., Kittaka S., Tsumetomo K., Kintaka K., Nishii J., Hirao K. Fabrication of One-Dimensional Photonic Crystal with Large Dispersion in SiO₂ Glass Substrate Using Deep Dry Etching Technique // Opt. Lett. 2005. Vol. 30. P. 192–200.
9. Kittaka S., Nara M., Nakazawa T., Asai T., Koyama T. Channel Waveguide of One-Dimensional Photonic Crystal // Diffractive Optics and Micro-Optics / ed. R. Magnusson. Vol. 75 of OSA, Trends in Optics and Photonics Series (Optical Society of America, 2002), paper DTuD1.

УДК 620.3+544-0.22.532(075.8)

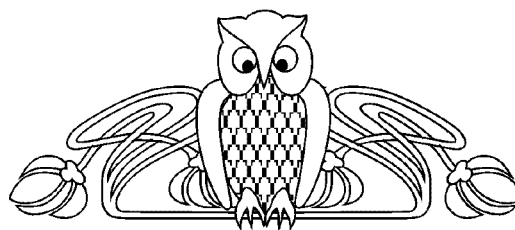
ВЛИЯНИЕ ВОДЫ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ НА НАНОСТРУКТУРЫ КРЕМНИЯ

Д. И. Биленко, О. Я. Белобровая, В. В. Галушка,
Я. Д. Карсакова, Т. Е. Мельникова, И. Б. Мысенко,
В. П. Полянская, Д. В. Терин

Саратовский государственный университет
E-mail: bil@sgu.ru

Исследуются результаты сопоставительного изучения растворимости, оптических свойств и морфологии кремниевых наночастиц и нанопористого кремния перед, в течение и после взаимодействия с дистиллированной водой и биологически активной средой на основе дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*). Обнаружена существенная зависимость влияния воды и БАС от структуры изучаемых материалов.

Ключевые слова: биологически активная среда, растворимость, кремниевые наночастицы, нанопористый кремний, дистиллированная вода, *Saccharomyces cerevisiae*.



Influence of Water and Biology Active Media on Silicon Nanostructures

D. I. Bilenko, O. Ya. Belobrovaya, V. V. Galushka,
Ya. D. Karsakova, T. E. Melnikova, I. B. Mysenko,
V. P. Polyanskay, D. V. Terin

The obtained results of comparative study of solubility, optical properties and morphology of silicon nanoparticles and nano porous Si before, during and after interaction with distilled water and the biology active medium- yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) show the significant