

**Российская академия наук
Институт общей физики им. А.М.Прохорова**

На правах рукописи

Сверчков Сергей Евгеньевич

1.5 мкм иттербий-эрбиевые лазеры с диодной накачкой
- элементная база и генерационные возможности.

Специальность 01.04.21 - лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук

Москва - 2005



Работа выполнена в Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН

Научный консультант - доктор физико-математических наук Денкер Борис Ильич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Жариков Евгений Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор Очкин Владимир Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор Толстой Михаил Никитич

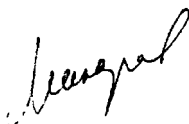
Ведущая организация - ФГУП НИИ «Полюс» им. М.В.Стельмаха

Защита состоится 23 мая 2005 г. в 15 час. на заседании Диссертационного совета Д002.063.02 при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН по адресу 119991, ГСП-1, Москва, ул.Вавилова, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН

Автореферат разослан " " апреля 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Макаров В.П.

Общая характеристика работы

Введение. Тема работы и ее актуальность.

Как известно, преимуществами твердотельных лазеров на диэлектрических материалах, активированных ионами переходных и редкоземельных металлов, являются возможность формирования в режиме модуляции добротности коротких мощных импульсов излучения, а также относительная простота масштабирования и формирования излучения с высокими спектральными и пространственными характеристиками. Однако КПД твердотельных лазеров при использовании традиционных источников накачки (газоразрядных ламп) не превышает единиц процентов.

Получившие же в последнее десятилетие весьма широкое распространение полупроводниковые инжекционные лазеры (лазерные диоды) обладают чрезвычайно высоким КПД, достигающим 40-50%, но ограниченной пиковой мощностью при сложности масштабирования и, как правило, невысокими пространственными характеристиками излучения.

Быстрый сегодняшний прогресс в науке и технике твердотельных лазеров во многом обусловлен возможностью объединения преимуществ обоих типов лазеров путем **создания твердотельных лазеров с диодной накачкой**. Такие лазерные системы обладают (по сравнению с лазерами, накачиваемыми газоразрядными лампами) намного более высоким КПД и меньшими габаритами, а также могут намного превосходить их по долговечности и стабильности параметров излучения.

Другое магистральное направление прогресса твердотельных лазеров - появление **новых лазерных материалов** активированных генерирующих сред, просветляющихся поглотителей, нелинейных и ВКР - активных сред и др.

Расширение спектра лазерных материалов в совокупности с переходом от ламповой к диодной накачке привело к тенденции развития "полностью твердотельных" лазерных систем (т. е. состоящих только из твердотельных оптических элементов, в том числе в системе накачки). До недавнего времени, однако, наиболее ярко эта тенденция проявлялась применительно к лазерам, излучающим в видимой и ближайшей ИК (около 1 мкм) областях спектра.

Известно, что **спектральная область** $\sim 1.5 - 1.6$ **мкм** привлекательна для разработчиков различных лазерных приборов по целому ряду причин. Прежде всего, это - относительная безопасность излучения для зрения: допустимая в полуторамикронной области плотность энергии, облучающей роговицу глаза, на 5 порядков превышает соответствующие значения для видимой и ~ 1 мкм областей спектра. Такая особенность объясняется удачным (десятки см^{-1}) коэффициентом поглощения полуторамикронного излучения водой, содержащейся в биологических тканях, и связанной с этим невозможностью достижения излучением чувствительной сетчатой оболочки. Эта же особенность делает полуторамикронные лазеры привлекательными для ряда микрохирургических применений, где требуется «деликатная» коагуляция малых объемов биологических тканей. В то же время земная атмосфера, несмотря на наличие в ней воды в виде паров, весьма прозрачна в полуторамикронной области, которая, таким образом, оказывается весьма удобной для работы лазерных локаторов и дальномеров. Следует также отметить, что с указанным спектральным диапазоном совпадают области максимальной прозрачности кварцевых световодов, использующихся в волоконных линиях связи и максимальной чувствительности распространенных неохлаждаемых фотоприемников - германиевых и InGaAs фотодиодов.

На настоящее время **наиболее распространенными твердотельными источниками полуторамикронного лазерного излучения являются лазеры на переходе $^4I_{13/2} - ^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+}** . Как всякие твердотельные лазеры, их отличает простота и возможность масштабирования. Также их преимуществом является большое (до 7-8 мс) время жизни верхнего лазерного уровня. Большое время жизни легко позволяет осуществлять накопление энергии инверсной населенности в лазерной среде для ее последующего излучения в виде коротких мощных импульсов (режимы модуляции добротности и усиления импульсного излучения), что требуется в преобладающем большинстве применений.

Поскольку нижним лазерным уровнем Er^{3+} является его основное состояние, для возникновения инверсии на указанном переходе необходимо возбудить около половины ионов эрбия. Такой высокий уровень возбуждения вкуче с ограниченной мощностью источников оптической накачки накладывает ограничение на концентрацию эрбия в лазерной среде. Невысокие (обычно не более нескольких десятых весового процента) концентрации Er^{3+} делают эффективную прямую (непосредственно в полосы поглощения эрбия)

оптическую накачку возможной только при значительных линейных размерах активных элементов лазеров. Так, в волоконной технике (где эрбиевые лазеры и усилители получили большое распространение) эта проблема решается за счет достаточно большой длины активного волокна. **Предметом же настоящей диссертации являются лазеры на малогабаритных объемных элементах.** В этом случае проблема их эффективной накачки может быть решена введением в активную среду достаточного количества сенсibilизаторов, поглощающих излучение накачки и передающих ее к лазерным ионам. Для ионов эрбия такими сенсibilизаторами являются ионы иттербия Yb^{3+} , имеющие интенсивную полосу поглощения в области $\sim 0.9\text{-}1$ мкм.

До настоящего времени единственной получившей распространение матрицей иттербий-эрбиевых лазеров являются фосфатные стекла (о причинах этого обстоятельства будет сказано ниже). В связи с появлением в последнее время доступных и эффективных InGaAs лазерных диодов, спектральная область излучения которых хорошо перекрывается с полосой поглощения иттербия, интерес к иттербий-эрбиевым лазерам резко возрос. Это связано с широтой возможных применений таких диодно-накачиваемых лазеров благодаря их эффективности, безопасности для зрения, компактности и потенциальной (при массовом производстве) дешевизне. Как и в случае, например, неодимовых лазеров, переход от ламповой к диодной накачке эрбиевых стекол должен позволить резко снизить габариты лазеров при одновременном резком повышении КПД. Кроме того, диодная накачка, в отличие от ламповой, легко позволяет осуществить непрерывный режим генерации.

Однако существовавшие до настоящего времени стекла для 1.5 мкм лазеров разрабатывались и оптимизировались в основном под накачку газоразрядными импульсными лампами. Осуществление же преимуществ лазеров с диодной накачкой требует создания новых специализированных лазерных материалов, оптимизированных для различных режимов накачки лазерными диодами.

Большинство применений твердотельных лазеров связано с возможностью формирования в них коротких мощных импульсов. Для миниатюрных лазеров с диодной накачкой наиболее интересны пассивные средства управления генерацией. **Однако к моменту начала настоящей работы пассивных модуляторов добротности для 1.5 мкм лазеров известно не было.**

В связи со всем вышесказанным, можно сформулировать научную проблему, цели и задачи диссертации.

Научная проблема

Настоящая диссертационная работа посвящена решению крупной научной проблемы создания миниатюрных полуторамикронных твердотельных лазеров с диодной накачкой, обладающих высокими КПД, средней и пиковой мощностью генерации.

Это потребовало проведения фундаментальных исследований в нескольких взаимосвязанных направлениях, ориентированных на разработку как элементной базы таких лазеров, так и их схемных решений, а именно на создание:

- нового поколения активных сред (как кристаллических, так и стеклообразных), специально предназначенных для различных типов лазеров с диодной накачкой;
- пассивных модуляторов добротности для полуторамикронных лазеров;
- диодно-накачиваемых лазеров на созданных активных и пассивных материалах.

Цели настоящей диссертационной работы.

I. Создание нового поколения иттербий-эрбиевых лазерных сред (как стеклообразных, так и кристаллических), специально предназначенных для лазеров с диодной накачкой;

II. Поиск и исследование пассивных модуляторов добротности 1.5 мкм лазеров;

III. Создание лазеров с диодной накачкой на основе разработанных активных и пассивных материалов.

Постановка основных задач диссертации **и методы их решения.**

Перед формулировкой конкретных задач, решавшихся в диссертации, следует сначала вкратце упомянуть об основных спектрально-кинетических особенностях системы ионов Yb^{3+} - Er^{3+} . Сенсibilизация люминесценции эрбия в ней осуществляется за счет безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения с ионов иттербия (уровень ${}^2\text{F}_{5/2}$) на уровень ${}^4\text{I}_{11/2}$ ионов эрбия (см. Рис 1.) Для эффективной генерации в системе Yb-Er должен удовлетворяться целый ряд требований, среди которых следует выделить:

1. Возможно более быстрая (не более чем за единицы микросекунд) релаксация возбуждений ионов эрбия с уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$ на верхний лазерный уровень ${}^4\text{I}_{13/2}$. Если релаксация на верхний лазерный уровень недостаточно быстра, то паразитные процессы обратного переноса энергии (с уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$ Er^{3+} назад к ионам иттербия) и кумуляции, или ап-конверсии, т.е. переноса энергии с ионов иттербия к ранее возбужденным ионам эрбия, в частности по схемам $\text{Yb}^{3+} ({}^2\text{F}_{5/2} - {}^2\text{F}_{7/2}) \rightarrow \text{Er}^{3+} ({}^4\text{I}_{13/2} - {}^4\text{F}_{9/2})$ и $\text{Yb}^{3+} ({}^2\text{F}_{5/2} - {}^2\text{F}_{7/2}) \rightarrow \text{Er}^{3+} ({}^4\text{I}_{11/2} - {}^2\text{H}_{11/2})$, могут привести к резкому снижению эффективности заселения верхнего лазерного уровня, и даже к полной невозможности достижения инверсии на рассматриваемом лазерном переходе.

2. Высокий, в идеале - близкий к единице, квантовый выход люминесценции на лазерном переходе или, другими словами, близость наблюдаемого времени затухания 1.5 мкм люминесценции эрбия к радиационному времени (типичное значение которого в оксидных матрицах - $7 \div 8$ мс).

До самого недавнего времени практически единственным типом материалов, в котором была реализована эффективная 1.5 мкм генерация в системе иттербий-эрбий, являлись фосфатные стекла. Это объясняется тем, что релаксационные свойства ионов эрбия в фосфатных стеклах хорошо согласуются с указанными двумя спектрально-кинетическими требованиями. Кристаллических же матриц с аналогичным сочетанием свойств известно не было.

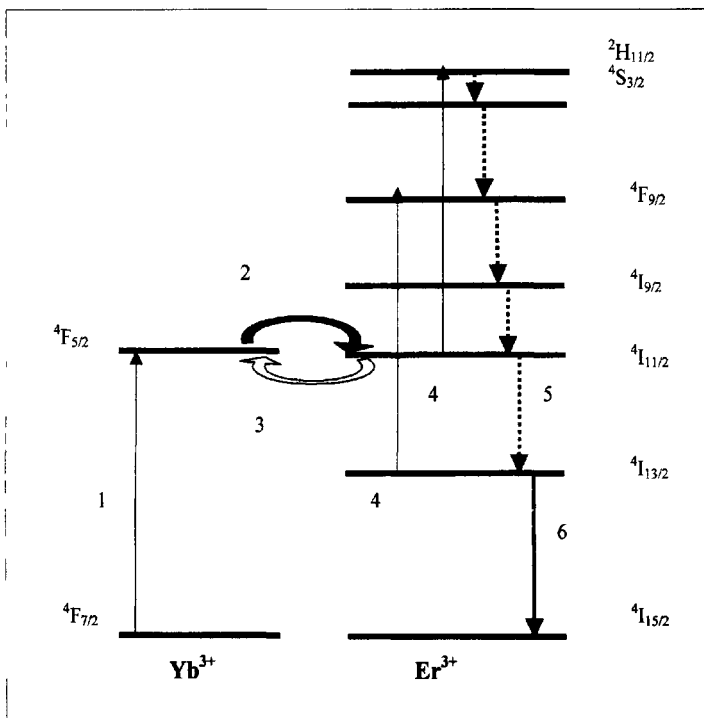


Рис 1. Схема уровней и основных процессов трансформации энергии в иттербий-эрбиевых лазерных средах.

1. - оптическая накачка;
- 2,3 - прямой и обратный безызлучательный перенос возбуждений между ионами иттербия и эрбия;
- 4 - ап-конверсионные (кумулятивные) процессы;
- 5 - многофононная релаксация;
- 6 - генерирующий переход.

Основной недостаток стекол как лазерных сред по сравнению с кристаллами - низкая теплопроводность и, как следствие, легкость теплового разрушения. Это обстоятельство ограничивает среднюю мощность генерации лазеров на эрбиевых фосфатных стеклах типичным значением в $0.3\div 0.5$ Вт на погонный сантиметр длины активного элемента, и особенно существенно для лазеров с непрерывной накачкой. В связи с этим, одной из задач, поставленных в диссертации, явился поиск **эффективных иттербий-эрбиевых лазерных сред, как стеклообразных, так и кристаллических, способных генерировать без разрушения более высокую среднюю мощность.**

Разумеется, проблема эта в равной степени актуальна для лазеров как с диодной, так и с ламповой накачкой. Однако в процессе работы выяснилось, что учет специфики диодно-накачиваемых лазеров позволяет существенно продвинуться в ее решении.

При поиске путей решения этой задачи в рамках диссертации использовались **два существенно различных подхода.**

Первый подход состоял в разработке **специальных высокопрочных стекол для иттербий-эрбиевых лазеров с диодной накачкой.** Методологическим приемом, позволившим достичь положительного результата при выборе их составов, явилось использование не чисто фосфатных, а смешанных (алюмо-боро-фтор-фосфатных) композиций, структурно аналогичных не чисто фосфатным, а более «связанным», механически и химически стойким силикатным стеклам. Разработанное в результате лазерное стекло (названное в англоязычных публикациях [34-37] Strong Erbium Laser Glass, SELG) оказалось способно, в отличие от ранее известных стекол, выдерживать без разрушения непрерывную накачку излучением существующих на сегодняшний день одиночных лазерных диодов. Совокупность термомеханических и спектрально-кинетических особенностей разработанного стекла четко определила область его применения - микролазеры повышенной средней мощности с непрерывной продольной диодной накачкой. Задача создания этого стекла потребовала разработки специальной технологии для его синтеза, во многом отличной от существующих технологий синтеза фосфатных лазерных стекол.

Другой подход к решению той же проблемы - создания активного материала для иттербий-эрбиевых лазеров с высокой средней мощностью состоял в **поиске кристаллической среды** для этой цели. Следует отметить, что

предпринимавшиеся различными исследователями попытки создания такой активной среды до самого последнего времени не приводили к практически значимому результату: эффективность генерации в предлагаемых кристаллах многократно уступала эффективности лазеров на стекле.

В рамках настоящей диссертации была поставлена задача **исследования спектрально-кинетических особенностей и генерационных возможностей новой кристаллической Yb-Er лазерной среды оксибората гадолиния - кальция: $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ (GdCOB)**. Стимулами постановки этой работы явились: удовлетворительное выполнение в этом материале спектрально-кинетических требований к Yb-Er среде, его технологичность и высокая (сравнительно со стеклами) теплопроводность. В результате впервые в микрочип-лазере на кристаллическом Yb-Er материале был достигнут (как в свободной генерации, так и при модуляции добротности) КПД генерации, близкий к КПД лазеров на стекле [42, 44]. Кристаллы GdCOB были выращены сотрудниками сектора «фоторефрактивные кристаллы» НЦЛМТ ИОФРАН.

Для обеспечения эффективного поглощения излучения диодных лазеров в малогабаритных активных элементах во многих случаях (прежде всего в миниатюрных лазерах с поперечной накачкой линейками лазерных диодов) требуется повышенная (до $3\text{--}4 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и более) концентрация ионов иттербия. Кроме того, из малости коэффициента усиления в миниатюрных диодно-накачиваемых лазерных элементах, который составляет не более нескольких процентов на проход, проистекает необходимость использования также и повышенных (по сравнению с типичными значениями в стеклах для ламповой накачки) концентраций ионов эрбия. **Задача создания таких концентрированных иттербий-эрбиевых лазерных стекол** потребовала решения ряда проблем, как фундаментального физического, так и технологического свойства.

Из проблем фундаментального характера следует отметить проблему развития в концентрированных иттербий-эрбиевых лазерных стеклах дополнительного канала потерь энергии. Имеются в виду потери энергии инверсной населенности, вызванные безызлучательным взаимодействием возбужденных ионов эрбия между собой (процесс $\text{Er}^{3+} ({}^4\text{I}_{13/2} - {}^4\text{I}_{9/2}) \rightarrow \text{Er}^{3+} ({}^4\text{I}_{13/2} - {}^4\text{I}_{15/2})$), незаметные в стеклах для ламповой накачки с невысокой концентрацией ионов эрбия $(1.5\text{--}3) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, но весьма существенные при генерации в стеклах с содержанием эрбия более $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Из проблем технологического свойства следует выделить проблему поиска составов стекол на фосфатной основе, допускающих введение высоких

концентраций иттербия без резкого роста склонности стекла к заруханию (кристаллизации).

В результате проведенных работ был предложен технологичный, устойчивый к кристаллизации состав стекла на фосфатной основе, допускающий введение до 4.2×10^{21} см⁻³ иттербия. Его спектрально-кинетические свойства позволяют варьировать в широких пределах концентрацию эрбия. Наиболее выигрышной областью применения этого стекла оказались миниатюрные лазеры с импульсной поперечной накачкой диодными линейками [15,25, 31].

Как уже упоминалось во Введении, большинство применений полупроводниковых **Yb-Er** лазеров требует осуществления режима модуляции добротности. Для миниатюрных лазеров с диодной накачкой наиболее интересны пассивные средства управления генерацией. Следует заметить, что до сравнительно недавнего времени насыщающихся поглотителей или другого типа пассивных модуляторов добротности для 1.5 мкм эрбиевых лазеров не существовало. **Работы по поиску пассивных затворов для лазеров 1.5 мкм диапазона** были начаты нами в 1990 г. Тогда были предложены и исследованы первые **пассивные модуляторы добротности для эрбиевых лазеров - германиевые зеркала и концентрированные эрбий-тербиевые стекла** [3, 4]. Лазеры с такими модуляторами показали неплохую эффективность, но ряд их недостатков сделал практическое использование неудобным.

Полученные первые положительные результаты стимулировали как дальнейший поиск в рамках настоящей диссертации, так и работы других исследователей. За прошедшее с тех пор время появился целый ряд материалов и устройств пассивного типа для управления генерацией (модуляции добротности и синхронизации мод) полупроводниковых эрбиевых лазеров. Однако не все из них оказались в достаточной мере практически пригодными. Одна из причин этого - малое усиление в эрбиевых лазерах и связанная с этим высокая чувствительность ко всякого рода внутривибрационным потерям.

Результатом же поисковых работ в рамках настоящей диссертации, в 1999 г. явилось **предложение использовать в качестве пассивного модулятора 1.5 мкм эрбиевых лазеров насыщающихся поглотителей из кристаллов легированной кобальтом алюмомагниево-шпинели** (стехиометрическая формула **MgAl₂O₄**).

В первых же генерационных экспериментах (в лазере на эрбиевом стекле с ламповой накачкой) при помощи кристалла шпинели с кобальтом был осуществлен режим пассивной модуляции добротности с эффективностью,

приближающейся к эффективности активных способов модуляции. По совокупности физико-механических, технологических и лазерных свойств кристаллы легированной кобальтом алюмомагниевого шпинели оказались наилучшим из известных на сегодняшний день пассивных модуляторов добротности лазеров на эрбиевых стеклах. Кроме того была показана применимость (с определенными оговорками) этих кристаллов для пассивной модуляции добротности неодимовых лазеров с длинами волн генерации 1.32÷1.44 мкм [23,24,26-28].

Дальнейшими задачами диссертации явилось исследование генерационных возможностей разработанных активных и пассивных материалов, создание на их основе диодно-накачиваемых лазеров различных схем с ранее недостижимыми характеристиками.

Научная новизна.

1. Проведены исследования процессов трансформации энергии оптического возбуждения в системе иттербий-эрбий в широкой области составов стекол на основе нескольких стеклообразователей и в широкой области концентраций активаторов. Установлено, что совокупность спектрально-кинетических требований к **Yb-Er** лазерным средам может хорошо выполняться в стеклах со смешанным стеклообразователем (силико-боро-фосфатных и алюмо-боро-фтор-фосфатных)
2. Впервые предложен устойчивый к кристаллизации состав **Yb-Er** для лазерных стекол (на силико-боро-фосфатной основе), включающих до 4.2×10^{21} см⁻³ ионов иттербия, при сохранении высокого квантового выхода люминесценции эрбия, и обладающих при этом хорошими технологическими свойствами и влагостойкостью.
3. Впервые предложен состав (на алюмо-боро-фтор-фосфатной основе) для иттербий-эрбиевых лазерных стекол, обладающих уникальным сочетанием высоких термомеханической и химической стойкости со спектрально-кинетическими и генерационными свойствами, необходимыми для диодно-накачиваемых 1.5 мкм микролазеров. Разработана нестандартная технология синтеза таких стекол с высоким качеством.
4. Впервые предложены и использованы в качестве матрицы для **Yb-Er** лазеров кристаллы оксибората гадолиния **Ca₄GdO(BO₃)₃**.

Проведены их спектрально-люминесцентные исследования. Впервые на кристаллическом **Yb-Er** микрочип-лазере достигнут КПД, близкий к типичным значениям КПД стеклянных лазеров (15% по наклону).

5. Предложены хронологически первые средства пассивной модуляции добротности 1.5 мкм эрбиевых лазеров: германиевые зеркала и **Er-Tb** стекла. Исследованы особенности этих модуляторов и характеристики лазеров с их использованием .
6. Предложены в качестве пассивных модуляторов добротности 1.5 мкм эрбиевых лазеров легированные ионами кобальта кристаллы алюмомагниевого шпинели. Исследованы спектрально-кинетические характеристики этих кристаллов, выращенных различными способами. Показано, что кристаллы шпинели с кобальтом являются по совокупности свойств наилучшим на сегодняшний день типом пассивного модулятора для лазеров на эрбиевом стекле. Кроме того, показана также применимость этого материала также и для модуляции добротности неодимовых лазеров с длинами волн генерации 1.3-1.44 мкм .
7. На основе разработанного нового поколения активных и пассивных материалов и с использованием новых схемных решений создан ряд диодно-накачиваемых лазеров с ранее недоступными характеристиками. В частности:
 - В лазере с импульсной поперечной накачкой достигнуты рекордные характеристики: до 50 мДж (в 50 нс импульсе) при абсолютном КПД 2.46%.
 - В микролазерах с непрерывной продольной накачкой: в непрерывном режиме достигнута выходная мощность 353 мВт; впервые осуществлены режим активной модуляции добротности (НПВО-затвором) и пассивной модуляции кристаллами легированной кобальтом шпинели.
 - Предложена монокристаллическая неразьюстируемая схема микрочип-лазера. На таком микрочипе при использовании разработанного высокопрочного стекла и пассивного затвора из шпинели с кобальтом получены рекордные средние мощности генерации цуга гигантских импульсов: 150 мВт при диодной накачке и 180 мВт при накачке **Ti:Al₂O₃** лазером.

Практическая ценность

Создано новое поколение иттербий-эрбиевых лазерных активных сред, специально предназначенных для диодно-накачиваемых 1.5 мкм лазеров. В их числе:

1. Концентрированные стекла с концентрацией РЗИ до 4.2×10^{21} см⁻³. Главная их область применения: лазеры с импульсной поперечной накачкой диодными линейками.

2. Высокопрочные стекла для продольно-накачиваемых микролазеров с повышенной средней мощностью. Разработана оригинальная технология их синтеза в объемах до 0.5 л.

3. Один из немногих эффективных кристаллических иттербий-эрбиевых лазерных материалов - **оксидборат гадолиния-кальция $GdCa_4O(BO_3)_3$** .

Предложены насыщающиеся поглотители для пассивной модуляции добротности 1.5 мкм эрбиевых лазеров на основе **кристаллов легированной кобальтом шпинели**, которые оказались на сегодняшний день наилучшими по совокупности свойств пассивными затворами для лазеров этого типа. Их эффективность оказалась близкой к эффективности затворов активного типа. Кроме того, выявлена ограниченная применимость этого материала и для пассивной модуляции добротности 1.3-1.44 мкм неодимовых лазеров.

Активные и пассивные материалы, разработанные в рамках диссертации, создали элементную базу для диодно-накачиваемых 1.5 мкм микролазеров. Использование перечисленных активных и пассивных материалов, в совокупности с предложенными схемными решениями, позволило существенно повысить (по сравнению с известными из литературы) их выходные характеристики (КПД, энергию в импульсе, среднюю мощность). На базе изложенных в диссертации исследований разработан, выпущен и успешно эксплуатируется ряд лазерных приборов.

Апробация работы:

Материалы диссертации докладывались на многочисленных международных и отечественных конференциях:

- Advanced Solid State Lasers (Advanced Solid State Photonics) в 1991, 1992, 1994, 1997, 1998, 1999 гг., трижды в 2000 г., дважды в 2001 г., в 2002, 2003, 2004 и 2005 гг.;
- SPIE International Conference on High power lasers 1991 г., США;

- LASERS'1991 (Munich, Germany);
- Всесоюзной конф. «Спектроскопия лазерных материалов», Краснодар, 1991 г.,
- CLEO в 1998 г. и CLEO/EQEC Europe в 2003 г.;
- «Ecology of cities » (Греция,Родос) в 1998 г.;
- «Photonics West - LASE» в 1998 г.;
- IQEC-LAT (Москва) в 2002 г.;
- CELO'2004, С.-Петербург.

Личный вклад автора:

Изложенные в диссертации результаты получены СЕ.Сверчковым лично или в соавторстве при его определяющем участии.

Основная часть работы была проведена в лаборатории Концентрированных лазерных материалов НЦЛМТ ИОФРАН (зав.лаб. д.ф.-м.н. Денкер Б.И.) в тесном взаимодействии с к.ф.м.н. Галаганом Б.И. и к.х.н. Максимовой Г.В.

Большую положительную роль сыграло сотрудничество с рядом отечественных и зарубежных исследовательских групп, обладавших необходимым для запланированных исследований оборудованием. Среди них следует отметить:

Сектор «фоторефрактивные кристаллы» НЦЛМТ ИОФРАН (зав. сект, к.х.н. Ивлева Л.И., сотрудники Полозков Н.М, Воронина И.Е.), которыми была выращена серия легированных кристаллов оксибората кальция-гадолиния.

Лабораторию проф. F.Laurell(Physics Dept. of the Royal Institute of Technology, Стокгольм, Швеция), где совместно с Dr. G.Karlsson, Prof. F.Laurell, Dr. V.Pasiskevichius, Dr. J.Hellstrom были проведены многочисленные эксперименты с микролазерами на разработанных в лаб. КЛМ активных и пассивных материалах;

Компанию Kigre inc., США, совместно с которой были исследованы особенности работы кристаллов шпинели в лазерах с импульсной поперечной диодной накачкой;

Лабораторию физики Университета Бургундии (во Франции) и Отделение электронной инженерии Технологического Университета Крита (в Греции)

где совместно с Dr. E.Georgiou, Dr.O.Musset и Prof. J.-P. Voquillon был создан высокоэффективный моноимпульсный лазер с накачкой диодными линейками на разработанном в лаб. КЛМ концентрированном стекле;

Публикации

Основные материалы диссертации содержатся в 44 опубликованных научных работах.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех частей, заключения и двух приложений, а также списка литературы из 161 наименований. Общий объем диссертации составляет 238 стр., включая 43 рис.

Содержание диссертации.

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы общие цели и конкретные задачи работы, ее научная новизна и практическая ценность. Рассмотрена структура и содержание глав диссертации.

Часть I посвящена поиску составов и спектрально-кинетическим исследованиям новых классов лазерных материалов, легированных системой иттербий-эрбий: стекол на основе нескольких стеклообразователей и кристаллических матриц, специально предназначаемых для различного типа диодно-накачиваемых лазеров.

Часть II посвящена поиску и исследованию нелинейно-оптических эффектов в результате воздействия полуторамикронного лазерного излучения на различные материалы с целью созданию на этой основе средств пассивного управления излучением эрбиевых лазеров.

Часть III диссертации посвящена созданию диодно-накачиваемых лазеров на разработанных активных и пассивных материалах.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

В **Приложении 1** содержится описание технологий синтеза разработанных иттербий-эрбиевых лазерных стекол.

Приложение 2 представляет собой описание серийного лазерного прибора, разработанного на основе созданного в рамках диссертации экспериментального лазера.

Переходим к изложению содержания **первой части**.

Глава 1.1. «Концентрированное иттербий-эрбиевое лазерное стекло»

Соображения эффективности поглощения энергии накачки, сокращения порога генерации и габаритов лазера в случае монохроматической накачки (в полосу поглощения иттербия), во многих случаях требуют возможно большей концентрации Yb. Можно привести следующий яркий пример: исторически впервые мощная и эффективная генерация на иттербий-эрбиевых стеклах была получена при накачке неодимовыми лазерами ($\lambda=1.054$ мкм). Слабое поглощение иттербия на этой длине волны требовало возможно более высоких концентраций последнего, и в 1987 г. авторами из ИРЭ АН СССР [И.Л. Воробьев, В.П. Гапонцев, А.К Громов, А.А. Изъинев, П.И. Садовский. «Новые активные среды для эрбиевых минилазеров диапазона 1.5 мкм.» Тезисы Всесоюзной конференции «Оптика лазеров - 1987» Ленинград, 1987 г., стр. 242] было предложено использовать для этой цели боратное стекло, допускающее сверхвысокое содержание иттербия - до 7×10^{21} см⁻³. Это стекло обладало достаточно высоким (0.5 см⁻¹) коэффициентом поглощения на длине волны накачки.

Для диодно-накачиваемых лазеров также во многих случаях требуется возможно более высокая концентрация иттербия: ограниченная мощность диодов требует для обеспечения приемлемых порогов генерации минимизации объема активной среды. К сожалению, малое время жизни верхнего лазерного уровня эрбия в упомянутом боратном стекле (460 пкс), вызванное многофононным тушением люминесценции эрбия на колебаниях трехкоординированных ионов бора, делает применение такого стекла в лазерах с диодной накачкой явно нерациональным.

Поэтому нами и была поставлена задача поиска составов, синтеза и исследований концентрированных иттербий-эрбиевых лазерных стекол, не обладающих указанным недостатком.

Создание концентрированного лазерного стекла включало этапы:
- Поиска базового состава стекла, устойчивого к кристаллизации и к действию атмосферной влаги с максимально технологически возможным содержанием редкоземельных ионов и

Исследования процессов преобразования энергии в таких концентрированных стеклах (с учетом дополнительно возникающих в них механизмов преобразования энергии).

Поиску подходящего, устойчивого к кристаллизации и к действию атмосферной влаги, базового состава стекла и изучению его основных физико-химических свойств посвящен §1.1.1. Методологическим приемом, позволившим решить поставленную задачу, явилось использование не чисто фосфатных составов, а составов со смешанным стеклообразователем, в данном случае силико-боро-фосфатных. Был найден технологичный (допускающий синтез в объемах свыше 1 л) влагостойкий (категория «У» по ГОСТ 13917-82) состав, допускающий введение до 4.2×10^{21} см³ редкоземельных ионов. При такой концентрации иттербия коэффициент поглощения стекла в широкой спектральной области 0.9-1 мкм оказывается порядка 10 см⁻¹. Это удобно для малогабаритных (с поперечником активного элемента ~1 мм) лазеров с поперечной накачкой диодными линейками - отпадает необходимость точного подбора диодов в линейке по длине волны генерации и их термостатирования для стабилизации длин волн излучения диодов вблизи узкого максимума поглощения иттербия вблизи 975 нм. Пиковое же значение коэффициента поглощения на этой длине волны достигает 35 см⁻¹.

Из малости коэффициента усиления в миниатюрных диодно-накачиваемых лазерных элементах, который составляет не более нескольких процентов на проход, проистекает необходимость использования в стекле для диодной накачки также и повышенных (по сравнению с типичными значениями в стеклах для ламповой накачки) концентраций ионов эрбия. В таких стеклах (с содержанием эрбия около 10^{20} см⁻³ и более) возникает дополнительный канал потерь энергии инверсной населенности - безызлучательное взаимодействие возбужденных ионов эрбия между собой (процесс $\text{Er}^{3+} (^4\text{I}_{13/2} - ^4\text{I}_{9/2}) \rightarrow \text{Er}^{3+} (^4\text{I}_{13/2} - ^4\text{I}_{15/2})$.) Экспериментальным исследованиям и математическому описанию особенностей накопления и релаксации энергии инверсной населенности ионов эрбия в разрабатываемом концентрированном стекле посвящен §1.1.2.

«Экологической нишей» разработанного стекла, помимо малоупотребительных в наше время лазеров с накачкой ~1.06 мкм неодимовыми лазерами, являются особо малогабаритные диодно-накачиваемые микрочип-лазеры, а также (и это главное) - лазеры с импульсной поперечной накачкой линейками лазерных диодов.

Глава 1.2. диссертации посвящена разработке иттербий-эрбиевых лазерных стекол для непрерывно-накачиваемых лазеров, способных выдерживать без разрушения возможно более высокую среднюю мощность накачки. В соответствии с развиваемой концепцией создания специализированных лазерных материалов, требования к новому стеклу также были специализированы. А именно: при выборе состава не ставилась задача создания непременно универсального стекла, способного эффективно работать как при диодной, так и при ламповой накачке. Снятие последнего требования позволило намного улучшить его термостойкие свойства по сравнению с существующими аналогами - стеклами, разрабатывавшимися под ламповую накачку.

Известно, что свойства стекол на фосфатной основе могут быть существенно улучшены введением трехвалентных стеклообразующих ионов малого радиуса (B^{3+} и Al^{3+}). Введение бора способствует, прежде всего, резкому повышению твердости фосфатного стекла, а алюминия - химической устойчивости и теплопроводности. Указанные ионы, так же как и ионы P^{5+} , способны образовывать тетраэдрические комплексы с кислородом. Чередование в структуре стекла PO_4 - групп с BO_4 или AlO_4 - группами позволяет сформироваться прочной трехмерной сетке с четырьмя мостиковыми атомами кислорода в расчете на один PO_4 , BO_4 или AlO_4 -тетраэдр. Такая структура аналогична сетке SiO_4 - тетраэдров в значительно более прочных и химически устойчивых, чем фосфатные, силикатных стеклах. Поэтому при поиске базового состава высокопрочного иттербий-эрбиевого лазерного стекла методологическим приемом, явилось использование не чисто фосфатных, а смешанных (алюмо-боро-фосфатных) составов с большим содержанием бора и алюминия. Разумеется, безусловным требованием к стеклу явилось включение в его состав достаточно большого ($\approx 2 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$) количества иттербия.

В результате проведенного поиска был подобран состав, основные термомеханические свойства которого приведены в **Таблице 1**. Наиболее выдающиеся параметры выделены жирным шрифтом. Там же для сравнения приведены параметры коммерческого стекла марки **QX-Eg** от компании Kigre inc. (США), известного своей высокой прочностью. Для определения порога теплового разрушения стекол направленной монохроматической накачкой (последняя строка таблицы) было использовано излучение непрерывных диодных лазеров и лазера на сапфире с титаном (длина волны 970 нм), сфокусированные в пятно поперечником 80 мкм. Исследуемые образцы представляли собой полированные пластинки толщиной 1 мм.

Таблица 1. Параметры стекла SELG в сравнении с коммерческим стеклом марки QX/Er (Kigre inc., США).

параметр	QX/Er.	Разработанное стекло (SELG)
Тепловое расширение α (20-40 ⁰ C), ($\times 10^{-7}K^{-1}$)	82	72
dn/dT (20-40 ⁰ C), ($\times 10^{-7}K^{-1}$)	0	27
Термооптическая постоянная $W=dn/dT+\alpha(n-1)$, ($\times 10^{-7}K^{-1}$)	41	66
Теплопроводность (Вт/м·К)	0,85	0,83 \pm 0,04
Теплоемкость, Дж/см ³ ·К	-	2,06 \pm 0,05
Твердость, (кГс/мм ²)	435	702\pm30
Потеря массы в кипящей воде (10^{-5} г/см ² ·час)	5,2	<1
Группа кислотоустойчивости (ГОСТ 13917-82)	-	1
Температура деформации (⁰ C)	485	755
Стойкость к тепловому удару (⁰ C)	100-110	165-175
Поглощенная мощность диодной накачки, приводящая к разрушению стекла	~500	2000

Из **Таблицы** видно, что в условиях диодной накачки порог разрушения разработанного стекла приблизительно в 4 раза выше, чем у американского аналога. Обращает на себя внимание также необычный характер разрушения алюмо-боро-фосфатного стекла. Оно, в отличие от **QX/Er**, не растрескивается, а локально плавится. Таким образом, его тугоплавкость также оказывается немаловажным для лазерных применений свойством.

Примечательны также его весьма высокие (в классе стекол на фосфатной основе) твердость и влагостойкость. Забегая вперед, следует отметить также, что при выборе состава стекла удалось удовлетворить еще одному требованию: сделать его коэффициент термического расширения достаточно близким к КТР алюмомагниевого шпинели - материала для пассивной модуляции добротности. Близость КТР активного и пассивного лазерных элементов позволила впоследствии создать на их основе монолитную конструкцию микрочип-лазера.

Поскольку тепловая стойкость и механическая прочность созданного алюмо-боро-фосфатного стекла по всем параметрам существенно превысили характеристики аналогов, в англоязычных публикациях для этого материала было предложено наименование SELG (аббревиатура от Strong Erbium Laser Glass).

К сожалению, синтез стекла лазерного качества по ранее принятой у нас технологии оказался невозможен. Тугоплавкость и высокая вязкость расплава препятствовала эффективному его осветлению и обезвоживанию: стекло включало многочисленные мелкие пузыри, а содержание ОН-групп в нем даже после длительной (двое суток) варки оставалось неприемлемо большим. Поэтому для синтеза стекла с лазерным качеством (т.е. с высокой оптической однородностью и с низким содержанием ОН-групп, соответствующим поглощению на длине волны 3.33 мкм не более 1.4 см^{-1}), пришлось фактически создавать новую технологию синтеза, описанную в **Приложении 1** к диссертации.

Исследование спектрально-кинетических свойств системы **Yb-Er** в SELG показало, что разработанный материал вполне соответствует требованиям к эффективной лазерной среде, с одной, однако, существенной особенностью. В нем аномально сильно выражено (по сравнению с известными фосфатными лазерными стеклами) миграционно-ускоренное тушение люминесценции иттербия на остаточных ОН-группах. Обычно в обезвоженных фосфатных

иттербий-эрбиевых лазерных стеклах указанный канал потерь энергии несущественен. В SELG же конкуренция процессов переноса энергии к ионам эрбия и на OH-группы приводит к ограничению на минимально допустимую концентрацию эрбия. При указанном выше технологически достигнутом уровне обезвоживания нижним пределом допустимых концентраций эрбия является величина $(5+7) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Это в несколько раз больше, чем в стеклах для ламповой накачки, при которой это стекло оказалось малоэффективным. Однако приведенное концентрационное ограничение как раз совпадает с нижней границей области концентраций, используемой в **микрочип-лазерах с непрерывной продольной диодной накачкой**.

Таким образом, совокупность высоких термомеханических свойств и спектрально-кинетических особенностей нового стекла делает его **весьма и исключительно подходящим** для этого типа лазеров с повышенной средней мощностью. Впрочем, дальнейшее совершенствование технологии обезвоживания может позволить расширить область применения этого стекла.

Изложенный в **Главе 1.3** альтернативный подход к решению проблемы создания активного материала для иттербий-эрбиевых лазеров с высокой средней мощностью состоит в поиске кристаллической среды для этой цели. Сложность проблемы состоит в необходимости одновременного совмещения многих разнородных требований, предъявляемых к таким кристаллам, что длительное время никому не удавалось. Лишь к 2003 году в литературе появились сообщения об эффективной генерации на ${}^4I_{13/2} - {}^4I_{15/2}$ переходе ионов эрбия при накачке через иттербий в кристалле оксибората иттрия-кальция $\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ (YCOB: $\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$). В задачи настоящей работы входило исследование возможностей другого кристалла аналогичной структуры - оксибората гадолиния - кальция: $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ (GdCOB). Одним из стимулов постановки этого исследования явилась меньшая температура плавления кристалла с гадолинием, что позволило использовать для выращивания кристаллов более доступную «платиновую», а не «иридиевую» технологию. Первым этапом спектрально-кинетических исследований кристалла GdCOB явилось измерение двух критических для **Yb-Er** лазерной среды параметров - времени жизни возбужденных состояний ионов Er^{3+} . Время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ оказалось равным 1.2 ± 0.02 мс, что близко к соответствующему значению для иттриевых кристаллов и соответствует квантовому выходу люминесценции около 15%. Что касается времени жизни состояния ${}^4I_{11/2}$, то, по причине его малости, точное измерение оказалось затруднительным. Образец кристалла с

Ег возбуждался 2-й гармоникой неодимового лазера ($\lambda=0.53$ мкм), и при помощи ФЭУ и монохроматора регистрировалась 0.98 мкм люминесценция с уровня $^4I_{11/2}$. Кинетика люминесценции обладала временем разгорания около 200 нс за счет конечного времени релаксации с вышележащих уровней, а дальнейший распад происходил с характерным временем 250 нс. Поскольку времена разгорания и релаксации сравнимы, определенную таким образом величину времени жизни следует рассматривать лишь как оценку сверху. Тем не менее, установлено, что она, по крайней мере, на порядок меньше, чем в фосфатных стеклах. Это обстоятельство практически исключает возможность влияния обратного переноса и ап-конверсии с уровня $^4I_{11/2}$ эрбия на характеристики лазерной генерации в **GdCOB:Yb,Er**.

Прямой же перенос энергии от иттербия к эрбию в **GdCOB** оказался процессом быстрым и эффективным. Оказалось, что в этом кристалле, также как и в некоторых фосфатных стеклах, скорость переноса растет приблизительно пропорционально квадрату концентрации иттербия. Причем при близких абсолютных значениях скорости переноса в обоих материалах, квантовая эффективность передачи энергии выше в кристалле по причине вдвое большего радиационного времени жизни ионов иттербия в нем (2.4 мс против ~1.2 мс в стеклах).

В целом результаты спектрально-кинетических исследований позволили надеяться на получение эффективной 1.5 мкм генерации в **GdCOB** при диодной накачке.

Часть II диссертации посвящена поиску и исследованию средств пассивного управления излучением полуторамикронных эрбиевых лазеров. Как отмечалось выше, на момент начала этих исследований (~1990 г.) пассивных средств управления генерацией для лазеров полуторамикронной области спектра известно не было. Описанные в **§II.1** и **§II.2** предложения использовать для пассивной модуляции добротности эрбиевых лазеров германиевые зеркала и эрбий-тербиевые стекла явились хронологически первыми примерами пассивных модуляторов добротности для лазеров на эрбиевых стеклах. Лазеры с такими модуляторами показали неплохую эффективность, но для модуляции добротности лазера **Er-Tb** стеклом потребовалось использование сложных оптических схем с острой фокусировкой излучения в пассивном затворе, а полупроводниковые зеркала легко повреждались возникающими гигантскими импульсами. Эти первые работы послужили стимулом для дальнейшего поиска пассивных средств управления генерацией эрбиевых лазеров как нашей, так и другим

исследовательским группам. За прошедшее с тех пор время различными исследователями был предложен целый ряд средств и способов пассивной модуляции добротности и синхронизации мод для 1.5 мкм эрбиевых лазеров. Однако и из них не все оказались одинаково практически пригодными.

В 1999 г. нами было предложено [23, 24] использовать для пассивной модуляции 1.54 мкм эрбиевых лазеров легированные кобальтом кристаллы магний-алюминиевой шпинели (стехиометрическая формула $MgAl_2O_4$).

А priori их преимуществами являются:

- а) Кубическая структура кристаллов шпинели, т.е. их оптическая изотропия.
- б) Высокая механическая и лучевая прочность.
- в) Технологичность. Кристаллы могут быть выращены целым рядом способов: раствор-расплавным, по Чохральскому, а также по Вернейлю. Последний способ является наименее затратным, однако состав выращиваемых по Вернейлю кристаллов существенно нестехиометричен и описывается формулой $MgO \cdot (2.5 + 3.5)Al_2O_3$.

Спектр поглощения ионов кобальта в шпинели представлен на Рис. 2.

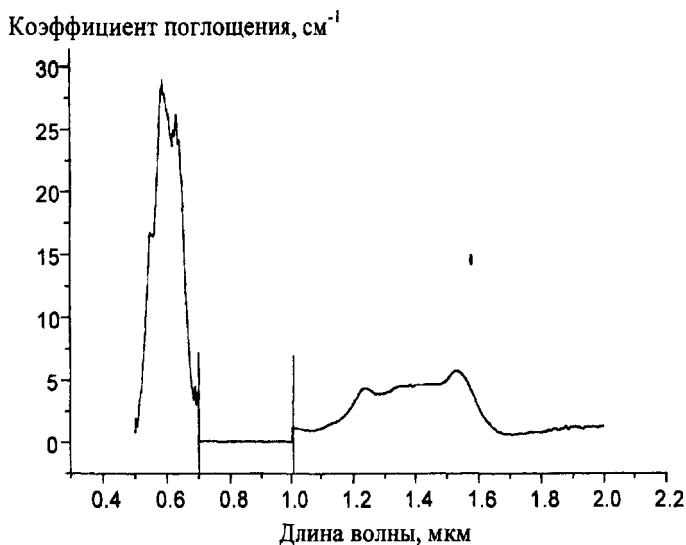


Рис.2. Обзорный спектр поглощения ионов кобальта в алюмомагниево-шпинели.

Оценка сечения поглощения на 1.54 мкм дала значение в несколько десятков раз выше сечения вынужденного испускания ионов эрбия в лазерном стекле. Это дало основания надеяться, что для осуществления режима модуляции добротности эрбиевых лазеров не понадобится фокусировки лазерного излучения в затвор.

Важнейшим параметром насыщающихся поглотителей является скорость их релаксации в основное состояние. Поскольку релаксация ионов кобальта в шпинели происходит безызлучательно, для измерения ее скорости была предложена следующая методика:

После возбуждения образца коротким 1.54 мкм лазерным импульсом регистрировалась кинетика пропускания образцом зондирующего света ксеноновой лампы. Экспериментально более удобной для этого оказалась не 1.5 мкм, а ~ 0.6 мкм полоса поглощения ионов кобальта. Во-первых, она значительно интенсивнее. Во-вторых, в этой области можно применить быстрый ФЭУ. Кроме того, ее легко отделить от длины волны возбуждения светофильтрами. Кинетика релаксации просветленного состояния оказалась экспоненциальной с постоянной времени 200 ± 20 нс, т.е. в несколько раз больше типичной длительности гигантских импульсов, что в большинстве случаев удобно.

Первые же лазерные эксперименты показали, что шпинель с кобальтом является весьма эффективным модулятором добротности лазеров на эрбиевом стекле. Так, в лазере с ламповой накачкой с ее помощью была достигнута выходная энергия под 300 мДж, а в лазере с поперечной диодной накачкой - 20 мДж.

Результаты сравнения модуляционных свойств шпинели с кобальтом и кристаллов флюорита с ураном, полученные совместно с исследователями компании Kigre inc.(США), показали явное преимущество шпинели.

Было также проведено сравнение эффективностей пассивного модулятора на основе шпинели с кобальтом и активного затвора на нарушенном полном внутреннем отражении. При активной модуляции добротности выходная энергия лазера оказалась всего на 20% выше, чем при пассивной в идентичных условиях. Эти и многие другие опыты позволяют утверждать, что кристаллы алюмомагниево-кобальтовой шпинели являются по совокупности свойств наилучшим, более того - практически идеальным материалом для пассивной модуляции добротности эрбиевых лазеров на стекле. Это утверждение справедливо и для кристаллов, выращенных

наименее затратным методом Вернейля, хотя эти кристаллы имеют некоторые спектроскопические особенности, связанные с отклонением их состава от стехиометрии и с особенностями технологии выращивания.

Как видно из спектра, полоса поглощения ионов кобальта в шпинели хорошо перекрывает и область длин волн генерации неодимовых лазеров 1.3-1.44 мкм. Однако сечение вынужденного испускания неодима в кристаллических матрицах может быть на порядок выше, чем у эрбия, а сечение поглощения ионов кобальта здесь чуть меньше. То есть, соотношение сечений может быть менее благоприятным. Так, в эксперименте с лазером на кристалле калий-гадолиниевого вольфрамата с неодимом $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$ (КГВ) оказалось, что при использовании резонатора, образованном плоскими зеркалами, модуляции добротности не происходит. Однако уже при слабой фокусировке излучения в затвор (диаметр пучка сжимался вдвое) были получены гигантские импульсы длительностью 300 нс и энергией 17 мДж. Более благоприятного соотношения сечений можно было ожидать при модуляции добротности неодимовых кристаллических лазеров, генерирующих на слабых переходах в области 1.4 мкм, и при модуляции добротности -1.3 мкм лазеров на стекле.

Так, при введении в «плоский» резонатор лазера с длиной волны $\lambda=1.44$ мкм на АИГ: Nd^{3+} пластинки шпинели с кобальтом, лазер начинал генерировать гигантские импульсы с энергией около 3 мДж. По-видимому, это - первая демонстрация режима модуляции добротности неодимовых лазеров с этой длиной волны. Сложность его осуществления объясняется конкуренцией с намного более сильными переходами ($\lambda=1.06; 1.32$ мкм).

Так же был осуществлен режим модуляции добротности 1.34 мкм лазера на неодимовом стекле. Были получены импульсы с энергией 10 ± 1 мДж.

Таким образом, была установлена ограниченная применимость кристаллов шпинели с кобальтом и для пассивной модуляции добротности 1.3-1.44 мкм неодимовых лазеров.

Часть III диссертации посвящена исследованию генерационных возможностей новых разработанных активных и пассивных материалов и созданию на их основе диодно-накачиваемых лазеров.

Конструктивно иттербий-эрбиевые лазеры с диодной накачкой на объемных элементах можно довольно четко разделить на 2 типа: лазеры с поперечной

импульсной накачкой диодными линейками и микролазеры с продольной накачкой излучением одного (или нескольких) лазерных диодов. В последнем случае (при диаметре накачиваемой области порядка 100 мкм) легко осуществляется непрерывный режим генерации.

Глава Ш.1 посвящена лазерам первого типа, для которого было разработано концентрированное стекло, описанное в **Главе I.1**. Активные элементы таких лазеров имеют, как правило, цилиндрическую форму, поперечник 1-3 мм и длину порядка сантиметра. Мощность диодных линеек, требующаяся для их накачки, должна составлять сотни Вт. До настоящего времени стоимость таких диодных линеек остается весьма высокой. Поэтому лазерные эксперименты проводились в тесном сотрудничестве с рядом исследовательских групп в Российской Федерации, США, Греции и Франции, обладавших необходимыми для этой цели источниками накачки. Элементами новизны, позволившими существенно повысить характеристики лазеров по сравнению с аналогами, явились:

Первое - применение концентрированного иттербий-эрбиевого стекла. Это позволило повысить эффективность накачки и смягчить требования к стабильности по длинам волн диодов в линейках накачки.

Второе - применение в такого типа лазере модулятора добротности на нарушенном полном внутреннем отражении.

***Примечание:** Преимущества НПВО-затворов (малые потери, высокая лучевая прочность, способность модулировать излучение любой поляризации в широком диапазоне длин волн, достаточное для 1.5 мкм эрбиевых лазеров быстрое действие) были подробно исследованы в кандидатской диссертации автора.*

Характеристики одного из таких лазеров [31] сведены в **Таблице 2**. На момент публикации (в 2001 г.) выделенные в таблице жирным шрифтом параметры (дифференциальный и абсолютный КПД, выходная энергия при модуляции добротности) в несколько раз превосходили все известные из литературы параметры моноимпульсных **Yb-Er** лазеров с диодной накачкой. Полученные параметры генерации позволяют заявить о достижении качественно нового уровня развития моноимпульсных иттербий-эрбиевых лазеров с диодной накачкой.

Таблица 2. Параметры лазера с импульсной поперечной диодной накачкой.

Параметр	Режим работы и конфигурация резонатора	Значение
Размеры АЭ, мм		Ø3×12
Концентрация активаторов, см ⁻³		Уб: 4×10^{21} Ег: 5×10^{19}
Выходное зеркало		R=78%
Дифференциальный КПД, %	Свободная генерация (без модулятора в резонаторе)	20.5
	Модуляция добротности НРВО -затвором	5.4 (в области порога)
Максимальный абсолютный КПД, %	Модуляция добротности НРВО -затвором	2.46
Максимальная выходная энергия, мДж	Свободная генерация (без модулятора в резонаторе)	360
	Модуляция добротности НРВО -затвором	50

Глава III.2 диссертации посвящена созданию и исследованию лазера с непрерывной продольной накачкой. Лазеры этого типа весьма малогабаритны: типичные размеры активной области - порядка 100 мкм в поперечнике и 1 мм в длину. В связи с этим они характеризуются очень небольшим коэффициентом усиления (единицы процентов на проход). Это обуславливает чрезвычайно высокие требования ко всем элементам резонатора, в частности, к модуляторам добротности. К моменту, когда в рамках диссертации была начата работа с такими лазерами (1998 г.), средств модуляции добротности таких микролазеров практически не существовало (если не считать механических задвижек). Мощность таких лазеров составляла 40-60 мВт, и ограничивалась тепловым разрушением стекла. В связи с этими обстоятельствами, основными поставленными в работе задачами явились: исследование возможностей активной и пассивной модуляции эрбиевых микролазеров и повышение их мощности за счет использования новых активных материалов. Значительная часть этих экспериментов также выполнялась в тесном сотрудничестве с другими исследовательскими группами: в Германии и, особенно, в Швеции.

Поскольку коэффициент усиления в эрбиевых микролазерах составляет единицы процентов, помещение затвора в резонатор обычным образом может привести к недопустимо большим потерям. Во избежание этого была предложена [25] специальная оптическая схема. Ее особенностью является промежуточное полупрозрачное зеркало, нанесенное на активный элемент со стороны НПВО-затвора. НПВО-затвор в данной схеме выполнял как функцию модулятора добротности, так и функцию элемента, осуществляющего пространственно-временное разделение пучков излучения накачки и генерации. При подходящих значениях параметров резонатора в таком лазере были получены импульсы с пиковой мощностью 500-600 Вт и длительностью 10-12 нс, т.е. практически впервые был осуществлен режим активной модуляции добротности микролазеров на иттербий-эрбиевом стекле с продольной накачкой. Частота повторения импульсов могла достигать кГц. К сожалению, ресурс НПВО-затворов составляет всего несколько миллионов срабатываний и при такой частоте исчерпывается в несколько минут. Другим явным недостатком НПВО-затвора для микролазеров явились его габариты, несопоставимые с размерами активной зоны.

По этим причинам для продольно-накачиваемых микролазеров пассивные затворы намного более предпочтительны. Ранее для их пассивной модуляции добротности были опробованы легированные Co^{2+} кристаллы гексаалюмината лантана-магния (LMA). Особенностью этого материала является дихроизм, из-за чего микрорезонатор лазера должен был содержать

поляризующий элемент. Это и весьма технически непросто и приводит к дополнительным оптическим потерям. Кубические кристаллы шпинели лишены этого недостатка. В диссертации подробно описаны спектрально-кинетические особенности работы микролазеров различных схем с модуляцией кристаллами шпинели и получены гигантские импульсы длительностью до 2.3 нс. Их пиковая мощность достигла 2 кВт. Однако средняя мощность генерации при использовании «обычных» лазерных стекол ограничивалась 60-70 мВт из-за разрушения стекла излучением накачки.

Выявление этого ограничения и послужило стимулом разработки нового высокопрочного стекла SELG. Была поставлена задача создания на нем микролазера возможно большей средней мощности с модуляцией добротности резонатора. В итоге была предложена [35, 36] неразъюстируемая монокристаллическая оптическая схема микрочип-лазера, изображенная на **Рис. 3**. Активный и пассивный элементы в нем жестко соединены друг с другом оптическим контактом по поверхности соприкосновения. На наружные поверхности пластинок нанесены зеркала резонатора.

Высокая теплопроводность шпинели и близость ее коэффициента теплового расширения к КТР стекла SELG сделали возможным ее использование в данной конструкции в качестве теплового радиатора.

Генерационные исследования такого микрочип-лазера проводились как при накачке лазерным диодом, так и при накачке непрерывным $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазером. Диаметр накачиваемой области составлял 80-100 мкм. Максимальная средняя мощность генерации составила 150 мВт при диодной накачке и 180 мВт при накачке $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ - лазером. Эти значения, по-видимому, являются рекордными для режима модуляции добротности. Никаких лучевых или термомеханических повреждений лазерного стекла, шпинели или оптических покрытий при работе лазера не наблюдалось.

Дифференциальный КПД как с диодной накачкой, так и с накачкой $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазером достигал 15%. На базе описанного экспериментального устройства разработан и выпускается серийный прибор, описанный в **Приложении 2** к диссертации.

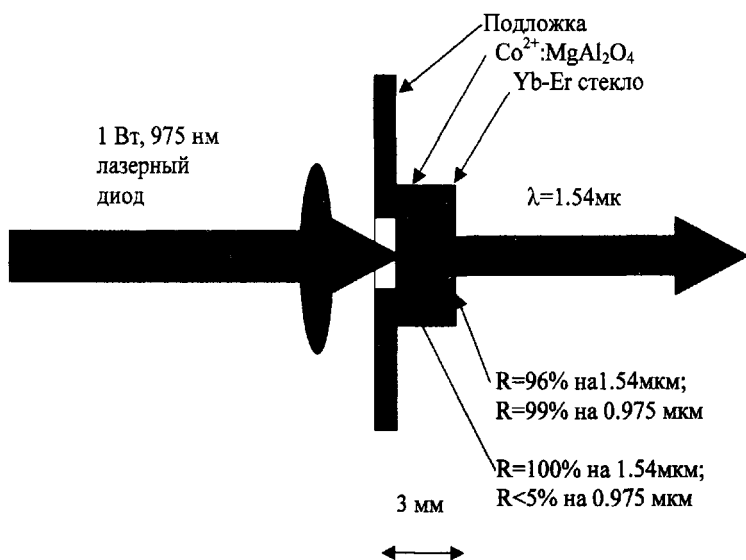


Рис.3. Схема монолитного нераз्यюстируемого микрочип-лазера на высокопрочном Yb-Er стекле SELG и $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$.

Дальнейшего повышения средней мощности генерации можно ожидать при переходе от стеклообразных к кристаллическим активным средам. Генерационные исследования кристаллов GdCOB [42, 44] проводились в микрочип-конфигурации (резонаторные зеркала наносились непосредственно на кристалл). Использовалось несколько различных источников накачки: титан-сапфировый лазер, одиночный лазерный диод, система из нескольких лазерных диодов. Излучение всех источников накачки фокусировалось в активных элементах в область поперечником ~100-120 мкм. В свободной генерации был достигнут дифференциальный КПД 15% и средняя мощность -80 мВт.. Впервые была осуществлена (в схеме, аналогичной **Рис.3**) пассивная модуляция добротности кристаллического **Yb-Er** лазера. КПД при этом достигал 11.5 %, а максимальная (ограниченная разрушением кристалла) средняя мощность - 90 мВт. Эти параметры близки к характерным для лазеров на стеклах, хотя и не превосходят лучшие из них. Кроме того, следует отметить высокие значения порога возникновения генерации в кристалле GdCOB по причине меньшего времени жизни ионов эрбия в кристалле по сравнению со стеклами. Еще одной сложностью при работе с этим материалом является малая ширина полосы поглощения, пригодной для накачки лазерными диодами.

В **Заключении** диссертации формулируются ее **наиболее существенные результаты**:

I. Исследованы особенности процессов трансформации энергии оптического возбуждения в системе иттербий-эрбий в широкой области составов стекол на основе нескольких стеклообразователей и в кристаллах оксибората кальция-гадолиния, в широкой области концентраций активаторов. Установлено, что совокупность спектрально-кинетических требований к **Yb-Er** лазерным средам может хорошо выполняться в стеклах со смешанными стеклообразователями.

II. Создано новое поколение иттербий-эрбиевых лазерных активных сред, специально предназначенных для диодно-накачиваемых 1.5 мкм лазеров, в их числе:

1. Концентрированное стекло с концентрацией РЗИ до $4.2 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и пиковым значением коэффициента поглощения Yb^{3+} до 35 см^{-1} на длине волны излучения InGaAs диодных лазеров 975 нм; Главная область

применения этого материала: лазеры с импульсной поперечной накачкой диодными линейками.

2. Высокопрочное алюмо-боро-фтор-фосфатное стекло для продольно - накачиваемых микрочип-лазеров, обладающее как высокой эффективностью генерации в условиях диодной накачки, так и выдающимися термомеханической прочностью и химической стойкостью;

3. Один из первых эффективных кристаллических иттербий-эрбиевых лазерных материалов - оксиборат гадолиния-кальция $GdCa_4O(BO_3)_3$.

Ш. Исследован ряд нелинейно-оптических эффектов воздействия полуторамикронного лазерного излучения на различные материалы с целью созданию на этой основе средств пассивного управления излучением эрбиевых лазеров. Впервые созданы средства пассивной модуляции добротности 1.5 мкм эрбиевых лазеров. **Предложенные для этой цели кристаллы шпинели с кобальтом оказались наилучшим на сегодняшний день пассивным затвором для лазеров на эрбиевом стекле, и по эффективности приближаются к затворам активного типа.**

Также была показана ограниченная применимость этих кристаллов для модуляции добротности неодимовых лазеров с длиной волны генерации 1.3÷1.44 мкм.

IV. На основе разработанных активных и пассивных материалов создан ряд диодно-накачиваемых лазеров с ранее недоступными характеристиками, в частности:

1. В лазере с импульсной поперечной диодной накачкой на концентрированном стекле при активной модуляции НПВО-затвором достигнуты рекордные характеристики: до 50 мДж (в 50 нс импульсе) при абсолютном КПД 2.46%.

2. В микролазерах с непрерывной продольной накачкой:

- В непрерывном режиме достигнута выходная мощность 353 мВт.

- Впервые осуществлен режим активной модуляции добротности НПВО-затвором .

- Впервые осуществлена пассивная модуляция добротности кристаллами шпинели с кобальтом. Достигнуты пиковая мощность генерации до 2 кВт и минимальная длительность импульсов генерации 2.3 нс.

- Предложена монолитная неразъюстируемая схема микрочип-лазера на основе высокопрочного стекла и легированной кобальтом шпинели. На

таком микрочипе получены рекордные средние мощности цуга гигантских импульсов: 150 мВт при диодной накачке и 180 мВт при накачке $Ti:Al_2O_3$ лазером.

- На новом кристаллическом лазерном материале (оксидборат кальция-гадолиния с Yb и Eg) получены свободная генерация и режим пассивной модуляции добротности с КПД и средней мощностью, близкой к типичным значениям для лазеров на стекле.

На основе созданной в рамках диссертации элементной базы и с использованием полученных в ней результатов исследований, разработаны серийно-выпускаемые лазерные устройства.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ в рамках проектов № 96-02-16097; № 99-02-17632; №02-02-16197; № 05-02-17502; № 00-02-81011Бел2000; №04-02-81015Бел 2004 А.

Список основных публикаций по теме диссертации:

1. Свечков С.Е., Свечков Ю.Е. Препринт ИОФАН №273. Нелинейное прыжковое тушение люминесценции примесных центров в твердых телах. (М., 1987).
2. Denker B., Kertesz I., Kirjanov A., Kroo N., Maljutin A., Osiko V., Sverchkov S., Sverchkov Ju. "Repetitively pulsed Nd glass slab lasers" IEEE J. of Quantum Electronics, v.QE-25., pp.1979-1980 (1989).
3. Денкер Б.И., Максимова Г.В., Осико В.В., Свечков С.Е., Свечков Ю.Е. «Новые способы пассивной модуляции добротности лазеров на эрбиевом стекле» Квантовая Электроника т. 17, № 8, с. 959 (1990 г.).
4. Денкер Б.И., Максимова Г.В., Осико В.В., Свечков С.Е., Свечков Ю.Е. «Новые способы пассивной модуляции добротности лазеров на эрбиевом стекле» Препринт ИОФАН № 43, МЛ 990 г.
5. Максимова Г.В., Свечков С.Е., Свечков Ю.Е. «Генерационные исследования нового иттербий-эрбиевого лазерного стекла для накачки неодимовыми лазерами» Препринт ИОФАН № 46, М., 1990г.
6. Денкер Б.И., Максимова Г.В., Осико В.В., Свечков С.Е., Свечков Ю.Е. «Лазеры на эрбиевом стекле с пассивной модуляцией добротности эрбий-содержащим элементом» Квантовая Электроника т. 18, №7, с. 855-858 (1991 г.).
7. Максимова Г.В., Свечков С.Е., Свечков Ю.Е. «Генерационные исследования нового иттербий-эрбиевого лазерного стекла,

накачиваемого неодимовыми лазерами» Квантовая электроника т. 18, №12 (1991 г.), с. 1437-1438.

8. B.Denker,G.Maksimova, V.Osiko, A.Prokhorov, S.Sverchkov, Yu.Sverchkov, Z.Horvath "Passive Q-switching of eyesafe erbium glass lasers", SPIE International Symposium on High Power Lasers, paper 1419-06, Jan 1991, LA.
9. Б.И.Денкер, Г.В.Максимова, С.Е.Сверчков, Ю.Е.Сверчков, В.Н.Якименко. « Разработка и исследование активированных стекол для пассивных модуляторов добротности лазеров полуторамикронного диапазона» Тезисы 8 Всесоюзного совещания-семинара "Спектроскопия лазерных материалов", Краснодар 1991 г., стр. 76.
10. B.Denker,G.V.Maksimova, V.V.Osiko, S.E.Sverchkov, Yu.E.Sverchkov. " Effective passive Q-switched erbium glass lasers", International conference "Advanced Solid State lasers" 1991 technical digest, Hilton head, USA, p.204-205.
11. B.Denker,G.V.Maksimova, V.V.Osiko, A.M.Prokhorov, S.E.Sverchkov, Yu.E.Sverchkov, Z.Gy.Horvath, "Q-switched erbium glass lasers for laser plasma creation", International conference "Lasers'91", 1991 Munchen, Germany. Abstracts, p. 109.
12. Sverchkov Yu,Denker B., Maximova G., Osiko V., Sverchkov S."Lasing parameters of GPI erbium glasses" Solid State Lasers III, Proc. SPIE 1627, pp 37-41(1992).
13. S.E.Sverchkov, B.Denker, V.V.Osiko, Yu.E.Sverchkov, A.P Fefelov, S.I.Khomenko, "Effective eyesafe frustrated total internal reflection Q-switched erbium lasers", Solid State Laser III, Gregory J.Quarles, Editor, Proc. SPIE 1627,42-45 (1992).
14. Денкер Б., Осико В., Сверчков С., Сверчков Ю., Фефелов А., Хоменко С.«Высокоэффективные лазеры на эрбиевом стекле с модуляцией добротности затвором на нарушенном полном внутреннем отражении» Квантовая Электроника 1992г., №6, с.544-547.
15. B.Denker, A.Korchagin, V. Osiko, S.Sverchkov, T.Allik, J.Hutchinson "Diode pumped and FTIR Q-switched laser performance of novel Yb-Er glass". OSA Proceedings on Advanced Solid State Lasers, 1994, v 20, pp.148-150.
16. A.Lukashev, S.Sverchkov, V.Solovyev, B.Denker, V.Engovatov, P.Pashinin. "Laser damage on skin by 1540 nm Er-glass laser exposure" Lasers in the Life Sciences, v.7(4) pp207-226 (1997).
17. Denker B., Konijaev V., Nikolski M., Osiko V., Sverchkov S. "Concentrated glass for microchip lasers.", OSA TOPS v.10, pp. 473-475(1997).

18. B.Denker, S.Sverchkov."Modern tendencies in glass lasers" in "Trends in laser development, application and technologies" eds: A.Czitrovski, I.Kertesz. Technoorg-Linda Ltd. Co., Budapest, 1997, pp.24-40.
19. Галаган Б., Данилейко Ю., Денкер Б., Осико В., Сверчков С, «Характер температурной зависимости КПД генерации эрбиевых лазерных стекол и механизм влияния сенсбилизаторов на него» Квантовая электроника, т 25, №4, с.324-326. (1998)
20. Denker B., Galagan B., Sverchkov S. "Temperature efficiency variations of erbium glass lasers" OSA TOPS v. 19, pp.469-471(1998).
21. T.Danger, G.Huber, B.Denker, B.Galagan, S.Sverchkov. "Diode Pumped Continious -Wave Laser around 1.54 um using Yb-Er Doped Silico-Boro-Phosphate Glass", CLEO'98 Technical Digest.
22. B.Denker, V.Engovatov, A.Lukashev, V.Osiko, P.Pashinin, S.Sverchkov, V.Soloviev, "Damage of skin by 1540 nm laser radiation" Ecology of Cities, Technical Digest, June1998, Rhodes, Greece.
23. B.Denker, B.Galagan, E.Godovikova, M.Meilman, V.Osiko, S.Sverchkov, I.Kertesz. "The efficient saturable absorber for 1.54 um Er glass lasers." OSA TOPS, Vol.26, pp. 618-620, (1999).
24. Галаган Б., Годовикова Е., Денкер Б., Мейльман М., Осико В., Сверчков С, «Эффективный просветляющийся фильтр на основе кристаллов $MgAl_2O_4:Co^{2+}$ для модуляции добротности лазеров с $\lambda=1.54$ мкм на эрбиевом стекле», Квантовая Электроника, т.26, №3, (1999) с. 189-190.
25. Гагарский С, Галаган Б., Денкер Б., Корчагин А., Осико В., Приходько К., Сверчков С. «Миниатюрные диодно-накачиваемые лазеры на иттербий-эрбиевых стеклах с модуляцией добротности оптическими затворами на нарушенном полном внутреннем отражении» Квантовая электроника, т.30, №1. с.10-12 (2000).
26. B.Denker, B.Galagan, V.Osiko, S.Sverchkov. "Erbium and neodymium glass lasers passively Q-switched by cobalt-activated spinel crystals." OSA TOPS, Vol.34, pp. 246-248, (2000).
27. Ruikun Wu, J.D.Myers, M.J.Myers, B.Denker, B.Galagan, S.Sverchkov, J.A.Hutchinson, W.Trussel. "Co:MgAl₂O₄ crystal passive Q-switch performance at 1.34, 1.44 and 1.54 micron." OSA TOPS, Vol.34, pp.254-256, (2000).
28. R. Wu, J. Myers, M. Myers, B. Denker, B. Galagan, S. Sverchkov, J.Hutchinson, W. Trussel, "Co²⁺:MgAl₂O₄ Crystal Passive Q-switch Performance at 1.34, 1.44 and 1.54um", Photonics West, LASE '99, SPIE Proceedings p.48, Conference 3929, 2000.

29. G.Karlsson, V.Pasiskevichius, F.Laurell, J.A.Tellefsen, B.Denker, B.Galagan, V.Osiko. S.Sverchkov, "Diode-pumped Er-Yb :glass laser passively Q-switched by use of $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ as a saturable absorber, " Appl. Opt. v.39, #33, pp.6188-6192, Nov.2000.
30. B.Denker, B.Galagan, V.Osiko, S.Sverchkov."Peculiarities of energy storage and relaxation in Yb-Er glasses with enhanced Er content", Advanced Solid State Lasers'2001 Technical Digest, pp.389-394.
31. Georgiou E., Musset O., Boquillon J-P., Denker B., Sverchkov S. "50 mJ/30ns FTIR Q-switched diode pumped Er:Yb:glass 1.54 μm laser", Opt Commun. V.198, #1-3, pp147-153(2001).
32. G.Karlsson, V.Pasiskevichius, F.Laurell, J.A.Tellefsen, B.Denker, B.Galagan, V.Osiko. S.Sverchkov " $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal as saturable absorber in diode pumped Q-switched Er-Yb glass laser", Advanced Solid State Lasers'2001 Technical Digest, pp.34-36.
- 33.F.Laurell , V.Pasiskevichius, B.Galagan, G.Karlsson, , B.Denker, S.Sverchkov,"Q-switched laser". Patent appl., ref# US-2018304 (2001).
34. B.Denker, B.Galagan, V.Osiko, S.Sverchkov "Materials and components for miniature diode-pumped 1.5 μm erbium glass lasers", Laser Physics, V.12, #4, pp. 104-108 (2002).
- 35.G.Karlsson, F.Laurell, J.Tellefsen, B.Denker, B.Galagan, V.Osiko, S.Sverchkov. "Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping" Appl.Phys. B(2002) v.75, ppl-6.
- 36.G.Karlsson, F.Laurell, J.Tellefsen, B.Denker, B.Galagan, V.Osiko, S.Sverchkov. "Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping.OSA TOPS, v.68, pp. 232-235(2002).
- 37.B.Denker, B.Galagan, V.Osiko, S.Sverchkov. "Glass for high average power diode pumped Yb-Er lasers ", International Quantum Electronics Conference'2002 (IQEC-LAT)Technical digest, p.101 QSuR1.
38. B.Denker, B.Galagan, V.Osiko, S.Sverchkov, G.Karlsson, F.Laurell. "Comparison of cobalt - activated spinel crystals grown by various methods as saturable absorbers for 1.3-1.6 μm lasers" OSA TOPS v. 83 Advanced Solid State Photonics' 2003, pp.216-219.
39. B.Denker, B.Galagan, G.Karlsson, F. Laurell, V.Osiko, S.Sverchkov, J.Tellefsen. «Optimization of materials for diode-pumped 1.5 μm erbium glass micro-lasers.»CLEO/EQEC '03 Conference Technical Digest, June 22-27 2003, Munich, Germany.
40. B.Denker, B.Galagan , G.Karlsson, F. Laurell, V.Osiko,V.Pasiskevichius, S.Sverchkov, J.Tellefsen. "Passively Q-switched 1.54 μm Yb-Er glass

- microchip lasers." CLEO/EQEC Europe '03 Conference Technical Digest, 22-27 June 2003, Munich, Germany.
41. B. Denker, B.Galagan, L. Ivleva, V.Osiko , S.Sverchkov, I.Voronina, J.Hellstrom, G.Karlsson, F.Laurell." New crystalline material for 1.5 micrometer lasers: Yb,Er-activated $\text{BaCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$." Advanced Solid State Photonics'2004 Technical Digest.
 42. B. Denker, B.Galagan, L. Ivleva, V.Osiko , S.Sverchkov, I.Voronina, J.Hellstrom, G.Karlsson, F.Laurell." Luminescent and laser properties of Yb,Er-activated $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ - a new crystal for eyesafe 1.5 micrometer lasers." Applied Physics B 79 (2004) 577-581.
 43. B.Denker, B.Galagan, L.Ivleva, V.Osiko, S.Sverchkov. "Active and passive materials for diode-pumped 1.5 μm Ytterbium-Erbium lasers"US-Russia Partnership Workshop CELO'2004, StPetersburg, June 7-11, 2004, paper III-22.
 44. B. Denker, B.Galagan, L. Ivleva, V.Osiko , S.Sverchkov, I.Voronina, J.Hellstrom, G.Karlsson, F.Laurell "Passive Q-Switching at 1.54 μm of a Er-Yb:GdCa $_4$ O(BO $_3$) $_3$ Laser with a Co :MgAl $_2$ O $_4$ Saturable Absorber". ASSP'05 technical digest.

01.04

22 APR 2005

• --- 225