

Непрерывные волоконные лазеры средней мощности

А.С.Курков, Е.М.Дианов

Проведен обзор результатов, полученных в области создания и исследования непрерывных волоконных лазеров средней мощности ($P \sim 10^{-1} - 10^2$ Вт). Рассмотрены свойства волоконных световодов, легированных ионами ряда редкоземельных элементов, и способы изготовления световодов с двойной оболочкой, а также методы формирования и свойства внутриволоконных брэгговских решеток, используемых в качестве селективных отражателей. Приведены основные схемы накачки лазеров на основе активных световодов с двойной оболочкой. Также описаны характеристики волоконных лазеров на основе световодов, активированных ионами неодима, иттербия, эрбия, тулия и гольмия. Рассмотрены принципы построения ВКР-конвертеров лазерного излучения на основе волоконных световодов различного состава. Приведены основные результаты исследований таких устройств. Сделан вывод о том, что описанные конфигурации волоконных лазеров позволяют получать излучение средней мощности на любой длине волны в спектральном диапазоне 0.9–2 мкм.

Ключевые слова: волоконный лазер, активные световоды, вынужденное комбинационное рассеяние.

	Содержание
1. Введение	881
2. Элементы волоконного лазера	883
2.1. Активные добавки волоконных световодов	
2.2. Фотоиндуцированные решетки показателя преломления	
2.3. Активные волоконные световоды	
2.4. Схемы накачки активных световодов	
2.5. Особенности волоконных световодов как усилительной среды	
3. Построение ВКР-лазеров	888
4. Характеристики волоконных лазеров	889
4.1. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Nd^{3+}	
4.2. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Yb^{3+}	
4.3. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Er^{3+}	
4.4. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Tm^{3+}	
4.5. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Ho^{3+}	
5. Волоконные ВКР-лазеры	895
5.1. Однокаскадные ВКР-лазеры	
5.2. Многокаскадные ВКР-лазеры	
5.3. Составные ВКР-лазеры	
6. Выводы	899
7. Литература	899

1. Введение

Волоконные лазеры являются одним из наиболее ярких достижений современной квантовой электроники. Это направление возникло на стыке лазерной физики и волоконной оптики. Существует ряд преимуществ волоконных лазеров по сравнению с традиционными квантовыми излучателями, которые позволяют им использо-

ваться наравне с обычными лазерами, а в некоторых случаях и заменить их. Следует отметить, что в начале своего развития основной задачей волоконной оптики представлялось создание волоконных световодов как пассивной среды для передачи информации. Однако, как и в любой другой развивающейся области науки, в процессе решения первоначальной задачи проявились другие возможности волоконной оптики, которые привели к расширению круга изучаемых объектов и явлений и, в свою очередь, расширили область возможных применений волоконных световодов и устройств на их основе.

Отдельным направлением волоконной оптики является разработка и исследование волоконных лазеров. В этих устройствах в качестве активной среды использу-

А.С.Курков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступил в редакцию 15 апреля 2004 г.

ются волоконные световоды, легированные различными добавками, прежде всего редкоземельными элементами. Следует отметить, что впервые волоконный лазер был создан Снитцером в 1961 г., когда была продемонстрирована лазерная генерация в стекле, легированном ионами Nd^{3+} [1]. Активный элемент лазера представлял собой стеклянную нить, покрытую оболочкой из стекла с пониженным показателем преломления. Развитие технологии получения волоконных световодов и полупроводниковых источников накачки позволило вернуться к идее волоконного лазера на качественно новом уровне. Начало бурного развития этого направления относится к концу 80-х гг. прошлого века, когда было показано, что волоконные световоды, легированные ионами Er^{3+} , могут найти применение в волоконных усилителях сигнала на длинах волн в диапазоне 1.53–1.56 мкм [2], т. е. в спектральной области минимальных оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла. Исследования в области волоконно-оптических усилителей послужили толчком для создания мощных полупроводниковых источников накачки. Открытие фоторефрактивного эффекта в световодах [3] и разработка методики записи внутриволоконных брэгговских отражающих решеток [4] позволили формировать брэгговские зеркала, образующие резонатор непосредственно в волоконных световодах, и реализовать широкий набор лазерных конфигураций в чисто волоконном исполнении. Все это привело к бурному развитию волоконных лазеров.

Следует отметить, что понятие «волоконные лазеры» охватывает чрезвычайно широкий круг лазерных конфигураций, характеризующихся различными масштабами выходной мощности, а также спектральными и временными характеристиками выходного излучения. В настоящей работе мы рассматриваем непрерывные волоконные лазеры, которые в последние годы привлекают большое внимание благодаря широкому кругу как реализованных, так и потенциальных применений.

Классификация волоконных лазеров по уровням выходной мощности выглядит достаточно условной, отражая в то же время особенности схемы построения лазера. Так, лазеры малой выходной мощности используют накачку в сердцевину световода. Это накладывает ограничения на характеристики полупроводникового источника накачки, который должен иметь характерный размер излучающей области 5–10 мкм. При этом мощность накачки не превышает сотен милливатт, поэтому характерная выходная мощность таких лазеров находится в диапазоне 10^{-1} – 10^2 мВт. Среди этих устройств можно выделить волоконные лазеры, излучающие в одной продольной моде с шириной линии около 20 кГц [5, 6]. К областям применения маломощных волоконных лазеров следует отнести их использование в качестве источников сигнала в оптических системах связи и в волоконных датчиках, а также в спектроскопии.

Разработка мощных полупроводниковых источников с широкой излучающей областью позволила приступить к созданию непрерывных волоконных лазеров средней мощности – от сотен милливатт до десятков ватт. В основе таких устройств лежат волоконные световоды с двойной оболочкой и сердцевиной, легированной активной примесью. Обычно в лазерах средней мощности в качестве отражателей используются брэгговские решетки, при этом объемные элементы в схеме лазера отсутствуют и нелинейно-оптические явления в резонаторе, как пра-

вило, не возникают. В таких лазерах не требуется использовать специальные меры для предотвращения лучевого пробоя материала световода. Условная верхняя граница выходной мощности подобных устройств составляет несколько десятков ватт в одной поперечной моде.

Отметим, что выходной мощности, превышающей 1 Вт, оказывается вполне достаточно для возбуждения в волоконных световодах вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), что позволяет с высокой эффективностью преобразовать излучение волоконного лазера в излучение на другой длине волны [7]. Волоконные лазеры и ВКР-конвертеры средней мощности используются в качестве источников накачки эрбиевых и ВКР-усилителей оптического сигнала для различных спектральных диапазонов. Кроме того, они могут использоваться в медицине, обработке материалов, оптической локации, системах наведения и беспроводной оптической связи. Следует отметить, что столь широкий круг различных применений во многом определяется возможностью использования различных редкоземельных добавок в сочетании с ВКР-конвертерами, что позволяет создавать волоконные источники, излучающие практически на любой длине волны в спектральном диапазоне 0.9–2 мкм.

В последние несколько лет интенсивно развивается направление, связанное с мощными волоконными лазерами. Выходная мощность излучения этих устройств превышает 100 Вт в одной поперечной моде [8–11] и 1 кВт в многомодовом режиме [12, 13]. Особенностью их конструкции является использование в качестве отражателей объемных зеркал, что подразумевает необходимость юстировки таких лазеров. Естественно, в этом случае теряется ряд преимуществ полностью волоконной конструкции, в которой соединения всех элементов осуществляются путем стандартной процедуры сваривания световодов. Кроме того, активные световоды, используемые в мощных одномодовых лазерах, имеют достаточно большой диаметр сердцевины (до 30 мкм), что затрудняет их стыковку с коммерчески доступными волоконными световодами. Мощные многомодовые лазеры представляют собой набор одномодовых волоконных лазеров, собранных в единый жгут. Основные применения мощных лазеров – это обработка материалов и медицина.

Таким образом, волоконные лазеры, развитие которых было вызвано потребностями волоконно-оптической связи, начинают приобретать и самостоятельное значение. Это позволяет выделить разработку и исследование таких устройств в самостоятельное направление квантовой электроники и волоконной оптики. Тот факт, что данные волоконные лазеры уже имеют широкий круг применений, который может быть еще существенно расширен, делает актуальными исследования в этой области.

В настоящей работе проводится обзор основных результатов в области разработки и исследования непрерывных волоконных источников средней мощности. Их схема представляется устоявшейся, она сочетает все преимущества цельноволокнистой конструкции. Именно такие лазеры в настоящее время находят наибольшее применение. Нами рассматриваются свойства активных сред непрерывных волоконных источников средней мощности, построение лазеров и организация накачки, а также ВКР-лазеры, использующие в качестве активной среды

волоконные световоды с различным химическим составом сердцевины.

2. Элементы волоконного лазера

На рис.1 представлена простейшая конфигурация волоконного лазера с торцевой накачкой, состоящего из полупроводникового источника накачки с волоконным выходом, отрезка волоконного световода, легированного активными ионами, и двух брэгговских решеток (другие способы накачки будут рассмотрены ниже). Входная брэгговская решетка обычно имеет коэффициент отражения, близкий к единице на длине волны генерации, а необходимый коэффициент отражения выходной решетки определяется величиной усиления и оптических потерь излучения в активном световоде. Брэгговские решетки могут быть записаны как непосредственно в активном световоде, так и в отрезках фоточувствительного световода, которые привариваются к активному. Рассмотрим отдельные элементы, составляющие волоконный лазер, и их свойства.

2.1. 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 дстройка 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 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 табл.1. Там же содержатся данные об области люминесценции этих активных ионов. 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 табл.1, и используемые оптические переходы представлены на рис.2.

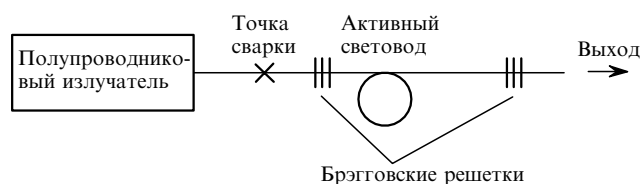


Рис.1. Простейшая конфигурация волоконного лазера.

Табл.1. Редкоземельные элементы, используемые для создания активных волоконных световодов, и спектральные области их люминесценции.

Активный ион	Область люминесценции (мкм)
Nd ³⁺	0.92–0.94
	1.05–1.1
	1.34
Ho ³⁺	1.9–2.1
Er ³⁺	1.53–1.6
Tm ³⁺	1.7–1.9
Yb ³⁺	0.98–1.16

Неодим (Nd³⁺). 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} → 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 [14].

Реализация волоконных лазеров с использованием оптического перехода ⁴F_{3/2} → ⁴I_{9/2} (λ ~ 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} → 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 [15].

Гольмий (Ho³⁺). Как было показано в работе [16], энергетическая схема Ho³⁺ имеет лазерный переход ⁵J₇ → ⁵J₈ с соответствующей длиной волны излучения в области 2 мкм. Время жизни на возбужденном уровне составляет около 0.5 мс. При этом гольмиевый лазер дол-

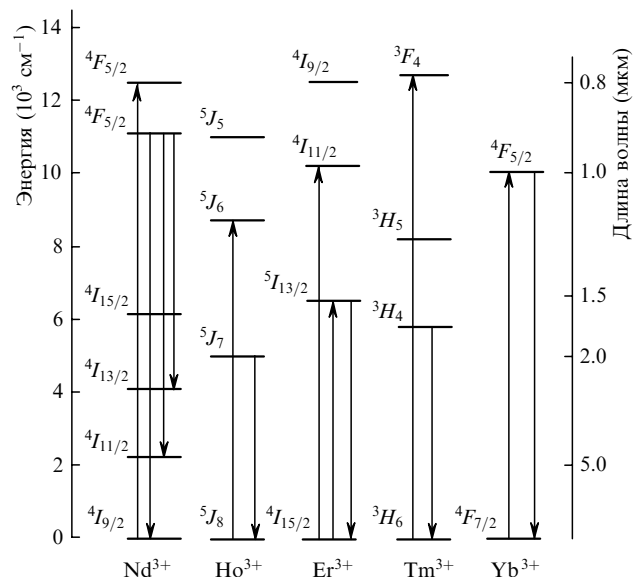


Рис.2. Схема энергетических уровней ионов ряда редкоземельных элементов.

жен 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 ${}^5J_8 \rightarrow {}^5J_5$, 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 ${}^5J_8 \rightarrow {}^5J_6$, позволяет рассчитывать на существенное улучшение характеристик гольмиевого волоконного лазера при накачке в эту полосу. Как будет показано ниже, это было осуществлено при использовании в качестве источника накачки иттербиевого волоконного лазера [17].

Эрбий (Er^{3+}). Ионы эрбия в кварцевом стекле обладают лазерным переходом ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, 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. Данные по свойствам волоконных световодов, легированных ионами Er^{3+} , сведены в несколько монографий, в частности [18, 19].

Тулий (Tm^{3+}). Возможность лазерной генерации в кварцевом стекле, легированном ионами тулия, была показана в работе [20]. В данном случае излучение связано с переходом ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$ при накачке в полосу, обусловленную переходом на уровень 3F_4 (~ 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. Лазерная генерация в волоконном световоде, легированном ионами Tm^{3+} , была впервые продемонстрирована в работе [21].

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 ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$, 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 алюмосиликат-

ного 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 [22, 23].

2.2. 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 сердцевинны световода под действием УФ излучения определенных длин волн. В настоящее время по этой проблеме опубликовано большое количество работ и монография [24]. 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 Λ , величина наведенного изменения показателя преломления δn , число штрихов N или длина решетки L . Две моды взаимодействуют на решетке с периодом Λ , если их постоянные распространения β_1 и β_2 удовлетворяют условию фазового синхронизма

$$\beta_2 - \beta_1 = \frac{2\pi m}{\Lambda}, \quad (1)$$

где m – целое число, характеризующее порядок решетки, в котором реализуется межмодовое взаимодействие. Связь основной моды с модой, имеющей противоположное направление распространения, возникает на определенной длине волны λ_{Br} , задаваемой соотношением

$$2n_{eff}\Lambda = \lambda_{Br}, \quad (2)$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления основной моды световода. В результате на длине волны λ_{Br} возникает отражение. Параметры решеток (спектральная ширина, коэффициент отражения) могут варьироваться в широких пределах в зависимости от условий записи и фоточувствительности световода. Коэффициент отражения R однородной брэгговской решетки длиной L определяется выражением [25]

$$R = th^2(kL), \quad (3)$$

где $k = \pi\eta\delta n/\lambda_{Br}$ – коэффициент связи; η – доля мощности излучения, распространяющегося по области, в которой наведено изменение показателя преломления. Спектральная ширина резонанса на полувысоте может быть выражена следующим соотношением [26]:

$$\Delta\lambda = \lambda\alpha \left[\left(\frac{\delta n}{2n} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где α – параметр, приблизительно равный единице для глубоких решеток ($R \sim 1$) и 0.5 для решеток небольшой глубины.

Поскольку период брэгговской решетки менее 1 мкм для отражения в ближней ИК области спектра, запись решетки производится в интерференционной картине УФ излучения. На рис.3 представлена схема записи решеток с использованием интерферометра Ллойда. Отметим, что такая схема требует высокой пространственной когерентности излучения и поэтому применяется, главным образом, с источником, использующим вторую гармонику аргонового лазера (длина волны излучения 244 нм).

Другой метод записи решеток основан на использовании фазовых масок [27]. В этом методе интерферируют первый и минус первый порядки дифракции излучения, прошедшего через кварцевую фазовую маску, рельеф которой выполнен таким образом, чтобы подавить нулевой и другие порядки дифракции. В данном методе требования к когерентности источника излучения не столь жесткие, что позволяет использовать эксимерные лазеры KrF (248 нм) и ArF (193 нм).

На рис.4 представлен типичный спектр пропускания брэгговской решетки с параметрами $L = 5$ мм, $\delta n = 8 \times 10^{-4}$, $\Lambda = 0.4$ мкм. Решетка обеспечивает коэффициент отражения $R \sim 0.99$ 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.

2.3. 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: MCVD (модифицированное химическое осаждение из газовой фазы) [28, 29], OVD (внешнее осаждение из газовой фазы) [30], VAD (аксиальное осаждение из газовой фазы) [31], осаждение с использованием плазмы PCVD и SPCVD [32, 33]. 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

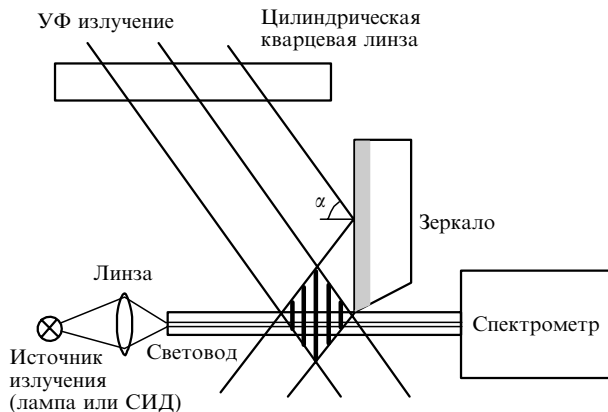


Рис.3. Схема записи решеток с использованием интерферометра Ллойда.

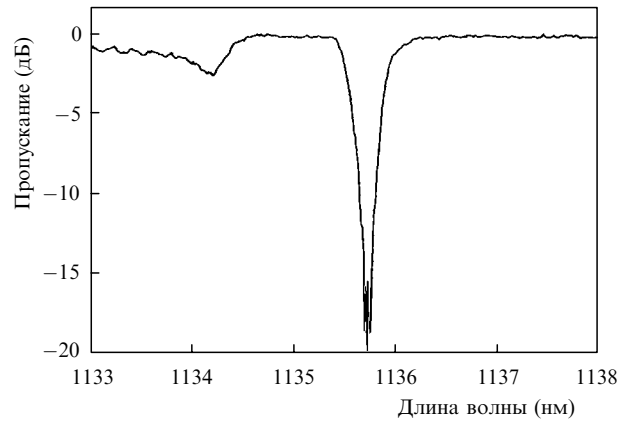


Рис.4. Типичный спектр пропускания брэгговской решетки с параметрами $L = 5$ мм, $\delta n = 8 \times 10^{-4}$.

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. 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.5 представлен спектр оптических потерь волоконного световода, легированного ионами Yb^{3+} с концентрацией $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [34]. 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 [35].

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

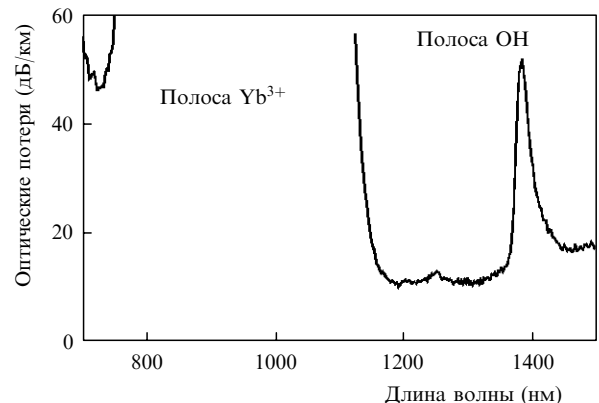


Рис.5. Спектр оптических потерь в сердцевине активного световода при концентрации ионов Yb^{3+} , равной $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

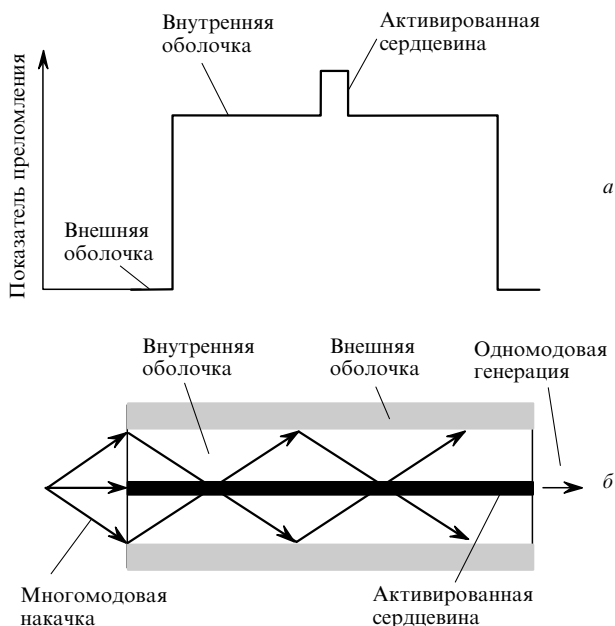


Рис.6. Модельный профиль преломления (а) и принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера (б).

профиль показателя преломления данных световодов представлен на рис.6,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 развиться в лазерную генерацию. При этом область генерации оказывается локализованной в одномодовой сердцевине, т. е. ее характерный поперечный размер составляет 5–10 мкм [36, 37]. Принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера иллюстрируется на рис.6,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).

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.

Для обеспечения эффективной связи мод внутренней оболочки с активированной сердцевиной необходимо использовать волоконные световоды с некруглой формой внутренней оболочки [38], поскольку в противном случае большая доля мощности распространяется в модах, не пересекающих область сердцевины. Для определения эффективности поглощения в оптических волокнах с различной геометрией внутренней оболочки в работе [34] 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 (125×100 мкм), прямоугольная (150×75 мкм), квадратная (125×125 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, 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%. D-образная форма выглядит наиболее простой для изготовления, поскольку требуется шлифовка 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, впервые

Табл.2. Влияние геометрии внутренней оболочки на эффективность поглощения излучения накачки в световоде, легированном ионами Yb^{3+} .

Геометрия оболочки	Поглощение на $\lambda = 978$ 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

реализованный в работе [39]. 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 [40], поперечное сечение которого представлено на рис.7. 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.

2.4. 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. 1). 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.

Две других схемы накачки используют принцип распределения вводимого излучения накачки по длине активного световода. Так, в работе [41] для ввода накачки предлагается использовать набор V-образных канавок, изготовленных на боковой поверхности световода. Принцип ввода накачки показан на рис.8. Несомненным достоинством такого способа является возможность добавления источников по длине активного световода по мере истощения мощности от предыдущего источника. К

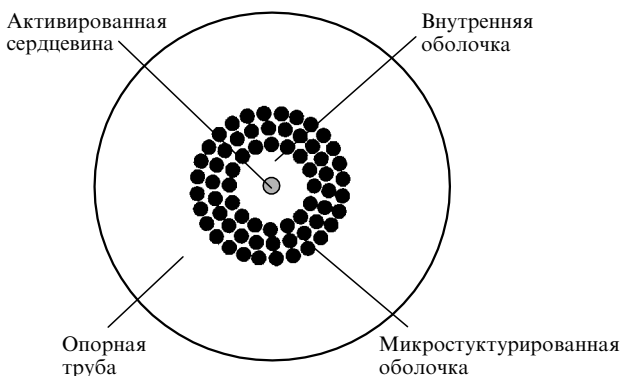


Рис.7. Схема волоконного световода с микроструктурированной оболочкой; черные кружки – воздушные промежутки.

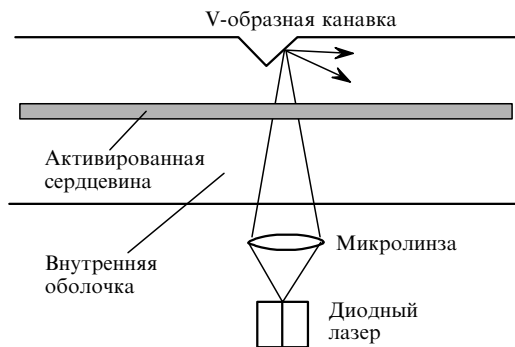


Рис.8. Схема накачки через V-образную канавку.

недостаткам следует отнести необходимость фиксации полупроводникового лазера относительно активного световода и защиты области ввода от внешних воздействий.

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 (GTW-световод). Один из световодов (активный) имеет сердцевину, легированную ионами иттербия, а второй (пассивный) – представляет собой волокно из высокочистого кварцевого стекла [42]. Соответствующая конфигурация представлена на рис.9. 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.9). 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

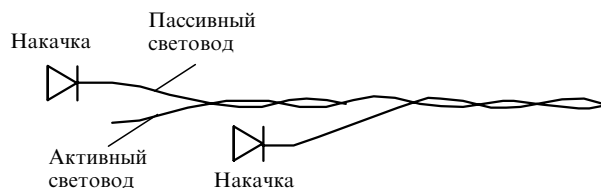


Рис.9. Схема накачки с использованием двойного световода.

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:

$$\frac{dP_s}{dz} = \chi_s [N_1 \sigma_e(\lambda_s) - N_0 \sigma_a(\lambda_s)] P_s - \alpha_s P_s, \quad (5)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\chi_p N_0 \sigma_a(\lambda_p) P_p - \alpha_p P_p, \quad (6)$$

где P_s и P_p , λ_s и λ_p – мощности и длины волн излучения сигнала и накачки соответственно; σ_a и σ_p – сечения поглощения и люминесценции; N_0 и N_1 – населенности основного и метастабильного уровней; α_s и α_p – коэффициенты нерезонансных потерь для сигнала и накачки; χ_s и χ_p – интеграл перекрытия полей излучения сигнала и накачки с активной областью,

$$\chi_{s,p} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} E_{s,p}(r) 2\pi r dr}{\int_0^{\infty} E_{s,p}(r) 2\pi r dr}, \quad (7)$$

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

В случае накачки в оболочку световода χ_p можно приблизительно оценить как

$$\chi_p \approx S_d / S_{cl}, \quad (8)$$

где S_d и S_{cl} – площади поперечного сечения легированной области и оболочки, по которой распространяется накачка. Подчеркнем, что 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 эквива-

лентно существенному уменьшению сечения поглощения на длине волны накачки.

3. Построение ВКР-лазеров

Волоконные ВКР-преобразователи, или ВКР-конвертеры, позволяют эффективно преобразовывать лазерное излучение накачки в излучение на более низких частотах (стоксово излучение), используя явление вынужденного комбинационного рассеяния света в волоконном световоде. Впервые ВКР лазерного излучения в стеклянном волоконном световоде наблюдалось в 1971 г. [43]. В эксперименте использовались стеклянные волоконные световоды с низкими оптическими потерями, разработанные незадолго до этого фирмой Корнинг Глас.

В случае непрерывной накачки начальный рост интенсивности стоксовой волны описывается соотношением

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s, \quad (9)$$

где I_s – интенсивность стоксовой волны; I_p – интенсивность волны накачки; g_R – коэффициент ВКР-усиления.

Специфика волоконных световодов как ВКР-среды заключается в относительно малом коэффициенте усиления. Так, для плавленного кварца, являющегося основным материалом световода, он составляет около 10^{-13} м/Вт [43]. Кроме того, количество применимых для волоконной оптики легирующих добавок, изменяющих спектр и коэффициент усиления ВКР, ограничивается технологическими возможностями и требованием сохранения низких оптических потерь. С другой стороны, волоконные световоды на основе кварцевого стекла обладают таким уникальным свойством, как большая длина взаимодействия, что позволяет снизить пороги получения ВКР. Само кварцевое стекло как некристаллический материал обладает широким спектром комбинационного рассеяния с максимумом вблизи 440 см^{-1} . Добавка GeO_2 с концентрациями, используемыми для производства волоконных световодов, слабо меняет форму спектра рассеяния. Соответствующий спектр, измеренный в световоде с сердцевиной из германосиликатного стекла, изображен на рис.10 (кривая 1) [44].

Если активную среду конвертера поместить в резонатор, образованный узкополосными отражателями, то мы получим ВКР-лазер. В первых работах по созданию

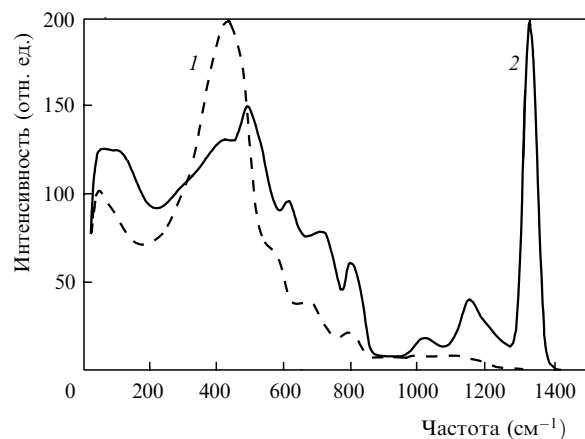


Рис.10. Спектр комбинационного рассеяния в германосиликатном (1) и фосфоросиликатном световодах (2).

ВКР-лазеров в качестве отражающих элементов использовались диэлектрические или металлические зеркала, напыленные на массивную подложку, которые делали конструкцию лазера достаточно громоздкой и требовали юстировки. Значительный прогресс в области разработки ВКР-лазеров был инициирован демонстрацией их применения в качестве источников накачки рамановских усилителей [45, 46]. Использование волоконных ответвителей и брэгговских решеток для получения обратной связи в резонаторе позволило существенно упростить конструкцию ВКР-лазера, сделать этот лазер приемлемым для практики и создать многокаскадные ВКР-преобразователи.

Еще более упростить конструкцию позволило предложение в [47] использовать в качестве активной среды ВКР-лазера световод с сердцевиной, легированной оксидом фосфора. Такой световод имеет стоксов сдвиг $\Delta\nu_{St}$, равный 1330 см^{-1} , что в три раза больше, чем у германо-силикатного световода (рис.10). Совершенствование характеристик фосфоросиликатных световодов позволило [48] изготавливать устройства, конкурирующие по эффективности с ВКР-лазерами на основе световодов с германо-силикатной сердцевиной, но имеющие менее сложную конструкцию в результате уменьшения количества каскадов преобразования и, следовательно, количества брэгговских решеток.

На рис.11 представлена упрощенная схема многокаскадного ВКР-лазера. При моделировании предполагается, что на длине волны накачки световод является одноимодовым. Кроме того, считается, что другие нелинейные эффекты, в частности вынужденное рассеяние Манделштама – Бриллюэна, не возбуждаются. Последнее приближение является справедливым в случае использования в качестве источника накачки волоконного лазера, имеющего достаточно широкую линию излучения. ВКР-лазер состоит из волоконного световода и набора брэгговских решеток с резонансными длинами волн, соответствующим стоксовым сдвигам в материале световода. При этом решетки, настроенные на промежуточные длины волн, имеют коэффициент отражения, близкий к 100 %.

Теоретическому анализу ВКР лазеров посвящен ряд работ [49 – 54]. Поведение многоступенчатого преобразователя можно описать следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \frac{dP_p^{f,b}}{dz} &= \mp \alpha_p P_p^{f,b} \mp \frac{v_p}{v_{s1}} \frac{g_R^1}{A_{eff}^1} (P_{s1}^f + P_{s1}^b) P_p^{f,b}, \\ \frac{dP_{sk}^{f,b}}{dz} &= \mp \alpha_{sk} P_{sk}^{f,b} \mp \frac{v_{sk}}{v_{sk+1}} \frac{g_R^{k+1}}{A_{eff}^{k+1}} (P_{sk+1}^f + P_{sk+1}^b) P_{sk}^{f,b} \\ &\quad \pm \frac{g_R^k}{A_{eff}^k} (P_{sk-1}^f + P_{sk-1}^b) P_{sk}^{f,b}, \end{aligned} \quad (10)$$

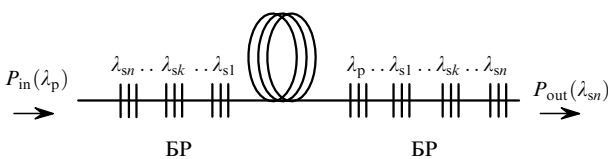


Рис.11. Упрощенная схема многокаскадного ВКР-преобразователя (P_{in} – входная мощность на длине волны накачки; P_{out} – выходная мощность сигнала на n -м каскаде преобразования; $k = 1, \dots, n$).

$$\frac{dP_{sn}^{f,b}}{dz} = \mp \alpha_{sn} P_{sn}^{f,b} \pm \frac{g_R^n}{A_{eff}^n} (P_{sn-1}^f + P_{sn-1}^b) P_{sn}^{f,b},$$

где P_p, P_{sk} – мощности накачки и сигнала на промежуточных частотах; P_{sn} – мощность сигнала на конечной длине волны; индексы f и b описывают волны, распространяющиеся в прямом и обратном направлении; v_p и v_{sk} – частоты накачки и сигнала; отношение v_p/v_{sk} учитывает разницу в энергии фотонов; α_p, α_{sk} – коэффициенты линейных потерь на длине волны накачки и сигнала; A_{eff} – эффективная площадь, занимаемая модой.

Следует отметить, что на практике измерение параметров g_R и A_{eff} с достаточной точностью представляется затруднительным. Поэтому для расчета можно воспользоваться довольно просто измеряемой интегральной характеристикой – коэффициентом усиления G используемого волоконного световода на заданной длине волны,

$$G = g_R/A_{eff}. \quad (11)$$

Численный расчет, основанный на приведенных выше соотношениях, используется для оптимизации параметров конвертера, которая сводится к выбору длины световода внутри устройства и коэффициента отражения выходной брэгговской решетки с резонансной длиной волны, соответствующей выходному сигналу для заданной мощности входного сигнала и параметров использованного волоконного световода.

4. Характеристики волоконных лазеров

В этом разделе рассматриваются характеристики реализованных волоконных лазеров на основе световодов, легированных различными редкоземельными элементами.

4.1. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Nd^{3+}

Волоконный лазер на основе световода, легированного ионами Nd^{3+} , излучающий в области 1.06 мкм, был первым лазером, который использовал накачку в оболочку [55]. 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, где отсутствует перепоглощение сигнала.

В течение нескольких лет после первой публикации выходная мощность неодимовых лазеров превысила 30 Вт [56]. На рис.12 представлены типичные (спектральная и мощностная) характеристики неодимового волоконного лазера [57] на основе световода с оболочкой размером 290×290 мкм и активированной сердцевиной диаметром 5 мкм. Для накачки использовалась диодная матрица с длиной волны излучения 0.81 мкм.

Заслуживает внимания работа [58], 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.

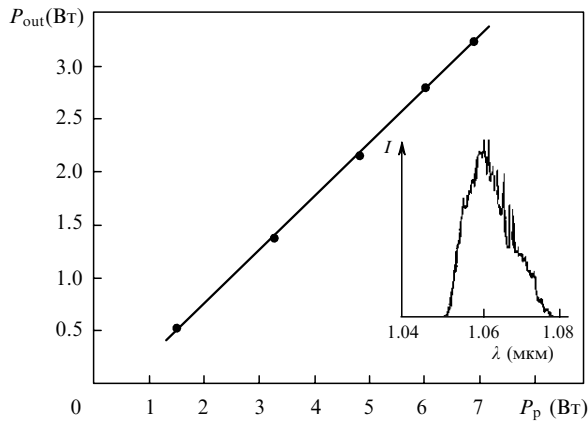


Рис.12. Зависимость выходной мощности неодимового волоконного лазера от мощности накачки. На вставке – спектр генерации лазера.

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 Nd-лазеров с использованием оптического перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ затруднена из-за конкуренции со стороны люминесценции в области 1.06 мкм, поэтому основной проблемой создания такого лазера является подавление люминесценции в этой области. В работе [15] 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.13. Видно, что подавление люминесценции на $\lambda = 1060$ нм составило около 60 дБ. На рис.14 представлена зависимость выходной мощности от мощности поглощенной накачки. Дифференциальная эффективность генерации составила около 35 %.

4.2. 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). 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.

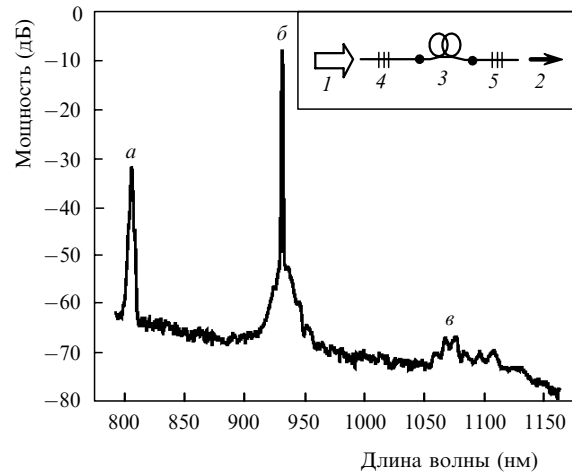


Рис.13. Спектр излучения неодимового волоконного лазера на $\lambda = 925$ нм: линия излучения накачки (а), линия генерация на 925 нм (б), излучение на 1060 нм (в). На вставке – схема лазера: 1 – излучение накачки; 2 – выходное излучение; 3 – активный световод; 4, 5 – брэгговские решетки.

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.15). По литературным данным сечения поглощения и люминесценции в максимуме практически совпадают и составляют 2.5×10^{-20} см² [23] (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, им посвящено множество публикаций (см., напр., [59, 60]). 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, записан-

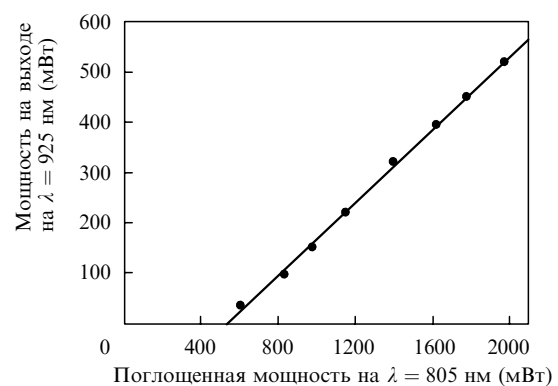


Рис.14. Зависимость выходной мощности неодимового волоконного лазера на $\lambda = 925$ нм от поглощенной мощности накачки.

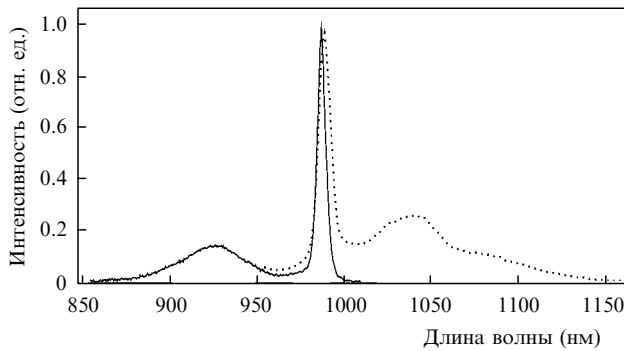


Рис.15. Спектры поглощения (сплошная кривая) и люминесценции (пунктирная кривая) ионов иттербия в кварцевом стекле.

ными как собственно в активном световоде [61], так и в отрезках другого световода, сваренного затем с активным [62]. В цитированных работах использовались активные световоды со следующими параметрами: разность показателей преломления сердцевинки и оболочки $\Delta n = (9 - 11) \times 10^{-3}$, диаметр сердцевинки $2a = 4.5 - 5.5$ мкм, концентрация ионов иттербия $(5 - 10) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Размер внутренней квадратной оболочки составил 120×120 мкм, что обеспечивало 100%-ную эффективность стыковки световода с волоконным выходом полупроводникового источника накачки.

На рис.16,*a* 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 %. На рис.16,*б* показан спектр излучения лазера, измеренный с разрешением 0.01 нм, ширина спектра составила 0.1 нм.

Как было отмечено выше, особенностью лазеров на основе активных волоконных световодов с накачкой в

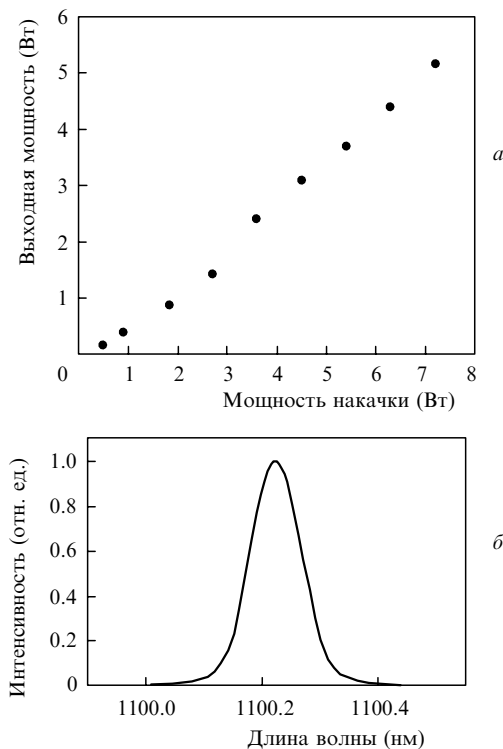


Рис.16. Зависимость выходной мощности иттербиевого волоконного лазера от мощности накачки (*a*) и спектр излучения (*б*).

оболочку является то, что в таких устройствах трудно добиться полной инверсной населенности среды, поскольку эффективное сечение накачки уменьшается пропорционально отношению площадей оболочки и сердцевинки 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.17 показана спектральная зависимость дифференциальной эффективности генерации для семи образцов волоконных лазеров [63]. 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 падает до 57 %, что объясняется влиянием перепоглощения излучения. В длинноволновой области спад эффективности объясняется резким уменьшением сечения люминесценции.

Следует отметить, что полученные результаты справедливы для выбранной геометрии активного волоконного световода, т.е. для данного отношения площадей оболочки и сердцевинки, составляющего около 500. Эффективность лазеров в коротковолновой части может быть повышена в результате увеличения диаметра активной сердцевинки. 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.15, поглощение в этой области конкурирует с люминесценцией, что требует создания высокой степени инверсии населенности для получения лазерной генерации.

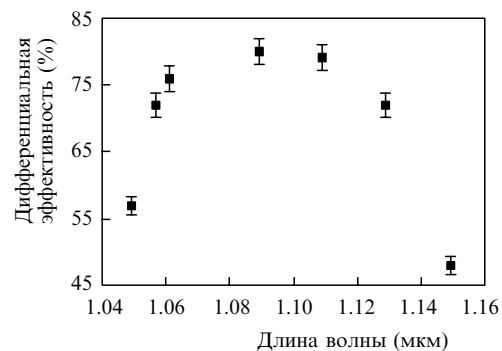


Рис.17. Спектральная зависимость дифференциальной эффективности иттербиевого волоконного лазера с накачкой в оболочку.

В работе [64] для реализации лазера, излучающего в области 980 нм, использовался активный световод с двойной оболочкой на основе стекол разного состава. На рис.18 показан профиль показателя преломления заготовки такого волоконного световода, изготовленный MCVD-методом. 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 алюминием. Волоконный световод имел диаметр внутренней оболочки около 25 мкм и диаметр сердцевины 10 мкм. Концентрация ионов Yb^{3+} составляла около $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, 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 $\text{NA} = 0.22$.

На рис.19 (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 %.

Для ввода большей мощности накачки и, следовательно, достижения более высокой мощности генерации в работе [65] 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.

На основе волоконных световодов, легированных ионами Yb^{3+} , впервые был запущен многомодовый лазер с резонатором, сформированным многомодовыми брэг-

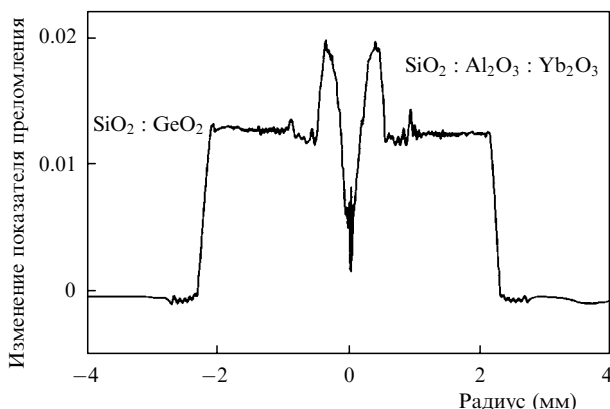


Рис.18. Профиль показателя преломления заготовки активного волоконного световода с оболочками на основе стекол разного состава.

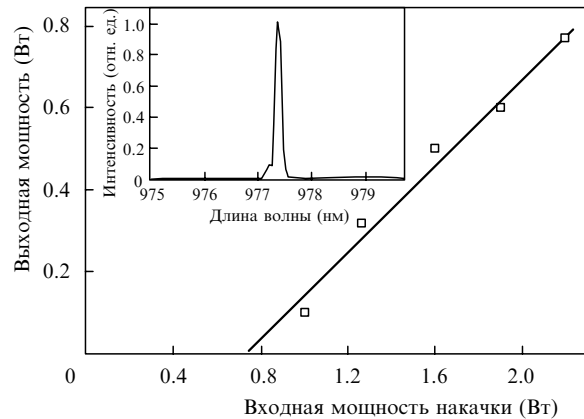


Рис.19. Зависимость выходной мощности лазера на $\lambda = 977.5 \text{ нм}$ от входной мощности накачки. На вставке – спектр излучения лазера.

говскими решетками, записанными в многомодовом градиентном световоде с диаметром сердцевины 50 мкм [66]. (Впервые такие решетки были изготовлены в работе [67].) В качестве активной среды лазера использовался волоконный световод с диаметром легированной ионами Yb^{3+} сердцевины 16 мкм и с диаметром внутренней оболочки 50 мкм. Вследствие малой разности показателя преломления активированной сердцевины и внутренней оболочки ($\Delta n = 0.003$) генерация на торцах световода осуществлялась не только в основной моде, но и в модах внутренней оболочки, распределение полей которых достаточно хорошо перекрывались с сердцевиной. Были изготовлены и исследованы два волоконных многомодовых лазера с входными отражателями, имеющими резонансные длины волн 1.03 и 0.98 мкм. В качестве выходного отражателя в реализованных схемах использовался выходной торец активного световода. Зависимость выходной мощности лазера, излучающего на $\lambda = 1036 \text{ нм}$, от мощности накачки представлена на рис.20. Дифференциальная эффективность лазера составила 80 %, что соответствует 90 %-ной дифференциальной квантовой эффективности. Для лазера с длиной волны излучения 978 нм была достигнута выходная мощность 1.5 Вт. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что многомодовые решетки могут быть эффективно использованы в качестве отражателей в схемах многомодовых лазеров.

В последнее время для создания лазеров с повышенной выходной мощностью все большее распространение

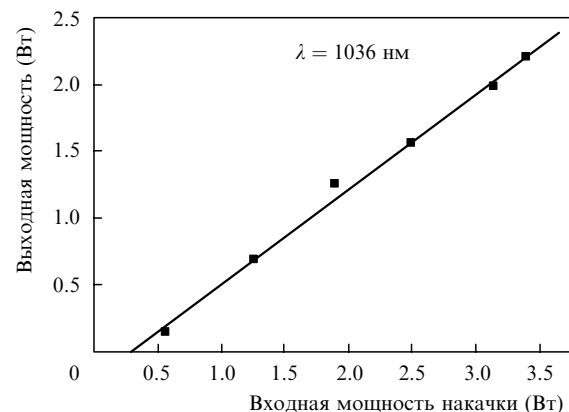


Рис.20. Зависимость мощности генерации на $\lambda = 1036 \text{ нм}$ от мощности накачки для многомодового волоконного лазера.

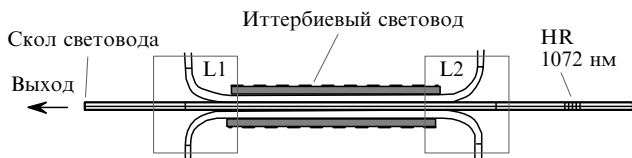


Рис.21. Упрощенная схема волоконного лазера на тройном световоде: L1 и L2 – точки разветвления световода; HR – брэгговская решетка с коэффициентом отражения, близким к 100% на $\lambda = 1072$ нм. В качестве выходного зеркала использовался скол световода, перпендикулярный его оси.

находят специальные волоконные световоды, представляющие собой объединение активного световода с пассивными [42]. В работе [68] продемонстрирован лазер на тройном световоде, являющемся объединением активного световода с двумя пассивными (рис.21). 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.22.

4.3. 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.23. 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 [39]. Диаметр внутренней оболочки составил 22 мкм, числовая апертура равнялась 0.18. При мощности накачки 900 мВт ($\lambda = 980$ нм) была получена лазерная

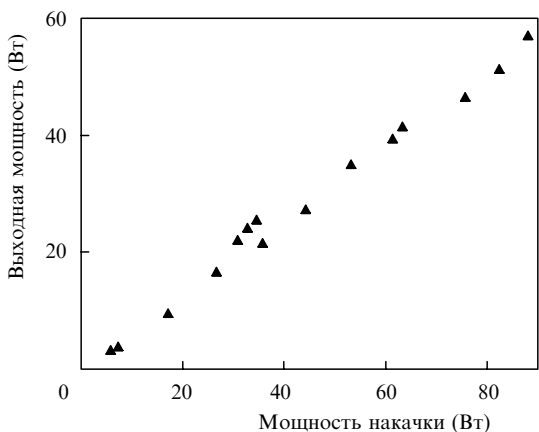


Рис.22. Зависимость выходной мощности от мощности накачки для иттербиевого волоконного лазера с накачкой через пассивные световоды.

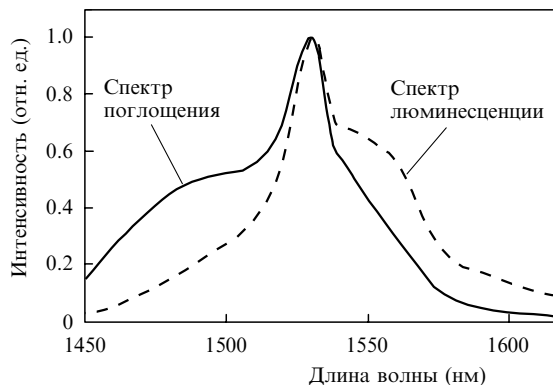


Рис.23. Спектры поглощения и люминесценции ионов эрбия в алюмогерманосиликатном кварцевом стекле.

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.23, 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 [69], 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 Yb^{3+} и Er^{3+} . В таких световодах эффективное поглощение накачки на длине волны 976 нм обеспечивается ионами Yb^{3+} , которые передают энергию возбуждения ионам Er^{3+} [70]. 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 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. В работе [71] 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 Er^{3+} и Yb^{3+} , используются для создания мощных одночастотных волоконных лазеров. Так, в работе [72] был реализован лазер с шириной линии излучения менее 30 кГц и выходной мощностью более 5 Вт (при мощности накачки 25 Вт).

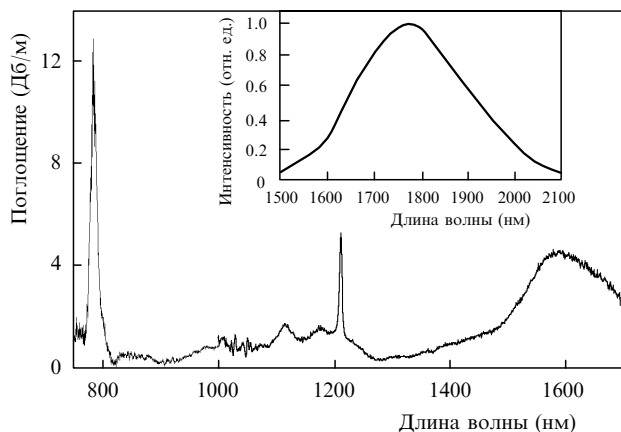


Рис.24. Спектр поглощения волоконного световода, легированного ионами тулия. На вставке – спектр люминесценции.

4.4. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Tm³⁺

Так же как и в предыдущем случае, эффективное использование накачки в оболочку световодов, легированных ионами Tm³⁺, затруднено тем, что генерация в области 1.8–2 мкм происходит по трехуровневой схеме. Однако ситуация облегчается наличием мощной полосы поглощения с центром на 787 нм, обусловленной переходом ³H₄ → ³F₄. Спектр поглощения волоконного световода, легированного ионами Tm³⁺, показан на рис.24. Кроме того, полосы поглощения и люминесценции, обусловленные переходом ³H₄ → ³H₆, в кварцевом стекле, легированном ионами Tm³⁺, существенно разнесены. Так, если центр полосы поглощения приходится в область 1600 нм, то центр линии люминесценции – в область 1800 нм. При этом ширина линии люминесценции составляет около 300 нм [73]. Все это позволяет получить достаточную степень инверсии, при которой перепоглощение сигнала является несущественным в спектральной области λ > 1.8 мкм.

В последние несколько лет был опубликован ряд работ, посвященных реализации лазера на основе волоконного световода, легированного ионами Tm³⁺, с накачкой в оболочку. Так, в работе [74] был продемонстрирован лазер с выходной мощностью 14 Вт на длине волны 2 мкм при мощности накачки 36.5 Вт на длине волны 787 нм, дифференциальная эффективность составила 46 %. В работе [75] был реализован перестраиваемый тулиевый волоконный лазер. Диапазон перестройки составил 230 нм (1860–2090 нм), максимальная выходная мощность достигла 7 Вт на длине волны 1950 нм, спадая до уровня 1 Вт на краях диапазона.

4.5. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Ho³⁺

Ионы Ho³⁺ имеют переход ⁵I₇ → ⁵I₈, который может быть использован для получения лазерной генерации в области 2 мкм. На рис.25 представлен спектр люминесценции волоконного световода, легированного ионами Ho³⁺, при возбуждении излучением криптонового лазера на длине волны 676 нм. Данная длина волны соответствует переходу ⁵I₈ → ⁵I₄. Постоянная времени люминесценции составила 0.5 мс.

В работе [17] для создания волоконного лазера использовался активный световод с сердцевиной на основе алюмогерманосиликатного стекла, введение активного

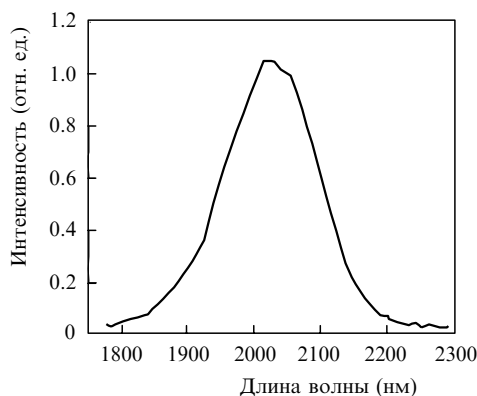


Рис.25. Спектр люминесценции ионов гольмия в кварцевом стекле.

иона осуществлялось методом пропитки. По оценке концентрация активной примеси составила 1.2 × 10¹⁹ см⁻³. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки световода была около 0.08, длина волны отсечки первой высшей моды лежала в области 1.5 мкм. На рис.26 показан спектр оптических потерь изготовленного световода.

Поскольку гольмиевые волоконные лазеры работают по трехуровневой схеме, то для получения инверсии населенности необходимо эффективное поглощение накачки. Наиболее сильные полосы поглощения находятся в видимой области, поэтому в первом продемонстрированном гольмиевом лазере накачка осуществлялась аргоновым лазером с λ = 457.9 нм [76]. Волоконный лазер имел относительно низкую дифференциальную эффективность (1.7%) и максимальную выходную мощность (0.67 мВт) при поглощенной мощности накачки 85 мВт.

Очевидно, что эффективное практическое применение гольмиевых волоконных лазеров требует использования полупроводниковых лазеров для накачки. Однако существующие мощные источники работают на длинах волн более 750 нм и не могут быть использованы для накачки в полосы поглощения гольмия в видимом диапазоне. В то же время использование полосы поглощения, локализованной в области 900 нм, представляется малоперспективным вследствие слабого поглощения.

Использование мощных иттербиевых лазеров с диодной накачкой в оболочку позволило создать эффективный гольмиевый волоконный лазер, в котором накачка

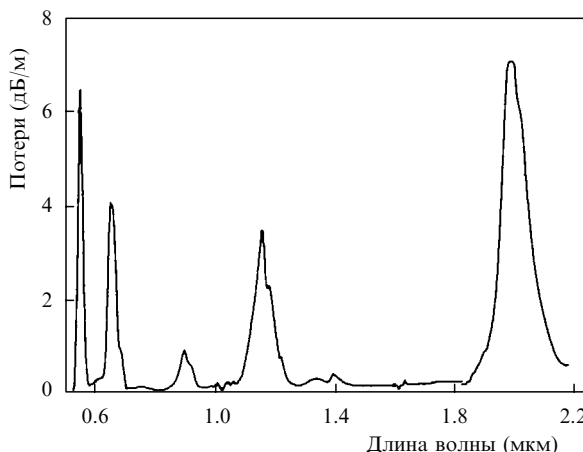


Рис.26. Спектр поглощения волоконного световода, легированного ионами гольмия.

проводится в сильную полосу поглощения на 1.15 мкм, которая соответствует переходу $^5I_8 \rightarrow ^5I_6$ [17]. Схема реализованного лазера показана на рис.27. В качестве активной среды использовался легированный гольмием световод с параметрами, указанными выше. Брэгговская решетка имела резонансную длину волны 2001 нм с шириной линии 1 нм и коэффициент отражения более 99 %. Выходной торец световода был использован в качестве выходного 4 %-ного зеркала. Для накачки в сердцевину гольмиевого волоконного лазера использовался иттербиевый волоконный лазер с $\lambda = 1150$ нм и максимальной выходной мощностью 3 Вт.

На рис.28 проиллюстрирована зависимость выходной мощности гольмиевого лазера от поглощенной мощности накачки итербиевого лазера для длины резонатора 4.5 м. Максимальная выходная мощность 280 мВт была достигнута при поглощенной мощности накачки 2 Вт, дифференциальная эффективность составила 20 %. Здесь же показан выходной спектр излучения гольмиевого лазера, измеренный с разрешением 0.2 нм. Длина волны генерации определялась резонансной длиной волны брэгговской решетки, ширина линии излучения лазера была около 0.4 нм [17].

Эффективность генерации описанного гольмиевого лазера существенно снизили высокие дополнительные оптические потери в активном световоде (0.65 дБ/м на $\lambda = 1.3$ мкм). В принципе, возможно изготовить образцы с оптическими потерями порядка 0.01 дБ/м, в этом случае дифференциальная эффективность генерации может быть увеличена примерно до 25 %. Заметим, что в настоящее время мощность полупроводниковых источников накачки, имеющих волоконный выход с диаметром сердцевины 100 мкм, достигает 20 Вт.

В последние несколько лет были реализованы и исследованы гольмиевые лазеры с использованием дополнительного легирования ионами тулия [77] и иттербия [78]. Накачка осуществлялась в полосы поглощения данных элементов с передачей возбуждения ионам гольмия. Это позволило использовать накачку в оболочку активного световода. Для системы Tm:Ho выходная мощность была равна 5 Вт на длине волны излучения около 2.1 мкм при мощности накачки 20 Вт. Для системы Yb:Ho выходная мощность составила 0.85 Вт при мощности накачки 11 Вт.

5. Волоконные 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 в волоконных световодах позволяет создавать эффективные преобразователи длины волны излучения лазерных источников и получать лазерную генерацию практически на любой длине волны ближнего ИК диапа-

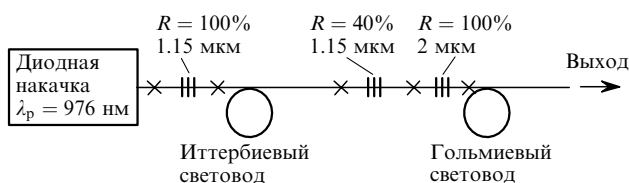


Рис.27. Схема гольмиевого волоконного лазера, крестиками показаны точки сварки.

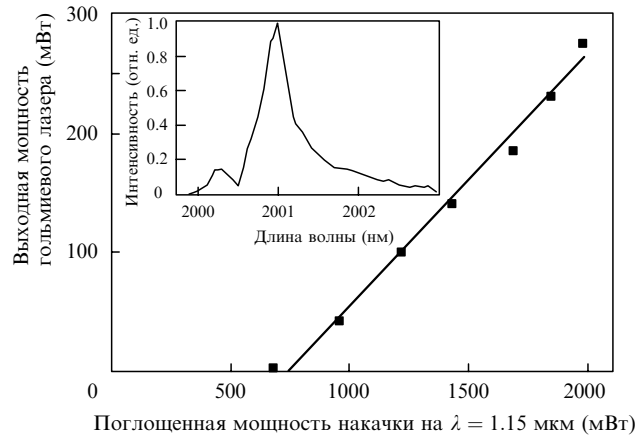


Рис.28. Зависимость выходной мощности гольмиевого волоконного лазера в области 2 мкм от поглощенной мощности накачки. На вставке – спектр излучения лазера.

зона. 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.

Среди первых работ по созданию эффективных волоконных ВКР-лазеров следует отметить работы [59, 79–81], а также работу [82], в которой описан эффективный ВКР-преобразователь на основе волоконных мультиплексоров, обеспечивающих обратную связь. В данном разделе рассматриваются различные типы лазеров, реализованных и исследованных в НЦВО.

5.1. Однокаскадные ВКР-лазеры

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

В работе [54] для экспериментальной реализации была выбрана конфигурация, позволяющая преобразовать излучение иттербиевого лазера с длиной волны 1.09 мкм в излучение на $\lambda = 1.15$ мкм. В качестве активной среды ВКР-лазера использовался стандартный волоконный световод «Flexcore-1060» со следующими параметрами: оптические потери – 0.8 дБ/км на $\lambda = 1.06$ мкм, коэффициент ВКР-усиления в области 1.15 мкм – $5.5 \pm 0.5 \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Длина используемого световода составила 500 м, коэффициент отражения выходной брэгговской решетки $R = 20 \%$. На рис.29 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.2.4. Из рис.29 следует, что эффективность преобразования излучения волоконного лазера превышает 70 %.

Волоконные световоды с сердцевиной на основе фосфоросиликатного стекла характеризуются наличием дополнительного пика комбинационного рассеяния с максимумом в области 1330 см^{-1} (см. рис.10). Как правило,

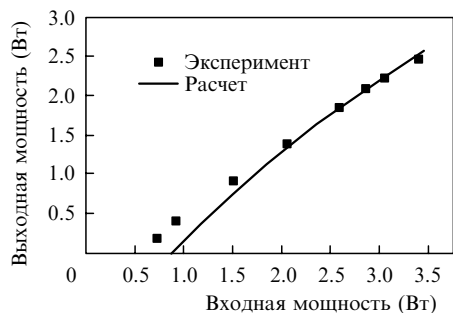


Рис.29. Зависимость выходной мощности однокаскадного ВКР-конвертера на основе германосиликатного световода от мощности иттербиевого лазера.

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 [83]. 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 % [80]. На рис.30 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.30. 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.

Значительный интерес представляет создание ВКР-лазеров на основе волоконных световодов с исключительно высокой (более 50 %) концентрацией GeO₂ в сердцевине. В этом случае за счет более высокой нелинейности германатного стекла, чем плавяного кварца, и малого диаметра сердцевины световода удастся получать коэффициенты ВКР-усиления, составляющие сотни дБ·км⁻¹·Вт⁻¹, что позволяет существенно уменьшить длину активной среды ВКР-лазера. Так, в работе [84] продемонстрирован ВКР-лазер на основе волоконного

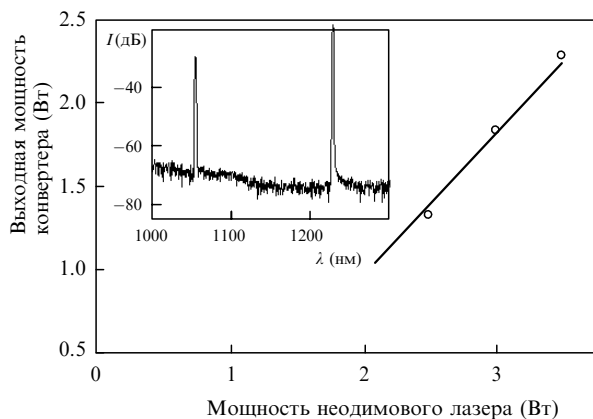


Рис.30. Зависимость выходной мощности однокаскадного ВКР-лазера от мощности накачки на входе в фосфоросиликатный световод. На вставке представлен спектр излучения на выходе ВКР-лазера.

световода с молярной концентрацией двуокиси германия в сердцевине 75 % и коэффициентом ВКР-усиления, составляющим около 300 дБ·км⁻¹·Вт⁻¹. Длина резонатора волоконного лазера составила всего 3 м. При этом эффективность преобразования излучения иттербиевого лазера ($\lambda = 1.07$ 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.31.

5.2. 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 см⁻¹, но и на частоте со сдвигом 440 см⁻¹, соответствующим максимуму ВКР в чистом плавяном кварце, который является основным материалом световода. Таким образом, появилась возможность использования двух различных сдвигов в одном и том же волоконном световоде [85]. В работе [86] был реализован ВКР-лазер с длиной волны излучения 1407 нм, использующий одно преобразование со сдвигом 1330 см⁻¹ и два преобразования со сдвигом 440 см⁻¹. Максимальная мощность излучения на длине волны 1407 нм составила 1 Вт, эффективность преобразования – 25 %. В работе [87] такая же конфигурация была использована для создания лазера с длиной волны 1430 нм и максимальной выходной мощностью 1.3 Вт (рис.32).

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

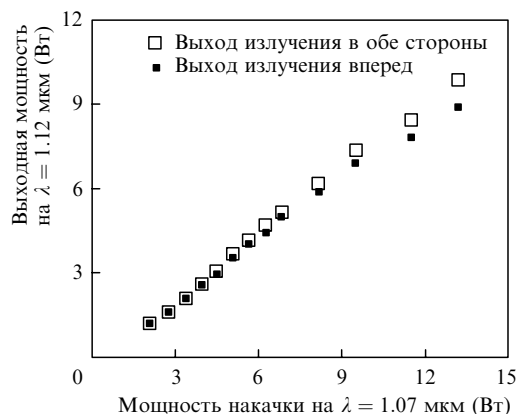


Рис.31. Зависимость выходной мощности ВКР-лазера на основе германатного световода от мощности накачки.

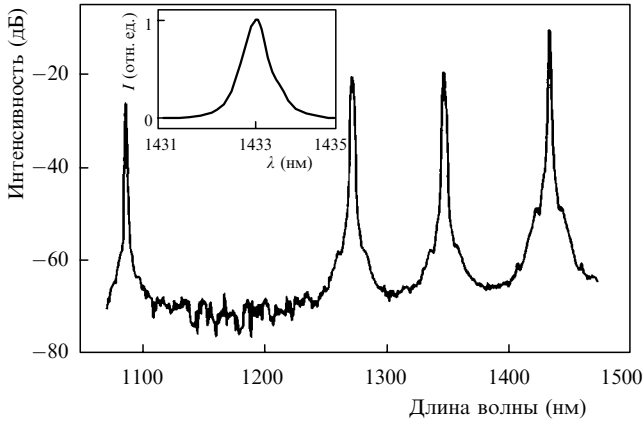


Рис.32. Спектр излучения ВКР-лазера на основе фосфоросиликатного световода с использованием стоксовых сдвигов 440 и 1330 см⁻¹.

Наиболее просто лазеры данного диапазона реализуются на основе фосфоросиликатного световода при двухкаскадном преобразовании частоты. В работе [53] 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 P₂O₅, составляющей 13 %. Использовалась исходная длина волны 1061 нм и конечная – 1480 нм. Оптические потери фосфоросиликатного световода составили 1.55, 0.92 и 0.75 дБ/км на длинах волн 1061, 1240 и 1480 нм соответственно. Коэффициенты усиления составили 5.5 и 4 дБ·км⁻¹Вт⁻¹ 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.33. На рис.34 показаны экспериментальные и рас-

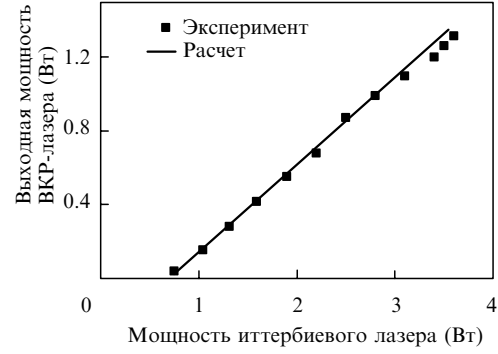


Рис.34. Зависимость выходной мощности двухкаскадного ВКР-лазера на основе фосфоросиликатного световода ($\lambda = 1480$ нм) от введенной мощности иттербиевого лазера P_{in} ($\lambda = 1061$ нм).

четные зависимости выходной мощности ВКР-лазера от введенной мощности иттербиевого лазера.

Для повышения эффективности ВКР-конвертера в работе [88] брэгговские решетки записывались непосредственно в фосфоросиликатном световоде, что позволило снизить внутрирезонаторные потери, при этом эффективность преобразования конвертера составила 45 %.

5.3. Составные ВКР-лазеры

Длинноволновая граница эффективного преобразования устройств, описанных в разд.5.2., 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 см⁻¹, обусловленными компонентой P₂O₅, и одним

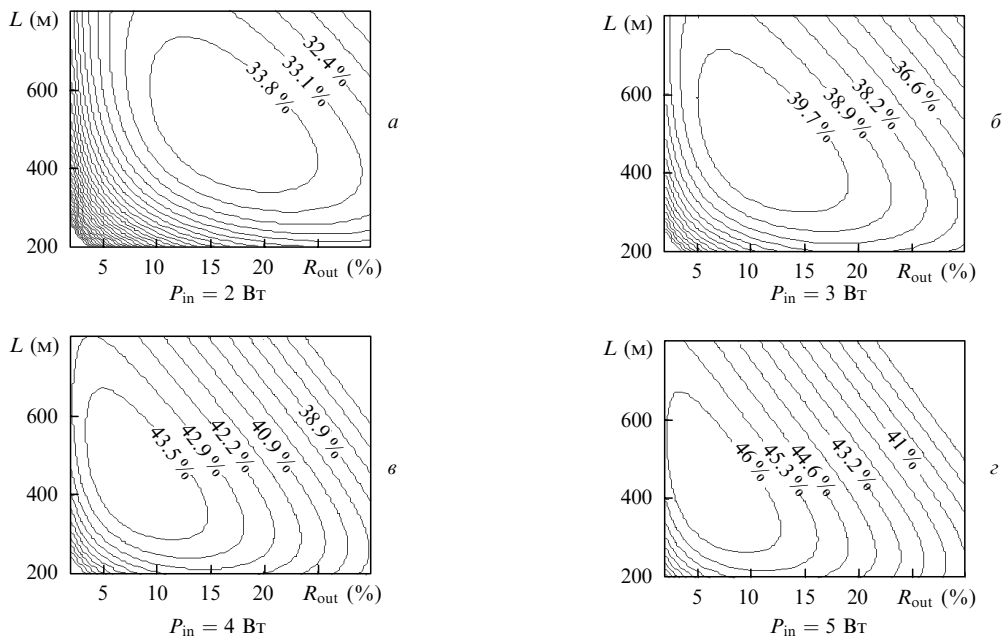


Рис.33. Зависимости коэффициента преобразования (в %) двухкаскадного ВКР-лазера от длины L используемого фосфоросиликатного световода и коэффициента отражения R_{out} выходной решетки для различных значений введенной мощности накачки P_{in} .

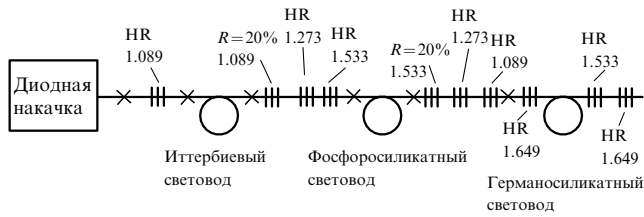


Рис.35. Схема составного ВКР-лазера. Крестиками показаны точки сварки, около каждой решетки указана резонансная длина волны (в мкм).

сдвигом на 440 см^{-1} , обусловленным кварцевым стеклом. К сожалению, фосфоросиликатные волоконные световоды в настоящее время имеют значительно большие оптические потери, чем световоды на основе германосиликатного стекла ($0.8 - 1 \text{ дБ/км}$ 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 германосиликатных световодах. Поэтому схема с одновременным использованием стоксовых сдвигов, обусловленных фосфорной и кварцевой составляющими материала световода, выглядит неперспективной. В то же время, в германосиликатных 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 германосиликатного 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 в работе [89] было предложено использовать составной ВКР-лазер, схема которого представлена на рис. 35. Лазер состоит из двух частей: двухкаскадного конвертера на основе фосфоросиликатного световода и однокаскадного преобразователя на германосиликатном световоде. Первая часть преобразователя позволяет получить выходное излучение на длине волны 1533 нм , вторая – на 1649 нм . Максимальная мощность излучения на $\lambda = 1533 \text{ нм}$ 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

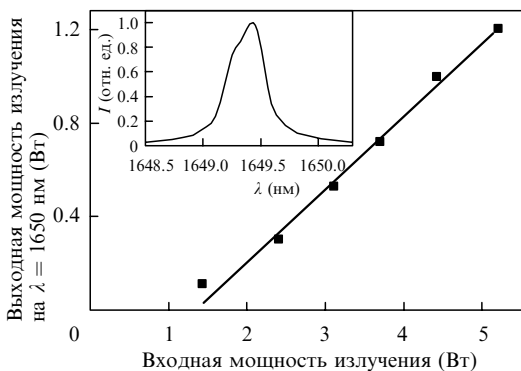


Рис.36. Зависимость выходной мощности составного ВКР-лазера от мощности иттербиевого лазера на $\lambda = 1089 \text{ нм}$. На вставке – спектр излучения составного лазера.

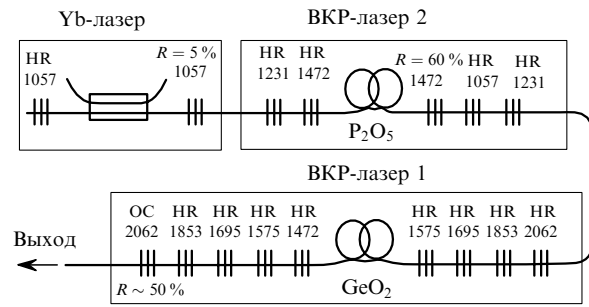


Рис.37. Схема четырехкаскадного волоконного ВКР-лазера с длиной волны 2.06 мкм ; ОС – выходное зеркало. Около каждой решетки указана резонансная длина волны (в нм).

дБ/км на длинах волн 1533 и 1649 нм соответственно. Коэффициент усиления слабого сигнала на длине волны 1649 нм составил $2.2 \text{ дБ}\cdot\text{км}^{-1}\text{Вт}^{-1}$. Измерение коэффициента усиления проводилось с помощью полупроводникового лазера, излучающего в данном спектральном диапазоне. На рис.36 показана мощностная характеристика ВКР-лазера на длине волны 1649 нм .

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.36).

Отметим, что использование составной конфигурации позволяет реализовать источники, перекрывающие спектральный диапазон $1.6 - 1.75 \text{ мкм}$. При этом ожидается получение примерно такой же выходной мощности, поскольку необходимая длина волны излучения иттербиевого лазера в этом случае попадает в диапазон $1.07 - 1.12 \text{ мкм}$, 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 соответствующую-

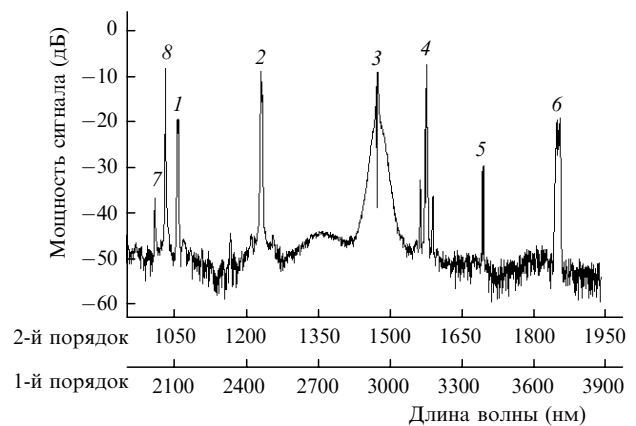


Рис.38. Спектр излучения на выходе четырехкаскадного ВКР-лазера: 1 – излучение накачки иттербиевого лазера (1057 нм); 2, 3 – излучение с двух каскадов фосфоросиликатного ВКР-лазера (1231 и 1472 нм); 4, 5, 6 – излучение с первых трех каскадов четырехкаскадного ВКР-лазера (1575 , 1695 и 1853 нм); 7 – излучение на максимуме ВКР-усиления (2017 нм), соответствующем частотному сдвигу 440 см^{-1} от 1853 нм ; 8 – излучение с четвертого каскада ВКР-лазера (2062 нм).

щее 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 [90].

В работе [91] 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.37, а на рис.38 приведен спектр его выходного излучения.

6. 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 Nd^{3+} , излучают в области 0.92 и 1.06 мкм, ионами Yb^{3+} – в 0.98 – 1.15 мкм, ионами Er^{3+} и $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ – в 1.53 – 1.6 мкм, ионами Tm^{3+} – в 1.85 – 2 мкм, ионами 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.

Авторы благодарят И.А.Буфетова за представленные экспериментальные результаты.

7. Литература

1. Snitzer E. *Phys. Rev. Lett.*, **7**, 444 (1961).
2. Mears R.J., Reekie L., Jancie I.M., Payne D.N. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. OFC'87* (Reno, USA, 1987, Vol. 3, p. 167).
3. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 647 (1978).
4. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. *Opt. Lett.*, **14**, 823 (1989).
5. Zyskind J.L., Mizrahi V., DiGiovanny D.J., Sulhoff J.W. *Electron. Lett.*, **28**, 1385 (1992).
6. Dong L., Loh W.H., Caplen J.E., Hsu K., Minelli J.D., Reekie L. *Opt. Lett.*, **22**, 694 (1997).
7. Dianov E.M., Prokhorov A.M. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **6**, 1022 (2000).
8. Dominic V., MacCormack S., Waarts R., Sanders S., Bicknese S., Dohle R., Wolak E., Yeh P.S., Zucker E. *Electron. Lett.*, **35**, 1158 (1999).
9. Platonov N.S., Gapontsev D.V., Gapontsev V.P., Shumilin V. *Proc. CLEO'2002* (Long Beach, USA, 2002, p. CPDC3).
10. Reichel V., Unger S., Brückner S., Mörl K., Müller H.-R., Kirchhof J., Sandrock T., Harchack A. *Photon. West Conf.* (San Jose, USA, 2003, p. 4974-23).
11. Zellmer H., Liem A., Limpert J., Schreiber T., Höfer S., Tünnermann A. *XII Int. Laser Phys. Workshop* (Hamburg, Germany, 2003, p. 4.4.1).
12. Ueda K.-I., Sekiguchi H., Kan H. *Proc. CLEO'2002* (Long Beach, USA, 2002, p. CPDC4).
13. Gapontsev V.P. *XII Int. Laser Phys. Workshop* (Hamburg, Germany, 2003, p. PS3).
14. Mears R.J., Reekie L., Poole S.B., Payne D.N. *Electron. Lett.*, **21**, 738 (1985).
15. Буфетов И.А., Дудин В.В., Шубин А.В., Сенаторов А.К., Дианов Е.М., Грудинин А.Б., Гончаров С.Е., Залевский И.Д., Гурьянов А.Н., Яшков М.В., Умников А.А., Вечканов Н.Н. *Квантовая электроника*, **33** (12), 1035 (2003).
16. Gandy H.W., Ginther R.J. *Proc. IRE*, **50**, 2113 (1962).
17. Kurkov A.S., Dianov E.M., Medvedkov O.I., Ivanov G.A., Aksenov V.A., Paramonov V.M., Vasiliev S.A., Pershina E.V. *Electron. Lett.*, **36**, 1015 (2000).
18. Bjarklev A. *Optical Fiber Amplifiers: Design System Applications* (Boston, London: Artech House, 1993).
19. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers. Fundamentals Technology* (San Diego: Acad. Press, 1999).
20. Gandy H.W., Ginther R.J., Weller J.R. *J. Appl. Phys.*, **38**, 3030 (1967).
21. Hanna D.C., Jauncey I.M., Percival R.M., Perry I.R., Smart R.G., Suni P.J., Townsend J.E., Tropper A.C. *Electron. Lett.*, **24**, 1222 (1988).
22. Gapontsev V.P., Samartsev I.E., Zayats A.A., Loryan R.R. *Proc. Conf. Adv. Solid State Lasers* (Hilton Head, USA, 1991, WC1-1, p. 214).
23. Pask H.M., Carman R.J., Hanna D.C., Tropper A.C., Mackechnie C.J., Barber P.R., Dawes J.M. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **1**, 1 (1995).
24. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings* (San Diego: Acad. Press, 1999).
25. Tamir T. (Ed.) *Topics Appl. Phys., Vol. 7. Integrated Optics* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1975).
26. Othonos A. *Rev. Sci. Instrum.*, **68**, 4309 (1997).
27. Hill K.O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D.C., Albert J. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1035 (1993).
28. Poole S.B., Payne D.N., Mears R.J., Fermann M.E., Laming R.I. *IEEE J. Lightwave Techn.*, **4**, 870 (1986).
29. Dianov E.M., Karpov V.I., Kurkov A.S., Protopopov V.N., Devyatykh G.G., Guryanov A.N., Gusovskiy D.D., Kobis S.V., Zverev Yu.B. *Proc. XXI Europ. Conf. Opt. Commun.* (Brussels, 1995, Vol. 2, p. 721).
30. Bosko P.L. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. OFC'89* (Houston, 1989, Vol. 5, p. 20).
31. Abramov A.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Voronkov A.E., Guryanov A.N., Devyatykh G.G., Ignatjev S.V., Zverev V.B., Karpichev N.S., Mazavin S.M. *Proc. CLEO'90* (Anaheim, USA, 1990, Vol. 7, p. 404).
32. Wada A., Tanaka D., Sakai T., Nozava T., Aikawa K., Tamauchi R., in *Opt. Amplifiers Their Applications, OSA Techn. Dig. Ser.*, **17**, 222 (1992).
33. Dianov E.M., Golant K.M., Khrapko R.R., Kurkov A.S., Protopopov V.N., Semenov S.L. *Opt. Mater.*, **3**, 181 (1994).
34. Kurkov A.S., Laptev A.Yu., Dianov E.M., Guryanov A.N., Karpov V.I., Paramonov V.M., Medvedkov O.I., Umnikov A.A., Protopopov V.N., Vechkanov N.N., Vasiliev S.A., Pershina E.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4083**, 118 (2000).
35. Ainslie B.J. *J. Lightwave Techn.*, **9**, 220 (1991).
36. Snitzer E., Po H., Hakimi F., Tumminelli R., McCollum B.C. *Proc. Conf. Opt. Fiber Sensors* (New Orleans, 1988, PD5).
37. Zenteno L. *IEEE J. Lightwave Techn.*, **11**, 1435 (1993).

38. Liu A., Ueda K. *Opt. Commun.*, **132**, 511 (1996).
39. Minelly J.D., Chen Z.J., Laming R.L., Caplen J.E. *Proc. XXI Europ. Conf. Opt. Commun.*, **2**, 917 (1995).
40. Sahu J.K., Renaud C.C., Furusawa K., Selvas R., Alvarez-Chavez J.A., Richardson D.J., Nilsson J. *Electron. Lett.*, **37**, 1118 (2001).
41. Goldberg L., Koplou J.P., Kliner D. *Opt. Lett.*, **24**, 673 (1999).
42. Grudinin A.B., Payne D., Turner P.W., Zervas M.N., Ibsen M., Durkin M.K. Int. patent WO 00/67350 (Priority date 30.04.99).
43. Stolen R.H., Ippen E.P., Tynes A.R. *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 62 (1972).
44. Аксенов В.А., Базаров Е.Н., Белов А.В., Дианов Е.М., Иванов Г.А., Исаев В.А., Колташев В.В., Маковецкий А.А., Наметов К.М., Плотниченко В.Г., Чаморовский Ю.К. *Неорганические материалы*, **34**, 1218 (1998).
45. Дианов Е.М., Фурса Д.Г., Абрамов А.А., Беловолов М.И., Бубнов М.М., Шипулин А.В., Прохоров А.М., Девярых Г.Г., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф. *Квантовая электроника*, **21** (9), 807 (1994).
46. Grubb S.G., Erdogan T., Mizrahi Y., Strasser T., Cheung W.Y., Reed W.A., Lemaire P.J., Miller A.E., Kosinski S.G., Nykolyak G., Becker P.C., Pechkam D.W. *Proc. Opt. Amplifiers Their Applications* (Breckenridge, 1994, p. PD-3).
47. Дианов Е.М., Прохоров А.М. Патент РФ № 2095902 (приоритет от 10.11.97); US Patent 5 833 700 (Priority date 17.11.98).
48. Bubnov M.M., Dianov E.M., Egorova O.N., Semjonov S.L., Guryanov A.N., Khopin V.F., DeLiso E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4083**, 12 (2000).
49. Reed W.A., Coughran W.C., Grubb S.G. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. OFC'95* (San Diego, USA, 1995, p. 107).
50. Vareille G., Audouin O., Desurvire E. *Electron. Lett.*, **34**, 675 (1998).
51. Rini M., Cristiani I., Degiorgio V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 1117 (2000).
52. Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **30** (10), 873 (2000).
53. Kurukitkoson N., Suguhara H., Turitsyn S.K., Egorova O.N., Kurkov A.S., Paramonov V.M., Dianov E.M. *Electron. Lett.*, **37**, 1281 (2001).
54. Rini M., Cristiani I., Degiorgio V., Kurkov A.S., Paramonov V.M. *Opt. Commun.*, **203** (1-2), 139 (2002).
55. Po H., Snitzer E., Tuminelli R., Zenteno L., Hakimi F., Cho N.M., Haw T. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. OFC'89* (Houston, USA, 1989, PD7).
56. Zellmer H., Tünnermann A., Welling H., Reichel V. *Proc. Conf. Opt. Amplifiers Their Applications, OSA Trends Opt. Photon. Ser.*, **16**, 137 (1997).
57. Дианов Е.М., Белов А.В., Буфетов И.А., Протопопов В.Н., Гурьянов А.Н., Гусовский Д.Д., Кобись С.В. *Квантовая электроника*, **24** (1), 3 (1997).
58. Jackson S.D., Li Y. *IEEE J. Quantum Electron.*, **39**, 1118 (2003).
59. Inniss D., DiGiovanni D.J., Strasser T.A., Hale A., Headley C., Stentz A.J., Pedrazzani R., Tipton D., Kosinski S.G., Brownlow D.L., Quoi K.W., Kranz K.S., Huff R.G., Espindola R., Le Grange J.D., Jakobovich-Veselka G., Boggavarapu B., He X., Caffey D., Gupta S., Srinivasan S., McEuen K., Patel R. *Proc. CLEO'97* (Baltimore, USA, 1997, CPD31).
60. Muendel M., Engstrom B., Kea D., Laliberte B., Minns R., Robinson R., Rockney B., Zhang Y., Collins R., Gavrilovic P., Rowley A. *Proc. CLEO'97* (Baltimore, USA, 1997, CPD30).
61. Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Karpov V.I., Vasiliev S.A., Lexin O.A., Dianov E.M., Gur'yanov A.N., Laptev A.A., Umnikov A.A., Vechkanov N.I. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. OFC'99* (San Diego, USA, 1999, WM4, p. 205).
62. Курков А.С., Карпов В.И., Лаптев А.Ю., Медведков О.И., Дианов Е.М., Гурьянов А.Н., Васильев С.А., Парамонов В.М., Протопопов В.Н., Умников А.А., Вечканов Н.И., Артюшенко В.Г., Фрам Ю. *Квантовая электроника*, **27** (3), 239 (1999).
63. Kurkov A.S., Paramonov V.M., Medvedkov O.I., Vasiliev S.A., Dianov E.M. *Proc. Conf. Opt. Amplifiers Their Application* (Quebec City, Canada, 2000).
64. Kurkov A.S., Dianov E.M., Paramonov V.M., Medvedkov O.I., Vasiliev S.A., Solodovnikov V.V., Zhilin V., Laptev A.Yu., Umnikov A.A., Guryanov A.N. *Conf. Dig. CLEO-2001* (Baltimore, USA, 2001, p. 216).
65. Selvas R., Yla-Jarkko K., Alam S.U., Nilsson J., Turner P.W., Moore J., Sahu J.K., Grudinin A.B. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. OFC'2003* (Atlanta, USA, 2003, p. TuL4).
66. Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Vasiliev S.A., Paramonov V.M., Grukh D.A., Dianov E.M., Guryanov A.N., Umnikov A.A. *Techn. Dig. IQEC/LAT-2002* (Moscow, 2002, p. L5uD4).
67. Mizunami T., Gupta S., Yamao T., Shimomura T. *Proc. Conf IOOC-ECOC'97* (Edinburg, 1997, Vol. 3, p. 182).
68. Bufetov I.A., Melkoumov M.A., Bubnov M.M., Kravtsov K.S., Semjonov S.L., Shubin A.V., Dianov E.M. *XIII Int. Laser Phys. Workshop* (Trieste, 2004, p. 214).
69. Bousselet P., Bettiati M., Gasca L., Lambelet P., Leplingard F., Bayart D. *Proc. Amplifiers Their Applications Conf.* (Stresa, Italy, 2001, OWC-3).
70. Townsend J.E., Barnes W.L., Jedzejewski K.P., Grubb S.G. *Electron. Lett.*, **27**, 1858 (1991).
71. Vienne G.G., Caplen J.E., Dong L., Minelly J.D., Nilsson J., Payne D.N. *J. Lightwave Techn.*, **16**, 1990 (1998).
72. Alam S., Yla-Jarkko K.H., Chryssou C.E., Grudinin A.B. *Proc. XXIX Europ. Conf. Opt. Commun. ECOC'03* (Rimini, Italy, 2003, Vol. 3, We2.6).
73. Hanna D.C., Percival R.M., Smart R.G., Tropper A.C. *Opt. Commun.*, **75**, 283 (1989).
74. Hayward A., Clarkson W.A., Turner P.W., Nilsson J., Grudinin A.B., Hanna D.C. *Electron. Lett.*, **36**, 711 (2000).
75. Clarkson A., Barnes N.P., Turner P.W., Nilsson J., Hanna D.C. *Opt. Lett.*, **27**, 1989 (2002).
76. Hanna D.C., Percival R.M., Smart R.G. *Electron. Lett.*, **25**, 593 (1989).
77. Jackson S.D., Mossman S. *Appl. Phys. B*, **77**, 489 (2003).
78. Jackson S.D., Mossman S. *Appl. Opt.*, **42**, 3546 (2003).
79. Grubb S.G., Strasser T., Cheung W.Y., Reed W.A., Mizrahi Y., Erdogan T., Lemaire P.J., Vengsarkar A.M., Di Diovanni D.J., Pechkam D.W., Rockney B.H. *Proc. Top. Meet. Opt. Amplifiers Their Applications* (Davos, 1995, p. 197).
80. Дианов Е.М., Буфетов И.А., Бубнов М.М., Греков М.В., Шубин А.В., Васильев С.А., Медведков О.И., Семенов С.Л., Егорова О.Н., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф., Яшков М.В., Варелас Д., Иокко А., Константины Д., Лимбергер Х.Г., Салате Р.П. *Квантовая электроника*, **29** (2), 97 (1999).
81. Карпов В.И., Дианов Е.М., Парамонов В.М., Медведков О.И., Бубнов М.М., Semyonov S.L., Vasiliev S.A., Protodopov V.N., Egorova O.N. *Opt. Lett.*, **24**, 887 (1999).
82. Chernikov S.V., Taylor J.R., Platonov N.S., Gapontsev V.P., Kuppers F., Mattheus A., Gabitov I. *Proc. OFC'97* (Dallas, USA, 1997, p. 345).
83. Курков А.С., Дианов Е.М., Парамонов В.М., Гурьянов А.Н., Лаптев А.Ю., Хопин В.Ф., Умников А.А., Вечканов Н.И., Медведков О.И., Васильев С.А., Бубнов М.М., Егорова О.Н., Семенов С.Л., Першина Е.В. *Квантовая электроника*, **30** (9), 791 (2000).
84. Bufetov I.A., Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Dianov E.M., Guryanov A.M., Khopin V.F., Salgansky M.Yu. *Proc. CLEO'2004* (San Francisco, 2004, p. CMD1).
85. Буфетов И.А., Дианов Е.М., Курков А.С. Патент на изобретение № 2158458 (приоритет от 08.02.2000).
86. Dianov E.M., Bufetov I.A., Bubnov M.M., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I. *Opt. Lett.*, **25**, 402 (2000).
87. Kurkov A.S., Dianov E.M., Paramonov V.M., Medvedkov O.I., Vasiliev S.A., Pershina E.V., Guryanov A.N., Laptev A.A., Umnikov A.A., Vechkanov N.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4083**, 126 (2000).
88. Bufetov I.A., Bubnov M.M., Larionov Y.V., Melkoumov M.A., Rybaltovsky A.A., Semjonov S.L., Dianov E.M., Vartapetov S.K., Obidin A.Z., Kurzanov M.A. *Proc. CLEO'2002* (Long Beach, USA, 2002, p. 480).
89. Dianov E.M., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Paramonov V.M., Egorova O.N., Kurukitkoson N., Turitsyn S.K. *Laser Phys.*, **13**, 397 (2003).
90. Mashinsky V.M., Medvedkov O.I., Neustruev V.B., Dvoyrin V.B., Vasiliev S.A., Dianov E.M., Khopin V.F., Guryanov A.N. *Proc. XXIX Europ. Conf. Opt. Commun.* (Rimini, Italy, 2003, Vol. 2, p. 210).
91. Dianov E.M. *XXX Europ. Conf. Opt. Commun. ECOC'04* (Stockholm, 2004, p. We1.3.1).