

Нанотехнологии для Волоконной Оптики

Т. Ю. Латышевская. Институт физики, Университет Цюриха, Швейцария

К. С. Новоселов. Департамент Физики и Астрономии, Университет Манчестера, Великобритания

Абстракт

Оптическое волокно давно и прочно вошло в нашу жизнь. Нам трудно себе представить рабочий день без быстрого доступа к удаленным базам данных, а наши выходные без отсылки огромного количества фотографий родным и близким. И все же, стремительное увеличение мощности современных компьютеров, а также развитие таких сервисов как интернет-телефония и видеоконференции многократно увеличивают нагрузку на электронные сети, что приводит к ужесточениям требований к оптоволоконным приборам. Более того, по мере развития этой области индустрии, для оптоволоконных приборов открываются все новые и новые перспективы и приложения. Ниже мы рассмотрим некоторые относительно недавние разработки в производстве оптоволоконной продукции.

Инновации в волоконной оптике

Стандартное оптоволоконно со «ступенчатым» изменением показателя преломления направляет свет за счет эффекта полного внутреннего отражения. Этот эффект легко наблюдать, если смотреть снизу на стакан с водой под некоторым небольшим углом, поверхность воды будет казаться зеркальной. Точно также лучи света в оптоволоконне отражаются от стенок и могут распространяться без потерь на значительные расстояния. В то же самое время довольно низкие значения угла внутреннего отражения в оптоволоконне (вспомните стакан с водой — вода будет казаться зеркальной только для довольно узкого диапазона углов зрения) и волновая природа света диктуют условия, что распространение света возможно только под некоторыми углами. Иначе говоря, оптоволоконно поддерживает распространение некоторого конечного числа дискретных «мод». Оптоволоконно, которое допускает распространение только одной моды, называют одномодовым — именно такие волокна наиболее пригодны для использования в телекоммуникациях.

Какие же недостатки у такого стандартного оптоволоконна со ступенчатым изменением показателя преломления? На самом деле никаких. Такое волокно довольно неплохо справляется со всеми приложениями, для которых оно изначально было

разработано. Проблема заключается в том, что современной индустрии необходимо нечто большее. Совершенно недостаточно выполнять только одну работу хорошо — гибкость (в прямом и переносном смысле), способность к интеграции с другими приборами и устройствами ценится также высоко как классическая надежность обычного оптоволоконна. А такое волокно отстает везде, где требуются некоторые необычные свойства, такие как способность передавать большую мощность, совместимость с различными датчиками и оптоволоконными лазерами на редкоземельных металлах, обладать высокой нелинейностью, двулучепреломлением или дисперсией. Другими словами, обычное оптоволоконно хорошо только для простых приложений в телекоммуникациях. Огромное количество новых применений возникло с появлением таких объектов как микроструктурированное волокно, оптоволоконно с фотонным кристаллом, волоконных лазеров, синхронизаторов мод на углеродных нанотрубках, наноплазменных структур. Ниже мы рассмотрим некоторые из них.

Микроструктурированное оптоволоконно

В отличие от оптоволоконна со ступенчатым изменением показателя преломления, которое производится как правило из двух или нескольких типов стекла (например стекло, допированное германием обладает более высоким показателем преломления и используется для производства центральной части волокна), микроструктурированное оптоволоконно может быть изготовлено целиком из одного типа стекла. Внешний слой с низким показателем преломления здесь заменен на большое количество цилиндрических полостей, заполненных определенным газом или просто воздухом.

Техника производства таких волокон была предложена впервые в 1991 году и с тех пор постоянно развивается. В основе технологии лежит довольно простая идея: стеклянные капилляры относительно большого размера складываются вместе в желаемую структуру, которая в последствии вытягивается под нагревом в оптоволоконно с определенным расположением воздушных полостей, геометрия которых определяется изначальным расположением капилляров. В зависимости от того как реализован

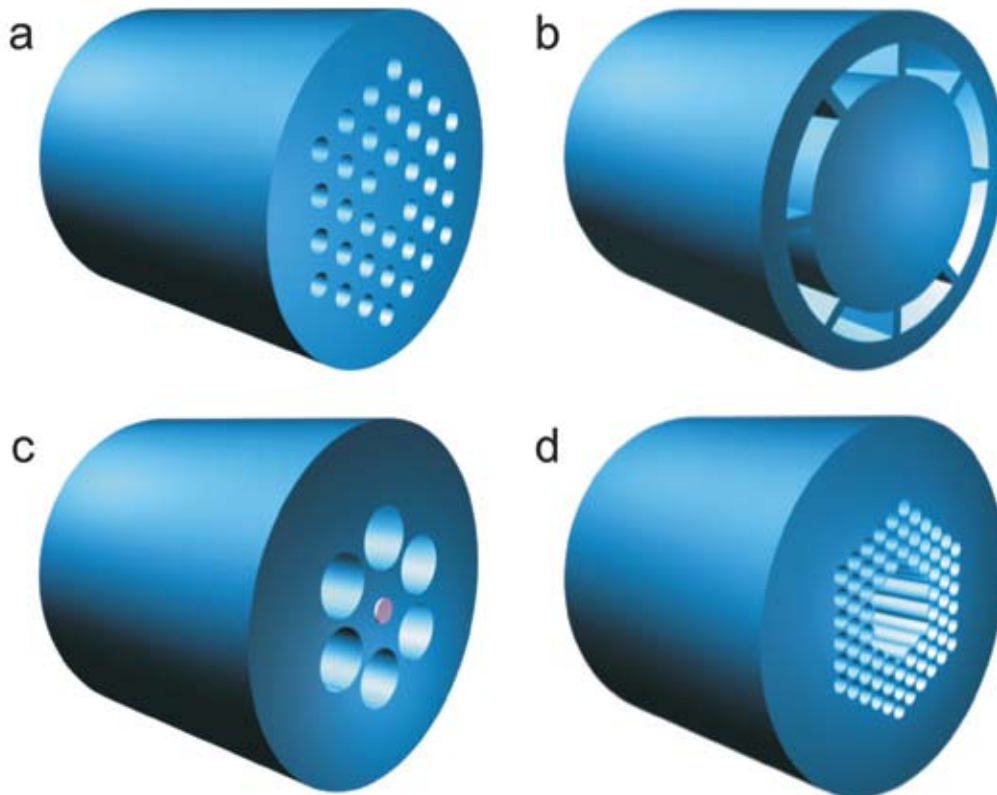


Рис. 1 Иллюстрация различных типов полостных волокон. (а) Одномодовое полостное волокно, где цилиндрические воздушные полости размещены гексагонально симметрично и центральная воздушная полость отсутствует. (б) Многомодовое волокно использует в качестве внешнего слоя кольцо из воздушных областей. (с) Активное волокно создается с использованием элементов из допированного стекла. Формирование второго внешнего слоя из воздушных полостей позволяет получить волоконный лазер. (д) Полое волокно с фотонным кристаллом с запрещенной зоной.

механизм полного внутреннего отражения, такие волокна можно разделить на два типа: полостные волокна и волокна на фотонных кристаллах.

Полостные волокна

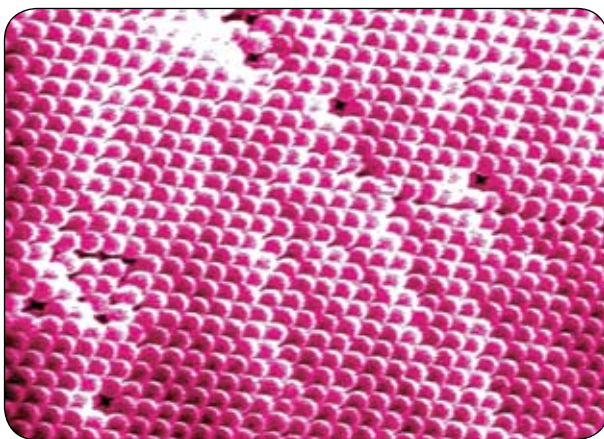
В полостных волокнах стеклянная центральная часть окружена набором цилиндрических воздушных полостей, что снижает эффективный показатель преломления и сильно модифицирует эффект полного внутреннего отражения. Поскольку размер воздушных полостей и расстояние между ними сравнимы с длиной волны света (сотни нанометров), то и эффективный показатель преломления будет варьироваться с длиной волны проходящего света. Результатом этого является способность такого оптоволокна нести только одну моду, вне зависимости от длины волны. Такие волокна обычно используются для передачи высоких мощностей света и обладают низкой нелинейностью.

Оптоволокно с фотонным кристаллом

В отличие от всех остальных волокон оптоволокно с фотонным кристаллом не использует идею

полного внутреннего отражения. Локализация света в центре такого волокна происходит за счет явления интерференции на периодической структуре с размером порядка длины волны, созданной решеткой цилиндрических полостей — фотонным кристаллом. Несмотря на то, что физика фотонных кристаллов, и особенно их производство, еще только развиваются, мы довольно часто сталкиваемся с родственными явлениями в повседневной жизни. Идея фотонного кристалла состоит в том, что в периодической структуре лучи света, отраженные от областей с разным показателем преломления, будут интерферировать друг с другом, усиливаясь или ослабляясь в зависимости от соотношения длины волны и периода структуры. Подобные явления придают яркую окраску крыльям некоторых бабочек и голограммам на наших кредитных карточках. И в том и в другом случае определенные цвета выделяются из белого света за счет интерференции. В фотонном кристалле интерференция гасит (запрещает распространение) для целого диапазона длин волн — в этом случае мы говорим о «запрещенной зоне» по аналогии с электронной зонной структурой.

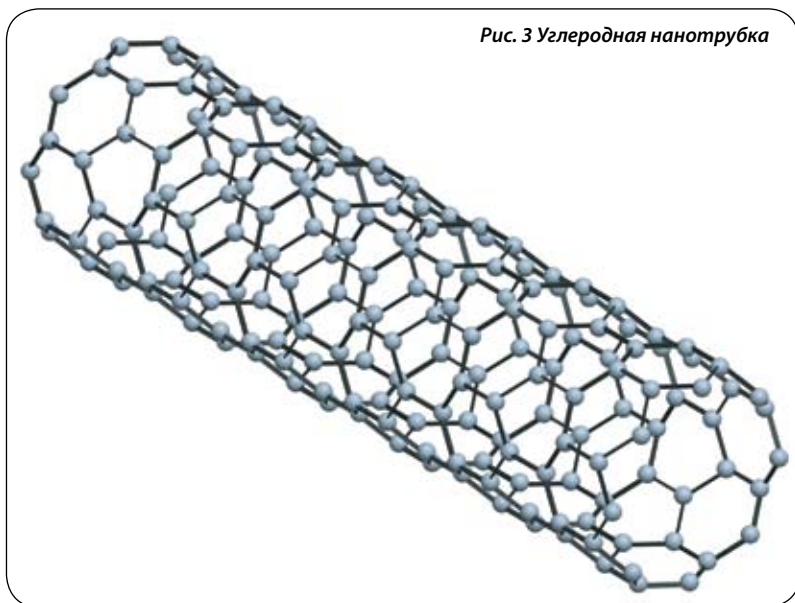
Рис.2 Пример фотонного кристалла. Характерный размер сфер 150 нанометров. Данные предоставлены профессором А. Григоренко, Университет Манчестера, Великобритания.



рой обычных кристаллов. Такие запрещенные моды (длины волн) будут локализованы в центральной части волокна на всем его протяжении.

Таким образом мы избавляемся от необходимости создавать определенную разницу в показателях преломления между внутренней и внешней областями в оптоволокне — выбор материала для внутренней части теперь ничем не ограничен. Более того, чаще всего используются полые волокна с фотонным кристаллом, где свет распространяется внутри воздушной полости в центре волокна (заметьте, что в волокнах со ступенчатым изменением показателя преломления это было бы невозможно — сердцевина волокна там всегда должна иметь больший показатель преломления, чем его внешняя часть). Преимущество таких волокон состоит в бесконечно малой дисперсии, поскольку свет теперь распространяется в практически бездисперсионной среде — воздухе.

Рис. 3 Углеродная нанотрубка



Преобразователи частоты на полостных лазерах

Возможность избавления от всяких ограничений на среду, в которой распространяется свет внутри волокна, открывает очень интересные перспективы и приложения. Так свет, распространяющийся внутри центральной части волокна, заполненной определенным газом, будет собирать информацию об этом газе (например за счет комбинационного рассеивания).

Комбинационное рассеивание может также быть использовано для преобразователей частоты. Проходящий свет возбуждает колебательные моды в молекулах газа, которым заполнено волокно. Преизлучение света на пониженной частоте, как правило, довольно слабый эффект, однако в случае оптического волокна он усиливается за счет огромной длины, на которой происходит взаимодействие (по всей длине волокна), а также за счет локального усиления электрического поля.

Оптоволоконные лазеры

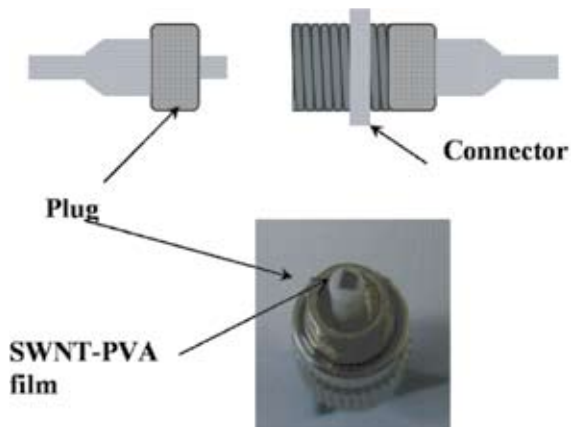
Технология оптоволоконных лазеров развивалась стремительными темпами в последние несколько десятилетий. В таких лазерах активная среда находится внутри самого оптического волокна. Характеристики волоконных лазеров улучшаются с каждым годом и уже практически приблизились к характеристикам обычных лазеров по мощности, длительности импульса и ширине полосы генерации. В то же время комбинация волоконных лазеров с микроструктурированным волокном открывает новые перспективы для таких устройств. Такие структуры обладают низкими изгибными потерями и повышенной избирательностью между модами.

Синхронизаторы мод на углеродных нанотрубках

В настоящее время волоконные лазеры применяются в самых разных областях — от телекоммуникаций до лазерной хирургии. Одно из основных преимуществ таких лазеров — это способность генерировать ультракороткие импульсы света в пикосекундном и субпикосекундном диапазонах. Для таких приложений оптоволоконные лазеры используют пассивные синхронизаторы мод — устройство, оптическая прозрачность которого варьируется с интенсивностью проходящего света. В последнее время все чаще и чаще используются синхронизаторы мод на углеродных нанотрубках.

Углеродные нанотрубки были открыты в 1991 году и представляют собой трубки диаметром несколько

Рис. 4 Синхронизатор мод на углеродных нанотрубках. Пленка с углеродными нанотрубками помещена на скол оптического волокна внутри оптического соединителя. Оптоволоконный лазер с таким синхронизатором мод способен генерировать импульсы с длительностью 200 фемтосекунд с частотой повторения 30 МГц со средней мощностью 1 мВт. Данные предоставлены Профессором Андреа Феррари, Группа Наноматериалов и Спектроскопии, Университет Кэмбриджа, Великобритания.



нанометров, стенки которых состоят из одного слоя углеродных атомов. Такие структуры обладают замечательными оптическими свойствами, которые зависят от диаметра и кристаллической структуры нанотрубок.

Развитие методов синтеза углеродных нанотрубок позволяет производить большое количество трубок с однородными оптическими свойствами. Высокая химическая, механическая и оптическая стабильность, малое время регенерации и возможность нанесения прямо на скол оптического волокна делают этот материал все более и более популярным для синхронизаторов мод.

Химические и биологические датчики на оптических волокнах

Развитие нанотехнологии и в частности наноплазмоники, в совокупности с волоконной оптикой приводит к возникновению новых устройств и сенсоров. Наноплазмонные структуры позволяют эффективно переводить плазмонные резонансы различных химических соединений, адсорбированных на поверхности оптоволокна, в оптические сигналы, распространяющиеся по оптоволокну. Многократное усиление локального электрического поля делают такие датчики чувствительными к единичным молекулам.



Рис. 5. Профессор Андреа Феррари, Группа Наноматериалов и Спектроскопии, Университет Кэмбриджа, Великобритания.

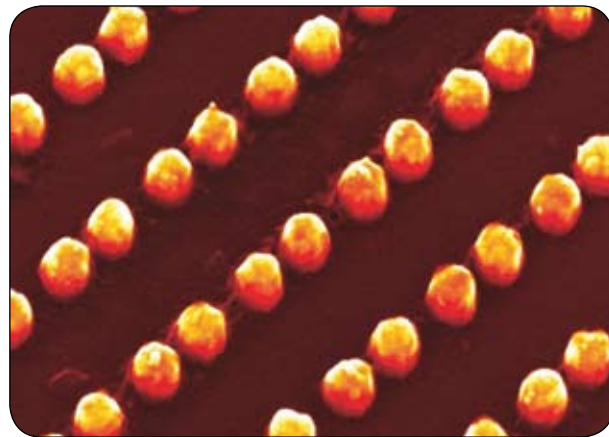


Рис. 6. Пример наноплазмонной структуры. Размер металлических частиц 100 нанометров. Данные предоставлены профессором А. Григоренко, Университет Манчестера, Великобритания.

Заключение

В последнее время волоконная оптика переживает второе рождение за счет интеграции с различными наноструктурами. Такой симбиоз приводит к совершенно новым, подчас неожиданным, областям применения. Вне всякого сомнения, что в ближайшее время мы будем свидетелями широкого проникновения устройств, основанных на оптических волокнах, в различные области индустрии от телекоммуникаций до медицины.