

**Министерство образования и науки Украины  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники**

**Кафедра ФОЭТ**

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

**По дисциплине «Теория лазерных и оптоэлектронных приборов и систем»**

**По теме «Волоконные лазеры»**

**Выполнил**

**ст.гр. ОТ-07-1**

**Клюев П. Г.**

**Проверил**

**Дзюбенко М.И.**

**2009**

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Волоконная оптика	5
1.1 Общие сведения о волоконной оптике	5
1.2 Распространение света в оптоволокне	6
1.3 Основные параметры оптического волокна	7
1.4 Потери при распространении света в оптическом волокне	9
2 Элементы волоконных лазеров	10
2.1 Особенности волоконных лазеров	10
2.2 Активные добавки волоконных световодов	12
2.3 Фотоиндуцированные решетки показателя преломления	16
3 Характеристики волоконных лазеров	28
3.1 Лазеры на основе световодов, легированных ионами $Nd^{3+}$	28
3.2 Лазеры на основе световодов, легированных ионами $Yb^{3+}$	34
3.3 Лазеры на основе световодов, легированных ионами $Er^{3+}$	40
4 ВКР – лазеры	42
4.1 Однокаскадные ВКР – лазеры	43
4.2 Многокаскадные ВКР-лазеры	46
4.3 Составные ВКР – лазеры	49
Выводы	54
Список используемых источников	55

## ВВЕДЕНИЕ

Волоконные лазеры являются одним из наиболее ярких достижений современной лазерной физики и волоконной оптики. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными лазерами, к числу которых относятся следующие:

- эффективный теплоотвод,
- высокое качество выходного излучения,
- высокие стабильность и надежность лазера,
- эффективность накачки,
- компактность и малый вес.

Эти преимущества позволяют волоконным лазерам не только находить свою нишу в ряде применений, но и в некоторых случаях заменять традиционные лазеры. Наибольший интерес с практической точки зрения представляют мощные непрерывные волоконные лазеры на основе активных волоконных световодов, легированных ионами редкоземельных металлов, и волоконные лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР).

В современных оптических линиях связи наиболее широко используются полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью. Более перспективным, с этой точки зрения, является использование волоконных лазеров с полупроводниковой накачкой, генерирующих в диапазоне 1,53 - 1,62 мкм. Необходимым элементом таких систем являются оптические усилители, среди которых, как показывают исследования, весьма перспективны ВКР-усилители, созданные на основе волоконных световодов и обладающие большой полосой усиления. Естественно, необходимым элементом любой системы связи являются сами волоконные световоды. Современные системы связи предъявляют весьма жесткие требования к свойствам оптических световодов и, прежде всего, к их оптическим потерям, дисперсии и эффективному сечению моды. Серьезной проблемой является создание одномодовых волоконных световодов с увеличенной

эффективной площадью сечения моды, необходимых для ослабления в них нелинейных явлений.

Совершенно противоположные требования предъявляются к волоконным световодам, используемым для генерации или преобразования частоты сверхкоротких оптических импульсов. В качестве источников излучения в оптических системах связи могут использоваться эрбиевые волоконные лазеры и оптические конвертеры, использующие рамановское преобразование частоты. Для преобразования частоты излучения в световодных лазерах эффективным является использование ВКР-конвертеров. Выходные характеристики и эффективность световодных лазеров и конвертеров в значительной мере определяются качеством используемых в них отражателей. Наиболее оптимальным является использование в качестве отражателей брэгговских решеток (решеток показателя преломления), созданных непосредственно в самом световоде.

Для создания высокоэффективных линий связи имеет большое значение разработка методов расчета и способов изготовления новых, более совершенных конструкций и самих световодов

Фундаментальные исследования нелинейно-оптических явлений в волоконных световодах явились основой создания высокоэффективных оптических усилителей, основанных на использовании ВКР в световодах. Разработанные усилители работают в области максимальной прозрачности волоконных световодов, и их использование открывает широкие возможности дальнейшего совершенствования волоконно-оптических каналов связи.

В качестве примера можно привести разработанные в ИОФАН волоконные ВКР-усилители оптических сигналов в диапазоне 1,3 и 1,5 мкм с коэффициентом усиления ~ 30 дБ, накачиваемые полупроводниковыми излучателями.

Анализ показывает, что одним из наиболее перспективных источников излучения для широкополосных систем связи, использующих частотное уплотнение, является суперконтинуум, генерируемый в волоконных световодах при возбуждении их мощными фемтосекундными лазерными импульсами.

# 1 ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

## 1.1 Общие сведения о волоконной оптике

Волоконная оптика является относительно молодой областью науки и техники, и её определение нельзя считать устоявшимся. Это область науки и техники, которая занимается изучением явлений, возникающих при распространении света в волоконных световодах; применением волоконных световодов и технологией их изготовления. [5]

Это одно из наиболее быстро развивающихся направлений современной лазерной физики. Успехи этого направления связаны с проведением широких комплексных фундаментальных исследований, которые обеспечили не только создание волоконных световодов с предельно низкими потерями, но и уникальных источников когерентного излучения в необходимом спектральном диапазоне. Однако требование увеличения скорости передачи и обработки информации ставит на повестку дня необходимость создания оптических каналов передачи информации со спектральным уплотнением. Именно на решение этой проблемы в значительной мере и направлены усилия ученых. Дальнейший прогресс невозможен без детальных фундаментальных исследований в области разработки новых элементов систем связи: высокоэффективных источников оптического излучения, оптических усилителей и волоконных световодов. [2].

Волоконный световод – это длинная тонкая нить, как правило, из стекла, имеющая сложную внутреннюю структуру. Оптоволокно широко используется в оптических системах связи, что позволяет передавать информацию на гораздо более дальние расстояния и в гораздо более высоких объемах, в отличие от других средств коммуникации. Волокна используют вместо металлических проводов по той причине, что сигналы по оптоволокну распространяются с меньшими потерями, и что немало важно, являются помехозащищенными от взаимодействия с другими электромагнитными волнами. Специально сконструированные волокна

используются в большом многообразии и других приложений, включая сенсоры и волоконные лазеры. [3].

## 1.2 Распространение света в оптоволоконне

В простейшем случае световод состоит из сердцевины с показателем преломления  $n_1$ , оболочки с показателем преломления  $n_2$  (при этом  $n_1 > n_2$ ) и защитного покрытия. Сердцевина и оболочка образуют волноводную структуру, обеспечивающую распространение излучения, а внешнее покрытие (полимерное, металлическое и пр.) предохраняет световод от внешних воздействий.

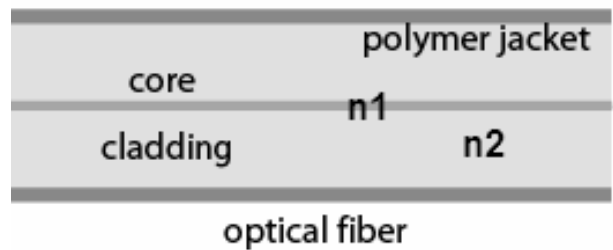


Рисунок 1.1 – Структура оптоволоконна

Распространение света в волоконных световодах основано на явлении полного внутреннего отражения. Это явление наблюдается при переходе излучения из среды с большим показателем преломления ( $n_1$ ) в среду с меньшим показателем ( $n_2$ ).

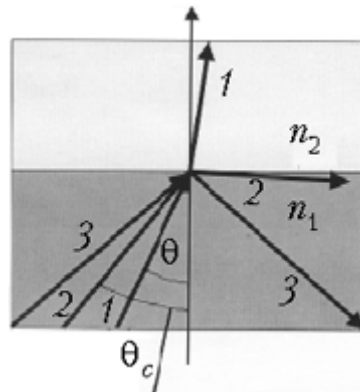


Рисунок 1.2 – Полное внутреннее отражение света

При углах падения меньше критического угла  $\theta_c$ , где  $\theta_c$  – угол между направлением распространения луча и нормалью к поверхности раздела сред, происходит преломление луча в соответствии с законом Снеллиуса (луч 1). При углах падения  $\theta > \theta_c$  наблюдается полное внутреннее отражение (лучи 2 и 3). Критический угол  $\theta_c$  определяется соотношением  $\sin \theta_c = n_2/n_1$ .

Таким образом, если среду с повышенным показателем преломления на достаточно большом расстоянии окружить средой с меньшим показателем преломления, можно обеспечить волноводное распространение света за счёт явления полного внутреннего отражения.

Первая демонстрация волноводного распространения света связана с именем английского учёного Дж.Тиндаля (1820–1893 гг.), который наблюдал такое распространение в струе воды. При этом полное внутреннее отражение обеспечивалось тем, что вода имеет показатель преломления более высокий (1,33), чем воздух (1). Следует отметить, что в настоящее время существует премия Тиндаля, присуждаемая за выдающиеся достижения в области волоконной оптики.[5].

Граница между сердцевиной и оболочкой может быть или резкой, в световоде со ступенчатым профилем показателя преломления, или постепенной, в градиентном волокне, то есть в волокне с плавно изменяющимся в поперечном сечении показателем преломления. [3].

### 1.3 Основные параметры оптического волокна

К основным параметрам волоконного световода относятся диаметр сердцевины  $2a$ , диаметр оболочки  $2b$ , числовая апертура  $NA$ , оптические потери  $\alpha$ , длина  $L$ .

В зависимости от типа волоконного световода диаметр сердцевины может составлять от 1 до 100 мкм, диаметр оболочки – от 100 до 1000 мкм. Для световодов, используемых в оптических линиях связи, диаметр сердцевины около 10 мкм, оболочки – 125 мкм. [5].

Как известно, свет распространяется по оптоволокну согласно закону полного внутреннего отражения. Так как свет должен падать на границу раздела сред под углом меньше некоторого критического  $\varphi_c = 90^\circ - \vartheta_c$  (где  $\vartheta_c$  – угол между направлением распространения луча и нормалью к поверхности раздела сред, см. рис.1.2), то по оптоволокну будет проходить только такой свет, который заходит в него под определенным диапазоном углов. Такой диапазон углов называется входной угловой апертурой волокна, и является функцией разности показателей преломления сердцевины и оболочки оптоволокну.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.1)$$

То есть существует максимальный угол  $\varphi_c$  между лучом, вводимым в световод, и осью световода, падая под которым свет проникает в оптоволокну так, что распространяется по его сердцевине. Синус этого максимального угла и есть числовая апертура (NA) оптоволокну. Волокно с большей числовой апертурой требует меньшей точности при сращивании волокон. Одномодовое волокно имеет низкую апертуру. [3]. Лучи, введённые в световод под углами больше  $\varphi_c$ , не испытывают полного внутреннего отражения, а преломляются и вытекают. На выходе волоконного световода излучение также сосредоточено в конусе с половинным углом  $\varphi_c$ .

Волноводные свойства волоконного световода зависят не только от его параметров, но и от длины волны  $\lambda$  распространяющегося излучения. Чтобы учесть этот фактор, вводится нормированная частота  $V$ .

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a NA \quad (1.2)$$



Значение нормированной частоты, в частности, определяет модовый состав излучения в световоде. С формальной точки зрения, мода – это устойчивое состояние электромагнитного поля внутри световода, одно из решений уравнений Максвелла для заданной структуры. Условно моду световода можно определить и как траекторию распространения света. [5]. Если  $V < 2,405$ , то в световоде распространяется лишь одна мода. [4]. Световоды, в которых реализуется такой режим в ближней ИК-области, определяются как одномодовые. При  $V > 2,405$  появляются моды более высоких порядков. Число мод при большом значении нормированной частоты порядка  $V^2/2$ . Понятие «одномодовости» носит несколько условный характер, т.к. при уменьшении длины волны излучения одномодовый световод становится многомодовым. [5].

#### 1.4 Потери при распространении света в оптическом волокне

Свет, распространяясь по оптоволокну неизбежно подвержен потерям. Существует несколько видов потерь на поглощение света, его рассеяние. Рассмотрим основные факторы, препятствующие стабильному прохождению света в световодах.

На коротких волнах преобладает релеевское рассеяние (см. рис. 1.3), которое обратно пропорционально четвертой степени длины волны излучения

$$\alpha_p = \frac{K_p}{\lambda^4} \quad (1.3)$$

На длинных волнах преобладает фононное поглощение. Оно проявляется в виде ряда пиков поглощения в далекой ИК-области (1,8 - 2,8 мкм). Частоты решеточного поглощения определяются акустическими и оптическими колебаниями решетки. Спектр фононного поглощения сложный.

Дополнительные пики потерь (их можно увидеть на графике зависимости потерь в оптоволокну от длины волны распространяющегося излучения) вносят гидроксильные группы ОН .

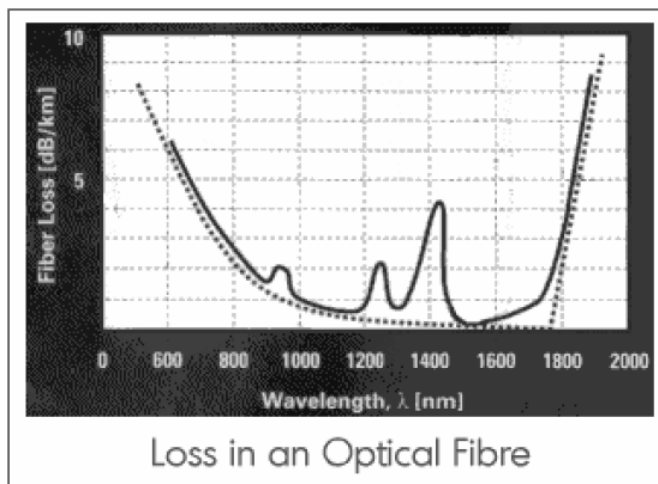


Рисунок 1.3 – Потери при распространении света в оптоволокне

Распространяясь по волокну, световой сигнал испытывает минимальное затухание порядка  $<0.2$  dB/km лишь в сверхчистых кремниевых волокнах вблизи длины волны 1,5 мкм. Однако для световодов длиной порядка нескольких метров потери на поглощение примесными атомами незначительны [4], что позволяет использовать волоконный световод в качестве активного элемента, сердцевина которого легирована активными ионами, как правило, тех же редкоземельных металлов. [5].

## 2 ЭЛЕМЕНТЫ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

### 2.1 Особенности волоконных лазеров

Одним из самых ярких достижений волоконной оптики является разработка и создание волоконных лазеров. В обычном лазере в качестве активной среды используется кристалл или стекло, легированное ионами элемента, который люминесцирует при оптическом возбуждении. В качестве таких элементов наибольшее распространение получили редкоземельные металлы – неодим, иттербий, эрбий и др. Для оптического возбуждения применяются мощные лампы

или полупроводниковые излучатели. Для получения генерации активный элемент помещается в резонатор, образованный двумя зеркалами – глухим и полупрозрачным, – через которое выходит излучение. Такие лазеры требуют юстировки зеркал и их жёсткой фиксации. Кроме того, существуют проблемы, связанные с нагревом активной среды.

Конструкция существенно упрощается при переходе к волоконному лазеру. В нём активным элементом является волоконный световод, сердцевина которого легирована активными ионами, как правило, тех же редкоземельных металлов. В качестве зеркал, формирующих резонатор, используются внутриволоконные брэгговские решётки с различными коэффициентами отражения, которые просто привариваются к активному световоду. Накачивается такой лазер малогабаритным полупроводниковым излучателем с волоконным выходом, который также приваривается к лазеру. Таким образом, получается компактное и лёгкое устройство, простое в эксплуатации из-за отсутствия механических юстировок, обладающее эффективным теплоотводом из-за большой площади боковой поверхности и высоким качеством выходного излучения, обусловленным волноводным характером его распространения. Все эти факторы делают волоконный лазер надёжным и стабильным источником излучения. Следует подчеркнуть, что за последние 15 лет максимальная выходная мощность волоконных лазеров выросла с 5 до 2000 Вт в непрерывном режиме, а спектральный диапазон их излучения простирается от 0,9 до 2,2 мкм. Это позволяет применять волоконные лазеры для обработки материалов (резка, сварка, сверление), для проведения хирургических операций, зондирования атмосферы, лазерной локации, в системах связи и пр.[5].



Рисунок 2.1 – Схема волоконного лазера

## 2.2 Активные добавки волоконных световодов

Так же как и в случае твердотельных лазерных источников, наибольшее распространение в качестве активных легирующих добавок волоконных световодов получили ионы лантаноидов, или редкоземельных элементов. Специфические оптические свойства данных элементов определяются тем, что для них характерна достройка внутренней f-оболочки, когда уже заполнились внешние оболочки. Наличие незаполненной внутренней оболочки приводит к появлению ярко выраженной дискретной структуры электронных переходов, которая и обуславливает применение ионов редкоземельных элементов в качестве активной примеси. Применимость активного иона для легирования волоконных световодов на основе кварцевого стекла определяется следующими факторами: во-первых, активный ион должен иметь излучательный переход в ближней ИК-области спектра, где кварцевое стекло наиболее прозрачно. Во-вторых, в кварцевом стекле энергия фононов составляет  $400 - 1100 \text{ см}^{-1}$ , поэтому наличие энергетических уровней с малым энергетическим зазором внутри оптического перехода приводит к безызлучательной релаксации, препятствуя появлению люминесценции. Поэтому в качестве активной примеси волоконных световодов на основе кварцевого стекла наибольшее распространение нашел ряд элементов, приведенных в таблице 2.1. Там же содержатся данные об области люминесценции этих активных ионов.

Таблица 2.1 – Ионы редкоземельных элементов, использующихся для активации волокон, и спектральные области люминесценции элементов

Активный ион	Область люминисценции, мкм
$\text{Nd}^{3+}$	0.92 – 0.94
$\text{Nd}^{3+}$	1.05 – 1.1
$\text{Nd}^{3+}$	1.34
$\text{Ho}^{3+}$	1.9 – 2.1
$\text{Er}^{3+}$	1.53 – 1.6
$\text{Tm}^{3+}$	1.7 – 1.9
$\text{Yb}^{3+}$	0.98 – 1.16

Отметим, что в волоконных световодах на основе стекол другого состава, в частности флюоридных и халькогенидных, возможно получение лазерной генерации с использованием и других активных ионов, например празеодима. Схемы энергетических уровней элементов, приведенных в таблице 2.1, и используемые оптические переходы представлены на рисунке 2.2.

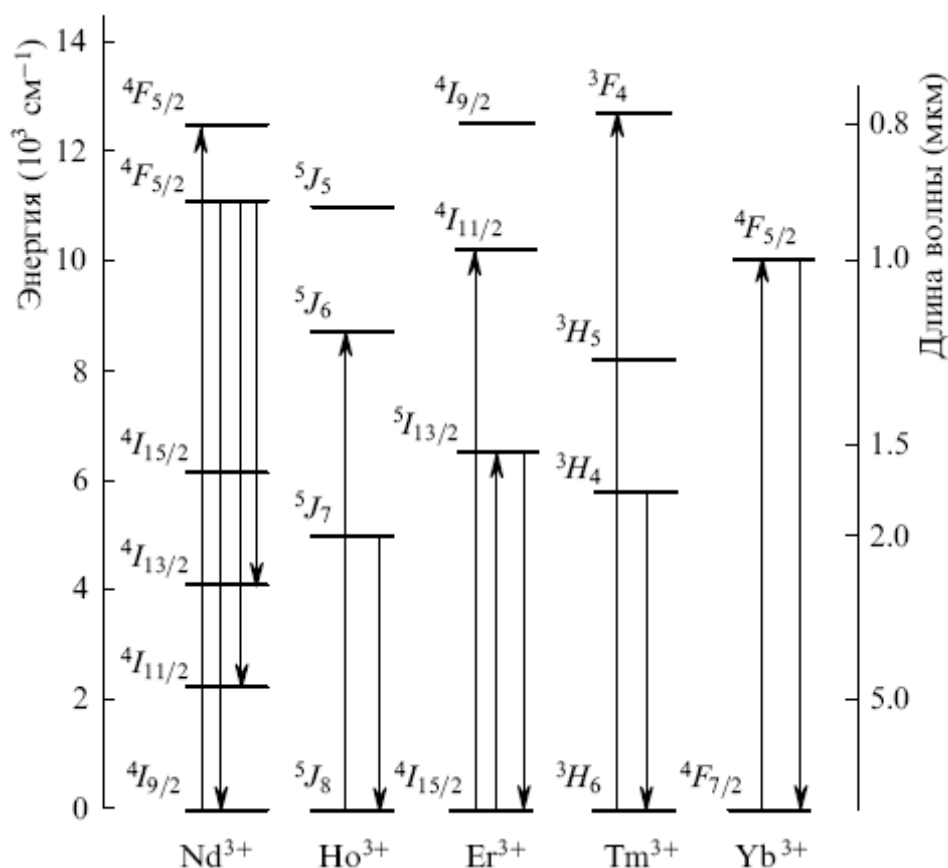


Рисунок 2.2 – Схема энергетических уровней ионов ряда редкоземельных металлов

Рассмотрим более подробно каждый из легирующих ионов.

**Неодим. (Nd<sup>3+</sup>).** Ионы неодима в кварцевом стекле имеют ряд сильных полос поглощения в видимом и ближнем ИК-диапазоне, однако для селективного возбуждения на уровень  $4F_{5/2}$  чаще всего используется полупроводниковый источник излучения с длиной волны 0.8 мкм. Три основных полосы люминесценции расположены в области 0.92, 1.06 и 1.34 мкм. При этом наиболее интенсивной является полоса люминесценции в области 1.06 мкм,

соответствующая переходу  ${}^4F_{3/2} \longrightarrow {}^4I_{11/2}$  (Время жизни на возбужденном уровне составляет около 0.5 мс.) На этой длине волны лазер работает по четырехуровневой схеме генерации. Это объясняет тот факт, что неодим был первой активной примесью для создания активной среды волоконного лазера, использующего световод на основе кварцевого стекла. Реализация волоконных лазеров с использованием оптического перехода  ${}^4F_{3/2} \longrightarrow {}^4I_{9/2}$  ( $\lambda = 0.92$  мкм) затруднена из-за конкуренции со стороны люминесценции в области 1.06 мкм, а генерация в области 1.34 мкм ( ${}^4F_{3/2} \longrightarrow {}^4I_{13/2}$ ) - из-за поглощения из возбужденного состояния. Тем не менее, подавление люминесценции на 1.06 мкм позволило создать эффективный волоконный лазер, излучающий на длине волны 0.92 мкм.

*Гольмий* ( $\text{Ho}^{3+}$ ). Энергетическая схема  $\text{Ho}^{3+}$  имеет лазерный переход  ${}^5J_7 \longrightarrow {}^5J_8$  с соответствующей длиной волны излучения в области 2 мкм. Время жизни на возбужденном уровне составляет около 0.5 мс. При этом гольмиевый лазер должен работать по трехуровневой схеме, поскольку на той же длине волны существует поглощение из основного состояния. Поэтому для таких лазеров для достижения инверсии необходимой является накачка в интенсивную полосу поглощения. По этой причине наибольшее распространение нашли твердотельные гольмиевые лазеры с ламповой накачкой в полосы поглощения, расположенные в видимой части спектра. Использование полосы поглощения в области 0.9 мкм, соответствующей переходу для накачки полупроводниковым источником не получило применения вследствие слабой интенсивности указанной полосы. В то же время, наличие интенсивной полосы поглощения в области 1.15 мкм, соответствующей переходу  ${}^5J_8 \longrightarrow {}^5J_5$ , позволяет рассчитывать на существенное улучшение характеристик гольмиевого волоконного лазера при накачке в эту полосу.

*Эрбий* ( $\text{Er}^{3+}$ ). Ионы эрбия в кварцевом стекле обладают лазерным переходом  ${}^4I_{15/2} \longrightarrow {}^4I_{13/2}$  соответствующим излучению в области 1.53 - 1.6 мкм, время жизни на метастабильном уровне составляет 10 - 12 мс. Данный спектральный

диапазон совпадает с областью минимальных оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла и, следовательно, с диапазоном, используемым в современных волоконно-оптических линиях связи. В сочетании с возможностью применять полупроводниковые источники накачки на 0.98 и 1.45-1.48 мкм это обусловило широкое использование волоконных световодов, легированных ионами эрбия, а также устройств на их основе. Следует отметить, что квантовая эффективность накачки для этих световодов приближается к 100 %, а большое время жизни на метастабильном уровне, составляющее около 10 мс, позволяет достигать высоких коэффициентов усиления.

*Тулий* ( $Tm^{3+}$ ). В данном случае излучение связано с переходом  ${}^3H_4 \longrightarrow {}^3H_6$  при накачке в полосу, обусловленную переходом на уровень  ${}^3F_4$  ( $\lambda = 790$  нм) либо  ${}^3H_5$  (1060 - 1250 нм). Спектральный диапазон возможной лазерной генерации составляет 1850-2100 нм, время жизни на метастабильном уровне примерно 0.2 мс.

*Иттербий* ( $Yb^{3+}$ ). Энергетическая структура ионов  $Yb^{3+}$  является предельно простой. Помимо основного уровня  ${}^2F_{7/2}$  они обладают лишь одним уровнем  ${}^2F_{5/2}$ . Следовательно, в спектре поглощения волоконных световодов, легированных ионами  $Yb^{3+}$  присутствует лишь одна полоса поглощения, имеющая сложную форму из-за штарковского расщепления. Данная полоса проявляет два максимума с центрами на 915 и 976 нм, поэтому для накачки используются полупроводниковые источники, излучающие в этих спектральных диапазонах. Спектр люминесценции, обусловленный переходом  ${}^2F_{5/2} \longrightarrow {}^2F_{7/2}$  имеет максимумы в области 978 - 982 нм и 1030 - 1040 нм, простираясь до области 1.15 - 1.2 мкм. Время жизни на метастабильном уровне для алюмосиликатного стекла составляет около 0.8 мс. Это позволяет реализовать широкий набор волоконных источников для диапазона 0.98 - 1.2 мкм с различными спектральными и энергетическими характеристиками.

## 2.3 Фотоиндуцированные решетки показателя преломления

Фотоиндуцированные брэгговские решетки показателя преломления используются в волоконных лазерах в качестве селективных отражателей, образующих лазерный резонатор. Получение фотоиндуцированных решеток показателя преломления стало возможным после обнаружения фоточувствительности световодов, т. е. стабильного изменения показателя преломления материала сердцевины световода под действием УФ излучения определенных длин волн. В общем случае под фотоиндуцированной внутриволоконной брэгговской решеткой показателя преломления следует понимать отрезок волоконного световода с модуляцией показателя преломления в световедущей области с амплитудой на уровне  $10^{-5} - 10^{-3}$  и периодом порядка длины волны распространяющегося излучения.

Основными характеристиками решетки являются период модуляции показателя  $\Lambda$ , величина наведенного изменения показателя преломления  $\delta n$ , число штрихов  $N$  или длина решетки  $L$ . На рис. 2.3 представлен типичный спектр пропускания брэгговской решетки с параметрами  $L=5$  мм,  $\delta n = 8 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Lambda=0.4$  мкм. Решетка обеспечивает коэффициент отражения  $R \approx 0.99$  на длине волны 1136 нм, при этом ширина спектра отражения составляет около 0.4 нм. Такие решетки, имеющие высокий коэффициент отражения и большую ширину спектра отражения, обычно используются в качестве входных отражателей волоконных лазеров.

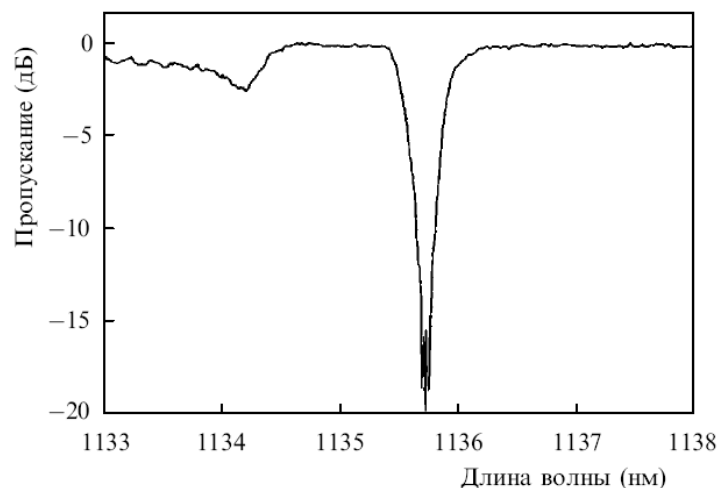


Рисунок 2.3 –Типичный спектр пропускания брегговской решетки



## 2.4 Активные волоконные световоды

Под активными понимают волоконные световоды, в состав материала которых входят ионы элементов, обладающих оптическими переходами. При этом активный ион может вводиться как в сердцевину световода, так и в его отражающую оболочку, если по ней распространяется заметная часть оптической мощности. Для производства активных волоконных световодов используется ряд технологических процессов: MCDV (модифицированное химическое осаждение из газовой фазы), OVD (внешнее осаждение из газовой фазы), VAD (аксиальное осаждение из газовой фазы) и другие. 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.

Следует отметить, что максимальная концентрация активных ионов в сетке кварцевого стекла невелика и ограничивается их растворимостью, а также возникновением кооперативных эффектов. [1]. Кооперативные явления – это явления в многочастичной системе, связанные с когерентным (согласованным) взаимодействием большого числа частиц. [6]. Это приводит к тому, что длина активной среды волоконного лазера может достигать нескольких десятков метров. Поэтому естественным требованием к активным волоконным световодам является наличие достаточно низких нерезонансных оптических потерь. Приемлемое значение потерь составляет от 5 до 20 дБ/км, в этом случае их влияние на эффективность лазера составляет не более нескольких процентов. На рис. 2.4 представлен спектр оптических потерь волоконного световода, легированного ионами  $Yb^{3+}$  с концентрацией  $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Сердцевина данного образца была также легирована  $Al_2O_3$ , что позволяет, как увеличить предел растворимости редкоземельных ионов в кварцевом стекле, так и уменьшить вероятности их кластеризации, приводящей к кооперативной ап-конверсии.

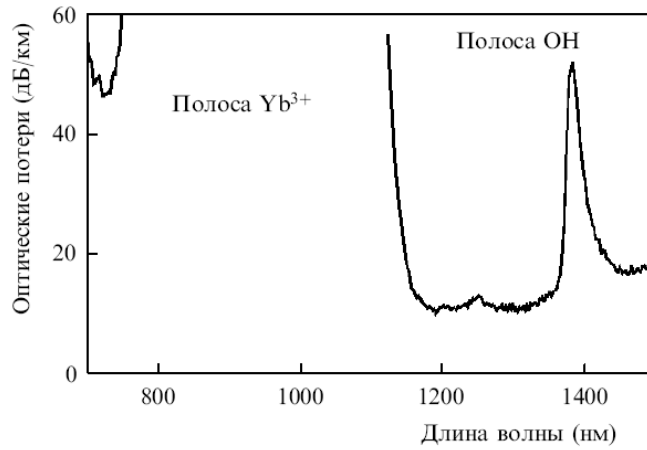


Рисунок 2.4 – Спектр оптических потерь в сердцевине оптического световода при концентрации ионов  $Yb^{3+}$   $n = 8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Как уже отмечалось, мощные полупроводниковые источники для накачки волоконных лазеров требуют применения волоконных световодов с двойной оболочкой. В качестве активной среды мощных волоконных лазеров используются световоды, состоящие из одномодовой сердцевины, легированной как активной примесью редкоземельного элемента, так и примесями, формирующими профиль показателя преломления, а также из внутренней оболочки из кварцевого стекла и внешней оболочки с показателем преломления, пониженным по сравнению с таковым для кварцевого стекла. Модельный профиль показателя преломления данных световодов показан на рис. 2.5, а.

Внутренняя оболочка (вместе с внешней оболочкой) образует многомодовый световод, по которому распространяется излучение накачки. Она имеет типичный размер 0.1 - 1 мм, что обеспечивает возможность ввода излучения накачки от полупроводниковых источников с мощностью от нескольких единиц до нескольких десятков ватт. При распространении по многомодовому световоду излучение накачки поглощается активными ионами редкоземельного элемента, вызывая люминесценцию, которая при наличии обратной связи может развиваться в лазерную генерацию. При этом область генерации оказывается локализованной в одномодовой сердцевине, т. е. ее характерный поперечный размер составляет 5 - 10 мкм. Принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера иллюстрируется на рис. 2.5,б.

Таким образом, волоконный лазер с накачкой в оболочку может рассматриваться как устройство, позволяющее повысить яркость полупроводникового источника в сотни раз (естественно, на другой длине волны).

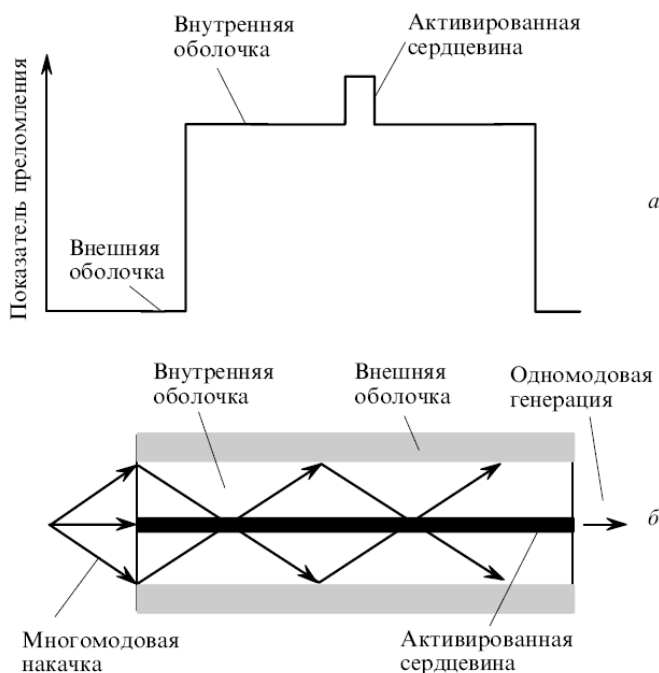


Рисунок 2.5 – Модельный профиль показателя преломления (а) и принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера (б).

Для наиболее распространенного типа волоконных световодов с двойной оболочкой в качестве материала внешней оболочки используются полимеры с низким показателем преломления. В частности, это силиконовая резина, обеспечивающая числовую апертуру многомодового световода  $NA = 0.38$ , и тефлон AF, позволяющий увеличить  $NA$  до 0.6. Как правило, световоды с полимерным покрытием имеют внешний диаметр 100 - 300 мкм.

К недостаткам использования силиконового покрытия следует отнести высокий уровень оптических потерь для излучения накачки, который составляет 50 дБ/км и более. Использование тефлона позволяет получать световоды с оптическими потерями в оболочке 10 дБ/км. Кроме того, данный материал обладает высоким пропусканием в УФ части спектра, что позволяет записывать

решетки без удаления полимера. Однако тефлоновое покрытие имеет малую толщину (10 - 20 мкм), что увеличивает риск повреждения световода. [1].

Оптические волокна с внутренней оболочкой круглой формы (см. рис. 2.6) являются неэффективными в смысле обеспечения связи мод внутренней оболочки с активированной сердцевиной, хотя и отличаются относительной простотой изготовления и соединения волокон. Причина заключается в том, что излучение в силу круговой симметрии не пересекает сердцевину волокна, расположенную в его центре, и следовательно, не обеспечивает должным образом накачку. Изгиб волокна в большинстве случаев не приводит к положительному результату. Смещение сердцевины к краю внутренней оболочки зачастую дает положительный эффект, однако это усложняет процесс производства волновода и его соединение.



Рисунок 2.6 – Геометрия накачки в оболочку круглой формы с центрированной и смещенной к краю сердцевиной

Внутренние оболочки волокон некруглой формы (см. рис. 2.7), в частности, многоугольники, оболочки в форме буквы D, прямоугольные оболочки являются эффективным путем повышения накачки активной сердцевины.



Рисунок 2.7 – Геометрия накачки во внутренние оболочки некруглых форм

Многоугольные оболочки трудны в изготовлении, зато их легко соединять, так как они обладают осевой симметрией по отношению к активной сердцевине. Оболочки в форме английской буквы D можно изготовить путем простого «шлифования» части круглой оболочки, но такие волноводы непросты в соединении.[7].

Для определения эффективности поглощения в оптических волокнах с различной геометрией внутренней оболочки рассматривалось несколько образцов, изготовленных из одной заготовки с сердцевиной, легированной иттербием. Данные световоды имели следующие форму и параметры внутренней оболочки: круглая (диаметром 125 мкм), D-образная с одной сошлифованной гранью (125 x 100 мкм), прямоугольная (150 x 75 мкм), квадратная (125 x 125 мкм). Для этих образцов было измерено поглощение в полосе иттербия для двух конфигураций: для прямых световодов и для световодов, изогнутых в форме восьмерки с радиусом изгиба 1 см. Использование последней конфигурации должно было способствовать перемешиванию мод оболочки и увеличению поглощения в полосе  $Yb^{3+}$ , если связь части мод оболочки с сердцевиной отсутствует для прямого оптического волокна. Из результатов измерений, представленных в табл.2.2, следует, что введение нерегулярного изгиба световода приводит к изменению поглощения только для образца с круглой формой внутренней оболочки, поэтому можно сделать вывод, что каждая использованная некруглая геометрия внутренней оболочки позволяет получить эффективность поглощения накачки, близкую к 100%.

Таблица 2.2 – Влияние геометрии внутренней оболочки на эффективность поглощения излучения накачки в световоде, легированном ионами  $Yb^{3+}$

Геометрия оболочки	Поглощение на 978 нм (дБ/м)	
	прямое волокно	«восьмерка»
Круглая	0.3±0.05	0.6±0.05
D – образная	2.2±0.05	2.2±0.05
Прямоугольная	3.5±0.05	3.5±0.05
Квадратная	3.3±0.05	3.3±0.05

D - образная форма выглядит наиболее простой для изготовления, поскольку требуется сошлифовка лишь одной грани заготовки. Однако сварка такого световода со световодом, имеющим круглую форму оболочки и используемым для изготовления брэгговских решеток, приводит к достаточно большим потерям в точке соединения из-за его асимметричной формы. Таким образом, оптимальной геометрией оболочки является квадратная форма, позволяющая добиться как высокой эффективности поглощения излучения накачки, так и малых оптических потерь при сварке с круглыми волокнами. Следует отметить, что можно использовать и другие геометрии оболочки, в частности шестигранную форму.

Для ряда задач необходимо использовать активные световоды с малым диаметром внутренней оболочки (30-60 мкм), накачиваемые более яркими полупроводниковыми источниками. Применение световодов с полимерным покрытием вызывает трудности из-за слишком малого внешнего диаметра, который не допускает использования сварочных аппаратов для соединения с другими волоконными световодами. В этом случае можно применять волоконный световод с двойной оболочкой на основе кварцевых стекол разного состава. В таком световоде в качестве внешней оболочки используется опорная труба из кварцевого стекла, а в качестве внутренней кварцевое стекло с достаточно большим содержанием  $GeO_2$ . Недостатком этой конструкции является ограничение сверху числовой апертуры световода на основе внутренней оболочки из-за разрушения заготовки, обусловленного разностью коэффициентов термического расширения для материалов внутренней и внешней оболочек. Вероятность разрушения заготовки повышается при больших геометрических размерах осажденной оболочки. Поэтому на практике числовая апертура для излучения накачки составляет 0.2 - 0.25, что существенно ограничивает вводимую мощность накачки.

Другим вариантом является использование активного световода с микроструктурированной оболочкой, поперечное сечение которого представлено на рис.2.8. На нем черными кружками обозначены воздушные промежутки. Характерное значение числовой апертуры таких световодов составляет 0.5 и

ограничивается вытеканием мод высших порядков через перемычки, поддерживающие внутреннюю оболочку. Большое значение  $NA$  позволяет увеличить плотность накачки в несколько раз по сравнению с предыдущей конструкцией световода при использовании идентичных источников накачки и сохранении диаметра внутренней оболочки.[1].

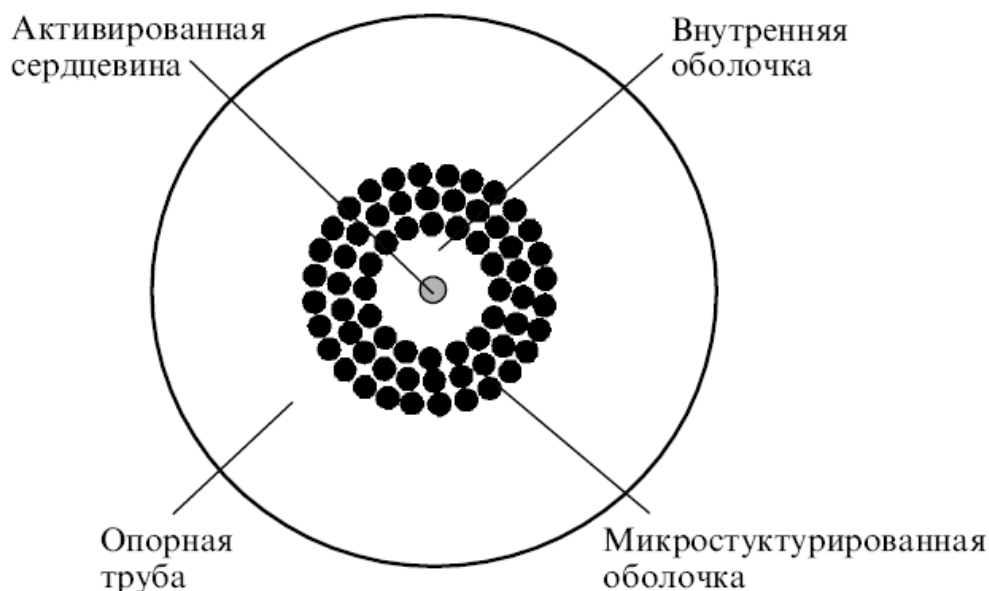


Рисунок 2.8 – Схема волоконного световода с микроструктурированной оболочкой.

## 2.5 Схемы накачки активных световодов

Для накачки активного волоконного световода с двойной оболочкой было предложено несколько способов. Наиболее простым из них является случай торцевой накачки, когда излучение полупроводникового источника вводится в активный световод через торец (см. рис. 2.9). Достоинством такого способа является возможность его использования для всех описанных выше типов световодов с двойной оболочкой. К его недостаткам относится возможность использования лишь одного источника накачки (лазерного диода или их сборки), поэтому вводимая в световод мощность ограничена современными возможностями полупроводниковой технологии.

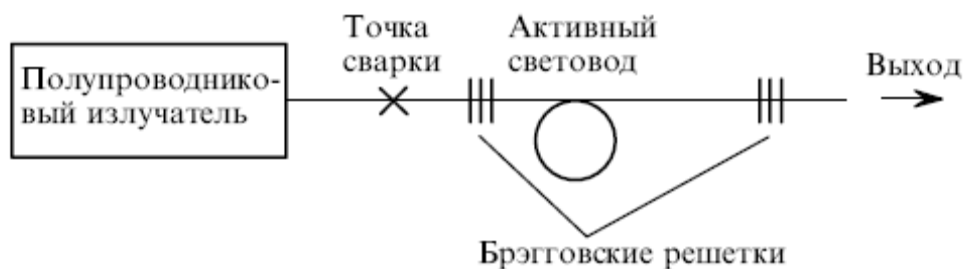


Рисунок 2.9 – Схема накачки активной среды через торец

Две других схемы накачки используют принцип распределения вводимого излучения накачки по длине активного световода. Так, для ввода накачки предлагается использовать набор U-образных канавок, изготовленных на боковой поверхности световода. Принцип ввода накачки показан на рис. 2.10. Несомненным достоинством такого способа является возможность добавления источников по длине активного световода по мере истощения мощности от предыдущего источника. К недостаткам следует отнести необходимость фиксации полупроводникового лазера относительно активного световода и защиты области ввода от внешних воздействий.

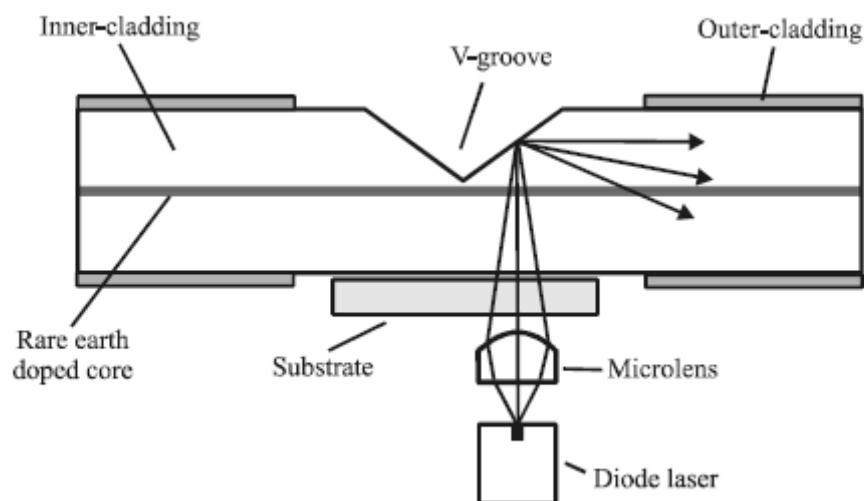


Рисунок 2.10 – Схема накачки через V – образную канавку



Особенностью другого способа накачки является использование специального двойного волоконного световода, представляющего собой два волоконных световода с общим полимерным покрытием, имеющим пониженный по сравнению с кварцевым стеклом показатель преломления (ОГУ-световод). Один из световодов (активный) имеет сердцевину, легированную ионами иттербия, а второй (пассивный) представляет собой волокно из высокочистого кварцевого стекла. Соответствующая конфигурация представлена на рис. 2.11.

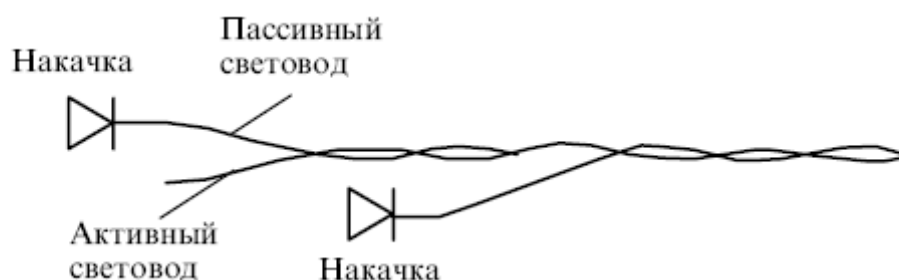


Рисунок 2.11 – Схема накачки с использованием двойного световода

Излучение накачки от полупроводникового излучателя вводится в пассивный световод. В области контакта световодов происходит перераспределение мощности накачки, введенной в пассивный световод, по двум световодам, при этом 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 световодах. Таким образом, происходит распределенная накачка по всей длине активного световода. В данной схеме возможно использование двух источников накачки, излучение которых вводится с противоположных концов пассивного световода, а также разрыв пассивного световода в области истощения мощности накачки и добавление следующего источника (рис. 2.11). Кроме того, можно увеличить число пассивных световодов в сборке, что позволит, в свою очередь, увеличить количество источников накачки.

## 2.5 Особенности волоконных световодов как усилительной среды

Активные волоконные световоды как усилительная среда обладают рядом особенностей по сравнению с лазерными кристаллами и стеклами. Так, волноводный характер распространения фотонов накачки и сигнала, как правило, исключает потери на их излучение через боковые поверхности среды. Только при неправильном выборе параметров световода, либо при наличии изгиба световода с малым радиусом могут возникать излучательные потери. Это является несомненным преимуществом волоконных лазеров по сравнению с обычными твердотельными лазерами. Однако характерная длина активной среды волоконных лазеров составляет единицы и десятки метров, поэтому при анализе их эффективности существенным является учет нерезонансных оптических потерь как излучения накачки, так и излучения сигнала.

Другие особенности волоконных лазеров обусловлены тем, что в одномодовом волоконном световоде излучение распространяется не только в сердцевине, но и в отражающей оболочке, при этом доли мощности в сердцевине и оболочке могут оказаться сопоставимыми. Кроме того, можно вводить активную примесь не во всю сердцевину, а лишь в часть ее, либо легировать часть оболочки световода. В принципе, можно легировать различные области световода разными активными примесями, при этом взаимодействие ионов в общепринятом смысле отсутствует, а есть лишь их оптическая связь.

Таким образом, классические выражения для усиления в случае волоконных световодов должны быть модифицированы. Приведем соотношения для эволюции мощности сигнала и накачки в трехуровневой схеме усиления, по которой работает большинство реализованных волоконных лазеров:

$$\frac{dP_s}{dz} = \chi_s [N_1 \sigma_e(\lambda_s) - N_0 \sigma_a(\lambda_s)] P_s - \alpha_s P_s, \quad (2.5)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\chi_p N_0 \sigma_a(\lambda_p) P_p - \alpha_p P_p, \quad (2.6)$$

где и  $P_s, P_p, \lambda_s, \lambda_p$  – мощности и длины волн излучения сигнала и накачки соответственно;  $(\sigma_a, \sigma_e$  – сечения поглощения и люминесценции;  $N_0$  и  $N_1$  – населенности основного и метастабильного уровней;  $\alpha_s, \alpha_p$  – коэффициенты нерезонансных потерь для сигнала и накачки;  $\chi_s, \chi_p$  – интеграл перекрытия полей излучения сигнала и накачки с активной областью.

$$\chi_{s,p} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} E_{s,p}(r) 2\pi r dr}{\int_0^{\infty} E_{s,p}(r) 2\pi r dr}, \quad (2.7)$$

где  $E(r)$  – радиальное распределение соответствующего поля;  $r_1$  и  $r_2$  – границы области световода, легированной активными ионами.

В случае накачки в оболочку световода  $\chi_p$  можно приблизительно оценить как

$$\chi_p \cong S_d / S_{cl} \quad (2.8)$$

где  $S_d, S_{cl}$  – площади поперечного сечения легированной области и оболочки, по которой распространяется накачка. Приведенное соотношение является весьма приблизительным, поскольку интеграл перекрытия излучения накачки в данном случае зависит от распределения интенсивности излучения источника накачки, способа возбуждения, формы оболочки и т. д. Тем не менее, ясно, что использование накачки в оболочку эквивалентно существенному уменьшению сечения поглощения на длине волны накачки. [1].

### 3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

#### 3.1 Лазеры на основе световодов, легированных ионами $Nd^{3+}$

Рассмотрим схему энергетических уровней, поглощательных и излучательных переходов в кремниевых световодах, легированных ионами  $Nd^{3+}$ .

Накачка в таких средах происходит вблизи значения длины волны 800 нм, что соответствует оптическому переходу между энергетическими уровнями  ${}^4I_{9/2}$  и  ${}^4F_{5/2}$  (см. рис. 3.1). Далее происходит быстрая релаксация на метастабильный уровень  ${}^4F_{3/2}$ , откуда соответственно возможны разрешенные согласно правилам изменения квантовых чисел ( $\Delta n = \pm 1, \Delta l = \pm 1$ ) излучательные переходы на уровни  ${}^4I_{13/2}$ ,  ${}^4I_{11/2}$ ,  ${}^4I_{9/2}$  с длинами волн в районе 1360 нм, 1050 – 1090 нм, 905 – 940 нм. [7].

Наиболее часто лазерная генерация происходит вблизи длины волны 1060 нм. Спектральная характеристика поперечного сечения излучения вблизи длины волны 1060 нм представлена на рис. 3.2. Полуширина линии излучения на полувысоте приблизительно равна 22 нм. [4].

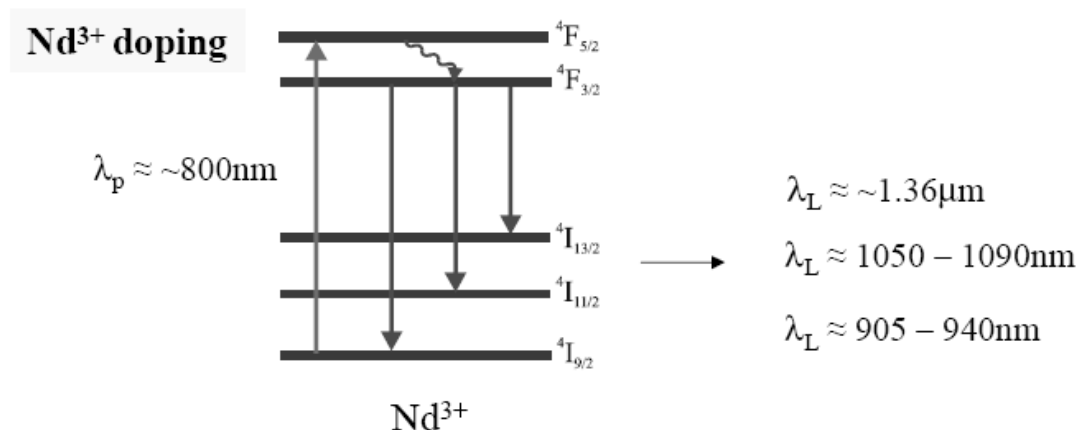


Рисунок 3.1 – Основные лазерные переходы высокоомощных волоконных кремниевых устройств, легированных ионами  $Nd^{3+}$

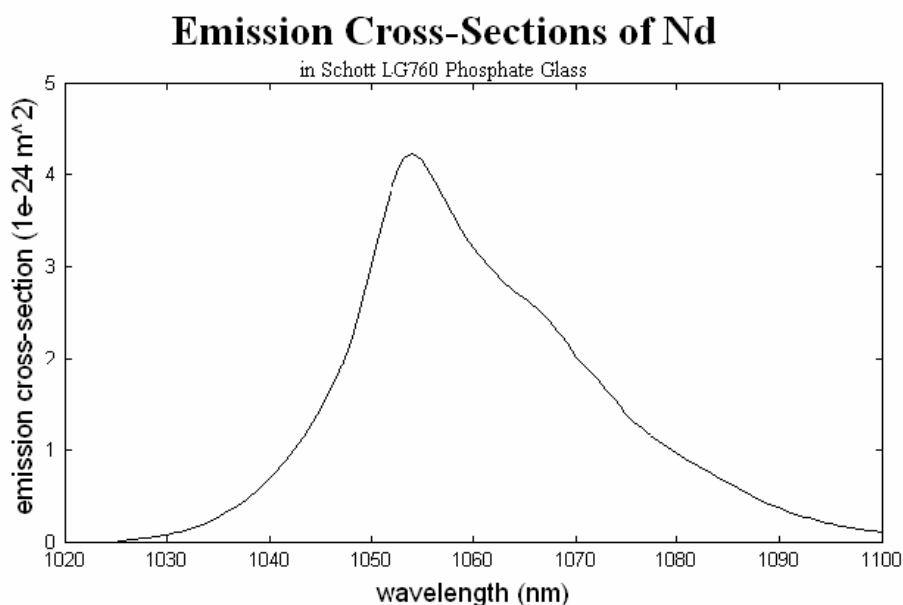


Рисунок 3.2 – Поперечное сечение излучения в ионе  $Nd^{3+}$

Остановимся на эффекте Штарка в таких волноводах. Напомним, что эффект Штарка проявляется в расщеплении спектральных линий атомов, молекул и других квантовых систем в электрическом поле. Эффект был открыт в 1913 Й. Штарком на линиях Бальмера серии водорода.

Эффект Штарка получил объяснение на основе квантовой механики. Атом (или другая квантовая система), находясь в состоянии с определенной энергией  $\varepsilon$ , приобретает во внешнем электрическом поле, дополнительную энергию  $\Delta\varepsilon$  вследствие его поляризуемости – приобретения в поле дипольного момента. Уровень энергии, которому соответствует одно возможное состояние атома (невыврожденный уровень), в электрическом поле характеризуется энергией  $\varepsilon + \Delta\varepsilon$ , т.е. смещается. Различные состояния, соответствующие вырожденному уровню энергии, могут приобретать разные дополнительные энергии  $\Delta\varepsilon_\alpha$  ( $\alpha=1,2,3,\dots,g$ , где  $g$  – степень вырождения уровня). В результате вырожденный уровень расщепляется на штарковские подуровни, число которых равно числу различных значений дополнительной энергии  $\Delta\varepsilon_\alpha$ . Так, уровень энергии атома с заданным значением полного момента  $M = \hbar\sqrt{J(J+1)}$  (где  $J=0,1,2,\dots$  – соответствующее квантовое число) расщепляется на подуровни, характеризуемые разными значениями магнитного квантового числа  $m_J$ , которое определяет величину

проекции  $\vec{M}$  на направление  $\vec{E}$ . В однородном электрическом поле, обладающем аксиальной симметрией, сохраняется квантование проекции  $\vec{M}$ . Однако в отличие от расщепления в магнитном поле при эффекте Зеемана на  $2J+1$  невырожденных подуровня (т.е.  $m_J = -J, -J+1, -J+2, \dots, 0, \dots, J-2, J-1, J$ ), значениям  $-m_J$  и  $+m_J$  соответствует одинаковая дополнительная энергия  $\Delta \varepsilon_\alpha$ , поэтому штарковские подуровни (кроме подуровня с  $J=0$ ) дважды вырождены и уровень с заданным  $J$  расщепляется при целом  $J$  на  $J+1$  уровень, а при полуцелом  $J$  на  $J+1/2$  подуровней (при  $J=1/2$  вообще не расщепляется). Двукратное вырождение в случае атомов с нечетным числом электронов, для которых значения  $J$  полуцелые, сохраняется и в неоднородных электрических полях. [6].

Существует линейный и квадратичный эффект Штарка. Штарковское расщепление уровней  $\Delta \varepsilon$  может быть пропорционально электрическому полю  $E$  (линейный эффект Штарка) и пропорционально  $E^2$  (квадратичный эффект Штарка). Последний случай реализуется в атомах, обладающих центром симметрии и поэтому не имеющих постоянного электрического дипольного момента  $d$ . Под действием электрического поля такой момент индуцируется в атоме  $d = \chi_{00} E$ , где  $\chi_{00}$  - поляризуемость атома, и поэтому энергия взаимодействия, как это следует из раздела электростатики в курсе физики,

$$\Delta \varepsilon = d \cdot E = \chi_{00} E^2 \quad (3.1)$$

В случае же, когда атом или молекула (например, водородоподобные атомы или ряд молекул) обладают постоянным электрическим дипольным моментом  $d$ , имеет место линейный эффект Штарка.

$$\Delta \varepsilon = d \cdot E \quad (3.2)$$

В линейном эффекте Штарка  $\Delta \varepsilon$  пропорциональна величине электрического поля  $E$  [8].

Важный случай эффекта Штарка – расщепления электронных уровней энергии иона в ионном кристалле (а также примесного иона в молекулярном

кристалле, содержащем дипольные молекулы) под действием внутрикристаллического поля. Штарковское расщепление в этом случае может достигать сотых долей эВ. Этот эффект учитывается в спектроскопии кристаллов и важен для твердотельных и лазеров. [6]

Вернемся к обсуждению влияния эффекта Штарка на энергетические уровни в кристаллах кремния с примесью ионов  $Nd^{3+}$ . Каждый уровень иона, как и ожидалось, расщепляется на несколько подуровней и вырождение по энергии подуровней поддерживается благодаря влиянию соседних ионов  $Nd^{3+}$ . А также быстрые переходы фононов между подуровнями вызывают уширение времени жизни за исключением низких температур. [7]

Волоконный лазер на основе световода, легированного ионами  $Nd^{3+}$ , излучающий в области 1.06 мкм, был первым лазером, который использовал накачку в оболочку. Это определялось тем, что первые мощные полупроводниковые системы накачки имели невысокую яркость, и для ввода излучения накачки необходимо было использовать активные световоды с размером внутренней оболочки в несколько сотен микрометров. В результате инверсия населенности была также небольшой, и генерация оказывалась возможной лишь в системах, работающих по четырехуровневой схеме (рис. 3.3), где отсутствует перепоглощение сигнала.

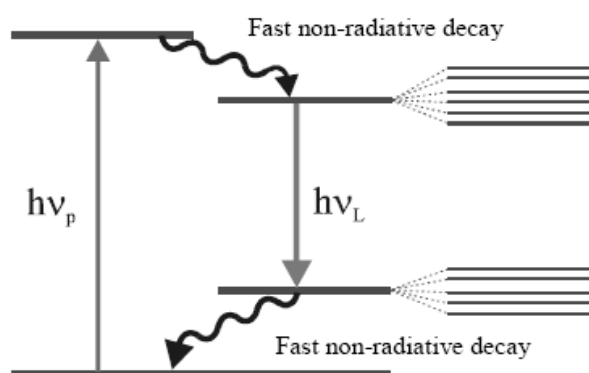


Рисунок 3.3 – Четырехуровневая модель лазера

В течение нескольких лет после первой публикации выходная мощность неодимовых лазеров превысила 30 Вт. На рис.3.4 представлены типичные (спектральная и мощностная) характеристики неодимового волоконного лазера на основе световода с оболочкой размером 290 x 290 мкм и активированной сердцевиной диаметром 5 мкм. Для накачки использовалась диодная матрица с длиной волны излучения 0.81 мкм.

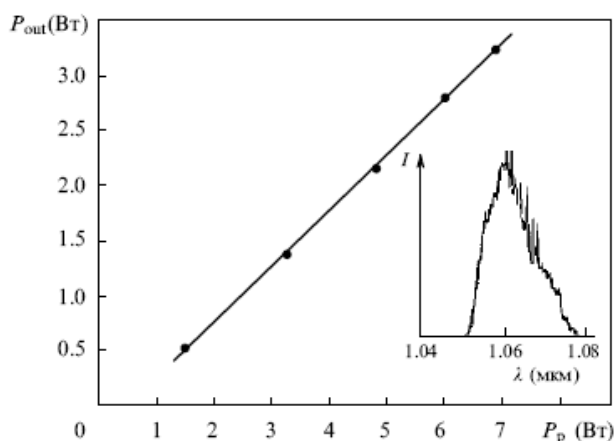


Рисунок 3.4 – Зависимость выходной мощности неодимового волоконного лазера от мощности накачки. На вставке – спектр генерации лазера.

Заслуживает внимания работа, в которой был продемонстрирован волоконный лазер, излучающий одновременно на двух длинах волн 1060 и 1090 нм. Сердцевина световода была легирована добавками алюминия и германия. При этом активные ионы попадали в различное окружение и имели разные спектры люминесценции.

При введенной мощности накачки 8.5 Вт лазер излучал более 3 Вт на длине волны 1060 нм и более 1 Вт на длине волны 1090 нм.

Значительный интерес представляют результаты разработки неодимового лазера с длиной волны генерации в области 0.92 мкм. Такие лазеры могут найти применение для накачки иттербиевого волоконного лазера, излучающего в области 0.98 мкм. В свою очередь, иттербиевый лазер, имеющий достаточно высокую мощность, может использоваться для накачки эрбиевых волоконных усилителей. Неодимовый лазер также может быть использован в схемах удвоения частоты для



получения излучения в синей области спектра. Как уже отмечалось, реализация волоконных лазеров с использованием оптического перехода  ${}^4F_{3/2} \longrightarrow {}^4I_{9/2}$  затруднена из-за конкуренции со стороны люминесценции в области 1.06 мкм, поэтому основной проблемой создания такого лазера является подавление люминесценции в этой области. Для этого использовался специальный волоконный световод с волноводной структурой, характеризующейся значительными потерями на вытекание в спектральной области  $\lambda > 1$  мкм. Это позволило реализовать волоконный лазер с выходной мощностью 0.5 Вт на длине волны 925 нм. Спектр излучения лазера представлен на рис.3.5 Видно, что подавление люминесценции на  $\lambda = 1060$  нм составило около 60 дБ. На рис.3.6 представлена зависимость выходной мощности от мощности поглощенной накачки. Дифференциальная эффективность генерации составила около 35%.

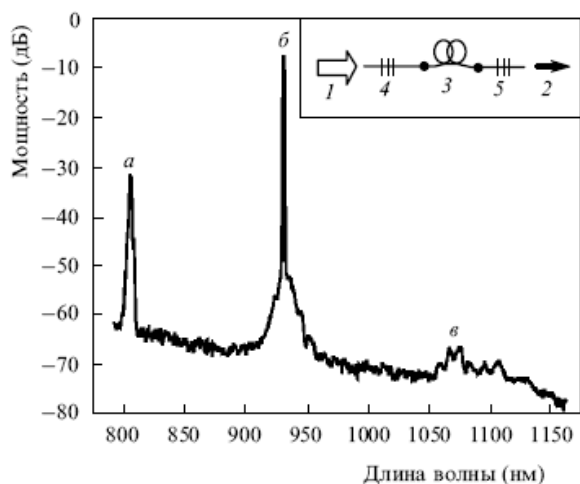


Рисунок 3.5 - Спектр излучения неодимового волоконного лазера на  $\lambda = 925$  нм: линия излучения накачки (а), линия генерация на 925 нм (б), излучение на 1060 нм (в). На вставке схема лазера: 1 - излучение накачки; 2 - выходное излучение; 3 - активный световод; 4, 5 - брэгговские решетки.

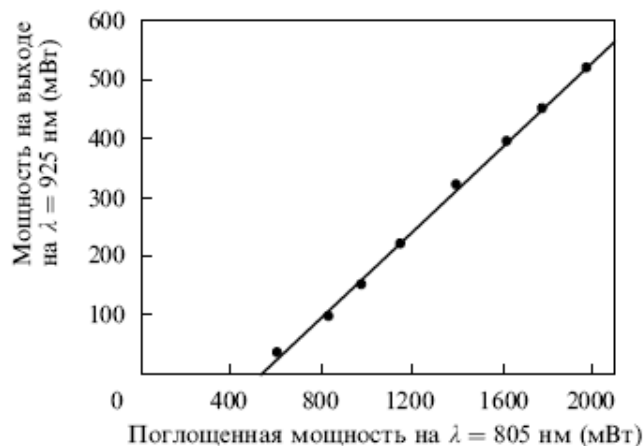


Рисунок 3.6 – Зависимость выходной мощности неодимового волоконного лазера на  $\lambda = 925$  нм от поглощенной мощности накачки.

### 3.2. Лазеры на основе световодов, легированных ионами $Yb^{3+}$

Энергетическая схема уровней ионов иттербия в кварцевом стекле чрезвычайно проста: помимо основного уровня  $^2F_{7/2}$  существует единственный возбужденный уровень  $^4F_{5/2}$  (см. рис.2.2). Отсутствие других энергетических уровней вплоть до УФ диапазона означает, что в данной системе должно отсутствовать поглощение из возбужденного состояния и кооперативная ап-конверсия. Это позволяет существенно увеличить концентрацию активной примеси по сравнению с такими распространенными легирующими добавками, как неодим и эрбий. Использование световодов с высокой концентрацией активной примеси в свою очередь позволяет уменьшить длину активной среды лазера, а значит, и влияние дополнительных оптических потерь.

Спектры поглощения таких световодов, определяемые электронными переходами между расщепленными уровнями, характеризуются наличием сложной полосы поглощения с центрами на  $\lambda = 915$  и  $976$  нм. Спектр люминесценции состоит из узкой линии с центром на  $980$  нм и полосы с максимумом на  $1035$  нм, простирающейся примерно до  $1200$  нм (рис.3.7).

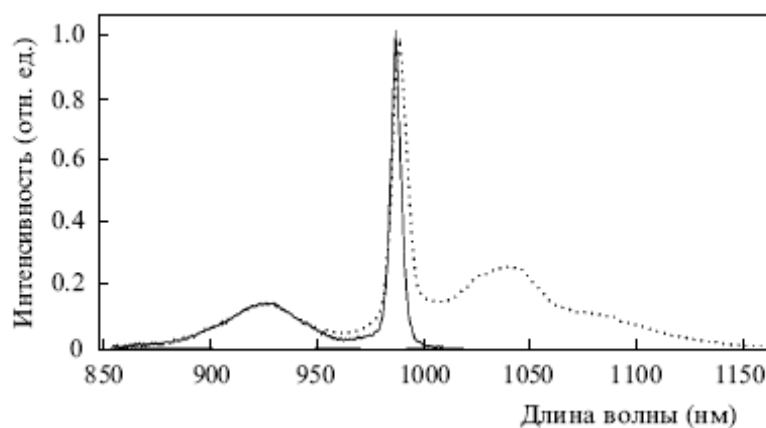


Рисунок 3.7 – Спектры поглощения (сплошная кривая) и люминисценции (пунктирная кривая) ионов иттербия в кварцовом стекле

По литературным данным сечения поглощения и люминесценции в максимуме практически совпадают и составляют  $2.5 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  (кварцевое стекло было легировано алюминием и германием). Следует отметить, что использование накачки в области 976 нм представляется более эффективным из-за большего сечения поглощения. В то же время, в результате накачки в полосу 915 нм может быть получена генерация в области 976 нм. Кроме того, при накачке в полосу 915 нм требования к длине волны излучения источника накачки и ее стабильности при изменении температуры не столь высоки из-за большой ширины этой полосы.

Иттербиевые лазеры в настоящее время являются наиболее распространенным типом волоконных лазеров с накачкой в оболочку. В настоящем обзоре в основном рассматриваются результаты, полученные в НЦВО при ИОФ им. А.М.Прохорова РАН. Для реализации иттербиевого волоконного лазера использовалась схема с брэгговскими решетками, записанными как собственно в активном световоде, так и в отрезках другого световода, сваренного затем с активным.

Использовались активные световоды со следующими параметрами: разность показателей преломления сердцевины и оболочки  $\Delta n = (9-11)10^{-3}$ , диаметр сердцевины  $2a = 4.5 - 5.5 \text{ мкм}$ , концентрация ионов иттербия  $(5 - 10)10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Размер внутренней квадратной оболочки составил  $120 \times 120 \text{ мкм}$ , что обеспечивало

100%-ную эффективность стыковки световода с волоконным выходом полупроводникового источника накачки.

На рис.3.8 представлена типичная зависимость выходной мощности иттербиевого волоконного лазера на длине волны 1100 нм от мощности накачки. Дифференциальная эффективность использования накачки в реализованном лазере составила 80 %, что соответствует квантовой эффективности около 90%. Также показан спектр излучения лазера, измеренный с разрешением 0.01 нм, ширина спектра составила 0.1 нм.

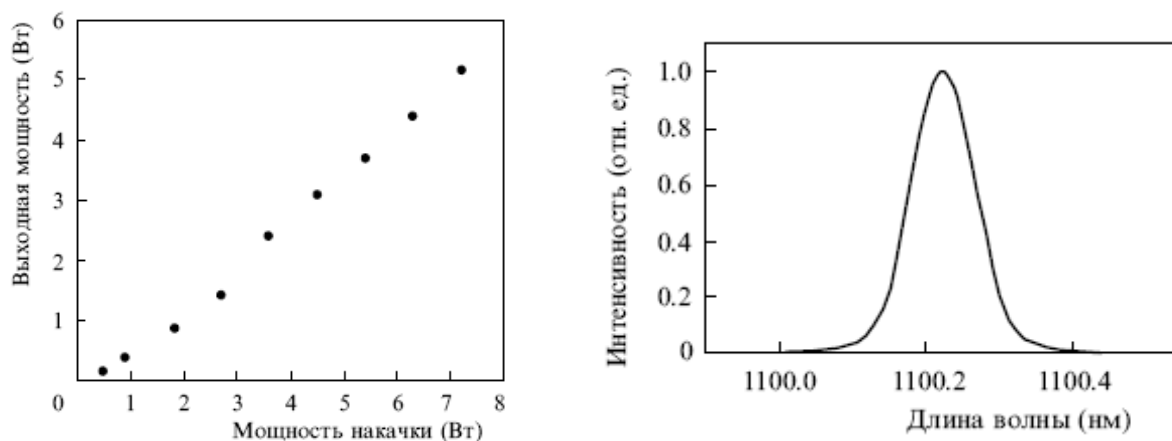


Рисунок 3.8 - Зависимость выходной мощности иттербиевого волоконного лазера от мощности накачки и его спектр излучения.

Как было отмечено выше, особенностью лазеров на основе активных волоконных световодов с накачкой в оболочку является то, что в таких устройствах трудно добиться полной инверсной населенности среды, поскольку эффективное сечение накачки уменьшается пропорционально отношению площадей оболочки и сердцевины световода. Поэтому на эффективность преобразования излучения накачки в лазерное излучение сильное влияние оказывает перепоглощение сигнала неинвертированной частью активных ионов. Спектр поглощения ионов иттербия характеризуется наличием длинноволнового края полосы поглощения с центром на 976 нм, при этом поглощение на длинах волн 1000 и 1060 нм составляет примерно 2 % и 0.2 % от поглощения на длине волны 976 нм соответственно. В то же время максимум люминесценции активных

ионов локализован в области 1035 нм и также имеет протяженный длинноволновый край, поэтому эффективность волоконного лазера определяется конкуренцией между люминесценцией и перепоглощением сигнала, в свою очередь определяя спектральную зависимость эффективности преобразования излучения накачки в лазерное излучение.

На рис. 3.9 показана спектральная зависимость дифференциальной эффективности генерации для семи образцов волоконных лазеров. Видно, что максимальная дифференциальная эффективность составляет около 80% и достигается в спектральной области 1.08 - 1.11 мкм. На длине волны 1.049 мкм она спадает до 57%, что объясняется влиянием перепоглощения излучения. В длинноволновой области спад эффективности объясняется резким уменьшением сечения люминесценции.

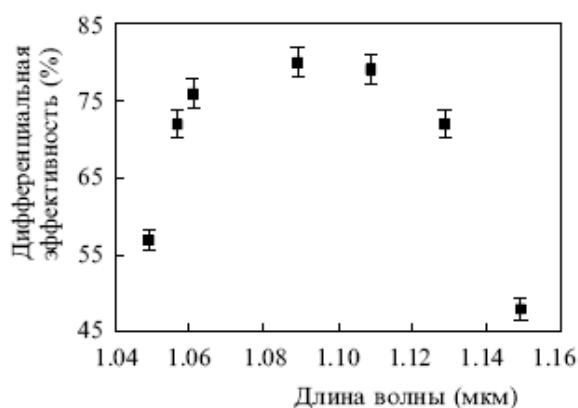


Рисунок 3.9 – Спектральная зависимость дифференциальной эффективности иттербиевого волоконного лазера с накачкой в оболочку.

Следует отметить, что полученные результаты справедливы для выбранной геометрии активного волоконного световода, т.е. для данного отношения площадей оболочки и сердцевины, составляющего около 500. Эффективность лазеров в коротковолновой части может быть повышена в результате увеличения диаметра активной сердцевины. Перспективным представляется также использование световодов с уменьшенным размером оболочки. Это выглядит возможным, учитывая современную тенденцию увеличения яркости

полупроводниковых источников накачки. Использование активных волоконных световодов с уменьшенным диаметром внутренней оболочки является особенно актуальным для реализации лазеров, излучающих в области 980 нм. Интерес к таким лазерам определяется возможностью их использования для накачки мощных эрбиевых усилителей. Как видно из рис. 3.7, поглощение в этой области конкурирует с люминесценцией, что требует создания высокой степени инверсии населенности для получения лазерной генерации.

Для реализации лазера, излучающего в области 980 нм, использовался активный световод с двойной оболочкой на основе стекол разного состава. На рис.3.10 показан профиль показателя преломления заготовки такого волоконного световода.

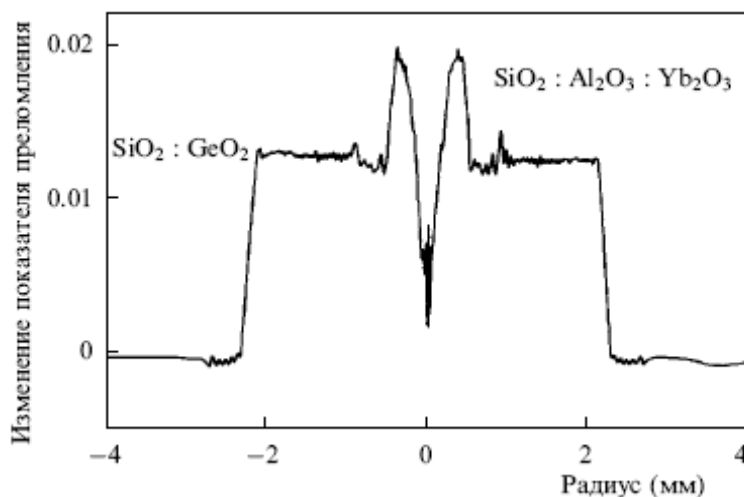


Рисунок 3.10 – Профиль показателя преломления заготовки активного волоконного световода с оболочками на основе стекол разного состава

Внутренняя оболочка световода являлась кварцевым стеклом с дополнительным легированием  $GeO_2$ , молярная концентрация примеси в ней была около 10%, что обеспечивало числовую апертуру для излучения накачки, равную 0.22. Роль внешней оболочки в данном случае играла опорная труба из кварцевого стекла. При изготовлении сердцевины использовалось легирование из раствора ионами иттербия и алюминия. Волоконный световод имел диаметр внутренней оболочки около 25 мкм и диаметр сердцевины 10 мкм. Концентрация ионов  $Yb^{3+}$  составляла около  $2 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, что обеспечивало коэффициент поглощения 2.5 дБ м

на 915 нм. Входная брэгговская решетка лазера записывалась непосредственно на активном световоде, который предварительно пропитывался водородом. Накачка волоконного лазера осуществлялась полупроводниковым источником излучения с длиной волны 915 нм, позволяющим вводить около 5 Вт мощности в световод с диаметром 50 мкм и  $NA=0.22$ .

На рис.3.11 (на вставке) представлен спектр излучения полученного волоконного лазера, генерация имеет место на длине волны 977.5 нм. Максимальная мощность генерации достигалась при использовании в лазере активного волоконного световода длиной 1.5 м. Кроме того, показана соответствующая зависимость мощности генерации от вводимой мощности накачки. Дифференциальная эффективность преобразования накачки в сигнал составила 53 %, а по отношению к поглощенной мощности – 82%.

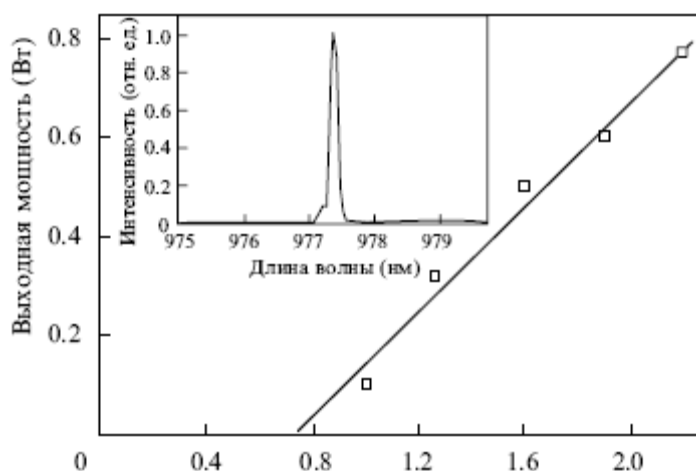


Рисунок 3.11 – Зависимость выходной мощности лазера на 977.5 нм от входной мощности накачки. На вставке – спектр излучения лазера.

Для ввода большей мощности накачки и, следовательно, достижения более высокой мощности генерации использовался световод с микроструктурированной оболочкой. При этом числовая апертура внутренней оболочки, имеющей диаметр 20 мкм, составила 0.7, выходная мощность излучения на 980 нм 1.4 Вт, при этом поглощенная мощность накачки равнялась 2.5 Вт. К недостаткам предложенной конфигурации следует отнести использование объемных зеркал в качестве отражателей, формирующих резонатор.

В последнее время для создания лазеров с повышенной выходной мощностью все большее распространение находят специальные волоконные световоды, представляющие собой объединение активного световода с пассивными. На рис.3.12 представлен лазер на тройном световоде, являющемся объединением активного световода с двумя пассивными. Использовались четыре источника накачки общей мощностью до 100 Вт. Выходная непрерывная мощность лазера составила 65 Вт на длине волны 1072 нм. Соответствующая зависимость выходной мощности от мощности накачки показана на рис.3.11.

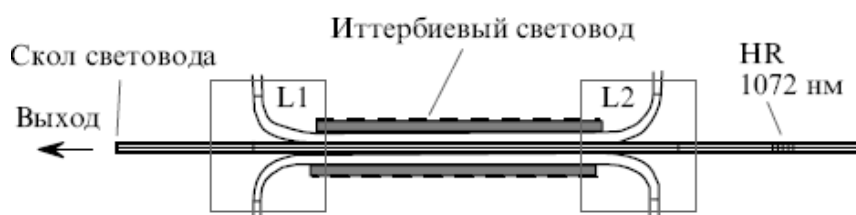


Рисунок 3.12 – Упрощенная схема волоконного лазера на тройном световоде:

L1 и L2 – точки разветвления световода, HR – брэгговская решетка с коэффициентом отражения, близким к 100% на длине волны 1072 нм. В качестве выходного зеркала использовался скол световода, перпендикулярный его оси.

### 3.3. Лазеры на основе световодов, легированных ионами $Er^{3+}$

Ионы  $Er^{3+}$  в кварцевом стекле имеют полосу люминесценции с центром на 1.53 мкм, что позволяет реализовать волоконные лазеры и усилители для спектрального диапазона 1.53 - 1.6 мкм. Соответствующий спектр люминесценции ионов  $Er^{3+}$  в алюмогерманосиликатном стекле представлен на рис.3.13.



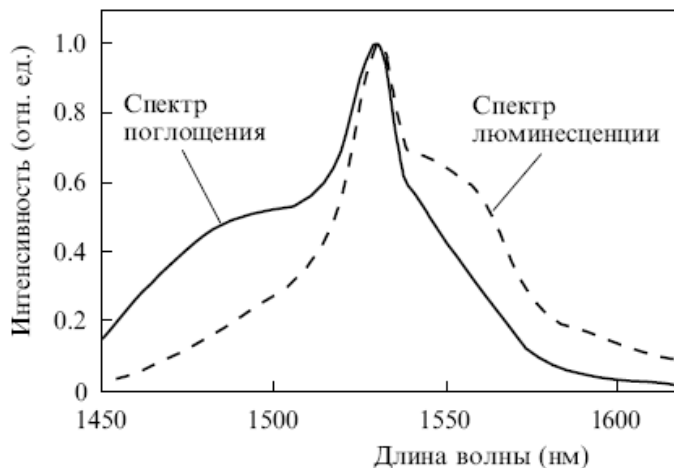


Рисунок 3.13 – Спектры поглощения и люминесценции ионов эрбия в алюмогерманосиликатном кварцевом стекле

Источники излучения на основе волоконных световодов, легированных ионами эрбия, работают по трехуровневой схеме, что подразумевает необходимость достижения высокой степени инверсии населенности. Максимум полосы поглощения практически совпадает с максимумом люминесценции, поэтому в первой работе по реализации эрбиевого волоконного лазера с накачкой в оболочку использовалась волноводная структура с малым диаметром внутренней оболочки, позволяющим добиться высокой степени инверсии. Диаметр внутренней оболочки составил 22 мкм, числовая апертура равнялась 0.18. При мощности накачки 900 мВт ( $\lambda = 980$  нм) была получена лазерная генерация мощностью 300 мВт на длине волны 1540 нм. дифференциальная эффективность составила 40 %.

Понятно, что выходная мощность в данном случае ограничивается возможностями ввода мощности накачки во внутреннюю оболочку малого размера. В то же время, как видно из рис.3.13, в спектральной области 1.56 -1.6 мкм (L-полоса) люминесценция доминирует над поглощением. Это позволяет снизить требования к степени инверсии населенности и использовать активные световоды с большим размером внутренней оболочки, и, следовательно, применять более мощные источники накачки. Этот подход был реализован в работе, в которой использовался активный световод с диаметром внутренней оболочки 50 мкм, что позволило получить усиленный сигнал в L-полосе

мощностью 1 Вт. Можно предположить, что такие световоды могут быть использованы и для создания лазеров, излучающих в этом спектральном диапазоне.

Для получения лазерной генерации в диапазоне 1.53 — 1.6 мкм чаще всего используют волоконные световоды, легированные одновременно ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ . В таких световодах эффективное поглощение накачки на длине волны 976 нм обеспечивается ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , которые передают энергию возбуждения ионам  $\text{Er}^{3+}$ . Такая передача оказывается возможной благодаря близости энергетических уровней  ${}^2F_{5/2}$  ионов иттербия и  ${}^4I_{11/2}$  - ионов эрбия. Одной из проблем реализации такого световода является выбор и воспроизведение правильного химического состава сердцевины. Так, для того чтобы снизить вероятность обратной передачи энергии, необходимо уменьшить время жизни ионов  $\text{Er}^{3+}$  на возбужденном уровне  ${}^4I_{11/2}$ , что достигается использованием фосфоросиликатного стекла для материала сердцевины. Кроме того, важным является выбор соотношения концентраций активных ионов. Показано, что максимальная эффективность лазерной генерации (около 50 %) достигается в случае, когда концентрация ионов иттербия превышает концентрацию ионов эрбия в 30 раз.

В настоящее время компанией IPG промышленным образом выпускаются волоконные лазеры с длиной волны излучения в диапазоне 1.53-1.62 мкм и выходной мощностью более 100 Вт. Отметим также, что волоконные световоды, легированные ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , используются для создания мощных одночастотных волоконных лазеров. Так, был реализован лазер с шириной линии излучения менее 30 кГц и выходной мощностью более 5 Вт (при мощности накачки 25 Вт).

#### 4 ВКР – лазеры

Созданные волоконные лазеры на основе световодов, легированных ионами редкоземельных элементов, излучают лишь в определенных спектральных областях, не заполняющих весь ближний ИК диапазон. Использование ВКР (вынужденного комбинационного рассеяния) в волоконных световодах позволяет

создавать эффективные преобразователи длины волны излучения лазерных источников и получать лазерную генерацию практически на любой длине волны ближнего ИК диапазона. При этом конфигурация ВКР-лазера и характеристики световода, используемого для преобразования, зависят от длины волны излучения накачки и заданной длины волны излучения конвертера. В качестве источника накачки предпочтительнее использовать иттербиевый волоконный лазер вследствие высокой эффективности генерации, а также достаточно широкого спектрального диапазона, в котором она достигается.

В данном разделе рассматриваются различные типы лазеров, реализованных и исследованных в НЦВО.

#### 4.1 Однокаскадные ВКР – лазеры

Простейшим типом ВКР-лазера являются устройства, использующие лишь один каскад преобразования. Световод с сердцевинной на основе германо-силикатного стекла ( $\Delta v_{st} = 440 - 480 \text{ см}^{-1}$ ) преобразует излучение иттербиевого волоконного лазера в излучение с длиной волны в области 1.1-1.22 мкм.

Для экспериментальной реализации была выбрана конфигурация, позволяющая преобразовать излучение иттербиевого лазера с длиной волны 1.09 мкм в излучение на  $\lambda = 1.15 \text{ мкм}$ . В качестве активной среды ВКР-лазера использовался стандартный волоконный световод «Flexcore-1060» со следующими параметрами: оптические потери - 0.8 дБ/км на  $\lambda = 1.06 \text{ мкм}$ , коэффициент ВКР-усиления в области 1.15 мкм -  $5.5 \pm 0.5 \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1} \text{Вт}^{-1}$ . Длина используемого световода составила 500 м, коэффициент отражения выходной брэгговской решетки  $R = 20 \%$ . На рис.4.1 представлена экспериментальная зависимость выходной мощности конвертера от выходной мощности иттербиевого лазера при длине световода 500 м. Здесь же приведена теоретическая зависимость, рассчитанная на основе модели, описанной в разд.2.5. Из рис.4.1 следует, что эффективность преобразования излучения волоконного лазера превышает 70%.

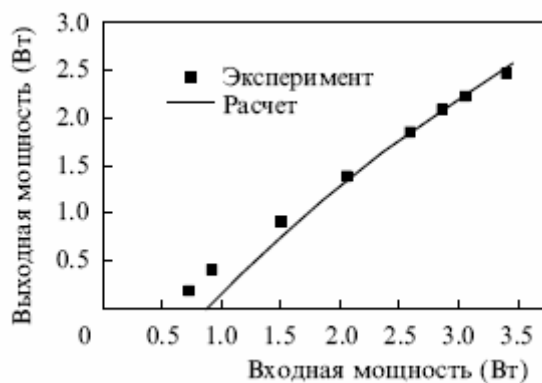


Рисунок 4.1 - Зависимость выходной мощности однокаскадного ВКР – конвертера на основе германосиликатного световода от мощности иттербиевого лазера

Волоконные световоды с сердцевиной на основе фосфоросиликатного стекла характеризуются наличием дополнительного пика комбинационного рассеяния с максимумом в области  $1330 \text{ см}^{-1}$ . Как правило, такие световоды имеют молярное содержание оксида фосфора 13-15% и оптические потери - 1.8 дБ/км на длине волны 1.06 мкм, спадающие примерно до 1 дБ/км в области 1.5 мкм. Поэтому однокаскадные ВКР-преобразователи излучения иттербиевого волоконного лазера на основе таких световодов позволяют получать излучение с длиной волны в области 1.22-1.35 мкм. При использовании в качестве источника накачки неодимового волоконного лазера возможно реализовать ВКР-лазеры с длиной волны излучения в области 1.24 мкм с эффективностью преобразования около 70%. На рис.4.2 показана зависимость выходной мощности ВКР-лазера на длине волны 1234 нм от мощности волоконного лазера, излучающего на длине волны 1060 нм. Спектр излучения ВКР-лазера представлен на вставке к рис.4.2. Особенностью реализованной схемы являлось то, что брэгговские решетки, формирующие резонатор ВКР-лазера, записывались непосредственно в фосфоросиликатном световоде. Это позволило снизить внутрирезонаторные потери и увеличить эффективность преобразования.

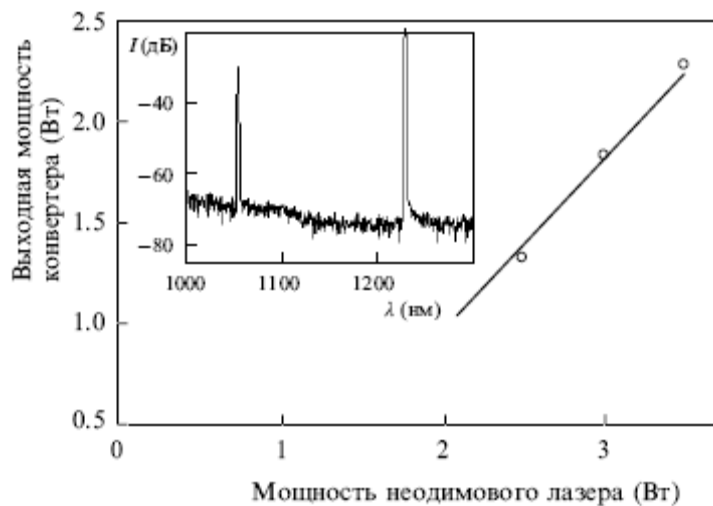


Рисунок 4.2 - Зависимость выходной мощности однокаскадного ВКР – лазера от мощности накачки на входе в фосфоросиликатный световод. На вставке представлен спектр излучения на выходе ВКР-лазера.

Значительный интерес представляет создание ВКР-лазеров на основе волоконных световодов с исключительно высокой (более 50%) концентрацией  $\text{GeO}_2$  в сердцевине. В этом случае за счет более высокой нелинейности германатного стекла, чем плавленого кварца, и малого диаметра сердцевины световода удастся получать коэффициенты ВКР-усиления, составляющие сотни  $\text{дБ} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , что позволяет существенно уменьшить длину активной среды ВКР-лазера. Так был продемонстрирован ВКР-лазер на основе волоконного световода с молярной концентрацией двуокиси германия в сердцевине 75 % и коэффициентом ВКР-усиления, составляющим около  $300 \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Длина резонатора волоконного лазера составила всего 3 м. При этом эффективность преобразования излучения иттербиевого лазера ( $\lambda = 1.07 \text{ мкм}$ ) в излучение на длине волны 1.12 мкм составила 70%. Соответствующая зависимость выходной мощности ВКР-лазера от мощности накачки Yb-лазера представлена на рис.4.3.

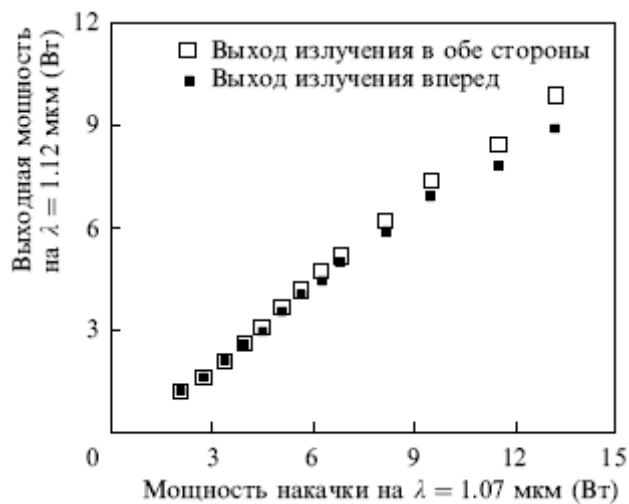


Рисунок 4.3 - Зависимость выходной мощности ВКР-лазера на основе германатного световода от мощности накачки.

#### 4.2. Многокаскадные ВКР-лазеры

Для получения излучения в спектральной области  $\lambda > 1.35$  мкм необходимо использовать многокаскадные ВКР-лазеры. Так, использование четырехкаскадного ВКР-преобразования в германосиликатном световоде позволяет генерировать излучение в диапазоне 1.35-1.45 мкм при накачке световода излучением иттербиевого волоконного лазера. Однако увеличение числа каскадов значительно усложняет схему лазера, т. к. растет число пар брэгговских решеток, резонансные длины волн которых должны выдерживаться с высокой точностью. Кроме того, брэгговские решетки вносят избыточные оптические потери (около 0.05 дБ на решетку), что снижает эффективность преобразования. Поэтому актуальным является поиск новых активных сред ВКР-лазера.

Существенный шаг вперед был сделан при использовании световода с фосфоросиликатной сердцевиной, в котором наблюдается усиление не только на частоте стоксова сдвига  $1330 \text{ см}^{-1}$ , но и на частоте со сдвигом  $440 \text{ см}^{-1}$ , соответствующим максимуму ВКР в чистом плавленом кварце, который является основным материалом световода. Таким образом, появилась возможность использования двух различных сдвигов в одном и том же волоконном световоде. Был реализован ВКР-лазер с длиной волны излучения 1407 нм, использующий

одно преобразование со сдвигом  $1330\text{ см}^{-1}$  и два преобразования со сдвигом  $440\text{ см}^{-1}$ . Максимальная мощность излучения на длине волны  $1407\text{ нм}$  составила  $1\text{ Вт}$ , эффективность преобразования- $25\%$ . Такая же конфигурация была использована для создания лазера с длиной волны  $1430\text{ нм}$  и максимальной выходной мощностью  $1.3\text{ Вт}$  (рис. 4.4).

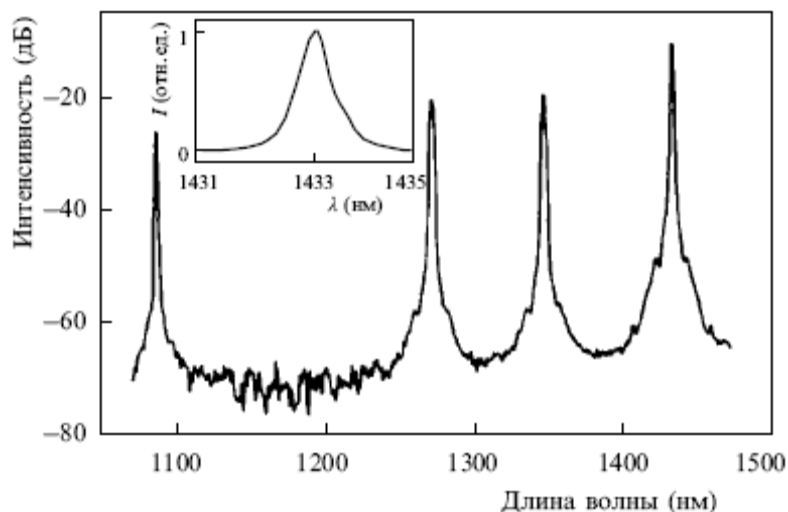


Рисунок 4.4 - Спектр излучения ВКР-лазера на основе фосфоросиликатного световода с использованием стоксовых сдвигов  $440$  и  $1330\text{ см}^{-1}$ .

Особый интерес вызывают ВКР-лазеры, излучающие в диапазоне  $1.45 - 1.6\text{ мкм}$ , соответствующем спектральной области, которая широко используется для волоконно-оптической связи. В частности, такие лазеры могут применяться для накачки ВКР- и эрбиевых усилителей.

Наиболее просто лазеры данного диапазона реализуются на основе фосфоросиликатного световода при двухкаскадном преобразовании частоты. Проведен теоретический анализ зависимости эффективности такого лазера от мощности накачки, длины используемого волоконного световода и коэффициента отражения выходной брэгговской решетки. Для расчета использовались параметры фосфоросиликатного волоконного световода с концентрацией  $\text{P}_2\text{O}_5$ , составляющей  $13\%$ . Использовалась исходная длина волны  $1061\text{ нм}$  и конечная -  $1480\text{ нм}$ . Оптические потери фосфоросиликатного световода составили  $1.55$ ,  $0.92$  и  $0.75\text{ дБ/км}$  на длинах волн  $1061$ ,  $1240$  и  $1480\text{ нм}$  соответственно. Коэффициенты уси-

ления составили  $5.5$  и  $4$  дБ\*км<sup>-1</sup>Вт<sup>-1</sup> на длинах волн  $1240$  и  $1480$  нм. Кроме того, при расчете учитывались внутрирезонаторные потери, обусловленные сваркой фосфоросиликатного световода со световодом, на котором записывались брэгговские решетки, а также дополнительным рассеянием на решетках. В сумме эти дополнительные потери оценивались в  $8\%$ . Результаты расчета отражены на рис.4.5.

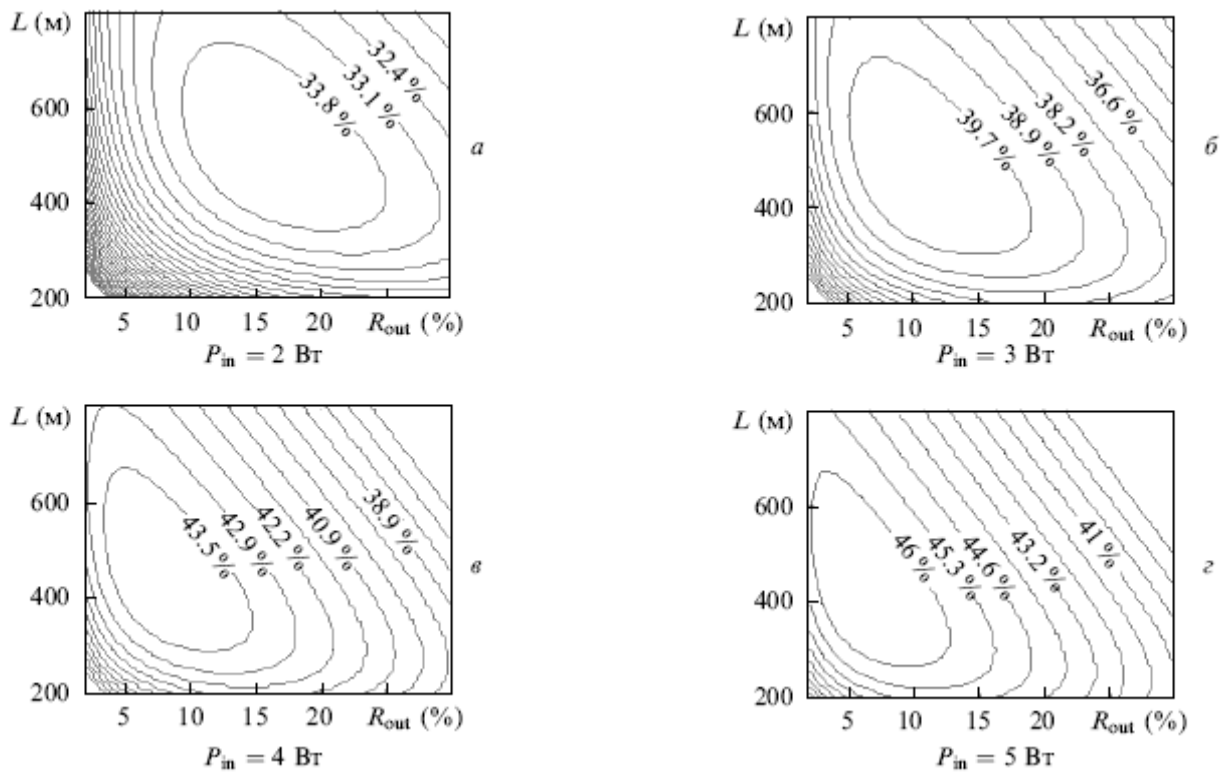


Рисунок 4.5 - Зависимости коэффициента преобразования (в %) двухкаскадного ВКР-лазера от длины  $L$  используемого фосфоросиликатного световода и коэффициента отражения  $R_{out}$  выходной решетки для различных значений введенной мощности накачки  $P_{in}$ .

На рис.4.6 показаны экспериментальные и расчетные зависимости выходной мощности ВКР-лазера от введенной мощности иттербиевого лазера.

Для повышения эффективности ВКР-конвертера брэгговские решетки записывались непосредственно в фосфоросиликатном световоде, что позволило снизить внутрирезонаторные потери, при этом эффективность преобразования конвертера составила  $45\%$ .



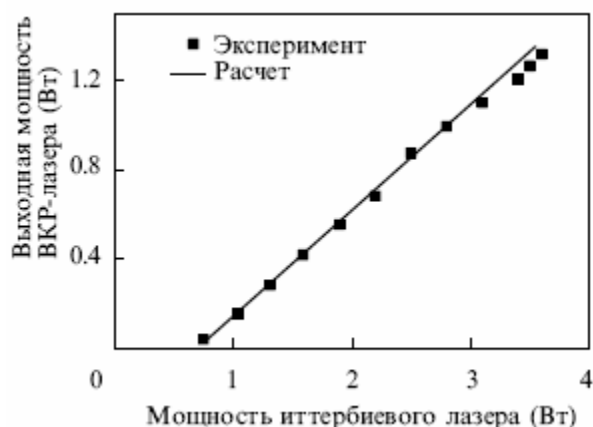


Рисунок 4.6 - Зависимость выходной мощности двухкаскадного ВКР-лазера на основе фосфоросиликатного световода ( $\lambda = 1480$  нм) от введенной мощности иттербиевого лазера  $P_{in}$  ( $\lambda = 1061$  нм).

### 4.3. Составные ВКР-лазеры

Длинноволновая граница эффективного преобразования устройств, описанных в разд.4.2., составляет 1.6 мкм. В случае ВКР-лазеров она определяется конфигурацией, основанной на двухкаскадном ВКР-преобразовании в фосфоросиликатном волоконном световоде, и длинноволновым краем генерации иттербиевых волоконных лазеров (1.12 мкм), где эффективность лазера превышает 60 %. В то же время, спектральный диапазон в области 1.6-1.8 мкм также представляет интерес для ряда применений.

Для генерации излучения в этой области можно использовать ВКР-лазер на основе фосфоросиликатного волоконного световода с двумя сдвигами частоты на  $1330 \text{ см}^{-1}$ , обусловленными компонентой  $P_2O_5$ , и одним сдвигом на  $440 \text{ см}^{-1}$ , обусловленным кварцевым стеклом. К сожалению, фосфоросиликатные волоконные световоды в настоящее время имеют значительно большие оптические потери, чем световоды на основе германосиликатного стекла (0.8 - 1 дБ/км против 0.2 дБ/км в области 1.5 мкм). При дальнейшем увеличении длины волны оптические потери в фосфоросиликатных волоконных световодах из-за влияния

края фононного поглощения растут быстрее, чем потери в германо-силикатных световодах. Поэтому схема с одновременным использованием стоксовых сдвигов, обусловленных фосфорной и кварцевой составляющими материала световода, выглядит неперспективной. В то же время, в германо-силикатных световодах потери растут существенно медленнее, и в телекоммуникационных волоконных световодах они в этой спектральной области составляют около 0.25 дБ/км.

Использование волоконных световодов на основе германо-силикатного стекла в качестве активной среды требует использования семикаскадного преобразования для получения излучения с длиной волны более 1.6 мкм. Такая схема сложна в изготовлении и малоэффективна из-за высокой общей пороговой мощности накачки, поэтому было предложено использовать составной ВКР-лазер, схема которого представлена на рис. 4.7.

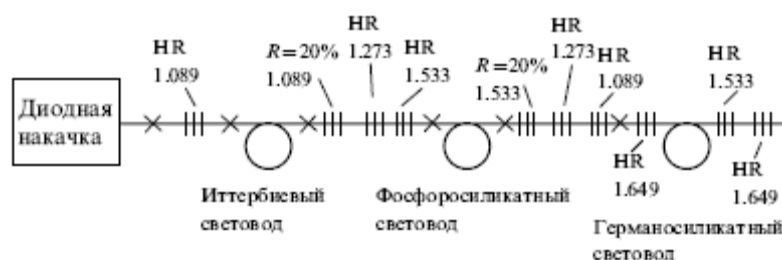


Рисунок 4.7 - Схема составного ВКР-лазера. Крестиками показаны точки сварки, около каждой решетки указана резонансная длина волны (в мкм).

Лазер состоит из двух частей: двухкаскадного конвертера на основе фосфоросиликатного световода и однокаскадного преобразователя на германо-силикатном световоде. Первая часть преобразователя позволяет получить выходное излучение на длине волны 1533 нм, вторая - на 1649 нм. Максимальная мощность излучения на  $\lambda = 1533$  нм составила 2.07 Вт при мощности полупроводникового лазера накачки 8 Вт. В качестве активной среды второй стадии использовался стандартный телекоммуникационный световод со смещенной в область 1.55 мкм длиной волны нулевой хроматической дисперсии; оптические потери в нем равнялись 0.2 и 0.25 дБ/км на длинах волн 1533 и 1649 нм

соответственно. Коэффициент усиления слабого сигнала на длине волны 1649 нм составил  $2.2 \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Измерение коэффициента усиления проводилось с помощью полупроводникового лазера, излучающего в данном спектральном диапазоне. На рис.4.8 показана мощностная характеристика ВКР-лазера на длине волны 1649 нм.

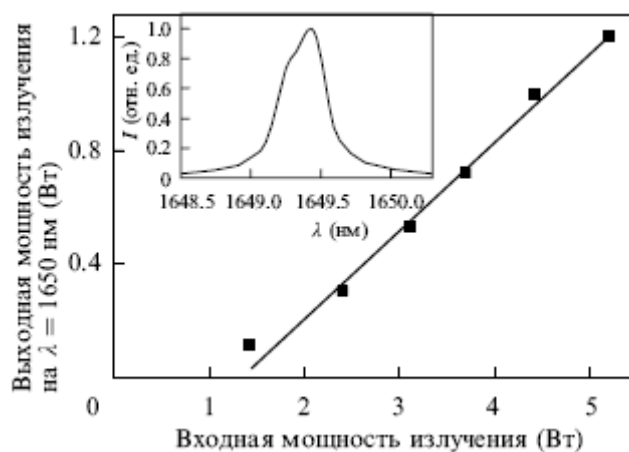


Рисунок 4.8 - Зависимость выходной мощности составного ВКР-лазера от мощности иттербиевого лазера на длине волны 1089 нм. На вставке - спектр излучения составного лазера.

Несмотря на невысокий коэффициент усиления, коэффициент преобразования излучения на длине волны 1533 нм в излучение на длине волны 1649 нм составил 63 %, дифференциальная эффективность преобразования излучения иттербиевого волоконного лазера ( $\lambda = 1089 \text{ нм}$ ) - 32 %, ширина линии излучения ВКР-лазера - 0.35 нм (рис.4.8).

Отметим, что использование составной конфигурации позволяет реализовать источники, перекрывающие спектральный диапазон 1.6-1.75 мкм. При этом ожидается получение примерно такой же выходной мощности, поскольку необходимая длина волны излучения иттербиевого лазера в этом случае попадает в диапазон 1.07 -1.12 мкм, где его эффективность изменяется незначительно.

Для получения лазерного излучения в области длин волн вблизи 2 мкм и длиннее необходимо использовать волоконные световоды на основе  $GeO_2$ . Стекло на основе двуокиси германия имеет минимум оптических потерь вблизи 2 мкм, при этом значение поперечного сечения комбинационного рассеяния превышает соответствующее значение для кварцевого стекла в 10 раз. Кроме того, германатное стекло имеет высокую фоточувствительность, что позволяет записывать брэгговские решетки в световоде без насыщения его водородом.

Реализован четырехкаскадный ВКР-лазер (ВКР-лазер 1) на основе германатного световода, генерирующий излучение на длине волны 2.06 мкм. В качестве источника его накачки применялся двухкаскадный ВКР-лазер на основе фосфоросиликатного волоконного световода с выходной длиной волны 1472 нм, который, в свою очередь, накачивался излучением волоконного Yb-лазера ( $\lambda = 1057$  нм). Схема ВКР-лазера показана на рис.4.9, а на рис.4.10 приведен спектр его выходного излучения.

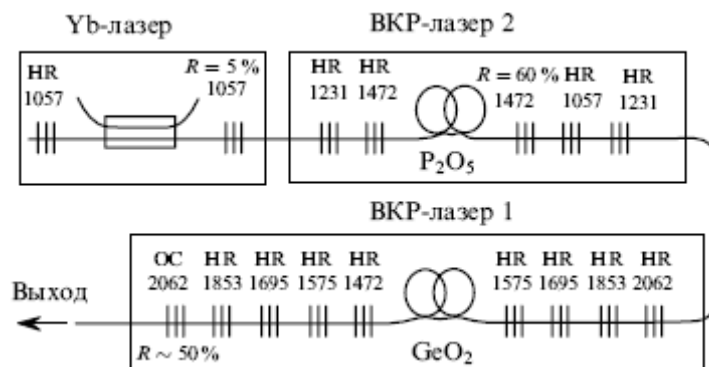


Рисунок 4.9 - . Схема четырехкаскадного волоконного ВКР-лазера с длиной волны 2.06 мкм; ОС - выходное зеркало. Около каждой решетки указана резонансная длина волны (в нм).

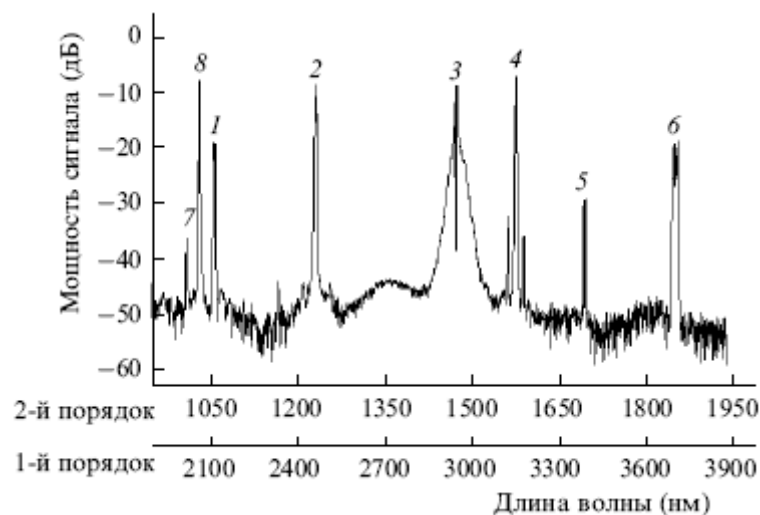


Рисунок 4.10 - Спектр излучения на выходе четырехкаскадного ВКР-лазера: 1 - излучение накачки иттербиевого лазера (1057 нм); 2,3- излучение с двух каскадов фосфоросиликатного ВКР-лазера 2 (1231 и 1472 нм); 4,5,6 - излучение с первых трех каскадов четырехкаскадного ВКР-лазера 1 (1575, 1695 и 1853 нм); 7 - излучение на максимуме ВКР-усиления (2017 нм), соответствующем частотному сдвигу  $440 \text{ см}^{-1}$  от 1853 нм; 8 - излучение с четвертого каскада ВКР-лазера 1 (2062 нм).

## ВЫВОДЫ

Из приведенного обзора работ следует, что на основе волоконных световодов, легированных различными редкоземельными примесями, созданы волоконные лазеры с длинами волн излучения в различных спектральных областях. Так, лазеры на основе световодов, легированных ионами  $\text{Nd}^{3+}$ , излучают в области 0.92 и 1.06 мкм, ионами  $\text{Yb}^{3+}$  - в 0.98-1.15 мкм, ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$  - в 1.53-1.6 мкм, ионами  $\text{Tm}^{3+}$  - в 1.85-2 мкм, ионами  $\text{Ho}^{3+}$  - в 2-2.1 мкм. Для реализации лазеров средней мощности необходимо использовать накачку их в оболочку. При этом световодная структура для излучения накачки может быть образована кварцевым стеклом и полимером, кварцевыми стеклами различного состава, также может использоваться микроструктурированная оболочка.

Применение фотоиндуцированных брэгговских волоконных решеток в качестве отражателей света позволило существенно упростить схему лазера; отметим возможность использования и многомодовых решеток.

ВКР-лазеры на основе волоконных световодов различного состава и брэгговских решеток используются для преобразования излучения волоконных лазеров в излучение с любой длиной волны в спектральной области 1.15-1.65 мкм. При этом эффективность преобразования составляет 30 % - 70 % в зависимости от числа каскадов преобразования. Использование германатного волоконного световода позволяет расширить эту спектральную область до 2 мкм.

Таким образом, рассмотренные конфигурации волоконно-оптических лазеров позволяют получать излучение средней мощности на любой длине волны в спектральном диапазоне 0.9-2 мкм, перекрывая практически весь ближний ИК диапазон.[1].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Дианов. Курков. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности, ИЦВО РАН, г. Москва, [www. gpi.ru](http://www.gpi.ru)
- 2 Волоконные лазеры и волоконная оптика, Internet.
- 3 Optical fiber. Fundamentals, Internet.
- 4 Fundamentals of Fiber Lasers and Amplifiers, Rüdiger Paschotta, RP Photonics Consulting GmbH, Zürich, Switzerland. Winter College on Fibre Optics, Fibre Lasers and Sensors, Trieste, February 2007. [www.rp-photonics.com](http://www.rp-photonics.com).
- 5 Е.М.Дианов,А.С.Курков, Волоконная оптика, ИЦВО РАН, г. Москва, [www. gpi.ru](http://www.gpi.ru)
- 6 Физическая энциклопедия, т. 5, гл. ред. А.М.Прохоров. – М.:Российская энциклопедия, 1998.
- 7 High Power Fibre Lasers and Amplifiers, Andy Clarkson, Optoelectronics Research Centre University of Southampton, United Kingdom. Winter College on Fibre Optics, Fibre Lasers and Sensors, Trieste, February 2007. [www.rp-photonics.com](http://www.rp-photonics.com).
- 8 В.А. Малышев, Основы квантовой электроники и лазерной техники. – М.:Высш. шк., 2005. – 543с.:ил.