



ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ



Лекция 4



Содержание лекции

1. Элементы волоконного лазера.
2. Активные добавки волоконных световодов.
3. Активные волоконные световоды.
4. Схемы накачки активных световодов.
5. Генерационные параметры иттербиевых волоконных световодов, легированных P_2O_5 и Al_2O_5 .

Элементы волоконного лазера

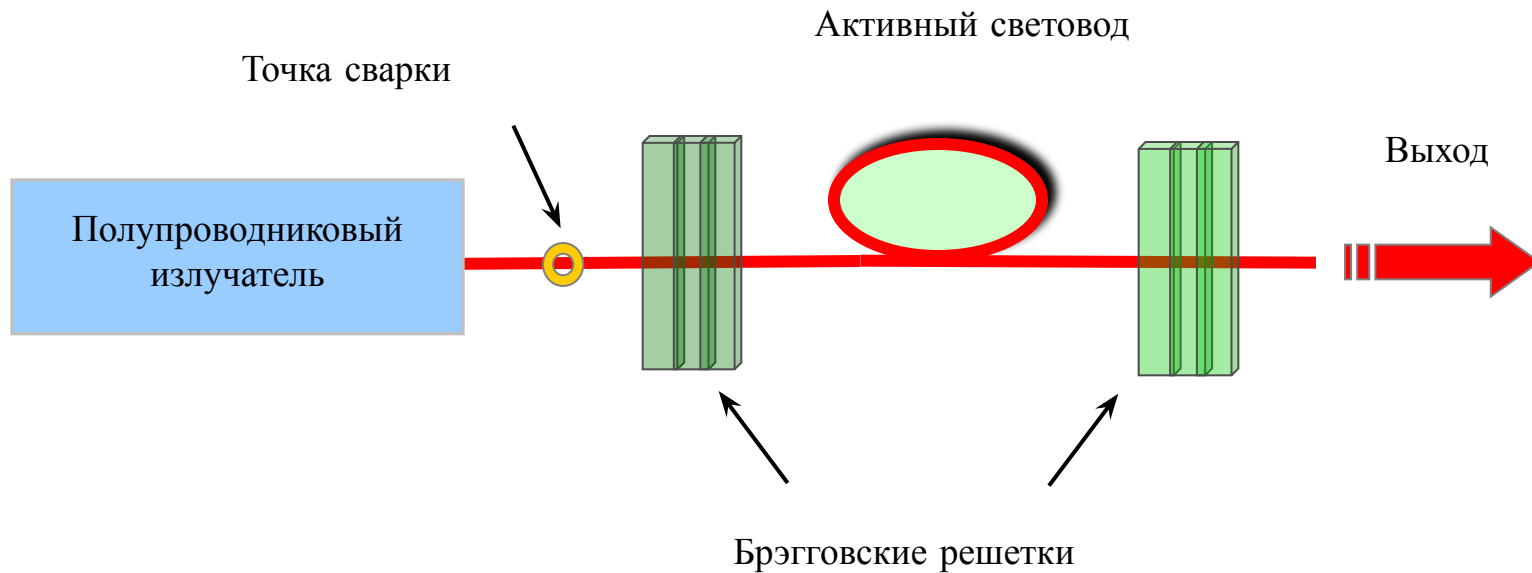


Рис.1. Простейшая конфигурация волоконного лазера.

Активные добавки волоконных световодов

Под активными понимают волоконные световоды, в состав материала которых входят ионы элементов, обладающих оптическими переходами.

Применимость активного иона для легирования волоконных световодов на основе кварцевого стекла определяется следующими основными факторами:

- активный ион должен иметь излучательный переход в ближней ИК – области спектра, где кварцевое стекло наиболее прозрачно;

•
•
•

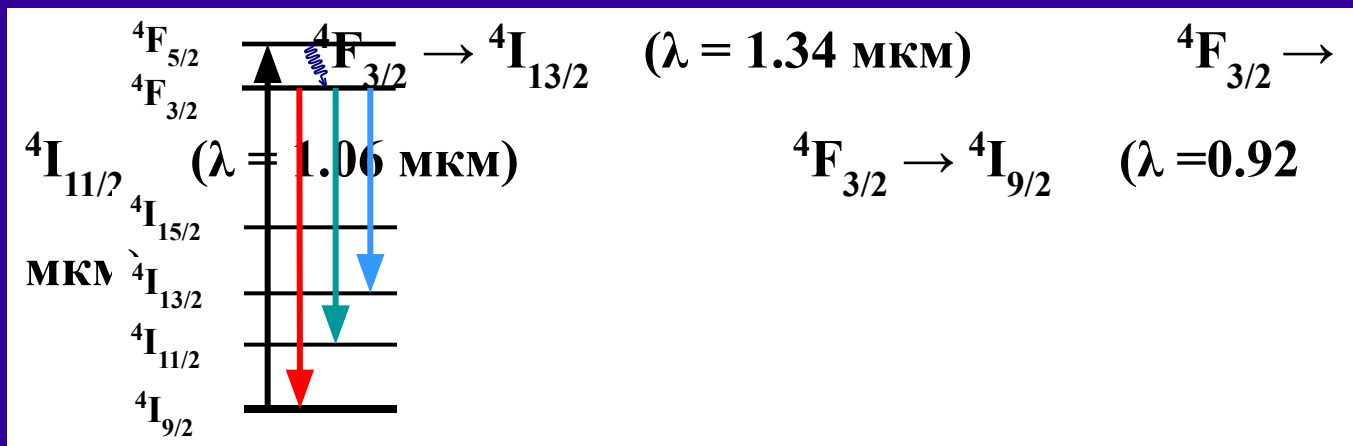
Таблица №1.

Редкоземельные элементы, используемые для создания активных волоконных световодов, и спектральные области их люминесценции.

Активный ион	Область люминесценции (мкм)
Nd³⁺	0.92 - 0.94 , 1.05 – 1.1 , 1.34
Yb³⁺	0.98 – 1.16
Er³⁺	1.53 – 1.6
Ho³⁺	1.9 – 2.1
Tm³⁺	1.7 – 1.9

Неодим (Nd^{+3})

Три основные полосы люминесценции расположены в области 0.92 ; 1.06 и 1.34 мкм.



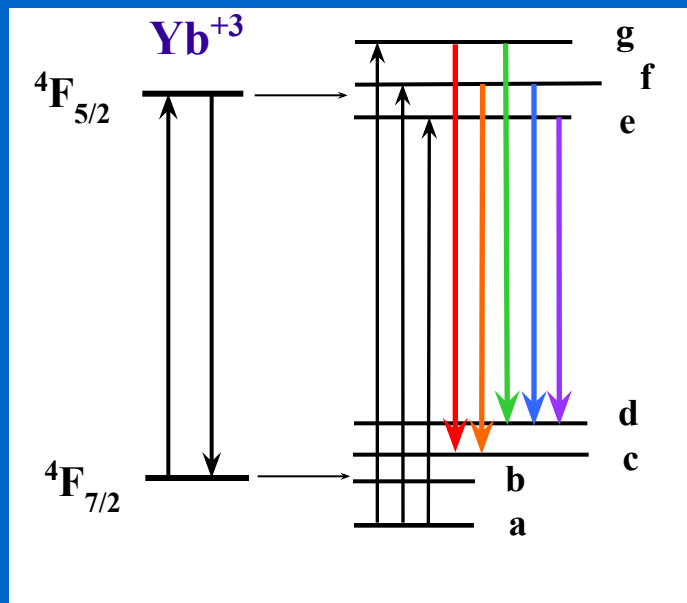
Реализация волоконных лазеров с использованием перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ ($\lambda = 0,92 \text{ мкм}$) затруднена из – за конкуренции со стороны люминесценции в области 1,06 мкм.

Генерация на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ($\lambda = 1,34 \text{ мкм}$) затруднена из – за поглощения из возбужденного состояния.

Создание эффективного волоконного лазера на длине волны 0,92 мкм связано с подавлением люминесценции на длине волны 1,06 мкм.

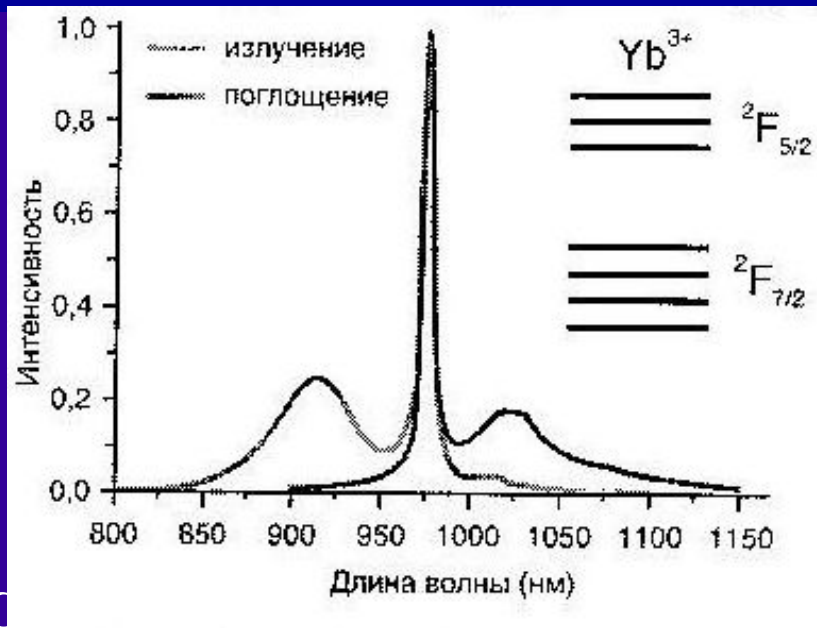
Иттербий (Yb^{+3})

Таблица 2. Положение подуровней Yb^{+3} в матрицах сердцевины волоконных АС и ФС световодов.



Уровень	Под-уровень	Энергия (см ⁻¹)	
		ФС световод	АС световод
$2F_{7/2}$	a	0	0
	b	260	400
	c	440	760
	d	740	1210
$2F_{5/2}$	e	10260	10245
	f	10520	10917
	g	10930	10940

Спектр поглощения и люминесценции волоконных световодов, легированных ионами Yb^{3+}

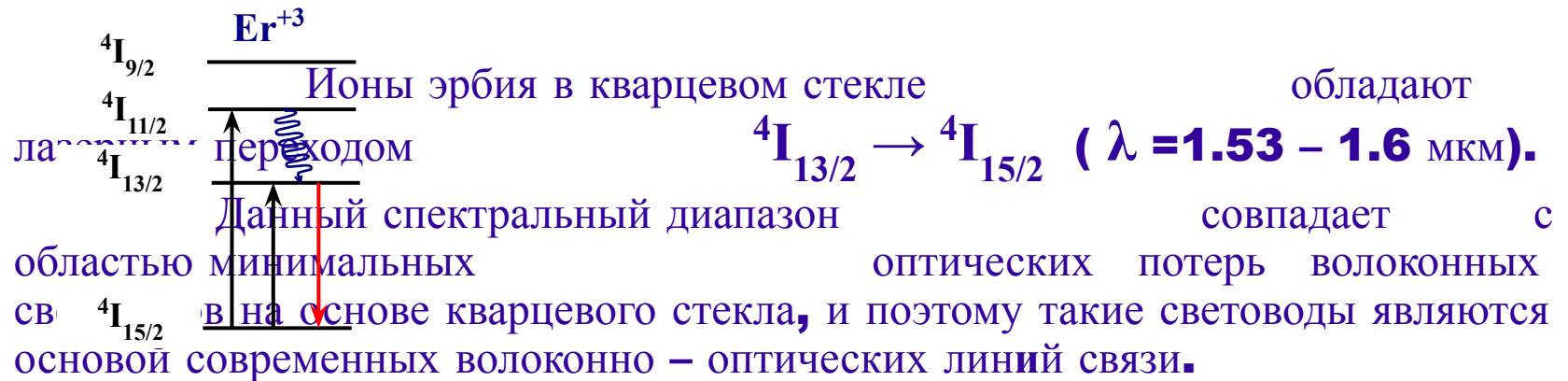


длина
максимума
978 нм.

Спектр люминесценции имеет максимумы в области **978 – 982 нм** и **1030 – 1040 нм**, простираясь до области **1150 – 1200 нм**.
Время жизни на метастабильном уровне для алюмосиликатного стекла составляет около **0.8 мс**.

Эрбий (Er^{+3})

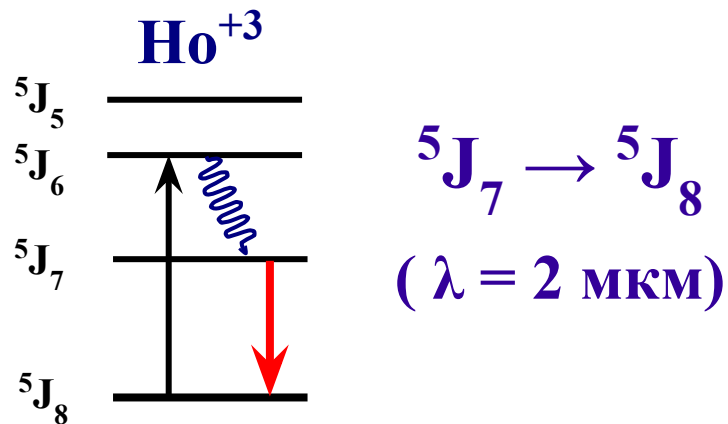
Система уровней эрбия



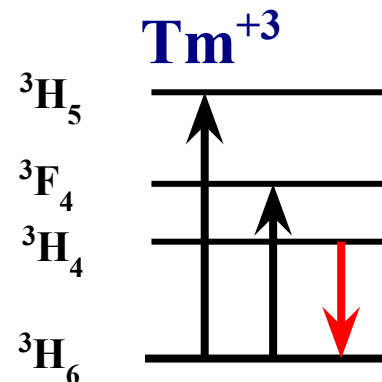
Квантовая эффективность таких световодов приближается к **100%**, т.к. существуют полупроводниковые источники накачки на **1.45 - 1.48** мкм.

Высокие коэффициенты усиления данных световодов связаны с большим временем жизни на метастабильном уровне (около **10** мс).

Гольмий (Ho^{+3}) и тулий (Tm^{+3})



Время жизни на возбужденном уровне составляет около **0,5 мс.** Существует интенсивная полоса поглощения в области **1.15 мкм.** В качестве источника накачки в этом диапазоне используется иттербиевый волоконный лазер.



Спектральный диапазон возможной лазерной генерации (**1850 – 2100 нм**). Генерация получена на переходе $3H_4 \rightarrow 3H_6$.

Накачка осуществляется в полосу, обусловленную переходом на уровень $3F_4$ (**~ 790 нм**), либо на уровень $3H_5$.

Активные волоконные световоды

Технологические процессы , используемые для производства активных волоконных световодов:

- MCVD (модифицированное химическое осаждение из газовой среды);
- OVD (внешнее осаждение из газовой среды);
- VAD (аксиальное осаждение из газовой среды);
- PCVD (осаждение с использованием плазмы).

Для введения активной примеси в этих процессах наибольшее распространение нашли метод пропитки, когда непроплавленный пористый материал сердцевины пропитывается раствором соли активной добавки, и легирование из летучих соединений.

MCVD – modified chemical vapor deposition – модифицированный метод химического осаждения из газовой фазы

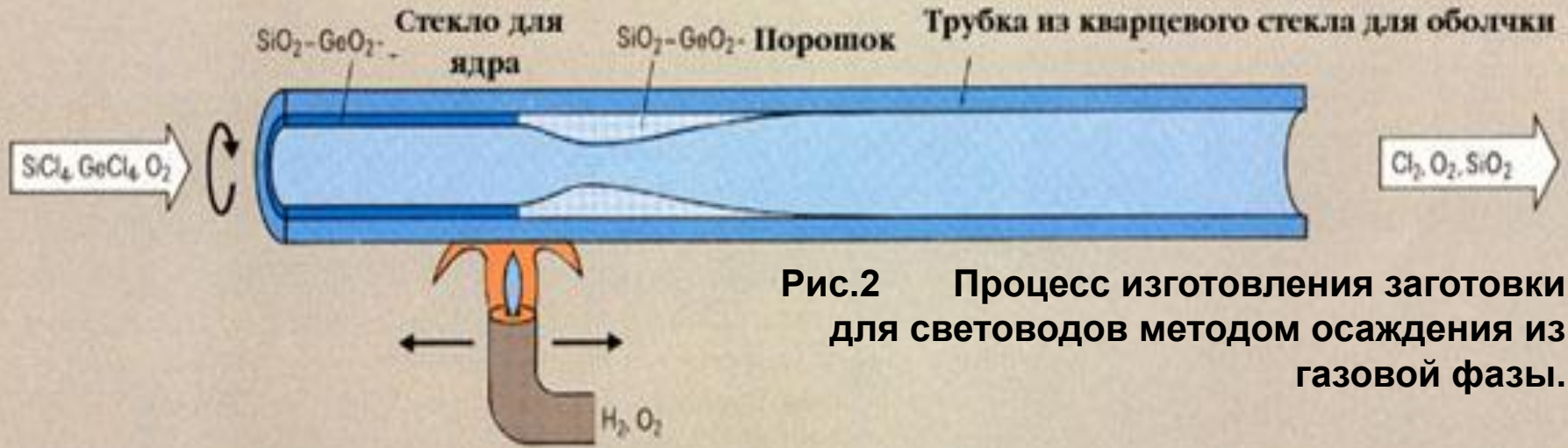


Рис.2 Процесс изготовления заготовки для световодов методом осаждения из газовой фазы.

- В этом методе добавляемая примесь SiO_2 отложена цилиндрическими слоями – начинается со слоя стекла для оболочки оптического световода и оканчивается слоем ядра волокна – на внутренней стороне вращающейся трубки, которая нагрета до 1600°C внешней горелкой.
- Поскольку каждый дискретный слой отложен друг на друга, то при нагревании они одновременно спекаются, чтобы сформироваться в твердое тело. Это происходит под действием горелки, путем перемещения её по трубе в направлении выброса газа, оплавливая слои кварца, отложенные перед

Модифицированный метод химического осаждения из газовой фазы

- В горячей зоне напротив горелки синтезируется оксид кремния. Образуются «пушинки» окиси, которые дрейфуют из горячей области в более холодную и прилипают к стенке. Этот процесс называется термофорезом.
- Важно, что осаждение происходит не в месте нагрева пламенем, а перед ним – там, куда пламя еще не дошло. На поверхности трубки образуется пористый слой окиси, и двигаясь дальше, горелка его проплавляет – остекловывает. Так получается слой чистого стекла.
- При следующих проходах через трубку пропускают ещё и германий в виде хлорида. Таким образом, легируют материал световода, создавая в нем градиент коэффициента преломления.
- После того, как необходимое число слоев осаждено, подачу хлоридов выключают, а температуру пламени увеличивают – в результате трубка плавится и схлопывается просто под действием

Модифицированный метод химического осаждения из газовой фазы

- Размеры заготовок, полученных этим способом, позволяют изготавливать волоконные световоды длиной до 10 км.
- Достижимые величины затухания на длине волны $\lambda = 1300$ нм в настоящее время составляют 0,5 дБ/км.
- Причиной этому является то, что во внутренней части трубы, контакт синтезируемого стекла с пыльным или влажным воздухом полностью отсутствует.
- Для реализации данного метода нужна очень хорошая труба заготовка без включений, так как включения – это центры напряжений, из которых могут начать расти трещины. Этого можно избежать путем химической или огневой полировки

Модифицированный метод химического осаждения из газовой фазы

- **Преимущества метода:**

- В процессе изготовления каждого слоя сохраняется закрытое пространство, что позволяет избежать примеси посторонних материалов.
- Легко управлять показателем преломления слоя.
- Оборудование, использованное для производства, относительно несложно по конструкции и просто в управлении.

- **Неудобства метода:**

- Размер стержня заготовки ограничен размером установки и трубкой кварцевого стекла.
- Должна использоваться только заготовка из кварцевого

OVD – outside vapor deposition –

МЕТОД ВНЕШНЕГО ОСАЖДЕНИЯ

В данном методе стекло осаждается на огнеупорный стержень прямо из пламени горелки, куда подаются хлориды исходных веществ.

- Поскольку осаждение происходит в атмосфере пламени, в таком материале остается много воды, получившейся в результате окисления водорода. Поэтому, после того как центральный стержень вынимают, приходится продувать заготовку хлором, который экстрагирует воду. И только после этого заготовка остекловывается.
- Перечисленные выше три фазы процесса, а именно – осаждение на огнеупорный стержень, сушка и остекловывание, происходит последовательно. Поэтому каждая фаза может быть оптимизирована отдельно, что позволяет

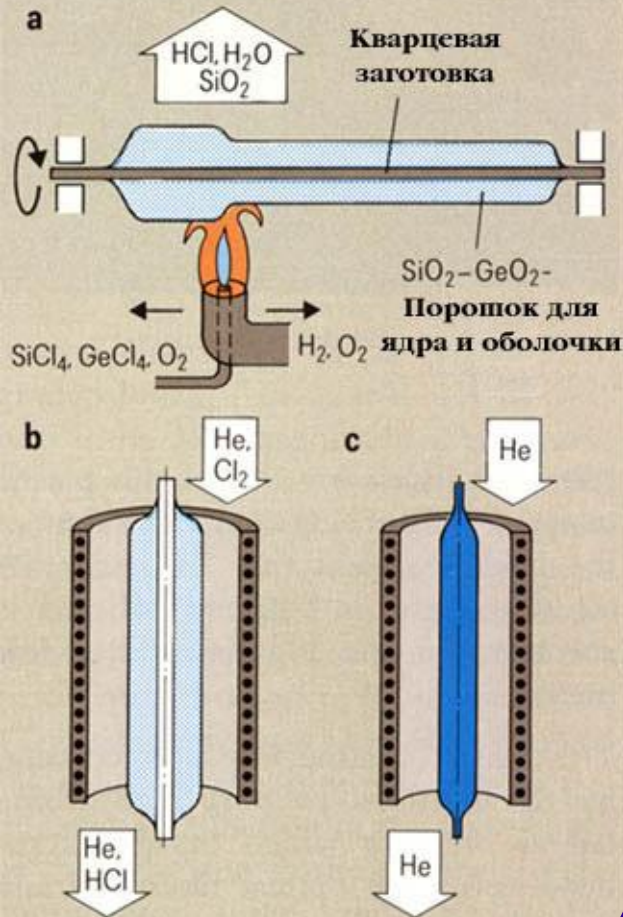


Рис. 3 Изготовление заготовки методом OVD (a) с последующей сушкой (b) и спеканием (c).

Метод внешнего осаждения

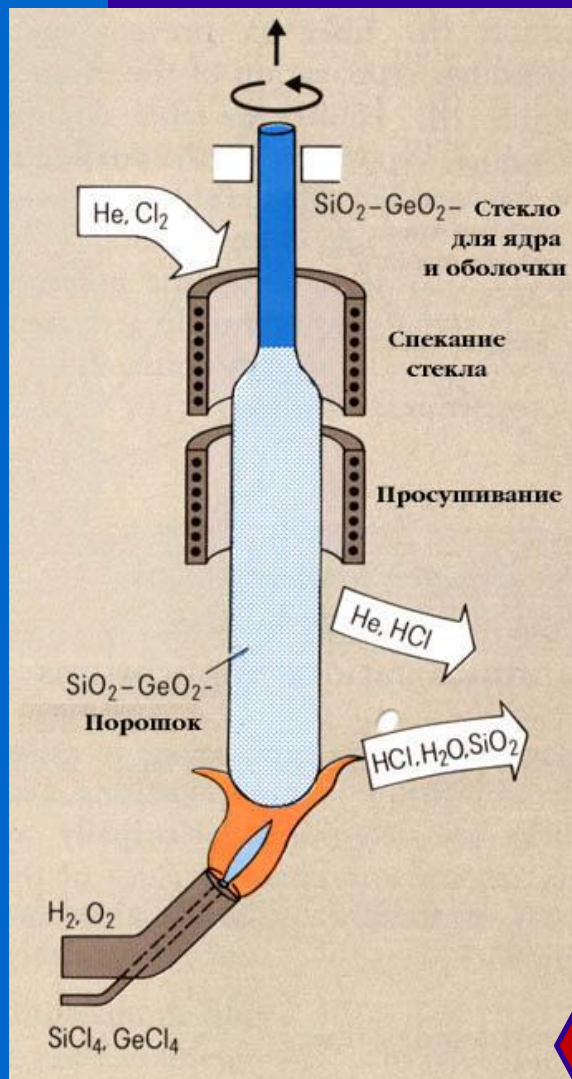
Преимуществами этого метода являются:

- Отсутствие предела размера стержня заготовки.
- Осаждение , дегидратация и процессы спекания отделены друг о друга.

Неудобства метода:

- В этом методе все химические реакции происходят на открытой площади, что способствует более легкому доступу для примесей.
- Во время снятия сырьевого материала с заготовки на внутренней стенке трубки происходит натяжение, которое приводит к появлению трещин и иных нарушений в структуре волокна.

VAD –axial vapor deposition –метод аксиального осаждения



В этом методе заготовка растет из затравки, расположенной на определенном расстоянии выше пламени горелки, имеющей сложную слоевую структуру, как у рулета.

- В середину пламени подают смесь хлоридов германия и кремния, затем слой буферного газа, потом только хлорид кремния для чистого стекла, потом опять буферный газ, и в конце концов на краю горелки, кислород с водородом – то, что, собственно говоря, и горит.

- Вещество осаждается не только на поверхность, но и на внутреннюю поверхность. Однако расстояние до этой поверхности должно быть строго фиксированным, и температура постоянно

Рис. 4 Изготовление заготовки VAD - методом.

Метод аксиального осаждения

Преимуществами этого метода :

- заготовка для оптоволокна может быть сделана непрерывно бесконечной длины;
- пламя горелки не двигается, и коэффициент газов, текущих от нее всегда константа;
- производительность наплавки ~ от 1 до 3 г/мин;
- волокно с малыми потерями может быть легко изготовлено при использовании процесса обезвоживания.

Неудобства метода:

- трудность управления пламенем для того, чтобы сделать необходимый профиль;

- трудности в изготовлении волокна с широкой полосой

Сравнение методов получения заготовки для ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

	MCVD	PMCVD	PCVD	OVD	VAD
Химическая реакция	окисление	окисление	окисление	гидролиз	гидролиз
Подача тепла	кислородно-водородная горелка	плазма (1 атм.), кислородно-водородная горелка	микроплазма (10 торр)	кислородно-водородная горелка	кислородно-водородная горелка
Скорость осаждения, г/мин	0,5 - 2	3 - 6	0,5 - 2,5	5	3 - 6
Эффективность осаждения, %	50 - 60	70 - 90	$\text{SiCl}_4 = 100$	50 - 70	50 - 70
Размер заготовки (волокон. км)	5 - 10	20 - 50	>50	5 - 10	50- 100
Контроль поверхности	очень легко осуществим	легко осуществим	очень легко осуществим	легко осуществим	Для SM волокон легко осуществим, для GI волокон требуются некот. тех. приемы
Применение	AT&T и многие страны	AT&T (в разработке)	Philips	Corning	Япония

Потери в активных световодах

- Максимальная концентрация активных ионов в сетке кварцевого стекла невелика и ограничивается их растворимостью, а также возникновением кооперативных эффектов.
- Это приводит к тому, что длина активной среды волоконного лазера может достигать нескольких десятков метров.
- Нерезонансные оптические потери в активных световодах – от **5** до **20** дБ / км.

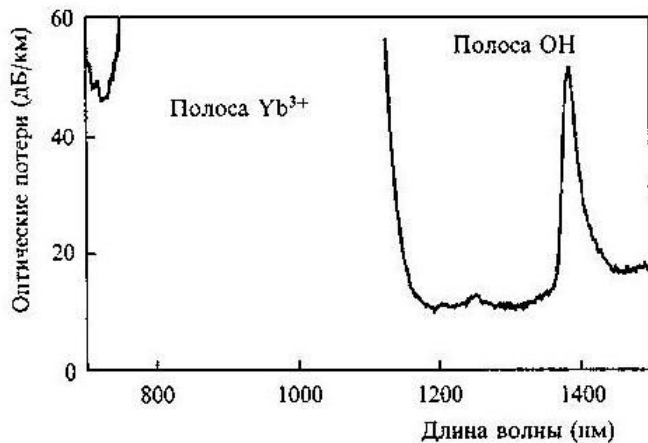
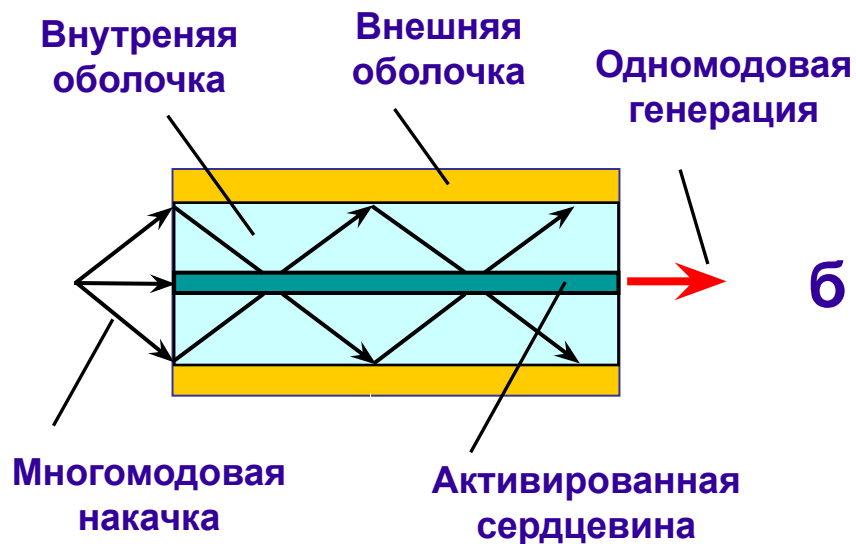
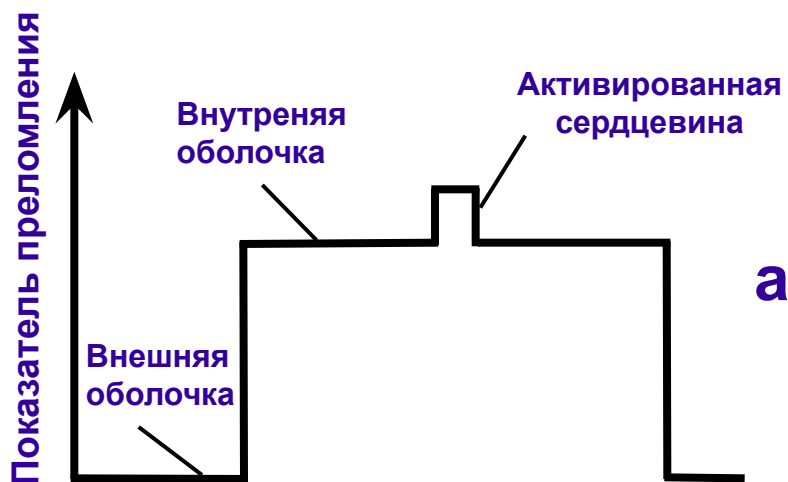


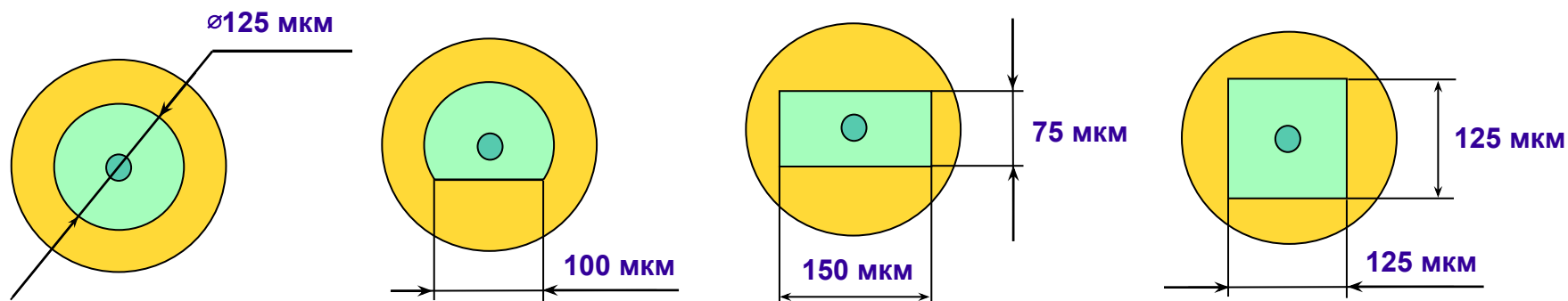
Рис. 5 Спектр оптических потерь в сердцевине активного световода при концентрации ионов Yb³⁺, равной $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Волоконные световоды на основе плавленого кварца, легированные ионами иттербия (Yb^{+3})



Модельный профиль преломления (а) и принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера (б).

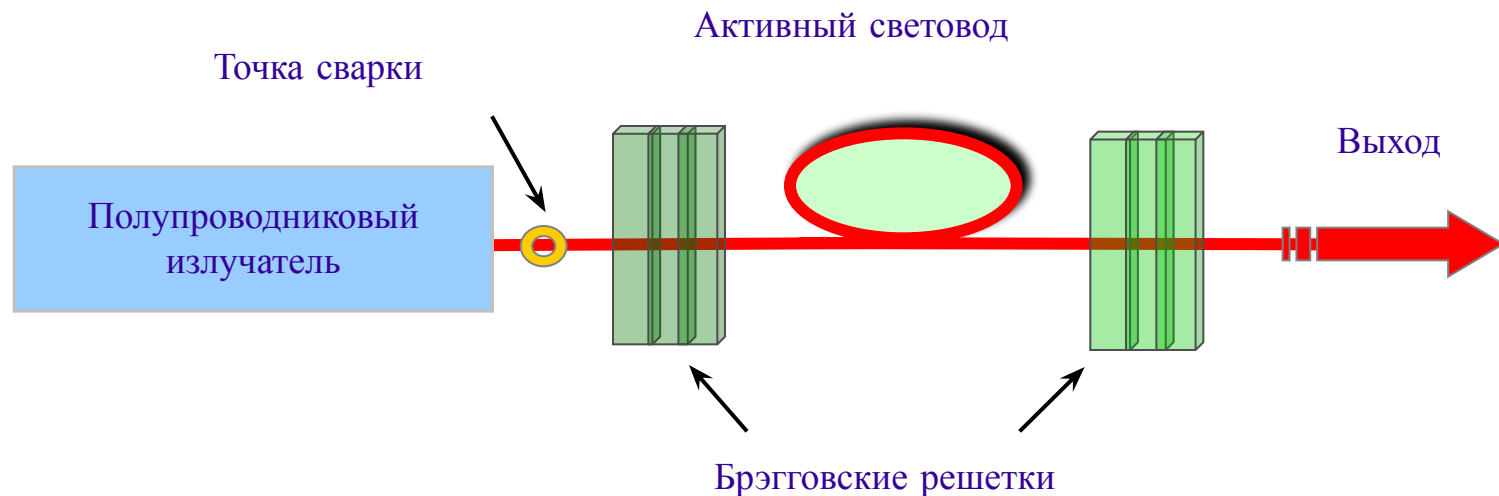
Структура внутренней оболочки волоконного световода



Геометрия оболочки	Поглощение на $\lambda = 978$ нм (дБ/м)	
	Прямое волокно	«Восьмерки»
Круглая	$0,3 \pm 0,05$	$0,6 \pm 0,05$
Д – образная	$2,2 \pm 0,05$	$2,2 \pm 0,05$
Прямоугольная	$3,5 \pm 0,05$	$3,5 \pm 0,05$
Квадратная	$3,3 \pm 0,05$	$3,3 \pm 0,05$

Схемы накачки активных световодов

1. Торцевая накачка.

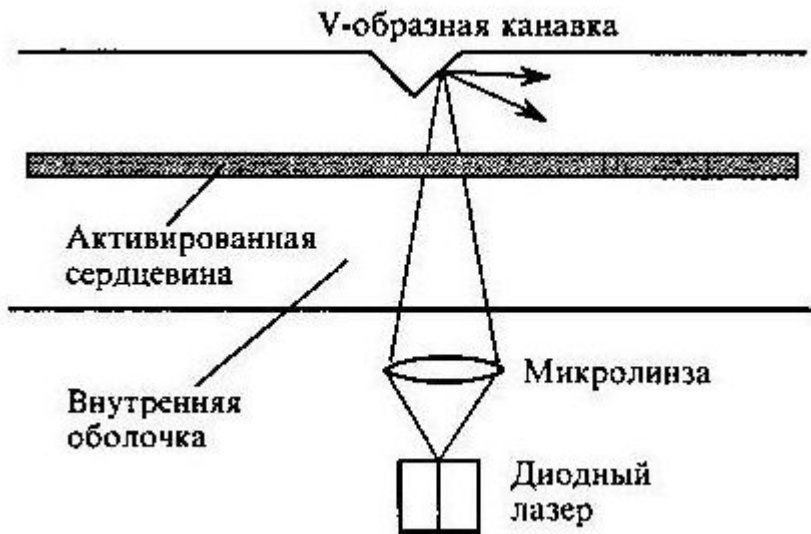


Достоинство – возможность использования для всех видов световодов с двойной оболочкой.

Недостаток – возможность использования лишь одного источника накачки (лазерного диода или их сборки).

Схемы накачки активных световодов

2. Схема накачки через V – образную канавку.



ВО –

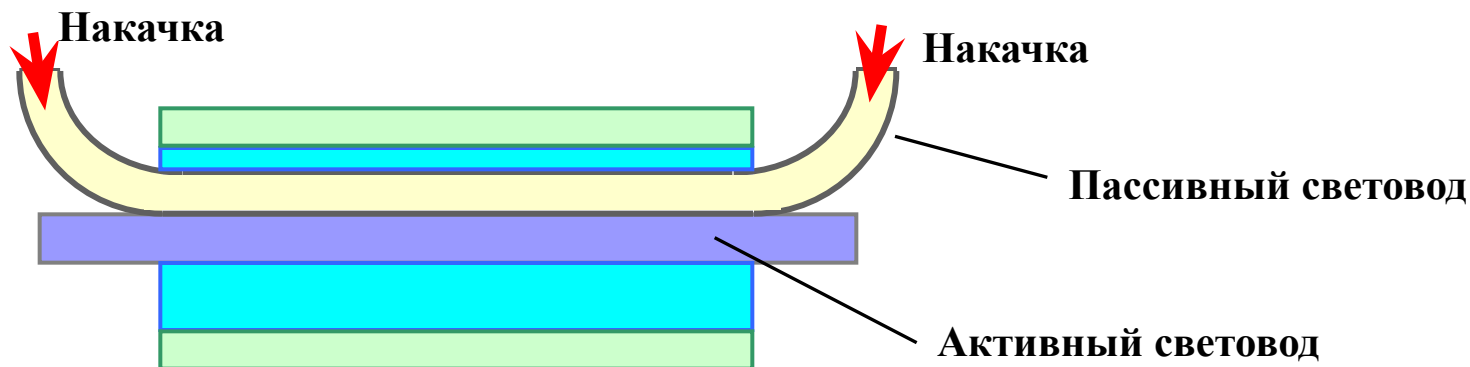
активного световода по
сти

источников по
от

саци полупроводникового лазера
относительно активного световода и защиты области ввода от
внешних воздействий.

Схемы накачки активных световодов

3. Схема накачки с использованием двойного световода.



- Особенности** – отношение мощностей накачки в обоих световодах определяется отношением площадей их оболочек.
- При распространении по активному световоду поглощение части накачки в его сердцевине компенсируется дополнительной перекачкой излучения из пассивного световода, необходимой для поддержания постоянного отношения мощностей накачки в активном и пассивном световоде.
 - В данной схеме возможно использование двух источников накачки, излучение которых вводится с противоположных концов пассивного световода.

Генерационные параметры иттербиевых волоконных световодов, легированных P_2O_5 и Al_2O_3

В настоящее время в волоконных лазерах используются, главным образом, два типа иттербиевых световодов на основе плавного кварца:

- с сердцевиной, легированной P_2O_5 (фосфоросиликатные (ФС) световоды);
- с сердцевиной, легированной Al_2O_3 и небольшим количеством GeO_2 (алюмосиликатные (АС) световоды).

Указанные добавки необходимы для:

- формирования профиля показателя преломления световода;
- реализации однородного введения Yb в матрицу стекла;
- устранения явления кластеризации;
- снижения оптических потерь в световодах.
- Массовое содержание фосфора, алюминия и иттербия в сердцевинах ФС и АС световодов :
 - фосфора (4 -10%);
 - алюминия (1 -2%);
 - иттербия (1 – 8%);
 - иттербия (1 – 3%).

Измерение сечений вынужденных переходов.

Для определения спектральных диапазонов , в которых возможно получение генерации иттербиевых лазеров , необходимо измерять спектральные зависимости сечения поглощения $\sigma_a(\lambda)$ и вынужденного излучения $\sigma_e(\lambda)$ в диапазоне длин волн $\lambda = 850 - 1200$ нм

Для измерения сечения поглощения в световодах используются следующие методы, основанные на :

- измерении поглощения слабого сигнала в световоде (метод поглощения слабого сигнала);
- наблюдении насыщения люминесценции при увеличении мощности накачки (метод насыщения люминесценции).

Сечение вынужденного излучения можно определить по спектрам люминесценции и по времени жизни ионов Yb^{3+} на верхнем лазерном уровне

$$\sigma_e(\lambda) = \frac{\lambda^3}{8 \pi c n^2 \tau} \cdot \frac{I(\lambda)}{\int \lambda I(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, τ – время жизни иона на верхнем лазерном уровне, n – показатель преломления материала, $I(\lambda)$ – спектр интенсивности люминесценции.

Время жизни иона в ФС матрице – 1,45 мс ; и 0,83 мс – в АС матрице.

По спектрам поглощения и люминесценции ФС и АС световодов были определены положения энергетических подуровней основного E_{1i} и возбужденного E_{2j} состояний ионов Yb^{3+} .

Схема уровней Yb^{3+}

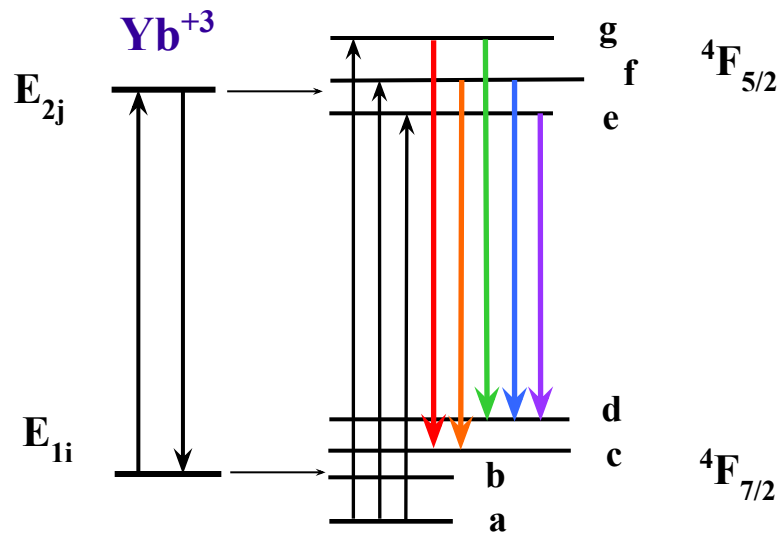


Таблица 1. Положение подуровней Yb^{3+} в АС и ФС матрицах стекла сердцевины волоконных световодов.

Уровень	Под-уровень	Энергия (см ⁻¹)	
		ФС световод	АС световод
$2F_{7/2}$	a	0	0
	b	260	400
	c	440	760
	d	740	1210
$2F_{5/2}$	e	10260	10245
	f	10520	10917
	g	10930	10940

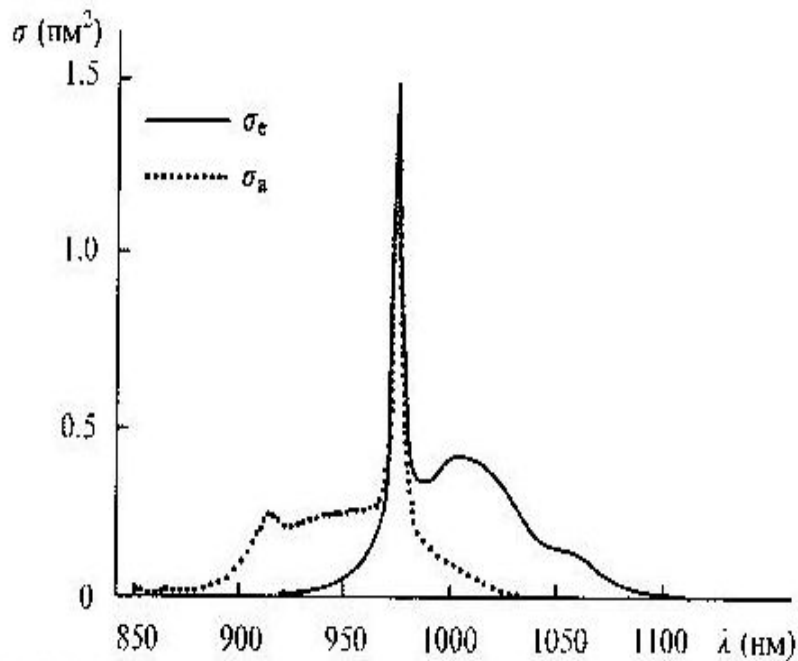


Рис. 6 Спектральные зависимости сечений вынужденных переходов Yb^{3+} в ФС волоконных световодах. Ширина основного пика сечения поглощения – ($\Delta\lambda = 4.8$ нм).

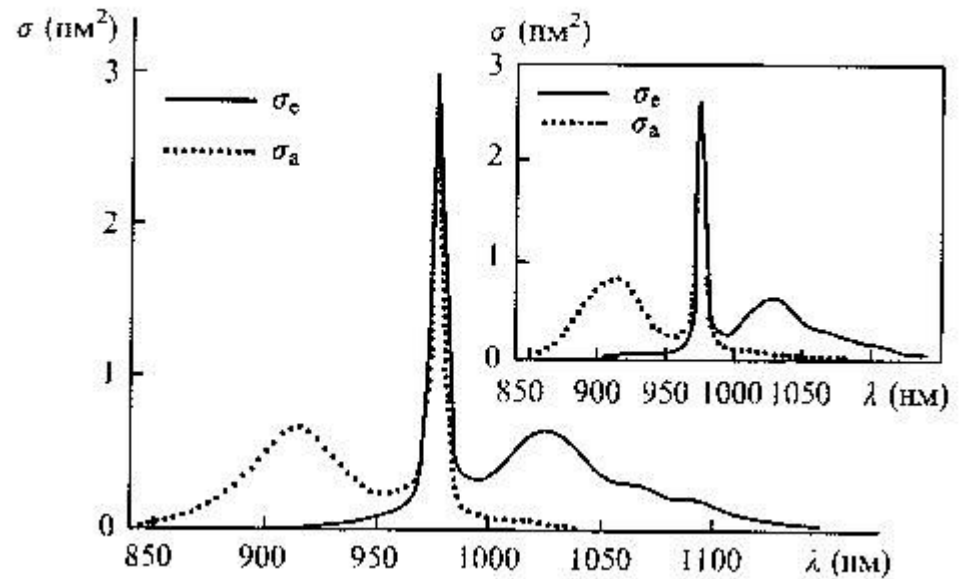


Рис.7 Спектральные зависимости сечений вынужденных переходов Yb^{3+} в АС волоконных световодах. Длина волны максимумов – 976 нм. Ширина основного пика сечения поглощения – ($\Delta\lambda = 7.7$ нм)

Диапазон длин волн генерации Yb лазеров на ФС и АС световодах с двойной оболочкой.

Для коэффициента усиления в сечении с продольной координатой z можно записать:

$$g(\lambda, z) = \sigma_e(\lambda) n_2(z) - \sigma_a(\lambda) n_1(z) \quad (4)$$

где n_1 – концентрация ионов Yb^{3+} в основном состоянии в единице объема; n_2 - концентрация ионов Yb^{3+} в возбужденном состоянии.

Коэффициент усиления за обход резонатора

$$G(\lambda) = 2 \left[\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda) \mu n_0 L - 2 \sigma_a(\lambda) n_0 L \right] \quad (5)$$

где

$$\mu = \frac{\int_0^L n_2(z) dz}{n_0 L}, \quad n_0$$

– полная концентрация ионов иттербия в единице объема.

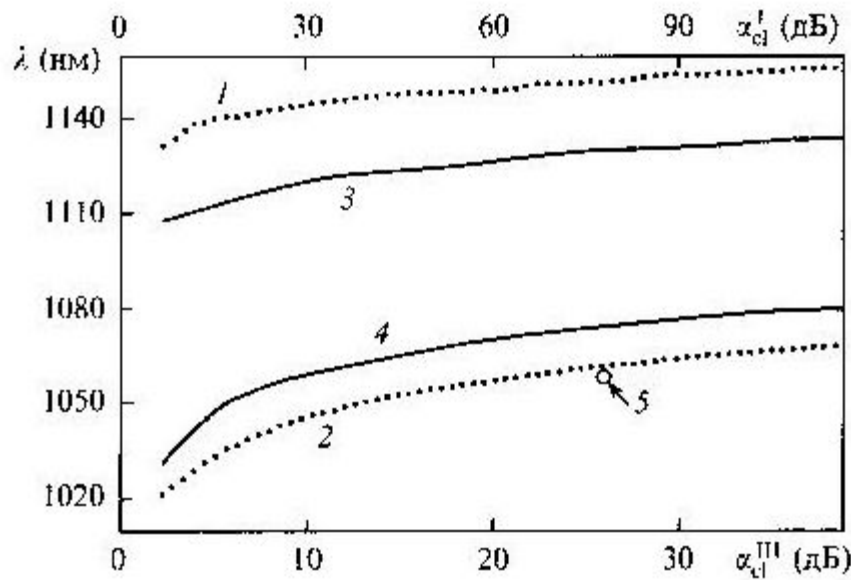
На пороге генерации выполняется условие:

$$G(\lambda) = \gamma(\lambda) \quad \text{где } \gamma(\lambda) \text{ - потери излучения на длине волны } \lambda.$$

На пороге генерации доля ионов на верхнем уровне есть

$$\mu(\lambda) = \frac{\sigma_a(\lambda) n_0 L + \gamma(\lambda)/2}{[\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)] n_0 L}$$

Допустимые диапазоны длин волн генерации для двух комбинаций резонансных и нерезонансных потерь.



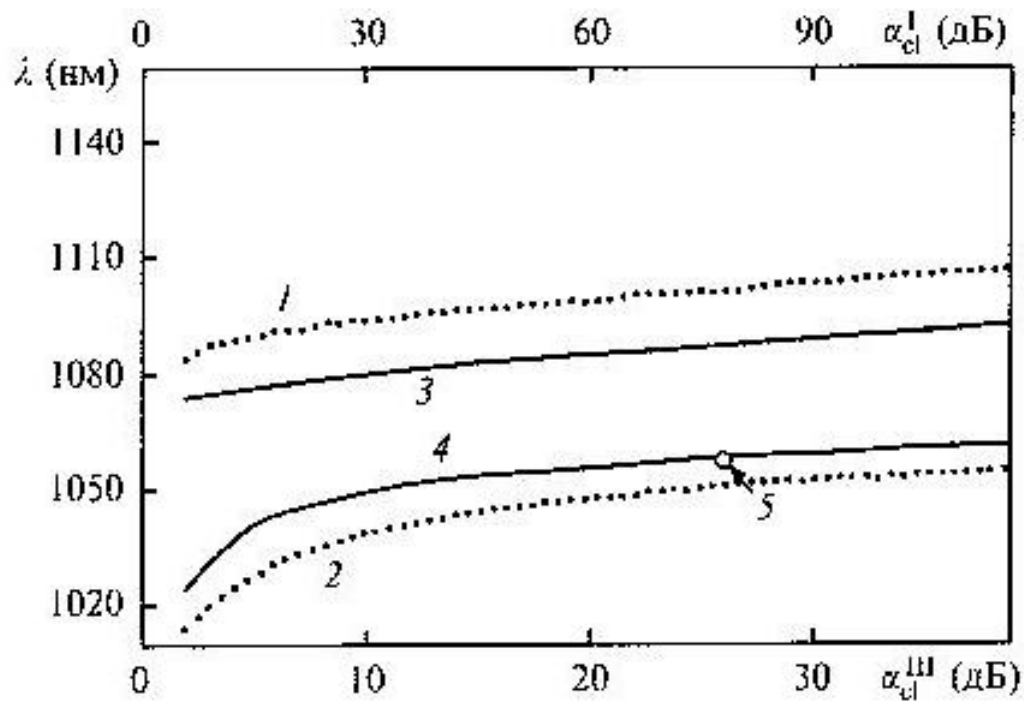
Допустимый диапазон длин волн генерации Yb – лазера на основе АС в зависимости от полного поглощения накачки ($\lambda = 976$ нм) из первой оболочки для одиночного (α_{cl}^I) и комбинаций резонансных

и нерезонансных потерь: кривые 1,2 – верхняя и нижняя границы диапазона для комбинации потерь

$\gamma(\lambda_r) = 10$ дБ, $\gamma(\lambda_{nr}) = 49$ дБ ; кривые 3,4 – верхняя и нижняя границы диапазона для комбинации потерь

$\gamma(\lambda_r) = 14$ дБ, $\gamma(\lambda_{nr}) = 29$ дБ .

Допустимые диапазоны длин волн генерации для двух комбинаций резонансных и нерезонансных потерь.

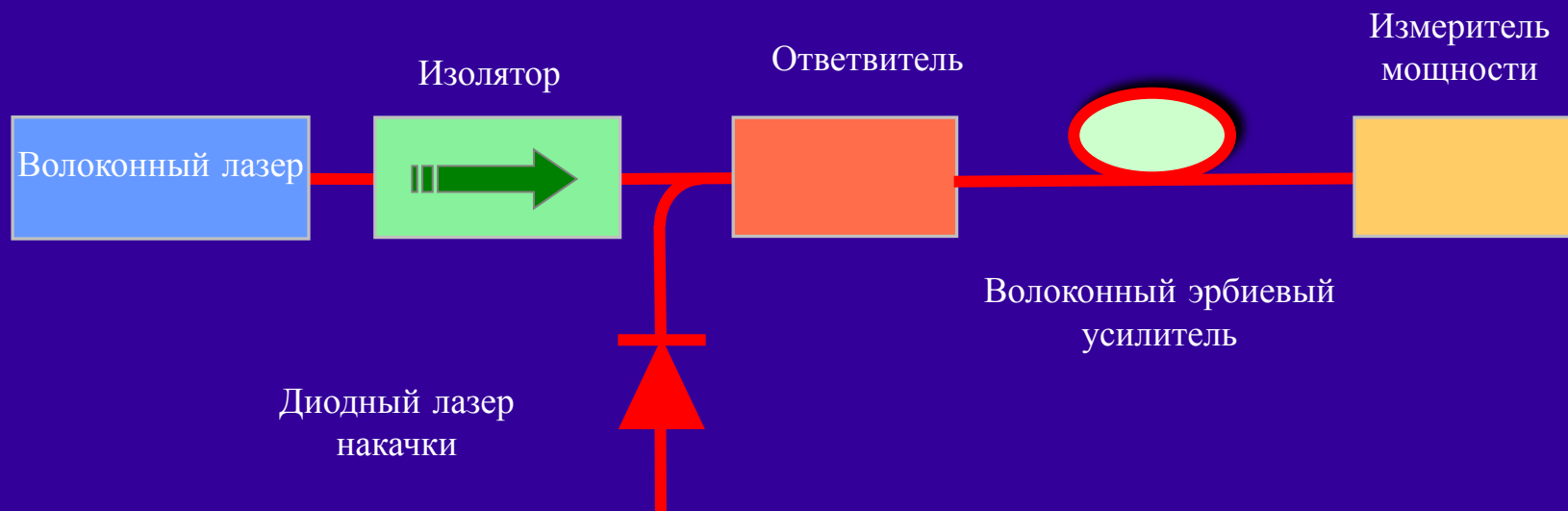


То же, что и на предыдущем рисунке для Yb – лазера на основе ФС световода ($\lambda = 974.5$ nm).

Усилительные свойства активных световодов с высокой концентрацией ионов эрбия.

- Волоконные световоды, легированные ионами эрбия, относятся к одному из самых распространенных типов активных волоконных световодов вследствие их широкого использования в волоконных усилителях для систем оптической связи.
- Одной из важных характеристик усилителя является длина используемого световода, которая, в основном, определяется концентрацией активных ионов.
- Эффективность усиления снижается, если концентрация ионов эрбия превышает определенный предел, причем величина этой предельной концентрации зависит от наличия и концентрации других легированных примесей.
- Падение эффективного усиления объясняется кластеризацией ионов эрбия, причем с ростом абсолютной концентрации оксида эрбия относительная доля кластеризованных ионов возрастает.
- Установлено, что введение оксида алюминия (Al_2O_3) в сетку кварцевого стекла позволяет повысить предельную концентрацию редкоземельных ионов.

Схема экспериментальной установки



В качестве источника сигнала использовался волоконный лазер с максимальной выходной мощностью 5 мВт на длине волны 1.56 мкм, в качестве источника накачки – полупроводниковой лазер с волоконным выходом и выходной мощностью до 300 мВт на длине волны 0.976 мкм.

Измерение коэффициента усиления

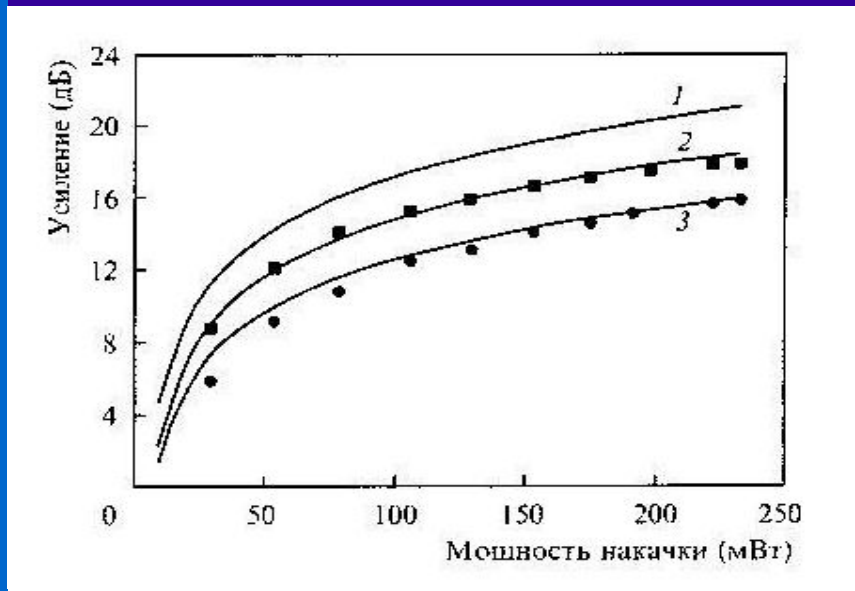


Рис.8 Расчетная зависимость усиления без учета передачи энергии в кластерах (1) и результаты измерения и расчета с учетом передачи энергии в кластерах (2) и (3). Кривая 2 построена для

световода с концентрацией ионов эрбия - $6,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; кривая 3 – для световода с концентрацией ионов эрбия - 10^{20} см^{-3} .

Мощность непрерывного входного сигнала 1 мВт на длине волны 1,56 мкм.

Длина использованных световодов – 1.6 м и 0.8 м.

Установлено, что в световодах с высокой концентрацией ионов эрбия основным источником снижения усиления является передача энергии в кластерах активных ионов.

Влияние концентрации активных ионов на эффективность усиления

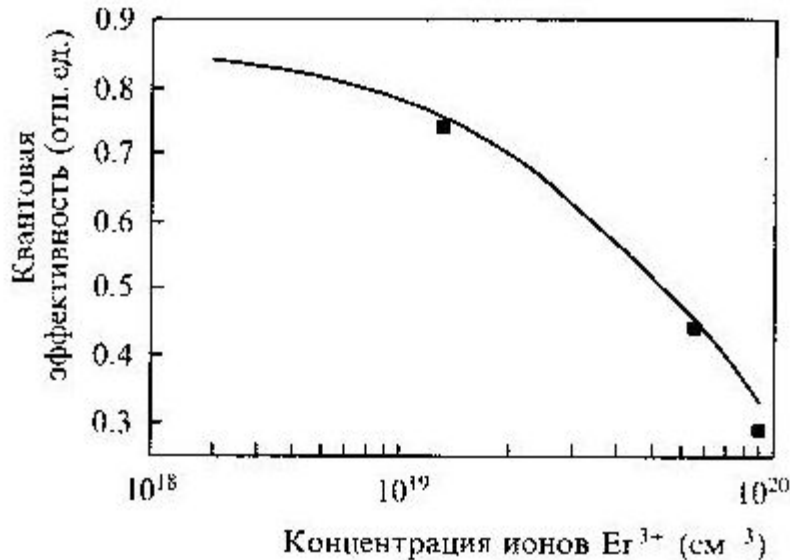


Рис.9 Результаты расчета и измерения квантовой эффективности усилителя от концентрации ионов эрбия для световода с высокой концентрацией примеси Al_2O_3 .

Видно, что квантовая эффективность световода с невысокой концентрацией ионов эрбия (10^{18} см^{-3}) достигает примерно 85%, а у световодов с концентрацией активных ионов до 10^{20} см^{-3} она падает до 33%.

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации схемы эрбиевых волоконных усилителей.

Фотоиндуцированные волоконные решетки показателя преломления

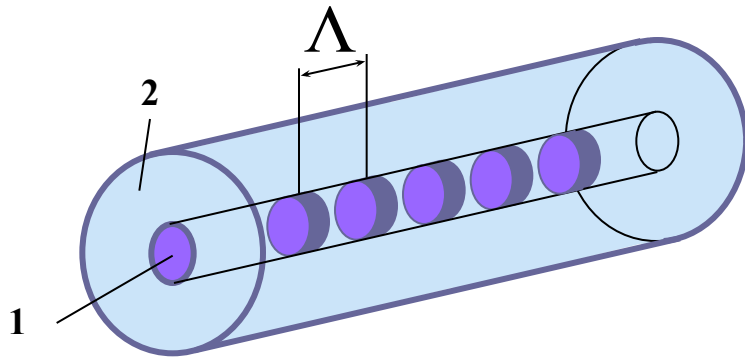


Схема волоконной решетки показателя преломления

- 1 – фоточувствительная сердцевина
2 – кварцевая оболочка

Типичные параметры брэгговской решетки:

$L = 5 \text{ мм}, \quad \delta n = 8 \times 10^{-4}, \quad \Lambda = 0,4 \text{ мкм}$
 $\rightarrow R \sim 0,99 \text{ на } \lambda = 1136 \text{ нм и } \Delta\lambda = 0,4 \text{ нм}$

Основные характеристики решетки:

- период модуляции показателя преломления Λ
- величина наведенного изменения показателя преломления δn
- число штрихов или длина решетки L
- спектральная ширина $\Delta\lambda_{br}$
- коэффициент отражения R

$$\lambda_{br} = 2 n_{ef} \Lambda$$

n_{ef} – эффективный показатель преломления основной моды световода

$$R = th^2(kL)$$

k - коэффициент связи, $k = \pi \eta \delta n / \lambda_{br}$

η - доля мощности основной моды, распространяющейся по области, в которой наведено изменение показателя преломления. $\delta n \approx (10^{-4} \div 10^{-3}) n$

$$\Delta\lambda_{br} = 2 \lambda_{br} \Lambda / L [1 + (kL/\pi)^2]^{1/2}$$

$$\Delta\lambda_{br} \approx 10^{-6} \lambda_{br}$$

Волоконные решетки показателя преломления

Наиболее важным свойством волоконных брэгговских решеток является узкополосное отражение оптического излучения, относительная спектральная ширина которого может составлять 10^{-6} и меньше.

Преимущества волоконных фотоиндуцированных решеток в сравнении с альтернативными технологиями (например, интерференционные зеркала и объемные дифракционные решетки):

- широкое разнообразие получаемых спектральных и дисперсионных характеристик, многие из которых могут быть реализованы только на основе волоконных решеток ПП;
- полностью волоконное исполнение;
- низкие оптические потери;
- относительная простота изготовления.

Волоконные брэгговские решетки

Волоконные брэгговские решетки связывают основную моду световода с той же модой, распространяющейся в противоположном направлении. Это означает, что на определенной длине волны λ_{br} распространяющееся по световоду излучение отражается от решетки полностью или частично. Коэффициент отражения на резонансной длине

$$R = \frac{\eta}{1 + \eta} \sin^2(kL)$$

$k = \pi \Delta n_{mod} / \lambda_{br}$ - коэффициент связи; η - амплитуда синусоидальной модуляции ПП, η - часть мощности основной моды, которая распространяется по сердцевине световода.

Спектральная ширина резонанса однородной решетки на полувывсоте выражается следующим

$$\Delta\lambda_{br} = 2\lambda_{br} \frac{\Delta n_{mod}}{L} \left[1 + \left(\frac{kL}{\pi} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Как видно из (2), спектральная ширина зависит не только от длины решетки и его периода, но также и от амплитуды модуляции ПП Δn_{mod} .

Волоконные брэгговские решетки

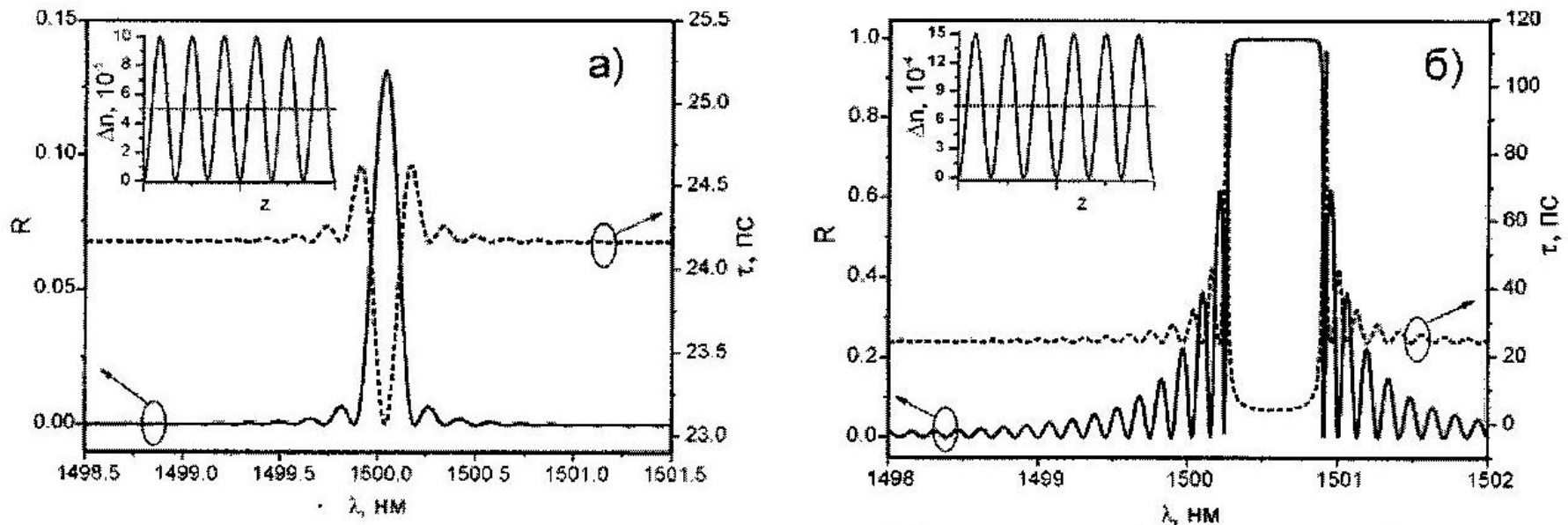


Рис. 10 Спектр отражения $R(\lambda)$ (сплошная кривая) и групповая задержка $\tau(\lambda)$ (штриховая кривая) однородных брэгговских решеток с различной амплитудой наведенного ПП : $\Delta n_{mod} = 5 \cdot 10^{-5}$ (а), $\Delta n_{mod} = 7.5 \cdot 10^{-4}$ (б). На врезках: схематический профиль ПП, наведенного в решетках.

Волоконные брэгговские решетки

В спектрах однородных ВБР обычно наблюдаются боковые максимумы, положение которых определяется длиной решетки.

Для частичного или полного подавления этих максимумов применяется так называемая анодизация решеток, под которой подразумевается плавное изменение амплитуды модуляции наведенного ПП в решетке по ее длине.

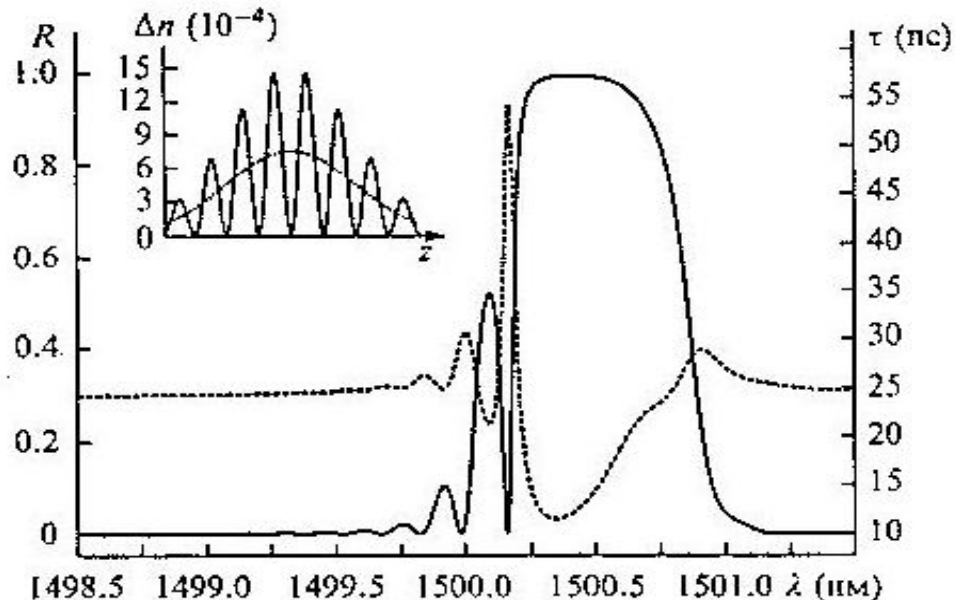


Рис.11 Спектр отражения $R(\lambda)$ (сплошная кривая) и групповая задержка $\tau(\lambda)$ (штриховая кривая) для ВБР с гауссовой огибающей профиля наведенного ПП.

Волоконные брэгговские решетки

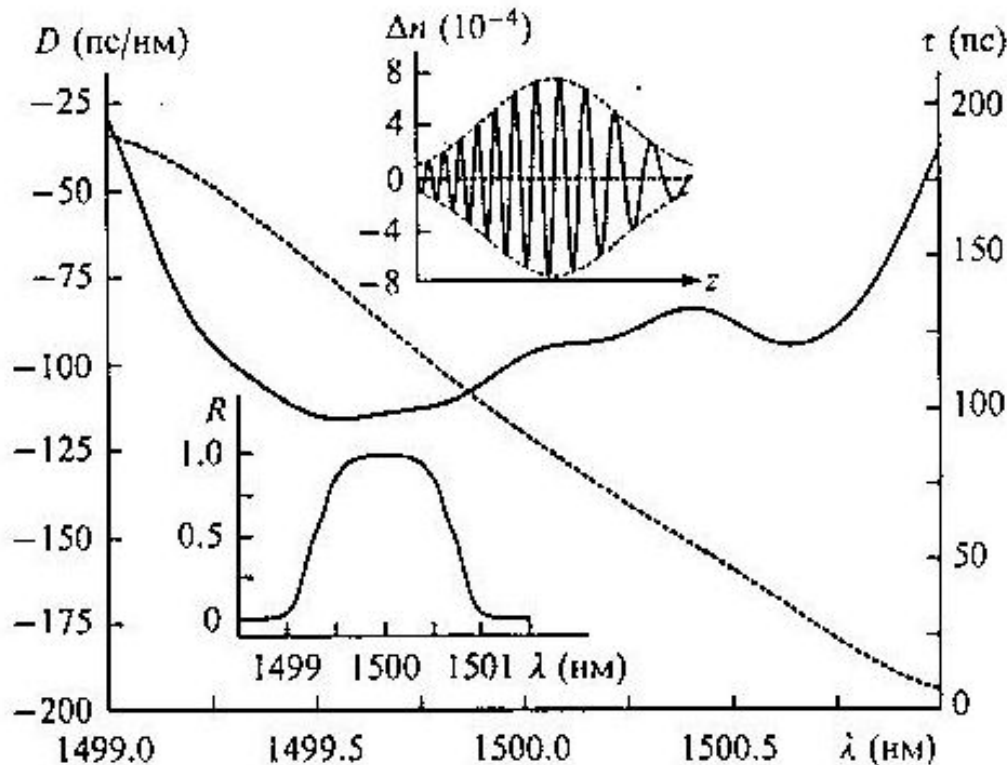


Рис. 12 Дисперсия $D(\lambda)$ (сплошная кривая) и групповая задержка $\tau(\lambda)$ (штриховая кривая) брэгговской решетки с гауссовой огибающей профиля наведенного ПП и переменным периодом.

На врезках - спектр отражения решетки $R(\lambda)$ и схематический профиль наведенного ПП $\Delta n(z)$.

Волоконные брэгговские решетки

Резонансная длина волны брэгговских решеток λ_{br} зависит от температуры световода и от приложенных к нему механических растягивающих или сжимающих напряжений :

где $\Delta\lambda_{br} = 2\pi\Lambda \left(\left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{11} - \nu(P_{11} - P_{33})] \right\} \epsilon + \left[\alpha + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right] \Delta T \right)$, (3)
 изменение температуры, ϵ – механическое напряжение, P_{ij} – коэффициенты Поккельса упруго – оптического тензора, ν – коэффициент Пуассона, α – коэффициент теплового расширения кварцевого стекла, n – эффективный показатель преломления основной моды.

Это соотношение дает типичные значения сдвига λ_{br} в зависимости от температуры ~ 0.01 нм/ К и от относительного удлинения световода $\sim 10^3 \cdot \Delta h/L$ (нм).

Типы фоточувствительности в германосиликатных световодах

Значительный вклад в изменение ПП в сердцевине германосиликатных световодов вносит фотоиндуцированная трансформация германиевых кислородно-дефицитных центров (ГКДЦ), которая приводит к образованию новых дефектных центров, а также к деформации сетки, проявляющейся в увеличении плотности стекла и изменении его показателя преломления. В спектре поглощения германосиликатного стекла доминируют две полосы с максимумами 242 и 330 нм.

В настоящее время известно несколько типов фоточувствительности германосиликатных световодов. Эти типы проявляются при различных условиях облучения световодов и отличаются друг от друга по динамике записи, отжига и другим свойствам фотоиндуцированных решеток.

Решетки типа I

- Реализуется при концентрации германия в сердцевине менее 20 мол. % .
- Характеризуется монотонным возрастанием ПП при увеличении дозы УФ – облучения.
- Характеризуется степенной зависимостью наведенного ПП от дозы :

$$\Delta n_{ind} \sim D^b$$

показатель степени b , как правило находится в диапазоне 0,3 - 0,5.

- Основную роль в формировании решеток типа I играет индуцированная УФ – излучением трансформация дефектных центров германосиликатного стекла и связанное с ней уплотнение сетки.
- Имеют относительно невысокую температурную стойкость , их заметная деградация наблюдается при температурах 200 – 300 °С.

Решетки типа I

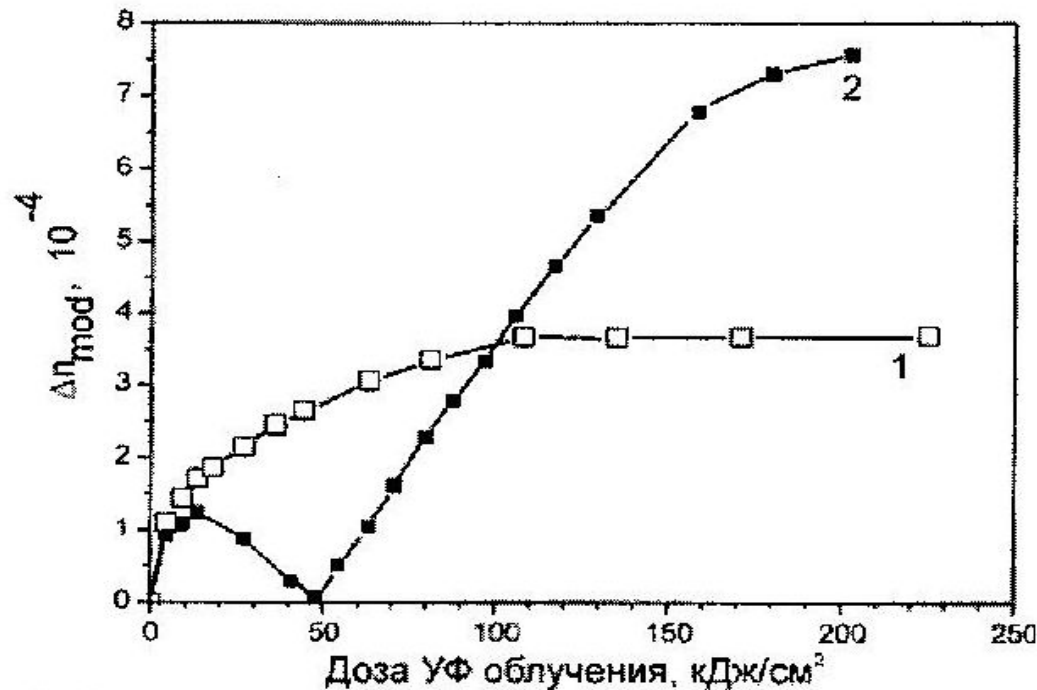


Рис. 13 Зависимости амплитуды модуляции наведенного показателя преломления для волоконных брэгговских решеток, записанных в световодах с концентрацией германия 12 мол. % (1) и 35 мол % (2).

Решетки типа *IIa*

При записи ВБР в световодах с высокой концентрацией германия (20 мол. % и более) после начального роста амплитуды модуляции наведенного ПП (коэффициента отражения) ее величина снижается практически до нулевого значения, а затем возрастает вновь, в дальнейшем стремясь к насыщению (рис. 13 кривая 2).

Явление уменьшения индуцированного ПП при УФ – облучении называют фоточувствительностью типа *IIa* , а решетки, которые записаны в области второго возрастания коэффициента отражения, решетками типа *IIa* .

В настоящее время известно, что образование решеток типа *IIa* тесно связано с изменением упругих напряжений в сетке германосиликатного стекла, происходящим при УФ – облучении.

Особенности решеток типа *IIa* :

- низкотемпературная водородная обработка приводит к полному исчезновению типа *IIa* и формирование этого типа вновь наблюдается после выхода молекулярного водорода из сетки стекла;
- решетки типа *IIa* имеют существенно более высокую температуру отжига в сравнении с решетками типа *I* (500 – 600 °С).

Волоконные решетки показателя преломления. Решетки типа II

- Решетки данного типа записываются путем облучения волоконного световода одним импульсом эксимерного лазера с плотностью энергии в импульсе около 1 Дж/см^2 .
- В результате воздействия такого мощного импульса возникает интенсивный прогрев сердцевины световода, сопровождающийся частичным плавлением граничной с сердцевиной области оболочки.

Недостатки:

- процесс записи весьма трудно контролировать из-за нестабильности энергии эксимерного лазера от импульса к импульсу;
- асимметрия наведенного изменения свойств стекла в области сердцевины приводит к эффективному возбуждению оболочечных мод, что сопровождается значительными потерями с коротковолновой стороны от основного резонанса;
- при облучении световода столь большими плотностями оптической мощности ($\sim 10^8 \text{ Вт/см}^2$) в ряде случаев происходит частичное повреждение поверхности световода, что резко снижает его механическую прочность.

Волоконные решетки показателя преломления. Решетки типа *Ia*

В присутствии молекулярного водорода в световодах, легированных одновременно германием и бором, возникает еще один тип фоточувствительности, характеризующейся сложной динамикой коэффициента отражения и резонансной длины волны.

Как и в решетках типа *IIa*, начальный рост коэффициента отражения сопровождается его уменьшением и последующим новым ростом.

В отличие от типа *IIa*, резонансная длина волны с дозой УФ – облучения сдвигается в длинноволновую область на очень большую величину 15 – 20 нм, что соответствует изменению среднего ПП в сердцевине $\sim 2 \cdot 10^{-2}$.

Такой тип фоточувствительности был назван типом *Ia*.

Особенности решеток этого типа:

- меньшая (на 30 %) температурная чувствительность в сравнении с решетками типа *I* и *IIa*.

Методы увеличения фоточувствительности ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

- Значительный интерес представляет увеличение фоточувствительности уже изготовленных, в том числе стандартных световодов без значительных изменений их собственных характеристик.
- Насыщение сетки стекла водородом при высокой температуре способно на порядок увеличить наведенный показатель преломления стандартных световодов.
- Такая обработка может быть выполнена на небольшом участке световода и обеспечивает повышенную фоточувствительность этого участка в течение длительного времени.
Этот способ приводит к значительному росту концентрации ОН группы в сетке стекла, которые имеют полосы поглощения в области **1.4** мкм .
Значительно уменьшается прочность световода.
- Насыщение сетки стекла молекулярным водородом при относительно низких температурах (**~ 100 °C**).
- Увеличение фоточувствительности с помощью механического растяжения световода при записи в нем решеток. При этом наведенный ПП увеличивается в **3 – 4** раза при фиксированных параметрах облучения в сравнении с ненапрянутым световодом, что позволяет сократить время записи решеток примерно на порядок.

Недостатки способа увеличения фоточувствительности при помощи механического растяжения световода

- приложенные деформации имеют довольно большую величину (3% и более), что требует высокого качества поверхности растяжения при записи;
- деформации значительно изменяют резонансную длину волны решетки, поэтому они должны быть учтены и заданы с высокой точностью, чтобы решетка после освобождения от механической нагрузки имела нужную длину волны.

•
•
•

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !!!

•
•
•
•
•
•
•
•