

УДК 535:530.182:621.372.632

С.А. БЕРЕЗНАЯ**, Д.Е. ГЕНИН***, З.В. КОРОТЧЕНКО**, А.Н. ПАНЧЕНКО*, С.Ю. САРКИСОВ**, ***,
А.Г. СИТНИКОВ*, ***, В.Ф. ТАРАСЕНКО*, А.Е. ТЕЛЬМИНОВ*

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ПРИ НАКАЧКЕ КРИСТАЛЛОВ GaSe И GaSe_{0,7}S_{0,3} ИЗЛУЧЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО СО₂-ЛАЗЕРА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 10,6 мкм¹

Представлены теоретические оценки и экспериментальные результаты исследования генерации второй гармоники в нелинейных кристаллах GaSe и GaSe:S при возбуждении СО₂-лазером, работающим на длине волны 10,6 мкм. Измеренные максимальная мощность излучения на второй гармонике и эффективность преобразования по мощности для кристаллов GaSe составили 8 кВт и 0,51 % соответственно. Приведены данные по порогам разрушения кристаллов GaSe и GaSe_{0,7}S_{0,3} при облучении СО₂-лазером.

Ключевые слова: нелинейные кристаллы, генерация второй гармоники, порог оптического пробоя.

Введение

В последнее время проводятся активные исследования, направленные на расширение диапазона частот генерации лазеров вплоть до терагерцового диапазона, с помощью преобразования излучения в нелинейных кристаллах. Кристаллы селенида галлия являются перспективными материалами для нелинейной оптики среднего ИК- и терагерцового диапазонов [1]. Основными достоинствами этого материала являются: широкий диапазон прозрачности 0,65–18 мкм, малое оптическое поглощение $< 0,1 \text{ см}^{-1}$, высокая нелинейная восприимчивость, высокая лучевая прочность, возможность достижения фазового синхронизма для различных типов нелинейных взаимодействий. С другой стороны, кристаллы GaSe обладают недостатками, связанными с низкой твердостью и слоистой структурой. Увеличению твердости кристаллов способствует их легирование [2].

Как известно, для получения высоких мощностей преобразованного по частоте излучения необходимо использовать значительные мощности излучения накачки. В этой связи необходимо знать, как изменятся пороги пробоя при легировании кристаллов GaSe. В данной работе проведено сравнение эффективностей процессов генерации второй гармоники в кристаллах GaSe и GaSe:S, а также определены пороги пробоя для кристаллов GaSe и GaSe_{0,7}S_{0,3} при воздействии излучения импульсного СО₂-лазера.

Теория

Перед проведением экспериментов по генерации второй гармоники (ГВГ) в кристаллах GaSe и GaSe_{0,7}S_{0,3} были сделаны расчеты углов фазового синхронизма θ (рис. 1) и выбран тип взаимодействия. При расчетах использованы дисперсионные соотношения из [3] для GaSe и из [4] для GaSeS (использованы приведенные в [4] дисперсионные уравнения для кристалла GaSe_{0,6}S_{0,4}).

Мощность второй гармоники пропорциональна коэффициентам качества (рис. 2). Эффективные нелинейности выражаются как $d_{\text{eff}} = -d_{22}\cos\theta\sin 3\varphi$ и $d_{22}\cos^2\theta\cos 3\varphi$ для первого и второго типов ГВГ в GaSe соответственно. В соответствии с рис. 2 первый тип взаимодействия в обоих кристаллах требует меньших углов синхронизма и соответствует более высоким коэффициентам качества. При расчетах было принято, что d_{22} обоих типов кристаллов составляет 54 пм/В.

Так как по расчетам I тип взаимодействия является более эффективным, наши эксперименты проводились в этой конфигурации. Поляризация лазерного излучения была вертикальной, а нелинейный кристалл вращался вокруг вертикальной оси для подстройки под углы синхронизма.

Расчет мощности второй гармоники P_{SHG} был проведен по известному соотношению для относительно невысоких эффективностей преобразования:

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009–2013 годы, г/к № 02.740.11.0444, и гранта Президента РФ НШ-4297.2010.2.

$$P_{\text{SHG}} = \frac{2\pi^2 d_{\text{eff}}^2 d^2 P_{\text{CO}_2}^2}{\epsilon_0 c n_{\text{CO}_2}^2 n_{\text{SHG}} \lambda_{\text{SHG}}^2 S} \sin^2 \left(\frac{|\Delta k| d}{2} \right),$$

где d – длина кристалла; P_{CO_2} – мощность излучения CO_2 -лазера; n_{CO_2} , n_{SHG} – показатели преломления на длине волны CO_2 -лазера и второй гармоники соответственно; S – площадь поперечного сечения лазерного пучка; c – скорость света; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; Δk – волновая расстройка.

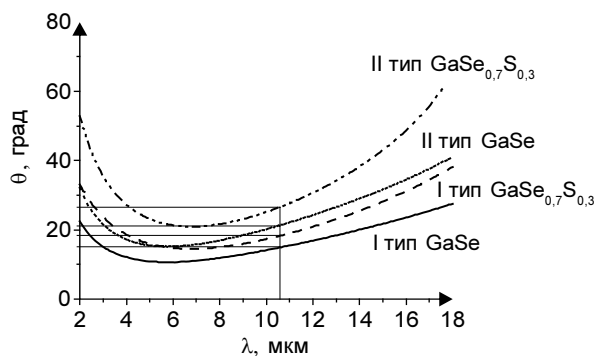


Рис. 1. Кривые фазового синхронизма для ГВГ в кристаллах GaSe и $\text{GaSe}_{0,7}\text{S}_{0,3}$ по I и II типам взаимодействия. Выделены значения внутренних углов синхронизма для ГВГ-излучения на длине волны 10,6 мкм

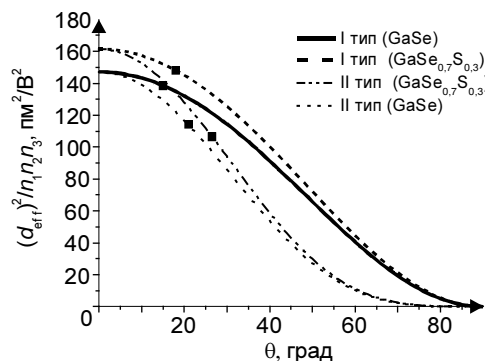


Рис. 2. Коэффициенты качества для ГВГ в кристаллах GaSe и $\text{GaSe}_{0,7}\text{S}_{0,3}$ по I и II типам взаимодействия. Отмечены точки, соответствующие углам синхронизма (рис. 1) для ГВГ-излучения на длине волны 10,6 мкм

Согласно расчетам, можно ожидать большую эффективность ГВГ в кристаллах $\text{GaSe}_{0,7}\text{S}_{0,3}$ по сравнению с GaSe. С другой стороны, реальная нелинейность в этих кристаллах может быть ниже, чем в GaSe.

Техника эксперимента

В экспериментах использовался мощный импульсный CO_2 -лазер с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии и прерывателем тока на основе SOS-диодов. Лазер был настроен на основную моду TEM_{00} на длине волны 10,6 мкм. Индуктивный накопитель позволял легко формировать импульс с коротким передним пиком около 50 нс длительностью и микросекундным хвостом [5].

Оптический резонатор состоял из глухого алюминиевого зеркала с радиусом кривизны 5 м и плоской пластинки из KRS-5 с коэффициентом отражения 32 % на длине волны лазерного излучения. Для получения поляризованного излучения внутрь резонатора устанавливалась пластинка из NaCl, расположенная под углом Брюстера к оптической оси резонатора. Для селекции поперечных мод и формирования одномодового режима применялась диафрагма диаметром 7 мм, также расположенная внутри резонатора. Выходная энергия лазерного и преобразованного излучения измерялась калориметром OPHIR с измерительными головками FL-250A, PE-50BB. Ошибка в измерениях энергии была не больше 20 %. Временные формы импульсов регистрировались Ge-Au-фоторезистором ФСГ-22-3А1. Электрические сигналы с фоторезистора регистрировались осциллографом Tektronix TDS-3034B с полосой пропускания 300 МГц. Для того чтобы отсечь излучение CO_2 -лазера, проходящее через кристалл, использовалась сапфировая пластинка с коэффициентом пропускания 43 % на длине волны $\lambda = 5,3$ мкм, непрозрачная на $\lambda = 10,6$ мкм.

В лазере использовалась рабочая смесь $\text{He}:\text{N}_2:\text{CO}_2 = 1:1:3$ при общем давлении 0,7 атм, общая энергия импульса при этом была 110 мДж. Временная форма импульса генерации для этого случая приведена на рис. 3. Первый пик излучения был длительностью 50 нс на полувысоте и содержал 35 % от всей энергии импульса.

В экспериментах по ГВГ лазер работал на смеси $\text{H}_2:\text{N}_2:\text{CO}_2 = 2:4:1$ при общем давлении 0,7 атм. При этом энергия генерации лазера составляла 180 мДж, то есть пиковая мощность излучения возросла примерно в 2,5 раза (рис. 4), в первом пике содержалось 52 % от всей энергии в

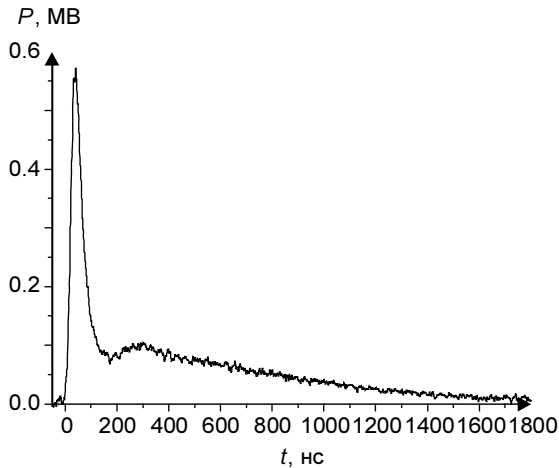


Рис. 3. Осциллограммы импульсов излучения CO₂-лазера, работающего на смеси He:N₂:CO₂ = 1:1:3 при общем давлении $p = 0,7$ атм

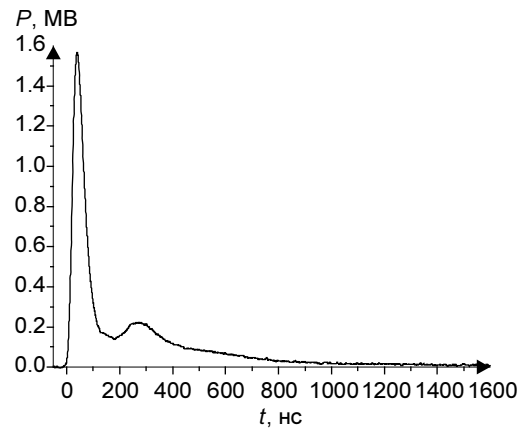


Рис. 4. Осциллограммы импульсов излучения CO₂-лазера, работающего на смеси H₂:N₂:CO₂ = 2:4:1 при общем давлении $p = 0,7$ атм

импульсе. Измеренный профиль интенсивности лазерного излучения соответствует гауссовому с радиусом пучка 3 мм по уровню e^{-2} (рис. 5).

На поверхность кристалла лазерное излучение фокусировалось NaCl-линзой с фокусным расстоянием $f = 234$ мм, а изменение плотности мощности происходило путем перемещения кристалла относительно фокуса линзы. Кристалл перемещался до тех пор, пока падающее излучение не начинало разрушать его. Порогом пробоя считалось появление на поверхности кристалла едва различимых глазом изменений. Затем изменения регистрировались оптическим микроскопом Altami CM1065-T. Расстояния от линзы до поверхности кристалла, при которых происходили изменения поверхности, составили $L_d = 17,6$ и $18,8$ см для GaSe и GaSe_{0,7}S_{0,3} соответственно.

Поэтому, чтобы избежать пробоя кристалла при проведении экспериментов по ГВГ, расстояние от линзы до кристалла было выбрано равным $L_d = 12$ см. При этом плотность мощности излучения накачки на поверхности кристалла составляла $11,6$ МВт/см².

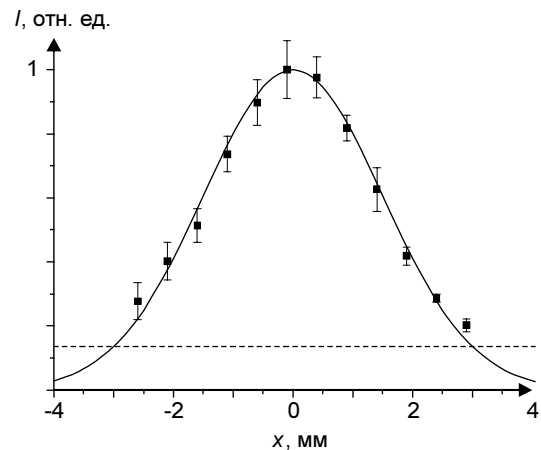


Рис. 5. Профиль поперечного сечения пучка лазерного излучения и распределение Гаусса (сплошная линия – теория, точки – эксперимент)

Оценка и измерение порогов пробоя

Фотографии поврежденных поверхности различных кристаллов приведены на рис. 6. Видно, что изменения на поверхности GaSe похожи на начало плавления, тогда как на поверхности GaSe_{0,7}S_{0,3} наблюдаются многочисленные мелкие трещины.

Расчет порога разрушения I_d кристаллов проводился в приближении гауссова пучка [6, 7]:

$$I_d = 2E / \pi \omega_d^2 \int_0^{\infty} \frac{\psi(t)}{\psi_{\max}} dt; \quad (1)$$

$$\omega_d^2 = \omega_{02}^2 \left[1 + \left(\lambda \frac{f - L_d}{\pi \omega_{02}^2} \right)^2 \right], \quad \omega_{02} = \frac{\lambda f}{\pi \omega_{01}}, \quad (2)$$

где $\psi(t)/\psi_{\max}$ – нормированная форма импульса падающего излучения; ω_{01} – радиус пучка, падающего на линзу; ω_{02} – радиус пучка в точке фокуса.

Полученные величины порога разрушения составили $I_d = 16$ и 26 МВт/см² для кристаллов GaSe и GaSe_{0,7}S_{0,3} соответственно. Видно, что легированный кристалл обладает более высоким

порогом повреждения, что важно для осуществления преобразования лазерного ИК-излучения, например, в ТГц-диапазон. Пороги повреждения, полученные для GaSe, примерно на один порядок ниже приведенных в работе [6]. Различие величин порогов наблюдается, вероятно, из-за того, что в нашем случае повреждения отчетливо видны только в микроскоп, а в работе [6] пороговой считалась мощность излучения, при которой регистрировался оптический пробой на поверхности кристалла.

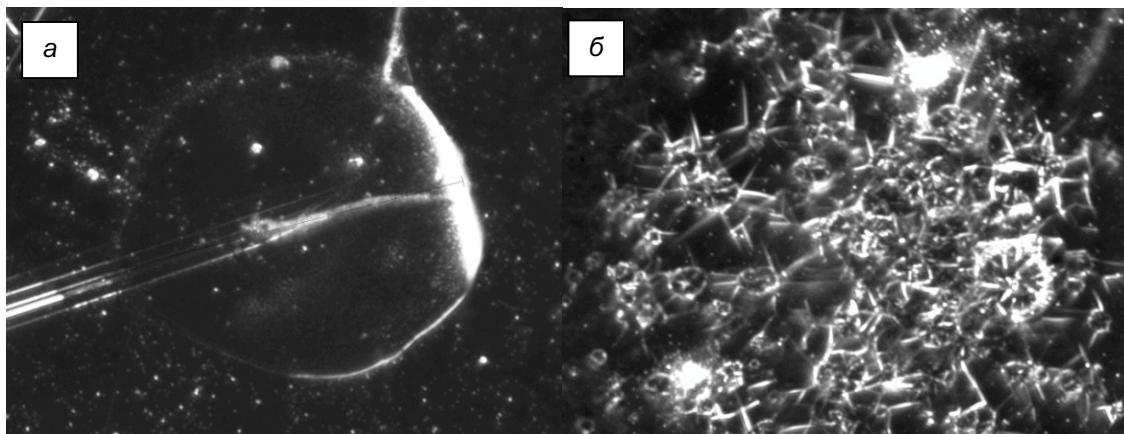


Рис. 6. Фотографии пятен пробоя на поверхностях кристаллов GaSe (а) и GaSe_{0,7}S_{0,3} (б), полученные с помощью оптического микроскопа Altami CM1065-T

Мы считаем, что наши измерения технологически более полезны, так как кристалл даже при незначительных нарушениях поверхности не может быть использован в качестве преобразователя оптического излучения, поскольку будет разрушен при следующем лазерном импульсе.

Известно, что оптический пробой происходит в продуктах разрушения поверхности, т.е. поверхность кристалла сначала нагревается, плавится и испаряется. Затем в эрозионном факеле формируется лазерная искра. Другими словами, кристалл будет поврежден еще до момента возникновения оптического пробоя.

Генерация второй гармоники

Эксперимент по генерации второй гармоники проводился следующим образом. Лазерное излучение на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм направлялось на кристалл, расположенный на подвижной платформе. Сначала проводилась настройка по вертикальному углу θ , а затем по азимутальному φ .

Измеренные зависимости мощности второй гармоники от азимутального угла φ и от угла падения θ представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

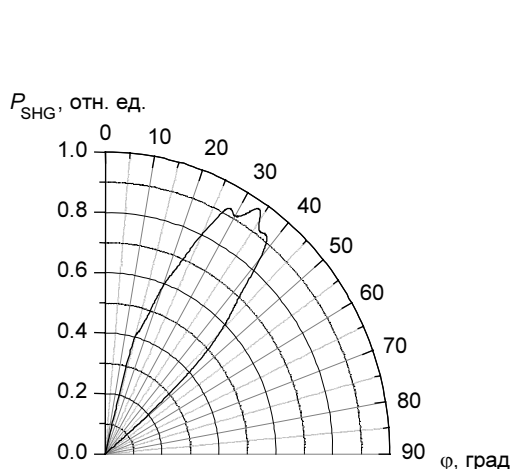


Рис. 7. Измеренная зависимость ГВГ-мощности от азимутального угла φ для GaSe

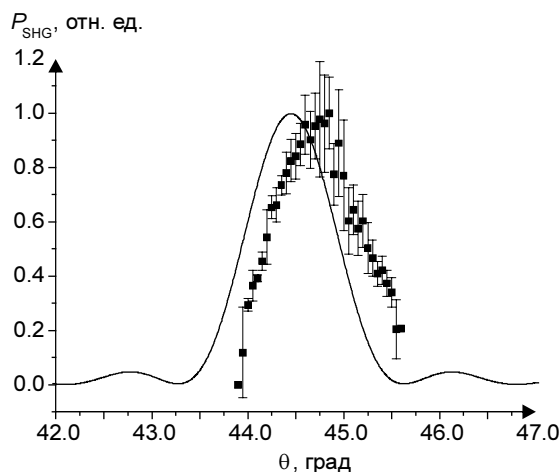


Рис. 8. Зависимость мощности ГВГ от угла падения излучения накачки θ для GaSe. Точки – экспериментальные данные, линия – оценки по выражению (1)

Расчетные и экспериментальные угловые зависимости мощности ГВГ от угла θ имеют хорошее согласие. Экспериментальный внешний угол фазового синхронизма составляет $\theta = 44,8^\circ$, а расчетный – $44,5^\circ$, т.е. наблюдается несовпадение в $0,2^\circ$. Ширины на полувысоте теоретической и экспериментальной угловой зависимости мощности ГВГ от θ совпадают и равны $1,1^\circ$.

На рис. 9 представлены временные формы импульсов излучения на второй гармонике. В первом случае (кривая 1) кристалл позволил получить излучение на $5,3$ мкм с помощью I типа ГВГ со значительной мощностью, даже без фокусировки излучения накачки.

Удельная энергия лазерного излучения на поверхности кристалла была порядка 2 Дж/см². Согласно формуле (1), фокусировка лазерного излучения накачки должна привести к более высокой эффективности преобразования энергии. В эксперименте пиковая мощность преобразованного излучения при увеличении мощности накачки удвоилась и достигла 8 кВт для GaSe (кривая 2).

Рис. 10 показывает эффективность η -преобразования мгновенной мощности для кристалла GaSe для сфокусированного излучения лазера. Эффективность преобразования мгновенной мощности определялась путем деления мгновенной мощности преобразованного излучения на величину мгновенной мощности излучения накачки.

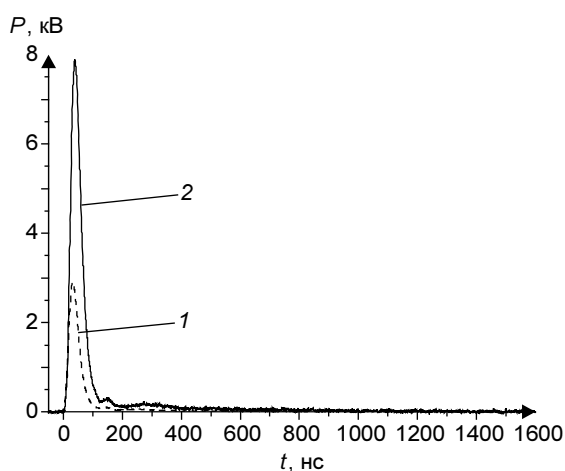


Рис. 9. Временная форма импульсов второй гармоники излучения для GaSe: кр. 1 – без линзы; кр. 2 – с линзой

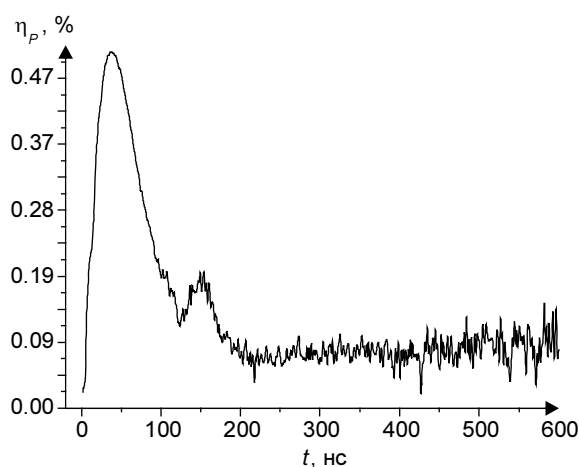


Рис. 10. Эффективность преобразования мгновенной мощности для GaSe в случае с линзой

Из рис. 10 видно, что максимальная эффективность преобразования наблюдается в течение первых ≈ 200 нс лазерного импульса. Максимальная эффективность достигается в момент максимума мощности лазерного импульса и составляет $0,51\%$. Следует отметить, что ГВГ наблюдалась в течение всего импульса накачки, однако эффективность преобразования в хвосте лазерного импульса была ниже на порядок.

Максимальная эффективность преобразования энергии, полученная в наших экспериментах, составила $0,38\%$: при 180 мДж падающего излучения получено $0,7$ мДж на длине волны $5,3$ мкм. Для увеличения энергетической эффективности необходимо обеспечить большее содержание энергии в первом пике лазерного излучения.

К сожалению, измерения мощности по генерации второй гармоники GaSe_{0,7}S_{0,3} были на пределе разрешения экспериментальной установки. Мы считаем, что мощности ГВГ были на порядок ниже, чем для GaSe. Низкая мощность ГВГ в кристалле GaSe_{0,7}S_{0,3} соответствует теоретическим расчетам по формуле (1), так как кристалл GaSe_{0,7}S_{0,3} имел длину $3,7$ мм, в то время как толщина кристалла GaSe составляла 10 мм.

Для более точного сравнения эффективности ГВГ в GaSe_{0,7}S_{0,3} и GaSe необходимо использовать кристаллы одинаковой длины и повысить саму эффективность преобразования, например, укорачивая лазерные импульсы. Кроме того, имеющийся запас по пороговой мощности для кристалла GaSe_{0,7}S_{0,3} позволяет увеличить мощность накачки примерно в 2 раза. В дальнейших экспериментах планируется преобразовать линии излучения CO₂-лазера в терагерцовый диапазон частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shi W. and Ding Y.J. // Appl. Phys. Lett. – 2004. – V. 84. – No. 10. – P. 1635–1637.
2. Sarkisov S.Yu., Morozov A.N., Kazakov A.V., et al. // Proc.–Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. International Siberian Conference on control and communications (SIBCON-2009). – Tomsk, March 27–28. – 2009. – P. 138–142.
3. Vodopyanov K.L. and Kulevskii L.A. // Opt. Commun. – 1995. – V. 118. – P. 375–378.
4. Аллахвердиев К.Р. и др. // Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9. – № 7. – С. 1483–1485.
5. Орловский В.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Там же. – 2010. – Т. 40. – № 3. – С. 192–194.
6. Andreev Yu.M. et al. // Kvant. Electron. – 2001. – V. 31. – No. 12. – P. 1075.
7. Звелто О. Физика лазеров. – М.: Мир, 1979. – 376 с.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 24.06.10.

**Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова

Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия

***Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: alex@to.hcei.tsc.ru

Березная Светлана Александровна, ведущ. технолог;

Генин Дмитрий Евгеньевич, магистрант;

Коротченко Зоя Владимировна, ведущ. технолог;

Панченко Алексей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Саркисов Сергей Юрьевич, зав. лабораторией, науч. сотр.;

Ситников Алексей Геннадьевич, к.ф.-м.н., науч. сотр., доцент;

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., зав. лабораторией;

Тельминов Алексей Евгеньевич, к.ф.-м.н., мл. науч. сотр.