

УДК 537.5:535.376

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР НА СОЕДИНЕНИЯХ А2В6 С ФОКОННОЙ ВСТАВКОЙ

А. С. Насибов, В. Г. Баграмов, К. В. Бережной, П. В. Шапкин

Рассмотрено устройство электроразрядного полупроводникового лазера с фоконной вставкой. В качестве активной среды применены пластины из соединений CdS , $Cd_xZn_{1-x}Se$ и CdS_xSe_{1-x} . В случае CdS наблюдалась генерация лазерного излучения ($\lambda = 525$ нм). Мощность излучения достигала 3 кВт при длительности импульса 3 нс. Рассмотрены условия получения генерации в стримерном режиме. Исследованы спектральные характеристики излучения канала разряда в пластинах $Cd_xZn_{1-x}Se$ и CdS_xSe_{1-x} . Показано, что спектр состоит из дискретных линий, которые возникают по мере распространения разряда и соответствуют изменению состава тройного соединения, полученного в процессе роста монокристалла. Предполагается, что применение тройных твердых растворов А2В6 позволит получить последовательную генерацию импульсов лазерного излучения в диапазоне 480–700 нм.

Ключевые слова: электроразрядный полупроводниковый лазер, твердые растворы А2В6, стримерный разряд.

Работа посвящена дальнейшему развитию электроразрядных полупроводниковых лазеров (ЭПЛ), в которых в качестве активной среды используются прямозонные соединения А2В6. Исследования лазерного излучения полупроводников при развитии в них стримерного разряда начались в 80-е годы прошлого века [1–5]. Несмотря на то, что уже первые исследования продемонстрировали такие уникальные возможности стримерного разряда как генерация мощных ультракоротких импульсов лазерного излучения и определение по характеристикам разряда (направление движения, длина, спектр) кристаллографических направлений, проводимости и однородности, дальней-

шие исследования прекратились из-за ряда существенных технических и технологических причин. Развитие современных методов формирования ультракоротких импульсов высокого напряжения [6, 7], волоконно-оптических систем регистрации и скоростной регистрирующей аппаратуры [8–10] создали предпосылки для дальнейшего развития этого направления [11–13]. В результате за последние годы был создан новый тип электроразрядного лазера [14] и значительно расширились возможности исследования его характеристик. Из результатов, полученных в последнее время, следует отметить эффект генерации на трех спектральных линиях 509, 480 и 469 нм при использовании в качестве активной среды $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ [15]. Нами проведено дальнейшее усовершенствование ЭПЛ путем применения световода переменного сечения (фокона). Применение фокона позволило: развязать от высокого напряжения вход световода, увеличить изображение ближней зоны излучения и обеспечить ввод излучения в волоконные кабели. В настоящей работе приведена схема устройства ЭПЛ с фоконом (ЭПЛ-Ф) и рассмотрены результаты экспериментов с активными элементами из монокристаллов CdS , $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ и $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Se}$. Основной целью экспериментов являлось подтверждение возможности получения эффекта генерации на нескольких спектральных линиях тройных соединений А2В6 и дальнейшее освоение диапазона $\lambda = 480\text{--}600$ нм.

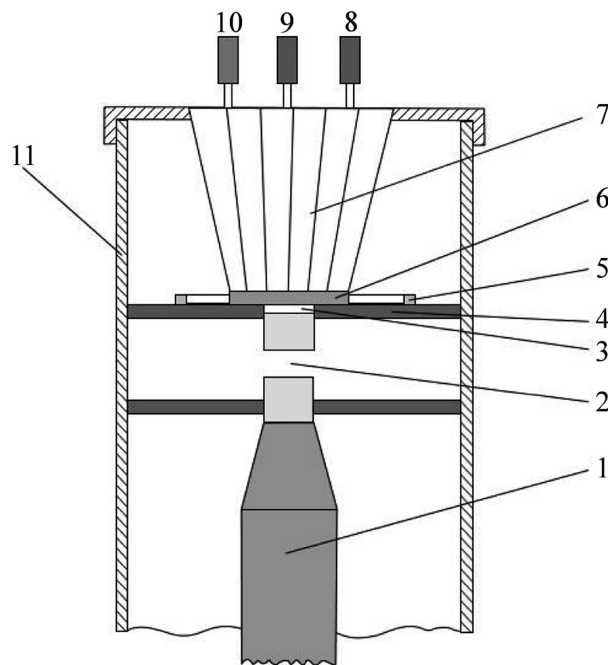


Рис. 1: Схема устройства электроразрядного полупроводникового лазера с фоконой вставкой (ЭПЛ-Ф) (пояснения в тексте).

Для исследования характеристик ЭПЛ был создан испытательный стенд, оборудованный аппаратурой для регистрации быстропротекающих процессов с волоконно-оптической системой передачи оптических сигналов [8]. Схема устройства ЭПЛ-Ф дана на рис. 1. В качестве генератора высоковольтных импульсов использовался высоковольтный блок малогабаритного импульсного радиационного аппарата МИРА-2М. Импульс генератора амплитудой 100 кВ через водородный разрядник поступал на высоковольтный электрод 1 коаксиальной камеры ЭПЛ. После пробоя разрядного промежутка 2 максимальная напряженность электрического поля возникала по кромке отверстия 3 в верхней изоляционной шайбе 4. Для плотного контакта плоскость изоляционной шайбы 4 смазывалась жидким диэлектриком. Меняя диаметр и положение кольцевого электрода 5, можно было менять направление развития разряда (стримера) вдоль или поперек плоскости полупроводниковой пластины 6. Изображение стримерного разряда, увеличенное в 2.2 раза, наблюдалось на выходной плоскости фокона 7. Все элементы ЭПЛ-Ф размещены в металлическом цилиндре с крышкой 11. Регистрация световых сигналов и синхронизация стрик-камеры осуществлялись с помощью волоконно-оптических кабелей (ВОК) 8-10. ВОК с диаметром волокна 100–200 мкм устанавливались на выходной поверхности фокона в исследуемых точках трека стримера. Световые сигналы поступали на малогабаритный спектрометр ФСД-9 и стрик-камеру UVSC-25 с волоконным входом, разработки ИОФРАН [10]. Необходимая задержка ~ 5 нс между импульсом синхронизации стрик-камеры и импульсом излучения осуществлялась путем подбора длины ВОК, по которому сигналы поступали на вход камеры. Для регистрации световых сигналов применялись также приемник излучения ФЭК-22М, цифровая фотокамера DSC-N9 и осциллограф Tektronix TDS-320. Активные элементы в виде пластин изготавливались из монокристаллов соединений A_2B_6 , выращенных на ориентированных подложках методом пересублимации из газовой фазы [16]. Пластины вырезались в двух направлениях – перпендикулярном или параллельном оси роста кристалла, отжигались при 850°C в парах серы и затем полировались механическим или химико-механическим способами. Характерная толщина пластин 1–5 мм, площадь 10×10 мм².

На рис. 2 дана фотография свечения стримерного разряда в пластине CdS толщиной 1 мм, вырезанной перпендикулярно главной оси симметрии кристалла. Основные направления движения разрядов образуют шестиугольную звезду с характерным углом 60° . От основных разрядов отходят отростки, образующие между собой угол в 120° . Распространение стримера в определенных кристаллографических направлениях связано с анизотропией в распределении внутренних полей кристалла $E_i = \frac{b\epsilon_i}{el}$,

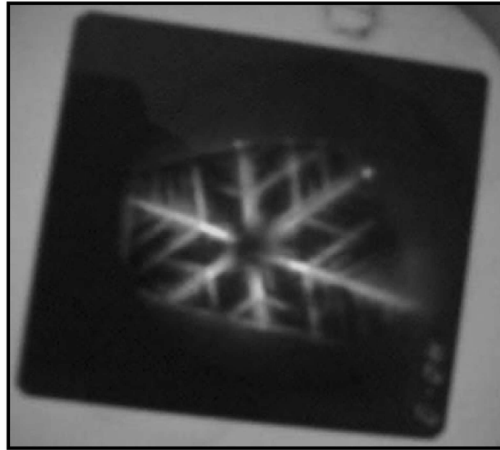


Рис. 2: Фотография свечения стримерного разряда через фильтр HC-9 (4×4 см) в пластине CdS толщиной 1 мм.

где $b = 0.3$ – коэффициент, определенный численными расчетами, ε_i – энергия ионизации, e – заряд электрона, l – длина свободного пробега электрона. В случае CdS $E_i \approx 10^6$ В/см [1]. Соответственно, коэффициент и частота ударной ионизации имеют анизотропное распределение и максимальны в направлениях распространения стримеров. Длина и интенсивность свечения отростков уменьшаются от начала к концу треков основных разрядов, что связано с параметрами импульса напряжения и проводимости кристалла [1, 17].

Спектр люминесценции треков разряда и осциллограмма импульса люминесценции приведены на рис. 3 и рис. 4. Сравнение формы и длительности импульса люминесценции с импульсом высокого напряжения показало, что стример возникал при напряжениях 10–20 кВ. Возникновение генерации лазерного излучения в данном случае маловероятно из-за большой длины трека стримера (~ 1 см) и механической полировки поверхности пластины, что приводит к значительным потерям излучения поперек и вдоль направления движения стримера. Для создания условий генерации лазерного излучения были изготовлены плоскопараллельные пластины толщиной 0.3–0.5 мм, отполированные химико-механическим способом.

Плоскости пластин были ортогональны одному из основных направлений движения стримера. В этом случае разряд распространялся от одной плоскости к другой и от него отходили три боковых отростка с углом между ними 120° (рис. 5(а)). С увеличением напряженности электрического поля боковые отростки исчезали и возникали все признаки лазерного излучения – резко возрастала яркость свечения (рис. 5(а), (б)), на-

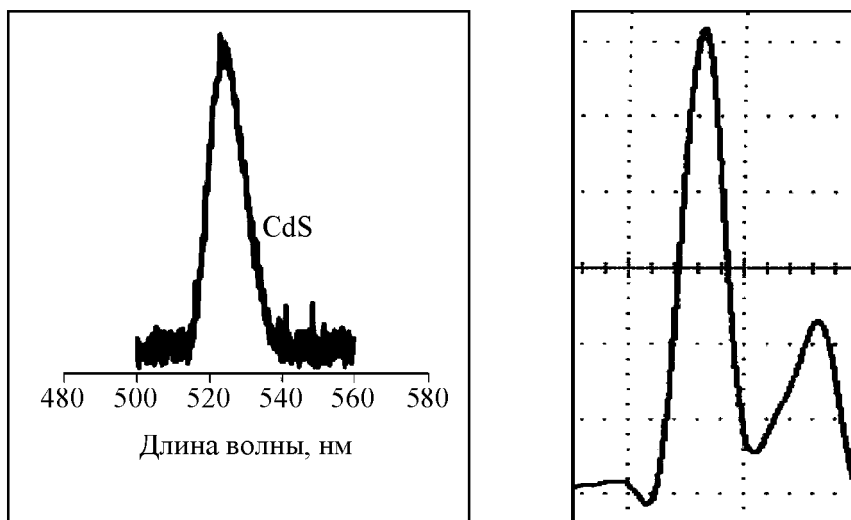


Рис. 3: Спектр люминесценции стримерного разряда.

Рис. 4: Осциллограмма импульса стримерной люминесценции пластины CdS . Цена крупного деления 10 нс.

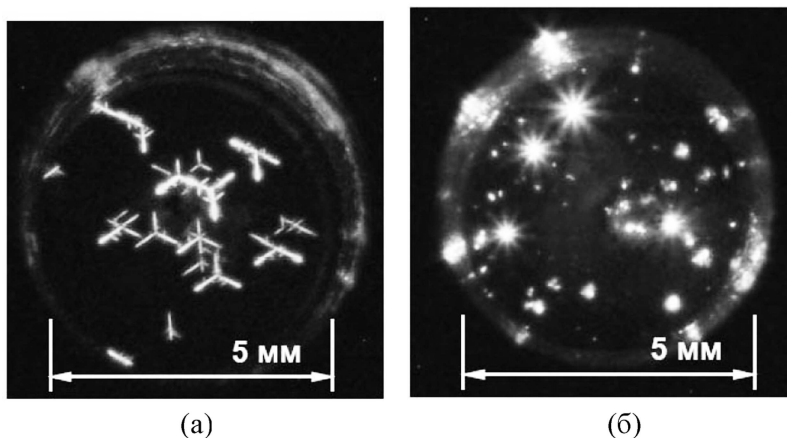


Рис. 5: Свечение пластин сульфида кадмия при разных напряженностях электрического поля в промежутке катод-анод. (а) толщина пластины 0.55 мм, расстояние анод-пластина 2 мм, катод-пластина 10 мм, напряжение 100 кВ; (б) толщина пластины 0.48 мм, расстояние анод-пластина 1 мм, катод-пластина 1 мм, напряжение 150 кВ.

блюдалось резкое уменьшение длительности и увеличение мощности до 3 кВт (рис. 4, б), сужение спектра (рис. 3, 7), и появление направленности излучения (рис. 8).

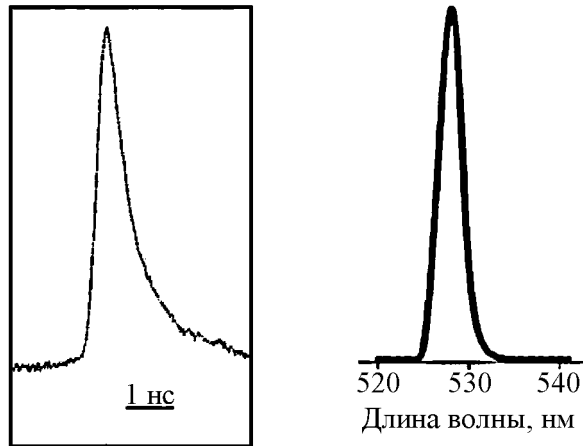


Рис. 6: Форма импульса лазерного излучения пластины CdS, зарегистрированная стрик-камерой. Импульсная мощность излучения 3 кВт.

Рис. 7: Спектр лазерного излучения пластины CdS.

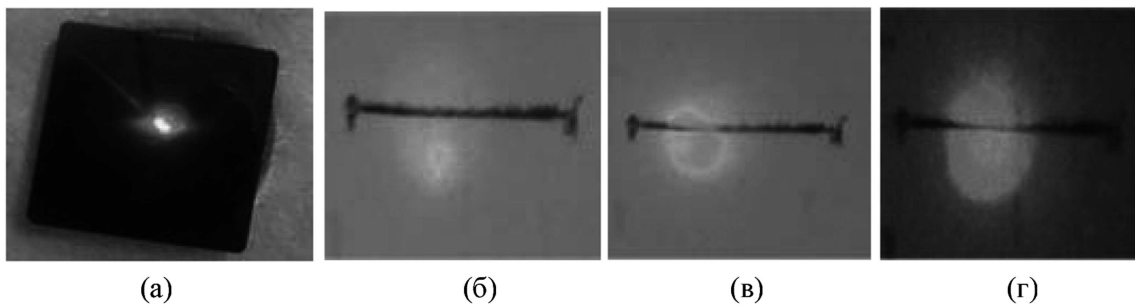


Рис. 8: Фото ближней зоны (а) лазерного излучения пластины CdS через фильтр HC-9 и дальней зоны ((б), (в), (г)) на диффузном экране при увеличении напряженности электрического поля. Расстояние от выходной плоскости фоконна до экрана 20 мм, длина метки 10 мм, размер пластины фильтра 40×40 мм.

На рис. 8 даны снимки ближней (а) и дальней зоны ((б), (в), (г)) излучения ЭПЛ в режиме генерации лазерного излучения при уменьшении внутреннего диаметра кольцевого электрода. Максимальная пиковая мощность излучения достигала 3 кВт. Из сравнения импульса лазерного излучения (рис. 6) с люминесцентным (рис. 4) видно, что длительность генерации лазерного излучения сократилась и отсутствует второй пик, что объясняется порговым характером начала генерации. Для возникновения генерации необходимо, чтобы усиление G_{z_0} компенсировало потери в оптическом резонаторе,

образованном плоскостями пластины:

$$Gz_0 = \alpha_a z_0 + \alpha_P(1 - z_0) + \Delta_R + \Delta_D,$$

где α_a , α_P – потери на поглощение в активной и пассивной областях резонатора; Δ_R , Δ_D – потери на зеркалах и дифракционные; z_0 , L – длина возбужденной области и расстояние между плоскостями пластины.

При электронном возбуждении обычно: $\alpha_a = 2\text{--}3 \text{ см}^{-1}$; $\alpha_P = 20\text{--}30 \text{ см}^{-1}$; $\Delta_R = 0.5|\ln(R_1 R_2)|$, R_1 , R_2 – коэффициенты отражения зеркал; $\Delta_D = 0.207 \cdot N^{-1.4}$, где $N = d^2 \cdot n/4 \cdot \lambda \cdot L$ – число Френеля, d – диаметр возбужденной области, n – коэффициент преломления полупроводника, λ – длина волны излучения. В нашем случае при скорости движения фронта ионизации $v_0 = 10^8 \text{--} 10^9 \text{ см/с}$, время прохождения фронтом длины резонатора $\tau = L/v_0 = 10^{-10}\text{--}5 \cdot 10^{-11} \text{ с}$, что значительно меньше времени жизни 1–3 нс неравновесных носителей в CdS при комнатной температуре и изменении их концентрации от $5 \cdot 10^{18}$ до 10^{19} см^{-3} [18]. В этом случае можно пренебречь потерями α_P и считать $z_0 = L$. Для пластины из сульфида кадмия $R_1 = R_2 = 0.18$ и $\Delta_R = 1.7$. Легко видеть, что дифракционные потери при $n = 2.5$, $d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, $\lambda = 5.25 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ и $L = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ пренебрежимо малы, и пороговый коэффициент усиления $G_{\text{th}} \approx \alpha_a + \Delta_R/L \approx 40 \text{ см}^{-1}$. В этом случае, для генерации лазерного излучения при комнатной температуре, достаточно достичь концентрации неравновесных носителей $10^{18} \text{--} 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [1, 12].

На рис. 9 показано изменение спектра излучения при движении стримера по поверхности пластины $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Se}$ со стороны ZnSe ($x = 0$). Пластина вырезана из монокристалла $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Se}$ в направлении роста. Длина стримера 1.5 мм. Длина волны излучения при перемещении оптического зонда вдоль траектории стримера менялась от 480 нм (синий) до 515 нм (зеленый). На рис. 10 приведены спектры излучения пластины $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$. Длина стримера 5 мм. Длина волны излучения, в этом случае, изменялась от 587 нм (желтый) до 520 нм (зеленый). На рис. 11 дана фотохронограмма двух импульсов излучения, зарегистрированных оптическими зондами одинаковой длины, в начале и конце стримера. Скорость стримера, определенная с учетом длины и времени задержки $\sim 5 \cdot 10^8 \text{ см/с}$. Следует заметить, что длительность стримерной люминесценции (рис. 4) значительно превышала время прохождения фронтом разряда длины стримера. Спектры стримерной люминесценции пластин, изготовленных из твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Se}$ и $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ с изменяющимся значением x , подтвердили предположение [15], что при движении стримера в сторону с увеличивающейся шириной запрещенной зоны возможно получение генерации лазерного излучения на нескольких

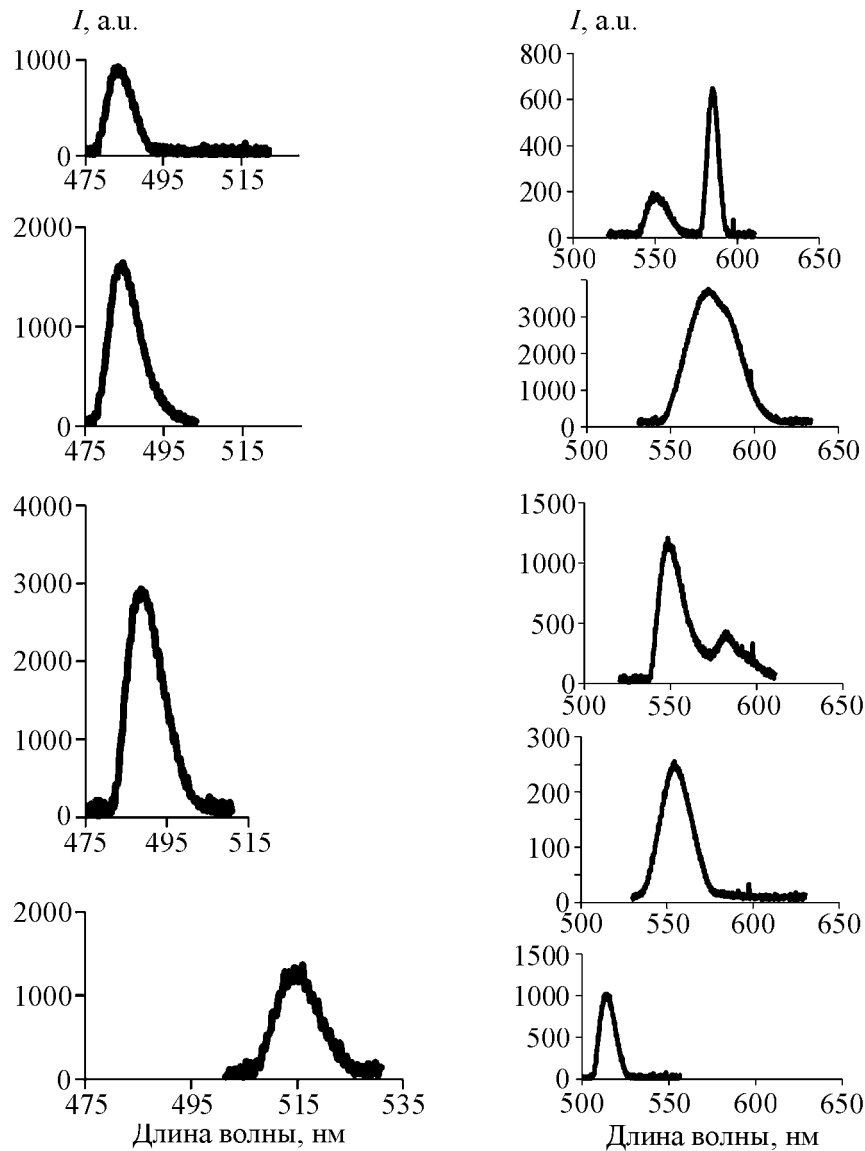


Рис. 9: Изменение спектра излучения пластины $Cd_xZn_{1-x}Se$ вдоль трека стримера, при перемещении оптического зонда от $Cd_xZn_{1-x}Se$, $x = 0.15$ ($\lambda = 515$ нм) в сторону $ZnSe$ ($\lambda = 485$ нм). Длина трека 1.5 мм.

Рис. 10: Изменение спектра излучения пластины CdS_xSe_{1-x} вдоль трека стримера при перемещении оптического зонда в сторону CdS ($\lambda = 515$ нм). Длина трека 5 мм.

линиях в диапазоне от 485 до 600 нм. Для достижения генерации, как показали эксперименты с CdS , необходимо уменьшить толщину пластин до 300–500 мкм и улучшить качество поверхности применением химико-механической полировки.

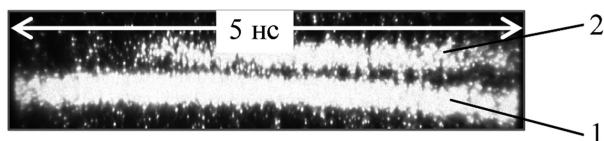


Рис. 11: Фотохронограмма импульсов света, зарегистрированная двумя оптическими зондами, в начале (1) и в конце (2) стримера в пластине $ZnCdSe_{1-x}$. Длина стримера 5 мм. Время задержки импульса (2) относительно импульса (1) ~ 1 нс.

Эксперименты подтвердили, что ЭПЛ с фоконной вставкой прост в изготовлении и удобен в работе. В дальнейших экспериментах предполагается получить и исследовать лазерное излучение тройных соединений A_2B_6 в диапазоне 480–600 нм.

В заключение авторы выражают благодарность сотруднику ФИАН Г. С. Гигиберия за помощь в проведении экспериментов и обработке результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 12-08-00263-а.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Н. Г. Басов, А. Г. Молчанов, А. С. Насибов и др., Письма в ЖЭТФ **19**(10), 650 (1974).
- [2] Н. Г. Басов, А. Г. Молчанов, А. С. Насибов и др., ЖЭТФ **70**(5), 1751 (1976).
- [3] В. П. Грибковский, В. В. Паращук, Г. П. Яблонский, ФТП **11**, 626 (1977).
- [4] А. С. Насибов, А. З. Обидин, А. Н. Печенов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11, 39 (1978).
- [5] А. С. Насибов, А. З. Обидин, А. Н. Печенов и др., Письма в ЖТФ **5**(1), 22 (1979).
- [6] Г. А. Месяц, М. И. Яландин, УФН **175**(3), 225 (2005).
- [7] А. С. Насибов, К. В. Бережной, А. Г. Реутова и др., ПТЭ, N 1, 75 (2009).
- [8] А. С. Насибов, К. В. Бережной, М. Б. Бочкарев и др., Сб. докладов 20 Международной конференции “Лазеры, Измерения, Информация” **1**, 5 (2010) (Изд-во С-Пб. политехнич. Университета, С-Пб, 2010).
- [9] А. Н. Андреев, А. С. Дубовик, В. П. Дегтярева и др., *Высокоскоростная фотография и фотоника в исследовании быстротекающих процессов* (Москва, Из-во “Логос”, 2002).
- [10] В. А. Подвизников, В. К. Чевокин, Препринт ИОФРАН N 1 (Москва, ИОФРАН, 2011).

- [11] Г. А. Месяц, А. С. Насибов, В. Г. Шпак и др., *ЖЭТФ* **133**(6), 1162 (2008).
- [12] Г.А. Месяц, А. С. Насибов, В. Г. Шпак и др., *Квантовая электроника* **38**(3), 213 (2008).
- [13] К. В. Бережной, М. Б. Бочкарев, А. С. Насибов и др., Сб. докладов 21 Международной конференции “Лазеры, Измерения, Информация” **1**, 14 (2011) (Изд-во С-Пб. политехнич. Университета, С-Пб, 2011).
- [14] К. В. Бережной, А. С. Насибов, А. Г. Реутова и др., Патент на изобретение N 2393602 (2010).
- [15] А. С. Насибов, Г. Д. Даниелян, В. Г. Баграмов и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **38**(4), 17 (2011).
- [16] Ю. В. Коростелин, В. Г. Тихонов, П. В. Шапкин, *Труды ФИАН* **202**, 201 (1990).
- [17] М. И. Дьяконов, В. Ю. Кочаровский, *ЖЭТФ* **94**(5), 321 (1988).
- [18] В. И. Козловский, Ю. М. Попов, *Квантовая электроника* **33**(1), 48 (2003).

Поступила в редакцию 13 ноября 2012 г.