

# Эффективный импульсный $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазер с плавной перестройкой длины волны в спектральном диапазоне 2.26–3.61 мкм

В.А.Акимов, В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов

*Получена эффективная генерация монокристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  при накачке излучением  $\text{Tm} : \text{YAP}$ -лазера с длиной волны 1.94 мкм и длительностью импульсов 300 мкс. В неселективном резонаторе  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазер генерировал излучение в окрестности длины волны 2.65 мкм с выходной энергией до 17 мДж и квантовой дифференциальной эффективностью по поглощенной энергии накачки 63%. Измеренный коэффициент поглощения кристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  на длине волны генерации не превышал  $0.045 \text{ см}^{-1}$ . При использовании резонатора с дисперсионной призмой осуществлена плавная перестройка длины волны генерации в спектральном диапазоне 2.26–3.61 мкм.*

**Ключевые слова:**  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазер, лазеры ИК диапазона, твердотельные лазеры, перестраиваемые лазеры.

## 1. Введение

Компактные перестраиваемые твердотельные лазеры, работающие в среднем ИК диапазоне спектра, представляют интерес для значительного круга практических применений, таких как контроль за состоянием окружающей среды, основанные на спектральном анализе методы медицинской диагностики, безопасная для зрения лазерная локация, оптическая связь и ряд других. Как было показано в [1–4], кристаллы  $\text{A}_2\text{B}_6$ , легированные двухвалентными ионами переходных металлов, являются перспективными лазерными средами для спектральной области 2–5 мкм. В частности, в кристаллах  $\text{Cr}^{2+} : \text{ZnSe}$  и  $\text{Fe}^{2+} : \text{ZnSe}$  была получена эффективная лазерная генерация и осуществлена непрерывная перестройка длины волны выходного излучения в спектральных областях 1.88–3.10 мкм [4, 5] и 3.77–5.05 мкм [6–9] соответственно.

Промежуточная область была частично перекрыта с помощью  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазера с диапазоном перестройки 2.3–3.4 мкм [10, 11]. В этих работах использовались кристаллы  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ , в которых легирование осуществлялось с помощью твердотельной диффузии в послеростовых отжигах чистых кристаллов  $\text{CdSe}$ . Накачка кристаллов производилась короткими по сравнению с временем жизни верхнего лазерного уровня импульсами (40 и 400 нс против  $\sim 6$  мкс) [12], а выходная энергия лазера не превышала 0.8 мДж.

Настоящая работа посвящена исследованиям лазерных характеристик монокристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ , выращенного из паровой фазы с одновременным легированием, при накачке длинными ( $\sim 300$  мкс) импульсами, а также возможности получения более высокой выходной энергии

кристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -лазера и расширения диапазона перестройки его длины волны.

## 2. Методика выращивания кристаллов $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$

Монокристаллы  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  выращивались из паровой фазы на монокристаллическую затравку при температурах 1100–1150 °С. Массоперенос паровой фазы осуществлялся физическим транспортом в гелии. Для достижения однородного легирования применена технология, разработанная ранее для выращивания однородных монокристаллов твердых растворов [13, 14]. Основной технологический подход заключался в использовании раздельных источников, содержащих сублиматы  $\text{CdSe}$  и  $\text{CrSe}$ , что позволяло за счет регулирования геометрии источников обеспечивать паровую фазу легирующим элементом в широком интервале концентраций и получать кристаллы с концентраций  $\text{Cr}^{2+}$ , равной  $10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Преимуществами данной технологии по сравнению с такими, как рост из расплава с необходимой лигатурой или рост из паровой фазы нелегированного кристалла  $\text{CdSe}$  с последующей диффузией  $\text{Cr}$  в твердом теле через поверхность, являются высокое структурное совершенство и оптическая однородность выращиваемых кристаллов.

Из выращенного таким способом кристалла  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$  был вырезан активный элемент толщиной 5.3 мм и диаметром 30 мм. Направление оптической оси кристалла составляло угол  $3^\circ$  с нормалью к полированным поверхностям активного элемента. Рабочие поверхности активного элемента не просветлялись. Концентрация ионов  $\text{Cr}^{2+}$ , определенная по спектру поглощения кристалла с учетом взятого из [10] сечения поглощения, составляла  $\sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

## 3. Экспериментальная установка

Оптическая схема установки на которой были проведены две серии экспериментов, представлена на рис.1.

В первой серии изучалась зависимость эффективности генерации и пороговой энергии накачки  $\text{Cr}^{2+} : \text{CdSe}$ -

В.А.Акимов. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

В.И.Козловский, Ю.В.Коростелин, А.И.Ландман, Ю.П.Подмарьков, Я.К.Скасырский, М.П.Фролов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: frolovmp@x4u.lebedev.ru

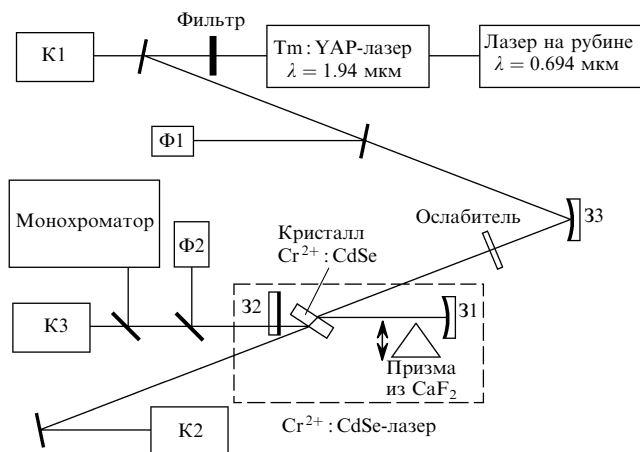


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

лазера с неселективным резонатором от пропускания выходного зеркала. В этом случае резонатор лазера имел длину 125 мм и был образован сферическим (радиус кривизны  $R = 200$  мм) зеркалом 31 и плоским выходным зеркалом 32, пропускание которого в окрестности длины волны 2.65 мкм варьировалось в широких пределах. Пропускание зеркала 31 не превышало 0.3 %.

Во второй серии экспериментов изучался диапазон спектральной перестройки лазера с дисперсионным резонатором. В этом случае длина резонатора составляла 140 мм, а в качестве заднего зеркала 31 использовалось алюминиевое зеркало с  $R = 500$  мм. Диапазон перестройки лазера перекрывался с помощью четырех плоских выходных зеркал, спектральные характеристики которых представлены ниже. Дисперсионным элементом служила призма из CaF<sub>2</sub> с преломляющим углом 70.3°, размещенная в резонаторе вблизи зеркала 31.

Активный элемент лазера был установлен вблизи выходного зеркала под углом Брюстера относительно оптической оси резонатора и ориентирован так, что оптическая ось кристалла Cr<sup>2+</sup>:CdSe лежала в плоскости падения лазерного пучка на поверхность активного элемента. Это сводило к минимуму влияние двулучепреломления кристалла на его генерацию.

Оптическая накачка кристалла Cr<sup>2+</sup>:CdSe осуществлялась излучением импульсного Тm:YAP-лазера с длиной волны  $\lambda = 1.94$  мкм, возбуждаемого светом лазера на рубине с ламповой накачкой ( $\lambda = 0.694$  нм), работавшего в режиме свободной генерации. Прошедшее через кристалл Тm:YAP излучение лазера на рубине отсекалось с помощью фильтра, в качестве которого использовалось дихроичное зеркало, имевшее близкий к 100 % коэффициент отражения на  $\lambda = 0.694$  мкм и пропускание 87 % на  $\lambda = 1.94$  мкм. Максимальная выходная энергия Тm:YAP-лазера достигала 100 мДж, его излучение было линейно поляризовано в горизонтальной плоскости (плоскость падения на кристалл Cr<sup>2+</sup>:CdSe), что сводило к минимуму потери излучения накачки на френелевское отражение от его граней. Накачка кристалла осуществлялась под углом  $\sim 5^\circ$  к оптической оси резонатора, что облегчало измерение энергии прошедшего через кристалл Cr<sup>2+</sup>:CdSe излучения накачки. Кроме того, такая схема предотвращала разрушающее воздействие излучения накачки на зеркала резонатора Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера. Пучок накачки фокусировался на кристалл сферическим алюминиевым зеркалом 33 с фокусным расстоянием 250 мм.

Пятно накачки на входе в кристалл имело сечение в виде слегка вытянутого в вертикальном направлении эллипса площадью 0.6 мм<sup>2</sup>.

В оптической схеме была предусмотрена возможность измерения энергий как падающего на кристалл Cr<sup>2+</sup>:CdSe, так и прошедшего через него излучения накачки, что позволяло по их разности надежно определять поглощенную кристаллом энергию накачки непосредственно в процессе генерации. Для этой цели использовались калориметры К1 и К2 (ИМО-2Н). Выходная энергия Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера измерялась калориметром К3 (ВЧД-2).

Регистрация формы импульсов накачки и генерации осуществлялась фотодиодами Ф1 и Ф2 (фотодиоды PD48 Mid-infrared optoelectronics IBSG), сигналы с которых подавались на осциллограф Tektronix TDS1012В. Длина волны генерации измерялась дифракционным монохроматором с теоретической разрешающей способностью 0.3 нм.

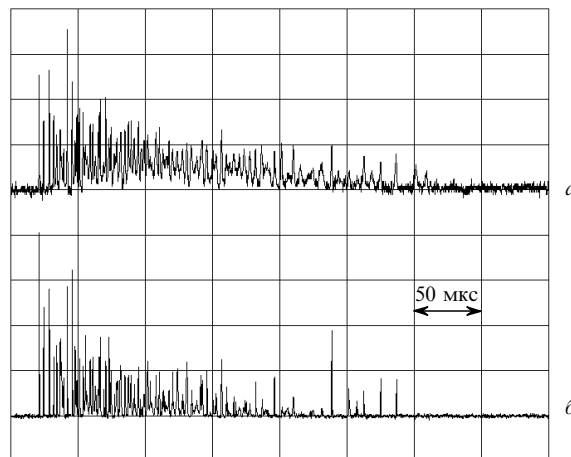
Кроме того, в дополнительной серии экспериментов накачка Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера осуществлялась вдоль оптической оси его резонатора. С этой целью оптическая схема установки была несколько видоизменена, о чем подробнее будет сказано ниже.

Все эксперименты с Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазером проводились при комнатной температуре.

#### 4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.2,а показана форма импульса Тm:YAP-лазера; полная длительность импульса накачки составляла  $\sim 300$  мкс. Импульс имел нерегулярную пиковую структуру, характерную для многомодовых твердотельных лазеров с большим временем жизни верхнего лазерного уровня. На рис.2,б представлена осциллограмма импульса генерации Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера, полученная при использовании выходного зеркала с пропусканием 16 % и энергии падающего на кристалл излучения накачки 65 мДж. Импульс также состоял из пиков, которые следовали за пиками импульса накачки.

В зависимости от спектральной характеристики выходного зеркала спектр генерации Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера без призмы в резонаторе находился в диапазоне 2.59–2.72 мкм и имел ширину  $\sim 50$  нм.

Рис.2. Осциллограммы импульсов накачки (а) и генерации (б) Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера.

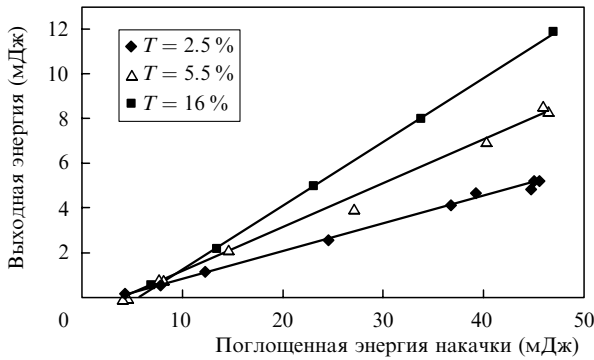


Рис.3. Зависимости выходной энергии Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера от поглощенной энергии накачки, полученные при использовании выходных зеркал с пропусканием 2.5 %, 5.5 % и 16 % и накачке кристалла Cr<sup>2+</sup>:CdSe под углом к оптической оси резонатора.

Зависимости выходной энергии Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера от поглощенной энергии накачки измерялись при использовании набора выходных зеркал с пропусканием на длине волны генерации 2.5 % – 69 %. На рис.3 в качестве примера показаны результаты, полученные при пропускании выходных зеркал 2.5 %, 5.5 % и 16 %. Для каждого из зеркал по экспериментальным точкам были определены значения пороговой поглощенной энергии накачки и дифференциальной эффективности лазера по поглощенной энергии накачки  $\eta$ . Совокупность полученных данных представлена на рис.4. С ростом пропускания зеркала пороговая энергия накачки возрастала от 3 до 19 мДж, а максимальное значение  $\eta$  (28 % – 29 %) достигалось при использовании выходных зеркал с пропусканием 16 % – 35 %.

При установке в резонатор лазера дисперсионной призмы спектр его генерации имел ширину  $\sim 10$  нм и был подвержен влиянию атмосферных паров воды. Использование призмы в качестве селектора позволяло осуществлять плавную перестройку длины волны генерации Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера в спектральной области 2.26–3.61 мкм, что превышает диапазон перестройки, достигнутый авторами [10, 11]. На рис.5,а представлены перестроечные кривые, полученные при фиксированной энергии падающего излучения накачки 65 мДж и использовании четырех выходных зеркал, спектры пропускания которых приведены на рис.5,б. Наблюдающийся в перестроечных кривых провал в окрестности длины волны 2.7 мкм обусловлен поглощением паров воды.

Используя значения  $\eta$  для пяти зеркал с пропусканием  $T$  в диапазоне 2.5 % – 16 %, мы провели оценку внутррезонаторных потерь. На рис.6 представлена зависимость  $1/\eta$  от  $1/T$ . Согласно [15] зависимость

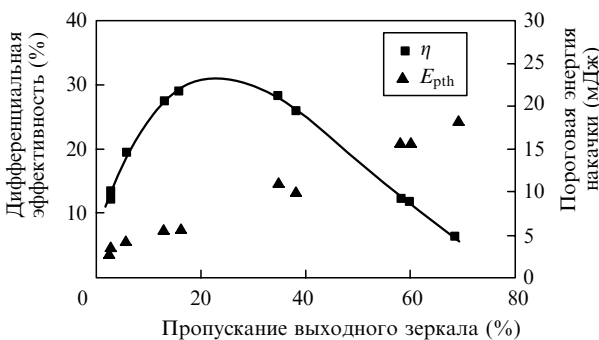


Рис.4. Зависимости дифференциальная эффективность  $\eta$  лазера на основе Cr<sup>2+</sup>:CdSe и пороговой поглощенной энергии накачки  $E_{pth}$  от пропускания выходного зеркала.

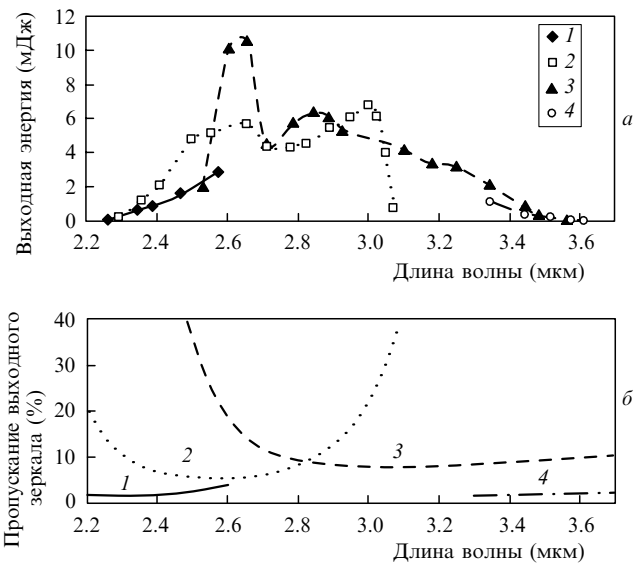


Рис.5. Перестроечные кривые длины волны генерации Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера в резонаторе с призмой, полученные при энергии накачки 65 мДж (а), и спектры пропускания выходных зеркал (б), с которыми они получены.

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\eta_0} + \frac{L}{\eta_0 T} \quad (1)$$

позволяет определить пассивные потери  $L$  за полный оборот резонатора и предельную эффективность лазера  $\eta_0$ :

$$\eta_0 = \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \eta_p \left( 1 - \frac{\sigma_{ESA}}{\sigma} \right), \quad (2)$$

где  $\lambda_p$  – длина волны излучения накачки;  $\lambda_g$  – длина волны излучения генерации;  $\eta_p$  – эффективность использования излучения накачки;  $\sigma_{ESA}$  – сечение поглощения с верхнего лазерного уровня;  $\sigma$  – сечение лазерного перехода.

Из представленных на рис.6 данных было получено  $L = 5.2$  %. Оценка сверху, основанная на предположении, что все потери определяются только внутренними потерями в кристалле, дает коэффициент поглощения на длине волны генерации, равный  $0.045 \text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует о высоком качестве оптического элемента. Из данных на рис.6 было получено, что  $\eta_0 = 0.38$ . Принимая во внимание значения  $\lambda_p$  и  $\lambda_g$ , имеем  $\eta_p(1 - \sigma_{ESA}/\sigma) = 0.52$ . Поскольку в легированных ионами Cr<sup>2+</sup> кристаллах A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> поглощение с верхнего лазерного уровня иона Cr<sup>2+</sup> невелико из-за отсутствия разрешенных оптических переходов, т. е.  $\sigma_{ESA}/\sigma \ll 1$ , можно предположить, что эффек-

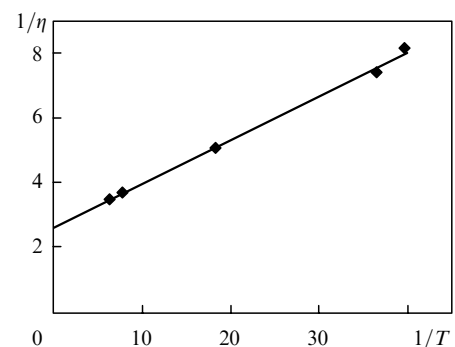


Рис.6. Зависимость обратной эффективности  $1/\eta$  от обратного пропускания выходного зеркала  $1/T$ .

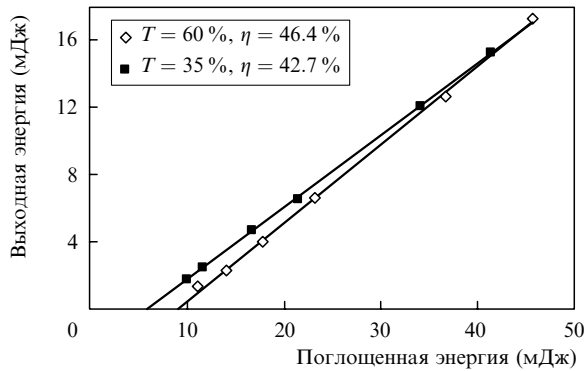


Рис. 7. Зависимости выходной энергии  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера от поглощенной энергии накачки, полученные при накачке кристалла  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  вдоль оптической оси резонатора.

тивность лазерной генерации ограничивалась эффективностью использования излучения накачки, например из-за наличия угла между направлением пучка накачки и оптической осью резонатора, имевшегося в данной схеме эксперимента, и, следовательно, неполного перекрытия областей накачки и генерации внутри активного элемента.

Для проверки этого предположения была проведена дополнительная серия измерений, в которых рабочие грани кристалла  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  были ориентированы перпендикулярно оптической оси резонатора, а его накачка осуществлялась вдоль оптической оси резонатора через зеркало 31. В этом случае зеркало 31 имело радиус кривизны 150 мм, длина резонатора была равна 145 мм, расстояние от выходного зеркала до кристалла составляло 5 мм. Пропускание этого зеркала равнялось 85 % на  $\lambda_p$  и 3 % на  $\lambda_g$ . Площадь пятна накачки на входе в кристалл была увеличена до 1 мм<sup>2</sup>.

В продольной схеме накачки определялись зависимости выходной энергии лазера от поглощенной энергии накачки (рис. 7) при пропускании  $T$  зеркала 32, равном 35 % или 60 %. При этих значениях  $T$  измеренные дифференциальные эффективности по поглощенной энергии накачки составляли соответственно 42.7 % и 46.4 %, а максимальная выходная энергия лазера достигала 17 мДж.

При расположении рабочих граней кристалла перпендикулярно оптической оси выходным зеркалом  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера служит интерферометр Фабри – Перо, образованный зеркалом 32 с коэффициентом отражения  $(1 - T)$  и обращенной к этому зеркалу гранью кристалла  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$  с френелевским коэффициентом отражения  $R_F = 18\%$ . Нетрудно показать, что эффективное пропускание  $T_{\text{eff}}$  такого составного зеркала определяется выражением

$$T_{\text{eff}} = \frac{T(1 - R_F)}{[1 + \sqrt{(1 - T)R_F}]^2}, \quad (3)$$

из которого следует, что для использованных нами зеркал 32  $T_{\text{eff}}$  составляло 15.9 % и 30.6 %; эти значения близки к оптимальной величине пропускания, следующей из данных рис. 4.

Достигнутое в эксперименте  $\eta = 46.4\%$  соответствует квантовой эффективности лазера 63 %, что хорошо согласуется с реализованной в [10] квантовой эффективностью 61 %.

Из рис. 2 видно, что на временах, превышающих 200 мкс, импульс генерации  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ -лазера состоит из редко стоящих пичков. Такой временной ход генерации, по-видимому, связан с тем, что средняя мощность накачки на больших временах монотонно снижается, а пороговое условие достигается только в моменты, соответствующие наиболее мощным пичкам излучения накачки. Это обстоятельство, очевидно, снижает эффективность генерации. По нашему мнению, она может быть повышена при использовании импульсов накачки с постоянной интенсивностью.

## 5. Заключение

В настоящей работе получена лазерная генерация на кристалле  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ , выращенном из паровой фазы с одновременным легированием. При накачке импульсами длительностью 300 мкс достигнутая квантовая эффективность по отношению к поглощенной энергии накачки составила 63 %, а выходная энергии – 17 мДж. Оценены внутренние потери в кристалле, коэффициент поглощения на длине волны генерации не превышал  $0.045 \text{ см}^{-1}$ . В дисперсионном резонаторе с призмой осуществлена плавная перестройка длины волны генерации в спектральном диапазоне 2.26 – 3.61 мкм.

Работа поддержана грантом Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-6055.2006.02, Программой фундаментальных исследований ОФН РАН «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур», Программой Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы» и ЗАО НТЦ «Реагент».

- DeLoach L.D., Page R.H., Wilke G.D., Payne S.A., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 885 (1996).
- Page R.H., Schaffers K.I., DeLoach L.D., Wilke G.D., Patel F.D., Tassano J.B., Payne S.A., Krupke W.F., Chen K.-T., Burger A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 609 (1997).
- Kück S. *J. Alloys and Compounds*, **341**, 28 (2002).
- Sorokina I.T. *Opt. Mater.*, **26**, 395 (2004).
- Demirbas U., Sennaroglu A. *Opt. Lett.*, **31**, 2293 (2006).
- Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24**, 1720 (1999).
- Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **35**, 809 (2005).
- Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **36**, 299 (2006).
- Fedorov V.V., Mirov S.B., Gallian A., Badikov V.V., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Akimov V.A., Voronov A.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42**, 907 (2006).
- McKay J., Schepler K.L., Catella G.C. *Opt. Lett.*, **24**, 1575 (1999).
- McKay J., Roh W.B., Schepler K.L. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ASSL-1001-WA7>
- Schepler K.L., Kück S., Shiozawa L. *J. Luminescence*, **72–74**, 116 (1997).
- Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Nasibov A.S., Shapkin P.V. *J. Crystal Growth*, **159**, 181 (1996).
- Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I. *J. Alloys and Compounds*, **371**, 25 (2004).
- Caird J.A., Pane S.A., Staver P.R., Ramponi A.J., Chase L.L., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 1077 (1988).