

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН. ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ РАЗРАБОТОК

Введение

На протяжении последних лет в производстве оптических волокон произошли серьезные изменения в плане применяемых технологий. Колебания спроса и снижение цен на оптические телекоммуникационные волокна привели к необходимости разработки новых экономически эффективных технологий изготовления и новых конструкций волокон. В настоящей статье описаны принятые в отрасли технологии производства оптических телекоммуникационных и специальных волокон, а также представлены несколько последних инновационных решений для изготовления заготовок и волокон. Телекоммуникационные оптические волокна производятся в очень больших объемах (свыше 100 млн км одномодового волокна, соответствующего ITU-T 652, в год) и имеют малое количество подкатегорий. Стимулом для разработки инновационных технологий является стремление к сокращению производственных расходов, повышению производительности, достижению экономии, обусловленной ростом масштабов производства, и улучшению характеристик оптического волокна. Волокна специального назначения, наоборот, производятся небольшими партиями, с многочисленными типами конструкций (подкатегорий), продаются метрами, при этом стимулом для новых технологических решений служат требования гибкости производства в связи с постоянно изменяющимися конструкциями оптических волокон.

Обзор технологий изготовления оптических телекоммуникационных волокон и связанные с ними инновационные решения

Стандартная последовательность технологического процесса производства одномодовых оптических волокон состоит из следующих этапов: изготовление заготовки сердцевинки оптического волокна (Core), наращивание оболочки (Clad), вытяжка заготовки в волокно (Draw) и, наконец, проведение испытаний на соответствие качества волокна (испытание на прочность, проверка геометрических параметров и оптические испытания) (QC).

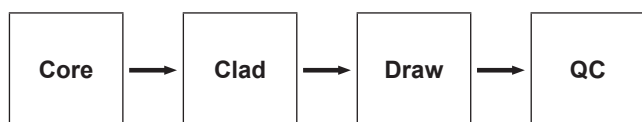


Рис. 1. Этапы технологического процесса

Изготовление заготовки сердцевинки одномодового оптического волокна

Заготовка сердцевинки определяет качество и эксплуатационные характеристики волокна и поэтому является его наиболее важной частью. К известным процессам изго-

товления сердцевинки относятся следующие: VAD, OVD, PCVD, MCVD и FCVD. Наиболее широко применяются методы VAD и OVD.

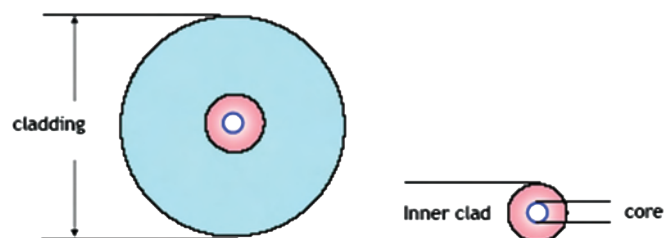


Рис. 2. Сердцевина (Core) и оболочка (Clad) оптического волокна

Развитие в направлении создания оптических волокон с низким и нулевым пиком воды (ITU-T 652D) приводит к новой проблеме, которую должна учитывать технология изготовления волокон: необходимость сокращения поглощения гидроксильных групп OH.

Процесс изготовления сердцевинки волокна методом VAD

Метод осевого парофазного осаждения (VAD), изобретенный в 1970 году в Японии, представляет собой химический процесс гидролиза в пламени, при котором в результате реакции паровой фазы формируются наночастицы стекла, образующие окиси. Частицы (SiO₂, GeO₂) осаждаются в осевом направлении на вращающемся кварцевом стержне путем термофорезного осаждения [4]. Пористая заготовка затем спекается (дегидратируется и остекловывается), а потом вытягивается в стержень, готовый к наращиванию оболочки. Метод VAD лучше всего подходит для изготовления оптических волокон с низким содержанием гидроксильных групп, но он также является очень трудным процессом для промышленного производства. В традиционной технологии осаждения по методу VAD используются концентрические кварцевые горелки, изготовленные в стекольных мастерских, и небольшие камеры осаждения с естественным потоком воздуха. Компания Nextrom разработала новый процесс VAD с использованием металлических горелок с калиброванными отверстиями и большой камерой осаждения с принудительным потоком воздуха [3].

Металлическая горелка выполнена из обработанного на прецизионном станке металлического газораспределителя с коррозионностойкой трубкой и образует тепловой и химический барьер путем подачи чистого воздуха, основанный на эффекте Вентури. Образование пламени и химическая реакция происходят в ламинарном потоке чистого воздуха. Это дает возможность получать очень точное и повторяемое осаждение, контролировать при помощи конструкции объем и скорость газов, использовать стандартные рецеп-

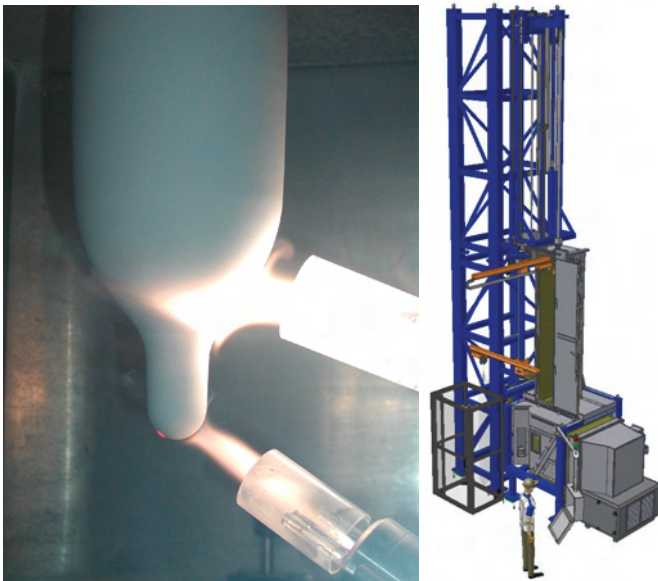


Рис. 3. Метод осаждения VAD

туры, поскольку они ведут себя единообразно на любой установке для осаждения. Большая камера с принудительным потоком воздуха имеет отдельные выпускные отверстия для сердцевины и оболочки с минимальным осаждением на стенках камеры, обеспечивает хорошую возможность контроля нежелательного вторичного осаждения, а также повышения стабильности пламени благодаря ламинарной зоне осаждения. Такая конструкция камеры успешно используется для производства оптических волокон с низким пиком воды при скорости осаждения 6 г/мин. В настоящее время ведутся дальнейшие разработки с целью повышения производительности этих установок.

Процесс изготовления сердцевины волокна методом OVD

Метод наружного парофазного осаждения (OVD), как и метод VAD, представляет собой процесс гидролиза в пламени. В отличие от метода VAD, в котором традиционно применяются концентрические кварцевые горелки, для процесса OVD производители всегда использовали металлические горелки. Использование металлических горелок не оказывало отрицательного воздействия на качество оптического волокна. Это показал опыт прокладки более 200 млн км оптического волокна, изготовленного с использованием таких горелок, за последние 20 лет. Более того, сравнительные испытания волокон свидетельствуют о том, что эксплуатационные характеристики волокна, полученного методом OVD, не отличаются от соответствующих характеристик волокна, изготовленного по методу VAD, за исключением содержания воды: волокна типа G652, изготовленные методом OVD, отличаются более высоким пиком поглощения гидроксильных ионов, чем волокна, полученные методом VAD. С другой стороны, процесс изготовления сердцевины OVD характеризуется более высокими скоростями осаждения – 24–36 г/мин благодаря использованию двух- и трехшпиндельных станков, соответственно.

Процессы изготовления сердцевины волокна методами MCVD и FCVD

Модифицированный метод химического парофазного осаждения (MCVD) заключается в процессе образования субмикронных частиц кварца в результате окисления SiCl_4

и последующем осаждении ультрадисперсного порошка SiO_2 и GeO_2 внутри высококачественной вращающейся опорной трубки. Эта технология используется с 1980-х годов и представляет собой простой процесс послойного осаждения. В процессе MCVD источником тепла являются расположенные снаружи кислородно-водородные горелки, в то время как в процессе FCVD (метод химического парофазного осаждения с помощью печи) источником тепла является печь. После того, как произошло осаждение, трубка «схлопывается» в стержень, обычно на том же станке для изготовления заготовок. Метод MCVD широко применяется для изготовления оптических волокон специального назначения, поскольку он позволяет легко контролировать показатель преломления каждого слоя. Однако этот метод уже не так широко используется в производстве телекоммуникационных оптических волокон, так как он не дает возможности изготавливать очень большие заготовки, длина зоны осаждения часто ограничивается 1 метром, и, кроме того, горелки O_2/H_2 (кислородно-водородные), применяемые для нагрева и «схлопывания» опорной трубки, не позволяют производить волокна с низким пиком воды. Усовершенствованный вариант этого метода с использованием нагревательной печи вместо горелок (FCVD) позволяет сократить содержание гидроксильных групп (OH) в заготовке и изготавливать волокна с низким пиком воды. Он также позволяет увеличить «полезный» размер опорной трубки.

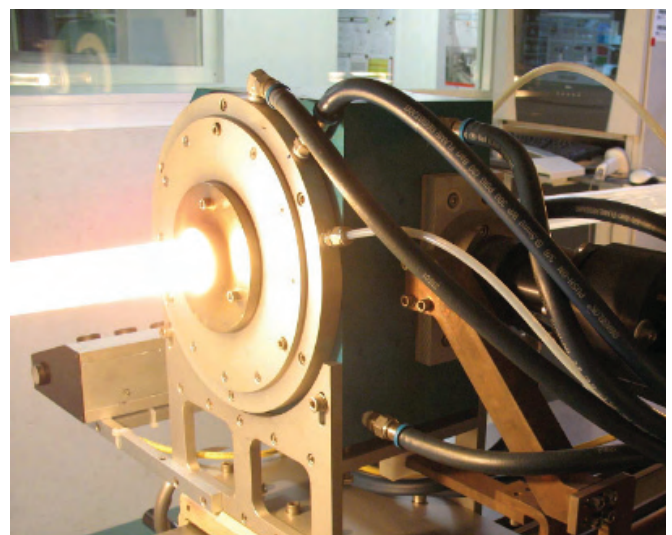


Рис. 4. Нагревательная печь для процесса FCVD

Путем сокращения соотношения В/А (диаметр осажденной оболочки относительно диаметра осажденной сердцевины волокна) можно увеличить размер заготовки для сердцевины и производить заготовки размером до 120 мм. Технология FCVD применяется на протяжении нескольких лет компаниями Silitec, Draka и другими для производства оптических волокон с низким пиком воды.

Процесс PCVD

Плазменный метод химического парофазного осаждения (PCVD), изобретенный компанией Philips в 1980-х годах, запатентованный и принадлежащий компании Draka, так же как и методы MCVD/FCVD, представляет собой процесс внутреннего осаждения. Единственным существенным отличием является то, что источником тепла, используемым для спекания осажденного ультрадисперсного порошка внутри

опорной трубы, служит расположенная внутри плазма низкого давления, создаваемая радиочастотным полем. Это позволяет очень точно контролировать процесс спекания слоев, что обеспечивает более точный контроль профиля показателя преломления, особенно, в случае оптических волокон с градиентным показателем преломления, но в то же время при этом допускается значительное включение легирующих примесей. Развитие этой технологии для изготовления телекоммуникационных оптических волокон идет в том же направлении, что и развитие технологии MCVD, то есть целью дальнейшего развития является изготовление заготовок сердцевины волокна с меньшим соотношением В/А и стержней для изготовления сердцевины с большими диаметрами, что приведет к повышению производительности.

Процесс наложения оболочки на одномодовые волокна

Стоимость оболочки составляет существенную часть стоимости волокна и в принципе не оказывает влияния на характеристики оптического волокна. Широко распространены следующие методы наложения оболочки: OVD Clad (метод наружного парофазного осаждения), APVD (Plasma) (усовершенствованный плазменный метод химического парофазного осаждения), и жакетирование по RIT или RIC технологиям (соответственно методы «стержень в трубке» или «стержень в цилиндре»). Далее представлен новый процесс наложения оболочки с использованием технологии наращивания оптической оболочки путем засыпки кварцевой крошки SAND (SCT), недавно разработанный компаниями Silitec / Nextrom.

Наложение оболочки методом OVD

Метод наружного парофазного осаждения (OVD) оболочки представляет собой процесс гидролиза в пламени, заключающийся в осаждении частиц мелкодисперсного порошка двуокиси кремния SiO₂ на стержне сердцевины и спекания порошка для получения сплошной стеклянной заготовки. Это самый распространенный метод наложения оболочки.

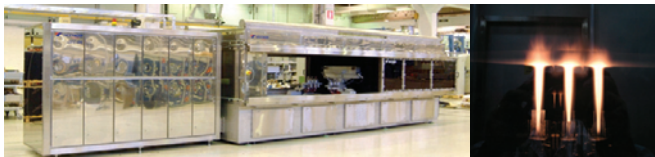


Рис. 5. Горизонтальный двухшпиндельный станок для наложения оптической оболочки методом OVD

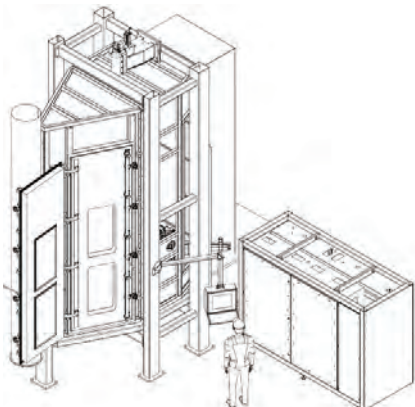


Рис. 6. Вертикальный станок для наложения оптической оболочки методом OVD

Производительность процесса в основном определяется скоростью осаждения, эффективностью осаждения и достижимым размером заготовки (длина и диаметр). В последнее время скорость осаждения постоянно повышается поставщиками оборудования. Вначале скорость осаждения составляла от 15 до 20 г/мин на одношпиндельных станках. Компания Nextrom в 2004 году выпустила двухшпиндельный станок с тремя горелками производительностью 54 г/мин для заготовок массой до 30 кг.

В 2008 году компания Nextrom выпустила вертикальный станок с 6 горелками производительностью около 50 г/мин для заготовок массой до 60 кг.

Наложение оболочки методом APVD

Усовершенствованный плазменный метод химического парофазного осаждения (APVD) представляет собой запатентованный компанией Draka процесс, заключающийся в осаждении природного кварцевого песка на стержень сердцевины оптического волокна при помощи плазменной горелки и наращивании стекла слой за слоем. Технология совершенствовалась с целью увеличения диаметра заготовки и сокращения загрязнения примесями, содержащимися в природном кварце.

Технологический метод изготовления заготовок RIC/RIT («стержень в трубке»/«стержень в цилиндре»)

Методы RIC/RIT «стержень в трубке» и «стержень в цилиндре» представляют собой простейший процесс наложения оболочки, который заключается во введении стержня для изготовления сердцевины внутрь трубки из материала высокой чистоты производства компаний Heraeus или General Electric. Самостоятельный процесс введения стержня в трубку осуществляется на отдельном горизонтальном или вертикальном станке, но более распространен способ введения стержня в трубку, производимый на башне для вытяжки волокна. Стержень (стержни) для изготовления сердцевины вставляются внутрь трубки или цилиндра, после чего происходит непосредственная вытяжка волокна. Компания Heraeus усовершенствовала данную технологию с целью снижения затрат на материалы и повышения производительности. Усовершенствование технологии привело к использованию цилиндров диаметром от 120 мм до 200 мм

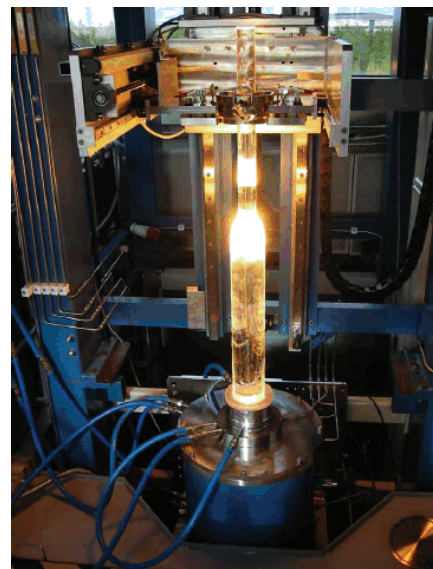


Рис. 7. Печь для вытяжки волокна из заготовок размером 150 мм

и длиной до 3 м. Потребовались очень большие печи для башен для вытяжки волокна или большие станки для жакетирования. Компания Nextrom внедрила в 2008 году свои собственные графитовые индукционные печи для заготовок размером 150 мм.

Новая SAND технология наложения оптической оболочки путем засыпки кварцевого песка (SCT)

Компания Silitec Fibers разработала новую универсальную и экономически эффективную технологию наложения оболочки оптического волокна. Этот процесс заключается в том, что кварцевый песок плавится вокруг стержня для изготовления сердцевинки с помощью печи [1].



Рис. 8. Вытяжка заготовки, изготовленной по технологии SAND

Конструкция, состоящая из сердцевинки, окруженной большой тонкостенной трубой, заполняется кварцевым песком (рис. 9 а). Затем песок плавится и превращается в стекло либо непосредственно в процессе вытяжки, либо на расположенном отдельно вертикальном станке (рис. 9 в). Последний вариант позволяет использовать более дешевые трубы для оболочек, которые могут быть отшлифованы до процесса вытяжки.

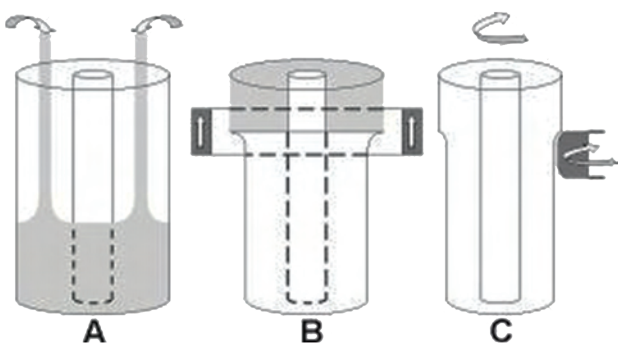


Рис. 9. Этапы процесса плавки кварцевого песка

Кварцевый песок существует в различных формах: зольгель, крошка синтетических кристаллов, мелкодисперсный кварцевый порошок. Этот процесс относительно прост и требует наличия только ограниченной инфраструктуры, то есть не требует скрубберов. Компания Silitec Fibers использует этот процесс в неавтономном варианте с 2004 года и в автономном варианте – с 2008 года.

Процесс вытяжки одномодовых оптических волокон

Качество процесса вытяжки зависит главным образом от конструкции печи, технологии наложения оболочки и оптимального контроля параметров процесса, таких как натяжение, температура, диаметры, скорость. Снижение расходов на процесс вытяжки достигается за счет повышения производительности, то есть увеличения производственной скорости, сокращения времени наладки и запуска оборудования, времени линейного нарастания скорости, повышения качества намотки, увеличения размера заготовок (длины и диаметра), а также за счет увеличения количества произведенного продукта, то есть сокращения отходов при начале и окончании работы, обрывов заготовки при вытяжке, снижения индуцируемого вытяжкой затухания и сокращения обрывов волокна при контроле качества в процессе вытяжки.

Увеличение размера заготовок несколько осложняет их транспортировку и обращение с ними. Если обращение с заготовками длиной 1 м и диаметром 100 мм не вызывает особых проблем, то манипулировать заготовками диаметром более 150 мм и длиной 3 м намного сложнее. Кроме того, энергопотребление при плавке больших заготовок существенно выше, чем при работе с заготовками меньших размеров. При выборе оптимального размера заготовок требуется найти компромиссное решение. За более чем 20-летний период развития технологии вытяжки волокна компания Nextrom разработала ряд новых технологических решений. К последним нововведениям относятся следующие:

- скорость вытяжки увеличена до 1800 м/мин и выше благодаря использованию фильер для нанесения влажного покрытия поверх нижнего влажного слоя;
- графитовая индукционная печь для заготовок диаметром более 150 мм с оптимизированной системой контроля расхода газа;
- автоматические сдвоенные приемные устройства для очень больших катушек (до 1000 км волокна на одной катушке).



Рис. 10. Автоматическое сдвоенное приемное устройство для катушек массой 100 кг, DFT100

Обзор технологий изготовления оптических волокон и инновационные решения в области производства волокон специального назначения

Оптические волокна специального назначения имеют широкий диапазон конструкций и областей применения, включая одномодовые волокна (с выбранной длиной волны отсечки), многомодовые волокна с градиентным показателем преломления, многомодовые волокна со ступенчатым показателем преломления, волокна с сохранением поляризации, легированные волокна для усилителей или лазеров, с одинарной или двойной оболочкой, микроструктурированные волокна со сплошной сердцевиной (PCF – фотоннокристаллические), брэгговские волокна с поллой сердцевиной...

Изготовление заготовок сердцевины для волокон специального назначения

При производстве оптических волокон специального назначения применяются все известные методы изготовления сердцевины, однако некоторые технологии обеспечивают достижение лучших характеристик для волокон определенных конструкций. При сложном профиле показателя преломления методы послойного осаждения, такие как MCVD, FCVD, PCVD, OVD, обеспечивают наиболее высокую гибкость производственного процесса. Среди проблем, связанных с производством волокон специального назначения, самой сложной задачей остается легирование сердцевины редкоземельными материалами, такими как Er, Yb и др. Для этого требуется высокая однородность легирующих материалов, высокая концентрация и возможность легировать сердцевины больших диаметров. Наиболее широко используется метод, называемый «жидким легированием», который состоит в том, что стержень для изготовления сердцевины после каждого осаждения пропускается через легирующий раствор, содержащий редкоземельные материалы. Это довольно обременительный метод, имеющий некоторые ограничения. Другой метод, применяемый компанией Liekki, основан на прямом осаждении наночастиц (DND).

Компании Nextrom и Silitес разработали несколько технологий, помогающих решить эту сложную задачу легирования.

Технология легирования кварцевого песка

Компания Silitес разработала метод легирования кварцевого песка, используемого в материале сердцевины. Кварцевый песок можно легко легировать окисями редкоземельных элементов. Кварцевая трубка заполняется легированным редкоземельными элементами песком, приготовленным методом жидкого легирования или непосредственно из порошкообразных окисей редкоземельных элементов. Этот процесс описан в [1]. Он использовался для производства волокна LMA Yb3+ и стержней для сердцевины диаметром до 20 мм с соблюдением строгого контроля однородности показателя преломления. Полученные результаты представлены в [2]. Оценивались концентрации иттербия примерно 3600 wt-ppm.

Хелатная система доставки легирующих элементов

Компания Nextrom разработала систему легирования редкоземельными элементами для доставки высокотемпературных реагентов с низким давлением насыщенного пара. При доставке этих реагентов в газовой фазе достигаются отличные результаты в отношении точности контроля, повторяемости и распределения. Были достигнуты концентрации Yb – 21 000 ppm и Er – 10 000 ppm.

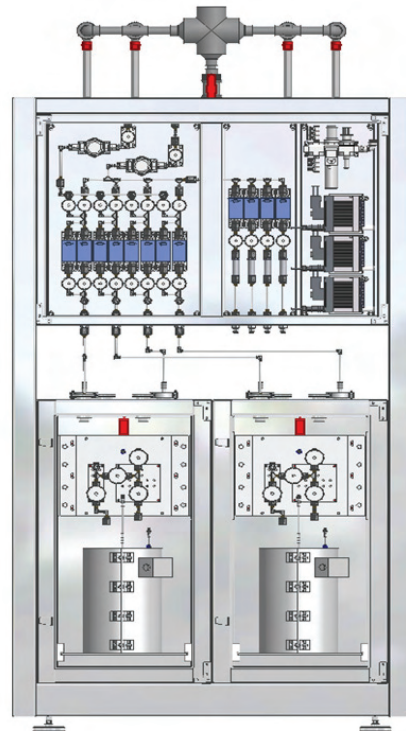
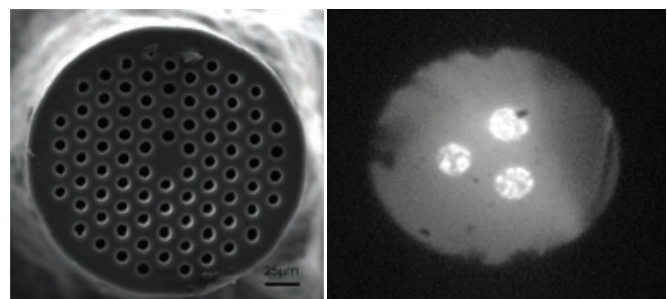


Рис. 11. Система доставки редкоземельных элементов при легировании кварцевого песка

Оболочка оптических волокон специального назначения и производство заготовок сложной структуры

При производстве оптических волокон с одной сердцевиной чаще всего используется процесс наращивания оболочки по методу «стержень в трубке». Однако в случае оптических волокон нового типа, таких как волокна с сохранением поляризации типа «Панда» или структурированных волокон, новые конструкции требуют модернизированных технологий производства. При производстве оптических волокон типа «Панда» необходимо просверлить сплошную заготовку и вставить в нее легированные бором стержни. Ограничивающим фактором является длина просверленного отрезка. Микроструктурированные фотоннокристаллические волокна изготавливаются методом компоновки и вытяжки многочисленных капилляров вокруг сплошной сердцевины или поллой трубки (Stack and Draw). Сложной задачей является сохранение требуемых геометрических размеров и продольной однородности.



Оптическое волокно Silitес LCA, диаметром 180 мм Оптическое волокно с несколькими сердцевинами Er3+

Рис. 12. Поликристаллические волокна и легированные волокна с несколькими сердцевинами, изготовленные методом засыпки кварцевой крошки

Новая технология, основанная на методе наращивания оболочки путем засыпки кварцевой крошки, была разработана компанией Silitec Fibers, которая внедрила гибкий процесс для создания оптических волокон сложной структуры – с несколькими сердцевинами или фотоникристаллических.

Возможность фиксировать и стабилизировать сложные и асимметричные структуры в кварцевом песке до начала затвердевания представляется главным преимуществом этой технологии. Капиллярные структуры могут быть окружены песком, включая пустоты между капиллярами. После затвердевания и схлопывания всей этой конструкции можно получить микроструктурированную заготовку, геометрию которой можно определить до вытяжки. Компания Silitec изготовила фотоникристаллические оптические волокна LMA с отличной геометрией, используя этот метод.

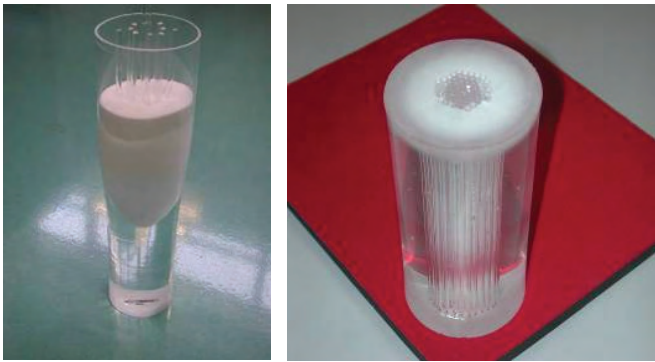


Рис. 13. Заготовки с несколькими сердцевинами и фотоникристаллические заготовки, изготовленные методом засыпки кварцевой крошки

Вытяжка оптических волокон специального назначения

Для вытяжки оптических волокон специального назначения требуются универсальные и отвечающие требованиям заказчика башни, пригодные для работы с широким диапазоном (небольшим) заготовок, типичными размерами волокон от 50 микрон до 1000 микрон, разнообразными материалами покрытий, а также рассчитанные на различные методы отверждения (рис. 14). Для производства поликристаллических волокон недавно было установлено строгое требование: вытяжка капилляров с точными размерами и автоматическая резка.

В связи с тем, что башни для вытяжки часто располагаются в небольших лабораториях, наблюдается тенденция к созданию гибкого, оптимизированного оборудования с перестраиваемой конфигурацией.

Заключение

Процесс изготовления стержней для сердцевины однофазных оптических волокон не претерпел каких-либо значительных изменений, но в его развитии отмечаются шаги по увеличению размера заготовок, повышению производительности, решению проблем, связанных с вызванным наличием гидроксильных групп (ОН) затуханием, и новыми конструкциями волокон, требующих новых профилей показателя преломления.

Компания Nextrom внесла свой вклад в развитие этого процесса, разработав новый метод осевого парового осаждения, обеспечивающий высокую стабильность процесса,

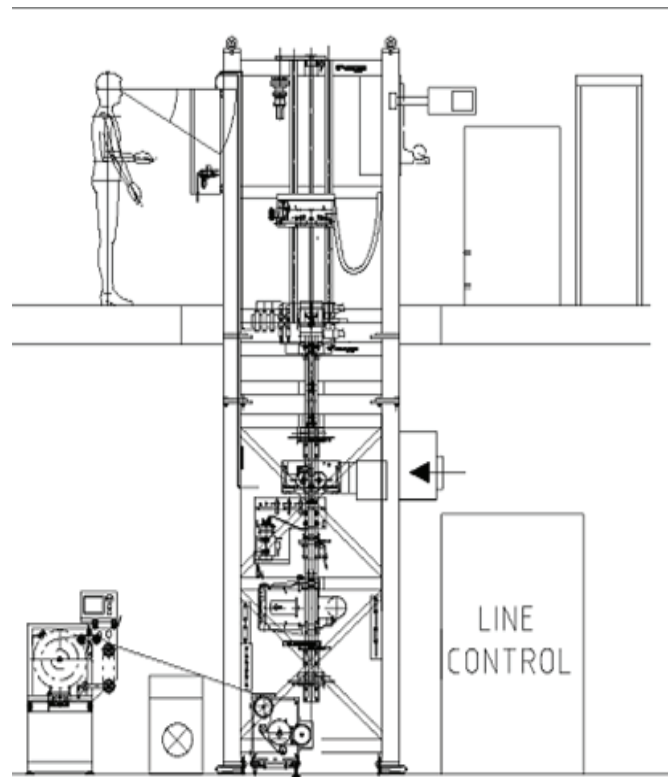


Рис. 14. Башня для вытяжки оптических волокон специального назначения

для которого используется технология химического парового осаждения с помощью печи, разработанной компанией Silitec Fibers. Процесс наложения оболочки на однофазные оптические волокна претерпел более существенные изменения, направленные на увеличение размера заготовок, повышение производительности и сокращение расходов на материалы. Компании Nextrom и Silitec внедрили новые высокоэффективные и востребованные процессы, такие как высокопроизводительный процесс наложения оболочки методом наружного парового осаждения, новая технология наращивания оболочки методом засыпки кварцевой крошки и технология вытяжки заготовок большого диаметра. В области оптических волокон специального назначения разработана технологическая цепочка процессов шла в направлении новых более гибких способов производства заготовок сложных структур и высоколегированных оптических волокон. В этой области компании Silitec и Nextrom также разработали инновационные процессы изготовления, такие как легирование и засыпка кварцевого песка, изготовление волокон с несколькими сердцевинами и поликристаллических волокон с наращиванием оболочки методом засыпки кварцевого песка.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Sandoz et al. «A Novel process to manufacture high efficiency laser fibers» Photonics 2008, Dehli.
2. P. Roy et al. «Active Optical Fibers: New design and alternative method of fabrication», Photonics 2008, Dehli.
3. A. Sarkar, B. Orchanian, A. Chan. «A Novel VAD process», IWCS 2008
4. N. Niizek, N. Inagaki and T. Edahiro. «Vapor-Phase Axial Deposition Method», Chapter 3, Optical Fiber Communication Vol. 1, Fiber Fabrication, edited by T. Li, Academic Press (1983).