

Тимбаков Константин Альбертович

магистрант

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный

университет путей сообщения»

г. Хабаровск, Хабаровский край

НАНОРАЗМЕРНЫЕ КВАРЦЕВЫЕ ВОЛОКНА. ПЕРЕДАЧА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация: в данной статье даются основные понятия о кварцевых нановолокнах, их уникальные свойства, анализируется передача излучения между такими волокнами.

Ключевые слова: нановолокно, субдлинноволновый диаметр, длина волны, оптические устройства, распространение света, запредельная связь.

За последние 30 лет оптические волокна с диаметром больше длины волны света получили широкое применение в системах оптической связи, оптических измерениях. Однако успехи микро- и нанотехнологий в сфере оптоэлектроники и стекловолоконной оптики, спрос на улучшенные характеристики, рост числа приложений и степени интеграции схем направили усилия разработчиков на миниатюризацию оптических устройств и волноводов. Основной шаг к миниатюризации устройств – это уменьшение диаметра оптического волокна и волновода. Следовательно, важной мотивацией для появления нановолокон является их потенциальная пригодность для использования в будущих нанометровых фотонных устройствах [1, с. 349].

Оптические нановолокна, названные так из-за своего диаметра меньше микрометра или волокна субдлинноволнового диаметра – это оптические волокна с диаметром, близким или меньше, чем длина волны распространяемого света.

Кварцевые волокна нанометрового диаметра, изготавливаются методом утоньшения стандартных оптических волокон в процессе вытягивания, который позволяет получить нановолокна с чрезвычайно однородным диаметром, высо-

кой чистотой поверхности на атомном уровне и низкими потерями при распространении волны, чего невозможно достичь в структурах поддлинноволнового диаметра, полученных другими методами, что делает их идеальными оптическими волноводами с низким затуханием. Кроме того, такие волокна могут быть очень длинными и обладают высокой механической прочностью и эластичностью, что облегчает их монтаж и соединения. Благодаря своей компактности, оптическим и механическим свойствам, нановолокна находят применение в различных областях, включая фотонные устройства (начиная от пассивных микросоединителей и резонаторов до активных устройств, таких как лазеры), оптические датчики и нелинейную оптику.

Кварцевые нановолокна в воздушной оболочке имеют большие различия между показателями преломления сердцевины и оболочки, что создает условия для эффективного оптического ограничения. Малый диаметр нановолокна и большое отличие между показателями преломления сердцевины и оболочки создают множество интересных оптических свойств, таких как жесткая локализация оптического излучения, обширные поля затухающих колебаний, концентрированное усиление поля и большие значения волноводной дисперсии.

Из-за крошечной торцевой поверхности, фокусировка и соединение стык в стык как методы распространения света в обычном волокне не применимы к нановолокнам. Вместо этого используются коническое сжатие и запердельная связь из-за их высокой эффективности и удобства для управления светом в волокнах субдлинноволнового диаметра. Как показано на рис. 1, для нановолокон, непосредственно вытянутых из исходного волокна, коническое сжатие является простым подходом для передачи света от более крупного волокна в тонкое нановолокно. В то же время для отдельных нановолокон, запердельная связь между двумя плотно контактирующими волноводами оказалась эффективна и удобна для передачи света от стартового волокна к целевому [3, с. 6].

Распространение света в нановолокнах показано на рис. 2, а. Сначала свет подается в сердцевину одномодового волокна, которое сужено до нановолокна,

а затем это коническое нановолокно используется для запределельной связи с другим нановолокном, в которое поступает свет при параллельном совмещении обоих волокон. Благодаря силам электростатического притяжения и Ван-дер-Ваальса нановолокна притягиваются друг к другу, образуя параллельное контактное соединение. На рис. 2, б показана оптическая микрофотография установления связи между излучающим конусом диаметром 390 нм и нановолокном диаметром 450 нм [1, с. 371].

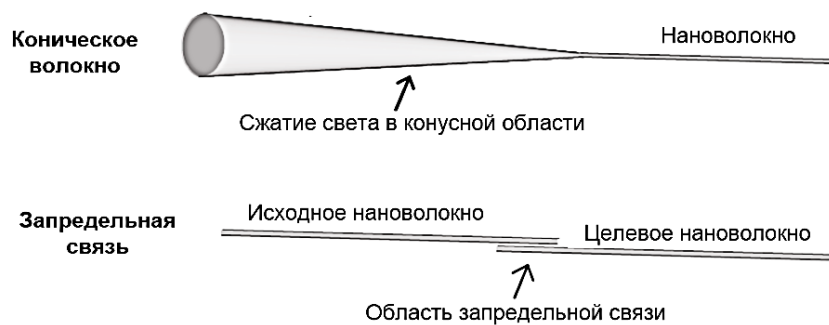


Рис. 1. Коническое волокно и запределельное соединение нановолокон

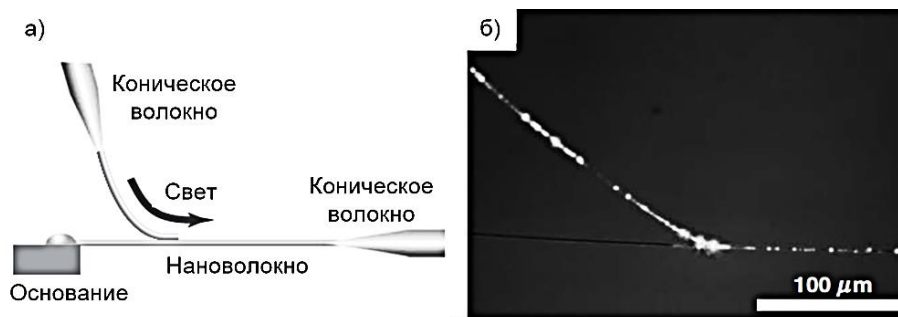


Рис. 2. Введение света внутрь кварцевого нановолокна: а – схема введения света внутрь кварцевого нановолокна с использованием запределельной связи; б – изображение на оптическом микроскопе нановолокна диаметром 390 нм, направляющего свет внутрь кварцевого нановолокна диаметром 450 нм

Для оценки коэффициента передачи оптической мощности связи (эффективности связи) между двумя параллельными нановолокнами в воздушном пространстве было проведено моделирование запределельной связи. В качестве средства моделирования выбран метод конечных разностей во временной области (FDTD), который является популярным способом численного решения задач

электромагнетизма, доказавшим свою универсальность и надёжность, оставаясь, вместе с тем, относительно простым для практической реализации [2, с. 43].

В среде FDTD были построены два кварцевых нановолокна диаметром $D = 500$ нм, в один из волноводов поступает излучение с длиной волны 633 нм (на рис. 5, 6 данный волновод расположен ниже), при этом изменяется длина их взаимного перекрытия. В данном случае была получена зависимость эффективности запредельной связи η от длины взаимного перекрытия L двух нановолокон, изменяя ее в пределах от 0 до 12,4 мкм (длина исходного нановолокна). Данная зависимость представлена на рис. 3.

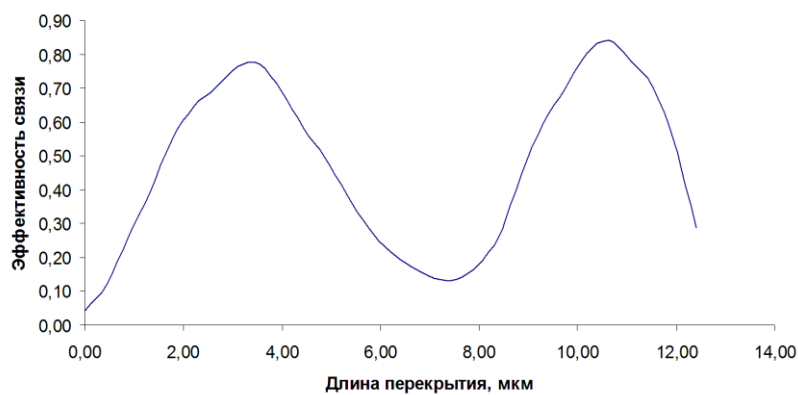


Рис. 3. Зависимость эффективности запредельной связи η двух кварцевых нановолокон диаметром 500 нм от длины их взаимного перекрытия L на длине волны излучения 633 нм

Полученная зависимость имеет квазипериодический характер. При этом максимальное значение $\eta_{\max} = 0,84$ получено при $L = 10,63$ мкм (рис. 4).

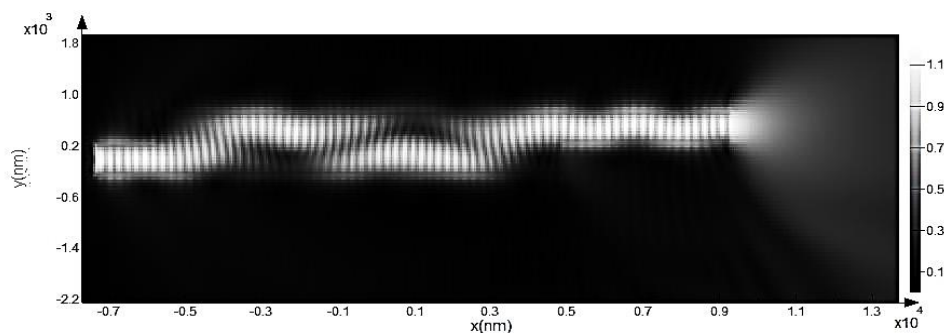


Рис. 4. Запредельная связи двух кварцевых нановолокон с $\eta_{\max} = 0,84$

Минимальное значение $\eta_{\min} = 0,04$ получено при $L = 0$ мкм (рис. 5), т. е. фактически запредельная связь малоэффективна.

По результатам моделирования были получены также максимальные значения эффективности запредельной связи двух параллельных нановолокон на длинах волн 850 нм и 1550 нм, равные соответственно 0,75 при диаметре нановолокон 700 нм, 0,75 при их диаметре 1000 нм. При этом сама зависимость эффективности связи от диаметра волокна показывает квазипериодический характер.

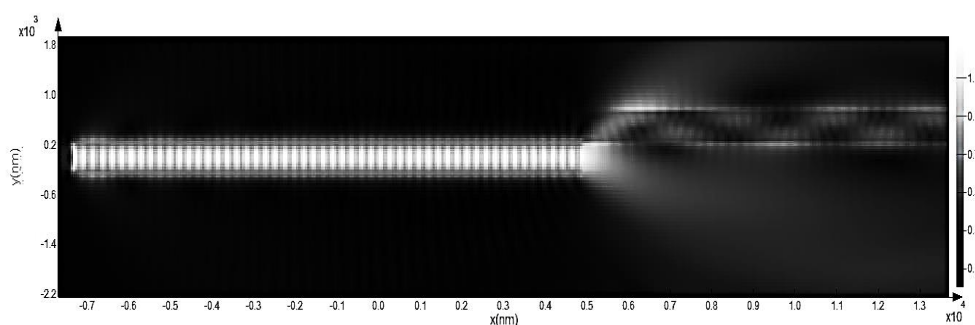


Рис. 5. Запредельная связи двух кварцевых нановолокон с $\eta_{\min} = 0,04$

Таким образом, путем подбора длины взаимного перекрытия между двумя кварцевыми нановолокнами при организации запредельной связи можно регулировать эффективность передачи оптического излучения до максимальных значений порядка 85%. Полученные результаты говорят о возможности разработки микро/наноразмерных волоконно-оптических устройств, таких как соединители, модуляторы, резонаторы, лазеры, на основе кварцевых нановолокон с диаметром порядка или менее длины волны излучения [4, с. 1429].

Список литературы

1. Мендес А. Справочник по специализированным оптическим волокнам / А. Мендес, Т.Ф. Морзе. – М.: Техносфера, 2012. – 728 с.
2. Моделирование интегральных схем нанофотоники: метод FDTD [Текст] / К.С. Ладутенко, П.А. Белов // Наносистемы: физика, химия, математика. – СПб., 2012. – Т. 3. – №5. – С. 42–61.
3. Huang K., Yang S., Tong L. Modeling of evanescent coupling between two parallel optical nanowires // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46. – №9. – P. 1429–1434.

4. Tong L., Sumetsky M. Subwavelength and Nanometer Diameter Optical Fibers. – Hangzhou: Springer, 2010. – 240 p.