

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

М. А. Ероньян, И. К. Мешковский

**ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИИ АНИЗОТРОПНЫХ
ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ**

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2014

Ероньян М. А., Мешковский И. К. Основы нанотехнологии анизотропных одномодовых волоконных световодов. Учебное пособие.– СПб: НИУ ИТМО, 2014. – 80 с.

В учебном пособии рассмотрены физико-химические основы нанотехнологии газофазных процессов получения особо чистых кварцевых стекол и световодов на их основе. Представлены современные методы получения и свойства анизотропных одномодовых световодов, используемых в интерферометрических системах различного функционального назначения. Показаны основные проблемы в технологии их производства и технические решения по их преодолению. Учебное пособие предназначено для магистров, обучающихся по программе «Нанотехнологии в волоконной оптике» направления 210700.68, «Инфокоммуникационные технологии, системы и сети», а также для студентов старших курсов, обучающихся по направлению 210700. Рекомендовано к печати Ученым советом факультета инфокоммуникационных технологий, 7 ноября 2013 г., протокол № 7



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет
информационных технологий, механики и
оптики, 2014

© М.А. Ероньян, И.К. Мешковский, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Исходные материалы для изготовления световодов.....	5
1.1 Кварцевое стекло: свойства и способы получения.....	5
1.2 Методы изготовления кварцевых труб.....	9
1.3 Реактивы, используемые в парофазных методах изготовления заготовок световодов.....	10
2 Методы изготовления заготовок световодов.....	14
2.1 MСVD метод	14
2.2 Методы изготовления заготовок на основе парофазного гидролиза.....	24
2.3 PМСVD метод изготовления заготовок.....	27
3 Технология вытягивания световодов из заготовок.....	28
4 Свойства кварцевых световодов.....	32
4.1 Оптические потери.....	32
4.2 Прочностные свойства световодов.....	40
5 Анизотропные одномодовые световоды.....	49
5.1 Поляризационные свойства световодов.....	49
5.2 Анизотропные световоды с эллиптической сердцевиной.....	53
5.3 Двухлучепреломляющие одномодовые световоды с анизотропией механических напряжений.....	58
5.3.1 Световоды с эллиптической напрягающей оболочкой.....	59
5.3.2 Световоды типа «Panda».....	73
5.3.3 АОВ типа «галстук-бабочка» (Bow-tie).....	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	79

ВВЕДЕНИЕ

Успехи оптического материаловедения конца 20 и начала 21 века в значительной степени обязаны изменениям масштабов исследуемых объектов с микро до нано уровня. Изучение физико-химических процессов получения оптических материалов из наноразмерных частиц определило перспективу создания новых изделий, обладающих уникальными оптическими и прочностными свойствами.

На основе результатов таких исследований разработаны высокотемпературные газофазные методы получения особо чистого кварцевого стекла, включающие процессы образования наночастиц из диоксида кремния в контролируемой по чистоте газовой атмосфере. Благодаря явлению термофореза частицы такого малого размера плотно упаковываются в пористые структуры с регулярными по размеру порами, обеспечивая тем самым прозрачное бездефектное стекло при их спекании.

Особо высокая чистота такого оптического материала открыла перспективы создания и производства волоконно-оптических световодов. Сейчас они являются основой не только для протяженных межконтинентальных и региональных телекоммуникационных линий связи, но и для производства различного рода волоконно-оптических систем гражданского и оборонного назначения.

В настоящем учебном пособии представлено современное состояние технологии анизотропных одномодовых волоконных световодов (АОВС), сохраняющих поляризацию излучения. Такие оптические волокна являются основой интерферометрических устройств различного функционального назначения.

В литературе [1-4] имеются материалы, охватывающие более широкий круг вопросов по этой теме, дополнительное ознакомление с которыми позволит расширить познание технологии волоконных световодов.

1 Исходные материалы для изготовления световодов

1.1 Кварцевое стекло: свойства и способы получения

Широко распространенный в земной коре диоксид кремния (SiO_2), являясь одним из основных стеклообразователей, использовался человеком для различных целей с древнейших времен. Его кристаллическая модификация в виде кристаллов кварца давно используется для получения кварцевого стекла. Благодаря ряду уникальных свойств оно нашло применение во многих отраслях промышленности. Особую значимость этот материал приобрел в конце прошлого столетия, когда методами парофазного синтеза SiO_2 были получены волоконные световоды (ВС) с особо малым затуханием света.

Существование в стеклообразном состоянии присуще ограниченному количеству элементов и соединений. Обычно вещества после расплавления кристаллизуются. Но в случае малой скорости кристаллизации или очень высокой скорости охлаждения кристаллизация не происходит. Существует несколько гипотез, определяющих критерий склонности веществ образовывать стеклообразное состояние. Одна из последних гипотез, выдвинутая Роусоном, предлагает количественный критерий, равный отношению прочности межатомной связи E_{M-O} в оксидах к температуре их плавления. Как видно из таблицы 1.1, вещества, склонные к стеклообразованию, имеют E_{M-O}/T более 0,053.

Таблица 1.1

Отношение прочности связи к температуре плавления для оксидов

Оксид	Прочность одинарной связи E_{M-O} , ккал	Температура плавления, $T_{пл}$, °К	Критерий стеклообразования E_{M-O}/T
B_2O_3	119 или 89	728	0,164 или 0,122
SiO_2	106	1993	0,053
GeO_2	108	1388	0,078
P_2O_5	88-111	843	0,104-0/131
TiO_2	73	2123	0,034
ZrO_2	81	2923	0,023
WO_3	103	1748	0,059
MgO	37	2913	0,013
CaO	32	2773	0,011

Особо интересно отметить необычно большую величину критерия для оксида бора, равную 0,164. Отсюда следует, что закристаллизовать B_2O_3 практически невозможно. Диоксид кремния с более низким критерием стеклообразования, равным 0,053, обладает устойчивым стеклообразным состоянием, однако в отличие

от оксида бора кварцевое стекло может кристаллизоваться в определенных условиях при температурах 1100-1650 °С.

Влияние температуры плавления на склонность к стеклообразованию объясняет тот факт, что вещества с более низкими значениями этого критерия склонны к стеклообразованию при пониженных температурах ликвидуса (в двойных и тройных оксидных системах).

Состояние кварцевого стекла характеризуется двумя температурами:

- T_g (≈ 1100 °С), что соответствует вязкости, равной $10^{13,3}$ пз,

- T_f (≈ 1600 °С) при вязкости, равной 10^8 пз.

При вязкости более $10^{13,3}$ пз ($T < T_g$) стекло представляет собой твердое хрупкое тело, а при $T > T_f$ стекломасса находится в расплавленном состоянии.

Кварцевое стекло обладает высокой прозрачностью в видимой и ближней инфракрасной области оптического спектра (от 0,6 до 1,6 мкм), достигая затухания менее 0,2 дБ/км на длине волны 1,55 мкм. В таблице 1.2 приведены его основные свойства. Оно обладает высокой механической прочностью. Так, прочность кварцевых световодов в герметичном покрытии на растяжение достигает 12-14 ГПа, что существенно выше показателей лучших сортов стали. Расчетный предел прочности кварцевых световодов составляет 15-25 ГПа. Недавно при испытаниях коротких отрезков особо тонких волокон из кварцевого стекла получена величина прочности 26 ГПа.

В полимерном защитном покрытии световоды в два раза менее прочные, чем в герметичной металлической оболочке, что обусловлено влиянием влаги на процесс разрушения стекла.

Коэффициент теплового расширения (КТР), равный 5×10^{-7} 1/градус, на порядок ниже в сравнении с тугоплавкими материалами. Поэтому кварцевое стекло обладает высокой термостойкостью: нагретые до температуры 1000-1200 °С стержни из плавленного кварца не разрушаются даже при погружении в воду.

Основной механизм расширения материалов с нагревом обусловлен ангармонизмом колебаний атомов. Однако структурные превращения, происходящие в кварцевом стекле при нагреве, приводят к уменьшению объема, чем и обусловлено низкое значение его КТР.

Высокая твердость, тугоплавкость и химическая инертность этого материала обеспечивает надежную эксплуатацию изготовленных из него изделий в агрессивных средах и при высоких температурах.

Повышенное значение вязкости кварцевого стекла и его поверхностного натяжения придают этому материалу уникальные технологические свойства,

позволяя устойчиво вытягивать длинномерные тонкие волокна со стабильными геометрическими параметрами.

Таблица 1.2

Свойства кварцевого стекла

Свойство	Размерность	Значение
Плотность,	г/см ³	2,20
Показатель преломления	-	1,458
Коэффициент линейного термического расширения	град ⁻¹	$5,7 \cdot 10^{-7}$
Поверхностное натяжение	дин/см	300
Теплопроводность	кал/см·град	0,0033
Микротвердость	кг/мм ²	703
Прочность стержней	кг/мм ²	7
Прочность волокон	кг/мм ²	1500

Кварцевое стекло получают двумя основными методами:

- наплавом кристаллов кварца и
- высокотемпературным парофазным синтезом SiO₂ с использованием летучих соединений кремния.

Исходными материалами для получения кварцевого стекла являются:

- природные виды кварца и искусственные кристаллы кварца, выращенные гидротермальным способом в автоклавах, а так же
- тетрахлорид кремния (SiCl₄) или силан (SiH₄).

Природные и искусственные кристаллы кварца дробятся, измельчаются, фракционируются по размерам зерен, обрабатываются смесью кислот HCl+HNO₃ для удаления с поверхности неорганических примесей, промываются водой и сушатся. Подготовленную таким образом крупку наплавляют в блоки.

Используют следующие методы ее наплава:

- 1- электротермический наплав в атмосфере водорода,
- 2- газопламенный наплав в пламени кислородо-водородной горелки,
- 3- электротермический наплав крупки в вакууме.

При парофазном синтезе SiO₂ с использованием реакционной парогазовой смеси применяют, в основном, два метода:

- 1 - парофазный гидролиз SiCl₄ в пламени горелки или
- 2 - окисление SiCl₄ в кислородной ВЧ-плазме.

В табл. 1.3 приведены способы получения стекла, его марки и содержание в них примесей переходных металлов и гидроксильных групп.

Таблица 1.3

Содержание примесей в промышленных кварцевых стеклах

Тип стекла	Способ производства	Содержание примесей металлов, масс. %	Содержание групп ОН, масс. %	Марки стекол
I	Плавка крупки в вакууме	До 0,01	Менее 5×10^{-4}	КИ (Россия), IR-Vitreosil (Англия), Infrasil (Германия)
II	Плавка крупки в кислородо-водородном пламени	Менее 0,01	$(1,5-6) \times 10^{-2}$	КУ,КВ (Россия); OG-Vitreosil, OH-Vitreosil (Англия); Herasil, Heralux, Optosil, Homosil (Германия)
III	Высокотемпературный гидролиз SiCl_4 в пламени	Менее 10^{-4}	0,2	КУ. КСГ (Россия); Spectrosil (Англия); Suprasil (Германия); Corning 7940, Dynasil (США)
IV	Окисление SiCl_4 в высокотемпературной плазме	Менее 10^{-4}	$0,4 \times 10^{-4}$	КУВИ (Россия); Spectrosil WF (Англия); Suprasil W (Германия); F-300, Corning 7943 (США).

1.2 Методы изготовления кварцевых труб

В технологии волоконных световодов широко используются трубы из кварцевого стекла. В настоящее время разработано несколько методов их изготовления. При непрерывных методах формования кварцевых изделий (трубок, стержней, пластин) электротермический наплав равномерно засыпаемой в молибденовый тигель крупки осуществляется в процессе вытягивания стекломассы в атмосфере водорода.

Огнеупорные материалы футеровки из молибдена, используемые в этих процессах, являются источником тугоплавких включений стекла формируемых изделий. Такие дефекты существенно снижают прочность световодов, изготавливаемых MCVD методом (modified chemical vapor deposition) на основе труб непрерывного формования.

В отечественной промышленности освоен одностадийный метод производства труб из кварцевого стекла при пламенном наплаве кварцевой крупки.

Этот процесс выгодно отличается от предыдущего отсутствием включений частиц молибдена в стекле, однако контакт стекломассы с материалом футеровки тигля из стабилизированного диоксида циркония также ограничивает возможность использования труб для изготовления волоконных световодов повышенной прочности из-за наличия тугоплавких неоднородностей в стекле. Исключить загрязнение стекла тугоплавкими включениями можно, если в процессах его наплавления и формования не использовать высокотемпературные огнеупорные материалы.

Таким требованиям отвечает многостадийный технологический процесс изготовления опорных кварцевых труб немецкой фирмы «Heraeus». Наплавление блока кварцевого стекла осуществляют в аппаратах, исключающих проникновение в высокотемпературную зону тугоплавких частиц. Затем следует абразивное формование цилиндрической заготовки и вытягивание трубы методом подобия. Подобным способом производят опорные трубы в США, отличающиеся от предыдущего высокой чистотой стекла (марка F-300), так как оно получается паросинтетическим методом.

1.3 Реактивы, используемые в парофазных методах изготовления заготовок световодов

Изготовление ВС состоит из двух основных стадий. Первая заключается в изготовлении заготовки в виде стержня, а вторая - в вытягивании из неё волокна и нанесении защитного покрытия. Отличие технологических процессов изготовления световодов определяется, в основном, разнообразием методов получения заготовок. Они на 90-95 % состоят из кварцевого стекла, в которое для формирования световедущих свойств вводятся специальные добавки.

Для увеличения показателя преломления стекло легируется, в основном, GeO_2 или P_2O_5 , а для его уменьшения используют B_2O_3 или фтор (рис. 1.1) Во всех процессах изготовления заготовок исходным сырьем является легколетучие галогениды (SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 , BBr_3 , BCl_3 , SiF_4 , SF_6 , CF_2Cl_2 и др.).

В процессе высокотемпературного взаимодействия этих реагентов с кислородом или парами воды получается смесь наноразмерных частичек оксидов. При спекании пористых осадков образуются стекла различного состава с определенным распределением функциональных добавок по слоям. Во всех методах изготовления заготовок используются особо чистые реактивы.

В таблице 1.4 приведены данные по содержанию в них примесей.

Таблица № 1.4

Основные свойства используемых реагентов

Вещество	Т кип, °С	Плотность г/см ³	Переход. металлы,	Водород- содержащие,	Взвешен. частицы,
SiCl_4	57,0	1,48	$<1 \times 10^{-8}$	$<1 \times 10^{-6}$	<1000
GeCl_4	83,1	1,87	$<2 \times 10^{-8}$	3×10^{-6}	<1000
POCl_3	75,2	1,56	$<3 \times 10^{-7}$	3×10^{-7}	<1000
BBr_3	90,9	2,65	$<5 \times 10^{-7}$	3×10^{-7}	<1000
CF_2Cl_2	47,6	1,51	$<4 \times 10^{-8}$	$<1 \times 10^{-4}$	<1000
SiF_4	- 65,0	1,59	$< 10^{-6}$	$<10^{-4}$	<1000

Изменение ПП связано с концентрацией (С, мол. доля) легирующих оксидов по разным источникам следующими зависимостями:

– для германосиликатного стекла $\Delta n = 0,1(1,25 \dots 1,36)C_{\text{GeO}_2}$,

– для фосфоросиликатного стекла $\Delta n = 0,1(0,88 \dots 1,03)C_{\text{P}_2\text{O}_5}$,

– для боросиликатного стекла $\Delta n = - 0,1(0,5C_{\text{B}_2\text{O}_3} + 0,0611C_{\text{B}_2\text{O}_3}^2)$.

При легировании фтором $\Delta n = - 0,004 (\text{ ат. \%})^{-1}$.

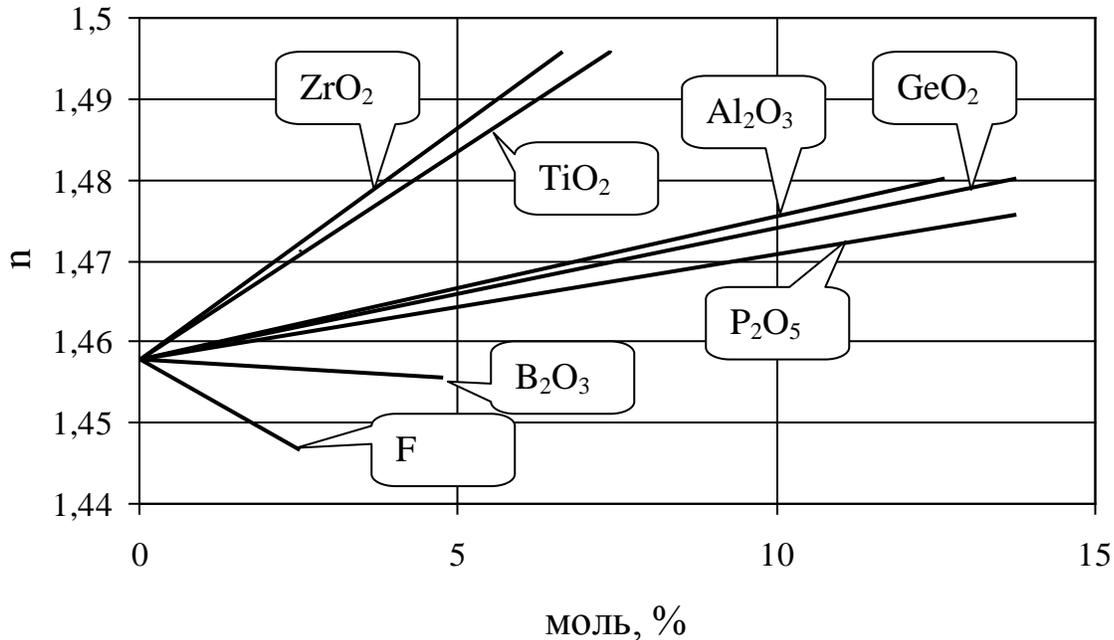


Рис. 1.1 Зависимость показателя преломления кварцевого стекла от содержания легирующих добавок.

Легирование кварцевого стекла фтором происходит за счет его внедрения в наноразмерные частицы диоксида кремния. Относительное изменение ПП при этом пропорционально давлению тетрафторида кремния в степени 1/4 (рис. 1.2).

Ранее предполагалось, что такая закономерность обусловлена равновесием:



где г и к обозначают соответственно газообразное и конденсированное состояние, а р – состояние комплексов $\text{SiO}_{3/2}\text{F}$ в растворенном состоянии.

В этом случае константа равновесия K_p связывает концентрацию атомов фтора в стекле с давлением тетрафторида кремния в степени 0,25.

$$K_p = C_{\text{SiO}_{3/2}\text{F}} / (P_{\text{SiF}_4})^{0,25}$$

Откуда получаем зависимость содержания фтора в стекле от давления тетрафторида кремния:

$$C_{\text{SiO}_{3/2}\text{F}} = K_p (P_{\text{SiF}_4})^{0,25}.$$

Аналогичная зависимость наблюдается и для изменения ПП с давлением фторсодержащих реагентов в исходной парогазовой смеси.

Однако согласно экспериментальным исследованиям при Δn менее 0,001 зависимость ПП от содержания фторирующих газов в исходной смеси становится линейной, особенно при повышенной толщине осаждаемых слоев стекла. Это обусловлено тем, что при малом содержании фтора в частицах диоксида кремния скорость спекания пористых слоев низкая. Поэтому фтор почти полностью внедряется в стекло.

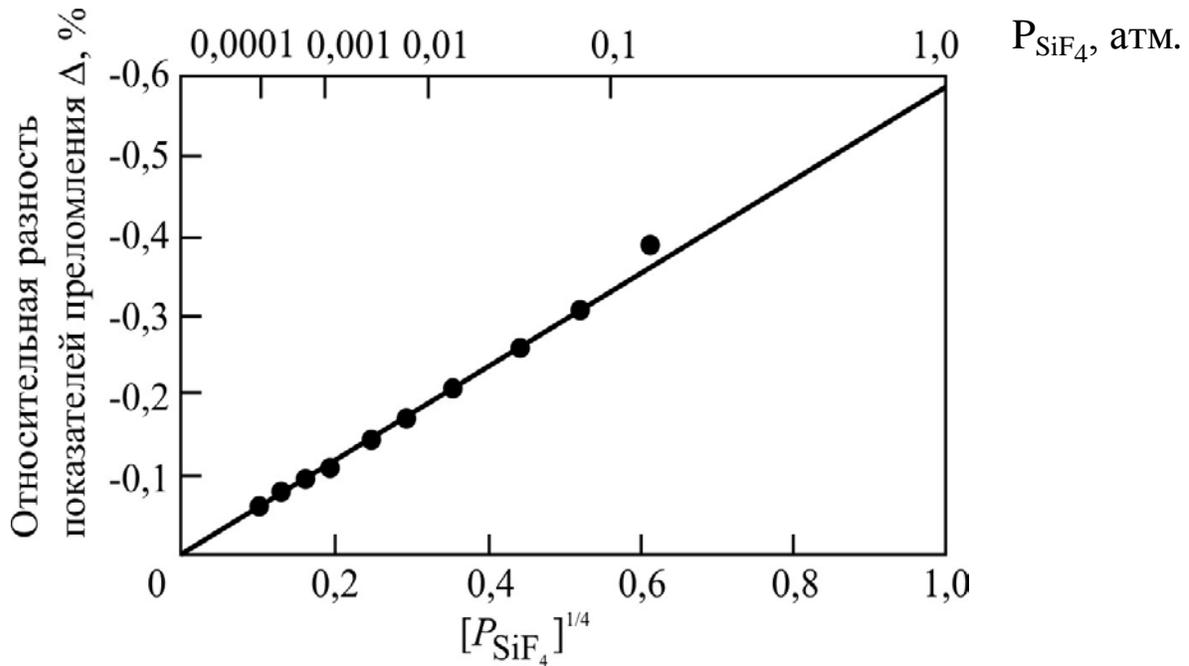


Рис. 1.2 Изменение относительного показателя преломления кварцевого стекла в зависимости от равновесного давления тетрафторида кремния в реакционной зоне.

В результате недавних исследований было установлено, что внедрение фтора в кварцевое стекло определяется не условиями равновесия газовой фазы со стеклом (как ранее предполагалось), а конкуренцией процессов внедрения фтора в частицы SiO_2 и их спеканием. С повышением содержания фторирующего реагента в парогазовой смеси увеличивается содержание фтора в аморфных частицах. Снижается их вязкость, что приводит к увеличению скорости спекания пористых структур (рис. 1.3), блокируя тем самым процесс внедрения фтора в частицы кремнезема.

Здесь уместно отметить, что в условиях плазменного нагрева парогазовой смеси ($SiCl_4 + SF_6 + O_2$) до температур выше температуры кипения диоксида кремния (≈ 3000 °C) фтор внедряется в стекло более эффективно, чем в MCVD процессе. Обусловлено это тем, что в момент образования наночастиц конденсированной фазы SiO_2 (при $t \leq 3000$ °C) скорость растворения фтора в них существенно выше, чем в MCVD процессе (при $t \leq 1300$ °C).

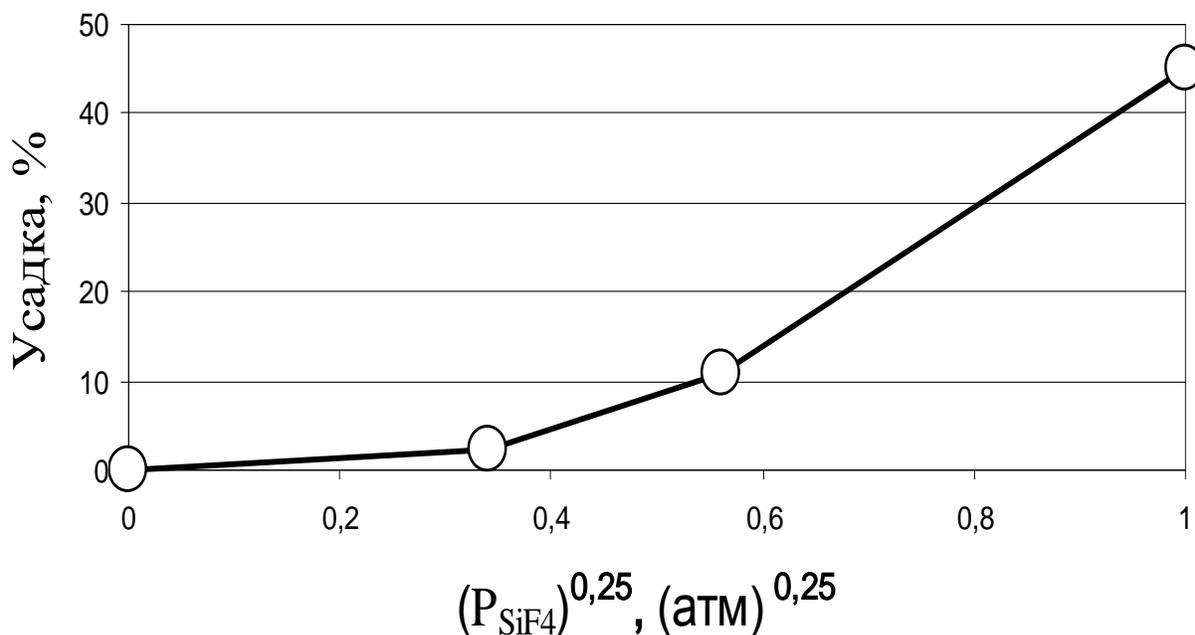


Рис. 1.3 Зависимость усадки пористых образцов из наночастиц SiO_2 , выдержанных в течение 30 минут при 1100°C , от содержания тетрафторида кремния в газовой атмосфере.

В MCVD методе кварцевое стекло можно легировать также и азотом, внедрение которого приводит к повышению ПП, однако предельно возможное его изменение не превышает 0,0015. Отличительной особенностью азотсодержащего кварцевого стекла является то, что оно обладает высокой радиационно-оптической устойчивостью.

Механизм легирования стекла азотом принципиально отличается от процесса легирования его фтором. Фтор активно замещает кислород в стеклообразной сетке кремнезема, в то время как замещение кислорода азотом может происходить только при равновесном давлении кислорода менее 10^{-12} атм, то есть в восстановительных условиях. Поэтому парогазовая смесь не содержит кислород, а SiCl_4 взаимодействует со смесью CO с CO_2 в присутствии азота, давление которого равно 0,8-0,9 атм. Соотношение углеродсодержащих газов обеспечивает требуемое равновесное давление кислорода.

В промышленных масштабах изготовления заготовок световодов используются четыре основные разновидности газофазных процессов:

MCVD - модифицированный методом химического парофазного осаждения (-modified chemical vapor deposition)

OVD - метод наружного парофазного осаждения (outer vapor deposition);

AVD - метод аксиального парофазного осаждения (axial vapor deposition)

PMCV - плазменный метод химического парофазного осаждения (plasma modified vapor chemical deposition).

2 Методы изготовления заготовок световодов

2.1 MCVD метод

Первые обнадеживающие результаты по получению волоконных световодов с малыми оптическими потерями обязаны методу химического парофазного осаждения (CVD), заключающемся во взаимодействии галогенидов с кислородом на внутренней поверхности кварцевой трубки при 1000 °С. Скорость такого процесса была очень низкой.

Поэтому его последующая модификация посредством увеличения температуры реакции на 400-500 °С привела к существенному повышению производительности процесса. При этом реакция с образованием наноразмерных частиц происходила не на поверхности трубки, а в газовой фазе, являясь, таким образом, гомогенным процессом.

Такой модифицированный методом химического парофазного осаждения (MCVD) впервые был опубликован в работах Мак Чесни в 1974 г., Герметичность системы приготовления парогазовой смеси, линии ее транспортировки и реакционной зоны обеспечивает надежную изоляцию реагентов от примесей окружающей среды, что обеспечивает получение особо чистого стекла.

Благодаря уникально широким технологическим возможностям и относительной простоте процесса, этот метод изготовления заготовок световодов сразу получил широкое распространение во всем мире и сегодня является, основным способом для производства ВС сложной конструкции специального назначения.

Сущность MCVD процесса схематически представлена на рисунке 2.1. Парогазовая смесь, состав которой формируется регулируемой подачей сухих газов (BCl_3 , SiF_4 , SF_6 , CF_2C_2) и газов-носителей (кислорода или аргона) через термостатируемые барботеры с легколетучими жидкими реактивами (SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 , VBr_3), разбавляется кислородом и подается внутрь вращающейся кварцевой трубы.

Расход парообразного реагента (Q_x) зависит от расхода газа-носителя (Q_{O_2}) следующим образом:

$$Q_x = Q_{O_2} \left(\frac{P_x}{1-P_x} \right),$$

где P_x равновесное давление паров жидкого реагента при температуре его барботажа.

Такой способ введения реагента приводит к тому, что поток газа на выходе из испарителя ($Q_x + Q_{O_2}$) выше, чем при входе в него (Q_{O_2}), а на испарение затрачивается тепловая энергия, приводящая к снижению температуры жидкого реагента. Для стабилизации его температуры испарители термостатируются.

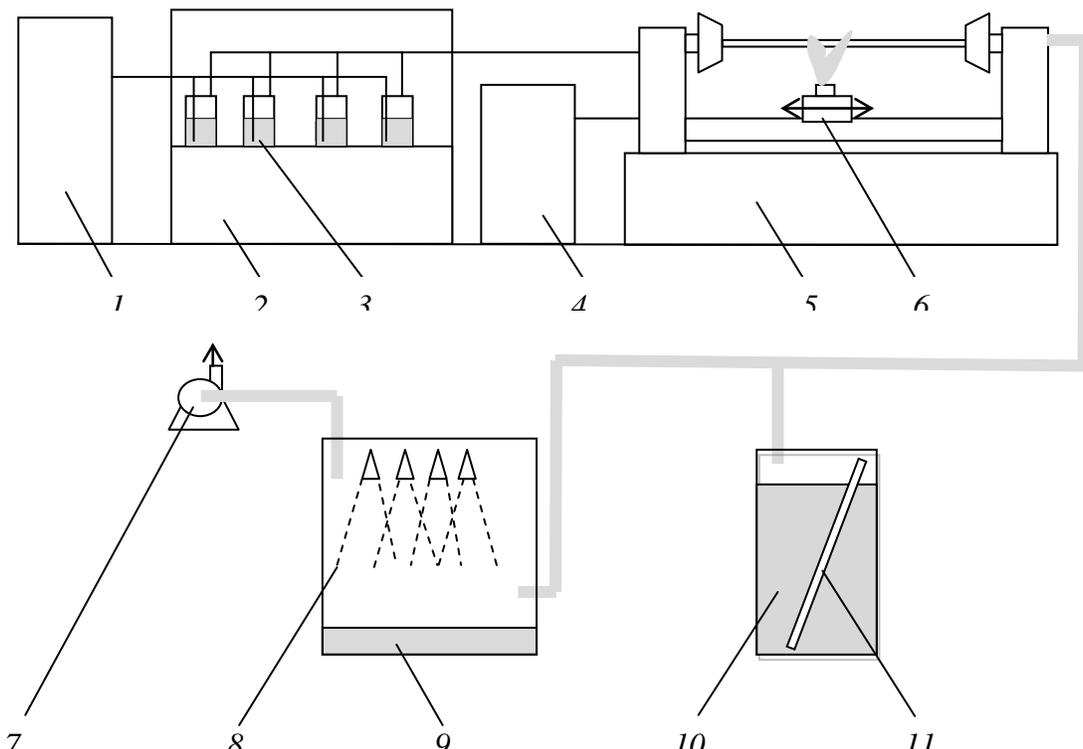


Рис. 2.1 Принципиальная схема технологической установки для изготовления заготовок световодов методом MCVD.

1- пульт управления термохимическим блоком; 2- термохимический блок; 3- испаритель; 4- пульт управления тепломеханическим станком; 5 – тепломеханический станок; 6- газовая горелка; 7- вытяжной вентилятор; 8- скруббер; 9 – щелочной раствор, 10 – сосуд с кислотой для травления труб, 11- опорная труба.

В таблице 2.1 приведены равновесные давления хлоридов при температуре барботирования жидких реагентов, равной 25 °С. Высокое равновесное значение BCl_3 , равное 1,2 атм, позволяет управлять его расходом, используя электронные регуляторы.

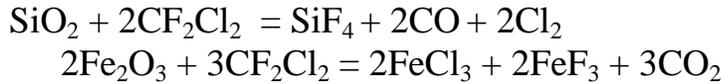
Таблица № 2.1

Равновесное давление пара жидких реагентов

Реагент	P_x , атм.
SiCl_4	0,3
POCl_3	0,05
BBr_3	0,08
BCl_3	1,2
GeCl_4	0,12

Для изготовления заготовок используются кварцевые трубки высокого качества, как по стабильности геометрических параметров (обычно с наружным диаметром $20 \pm 0,2$ мм и толщиной стенки $2 \pm 0,05$ мм), так и по чистоте материала. До установки

трубки на станок она подвергается травлению в 10 % растворе фтористоводородной кислоты (позиция 10 на рис. 2.1), промывке в дистиллированной воде и сушке. После установки трубки в зажимные устройства тепломеханического станка ее внутренняя поверхность подвергается высокотемпературному травлению смесью фторсодержащих газов (SF_6 или CF_2Cl_2) с кислородом при температуре 800-1700 °С. При этом атомы красящих примесей (преимущественно железа) и кремний газифицируются, превращаясь в галогениды по реакции:



В процессе газификации примеси и фторид кремния удаляются газовым потоком в нейтрализатор вредных веществ (скруббер).

Интересной особенностью процесса газофазного травления кварцевого стекла (рис. 2.2) является увеличение массы трубы при малых расходах фреона (30 мл/мин) и высоких температурах (1700 °С). Значит, наряду с травлением стекла происходит внедрение в него фтора, причем второй процесс доминирует при малых концентрациях фреона и высоких температурах.

Внутри трубки после газофазной очистки ее внутренней поверхности подается парогазовая смесь. Трубка нагревается до температуры 1300 - 1500 °С перемещающейся со скоростью 2-3 мм/с газовой горелкой. В зоне нагрева происходит реакция с образованием наноразмерных частиц.

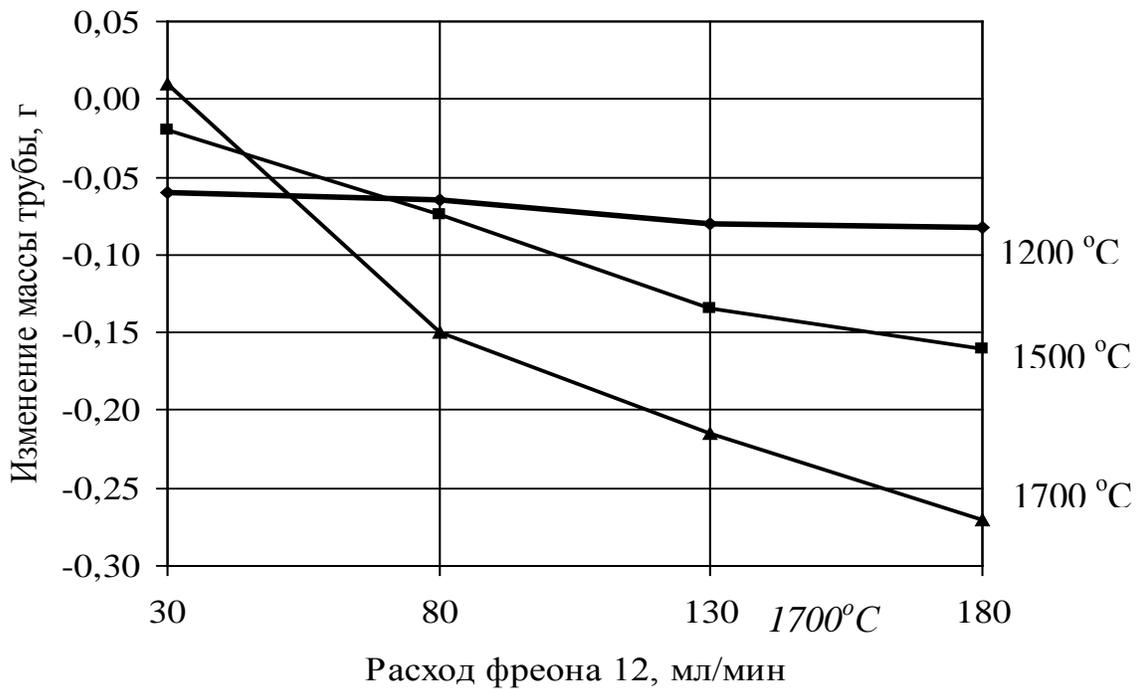


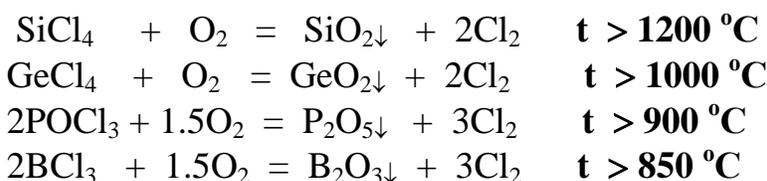
Рис. 2.2 Изменение массы трубы в зависимости от температуры и расхода

фреона-12 при травлении.

Образующиеся тонкодисперсные частицы оксидов осаждаются на внутреннюю поверхность трубки и спекаются до прозрачного состояния. После нанесения необходимого количества стеклообразных слоев оболочки и сердцевины трубка нагревается до температуры 2000-2150 °С горелкой, перемещающейся с малой скоростью (0.2 - 0.5 мм/с). Силы поверхностного натяжения сжимают (коллапсируют) трубку так, что за два или три прохода горелки она превращается в штабик – заготовку.

Высокий уровень стабильности толщины и состава осаждаемых слоев обеспечивается точностью регулирования скорости перемещения горелки ($\approx 0,2\%$), расходов газов-носителей (менее 2%) и температуры испарителей (менее 0,5 °С).

Взаимодействие парообразных галогенидов с кислородом в зоне реакции определяется константами следующих равновесных процессов:



Температура начала реакций снижается в ряду SiCl_4 - GeCl_4 - POCl_3 - BCl_3 с 1200 до 850 °С. При добавлении в парогазовую смесь, содержащую кислород и SiCl_4 , паров GeCl_4 , POCl_3 или BCl_3 температура начала взаимодействия тетрахлорида кремния с кислородом снижается.

В справочной литературе Интернет ресурса [5] табулированы значения стандартного изменения свободной энергии образования веществ (ΔF_i°), на основании которых можно определить значение стандартного изменения свободной энергии (ΔF_T°) для этих реакций:

$$\Delta F_T^\circ = [r(\Delta F_R^\circ) + s(\Delta F_S^\circ)] - [a(\Delta F_A^\circ) + b(\Delta F_B^\circ)],$$

где ΔF_R° , ΔF_S° , ΔF_A° , ΔF_B° справочные значения стандартного изменения свободной энергии образования исходных (А, В) веществ и продуктов реакции (R, S) с соответствующими стехиометрическими коэффициентами (a, b, r, s).

Далее на основании ΔF_T° можно определить константу равновесия реакции (K), позволяющую оценить степень превращения веществ:

$$\Delta F_T^\circ = - RT \ln K_p,$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Термодинамические расчеты показывают, что в условия MCVD процесса все галогениды, за исключением GeCl_4 , полностью превращаться в оксиды. Однако, степень превращения хлорида германия в GeO_2 (α), рассчитанная по приведенному ниже уравнению, существенно снижается с увеличением температуры и уменьшением содержания кислорода в реакционной зоне:

$$K_p = \frac{a_{\text{GeO}_2} \times (2P_{\text{SiCl}_4} + 2\alpha P_{\text{GeCl}_4})^2}{(1-\alpha) P_{\text{GeCl}_4} \times P_{\text{O}_2}},$$

где a_{GeO_2} – термодинамическая активность GeO_2 , равная его мольной концентрации, P_i – давление газов в исходной парогазовой смеси.

В MCVD процессе время реакции ограничено длительностью пребывания реагентов в реакционной высокотемпературной зоне. Поэтому степень превращения галогенидов в оксиды определяется также кинетическими параметрами.

Радиальный температурный градиент в прореагировавшей парогазовой смеси за зоной реакции в условиях горячий газ – холодная стенка способствует эффективному осаждению оксидных частиц за зоной нагрева трубки пламенной горелкой (рис. 2.3). Такое явление называется термофорезом. Оно заключается в том, что момент количества движения газообразных молекул, ударяющихся в частицу со стороны повышенных температур реакционной зоны (T_p) больше, чем от соударения молекул со стороны холодного газа.

Эффективность осаждения частиц (E) зависит от температуры реакционной зоны (T_p) и температуры стенки кварцевой трубки (T_o):

$$E \approx 0,8(1 - T_o/T_p)$$

На эффективность осаждения тонкодисперсных оксидов существенно влияет T_o , которая определяется толщиной стенки трубы, скоростью перемещения горелки, длиной пути ее сканирования, условиями охлаждения трубки и мало зависит от скорости парогазового потока и диаметра трубки.

Здесь, однако, следует отметить, что в самой реакционной зоне термофорез действует противоположным образом, перемещая частицы в ядро потока. По этой причине содержание компонентов в зоне осаждения наночастиц за горелкой не постоянно. В начальной зоне осаждения состав пористого слоя обогащен SiO_2 а далее по длине зоны осаждения увеличивается содержание GeO_2 или P_2O_5 . Поэтому на радиальном профиле показателя преломления заготовки в слоях легированного кварцевого стекла наблюдается пилообразная структура. Для снижения такой неоднородности используют два приема:

- снижают толщину осаждаемых слоев или
- производят их гомогенизацию посредством высокотемпературной обработки при избыточном внутри трубки давлении, предотвращающим ее сжатие.

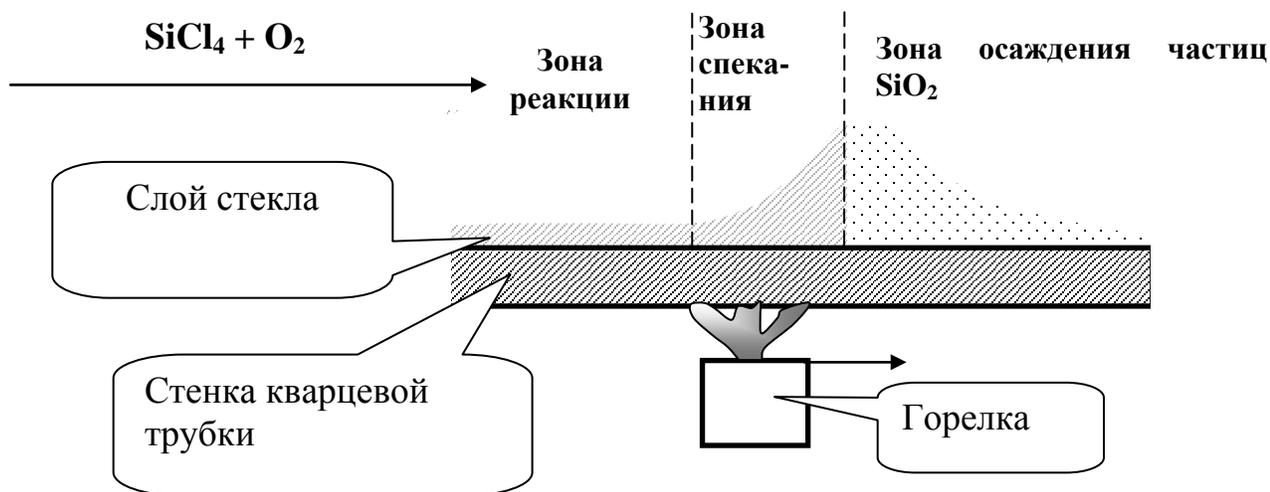


Рис. 2.3 Схема процесса образования и осаждения частиц.

Толщина осаждаемых слоев и условия их спекания оптимизируются во избежание образования пузырей в синтезированной стекломассе при коллапсировании трубки в штабик-заготовку.

Процесс высокотемпературного сжатия трубки с нанесенными слоями осуществляется при высокой температуре 2000-2150 °С, в связи с чем возникает необходимость решения трех основных проблем:

- первая заключается в деформации трубки из-за низкой вязкости кварцевого стекла и сложности сохранения круглой формы заготовки,
- вторая связана с массоуносом стекла, обусловленным его испарением,
- третья проблема – это наличие «провала» ПП в центре сердцевины (рис. 2.4) из-за повышенной летучести GeO₂.

%

Указанные проблемы устраняются следующими методами.

Для стабилизации круглой формы заготовки и её внутренних слоев необходимо оптимизировать в зависимости от её состава и структуры температуру и ширину зоны нагрева при коллапсировании трубки. Эллиптичность сердцевины можно предотвратить, если на окончательном этапе сжатия трубки в штабик внутри

неё поддерживать избыточное давление в несколько миллиметров водного столба (рис. 2.5).

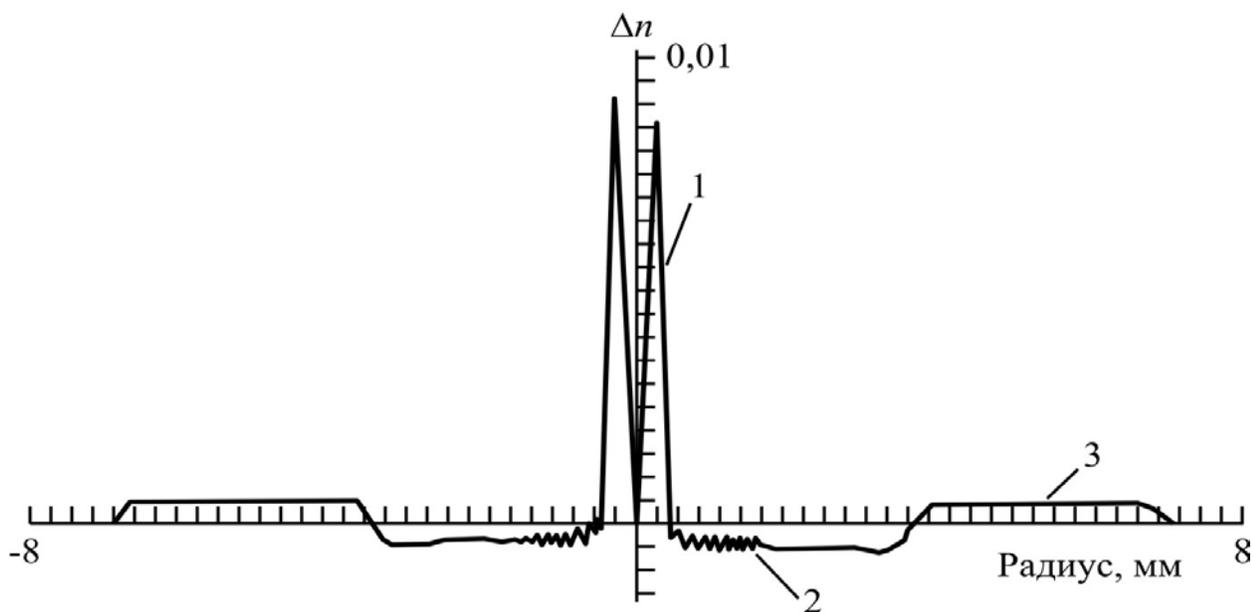


Рис. 2.4 Радиальный профиль показателя преломления в заготовке.

1 - германосиликатная сердцевина, 2-оболочка, легированная фтором и фосфором, 3- стекло опорной кварцевой трубы.

В процессе высокотемпературного коллапсирования заготовки может испариться до 15 % стекла. Степень массоуноса существенно зависит от окислительного потенциала пламени: с увеличением содержания кислорода его величина может быть уменьшена в несколько раз. Это обусловлено высокотемпературной диссоциацией кремнезема:



где (κ) и (ζ) обозначает соответственно конденсированное и газообразное состояние.

Из приведенного уравнения видно, что при увеличении парциального давления кислорода в пламени реакция смещается влево, снижая тем самым массовый расход оксида кремния. Таким образом, изменяя соотношения расходов кислорода и водорода в горелке можно направленно снижать массоунос заготовки в процессе ее высокотемпературной обработки. Эксперименты показывают, что при постоянной температуре нагрева стекла массоунос можно снизить с 15 до 5 %, за счет увеличения содержания кислорода в кислородо-водородной горючей смеси.



Рис. 2.5 Влияние давления внутри трубки в процессе коллапсирования на эллиптичность сердцевины.

Третья проблема процесса коллапсирования, приводящая к «провалу» показателя преломления по оси сердцевины, решается двумя основными подходами.

Первый заключается в подавлении испарения легколетучего оксида посредством введения внутрь трубки кислорода с малым содержанием паров галогенида легирующего элемента (GeCl_4).

Второй способ более эффективный: он заключается в газофазном травлении фторсодержащими газами внутреннего слоя сердцевины, обедненной легирующей добавкой, после предварительного высокотемпературного сжатия заготовки до диаметра внутреннего канала, равного 3-4 мм (рис. 2.6).

Второй способ устранения «провала» показателя преломления по сравнению с первым обеспечивает снижение оптических потерь германосиликатной сердцевины, особенно при высоком содержании в ней диоксида германия.

Особую сложность в MСVD технологии представляет устранение ОН- групп, наличие которых приводит к повышенным оптическим потерям в спектральной области прозрачности кварцевого стекла (1,3-1,6 мкм). Имеется два основных источника этой водородсодержащей примеси: опорные кварцевые трубы и кислород, используемый в качестве газа-носителя.

В соответствии с реакцией взаимодействия кварцевого стекла с парами воды ($\text{H}_2\text{O} + \equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv = 2 [\equiv\text{Si}-\text{OH}]$) содержание ОН групп в стекле пропорционально давлению паров воды в степени 0,5. То есть при снижении содержания паров воды в газовой фазе в 100 раз концентрация ОН групп в стекле уменьшится в 10 раз.

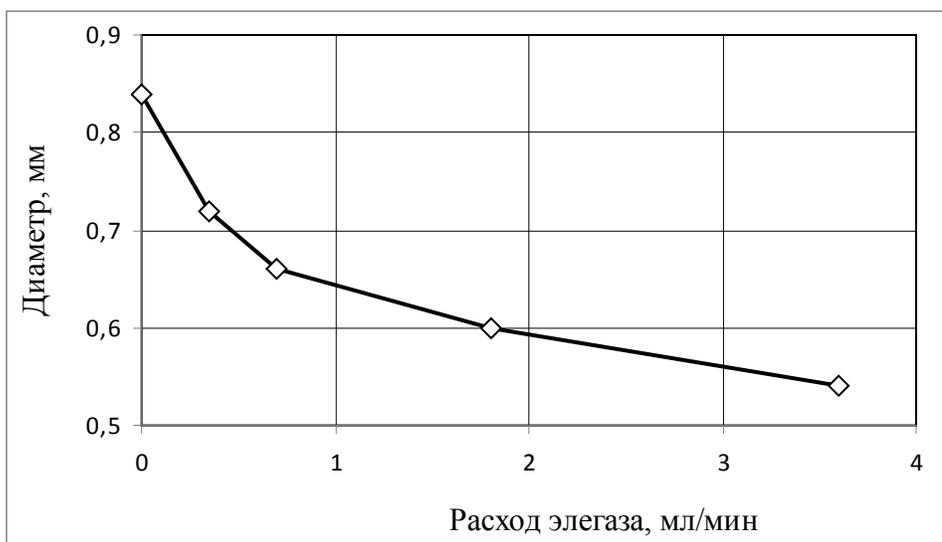
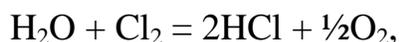


Рис. 2.6 Влияние расхода SF_6 на диаметр сердцевины в процессе сжатия трубки при $1800\text{ }^\circ\text{C}$ и скорости перемещения горелки 20 мм/мин .

Снижение содержания этой примеси в сердцевине световода обеспечивается следующими приемами:

- кварцевые трубы предварительно отжигаются при $900\text{-}1000\text{ }^\circ\text{C}$, что приводит к уменьшению концентрации в стекле свободного водорода и ОН групп,
- на внутреннюю поверхность трубки наносится довольно толстый слой изолирующей оболочки, подавляющий диффузию водорода в сердцевину,
- водородсодержащие примеси в кислороде дожигаются на катализаторе при температуре более $400\text{ }^\circ\text{C}$, после чего образовавшаяся влага поглощается молекулярным ситом,
- высокотемпературное сжатие трубки осуществляется с продувкой внутреннего канала сухим кислородом, содержащим хлор, который переводит в HCl пары воды, оставшиеся в кислороде после окисления водородсодержащих примесей и его сушки:



снижая тем самым внедрение молекул воды в стекло (рис. 2.7),

- в процессе коллапсирования заготовки ее внутренний канал продувают кислородом, с малыми добавками веществ, содержащих дейтерий, что приводит к выводу полос поглощения группами ОН из оптического спектра прозрачности кварцевого стекла (таблица 2.2).

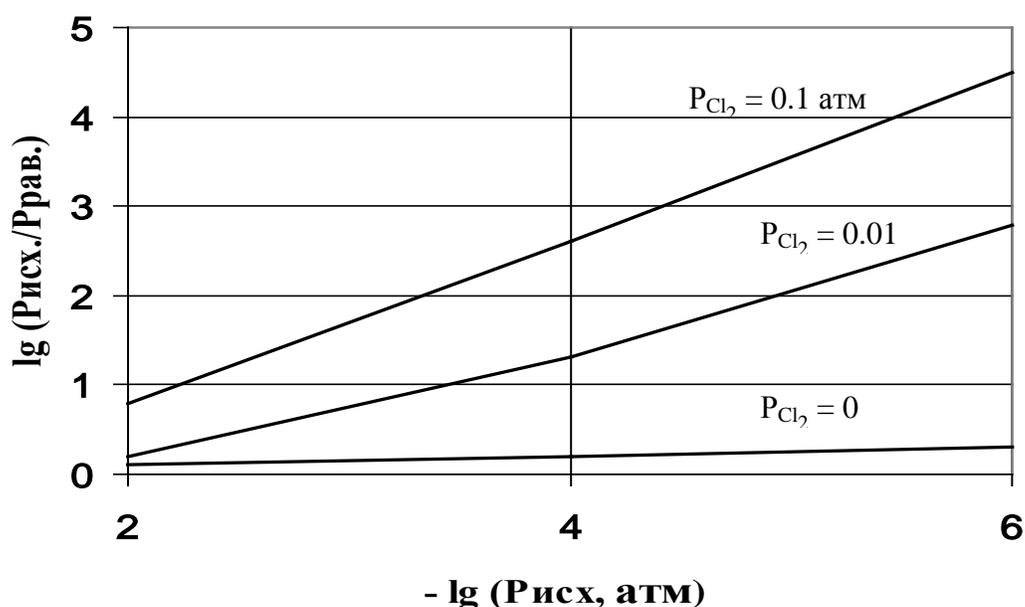


Рис. 2.7 Влияние исходного давления паров воды ($P_{\text{исх.}}$) и хлора на равновесное давление паров воды ($P_{\text{рав.}}$) в кислороде при температуре 2500 К.

Таблица 2.2

Характеристика поглощения колебаниями ОН и ОД в кварцевом стекле.

Тип колебаний	ОН Второй обертон	ОН Комбинац. колебания	ОН Первый обертон	ОД Второй обертон	ОД Комбинац. колебания
Длина волны, мкм	0,95	1,25	1,38	1,26	1,65
Интенсивность, дБ/км ppm	1	2	50	1	2

2.2 Методы изготовления заготовок на основе парофазного гидролиза

Два других метода изготовления заготовок световодов основаны на высокотемпературном гидролизе сырьевых галогенидов в пламени горелки:

- метод наружного парофазного осаждения (OVD), представленный на рисунке 2.8 и

- метод аксиального парофазного осаждения (AVD), - на рисунке 2.9.

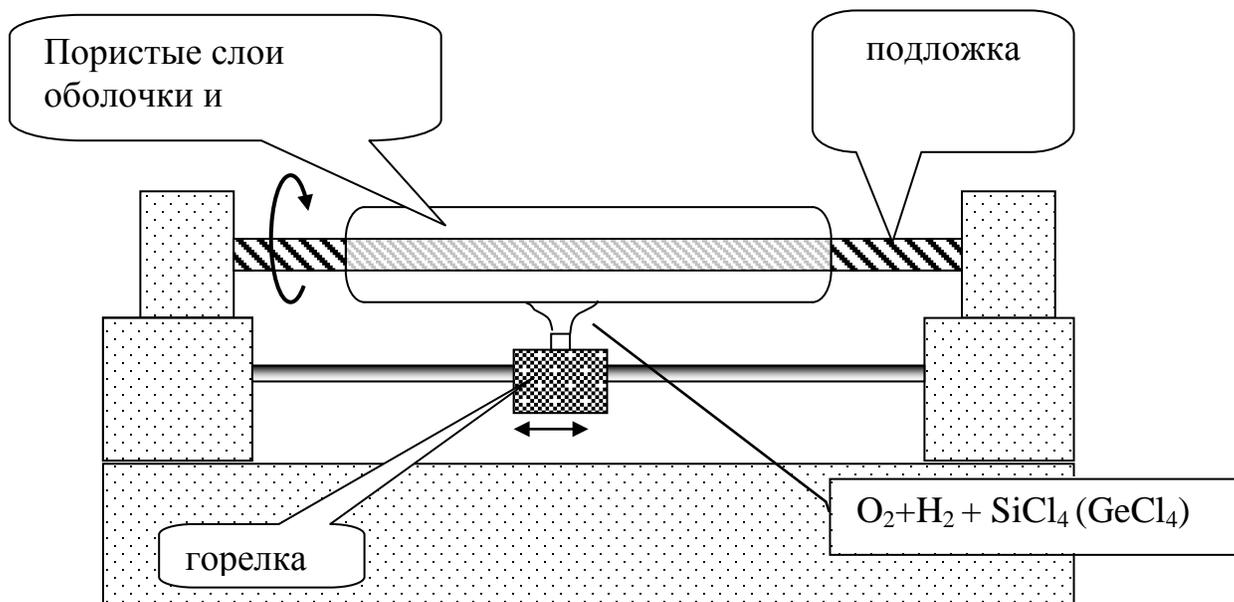


Рис. 2.8 Принципиальная схема OVD процесса.

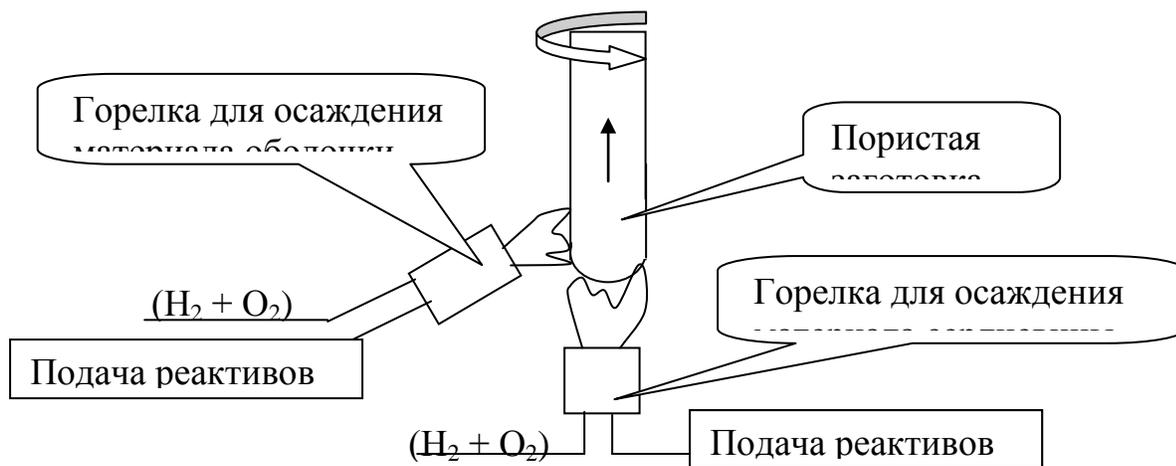
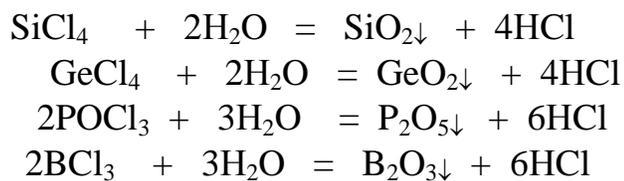


Рис. 2.9 Принципиальная схема AVD процесса.

В этих методах частицы оксидов образуются по следующим химическим реакциям:



Первый метод широко распространен в США, в то время как AVD процесс является основной технологией изготовления световодов в Японии. OVD метод заключается в осаждении частиц на поверхность вращающейся цилиндрической подложки, вдоль которой горелка совершает возвратно-поступательные движения. Так получается насыщенная влагой пористая цилиндрическая заготовка с сформированными слоями сердцевины и оболочки. Влага из неё удаляется обработкой в атмосфере сухих газов (аргона или гелия), содержащих кислород, при 1000 °С. Для снижения содержания влаги в пористой заготовке в газовую смесь добавляют хлор, 1 % добавки которого приводит к снижению влагосодержания в стекле 10-100 раз. Остекловывание пористых заготовок производят при 1500 °С. При этом поры исчезают, заготовка становится прозрачной. Внутренний канал закрывается в процессе высокотемпературной вытяжки волокна при температура более 2000 °С. В качестве подложки используются графитовые стержни или трубки из оксида алюминия. Удаление с них пористой заготовки представляет определенные трудности. В связи с этими проблемами подложки предложено получать карбонизацией бумажных тонкостенных цилиндров (нагревом в инертной среде с их превращением в углеграфитовый материал), которые после осаждения пористого слоя выжигаются в токе кислорода. Сущность AVD метода изготовления заготовки (рис. 2.9). заключается в осаждении оксидных частиц на торцевую часть вращающейся пористой заготовки, которая по мере её напыления медленно поднимается, сохраняя постоянной величину зазора между горелкой и поверхностью осаждения. В этом способе важен высокий уровень точности регулирования температуры осаждения и расстояния между горелкой и поверхностью осаждения наночастиц. Затем также как и в OVD методе следуют процессы сушки и спекания. Полученная таким образом прозрачная заготовка в отличие от предыдущих методов не имеет внутреннего канала. Благодаря этому, диоксид германия, находящийся в сердцевине, не восстанавливается, как в условиях MCVD и OVD процессов высокотемпературного сплавления внутреннего канала. Поэтому только AVD методом достигаются самые низкие оптические потери в одномодовых германийсодержащих световодах. Методы OVD и AVD позволяют изготавливать заготовки массой до нескольких килограмм, что дает возможность вытягивать световоды для линий дальней связи стандартного диаметра 125 мкм длиной более 100 км. В России в настоящее время планируется освоить крупномасштабное производство одномодовых световодов для линии связи с использованием «send» технологии, включающей изготовление MCVD или AVD методом предзаготовки с увеличенным диаметром сердцевины и последующим ее сплавлением с кварцевой трубкой из особо чистого кварцевого стекла. Зазор между кварцевой трубкой и предзаготовкой заполняется кварцевой крупкой и вакуумируется до остаточного давления не более 10^{-3} мм рт. ст. От предыдущих методов этот способ выгодно отличается высокой производительностью и малыми затратами, не уступая им по оптическим и прочностным свойствам световодов.

2.3 PMCVD метод изготовления заготовок

Плазменный метод химического парофазного осаждения (PMCVD) отличается от традиционного MCVD метода способом нагрева парогазовой смеси и наличием высокочастотного генератора инициирующего возбуждение плазмы в реакционной зоне.

Высокие температуры нагрева парогазовой смеси в этом методе способствуют повышению эффективности процесса осаждения оксидов по сравнению с пламенным нагревом трубки.

В методе PMCVD (plasma modified chemical vapor deposition) мощность ВЧ-генератора обычно составляет ~ 20 кВт, мощность в разряде ~ до 12 кВт. Частота генератора лежит в диапазоне 13-27 МГц (оптимальная частота ~ 20 МГц). Опорная кварцевая трубка диаметром до 40...50 мм, располагается внутри индуктора и совершает возвратно-поступательные движения аналогично движению горелки в методе MCVD (рис. 2.10).

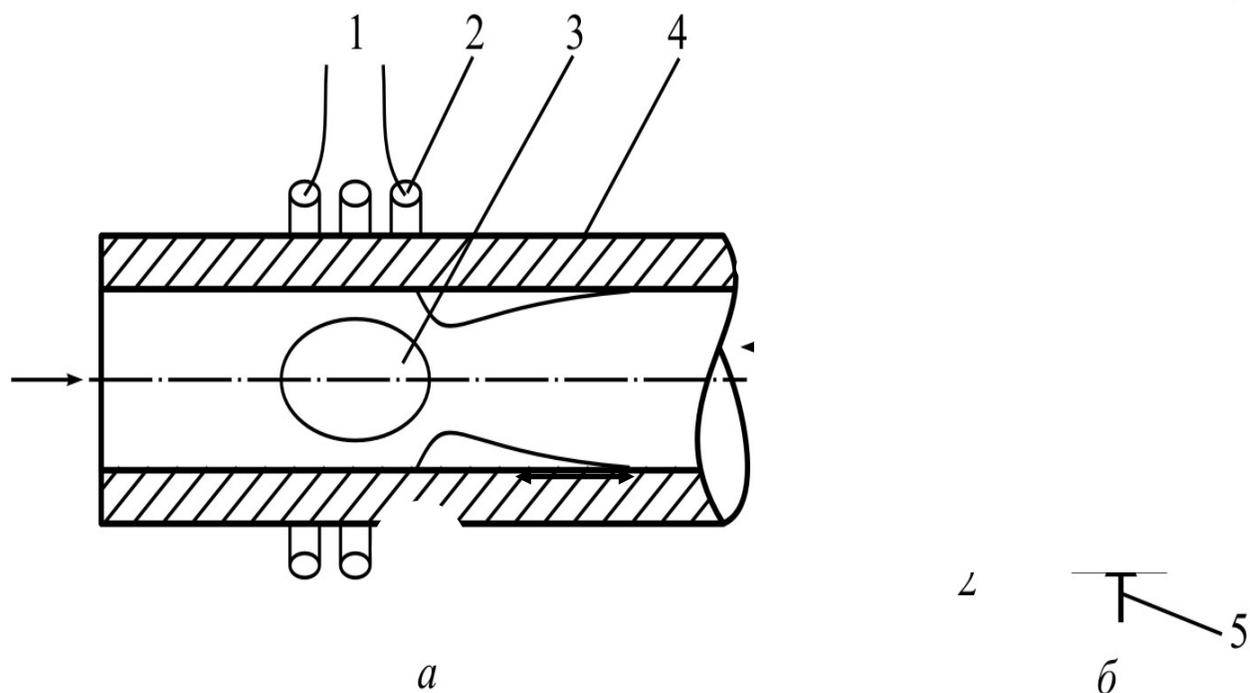


Рис. 2.10 PCVD метод изготовления заготовок.

1 -индуктор, 2-подача охлаждающей воды в индуктор, 3- высокотемпературная плазма. 4- трубка из кварцевого стекла, сканирующая относительно индуктора.

Пары SiCl_4 вместе с кислородом и парами галогенидов легирующих компонентов (GeCl_4 , POCl_3 , CCl_2F_2 , SF_6 и др.) поступают в опорную трубку.

При средней температуре плазмы 4000...5000 °С почти все молекулы диссоциируют на отдельные атомы. На выходе из плазмы они образуют частички оксидов, которые осаждающиеся на стенках трубки.

Из-за высокой разности температур оси плазмы (~ 10 000 °С) и стенки трубки существенно повышается эффективность термофореза по сравнению с MCVD процессом.

Степень образования и осаждения оксидов увеличивается до 90 % для SiO_2 и до 85 % для GeO_2 .

В этом методе достигается также высокий уровень легирования кварцевого стекла фтором: до 5 мас. % вместо 2 мас. % в альтернативных методах, использующих пламенный источник нагрева.

Однако в методе PMCVD не обойтись без пламенных источников нагрева, так как после осаждения слоев опорная трубка так же как и в MCVD методе подвергается высокотемпературному сжатию в штабик-заготовку с использованием кислородно-водородной горелки.

Недостатком метода PMVD является то, что параметры разряда (соответственно плазмы) в значительной степени зависят от состава парогазовой смеси.

Это существенно ограничивает его технологические параметры, исключая возможность получение заготовок световодов со сложным профилем показателя преломления.

Поэтому этот метод используется в основном для получения заготовок световодов со ступенчатым профилем показателя преломления, которые имеют в настоящее время ограниченное применение.

3 Технология вытягивания световодов из заготовок

Оборудование и технология вытягивания световодов практически не отличаются для заготовок изготовленных разными методами.

Разнообразие самого процесса вытягивания кварцевых световодов заключается в диаметре стекловолокна и способах нанесения защитно-упрочняющего покрытия. В качестве покрытий чаще всего используют эпоксиакрилатную композицию, отверждаемую ультрафиолетовым излучением.

Иногда для повышения долговечности волокна перед нанесением полимерного покрытия на него наносят тонкий (менее 1 мкм) слой пироуглерода.

Этот слой изолирует волокно от влаги, замедляя тем самым процесс роста поверхностной трещины до критического состояния. В ряде случаев, для повышения прочности волокна и температуры его эксплуатации используют покрытие из металлов (олова, свинца, алюминия, меди и, даже, золота).

Тепловая обработка волокна с эпоксиакрилатным покрытием при 300-350 °С в инертной среде приводит к карбонизации покрытия и к десятикратному повышению долговечности световода. Эксплуатация таких световодов возможна при температурах вплоть до 200-250 °С. Принцип вытяжки волокна заключается в нагреве заготовки в печи до температуры размягчения кварцевого стекла и вытягивании из нее тонкой нити.

Охлаждаясь на воздухе, кварцевая нить быстро твердеет и перестает удлиняться, что обеспечивает возможность получения волокон с постоянным по длине диаметром. Соотношение между диаметром заготовки и волокна определяется из уравнения баланса масс переработанной заготовки и вытянутого волокна:

$$D_{\text{заг}}^2 V_{\text{заг}} = d_{\text{вол}}^2 V_{\text{вол}},$$

где $D_{\text{заг}}$ и $d_{\text{вол}}$ – диаметры заготовки и волокна, соответственно, $V_{\text{заг}}$ и $V_{\text{вол}}$ скорости подачи заготовки и вытяжки волокна, соответственно.

Процесс вытягивания волокна на установке, схематично изображенной на рисунке 3.1 состоит из следующих операций:

- Подготовки заготовки, заключающейся в ее травлении в 10 % растворе плавиковой кислоты, промывке в дистиллированной воде и сушке.

Зажиме заготовки в кулачках патрона подающего механизма.

- Разогреве печи до 2000 °С.

- Введении конца заготовки в печь.

- Оттяжки размягченного конца заготовки из печного пространства штабиком из кварцевого стекла.

- Проведении вручную или механизмом предварительной оттяжки волокна по всему вытяжному тракту.

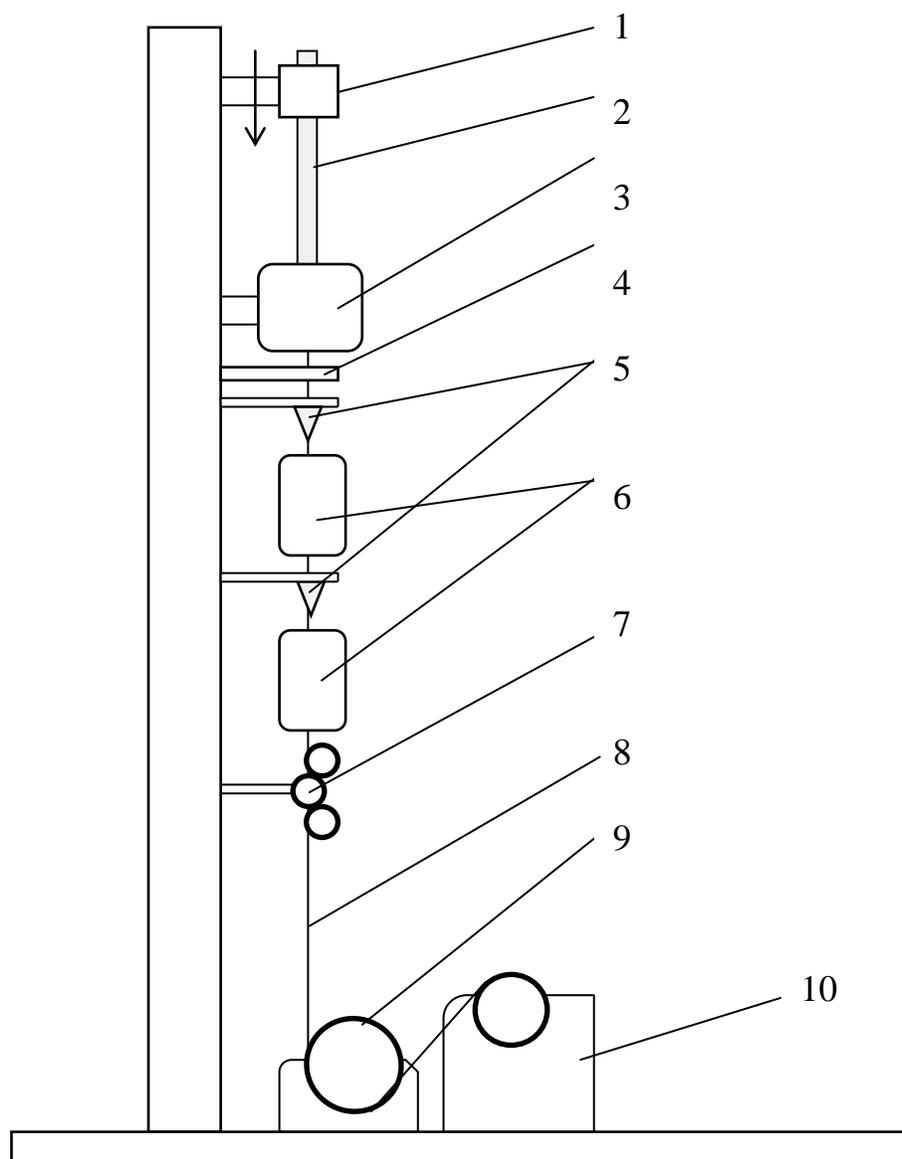


Рис. 3.1 Схема установки для вытягивания волокна.

1- система подачи заготовки, 2 – заготовка, 3 - высокотемпературная графитовая печь, 4 - датчик диаметра волокна, 5- фильера для нанесения эпоксиакрилатного покрытия, 6- ультрафиолетовая печь для отверждения покрытия, 7- датчик натяжения волокна, 8- световод, 9- тянущее устройство с датчиком скорости вытягивания волокна, 10- узел намотки световода на катушку.

- Заправки волокна в тянущее устройство.
- Включении автоматического режима вытягивания волокна заданного диаметра.
- Включении УФ отверждаемой печи.
- Заливки жидким полимером фильерных узлов.
- Юстировки фильерного узла для достижения концентричности покрытия.
- Заправки световода в намоточное устройство.
- Проведении процесса вытягивания.
- Остановки процесса вытягивания при получении необходимого количества волокна.

При отработке режимов вытягивания волокна контролируют величину его натяжения (5-10 г.), которая существенно влияет на прочность световодов.

В ряде случаев для уменьшения оптических потерь световодов с германосиликатной сердцевиной усилие вытягивания доводят до 100 г., что, однако, несколько ухудшает прочностные характеристики кварцевого волокна.

Для снижения дополнительных оптических потерь за счет микроизгибов намотанного на катушку оптического волокна практикуют двухслойное УФ отверждаемое покрытие.

Первый слой в этом случае состоит из мягкого полимера с модулем Юнга (Е), равным 1-20 МПа, а второй – из более жесткого эпоксиакрилата с Е, равным 0,1-4 ГПа.

В качестве высокотемпературной печи используют либо печь с графитовым нагревателем, работающим в атмосфере инертного газа (аргона), либо печь с нагревателем из стабилизированной двуокиси циркония, работающим на воздухе, т.е. в окислительной среде.

Во втором случае получают более прочные световоды.

4 Свойства кварцевых световодов

4.1 Оптические потери

Световод на основе кварцевого стекла состоит из круглой сердцевины с показателем преломления n_1 и круглой оболочки с показателем преломления n_2 (рис. 4.1). Луч света, падающий под углом Q_1 на границу раздела двух сред, отражается под тем же углом и преломляется под углом Q_2 , соответствующим закону преломления Снеллиуса :

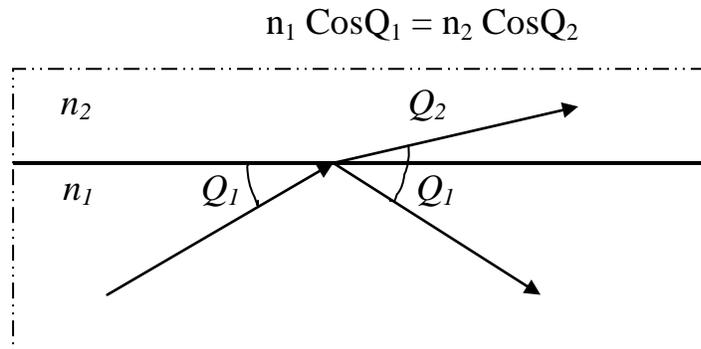


Рис. 4.1 Отражение и преломление луча на поверхности границы раздела сердцевина-оболочка.

При Q_2 равном нулю наступает явление полного внутреннего отражения – вся энергия падающего луча переходит в отраженный. Свет, падающий на световод под углом $Q_1 \leq \arccos(n_2/n_1)$ распространяется только внутри сердцевины оптического волокна.

На рис. 4.2 представлена типичная структура поперечного сечения волоконного световода, состоящего из сердцевины, отражающей оболочки и полимерного защитного покрытия.

Существует, в основном, три типа световодов, изготавливаемых на основе особо чистого кварцевого стекла методами парофазного осаждения. Отличаются они в основном радиальным профилем показателя преломления и диаметром сердцевины:

- многомодовые волоконные световоды со ступенчатым профилем показателя преломления,
- многомодовые световоды с градиентным профилем и
- одномодовые с диаметром сердцевины существенно меньшим, чем у многомодовых оптических волокон.

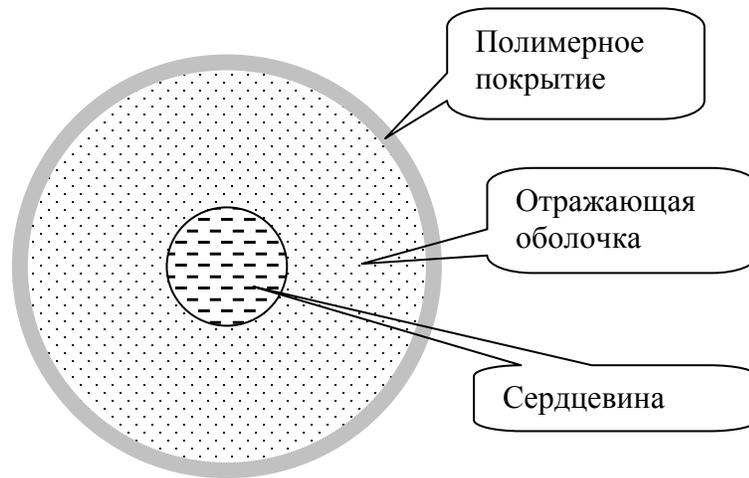


Рис. 4.2 Структура поперечного сечения световода.

Число мод, распространяющихся в многомодовом ОВ со ступенчатым профилем ПП, определяется уравнением

$$N = V^2/2,$$

где V – так называемая нормализованная частота, равная:

$$V = (\pi d_C NA^2) / \lambda = \pi d_C (2n \Delta n)^{1/2} / \lambda,$$

где d_C – диаметр сердцевинки в волокне, λ – длина волны, NA – числовая апертура волокна, n – ПП кварцевого стекла, Δn – разность ПП материалов сердцевинки и светоотражающей оболочки.

Число мод, распространяющихся в градиентном многомодовом световоде, определяется как:

$$N = V^2/4,$$

т. е. в 2 раза меньше, чем в световоде со ступенчатым профилем показателя преломления при одинаковых значениях NA .

Большое количество мод в многомодовом световоде приводит к уширению во времени импульса светового сигнала из-за разной скорости их распространения. Это явление существенно снижает объемы передаваемой информации. В одномодовых же световодах такое явление не происходит. Поэтому последний тип световодов широко используется как для линий дальней связи, так и для разного рода датчиков.

Диаметр сердцевинки d_C одномодовых, волоконных световодов со строго ступенчатой формой радиального профиля определяется из условия:

$$V = \pi d_c(\text{NA})/\lambda = \pi d_c(2n \Delta n)^{1/2}/\lambda = 2,405,$$

При V менее 2,405 возможно распространение только одной моды LP_{01} , состоящей из двух ортогонально поляризованных компонент. Длина волны света, при которой наступает одномодовый режим его распространения, называется длиной волны отсечки высших мод и обозначается λ_c .

Степень прозрачности световодов определяется таким параметром, как оптические потери, который рассчитывается на основании соотношения мощностей входящего и выходящего из оптического волокна света:

$$\alpha = -[10 \lg(I/I_0)]/L,$$

где: α - оптические потери (дБ/км); I , I_0 –соответственно интенсивность выходящего и входящего в волокно излучения; L – длина световода, км.

Принципиальная схема установки для измерения спектральной зависимости оптических потерь представлена на рисунке 4.3. Принцип ее действия заключается в следующем. Излучение от галогеновой лампы преобразуется камертонным модулятором в импульсные сигналы, проходит через монохроматор, на выходе из которого изменяется во времени длина волны излучения. Система линз фокусирует излучение на торец световода, а с помощью трехкоординатных подвижек достигается максимальный уровень введенной в волокно мощности излучения, измеряемой фотодетектором. Сопоставляя спектральную зависимость мощности излучения прошедшего через длинный отрезок волокна (I) и через короткий отрезок (I_0) получают спектральную зависимость оптических потерь с распечаткой на принтере.

При постоянной длине волны оптические потери измеряются рефлектометром. Принцип работы прибора основан на анализе отражённых оптических импульсов, излучаемых рефлектометром в оптическое волокно. Измерения с помощью оптического рефлектометра основано на явлении обратного рассеяния света в волокне и на отражении света от скачков показателя преломления. Импульсы света, распространяясь по сердцевине световода, испытывают отражения и затухания на неоднородностях стекла и вследствие поглощения в среде.

Оптический импульс вводится в волокно через направленный ответвитель. Этот импульс распространяется по волокну и ослабляется в соответствии с коэффициентом затухания волокна. Незначительная часть оптической мощности рассеивается, и в результате обратно рассеянное излучение через направленный ответвитель попадает на фотодетектор, преобразуется в электрический сигнал, усиливается, обрабатывается и результат выводится на дисплей.

Измерение затухания основано на предположении, что коэффициент обратного рассеяния является постоянным для данного волокна, то есть в каждой точке волокна рассеивается назад одинаковое количество оптической мощности, но из-за

затухания самого волокна на фотодиод рефлектометра попадает линейно уменьшающаяся оптическая мощность.

Затухание волокна между двумя точками 1 и 2 определяется как половина разности между соответствующими уровнями мощности P_1 и P_2 :

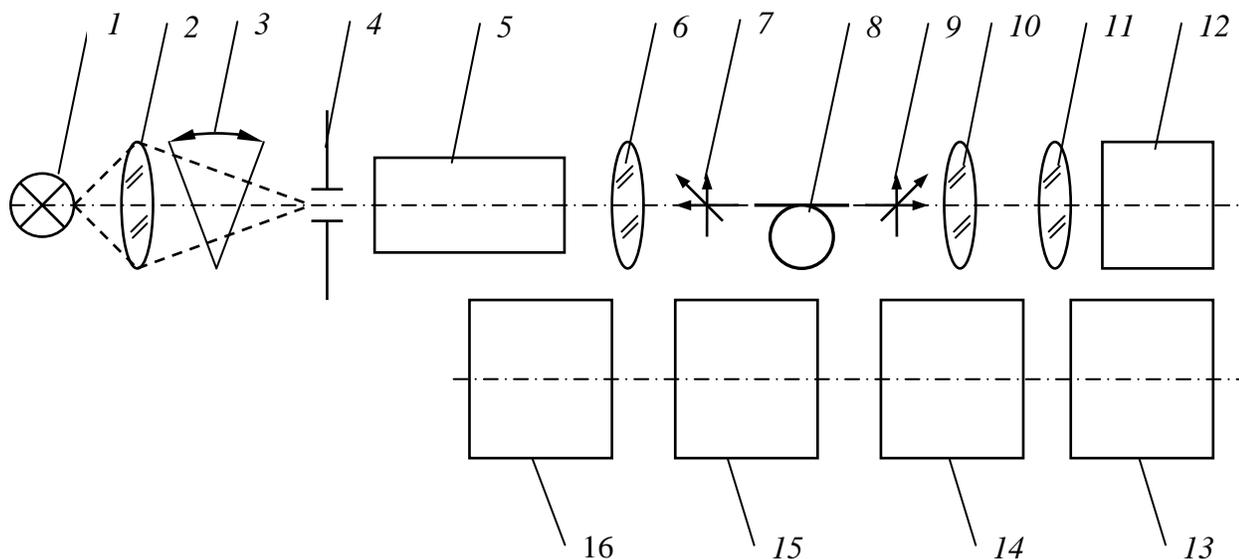


Рисунок 4.3 Установка для измерения оптических потерь в световодах.

- 1 – источник излучения – галогенная лампа;
- 2 – конденсатор;
- 3 – камертонный модулятор типа РНО;
- 4 – щель монохроматора;
- 5 – монохроматор МРД-23;
- 6, 10, 11 – объективы увелич. 8-10^x;
- 7, 9 – трехкоординатные подвижки;
- 8 – оптическое волокно;
- 12 – фотодиод;
- 13 – синхронный усилитель
- 14 – осциллограф Tektronix 7854;
- 15 – компьютер;
- 16 – принтер

$$A = - (0.5) * (P_1 - P_2) \text{ (dB)}.$$

Множитель (- 0,5) появляется из-за того, что свет прошел двойной путь от источника к пункту отражения и обратно.

Анализ рефлектограмм позволяет определить длину волоконно-оптической линии, затухание сигнала в ней и расстояния до мест неоднородностей волокна, которые могут быть связаны с обрывом или дефектами его структуры.

Оптические потери световодов с сердцевиной из чистого или легированного кварцевого стекла в спектральной области его прозрачности состоят из следующих основных частей:

$$\alpha = \mathbf{B} + \alpha_p + \alpha_{yф} + \alpha_{нк} + \alpha_{из} ,$$

где: \mathbf{B} – потери из-за рассеяния света на макронеоднородностях оптического волокна, превышающих по размерам длину волны излучения,

α_p – рэлеевское рассеяние на микронеоднородностях, присущих стеклообразному состоянию,

$\alpha_{yф}$ – коротковолновый край фундаментального поглощения, обусловленный электронными переходами,

$\alpha_{нк}$ – инфракрасный край фундаментального поглощения, связанный с колебаниями атомов стеклообразной сетки,

$\alpha_{из}$ – потери на излучение, когда окружающая сердцевину оболочка имеет величину показателя преломления меньше, чем показатель преломления наружной оболочки.

Рэлеевское рассеяние света обусловлено градиентами концентраций и плотностей в микрообъемах стекла много меньших, чем длина волны излучения. Величина (α_p) обратно пропорциональна длине волны в четвертой степени:

$$\alpha_p = A \lambda^{-4} ,$$

где: A – коэффициент, зависящий от состава стекла и температуры вытягивания световодов. Он имеет размерность мкм⁴ дБ/км.

Параметр A существенно зависит от степени легирования кварцевого стекла (рис. 4.4). Рэлеевское рассеяние дает существенный вклад в оптические потери в коротковолновой части окна прозрачности кварцевого стекла. Поэтому сердцевину световодов для видимого и ультрафиолетового участка спектра целесообразно изготавливать из чистого диоксида кремния (с фторсодержащей оболочкой) или фосфоросиликатного стекла, отличающимися наиболее низкими значениями коэффициента A .

Оптические потери, связанные с электронными переходами ($\alpha_{yф}$) дают пренебрежимо малый вклад в спектральной области прозрачности кварцевого стекла (от 1 до 1,6 мкм).

Оптические потери, обусловленные колебаниями атомов стеклообразной сетки ($\alpha_{нк}$), увеличиваются с введением в кварцевое стекло легирующих добавок.

Так, легирование кварцевого стекла оксидами P_2O_5 и B_2O_3 в отличие от GeO_2 сужает спектральное окно прозрачности кварцевого стекла. Длина волны максимума полос поглощения колебаниями связанных атомов В-О, Р-О, Si-О, и Ge-О равна соответственно 7.3, 8.0, 9.2, и 11 мкм.

Коротковолновый край поглощения этих полос смещает длинноволновую границу окна прозрачности кварцевого стекла в коротковолновую область оптического спектра с 1,6 мкм до 1 мкм при легировании B_2O_3 и до 1,3 мкм при легировании P_2O_5 . С другой стороны, введение диоксида германия в стекло не приводит к увеличению оптических потерь, связанных с колебанием связанных атомов Ge-О.

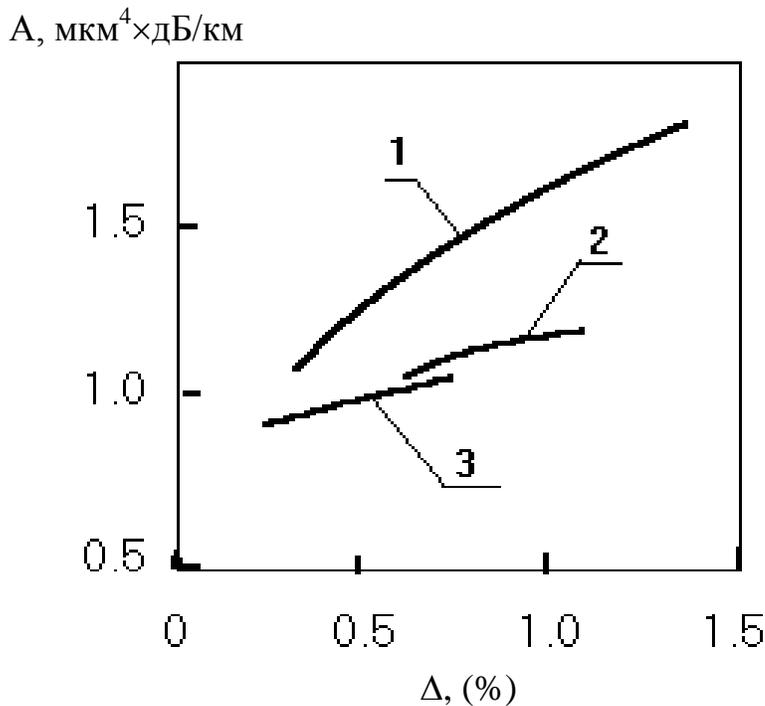


Рис. 4.4 Влияние относительной разности показателей преломления сердцевины и оболочки ($\Delta = \Delta n/n$) световодов различного состава на коэффициент рэлеевского рассеяния (A): 1- GeO_2 - B_2O_3 - SiO_2 ; 2 - P_2O_5 - GeO_2 - SiO_2 ; 3 - P_2O_5 - SiO_2 .

Современное широкомасштабное производство световодов для линии дальней связи на длине волны 1.3 и 1.55 мкм основано на одномодовых ВС с сердцевиной легированной диоксидом германия. Добавление легкоплавких оксидов бора или фосфора с целью снижения температуры спекания световедущих слоев пористого стекла нежелательно, так как приводит к существенному увеличению оптических потерь в этом участке спектра. Поэтому в MCVD технологии изготовления заготовок одномодовых ВС с малыми оптическими потерями B_2O_3 и P_2O_5 вводятся в небольших количествах только при осаждении слоев оболочки, изолирующей сердцевину от примесей опорной кварцевой трубы. А для изоляции

германийсодержащей сердцевины от этих добавок перед осаждением её слоев наносят тонкий слой из чистого кварцевого стекла. При такой структуре одномодовых световодов достигается низкий уровень оптических потерь: 0.6 и 0.3 дБ/км на длине волны 1.3 и 1.6 мкм, соответственно.

Оптические потери на излучение ($\alpha_{из}$) свойственны для световодов с депрессированной оболочкой, то есть оболочкой, у которой ПП меньше, чем показатель преломления наружной оболочки из чистого кварцевого стекла. В этом случае имеет место, так называемое, явление «туннелирования» излучения.

Величина оптических потерь такого рода зависит от толщины этой оболочки и степени депрессии ПП. Эксперименты показывают, что зависимость логарифма величины оптических потерь на излучение от длины волны имеет линейный характер:

$$\lg(\alpha_{из}) = K \lambda,$$

где K – константа, зависящая от конструкции световода.

Наряду с рассмотренными факторами, приводящими к увеличению оптических потерь световодов, существует еще два: поглощение света примесями «красящих» элементов (железа, хрома, никеля, кобальта, марганца меди и ванадия), а также избыточные оптические потери, образующимися в процессе вытягивания световодов.

Последний фактор проявляется при увеличении температуры вытягивания германосиликатных световодов, особенно при повышенных концентрациях GeO_2 в сердцевине. Величина избыточных оптических потерь пропорциональна квадрату концентрации легирующего компонента. Это явление специфично только для MCVД процесса изготовления заготовок. Природа этого явления окончательно не установлена. Однозначно лишь определено, что источником повышенных оптических потерь является граница, разделяющая сердцевину и оболочку. В настоящее время предложены в основном два объяснения этого явления:

- повышенный уровень рассеяния на этой границе из-за гидродинамического механизма образования неоднородностей при разной вязкости стекла сердцевины и оболочки,

- поглощение излучения из-за восстановления оксида германия при повышенных температурах сжатия заготовки и вытягивания волокна, когда кислород из сердцевины диффундирует как в оболочку, так и в сжимаемый внутренний канал заготовки.

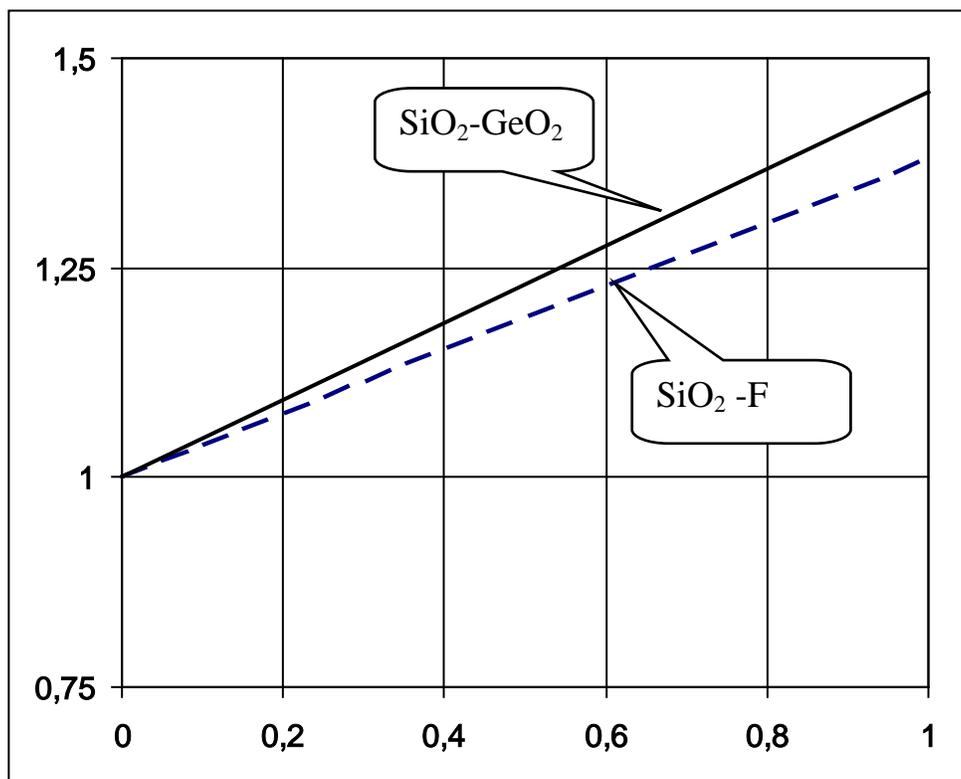
Интересно отметить, что две разных трактовки этого явления дают одинаковые практические рекомендации для ослабления этого эффекта, которые заключаются в газофазном травлении внутренней части сердцевины при коллласировании заготовки, а так же в снижении температуры вытягивания и градиента концентрации диоксида германия на границе сердцевины с оболочкой.

Снижение влияния температуры вытягивания на оптические потери германосиликатных световодов достигается также дополнительным легированием сердцевины фтором. Эта рекомендация противоречит первому механизму избыточных потерь, но находит объяснение во втором.

Не смотря на то, что при дополнительном легировании фтором возрастают оптические потери на рэлеевское рассеяние, избыточные оптические потери падают в большей степени. В итоге, суммарные оптические потери снижаются.

На рис. 4.5 представлена зависимость соотношения коэффициентов рэлеевского рассеяния для легированного (A) и чистого кварцевого стекла (A_0) от абсолютного значения относительной разности их показателей преломления.

$$A/A_0$$



$$|\Delta|, \%$$

Рис. 4.5 Зависимость относительного коэффициента рэлеевского рассеяния (A/A_0) для германосиликатного и фторсиликатного стекол от абсолютного значения относительной разности ПП легированного и чистого кварцевого стекла ($|\Delta|, \%$).

Окончательное выяснение природы избыточных оптических потерь германосиликатных одномодовых световодов, изготавливаемых MCVD методом, позволит разработать более эффективные рекомендации по изготовлению высоколегированных германием оптических волокон с малыми потерями.

4.2 Прочностные свойства световодов

Волокна из кварцевого стекла должны обладать необходимым уровнем прочности для обеспечения их переработки в оптический кабель и в процессе эксплуатации в составе различного рода систем и устройств. Минимизация габаритов оптических приборов, в которых используется оптическое волокно, выдвигает повышенные требования к механической прочности световодов, так как в них могут возникать высокие напряжения при изгибе. Поэтому вопросам изучения прочности волокон из кварцевого стекла всегда уделялось особое внимание.

Более 30 лет назад было установлено, что волокно из кварцевого стекла обладает очень высокой прочностью (~15 ГПа). Однако статистический характер распределения дефектов, приводящих к разрушению стекла, затрудняет реализовать высокопрочное состояние волокна на больших длинах. Изоляция поверхности стекловолокна от воздействия окружающей среды нанесением полимерных оболочек не увеличивает прочность стекла, а только исключает травмирование поверхности и обеспечивает сохранность прочностных свойств стекла.

На практике прочность кварцевых световодов в зависимости от метода испытаний характеризуется динамической и статической прочностью (долговечностью).

Первая определяется величиной разрушающего напряжения, создаваемого методом растяжения или изгиба. Вторая – длительностью процесса разрушения волокна, находящегося под действием постоянного напряжения.

Экспериментальные данные по измерению динамической прочности описываются следующим аналитическим выражением:

$$\log \sigma_d = (1+n)^{-1} \log v_\sigma + (1+n)^{-1} \log k_d,$$

где σ - приложенное к световоду растягивающее напряжение,
 v_σ - скорость нагружения,
 k_d – коэффициент, характеризующий кварцевое стекло,
 n - параметр влияния окружающей среды.

Величина разрушающего растягивающего напряжения σ зависит от размера дефекта r , расположенного на поверхности стекловолокна:

$$\sigma = 0.474 \times 10^{-3} r^{-0.5} \text{ (ГПа)}.$$

На основании этого уравнения можно оценить величину трещины, которая обуславливает верхний уровень прочности (6 ГПа) метровых отрезков световодов в полимерной оболочке. Оказывается, что размер дефекта составляет $\sim 6 \times 10^{-9}$ м (6 нм). Эта величина в несколько десятков раз больше длины структурного звена Si-O в стекле, равного 0.16 нм. Прочность даже очень малых отрезков ВС (6-7 ГПа),

измеренная методом изгиба, свидетельствуют о гарантированном наличии трещин глубиной не менее 6 нм на поверхности стекловолокна диаметром 125 мкм и длиной около 1 мм.

Статическая прочность волокна определяется длительностью процесса его разрушения под действием постоянного напряжения. Модельные представления о процессах разрушения хрупких тел на основе термофлуктуационного разрыва Si-O связи во влажной среде дают следующую зависимость долговечности τ от величины приложенного к волокну напряжения σ :

$$\ln \tau = \ln \tau_0 - \alpha \ln P + U_0/(RT) - \gamma\sigma/(RT)$$

где τ - длительность процесса разрушения,
 τ_0 - период атомных колебаний (10^{-13} с)
 α - порядок реакции гидролиза,
 γ - константа, характеризующая дефектность образца,
 P - давление паров воды,
 U_0 - энергия гидролитического разрыва связи Si-O,
 R - газовая постоянная,
 T - температура (К),
 σ - растягивающее напряжение.

Величине α , определенная на основе экспериментальных данных по зависимости долговечности (времени разрушения волокна) от давления паров воды равна 1 (рис. 4.6).

При постоянной температуре и влажности уравнение для расчета долговечности существенно упрощается:

$$\ln \tau = A - B\sigma,$$

где A и B константы.

Прочность световодов существенно зависит от условий вытягивания световодов. На рис. 4.7 представлена характеристика прочности волокна в Вейбулловских координатах (прочность – вероятность разрушения волокна) для световодов вытянутых при разных условиях. Испытания проводили динамическим методом, увеличивая величину напряжения во времени методом изгиба волокна.

Наблюдается интересная особенность. Если в нейтральных условиях атмосферы инертного газа (аргона) увеличение температуры вытягивания не влияет на прочность волокна, то в восстановительных условиях (H_2+10N_2) прочность катастрофически падает. Такое поведение можно объяснить восстановлением находящихся в кварцевом стекле примесей до элементарного состояния. Процесс этот контролируется диффузией кислорода в поверхностном слое. Поэтому с увеличением температуры вытягивания в восстановительных условиях глубина дефектного слоя увеличивается, что и приводит к падению прочности.

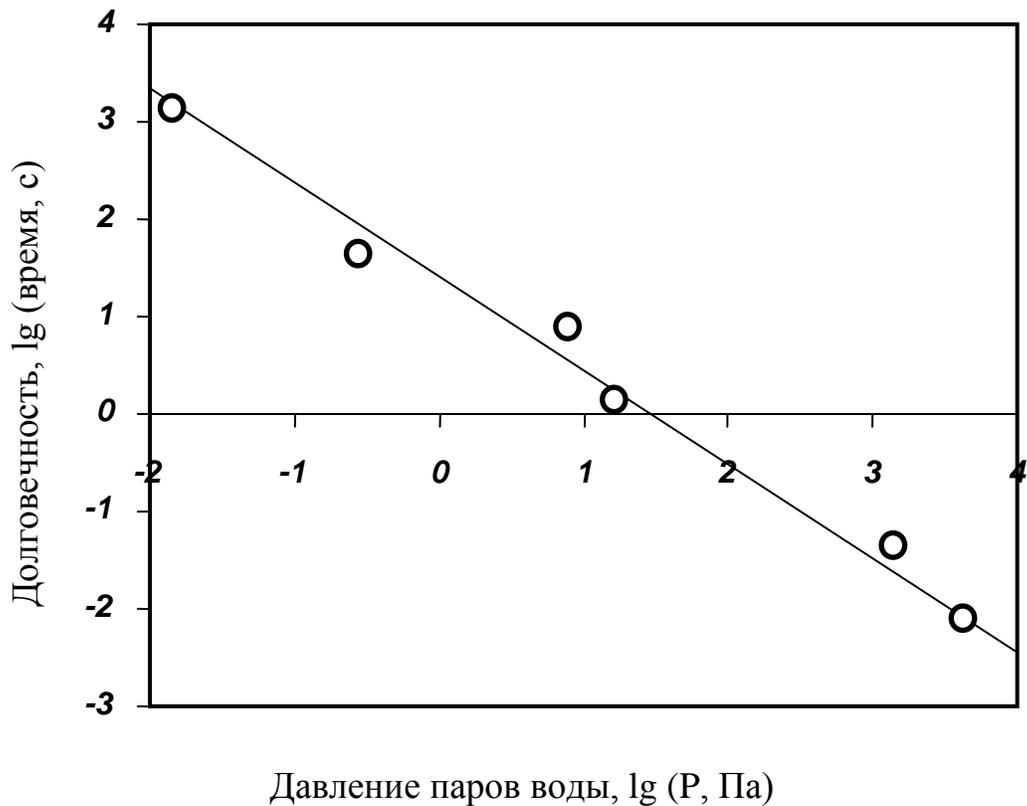


Рис. 4.6 Зависимость долговечности от равновесного давления паров воды при постоянном напряжении волокна, созданном его изгибом.

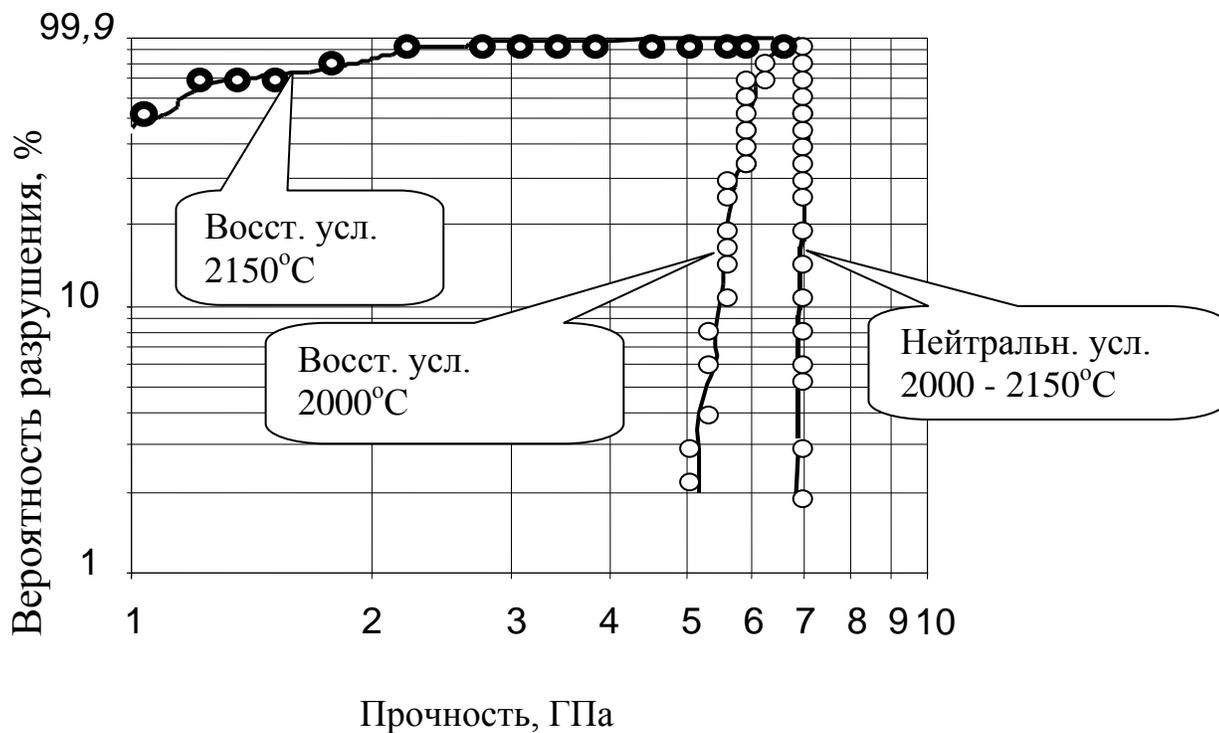


Рис. 4.7 Влияние условий вытягивания волокна на его прочность, измеренную методом изгиба.

Статистический характер распределения дефектов по длине световодов создает определенные трудности теоретического анализа механической надежности длинномерных оптических волокон. Для вероятностной оценки разрушения напряженного волокна широко используется модель «слабого звена». Согласно этой модели с увеличением длины волокна повышается частота появления более крупных дефектов.

Вероятность (F) того, что прочность ВС длиной L окажется менее определенной величины напряжения σ с учётом статистики Вейбулла определяется уравнением:

$$\ln \ln [(1-F)^{-1}] = \ln L + m \ln \sigma = \ln L + v^{-1} \ln \sigma,$$

где $m \approx 1/v$; v- коэффициент вариации.

Параметр m характеризует прочность световодов: чем больше его значение, тем в меньшей степени отличается нижний уровень прочности от верхнего для разрывного напряжения отрезков волокна. Экспериментальные данные для серии образцов, как правило, ложатся на прямую линию в координатах Вейбулла: $\ln \sigma - \ln \ln (1-F)^{-1}$. Если статистика образования дефектов имеет разную природу, то экспериментальные данные низкопрочного состояния ложатся на искривленную линию.

Срок службы ВС (τ), находящегося под постоянной эксплуатационной нагрузкой $\sigma_{\text{раб}}$, можно оценить на основании его перемотки при повышенном напряжении $\sigma_{\text{пер}}$:

$$\tau = B (\sigma_{\text{пер}})^{n-2} / (\sigma_{\text{раб}})^n,$$

где n – параметр, характеризующий влияние влаги равен 21.5 ± 1.5 , а B – является характеристикой дефектности волокна. Минимальное значение B равно 10^{-3} ГПа²·с.

Сущность такого прогноза заключается в том, что разрушающее напряжение зависит от глубины трещины: чем меньше глубина трещины, тем больше величина критического разрушающего напряжения. Поэтому ВС, перемотанный при высокой нагрузке ($\sigma_{\text{пер}}$) без разрушения, будет иметь трещины глубиной (l_1) меньшей, чем глубина критических трещин (l_2) для более низкой эксплуатационной нагрузки ($\sigma_{\text{раб}}$). Увеличение размера трещины от l_1 до l_2 (рис. 4.8) и определяет длительность срока эксплуатации ВС, подверженного эксплуатационной нагрузке.

Рассмотренные аналитические модели дают возможность достаточно надежно оценить долговечность ВС, но не вскрывают природу образования и распределения микродефектов в волокне.

Очевидно, что специфика состояния этих дефектов связана в первую очередь с гетерогенным состоянием микропримесей в кварцевом стекле. Поэтому прочностные свойства ВС определяются условиями получения опорных труб и технологией изготовления заготовок.

Прочность световодов также существенно зависит от технологических параметров вытягивания волокна: температуры, натяжения и концентрации взвешенных частиц в высокотемпературной зоне.

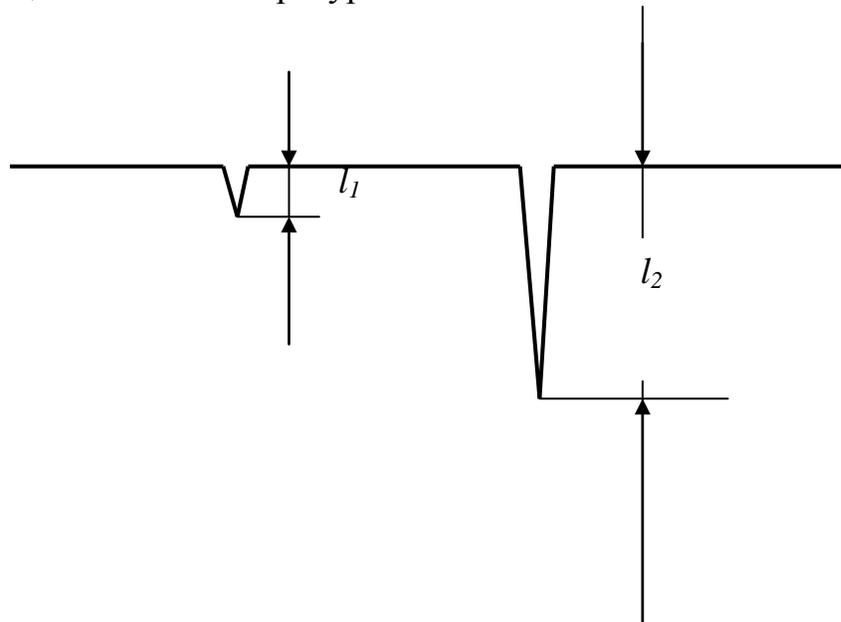


Рис. 4.8 Критическая глубина трещины l_1 и l_2 для напряжения перемотки ($\sigma_{пер}$) и эксплуатации ($\sigma_{раб.}$), соответственно.

Разрушение волоконного световода начинается, как правило, с дефекта, расположенного на поверхности волокна. В связи с этим качество стекломассы наружной кварцевой оболочки существенно влияет на прочностные свойства ВС. Практика показывает, что используемые в MCVD методе трубы процессов непрерывного формования из природного сырья отличаются низкой стоимостью, но не могут обеспечить высокой прочности световодов, особенно если наплавление стекла происходит в среде водорода. Трубы из синтетического кварцевого стекла более дорогие, однако содержат существенно меньше микродефектов, благодаря чему обеспечивают высокопрочное состояние ВС. По той же причине высокая чистота наружной кварцевой оболочки заготовок OVD и AVD процессов не создает особых проблем с получением ВС, обладающих необходимым уровнем прочности.

Гетерогенное состояние примесей, являющееся основным фактором, лимитирующим прочностные свойства оптического волокна, обусловлено двумя основными причинами.

Первая заключается в восстановлении примесных оксидов плавленным кварцем, состав которого отличается от стехиометрии дефицитом кислорода.

Вторая причина заключается в ликвационном фазовом распаде микрообластей кварцевого стекла, содержащих примесь в температурном интервале (2100-1500 °С) пластической деформации заготовки при её вытягивании. Это приводит к появлению микросфер с повышенным содержанием примесей, которые, обладая более высоким коэффициентом термического напряжения по сравнению с кварцевым стеклом, создают растягивающие напряжения при охлаждении волокна. Суммарное количество примесей металлов в кварцевом стекле марки КВ, используемом для изготовления опорных кварцевых труб, равно 7.5×10^{-3} мас. %, существенно меньше величины дефицита кислорода (0.1%) плавленного кварца. Поэтому с увеличением температуры нестехиометричный диоксид кремния может восстанавливать оксиды примесных металлов вплоть до элементарного состояния. Такие окислительно-восстановительные процессы могут стабилизировать дисперсное состояние примесей, что исключает возможность их растворения на атомном уровне. Более того, атмосфера инертного газа графитовой печи, содержащего 10^{-6} атм кислорода приводит к разложению многих примесных оксидов на поверхности заготовки при температурах вытяжки волокна (рис. 4.9).

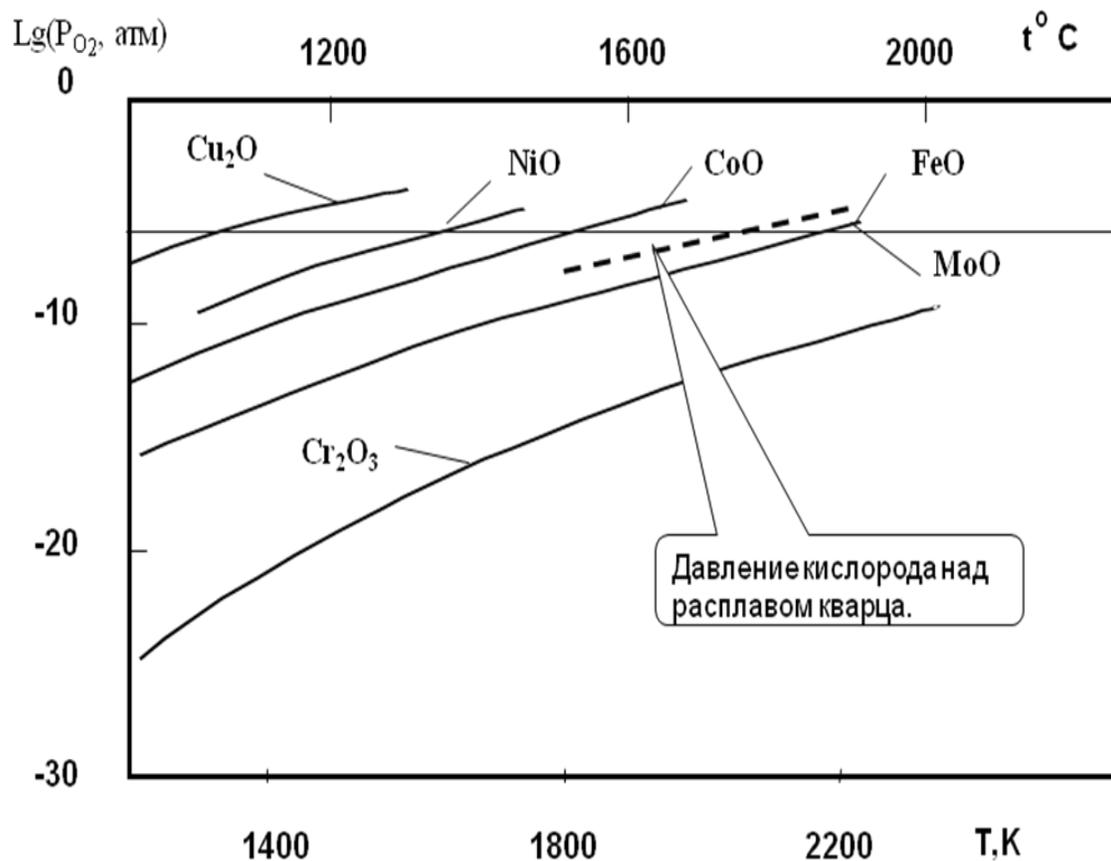


Рис. 4.9 Давление разложения примесных оксидов: горизонтальной линией отмечен уровень содержания кислорода в аргоне высокой чистоты.

Повышенная излучательная способность примесей (FeO, Cr₂O₃, TiO₂, NiO и др.) в спектральной области прозрачности кварцевого стекла приводит к локальному охлаждению и стабилизации формы дисперсной фазы в стекле при формировании труб или волокон методом вытягивания.

В таблице 4.1 представлены данные по температуре начала ликвационного распада кварцевого стекла, содержащего примесь. Такие ликвационные неоднородности при охлаждении создают микрообласти с повышенным содержанием примеси. Любая примесь в кварцевом стекле за редким титана и фтора приводит к увеличению коэффициента термического расширения. Поэтому в этих микрообластях после охлаждения волокна возникают растягивающие напряжения, инициируя тем самым образование микротрещин.

Снижению степени ликвационного фазового разделения способствуют снижение содержания примесей в наружном слое заготовок, а также повышение температуры и скорости вытягивания волокна.

Таблица 4.1

Температура начала фазового распада в области кварцевого стекла, содержащего примесь, при охлаждении расплава.

Примесь	ZrO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	FeO
Температур критического расслоения, °С	2430	2100	2200	1780	1700

Влияние дефектов поверхностного слоя заготовки на прочность стекловолокна можно снизить двумя основными приемами:

- в нанесении на заготовку методом газофазного осаждения слоя особо чистого кварцевого стекла.

- в создании сжимающих напряжений в поверхностном слое световода.

Во втором случае на заготовку наносят тонкую оболочку легированного кварцевого стекла, обладающего более низкой вязкостью или пониженным коэффициентом термического расширения.

Кристаллизация кварцевого стекла (его превращения в кристобалит) на поверхности заготовок в процессе вытягивания волокна также может привести к снижению прочности световодов. Результаты опубликованных исследований показали, что при температурах близких к температуре плавления кристобалита (≈ 1700 °С) кристаллизация стекла происходит только при давлении кислорода более 2×10^{-6} атм. Снижение давления кислорода ниже этого уровня (т. е. создание восстановительной газовой атмосферы) исключает кристаллизацию стекла.

Удаление влаги из полимерного покрытия ВС проводит почти к двукратному увеличению их динамической прочности: с 6 до 10-12 ГПа, измеренной методом изгиба. Однако в течение нескольких минут полимерная оболочка набирает влагу из окружающей среды и восстанавливает прежнее значение прочности (рис. 4.8).

Длительность этого процесса зависит от толщины полимерного покрытия и условий предварительной сушки при 100 °С:

- в воздушной атмосфере (термообработка),
- в токе сухого кислорода (термопродукка O₂) или
- в токе смеси паров SiCl₄ с кислородом (термопродукка SiCl₄).

Несмотря на кратковременное существование световодов в высокопрочном состоянии после таких обработок, этот процесс упрочнения может обеспечить технические параметры световодов, удовлетворяющие требованиям ряда объектов военного назначения с малым временным ресурсом работы.

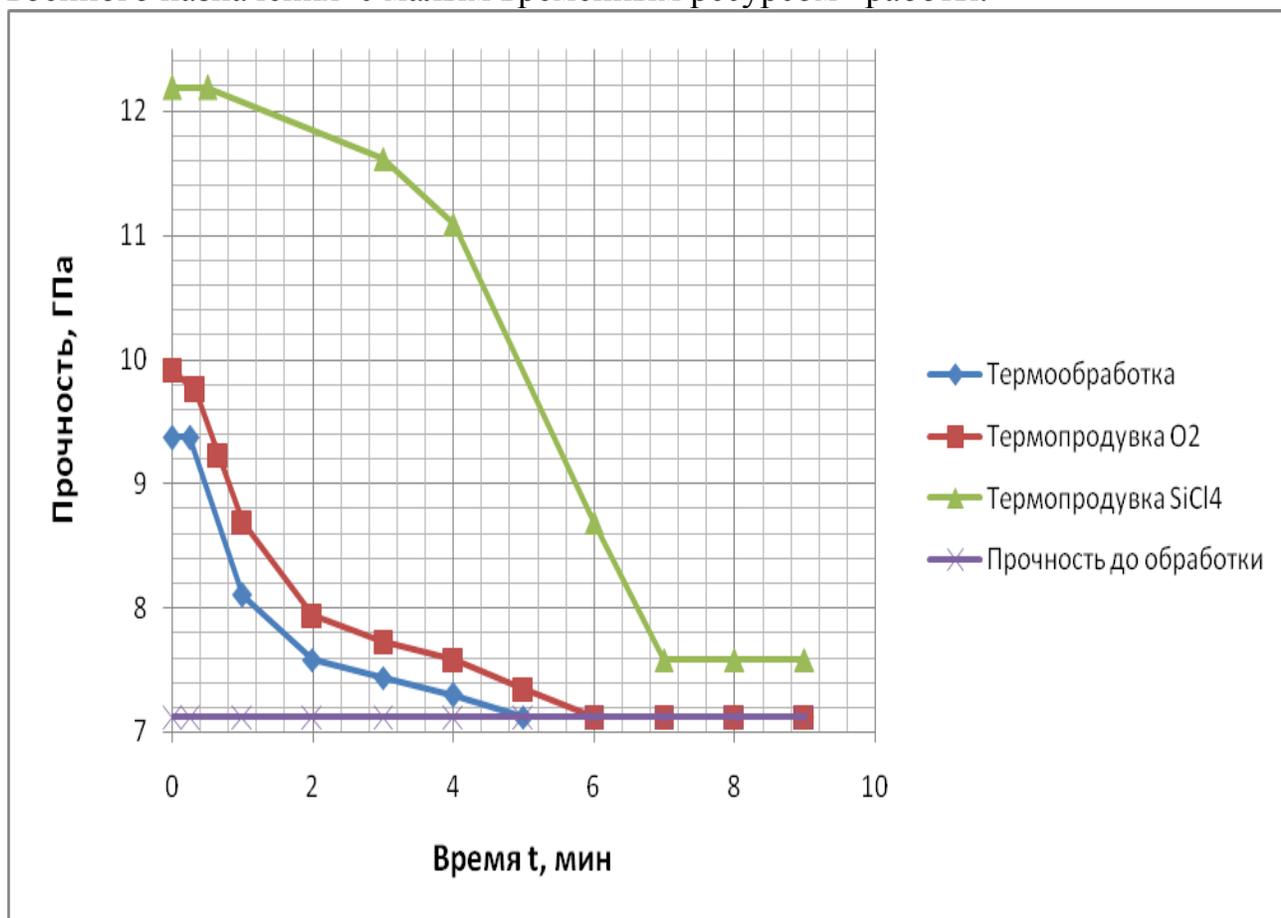


Рис. 4.8 Падение прочности волокна в воздушной атмосфере естественной влажности во времени при разных режимах его предварительной сушки при 100 °С.

Нанесение на кварцевое волокно герметичного металлического покрытия полностью исключает влияние влаги на процесс разрушения стекла, чем достигаются прочность в 14 ГПа.

5 Анизотропные одномодовые световоды

5.1 Поляризационные свойства световодов

Наряду с магистральными линиями связи волоконные световоды широко используются в самых разнообразных измерительных, диагностических и высокочувствительных системах контроля и управления.

На основе анизотропных одномодовых волоконных световодов (АОВС) создаются датчики для измерения различных физических величин и волоконно-оптические гироскопы.

В изотропном одномодовом световоде с круглым поперечным сечением сердечника и осесимметричным распределением показателя преломления распространяются две ортогонально поляризованные моды HE_{11} , которые принято обозначать HE^x_{11} и HE^y_{11} .

При введении в волокно одной из этих мод состояние её поляризации изменяется из-за преобразования в ортогональную моду под воздействием внешних факторов: давления, температуры, вибраций и др. Линейно поляризованное излучение становится эллиптически поляризованным.

Перекачка световой энергии из одной моды в другую обусловлена тем, что они вырождены, то есть их постоянные распространения β_x и β_y одинаковы.

Состояние поляризации излучения можно сохранить, если нарушить симметрию формы или показателя преломления сердцевин. В этом случае β_x и β_y будут отличаться, ограничивая степень обмена энергией излучения между ортогональными модами.

Оптические волокна такого типа называются анизотропными одномодовыми световодами.

Геометрическая анизотропия создается превращением круглой формы сердцевин в эллиптическую, а анизотропия показателя преломления обеспечивается ортогональной ориентацией напряжений вокруг сердцевин при использовании материалов с разными коэффициентами термического расширения.

Мерой анизотропии АОВС является двулучепреломление (ДЛП):

$$B = (\beta_x - \beta_y)/(2\pi/\lambda),$$

которое рассчитывают на основании измерения длины биений ортогональных мод (L_b) - длины, на которой фазовый набег поляризационных мод составляет 2π :

$$B = \lambda/L_b.$$

Чем меньше длина биений, тем больше двулучепреломление и, следовательно, меньше связь между поляризационными модами.

Доля мощности введенного в световод линейно поляризованного излучения P_x , перешедшая в ортогональную (паразитную) моду P_y , характеризуется коэффициентом ослабления η :

$$\eta = 10 \lg(P_y/P_x) = 10 \lg(hL),$$

где, h – степень сохранения поляризации излучения, L – длина световода.

Из этого уравнения следует, что:

$$h = (P_y/P_x)L^{-1}$$

Длина биений и степень сохранения поляризации излучения измеряются на одной установке, схематическое изображение которой представлено на рисунке 5.1

Метод измерения h параметра основан на прямом измерении мощности поляризованного оптического излучения, прошедшего ВС и анализатор, установленный в положении выхода рабочей (x) и ортогональной (y) мод.

Точность метода определяется характеристиками поляризатора и анализатора. Для измерения степени сохранения поляризации на уровне 10^{-5} 1/м длина отрезка должна быть не менее 1 км.

Для определения длины биений методом спектрального сканирования используются короткие отрезки волокна (длиной 300 - 500мм).

Метод основан на измерении изменения интенсивности поляризованного оптического излучения, прошедшего через ВС и анализатор при изменении длины волны излучения.

Расчет длины биений производят по формуле:

$$L = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{1550} l,$$

где L - длина поляризационных биений, мм; λ_1, λ_2 - ближайšie к рабочей длине волны ($\lambda = 1,55$ мкм) длины волн, на которых наблюдается максимальное или минимальное значение сигналов; l - длина образца, мм.

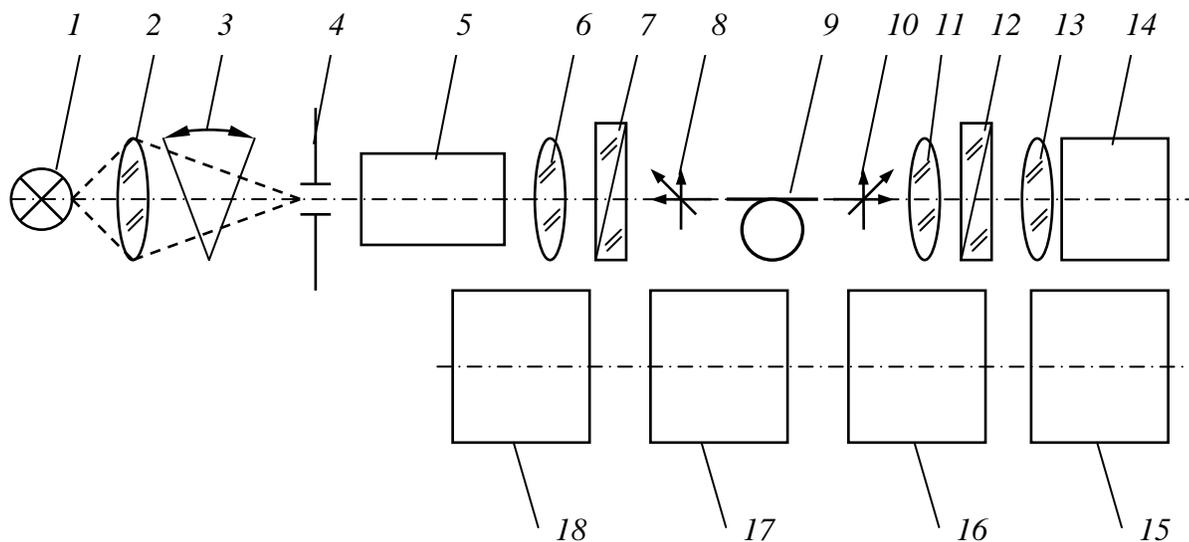


Рисунок 5.1 Установка для измерения поляризационных характеристик анизотропных световодов.

- 1 – источник излучения – галогенная лампа;
- 2 – конденсатор;
- 3 – камертонный модулятор типа РНО;
- 4 – щель монохроматора;
- 5 – монохроматор МРД-23;
- 6, 11, 13 – объективы увелич. 8-10^x;
- 7, 12 – поляризаторы;
- 8, 10 - трехкоординатные подвижки;
- 9 – оптическое волокно;
- 14 – фотодиод;
- 15 – синхронный усилитель
- 16 – осциллограф Tektronix 7854;
- 17 – компьютер;
- 18 – принтер

За период с публикации первых изобретений по изготовлению оптических волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения, с 1980 по 2013 годы выявлено более 100 изобретений по технологии изготовления и конструкциям оптических волокон такого типа.

На рисунках представлены диаграммы распределения изобретений по странам (рис. 5.2) и технологиям (рис. 5.3).



Более 84 % изобретений опубликовано в Японии, около 10 % - в России, и 5 и 1% изобретений - в США и Германии соответственно.

Рис. 5.2 Диаграмма распределения изобретений по странам.



Большинство изобретений базируется на MCVD процессе (78%), в 17% используют способ OVD и 5% – способ VAD.

Рис. 5.3 Диаграмма распределения изобретений по технологиям.

Сопоставительный анализ состояния отечественных и зарубежных разработок в технологии волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения, свидетельствует о перспективности использования MCVD способа их производства.

5.2 Анизотропные световоды с эллиптической сердцевиной

Самым простым в конструктивном и технологическом отношении анизотропным одномодовым световодом является световод с эллиптической сердцевиной. Его двулучепреломление (B), при соотношении осей эллипса сердцевины ≥ 3 пропорционально квадрату разности показателей преломления сердцевины и оболочки Δn :

$$B \approx K (\Delta n^2)$$

ДЛП становится практически постоянным при a/b , равном 4 (рис. 5.4) для световода с относительной разностью показателей преломления 4,3 %.

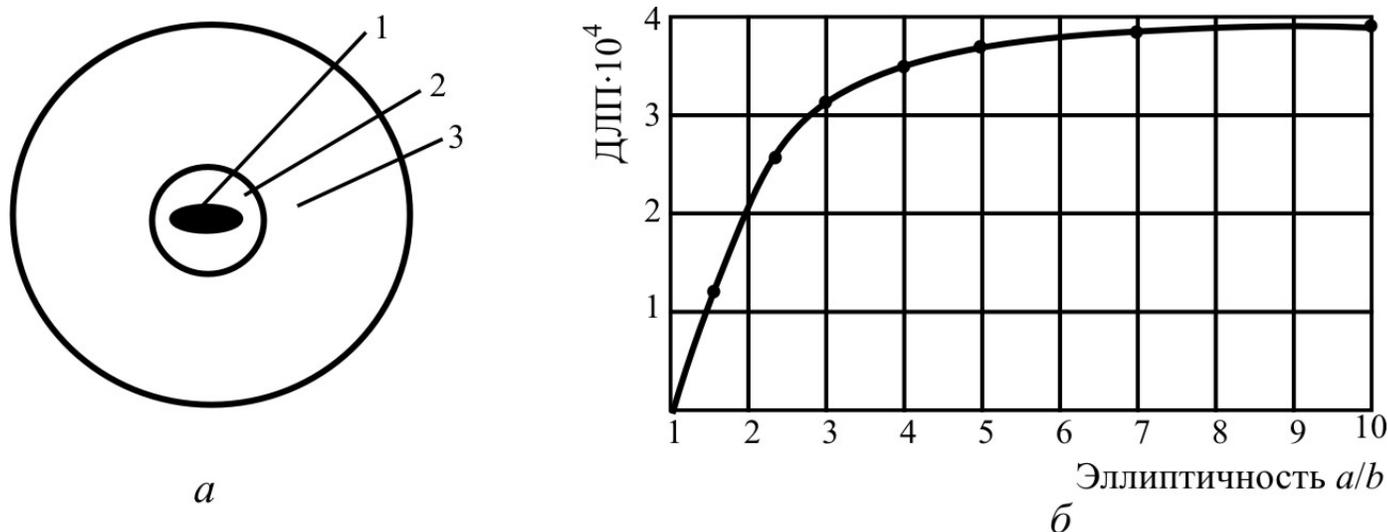


Рис. 5.4. Форма АОВС с эллиптической сердцевиной (а) и зависимость ДЛП от отношения осей в эллиптической сердцевине (б); 1 – сердцевина, 2 – светоотражающая оболочка, 3 – технологическая кварцевая оболочка.

В этих АОВС имеет место разность геометрического пути распространения двух ортогонально поляризационных мод. Путь поляризационной моды вдоль малой оси эллипса (соответственно время распространения этой моды) меньше, чем вдоль большой оси. Поэтому малая ось часто называется быстрой, а большая ось – медленной.

Отличительной особенностью MCVD метода изготовления таких световодов является операция высокотемпературного сжатия (рис. 5.5), которая осуществляется при регулируемом внутри трубки разряде, составляющем несколько

миллиметров водного столба. В результате такой операции сердцевина принимает эллиптическую форму, а высоковязкая оболочка становится практически круглой.

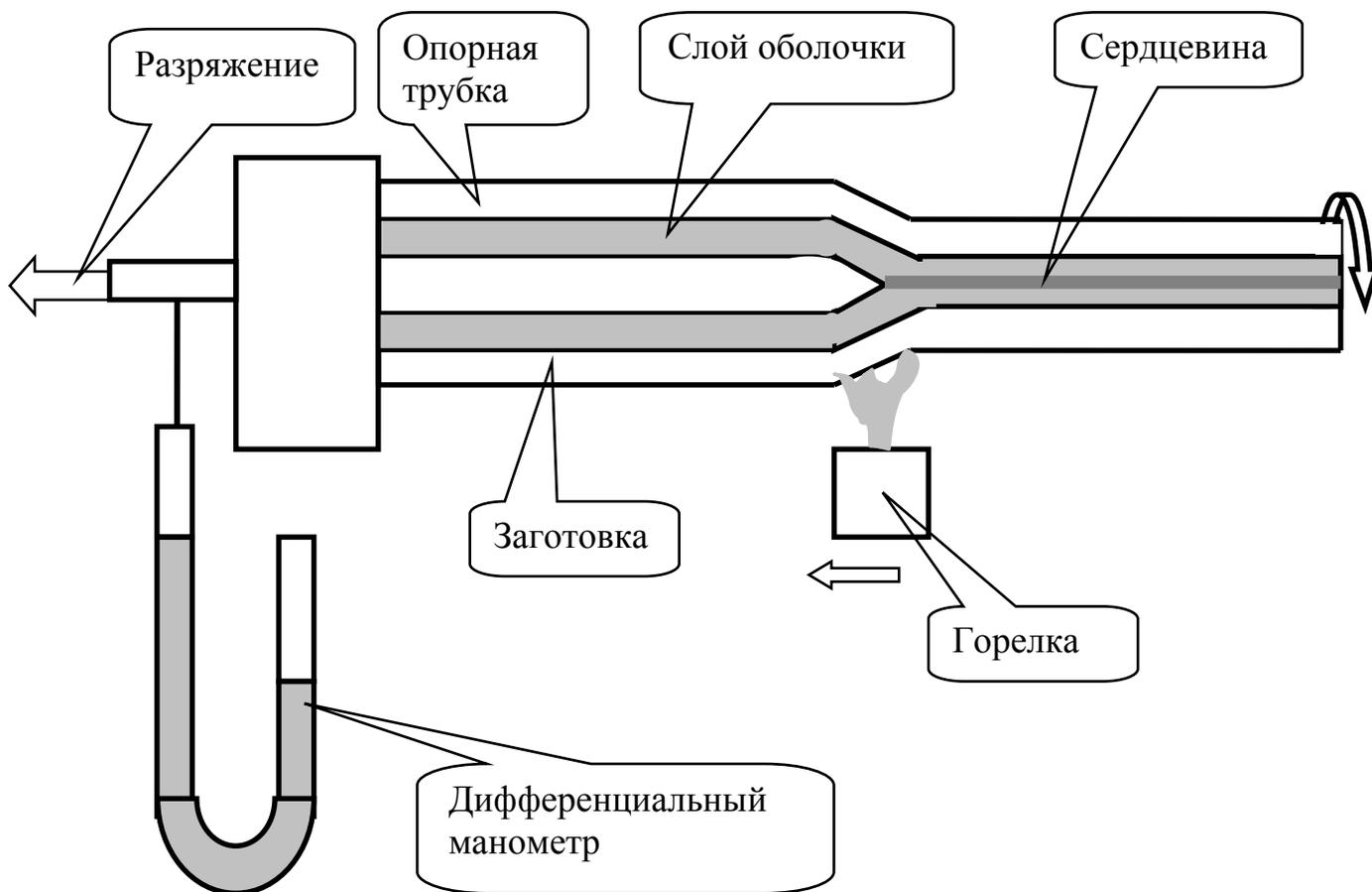


Рис. 5.5 Принципиальная схема операции коллапсирования при формировании эллиптической сердцевины.

В АОВС с эллиптической сердцевиной можно повысить степень поляризации излучения за счет вытекания излучения из нерабочей моды. Это осуществляется формированием вокруг сердцевины эллиптической депрессированной оболочки, оси которой совпадают по направлению с аналогичными осями сердцевины.

MCVD способ изготовления таких световодов отличается от известных методов операцией формирования эллиптической формы сердцевины. Для этого в заготовке, внутри которой соосно расположены сердцевина и легированная фтором оболочка, с двух противоположных сторон нарезаются канавки. В процессе последующего высокотемпературного округления заготовки низковязкая сердцевина и оболочка принимают эллиптическую форму. Далее из заготовки вытягивают волокно. Этапы такой технологии схематично представлены на рисунке 5.6.

Наличие депрессированной эллиптической оболочки придает такому световоду поляризующие свойства, однако высокое содержание диоксида германия в сердцевине (более 17 мол. %) приводит к повышенным оптическим потерям (более 20 дБ/км) на длине волны 1,55 мкм.

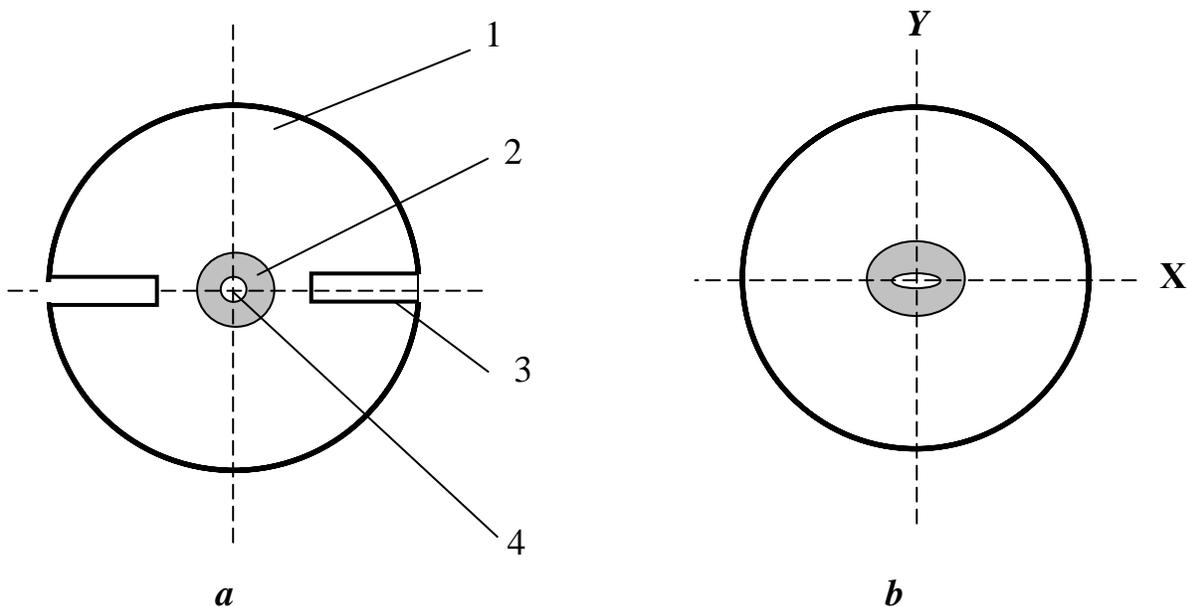


Рис. 5.6 Поперечное сечение заготовки световода после нарезания канавок (а) и после округления (b): 1 – стекло опорной трубы; 2– оболочка; 3 - нарезанная канавка; 4– сердцевина.

АОВС с эллиптической сердцевиной наряду с простотой технологии изготовления обладают рядом других отличительных особенностей:

- высоким уровнем двулучепреломления,
- повышенной устойчивостью поляризационных и оптических свойств при изгибе волокна,
- слабым влиянием изменения температуры на эти характеристики.

Однако световоды такой конструкции обладают на сегодня повышенным уровнем оптических потерь и создают определенные проблемы при стыковке в оптических разъемах.

Эти недостатки являются сдерживающим фактором в использовании световодов с эллиптической сердцевиной, но, тем не менее, учитывая их достоинства, интерес исследователей к решению указанных проблем не ослабевает.

Так, совсем недавно американская фирма «Draka» информировала об освоении производства анизотропного одномодового световода с эллиптической сердцевиной без раскрытия особенностей конструкции световода и сущности технических

решений по преодолению проблем в достижении малых оптических потерь (табл. 5.1).

Можно только догадываться, что его оболочка в значительной степени легирована фтором с тем, чтобы при заданном высоком уровне разностей ПП сердцевин и оболочки снизить содержание в сердцевине диоксида германия, который создает проблемы в достижении малых оптических потерь.

Таблица 5.1

Параметры АОВС с эллиптической сердцевиной, изготавливаемые фирмой «Draka»

Параметр	Размерность	Величина
Диаметр стекловолокна	мкм	80 и 125
Большая ось сердцевины	мкм	6
Малая ось сердцевины	мкм	2
Числовая апертура	-	0.24
Рабочая длина волны	нм	1550
Затухание на длине волны 1550 нм	дБ/км	≤ 1.0
Длина волны отсечки высшей моды	нм	1450
Длина биений на длине волны 1550 нм	мм	5
h параметр при 1550 нм	m^{-1}	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$
Диаметр модового пятна при 1550 нм	мкм	5.5

Другая современная разработка АОВС с эллиптической сердцевиной основана на технологии микроструктурированных световодов. Процесс изготовления такого световода состоит из следующих этапов:

- изготовление труб-заготовок для вытягивания капилляров;
- сборка заготовки посредством вставления капилляров в толстостенную трубку;
- приварка технологических патрубков к концам трубки;
- очистка поверхностей сплавления методом травления в растворе плавиковой кислоты или газофазным травлением;
- промывка дистиллированной водой зоны травления;
- сушка сборки потоком сухого кислорода;
- вытяжка волокна с нанесением защитного полимерного покрытия.

Для предотвращения сплавления каналов при вытяжке волокна в них поддерживается избыточное давление.

На рисунке 5.7 представлено поперечное сечение такого АОВС. Основными достоинствами световодов такой конструкции являются:

- самая высокая устойчивость оптических свойств к изгибу волокна и изменению температуры;
- радиационно-оптическая устойчивость;
- отсутствие потерь на отражение при стыковке световодов;
- малая дисперсия, что обусловлено тем, что излучение распространяется в воздушной среде.

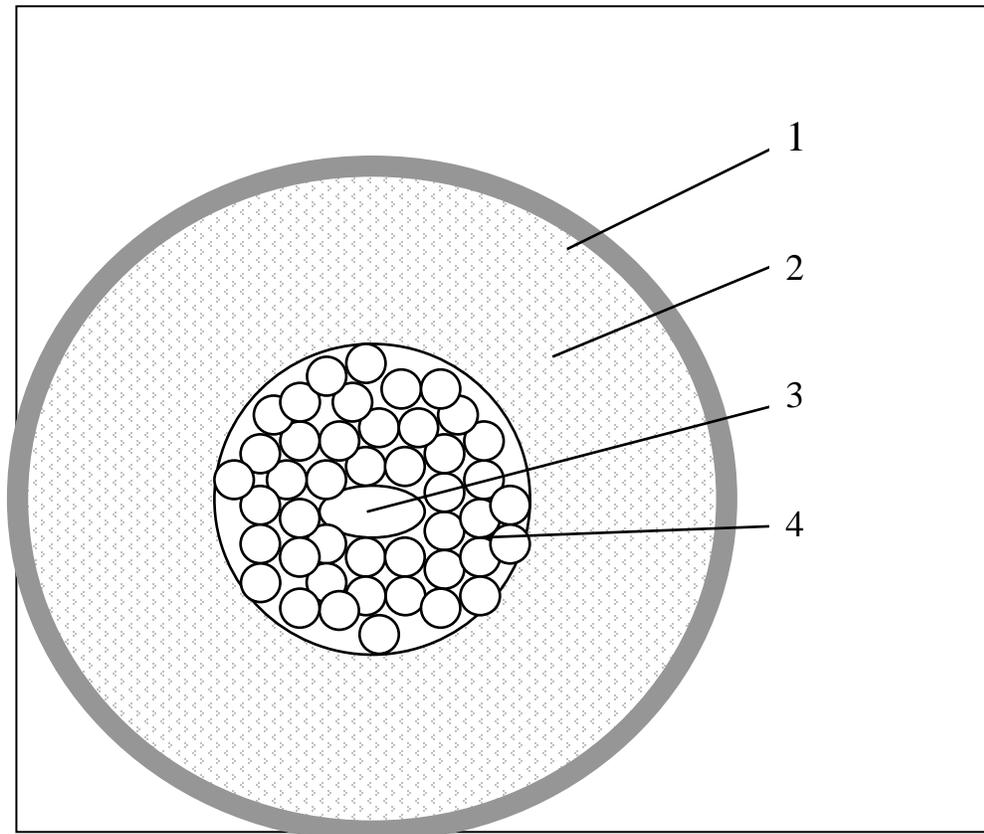


Рис. 5.7 Поперечное сечение микроструктурированного АОВС с эллиптической полостью сердцевины:

- 1 - полимерная оболочка,
- 2 – кварцевое стекло,
- 3 – полость сердцевина,
- 4 – кварцевые капилляры.

Несмотря на указанные достоинства, технология АОВС с полостью эллиптической сердцевинной настолько сложная и затратная, что в настоящее время такие световоды обладают низкой конкурентоспособностью по сравнению с широко рекламируемыми аналогами промышленного производства.

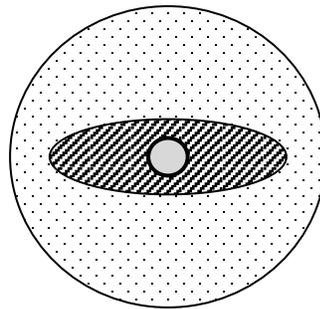
5.3 Двулучепреломляющие одномодовые световоды с анизотропией механических напряжений

В настоящее время в промышленных масштабах производятся АОВС, в которых ДЛП создается за счет азимутального распределения напряжений в сердцевине круглого сечения.

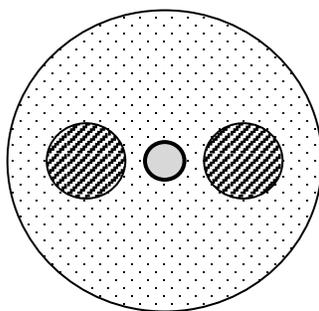
Существует два основных типа таких оптических волокон (рис. 5.8):

- световоды с эллиптической напрягающей оболочкой и
- световоды с напрягающими элементами круглого (Panda) или сегментарного сечения (Bow-tie).

Эллиптическая напрягающая оболочка



Panda



Bow-tie

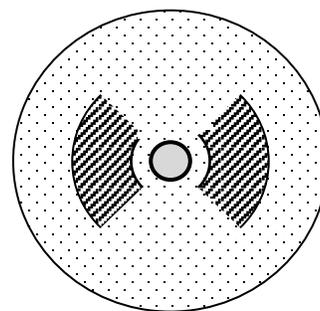


Рис. 5.8 Структуры АОВС: материал напрягающих элементов обозначен штриховкой.

5.3.1 Световоды с эллиптической напрягающей оболочкой

История создания и развития технологии анизотропных одномодовых волоконных световодов начинается с изготовления MCVD методом оптических волокон с эллиптической напрягающей оболочкой. Эта технология, претерпев некоторые изменения во времени, является сегодня одной из основных в промышленном производстве АОВС.

Первые образцы АОВС с эллиптической напрягающей оболочкой изготавливались MCVD методом с германосиликатной сердцевиной и боросиликатной напрягающей оболочкой. На первом этапе получали заготовку с осесимметричными слоями сердцевины, боросиликатной оболочки и буферного слоя из кварцевого стекла, легированного фтором и фосфором. После плоскопараллельного шлифования такой заготовки и высокотемпературного кругления низковязкая напрягающая оболочка принимала эллиптическую форму, а сердцевина из высоковязкого стекла оставалась круглой (рис. 5.9). Оксид бора в сравнении с кварцевым стеклом имеет очень высокий коэффициент термического расширения: 150×10^{-7} и $5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ для первого и второго случая, соответственно. Поэтому наличие 15-20 мол % B_2O_3 в напрягающей эллиптической оболочке создает в сердцевине разность механических напряжений в ортогональных направлениях.

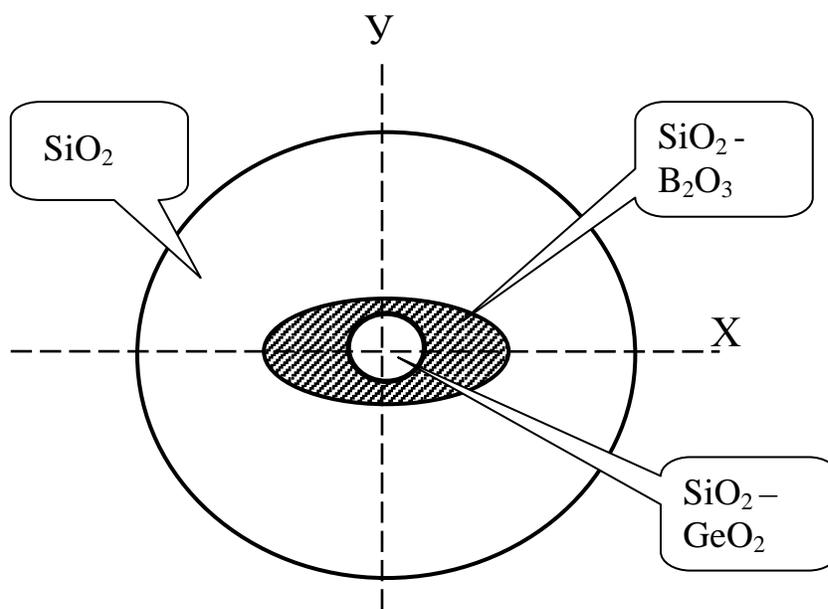


Рис. 5.9 Структура АОВС с эллиптической напрягающей оболочкой.

Этот способ имел два основных недостатка:

- в процессе шлифовки удалялась значительная часть материала опорной кварцевой трубы (до 40 %),
- напрягающая оболочка имела пониженный показатель преломления, что приводило к повышенным потерям на излучение (так называемого «туннелирования» света) через депрессированную зону вокруг сердцевины (рис. 5.10).

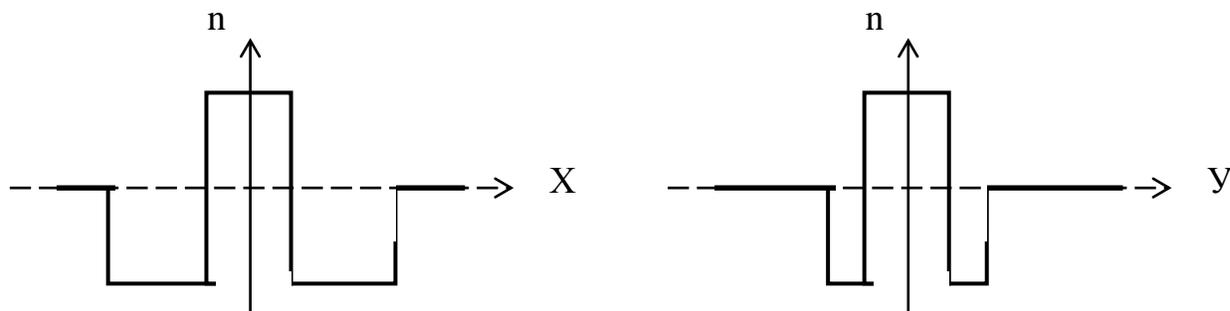


Рис. 5.10 Радиальный профиль показателя преломления в заготовке по большой (X) и малой (Y) оси эллиптической оболочки.

В последующем развитии этого метода первый недостаток был устранен заменой процесса шлифовки нарезанием двух канавок, что привело к существенному снижению потерь стекломассы заготовок при абразивной обработке (с 40 до 10 %). Более того, в отличие от плоско-параллельного шлифования новая абразивная обработка допускала некоторое искривление заготовок, что было недопустимо в первом случае обработки.

На рисунках 5.11 и 5.12 схематично представлены процессы абразивной обработки и высокотемпературного кругления заготовки с образованием эллиптической формы напрягающей оболочки.

Глубина канавок составляет 30 % от диаметра заготовки, их ширина соответствует толщине алмазного диска и равна 0,6-1 мм. Локальная опора заготовки в зоне нарезания канавки допускает величину стрелы ее прогиба до 5 мм.

Операцию кругления проводят за несколько проходов горелки, изменяя в начале каждого прохода направление вращения с целью устранения окружного смещения стекла в заготовке.

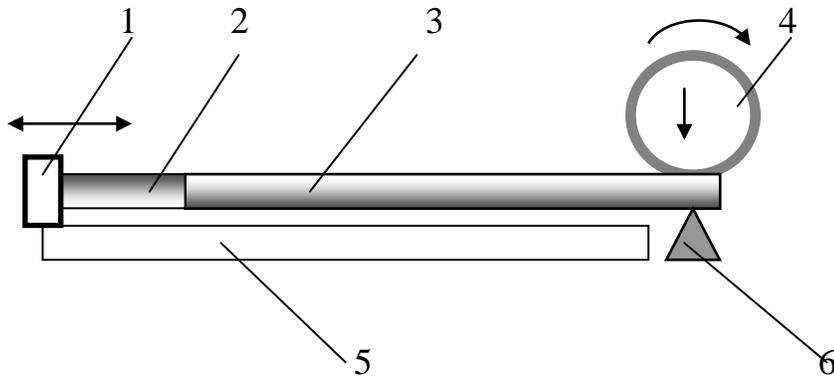


Рис. 5.11 Принципиальная схема нарезания канавок: 1- фиксатор, удерживающий заготовку от поворота, 2- технологический конец, 3- заготовка, 4- алмазный круг, 5- направляющая для перемещения заготовки, 6- опорная база.

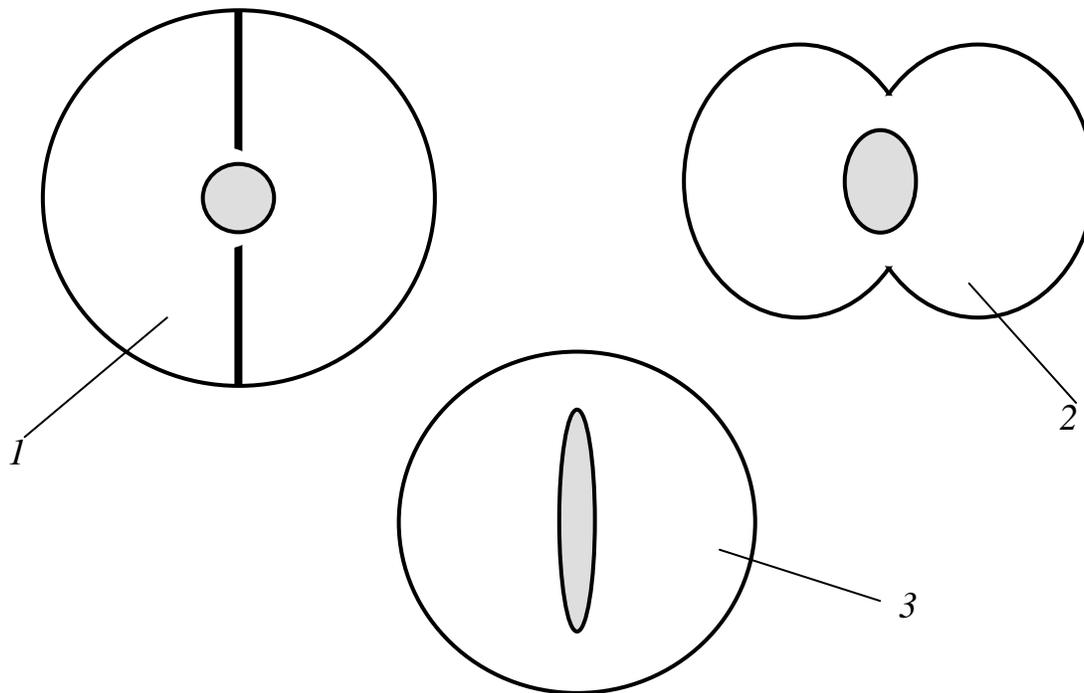


Рис. 5.12 Схема эллипсования напрягающей оболочки при круглении: до кругления (1), после двух (2) и восьми (3) проходов кругления.

Второй недостаток устранен дополнительным введением в боросиликатную оболочку диоксида германия для согласования ее показателя преломления с показателем преломления наружной оболочки из кварцевого стекла. Отработка процесса осаждения боргерманосиликатного стекла связана с решением двух основных проблем:

- изменением показателя преломления напрягающей оболочки при вытягивании волокна и
- склонностью такого стекла к образованию пузырей в процессе высокотемпературного сжатия трубки в штабик.

Для решения первой проблемы показатель преломления напрягающей оболочки в заготовке увеличивают на 0.004-0.006 по сравнению с ПП кварцевого стекла (рис. 5.13).

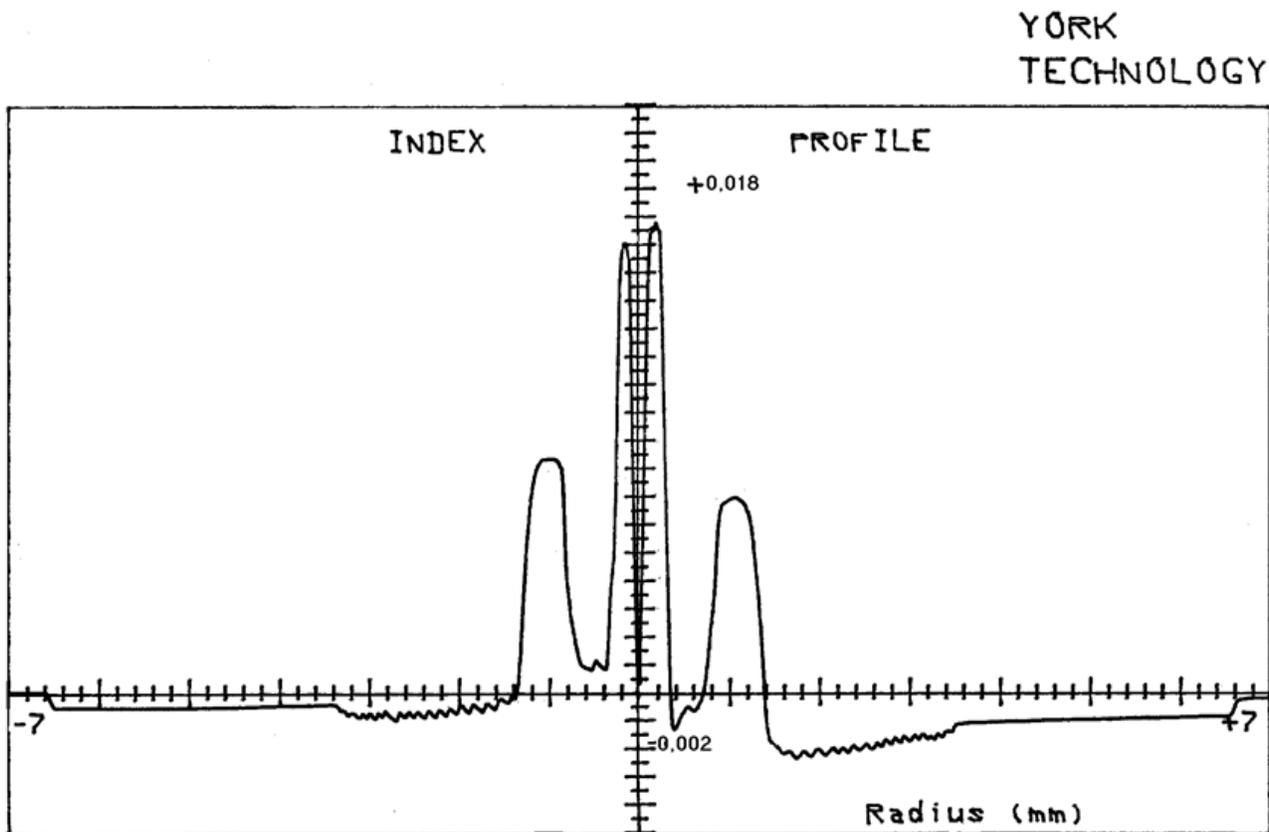


Рис. 5.13 Радиальный профиль показателя преломления в заготовке, измеренный на рефрактометре Р -101.

Это обусловлено изменением ПП борсодержащего кварцевого стекла в процессе вытягивания волокна из-за закалочных явлений высокотемпературной структуры, имеющей пониженный показатель преломления.

Окружающую сердцевину оболочку, ограничивающую проникновение излучения в борсодержащую оболочку, обладающую повышенным поглощением на

длине волны 1,55 мкм, легируют малыми количествами фтора и GeO_2 для понижения температуры спекания. Эти добавки противоположным образом изменяют ПП, обеспечивая тем самым величину рефракции, соответствующую кварцевому стеклу. Поэтому все оболочки в АОВС имеют величину ПП близкую к показателю преломления кварцевого стекла опорной кварцевой трубы (рис. 5.14).

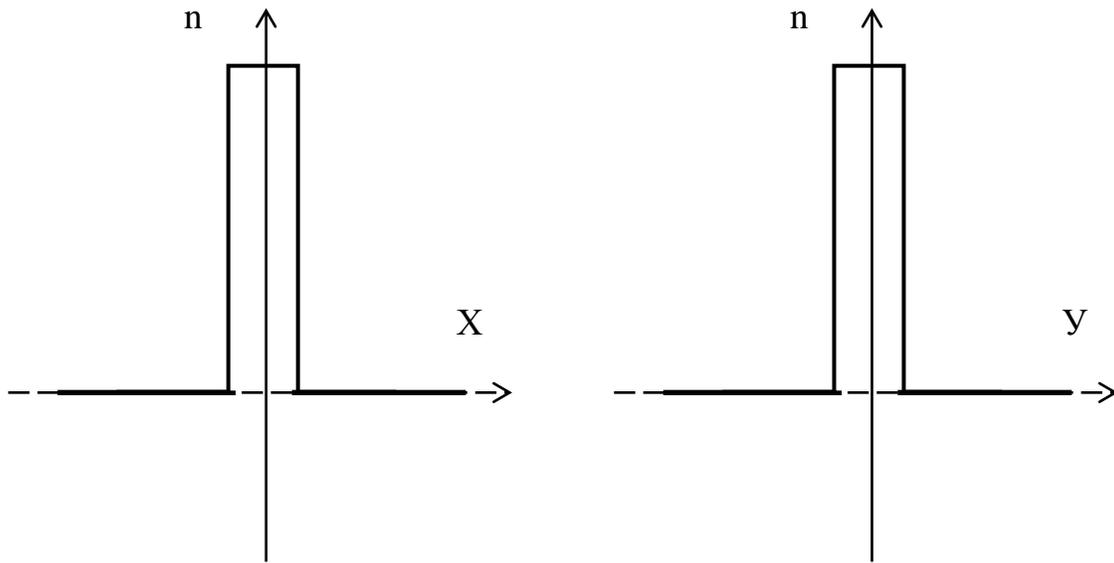


Рис. 5.14 Радиальный профиль ПП в световоде по двум ортогональным направлениям.

Вторая проблема связана с высоким равновесным давлением над диоксидом германия в сравнении с оксидом бора (рис. 5.15). Несмотря на то, что содержание диоксида германия в слое стекла напрягающей оболочки находится на уровне 10 мол. %, градиент концентрации компонентов в монослое не исключает наличие частиц и конгломератов из чистого GeO_2 .

Пористый осажденный слой напрягающей оболочки спекается при пониженных температурах, блокируя тем самым трудноспекаемые конгломераты из SiO_2 . Образующиеся таким образом поры вздуваются из-за высокой упругости пара над диоксидом германия при температурах сжатия трубки.

Оптимизация толщины и температуры осаждения слоев напрягающей оболочки устраняет это явление.

Степень сохранения поляризации излучения АОВС зависит от величины двулучепреломления, которая в свою очередь определяется коэффициентом термического расширения материала напрягающей оболочки и ее эллиптичностью.

При постоянном уровне двулучепреломления величина степени сохранения поляризации излучения зависит от диаметра стекловолокна, качества полимерного покрытия и диаметра намотки световода на катушку.

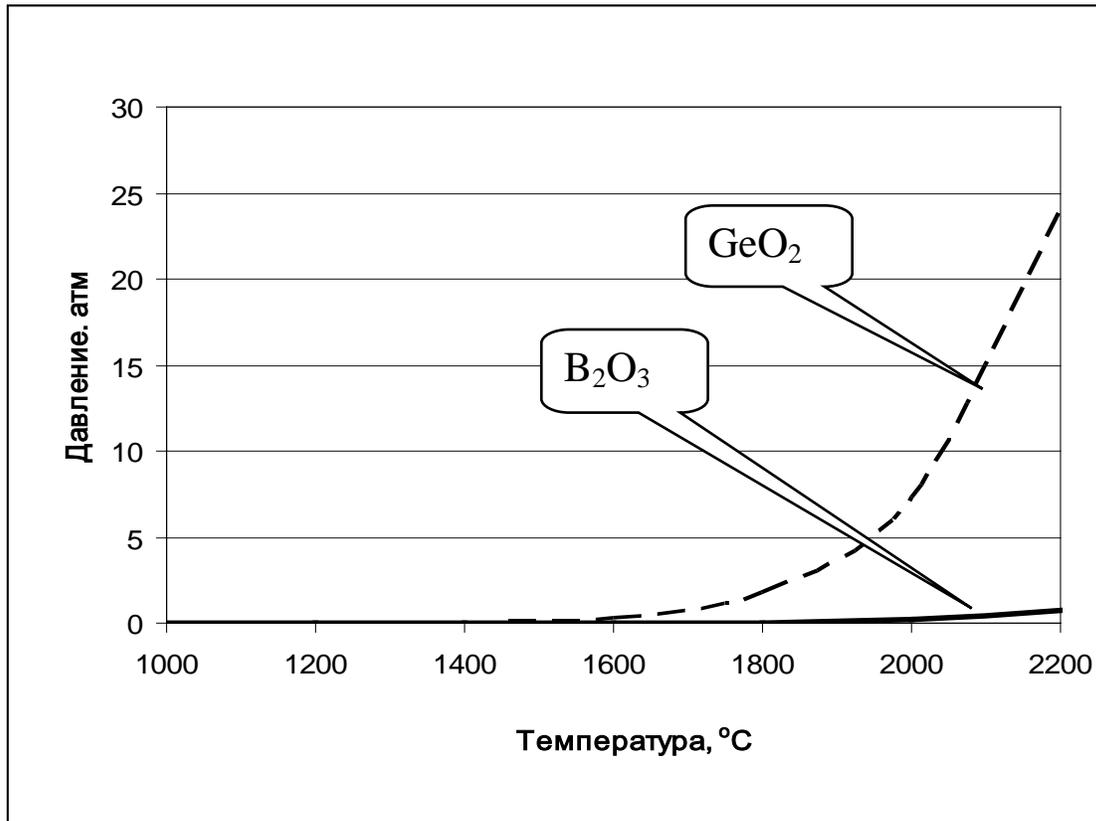


Рис. 5.15 Температурная зависимость равновесного давления над чистыми оксидами германия и бора.

ДЛП световодов, вызванное анизотропией напряженного состояния для оптического волокна с напрягающей эллиптической оболочкой, в соответствии с устоявшимися представлениями, зависит от ряда параметров:

$$V = CE (1-\nu)^{-1}(\Delta\alpha) (T_g-T_o) (a-b) (a+b)^{-1},$$

где, C – фотоупругая константа сердцевин, E – модуль Юнга кварцевого стекла, ν – коэффициент Пуассона, $\Delta\alpha$ - разность коэффициентов термического расширения эллиптической оболочки и кварцевого стекла, T_g и T_o – температура размягчения напрягающей оболочки и комнатная температура, соответственно, $(a-b)/(a+b)$ – эллиптичность оболочки.

Последующие исследования свойств АОВС с эллиптической напрягающей оболочкой показали, что наряду с указанным механизмом возникновения анизотропии напряжений, значительная часть напряженного состояния сердцевин

возникает за счет изменения плотности материала напрягающей оболочки, вызванного его структурными преобразованиями при охлаждении волокна в процессе вытягивания.

Плотность боросиликатного стекла в отличие от кварцевого стекла сильно зависит от температуры. Так, если в диапазоне 200-800 °С плотность кварцевого стекла, содержащего 21,5 мол. % B_2O_3 , изменяется на 0,006 г/см³ (рис. 3.16), то для чистого кварцевого стекла всего на 0,00025 г/см³. Это связано с тем, что с нагревом доля B_2O_3 , внедренного в стеклообразную сетку кремнезема, существенно увеличивается. Поэтому в процессе нагрева или охлаждения АОВС с эллиптической напрягающей оболочкой в сердцевине возникают анизотропные упругие напряжения.

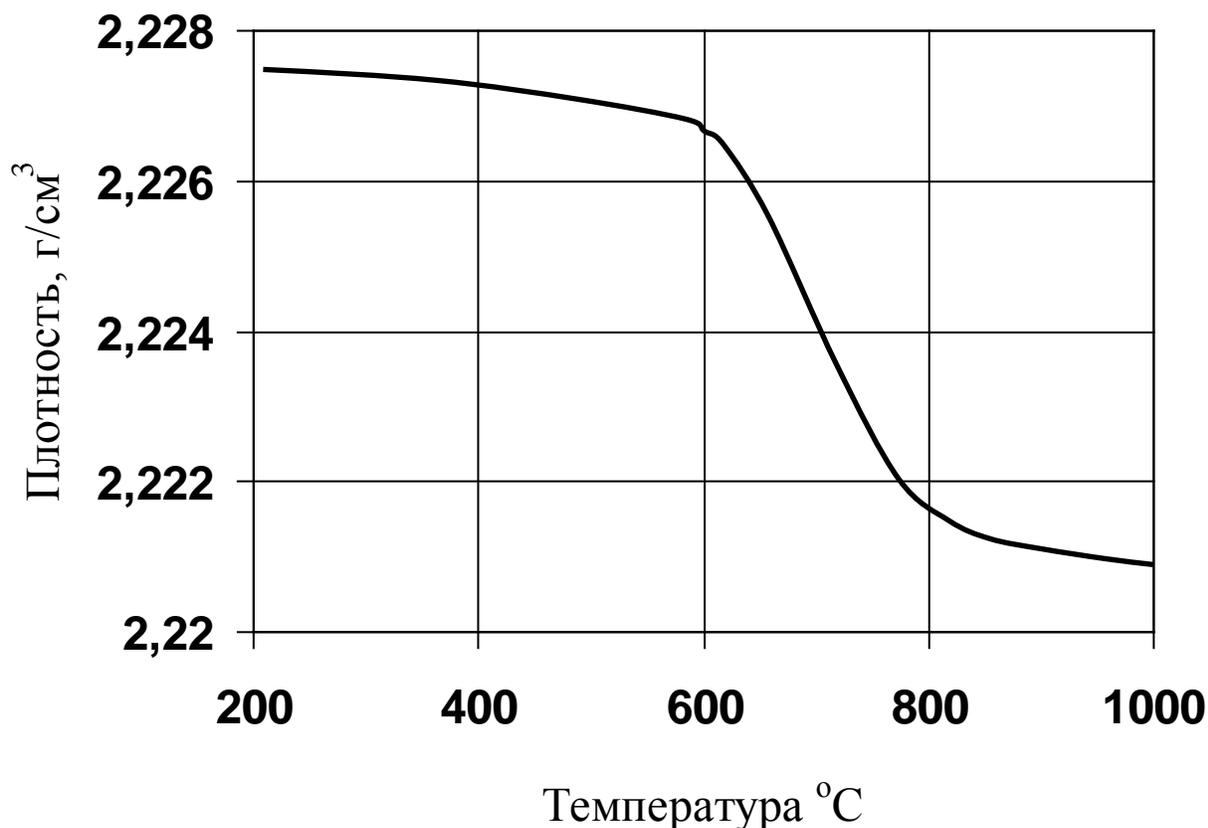


Рис. 3.16 Зависимость плотности боросиликатного стекла, содержащего 21,5 мол. % B_2O_3 от температуры отжига.

Нагрев АОВС приводит к уменьшению длины биений, что является следствием увеличения двулучепреломления стекла сердцевины. С увеличением температуры отжига скорость изменения длины биений растет (рис. 5.17), однако ДЛП для равновесной структуры стекла усиливается с понижением температуры.

Изменение структуры боросиликатного стекла наряду с изменением ДЛП приводит также к изменению его показателя преломления (Δn), зависящего от температуры (T) и времени температурной обработки (t):

$$\Delta n = \Delta n_0 \{1 - \exp[-t/\tau(T)]\}; \quad \tau(T) = \tau_0 \exp(F/kT),$$

где $\tau(T)$ – время процесса релаксации, зависящее от температуры, τ_0 – константа, равная $1,2 \cdot 10^{-6}$ час; F – энергия активации, равная 0,91 эВ; k – константа Больцмана ($8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К).

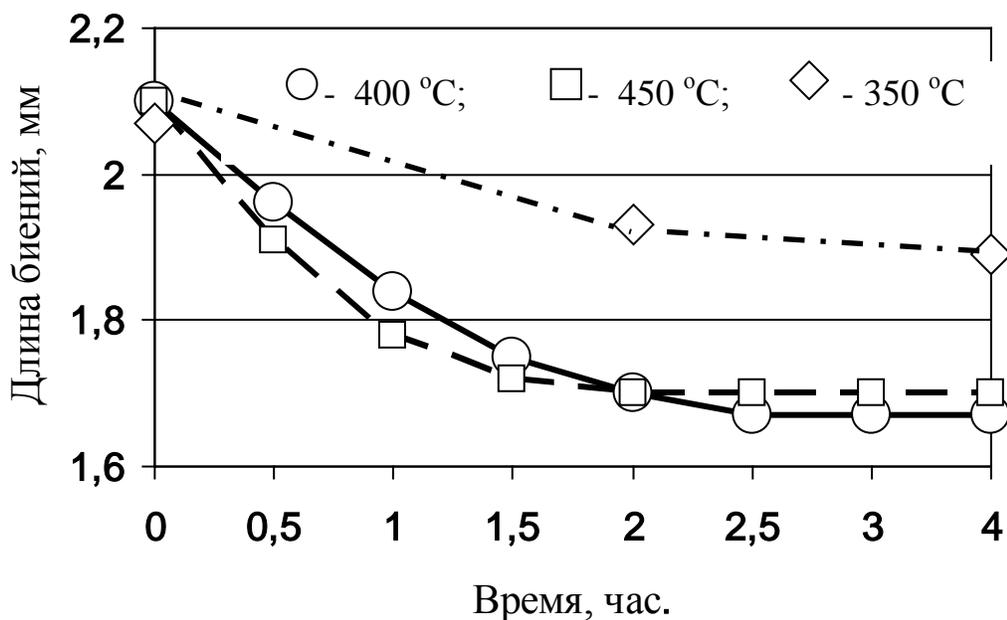


Рис. 5.17 Влияние температуры отжига АОВС на длину биений при $\lambda = 0,85$ мкм.

Эксперименты показали, что длительный отжиг АОВС с эллиптической напрягающей оболочкой в течение 42 часов при 380 °C увеличивает двулучепреломление на 47 %: с 0,0006 до 0,00088.

Изменение плотности борсодержащей оболочки при высоких температурах вытягивания волокна, когда она находится в жидком состоянии, также может привести в анизотропии напряжений в момент затвердевания сердцевины и наружной оболочки.

На рисунке 5.18 представлены результаты по исследованию зависимости двулучепреломления АОВС от эллиптичности напрягающей оболочки содержащей 17 мол. % B_2O_3 и GeO_2 в количестве, обеспечивающем величину ПП, соответствующую ПП наружной оболочки из кварцевого стекла. Стекловолокно диаметром 125 мкм защищено полимерным покрытием толщиной 40 мкм. Длина

волны отсечки высших мод находилась в пределах 1.35 – 1.45 мкм. Двухлучепреломление (В) световодов рассчитывали по формуле: $V = \lambda / L_b$, а длину биений ортогональных мод (L_b) измеряли методом спектрального сканирования при длине волны $\lambda \approx 1.5$ мкм.

Результаты экспериментов, представленных точками на рисунке 5.18, свидетельствуют о наличии двух линейных участков.

При эллиптичности напрягающей оболочки более 0.45, характер зависимости резко усиливается. Это связано, скорее всего, с появлением гидростатической компоненты в анизотропии напряженного состояния, так как при такой эллиптичности напрягающей оболочки малая ось эллипса соответствует по размеру диаметру изолирующей оболочки. Напрягающая оболочка разделяется на два изолированных сектора (рис. 5.19), способствуя тем самым возникновению гидростатического механизма наведения анизотропии напряженного состояния.

Когда же величина малой оси эллипса больше диаметра высоковязкой изолирующей оболочки, давление жидкого стекла напрягающей оболочки при охлаждении равномерно передается по всему ее объему и в равной мере распределяется по всем направлениям относительно сердцевины. Анизотропии напряжений за счет гидростатической компоненты в этом случае не возникает.

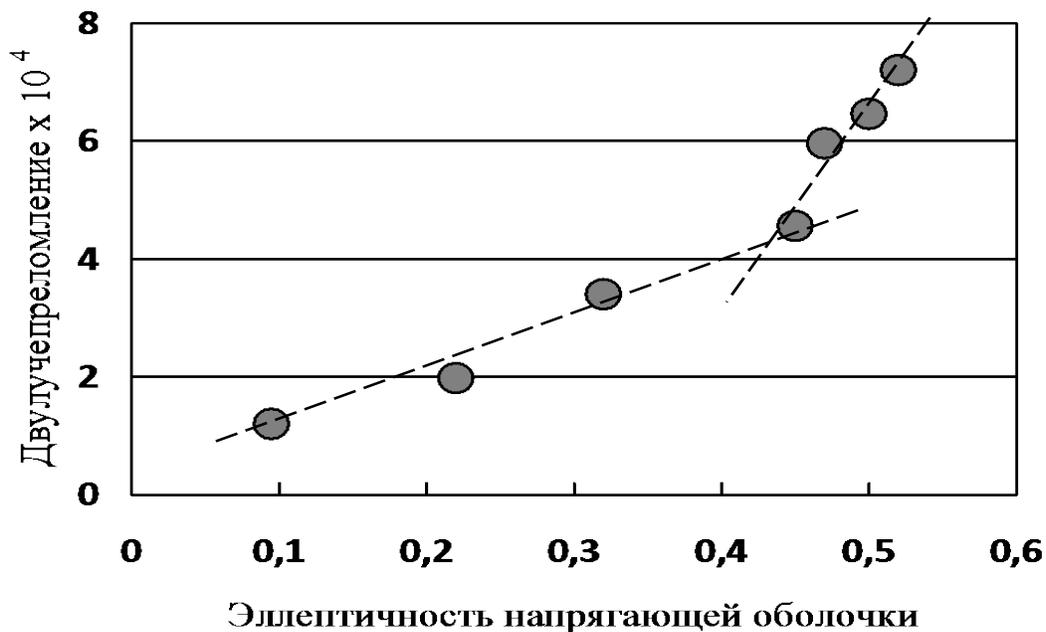


Рис. 5.18 Влияние эллиптичности напрягающей оболочки на ДЛП.

Вклад гидростатической компоненты в анизотропию напряженного состояния сердцевины усиливается с повышением температуры вытягивания волокна. Так, при эллиптичности напрягающей оболочки, равной 0,52, увеличение температуры

вытягивания с 2050 до 2150 °С приводит к изменению двулучепреломления с 0,00066 до 0,00072. При наведении ДЛП за счет разности коэффициентов термического расширения структурных элементов световода температура вытягивания волокна не должна влиять на анизотропию напряженного состояния сердцевинны.

Таким образом, разделение эллиптической напрягающей оболочки на два изолированных сектора способствует существенному повышению ДЛП в сердцевине АОВС и, как следствие, к увеличению степени сохранения поляризации излучения.

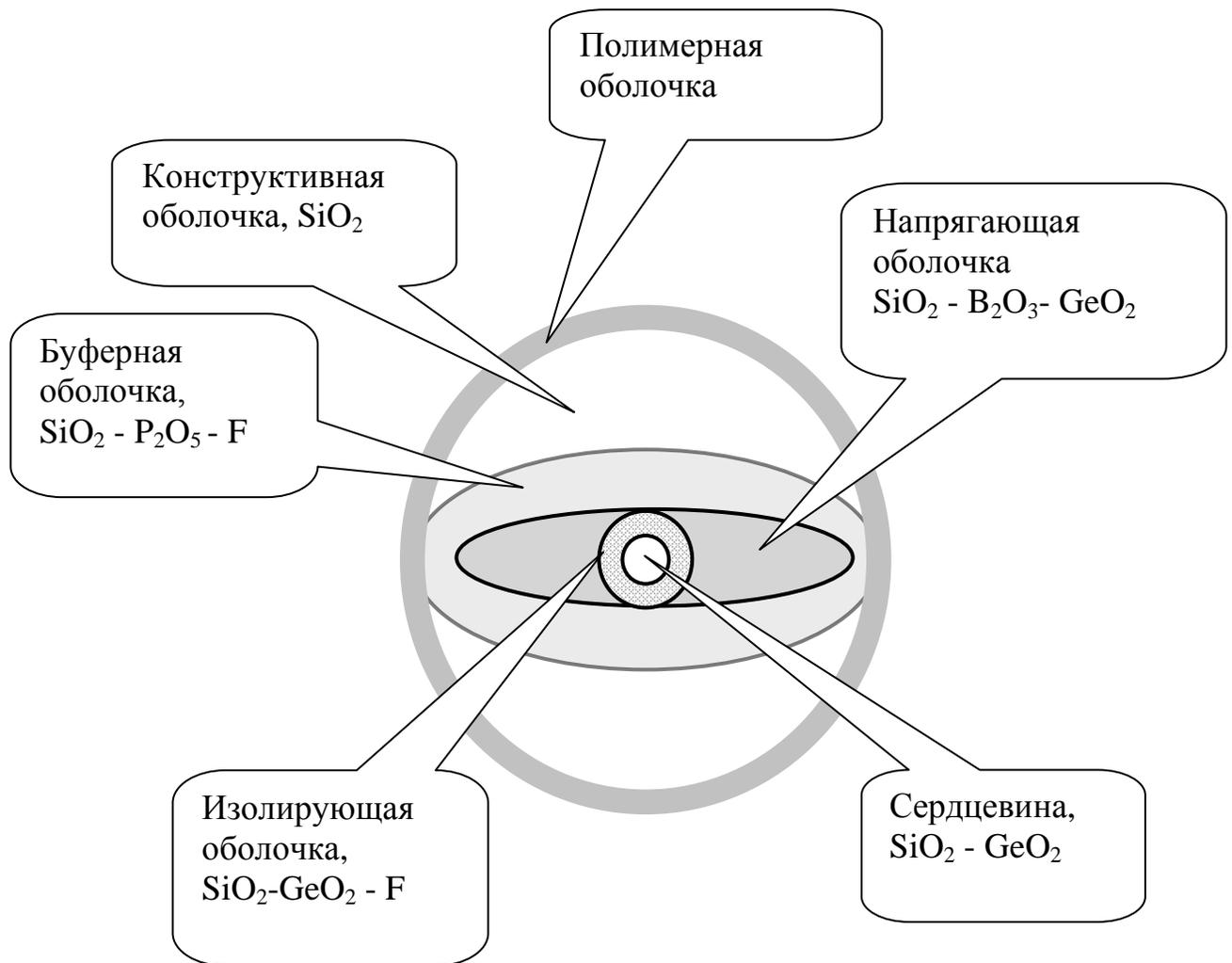


Рис. 5.19 Конструкция АОВС с разделенными секторами эллиптической напрягающей оболочки.

При постоянном уровне ДЛП степень сохранения поляризации излучения улучшается с увеличением диаметра стекловолокна (таблица 5.2).

Таблица 5.2

Влияние диаметра стекловолокна на степень сохранения поляризации излучения.

Диаметр стекловолокна, мкм	ДЛП	h-параметр, 1/м	Полимерное покрытие
40	0,0004	$5-7 \times 10^{-5}$	однослойное
80	0,0004	$1-2 \times 10^{-5}$	двухслойное
125	0,0004	$5-6 \times 10^{-6}$	двухслойное

Величина оптических потерь на длине волны 1,5 мкм для АОВС с борсодержащей напрягающей оболочкой зависит от трех основных параметров:

- разности ПП напрягающей оболочки и наружной оболочки из чистого кварцевого стекла в заготовке;
- соотношения диаметров изолирующей оболочки и сердцевины;
- диаметра намотки АОВС на катушку.
-

Показатель преломления напрягающей оболочки в заготовке, как ранее упоминалось, должен быть на 0,004-0,006 больше ПП наружной оболочки из кварцевого стекла.

Если он превышает больше, чем на 0,006, то ПП напрягающей оболочки в волокне будет выше, чем ПП наружной оболочки (рис. 5.20 А),

что приведет к оптическим потерям на излучение.

Такой же характер оптических потерь будет, если ПП напрягающей оболочки в заготовке будет превышать ПП кварцевого стекла на величину менее 0,004.

В этом случае напрягающая оболочка в волокне становится депрессированной (рис. 5.20 Б), через которую излучение туннелируется в наружную оболочку.

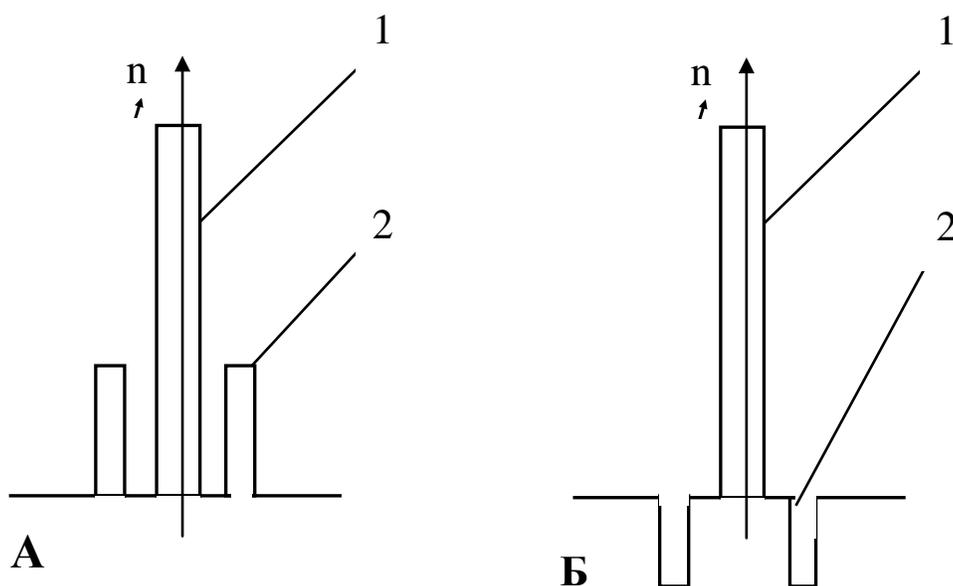


Рис. 5.20 Радиальный профиль ПП в световоде при завышенном (А) и заниженном (Б) его значении для напрягающей оболочки в заготовке:

- 1- ПП сердцевины;
- 2- ПП напрягающей оболочки.

Хороший уровень компенсации оболочек в световоде достигается при завышении ПП напрягающей оболочки в заготовке на 0,005 по сравнению с ПП наружной оболочки.

На рисунке 5.21 показана зависимость оптических потерь на излучение от разницы ПП напрягающей оболочки и наружной оболочки ($\Delta n_{об}$) в заготовке. Минимальный уровень оптических потерь на излучение достигается при $\Delta n_{об}$ равном 0,005.

С уменьшением этого параметра оптические потери растут гораздо сильнее, чем при его увеличении.

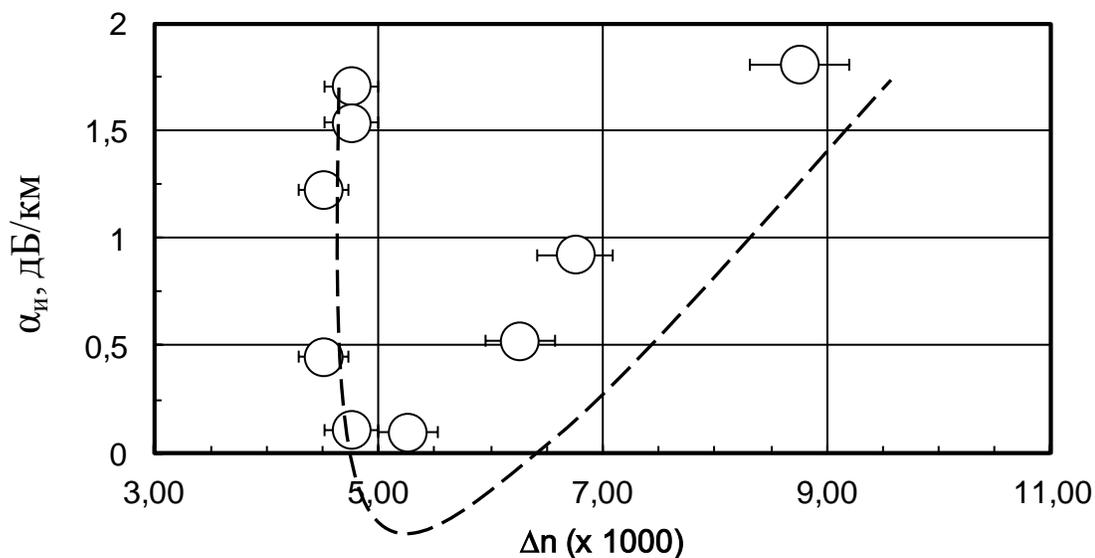


Рис. 5.21 Влияние $\Delta n_{об}$ напрягающей оболочки в заготовке на оптические потери АОВС за счет излучения ($\alpha_{из}$).

Второй фактор, определяющий оптические потери, зависит от толщины изолирующей оболочки.

На рис. 5.22 представлены экспериментальные данные по влиянию соотношения диаметров изолирующей оболочки и сердцевинны (γ) на оптические потери АОВС с $\Delta n_{об} \approx 0,005$ и числовой апертурой $\approx 0,12$.

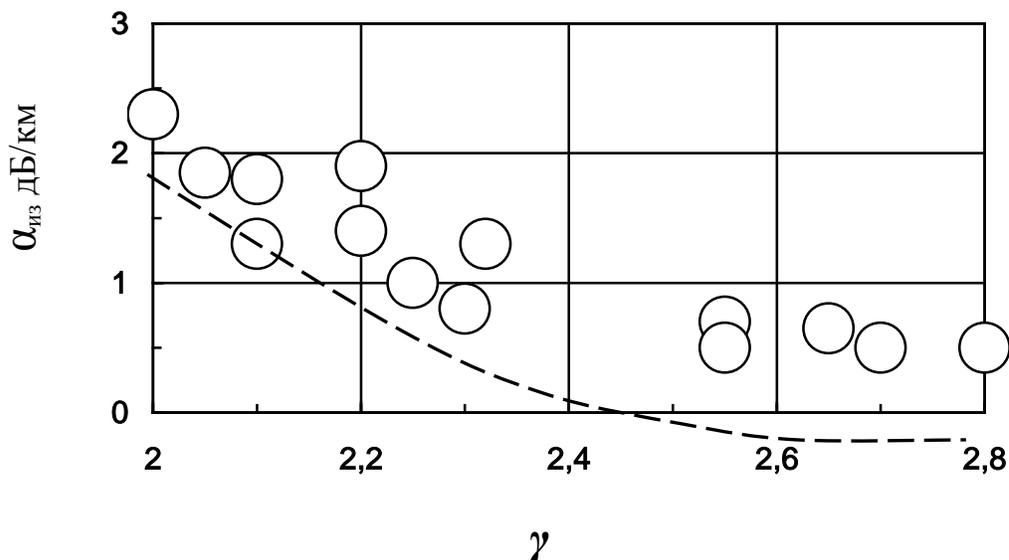


Рис. 5.22 Влияние соотношения диаметров изолирующей оболочки и сердцевинны (γ) на оптические потери ($\alpha_{из}$).

Как видно из рис. 5.22 при оптимальной толщине изолирующей оболочки ее диаметр в 2,5 раза должен быть больше диаметра сердцевины.

АОВС, использующиеся в волоконно-оптических гироскопах, наматываются на катушки световодного контура.

Поэтому зависимость оптических потерь от диаметра намотки (рис. 5.23) является важной технической характеристикой для такого рода приборов.

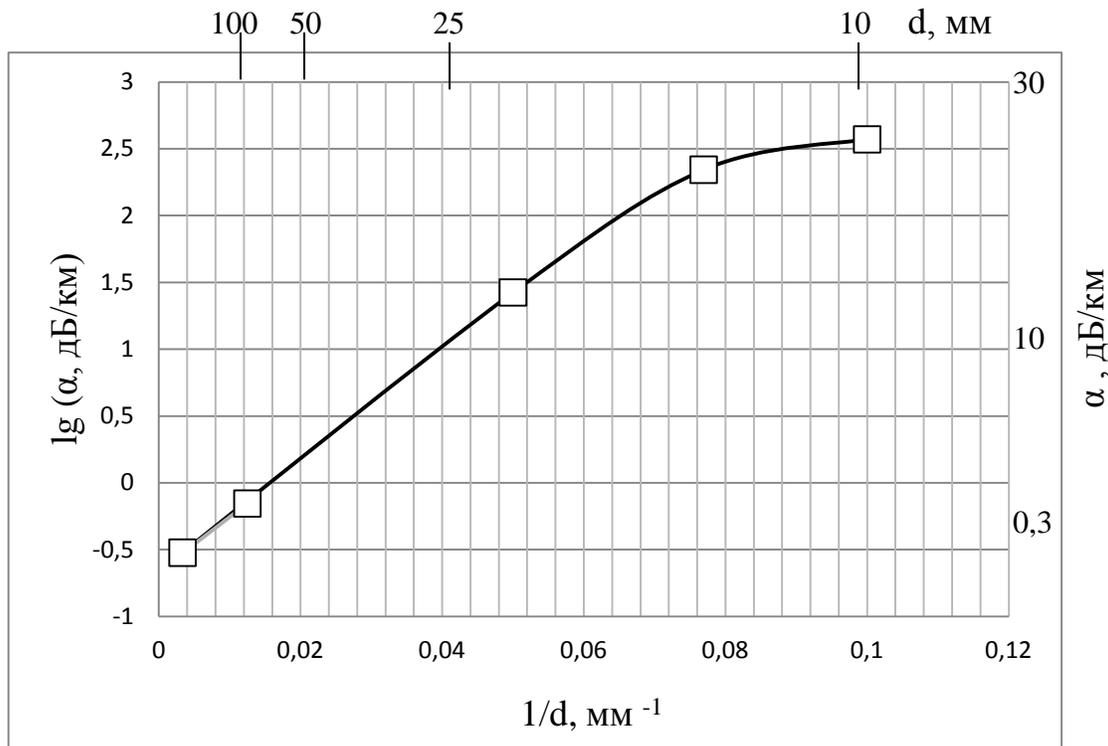


Рис. 5.23 Зависимость оптических потерь (α) от диаметра (d) намотки на катушку световода с числовой апертурой 0,12.

АОВС с эллиптической напрягающей оболочкой отечественного производства с диаметром стекловолокна, равным 125 мкм и разделенными секторами борсодержащей оболочки (рис. 5.19) по оптическим потерям при $\lambda = 1,55$ мкм соответствуют уровню лучших образцов зарубежного производства ($\alpha \leq 0,5$ дБ/км), а величина их ДЛП равна $7,6 \cdot 10^{-4}$.

Для аналогов зарубежного производства этот параметр хуже, равен $5 \cdot 10^{-4}$.

5.3.2 Световоды типа «Panda»

АОВС «Panda» несмотря на, пожалуй, самую трудоемкую технологию изготовления, являются сегодня основным типом световодов, изготавливаемых отечественными и зарубежными производителями. Эта исторически сложившаяся ситуация объясняется тем, что в свое время для таких АОВС были достигнуты наилучшие характеристики, что и определило массовое освоение такой технологии ведущими фирмами по производству световодов. Сегодня они, однако, уступают световодам с эллиптической напрягающей оболочкой, как по трудоемкости, материальным затратам, так и по поляризационным характеристикам.

Стадии процесса изготовления заготовки для световода типа «Panda» представлены схематично на рисунке 5.24.

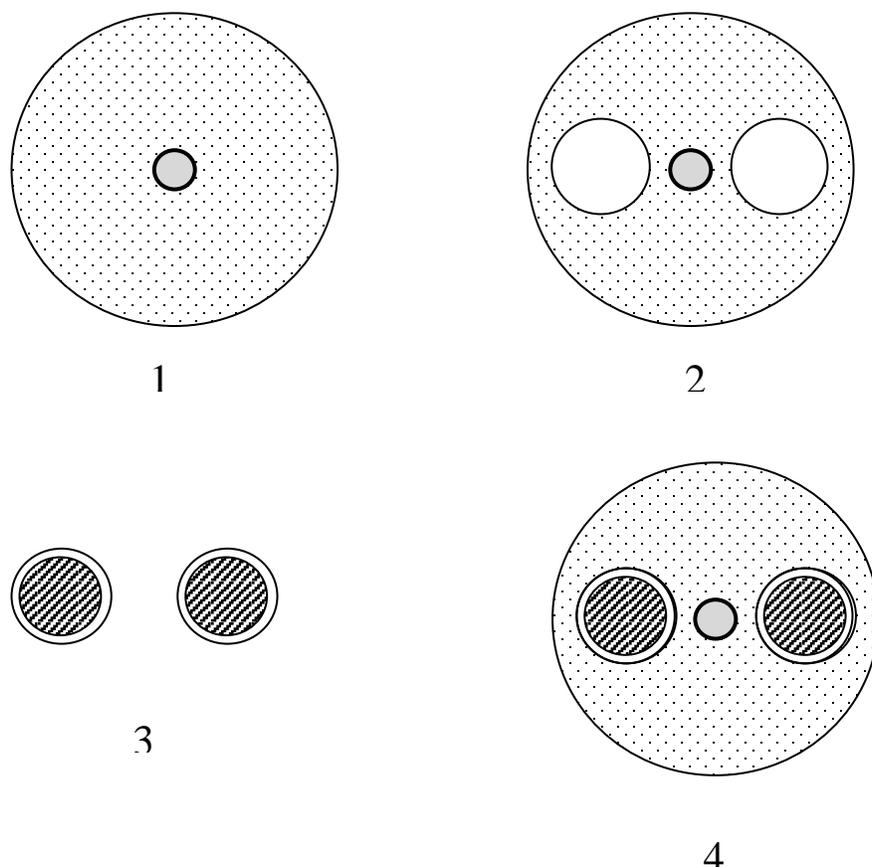


Рис. 5.24 Схема многоступенчатого процесса изготовления заготовки для вытягивания АОВС типа «Panda»: 1- изготовление исходной заготовки с сердцевиной методом MCVD или OVD; 2- сверление продольных отверстий; 3- изготовление MCVD методом напрягающих стержней с боросиликатным стеклом; 4- вплавление стержней в заготовку в процессе вытягивания волокна.

Основные недостатки технологии изготовления заготовок АОВС типа «Panda» таким трудоемким методом заключаются в следующем:

- многостадийность;
- длительная и трудоемкая операция сверления, осуществляемая на сложном и дорогостоящем оборудовании;
- малая длина заготовок (до 300 мм), ограниченная операцией сверления;
- значительные отходы дорогостоящего кварцевого стекла, обусловленные травлением наружной оболочки напрягающих стержней и сверлением заготовки;
- операция сплавления элементов происходит в процессе вытягивания волокна, что исключает возможность оценки качества стекла в пограничных зонах.

Многие из указанных недостатков устранены в усовершенствованном методе изготовления заготовок АОВС типа «Panda», использующем «send» технологию, когда в центр опорной кварцевой трубки вставляют заготовку с сердцевиной, вокруг нее с диаметрально противоположных сторон располагают два боросиликатных стержня, а свободное пространство в трубке заполняют кварцевой крупкой. Сборку сплавляют при вакуумировании внутреннего пространства трубки до остаточного давления 10^{-3} - 10^{-6} мм. рт. ст. (рис. 5.25).

Операцию высокотемпературного сплавления элементов сборки с засыпкой из кварцевой крупки проводят при 2000 – 2100 °С. Внутреннее пространство трубки вакуумируют, чем обеспечивают высокую скорость устранения пустот между частицами кварца и получение стекломассы, не содержащей пузырей.

Необходимый уровень откачки оценивается сопоставлением давления, создаваемого силами поверхностного натяжения P_σ , и давления остаточного газа внутри пузырей P , при их сжатии в процессе сплавления (рис. 5.26):

$$P_\sigma = 4\pi\sigma/d,$$

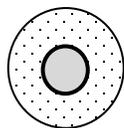
$$P = P_0(d_0^3/d^3),$$

где d_0 – диаметр пузыря до сжатия, d – его диаметр после сжатия, σ – поверхностное натяжение кварцевого стекла, P_0 – давление внутри трубки после ее вакуумирования.

В процессе сплавления кварцевых зерен размером 300-500 мкм образуются замкнутые поры (пузыри) величиной порядка 100 мкм.

При исходном давлении в них 10^{-3} - 10^{-6} атм. происходит сжатие пор внешним атмосферным давлением и силами поверхностного натяжения с образованием сферических полостей диаметром 10 – 0,3 мкм, соответственно (рис. 5.26).

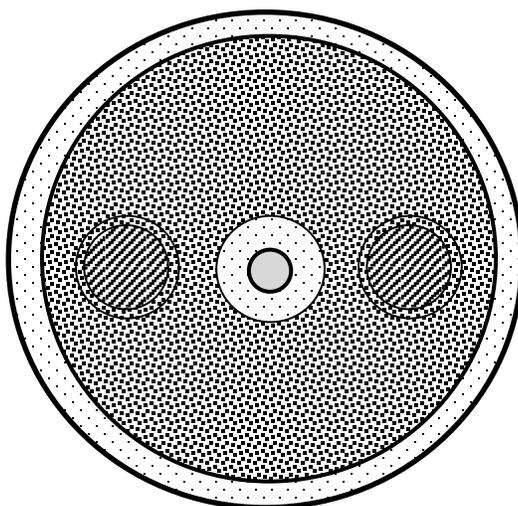
Изготовление MCVD методом заготовки с повышенным диаметром сердцевины.



Изготовление MCVD методом напрягающих стержней.



Сборка элементов в трубку и засыпка кварцевой крупкой.



Плавление крупки при вакуумировании.

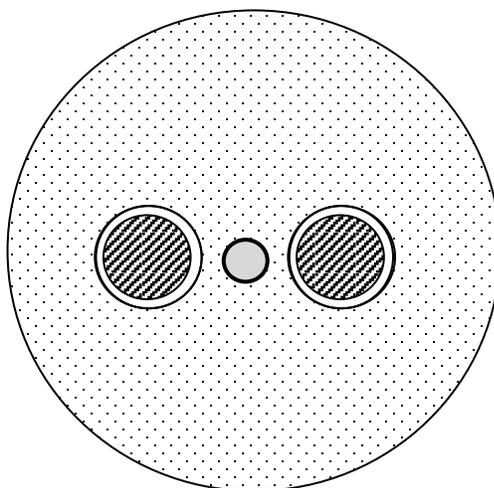


Рис. 5.25 Схема «send» метода получения заготовки АОВС.

В первом случае (линия 1) при диаметре пузыря 10 мкм процесс его сжатия прекращается, так как силы поверхностного натяжения не могут уменьшить его размер: $P_{\sigma} = P = 1$ атм.

Во втором случае, при начальном давлении 10^{-6} атм. (линия 2) имеем: $P_{\sigma} = P = 50$ атм и диаметр пузырей $\approx 0,3$ мкм. При таком высоком давлении остаточные газы полностью растворяются в кварцевом стекле. Пузыри исчезают.

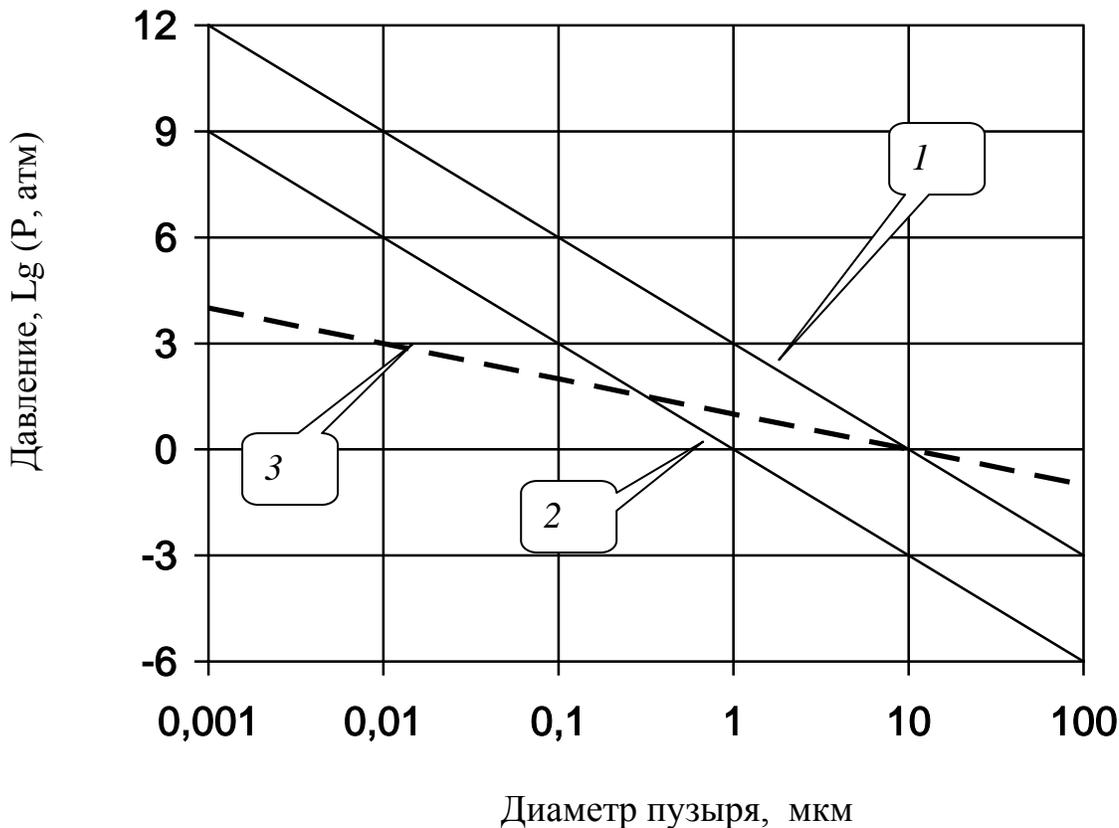


Рис. 5.26 Расчетная зависимость давления внутри пузыря от его диаметра: 1 и 2 – давление, обусловленное сжатием пузыря от исходного диаметра, равного 100 мкм при исходном давлении 10^{-3} (1) и 10^{-6} (2) атм; 3 – давление, создаваемое силами поверхностного натяжения.

Достоинства метода, использующего «send» технологию очевидны:

- существенное упрощение и аппаратное удешевление метода при замене операции сверления на операцию засыпки;
- малые затраты из-за низкой стоимости крупки из природного сырья;
- увеличение длины заготовки и возможность проведения сплавления элементов сборки до операции вытягивания световодов.

Параметры отечественных и зарубежных АОВС «Panda» промышленного производства на $\lambda = 1,55$ мкм составляют:

- оптические потери $\leq 0,5$ дБ/км; длина биения ≈ 3 мм; ДЛП $\approx 5,1 \cdot 10^{-4}$; величина h -параметра до $\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$.

5.3.3 АОВ типа «галстук-бабочка» (Bow-tie)

Структура заготовки АОВС типа «галстук-бабочка» приведена на рисунке 5.27. Теоретический анализ распределения напряжений в сердцевине показал, что структура напрягающего элемента в АОВС наиболее оптимальная с точки зрения создания наибольшего ДПП, должна иметь:

- два сектора из напрягающего борсодержащего стекла, осесимметрично расположенных относительно сердцевины;
- угол сектора, равный 90° ;
- наружный радиус напрягающего сектора, равный 0,75 от радиуса АОВС;
- внутренний радиус сектора, должен быть как можно меньше.

Последнее требование зависит от длины рабочей волны:

- при $\lambda = 1,55$ мкм этот радиус определяется толщиной изолирующей оболочки, ослабляющей оптическое поглощение оксидом бора напрягающего сектора;
- при $\lambda = 0,85$ мкм оксид бора не сказывается на оптических потерях, и внутренний радиус напрягающих секторов может быть соразмерен с диаметром сердцевины.

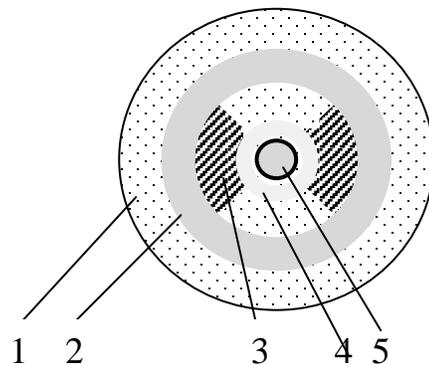
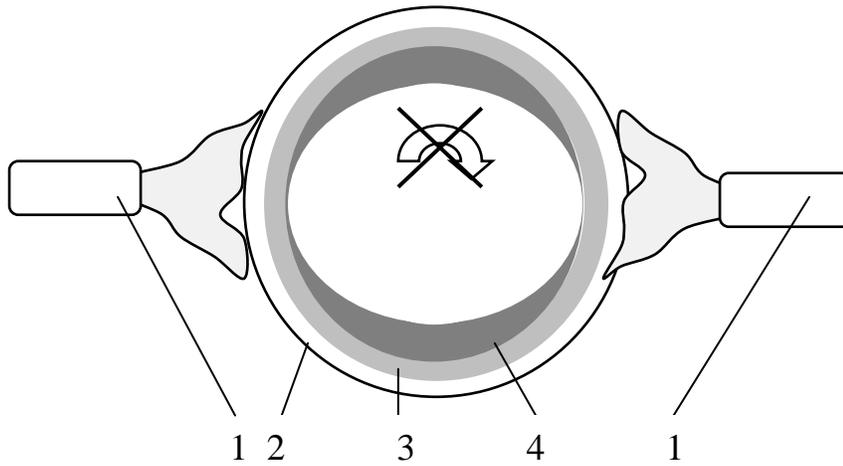


Рис. 5.27 Структура заготовки АОВС «галстук-бабочка»: 1- кварцевое стекло; 2- защитная оболочка; 3- напрягающий сектор; 4- изолирующая оболочка 5- сердцевина.

Технология изготовления заготовок АОВС методом MCVD включает следующие операции:

- осаждение на внутреннюю поверхность опорной трубки слоев защитной оболочки ($\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-F}$);
- осаждение слоев боросиликатного или германоборосиликатного стекла напрягающей оболочки ($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$);
- газофазное травление напрягающей оболочки при подаче в трубку фторсодержащего реагента (например, CF_2Cl_2 или SF_6) при азимутально-неоднородном нагреве трубки (рис. 5.28);

А



Б

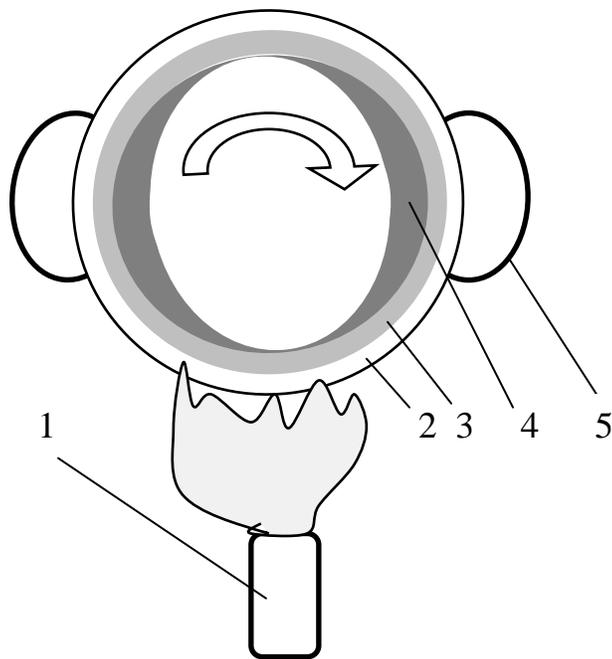


Рис. 5.28 Схема процессов азимутально-неоднородного газофазного травления с использованием двух горелок (А) и тепловых экранов (Б): 1 – горелка, 2 – кварцевая трубка, 3 – защитная оболочка, 4 – напрягающая оболочка, 5 – тепловые экраны.

- осаждение слоя изолирующей оболочки ($\text{SiO}_2\text{--GeO}_2\text{--F}$);
- осаждение слоя германосиликатного стекла сердцевины;
- сжатие трубки в штабик-заготовку.

В процессе высокотемпературного сжатия остатки напрягающей оболочки формируются в сектора.

Возможны два способа азимутально-неоднородного нагрева (рис. 5.24): - нагрев с помощью двух горелок, перемещающихся вдоль невращающейся трубки (А);
 – нагрев вращающейся трубки горелкой при использовании тепловых экранов, которые устанавливаются на этапе травления напрягающей оболочки (Б).

Первый способ предложен англичанами, а второй – специалистами ФИРЭ РАН. Второй способ более желателен, так как позволяет легче регулировать зону нагрева за счет угла экранов и их толщины и обеспечивает лучшую равномерность зоны нагрева по длине трубки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное в настоящем учебном пособии состояние технологии АОВС предопределяет следующие перспективы их развития:

1. Разработки газофазных процессов нанотехнологии специальных световодов в своем совершенствовании не достигло пределов. Открывающиеся новые физические явления незамедлительно находят реализацию в разработке разных конструкций волоконных световодов и способах их производства. Их технологии становятся проще, доступнее и менее затратные.
2. Сегодня производители отмечают растущий интерес к специализированным волокнам для применения в оптических системах гражданского и оборонного назначения. Стоимость мирового ежегодного потребления специальных оптических волокон составляет более 1,2 млрд долларов.
3. Достигнутый уровень технических характеристик АОВС раскрывает большие возможности для создания на их основе интерферометрических датчиков и волоконно-оптических гироскопов. Тем не менее, конструкции и технологии производства световодов постоянно совершенствуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумкова Д.Б., Левченко А.Е. Специальные волоконные световоды: учебное пособие./Д.Б. Шумкова, А.Е. Левченко.- Пермь.: Изд-во ПНИПУ, 2011.—176 с.
2. Иванов Г.А., Первадчук В.П. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учебное пособие./ Г.А. Иванов, В.П. Первадчук. — Пермь. Изд-во ПНИПУ, 2011.—171 с.
3. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: учебное пособие./ Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров.— СПб.: Изд-во НИУ ИТМО,2009.—176 с.
4. Дж. Гауэр, Оптические системы связи. М: Радио и связь. 1989 г. 501 с.
5. Унгер Х. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы.- М.: Мир, 1977. 656 с.
6. Базаров Е.Н., Бурков В.Д., Шатров А.Д. Теоретические основы волоконно-оптической техники. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 203 с.
7. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники. – М.: Изд-во МГУЛ, 2008. – 332 с.
8. JANAF Thermochemical tables, (<http://kinetics.nist.gov/janaf/>).



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Кафедра физики и техники оптической связи вошла в состав инженерно-физического факультета в 1976 г. И в 2010 году была переведена на вновь созданный факультет инфокоммуникационных технологий.

Заведующим кафедрой является д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ И.К. Мешковский. На кафедре развились два научно-технических направления: технология оптического волокна и создание новых композиционных оптических материалов.

В 1982 году кафедра первой в стране стала осуществлять подготовку инженеров по специальности «Волоконная и интегральная оптика». На базе кафедры были проведены первые в России разработки по технологии производства оптического волокна, оптических жгутов, различных волоконно-оптических приборов и систем.

Возникла научная школа в области фотоники дисперсных и нелинейных сред. В 1998 году в связи с развитием систем телекоммуникации и высокими потребностями в специалистах по волоконно-оптической связи кафедра первой в Санкт-Петербурге стала осуществлять подготовку инженеров по специальности «Физика и техника оптической связи». С 2008 года - подготовку бакалавров и магистров по направлению «Телекоммуникации», а с 2011 года - подготовку бакалавров и магистров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

На кафедре проводятся студенческие научные семинары по телекоммуникации. Кафедра осуществляет научные разработки совместно со многими зарубежными фирмами и университетами.



Ероньян Михаил Артемьевич, Мешковский Игорь Касьянович

Основы нанотехнологии анизотропных одномодовых волоконных световодов

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО
Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе