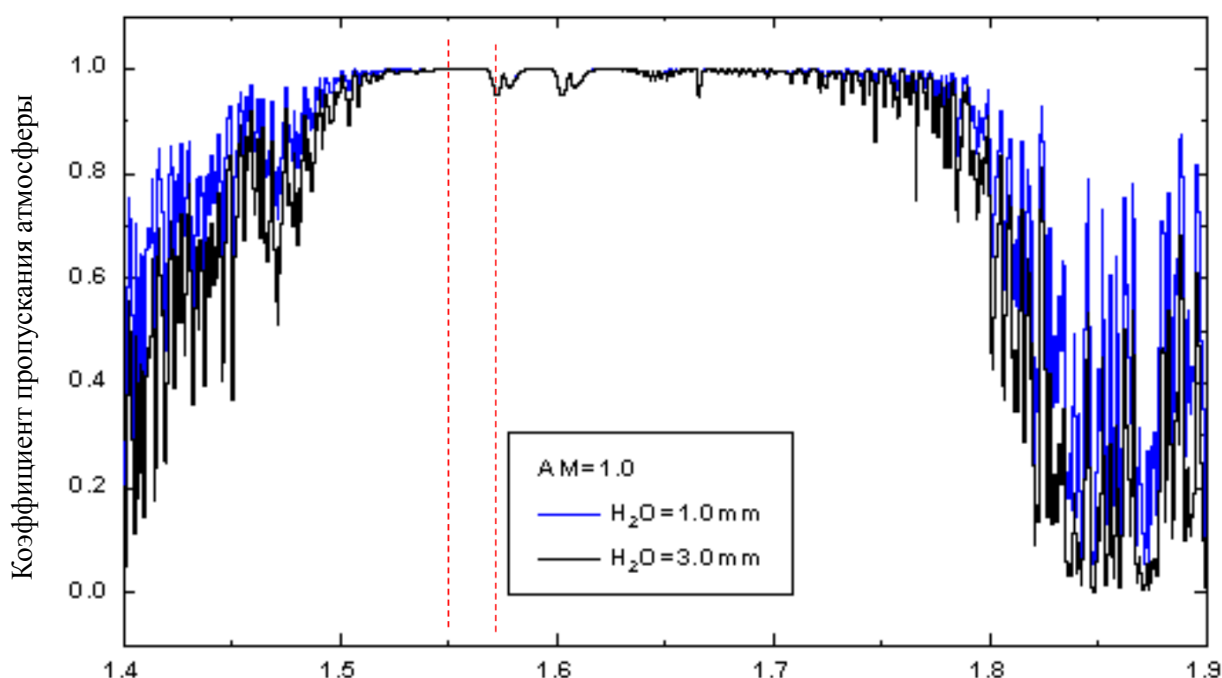


ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЭРБИЕВЫЕ ЛАЗЕРЫ ПОЛУТОРАМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА ИЗЛУЧЕНИЯ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Введение

Известно [1], что длины волн излучения в диапазоне 1,5 – 1,8 мкм попадают в окно прозрачности атмосферы (рис. 1), что критично при передаче излучения на большие расстояния в таких приложениях, как коммуникации и лидары. Кроме того, лазеры на длинах волн излучения в этом диапазоне считаются безопасными для глаз. Повреждения глаз лазерным излучением могут возникнуть как вследствие переоблучения сетчатки, так и вследствие чрезмерного поглощения лазерной энергии в роговице и/или в хрусталике. Порог поражения сетчатки импульсным лазером, работающим в полосе 1,5 – 1,6 мкм, на порядки выше по величине, чем в районе длины волны 1 мкм.



Длина волны лазерного излучения, мкм

Рис. 1

Длины волн больше 1,6 мкм продолжают быть менее опасными для сетчатки. Кроме того, свет в этих более длинных волнах все сильнее поглощается роговицей, что способствует снижению облучения сетчатки. Однако на некоторых длинах волн (3 мкм и около 10 мкм) лазерное излучение поглощается сильно, что приводит в большинстве случаев к тому, что энергия поглощается в очень тонком слое роговицы (менее 100 мкм), тем самым значительно понижая порог поражения.

Ввиду этих соображений лазеры, работающие в полосе 1,5 – 1,8 мкм, выгодны по общей безопасности для глаз в сочетании с хорошим атмосферным пропусканием.

Наиболее известными твердотельными лазерами, генерирующими излучение полуторамикронного диапазона, являются эрбиевые лазеры и лазеры на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) света. Лазеры на ВКР подробно рассмотрены в [2]. В работе [3] смоделирован компактный, мощный, высокоэффективный лазерный излучатель, работающий на

длине волны излучения 1,531 мкм в моноимпульсном или квазинепрерывном режиме на ВКР, разработана методика расчета параметров ВКР-лазеров, написано компьютерное приложение для ускорения процесса расчета и выбора наиболее технологичных интерференционных покрытий с заданными коэффициентами отражения. Несмотря на множество преимуществ, такие лазеры имеют недостатки, такие, как энергетические потери при ВКР и механическая хрупкость некоторых кристаллов, из которых изготавливаются твердотельные ВКР-среды.

Цель статьи – изучение принципов модернизации эрбиевых твердотельных лазеров для эффективной генерации импульсов в безопасном для глаз диапазоне длин волн. Для достижения поставленной цели проведен анализ соответствующей научной литературы.

Твердотельные эрбиевые лазеры полуторамикронного диапазона излучения с иттербием

Наиболее распространенными твердотельными источниками полуторамикронного лазерного излучения являются лазеры на переходе $^4I_{13/2} - ^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} [4]. 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 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 работы 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 $\sim 0,9 - 1$ мкм.

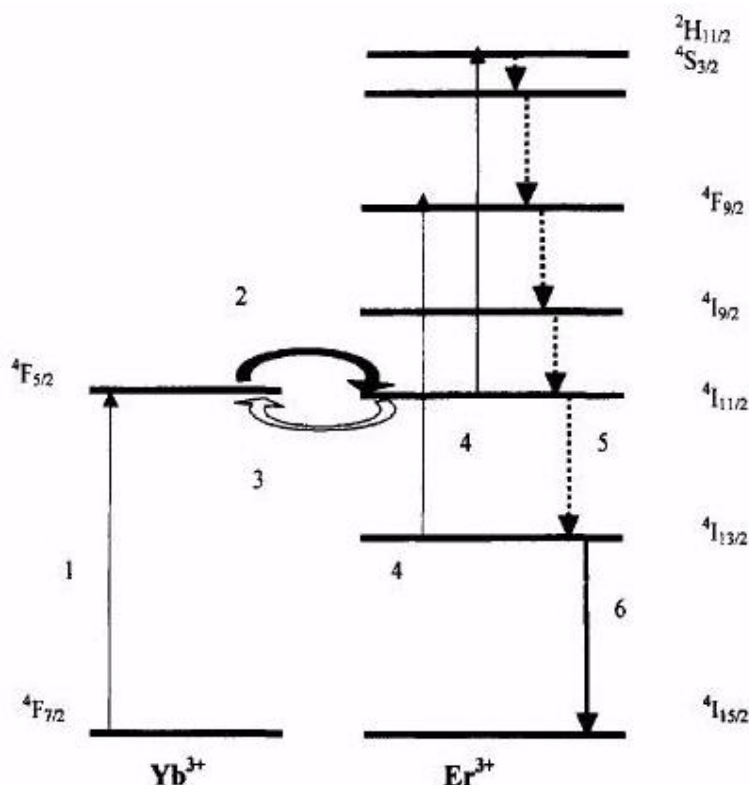
В связи с появлением в последнее время доступных и эффективных InGaAs лазерных диодов, спектральная область излучения которых хорошо перекрывается с полосой поглощения иттербия, интерес к иттербий-эрбиевым лазерам резко возрос. Это связано с широтой возможных применений таких диодно-накачиваемых лазеров 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 позволяет резко снизить габаритные размеры лазеров при одновременном резком повышении КПД. Кроме того, диодная накачка, в отличие от ламповой, позволяет осуществить непрерывный режим генерации.

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.

Следует упомянуть основные спектрально-кинетические особенности системы ионов Yb^{3+} - Er^{3+} . Сенсibilизация люминесценции эрбия в ней осуществляется за счет безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения с ионов иттербия (уровень $^2F_{5/2}$) на уровень $^4I_{11/2}$ ионов эрбия (рис. 2). Для эффективной генерации в системе Yb - Er должны удовлетворяться следующие требования:

1. Возможна более быстрая (не более чем за единицы микросекунд) релаксация возбуждений ионов эрбия с уровня $^4I_{11/2}$ на верхний лазерный уровень $^4I_{13/2}$. Если релаксация на верхний лазерный уровень недостаточно быстра, то паразитные процессы обратного переноса энергии (с уровня $^4I_{11/2}$ 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 $\text{Yb}^{3+} (^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}) \rightarrow \text{Er}^{3+} (^4I_{13/2} - ^4F_{9/2})$ и $\text{Yb}^{3+} (^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}) \rightarrow \text{Er}^{3+} (^4I_{11/2} - ^2H_{11/2})$, 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 – 8 мс).



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

Рис. 2

Основной недостаток фосфатных 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 – 0,5 Вт на погонный сантиметр длины активного элемента, особенно существенно для лазеров с непрерывной накачкой.

Использовались два различных подхода устранения этого недостатка.

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, стало использование не чисто фосфатных, а смешанных (алюмо-борфтор-фосфатных) композиций, структурно аналогичных не чисто фосфатным, а более «связанным», механически и химически стойким силикатным стеклам. Разработанное лазерное стекло (названное в англоязычных публикациях Strong Erbium Laser Glass, SELG [5 – 8]) 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 – созданию активного материала для иттербий-эрбиевых лазеров с высокой средней мощностью – состоял в поиске кристаллической среды для этой цели. Предложена новая кристаллическая Yb-Er лазерная среда оксибората гадолия-кальция: $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ (GdCaOB). Отмечено удовлетворительное выполнение в этом материале спектрально-кинетических требований к среде, его технологичность и высокая (в сравнении 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 [9, 10].

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 $3 - 4 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ 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.

Как фундаментальную 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 ($1,5 - 3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$), но 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 предложен технологичный, устойчивый к кристаллизации состав стекла на фосфатной основе, допускающий введение до $4,2 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ 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 [11 – 13].

Предложено использовать в качестве пассивного модулятора 1,5 мкм эрбиевых лазеров насыщающиеся поглотители из кристаллов легированной кобальтом алюмо-магниевого шпинели (стехиометрическая формула MgAl_2O_4).

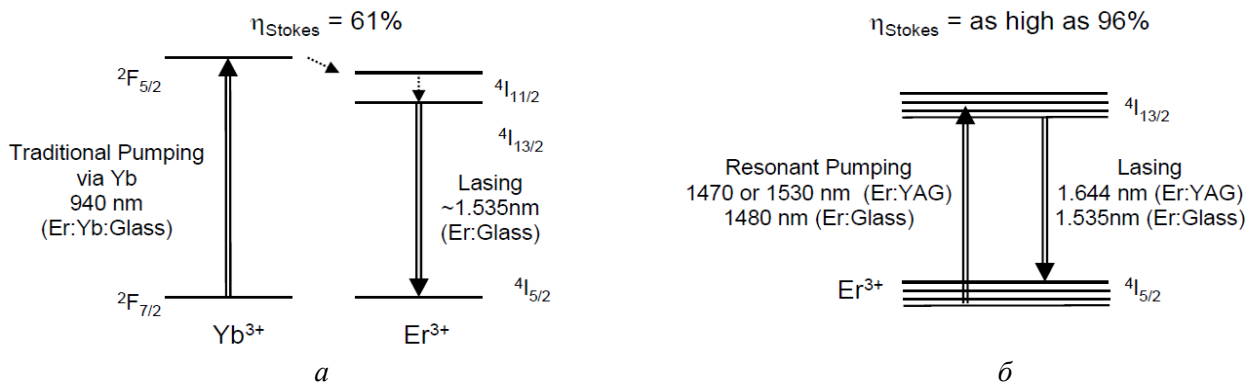
В первых же генерационных экспериментах (в лазере на эрбиевом стекле с ламповой накачкой) при помощи кристалла шпинели с кобальтом был осуществлен режим пассивной модуляции добротности с эффективностью, приближающейся к эффективности активных способов модуляции. По совокупности физико-механических, технологических и лазерных свойств кристаллы легированной кобальтом алюмо-магниевого шпинели оказались наилучшим из известных на сегодняшний день пассивных модуляторов добротности лазеров на эрбиевых стеклах. Кроме того, была показана применимость (с необходимостью использования фокусировки излучения некоторых активных элементов в пассивном затворе) этих кристаллов для пассивной модуляции добротности неодимовых лазеров с длинами волн генерации 1,32 – 1,44 мкм [14 – 18].

Исследована возможность активной модуляции добротности эрбиевых микролазеров при помощи оптических затворов на нарушенном полном внутреннем отражении (НПВО-затворов). Преимущества НПВО-затворов для модуляции добротности лазеров с низким коэффициентом усиления известны. Это – низкие оптические потери (обычно около 1 – 2 % на проход) и нечувствительность к поляризации модулируемого излучения. Однако достижимый в лазерах исследуемого типа коэффициент усиления также составляет единицы процентов на проход. Поэтому помещение обычным образом в резонатор такого лазера НПВО-модулятора приведет к потерям, сравнимым или даже превышающим коэффициент усиления активной среды и сделает сколько-нибудь эффективную генерацию невозможной. Во избежание чрезмерных оптических потерь была предложена оптическая схема, включающая промежуточное зеркало на активном элементе со стороны модулятора, необходимое для снижения чувствительности лазера к оптическим потерям на модуляторе и с коэффициентом отражения, обеспечивающим невозможность возникновения свободной генерации на нанесенных на активном элементе зеркалах.

В [19] представлен твердотельный лазер с диодной накачкой, длина волны излучения которой 970 – 980 нм, с активным элементом, выполненным из полифункционального наноматериала, представляющего собой стекло, содержащее нанокристаллические фазы, активированные трехвалентными ионами эрбия (обеспечивают лазерную генерацию), трехвалентными ионами иттербия (ионы-сенсibilизаторы, повышают эффективность диодной накачки) и тетракоординированными двухвалентными ионами кобальта (обеспечивают насыщаемое поглощение на длине волны генерации для реализации пассивной модуляции добротности резонатора). То есть такой активный элемент сочетает в себе свойства активной лазерной среды и пассивного лазерного затвора.

Твердотельные эрбиевые лазеры полумикронного диапазона излучения без иттербия

Одним из преимуществ накачки эрбиевого активатора через иттербиевый сенсibilизатор (рис. 3, а) является то, что феноменологии такой накачки и лазерной генерации могут быть по существу разделены [1]. В частности, можно независимо оптимизировать легирование иттербием для достижения желаемого уровня поглощения и/или однородности, а легирование эрбием – для оптимальной лазерной генерации. Иттербиевый сенсibilизатор может быть удобно накачен лазерными диодами с длинами волн излучения около 940 или 980 нм. Такие диоды эффективны, широко коммерчески доступны и недороги. Полоса поглощения на 940 нм по меньшей мере 10 нм в ширину в большинстве материалов. Тем не менее, в некоторых материалах (особенно в YAG) полоса поглощения в районе 980 нм слишком узкая (~2 нм), чтобы накачиваться обычными диодами и необходимо использовать узкополосные диоды.



а – традиционный перенос энергии через Yb; б – резонансная накачка

Рис. 3

Очевидным недостатком накачки эрбия через иттербиевый сенсibilизатор является низкая стоковая эффективность (~60 %) и высокая доля тепловых потерь (~40 %). Ненужное тепло осаждается в усиливающей среде и ограничивает выходную энергию. Этот тепловой эффект значительно уменьшает в остальном привлекательную накачку через иттербиевый сенсibilизатор.

В последнее десятилетие высокоомощные полупроводниковые лазерные диоды, излучающие вблизи 1,5 мкм, стали надежными и коммерчески доступными. Эта новая технология предлагает резонансную (прямую) накачку ионов Er^{3+} доставкой энергии возбуждения непосредственно в верхнее состояние (рис. 3, б). Ключевой мотивацией для резонансной накачки является более высокая стоковая эффективность (до 96 %) и соответствующее уменьшение ненужного тепла, осаждаемого в усиливающей среде. Как результат, резонансно накачиваемая легированная эрбием усиливающая среда может работать при гораздо большей средней мощности, чем с иттербиевым сенсibilизатором. Резонансная накачка продемонстрирована в 2005 году [20] в $\text{Er}:\text{YAG}$ и в 2012 году – в волокне из силикатного стекла [21].

Внутриполосная накачка $\text{Er}:\text{YAG}$ лазера с помощью оболочко накачиваемого эрбий-иттербиевого волоконного лазера исследована в [22]. С использованием $\text{Er}:\text{YAG}$ стержня с легированием 0,5 ат. % была получена максимальная выходная мощность в ~4,2 Вт (ограниченная доступной мощностью накачки) в TEM_{00} луче с $M^2 \approx 1,2$. Дифференциальная эффективность по отношению к поглощенной мощности накачки была ~44 %. Обнаружено, что эффективность $\text{Er}:\text{YAG}$ лазеров, работающих на длине волны 1646 нм, зависит от концентрации Er^{3+} . В сопоставимых лазерных компоновках наблюдалось значительное снижение порога и повышение дифференциальной эффективности при уменьшении концентрации эрбия с 2 до 0,5 %. Это неожиданный результат, учитывая, что все лазеры работали в непрерывном режиме и имели относительно небольшие резонаторные потери. Ап-конверсионный перенос энергии был исследован как возможный механизм такого поведения. Результаты указывают, что ап-конверсия действительно играет важную роль и, безусловно, должна приниматься во внимание, когда привлекаются большие плотности возбуждения (т.е. в лазерах с модуляцией добротности или в непрерывных лазерах с высокими резонаторными потерями), но не должна приниматься во внимание для наблюдаемой зависимости работы от концентрации в данных экспериментах. Явно существует дополнительный механизм (еще неопределенный), который оказывает вредное воздействие на эффективность и зависит от концентрации эрбия. Вероятно, что дальнейшее снижение уровня легирования эрбием может привести к дальнейшему повышению эффективности.

Заключение

Рассмотрены различные реализации твердотельных эрбиевых лазеров с диодной накачкой: на основе активных элементов из стекол и кристаллов; с накачкой через иттербиевый сенсibilизатор и с резонансной накачкой; с НПВО-затвором, с пассивным затвором из кристалла легированной кобальтом алюмо-магниевого шпинели и с интегрированием свойств пассивного затвора в активный элемент.

Несмотря на то, что на данный момент твердотельные лазеры с диодной системой накачки украинского производства будут дороже по себестоимости аналогов с ламповой системой накачки, их разработка актуальна по ряду причин. Во-первых, твердотельные лазеры с диодной системой накачки имеют более высокий КПД и существенно больший ресурс работы, а также, в отличие от аналогов с ламповой накачкой, позволяют реализовать квазинепрерывный режим работы устройств. Во-вторых, серийное производство подходящих газоразрядных ламп не налажено в Украине, их закупка в РФ затруднена, а складских запасов хватит ненадолго.

Список литературы: 1. *John Vetrovec. Erbium-Based Edge-Pumped Disk Laser.* / John Vetrovec, Drew A. Copeland, and Amardeep S. Litt // SPIE LASE 2012 Conference – San Jose, CA. – February 2–7, 2013. 2. *Безносенко И.В.* Вынужденное комбинационное рассеяние в приложении источников полутора-

микронного излучения / И.В. Безносенко, Ю.П. Мачехин // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – Том 13, № 4. – С. 406 – 419. 3. *Безносенко И.В.* Компактный лазерный излучатель на 1,531 мкм на кристалле $\text{PbMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ с ВКР-самопреобразованием и диодной накачкой / И.В. Безносенко, Ю.П. Мачехин // Радиотехника. – 2015. – Вып. 182. – С. 87 – 95 4. *Сверчков С.Е.* 1,5 мкм иттербий-эрбиевые лазеры с диодной накачкой – элементная база и генерационные возможности : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.21 / Сергей Евгеньевич Сверчков. – М., 2005. – 238 с. 5. *Eyesafe pulsed microchip laser using semiconductor saturable absorber mirrors* / R. Fluck, R. Haring, R. Paschotta et al. // Appl. Phys. Lett. – 1998. – v. 72. – pp. 3273 – 3275. 6. *Eyesafe pulsed microchip laser* / R. Fluck, E. Gini, H. Melchior, U. Keller // Advanced Solid State Lasers: Technical Digest. – 1998. – pp. 325 – 326. 7. $\text{Co}^{2+}:\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (YSGG) Passive Q-switch for Infrared Erbium Laser / M. Camargo, R. Stultz, M. Birnbaum, M. Kokta // IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS). – 1994. – 2, 433. 8. *Camargo M.* Divalent Uranium and Cobalt Saturable Absorbers Q-switches at 1.5 μm . / M. Camargo, R. Stultz, M. Birnbaum // OSA Proc. on Advanced Solid State Lasers. – 1995. – v. 24. – pp. 460 – 464. 9. *Boiko R.* Glass ceramics Co saturable absorber Q-switch for 1.3 – 1.6 μm spectral region. / R. Boiko, A. Okhrimchuk, A. Shestakov // OSA TOPS. – 1998. – v. 19, ASSL. – pp. 185 – 188. 10. *Excited state absorption and passive Q-switch performance of Co doped oxide ceramics* / K.V. Yumashev, I.A. Denisov, N.N. Posnov et al. // J. of Alloys and Compounds. – 2002. – v. 341. – pp. 366 – 370. 11. *Spectroscopic properties and diode pumped 1.6 μm laser performance in Yb-codoped Er:Y₂Al₅O₁₂* / T. Schweizer, T. Jensen, E. Neumann, G. Huber // Optics Comm. – 1995. – № 118. – P. 557. 12. *Новые способы пассивной модуляции добротности лазеров на эрбиевом стекле* / Б.И. Денкер, Г.В. Максимова, В.В. Осико и др. // Препринт ИОФАН. – М., 1990. – № 43. 13. *Passively Q-switched microchip lasers at 1.3 μm and 1.5 μm* . / R. Fluck, B. Brown, U. Keller et al. // CLEO: Technical Digest. – 1997. 14. *High average power 1.54 μm Er-Yb doped phosphate glass laser*. / S. Jiang, S. Hamlin, J. Myers et al. // Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). – 1996 15. *Новые способы пассивной модуляции добротности лазеров на эрбиевом стекле* / Б.И. Денкер, Г.В. Максимова, В.В. Осико и др. // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 8. – С. 959. 16. *Лазеры на эрбиевом стекле с пассивной модуляцией добротности эрбий-содержащим элементом* / Б.И. Денкер, Г.В. Максимова, В.В. Осико и др. // Квантовая электроника. – 1991. – Т. 18, № 7. – С. 855 – 858. 17. *Er:Ca₅(PO₄)₃F saturable absorber Q-switch for the Er glass laser at 1.53 μm* . / K. Sparious, R. Stultz, D. Birnbaum et al. // Appl. Phys. Lett. – 1993. – v. 62. – pp. 2763 – 2765. 18. *Camargo M.* Passive Q-switching of the Erbium Glasses Using $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$. / M. Camargo, R. Stultz, M. Burnbaum // OSA Proc. on Advanced Solid State Lasers. – 1996. 19. *Твердотельный эрбиевый лазер с диодной накачкой: патент U 8891 Республика Беларусь: МПК H 01S 3/16* / Белорус. нац. техн. ун-т (ВУ): Скопцов Н.А., Гапоненко М.С., Маляревич А.М., Юмашев К.В. – № 20120607; заявл. 2012.06.14; опубл. 2012.12.30. 20. *Resonantly Pumped Eyesafe Erbium Lasers* / S.D. Setzler, M.P. Francis, Y.E. Young et al. // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. – May – Jun 2005. – v. 11, № 3. – pp. 645 – 657. 21. *All-glass resonantly cladding-pumped Yb-free Er-doped fiber laser* / J. Zhang, J. McElhenny, V. Fromzel, and M. Dubinskii // SPIE Defense, Security and Sensing. – Baltimore, April 25, 2012. 22. *Peter Jander.* High-power Er:YAG laser at 1646 nm pumped by an Er,Yb fiber laser. / Peter Jander, Jayanta K. Sahu and W. Andrew Clarkson // Proc. of SPIE. – 2004. – v. 5620. – pp. 297 – 307.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.04.2016