

# Высокочастотный HF-лазер с пластинчатыми электродами

А.В.Андраманов, С.А.Кабаев, Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян, А.В.Писецкая, В.Д.Селемир

*Исследован высокочастотный электроразрядный HF-лазер с индуктивно-емкостной стабилизацией разряда на активной смеси  $H_2 - SF_6 - He$ . Многосекционный разрядный промежуток с общей длиной 250 мм был образован парами анодно-катодных пластин, расположенными в виде ломаной линии. Ширина разряда между каждой парой пластин составляла  $\sim 1$  мм, а его высота была равна  $\sim 12$  мм. Лазерный пучок на выходном зеркале резонатора имел поперечное сечение  $\sim 9 \times 11$  мм. Максимальные энергия импульса генерации и эффективность лазера для смеси  $H_2 - SF_6$  составляли 14.3 мДж и 2.1% соответственно. В смеси с добавлением гелия энергия импульса излучения снижалась на 10% – 15%. Максимальная скорость газа в рабочем промежутке достигала 20 м/с. Предельная частота повторения импульсов  $f_{lim}$ , при которой еще не наблюдается снижения энергии импульсов излучения, была равна  $\sim 2$  кГц для смеси  $H_2 - SF_6$  и  $\sim 2.4$  кГц для смеси  $H_2 - SF_6 - He$ . Достигнута средняя мощность лазерного излучения  $\sim 27$  Вт при частоте повторения импульсов 2.4 кГц.*

**Ключевые слова:** электроразрядный HF-лазер, пластинчатые электроды, индуктивно-емкостная стабилизация, распределение энерговклада, предыонизация, частота повторения импульсов.

## 1. Введение

В настоящее время электроразрядные газовые лазеры с высокой частотой повторения импульсов (1–5 кГц) используются в микролитографии, экологии, медицине и т. д.

Для эксимерных лазеров с накачкой объемным самостоятельным разрядом и частотой повторения импульсов несколько килогерц характерна малая ширина разряда ( $\sim 3$  мм) и высокая скорость газового потока в межэлектродном промежутке (не менее 50 м/с) [1]. В микролитографии используются эксимерные лазеры [2] с частотой повторения импульсов  $f \approx 4$  кГц.

О разработке химического DF-лазера с частотой повторения  $f = 1.2$  кГц сообщается в [3]. Для реализации высокочастотного режима работы лазера с шириной разряда  $\sim 8$  мм применяются достаточно мощные вентиляторы, обеспечивающие скорость газового потока в разрядном промежутке около 30 м/с.

Высокочастотный режим электроразрядного эксимерного ХеF-лазера реализован в работе [4] при относительно малой скорости прокачки газа за счет использования нового электродного узла [5] на основе многосекционных пластинчатых электродов с индуктивно-емкостной стабилизацией разряда. Формирование в этом лазере предельно узкого разряда с шириной  $\sim 1$  мм позволило получить при невысокой скорости прокачки активного газа ( $\sim 19$  м/с) частоту повторения импульсов до 4–5 кГц.

Применение для возбуждения активной среды химических HF (DF)-лазеров многосекционных узких разрядов, расположенных, как и в работе [4], в одной плоскости, приведет к значительным дифракционным потерям в резонаторе, поскольку длина волны излучения таких лазеров существенно больше, чем у эксимерных (в 10–15 раз). Этих потерь можно избежать, используя для формирования разряда пластинчатые электроды, в которых анодно-катодные пары пластин расположены в плоскостях, образующих угол  $\alpha$  с оптической осью. Впервые такая конструкция электродного узла применялась в работе [6] для формирования требуемого профиля лазерного пучка в ближней зоне.

Если расположить электродные пластины под небольшим углом к оптической оси лазера ( $\alpha \leq 30^\circ$ ), то коэффициент сменности газовой смеси [1]  $K = v \cos \alpha / (fb)$  (где  $v$  – скорость газа,  $b$  – ширина плазменного образования) будет определяться, в основном, шириной плазменного образования ( $b/\cos \alpha \approx b \sim 1 - 1.5$  мм). При этом ширина лазерного пучка  $D$ , определяемая размером проекции плазменной области на плоскость, перпендикулярную оптической оси лазера, может быть достаточно большой ( $D \geq 10$  мм). Такое расположение электродных пластин приводит к существенному снижению дифракционных потерь излучения и позволяет при умеренных скоростях газового потока (10–20 м/с) создавать ИК лазеры с частотой повторения импульсов до нескольких килогерц и шириной пучка в ближней зоне  $D \geq 10$  мм. Впервые этот подход был предложен в работе [5].

В настоящей работе экспериментально исследуется высокочастотный HF-лазер с активным объемом  $12 \times 10 \times 250$  мм на основе пластинчатых электродов, расположенных под углом к оптической оси. Система прокачки газа обеспечивала скорость газового потока в межэлектродном промежутке до 20 м/с.

А.В.Андраманов, С.А.Кабаев, Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян, А.В.Писецкая, В.Д.Селемир. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: Lazhintsev@ntc.vniief.ru, web-site: http://www.vniief.ru

Поступила в редакцию 25 ноября 2005 г.

## 2. Экспериментальная установка

Прокачной лазер собран на основе серийной лазерной камеры CL-5000 [4], которая выпускается в Центре физического приборостроения ИОФ РАН (Троицк), и нового электродного узла с многосекционным разрядным промежутком [5].

Длина алюминиевого корпуса камеры составляла 430 мм. Зеркала резонатора закреплялись на ее торцевых фланцах. Резонатор был образован сферическим ( $R \approx 5$  м) медным зеркалом с золотым покрытием и плоским выходным зеркалом на подложке из  $\text{CaF}_2$  с коэффициентом отражения 60%. Глухое зеркало защищалось от повреждения пластиной из  $\text{CaF}_2$ . Расстояние между зеркалами резонатора равнялось 50 см. Внутри камеры находились диаметральный вентилятор, который вращался с помощью магнитной муфты электрическим двигателем постоянного тока, и теплообменник. В верхней части камеры располагался электродный блок с источником накачки лазера.

На рис.1 изображена схема электродного узла лазера. Разрядный промежуток образован парами анодно-катодных пластин, расположенных под углом  $\alpha$  к оптической оси лазера. Рабочая кромка каждой из пластин имела профиль Степперча. Высота и полная длина разрядного промежутка вдоль оптической оси составляли 12 и 250 мм соответственно.

Предыонизация осуществлялась искровыми разрядами, расположенными с двух сторон разрядного промежутка. Схема импульсной накачки лазера содержала накопительную емкость  $C_s$  (2.8 нФ), обострительную емкость  $C_p$  (2.4 нФ) и емкость предыонизации  $C_{pr}$  (0.43 нФ). Для реализации индуктивно-емкостной развязки к каждой паре электродных пластин была подсоединена своя обострительная емкость  $C_p^{(i)}$ , которая заряжалась через развязывающую индуктивность  $L_d^{(i)}$  (рис.1).

Энергопитание лазера осуществлялось от импульсного источника. Накопительная емкость  $C_s$  заряжалась с помощью резонансно-диодной схемы в течение 240 мкс. Фильтрующая емкость была равна 0.22 мкФ. Максимальное зарядное напряжение на накопительной емкости в импульсно-периодическом режиме работы лазера составляло 22 кВ. Схема резонансно-диодной зарядки обеспечивала предельную частоту повторения импульсов 4 кГц.

После включения тиратрона ТГИ-1000/25 накопительная емкость по  $C-C$  схеме заряжала обостритель-

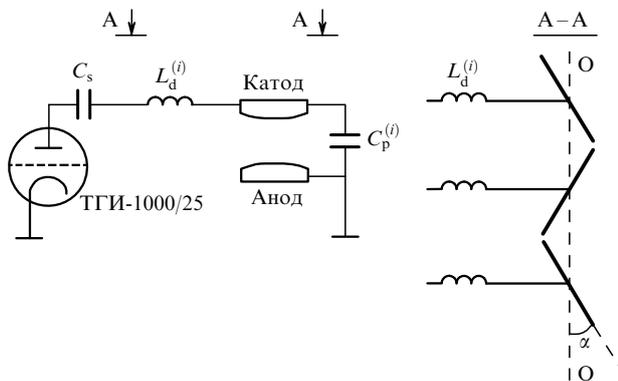


Рис.1. Схема электродного узла HF-лазера (OO – оптическая ось лазера).

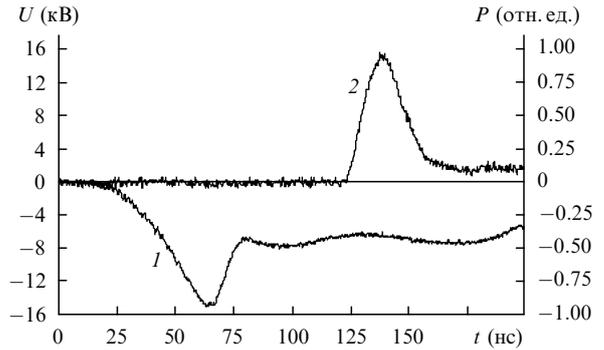


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения на обострительной емкости  $U$  (1) и генерации  $P$  (2) для смеси состава  $\text{H}_2:\text{SF}_6 = 9.5:66.5$  Тор при зарядном напряжении накопительной емкости 22 кВ.

ную емкость (см. рис.1). При определенном напряжении на обострительных емкостях происходил пробой искровых промежутков предыонизатора и начиналась зарядка его емкостей. После достижения на обострительных емкостях пробойного напряжения в межэлектродном промежутке формировался объемный разряд. Характерные осциллограммы импульса напряжения на обострительной емкости и импульса генерации приведены на рис.2. Фронт нарастания импульса напряжения до пробоя межэлектродного промежутка составлял  $\sim 40$  нс при амплитуде импульса 10–15 кВ.

## 3. Экспериментальные результаты

Оптическая схема измерений параметров высококачественного HF-лазера представлена на рис.3. Распределение удельной энергии накачки в поперечном сечении активного объема определялось, как и в работе [6], по интенсивности свечения разряда в видимой области спектра. Для регистрации свечения разряда использовался цифровой фотоаппарат Olympus C-4040 I. При фотографировании разряда глухое зеркало резонатора 3 заменялось кварцевой пластиной. Для устранения параллакса съемка проводилась в параллельных лучах с использованием линзы 4, фокальная плоскость которой находилась в центре разрядного промежутка.

Фотографии свечения разряда и распределения интенсивности свечения по ширине разряда приведены на рис.4. Вблизи катода во всех режимах отчетливо наблюдаются стримеры. При увеличении удельного энерговклада в активный объем размеры стримеров возрастают. При работе лазера с частотой повторения импульсов 2 кГц (рис.4,а) из-за усреднения по 30 импульсам ширина разряда несколько увеличивается, а провал в центральной области незначительно замывается. Таким образом, интенсивность свечения разряда в центре активного объема для электродов с профилем Степперча составляет 60%–70% от максимальной интенсивности (рис.4,а,б),

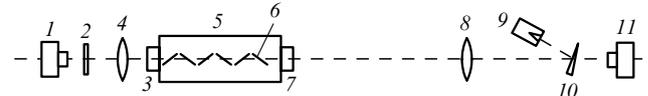


Рис.3. Оптическая схема измерения параметров HF-лазера: 1 – цифровой фотоаппарат; 2 – светофильтр; 3 – глухое зеркало; 4 – линза; 5 – лазерная камера; 6 – электродные пластины; 7 – выходное зеркало; 8 – линза из  $\text{CaF}_2$ ; 9 – фотоприемник; 10 – клин; 11 – термометр.

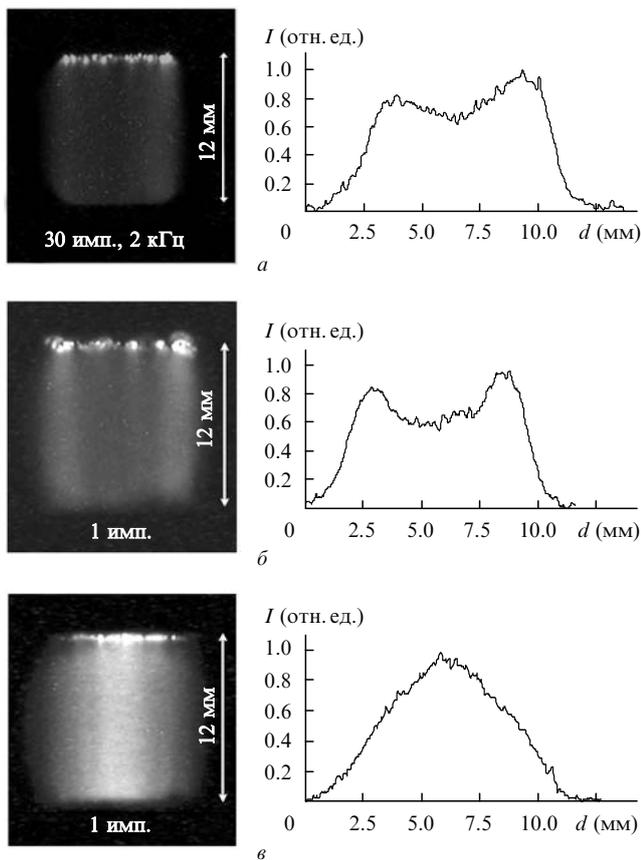


Рис.4. Фотографии свечения разряда HF-лазера и профили распределений интенсивности свечения по ширине разряда  $d$  для электродных пластин с профилем Степперча (а, б) и с комбинированным профилем – профилем Степперча и цилиндрической поверхностью (в). Активная смесь состава  $H_2 : SF_6 : He = 7:49:75$  Тор (а, б) и  $12.6:77.8:75$  Тор (в), частота повторения импульсов 2 кГц (а) (б, в – одиночные импульсы), зарядное напряжение 22 кВ, скорость прокачки газа 18 м/с.

а характерная ширина зоны свечения разряда равна  $\sim 10$  мм.

Чтобы увеличить интенсивность лазерного пучка в центральной части активного объема, был собран комбинированный вариант электродного узла, в котором все анодные электродные пластины с профилем Степперча были заменены пластинами с рабочей кромкой в виде цилиндра. В этом варианте электродного узла провал в интенсивности свечения в центральной части разряда отсутствовал (рис.4,в). Профиль распределения интенсивности лазерного излучения с более плоской вершиной можно получить, заменив не все, а часть анодных пластин пластинами с цилиндрической кромкой. Этой же цели можно достичь, используя анодные пластины с увеличенным радиусом рабочей кромки. Таким образом, с помощью различных комбинаций электродных пластин можно сформировать необходимый профиль лазерного пучка.

Как показано в работе [6], профили распределений интенсивности излучения HF-лазера в ближней зоне и интенсивности свечения разряда в видимой области спектра близки по форме. На рис.5 приведен отпечаток лазерного пучка на фотобумаге, на которую проецировалось уменьшенное (примерно в семь раз) изображение выходного зеркала лазера. Для удобства интерпретации результатов опытов вблизи выходного зеркала резонатора размещалась сетка из проволочек с шагом 1 мм. По-

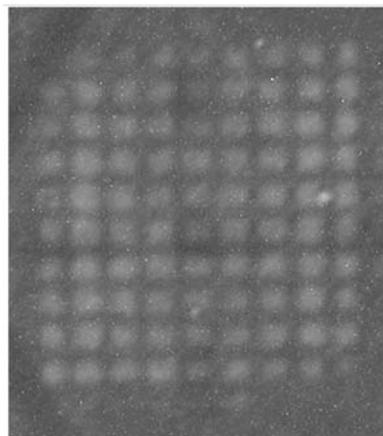


Рис.5. Отпечаток лазерного пучка на фотобумаге при использовании электродов с профилем Степперча. Шаг сетки, расположенной в ближней зоне, равен 1 мм.

перечное сечение лазерного пучка имело размер  $\sim 11 \times 9$  мм. Вблизи краев пучка (слева и справа) наблюдается увеличение интенсивности излучения по сравнению с интенсивностью в центральной области пучка, что качественно совпадает с результатами исследования профиля свечения разряда (рис.4,а, б).

В экспериментах энергия лазерного излучения измерялась с помощью термопарной головки ORIEL № 70263, имеющей постоянную времени 2.5 с. Использовались активные среды  $H_2 - SF_6$  и  $H_2 - SF_6 - He$ . Максимальная энергия генерации 14.3 мДж была получена на смеси  $H_2 : SF_6 = 1:6$  при полном давлении 90 Тор и зарядном напряжении 22 кВ (эффективность по отношению к накопленной энергии  $\eta \approx 2.1\%$ ). При добавлении He (75 Тор) к смеси  $H_2 - SF_6$  энергия генерации снижалась на 10% – 15%.

Оптимизация эффективности  $\eta$  химического HF-лазера на основе пластинчатых электродов проводилась в работе [7]. Максимальная эффективность лазера с электродным узлом, имеющим межэлектродное расстояние 10 мм, составила 2.9% при суммарном давлении смеси 110 Тор ( $H_2 : SF_6 = 1:12$ ) и зарядном напряжении накопительной емкости 28 кВ. В настоящей работе зарядное напряжение не превышало 22 кВ, что не позволяло работать с оптимальными для этого межэлектродного промежутка более высокими давлениями активной среды. В работе [3] эффективность DF-лазера с межэлектродным промежутком 10 мм составила  $\sim 2\%$  при высоком суммарном давлении смеси 120 Тор ( $D_2 : SF_6 = 1:6$ ). Для накачки лазера использовалась схема Фитча с удвоением напряжения до 36 кВ.

При работе лазера с высокой частотой повторения импульсов ( $f \lesssim 2.5$  кГц) калориметром измерялась энергия излучения  $E_N$  пакета из  $N$  импульсов, состоявшего, как правило, из нескольких десятков импульсов. Затем определялась средняя энергия одного импульса излучения  $E_{av}(f) = E_N(f)/N$  для различных  $f$ .

В высокочастотном эксимерном KGF-лазере расположение искр предыонизатора существенно влияет на стабильность и энергию импульсов излучения [1]. В связи с этим в настоящей работе исследовалась зависимость средней энергии импульсов от расположения искровых промежутков предыонизатора (вверх или вниз по потоку) и частоты повторения импульсов.

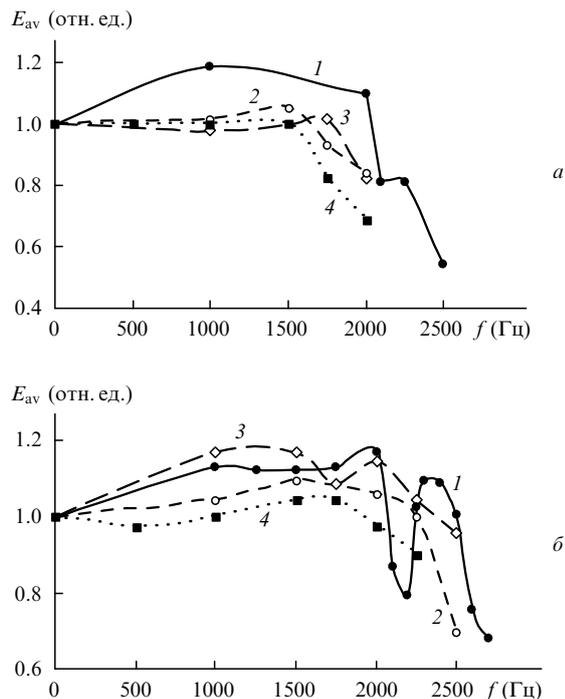


Рис.6. Зависимости  $E_{av}(f)$  в отсутствие предыонизации (1), при расположении искр предыонизатора вниз (2) и вверх (3) по потоку, а также с двух сторон от разрядного промежутка (4). Активные смеси состава  $H_2:SF_6 = 9.5:66.5$  Тор (а) и  $H_2:SF_6:He = 9.5:66.5:75$  Тор (б), скорость газовой смеси в межэлектродном промежутке 18 м/с, зарядное напряжение 22 кВ.

На рис.6 приведены зависимости  $E_{av}(f)$  для различных вариантов предыонизации. По этим зависимостям определялась предельная частота повторения импульсов  $f_{lim}$ , при которой  $E_{av}(f_{lim})$  незначительно отличается от средней энергии в режиме редко повторяющихся импульсов. Следует отметить, что при низкой частоте повторения для различных вариантов расположения искровых промежутков предыонизатора энергия импульсов излучения различается незначительно (на 10%–15%). Для наглядности энергия на рис.6 дана в относительных единицах, причем для каждого варианта предыонизатора за единицу принималось значение энергии в режиме излучения одиночного импульса.

На рис.6,а представлены зависимости  $E_{av}(f)$  для зарядного напряжения 22 кВ и смеси  $H_2:SF_6 = 9.5:66.5$  Тор. При расположении искр предыонизатора вниз по потоку и с двух сторон разрядного промежутка  $f_{lim} = 1500$  Гц. При расположении искр вверх по потоку и в отсутствие предыонизации частота  $f_{lim}$  увеличивается и составляет 1750 и 2000 Гц соответственно.

В работе [3] для повышения частоты повторения импульсов химического DF-лазера к активной смеси добавлялся гелий. При добавлении 450 Тор гелия наблюдалось увеличение  $f_{lim}$  от 400 до 1000 Гц. В настоящей работе даже небольшая добавка гелия (75 Тор) позволила существенно увеличить частоту повторения (рис.6,б). При увеличении давления гелия до нескольких сотен торр эффективность лазера значительно снижалась. При расположении искр предыонизатора вниз и вверх по потоку частота  $f_{lim}$  увеличилась до 2250 Гц, а при расположении искр с двух сторон разрядного промежутка она составила 1750 Гц. В отсутствие предыонизации частота  $f_{lim}$  увеличилась до 2400 Гц.

Следует отметить резонансный характер кривых 1 и 3 (рис.6,б), обусловленный развитием в разрядном промежутке акустических возмущений, отмечаемых также в [3], которые наиболее сильно проявляются в отсутствие предыонизации (кривая 1). При наличии предыонизации зависимости  $E_{av}(f)$  имеют более плавный характер.

В дальнейшем был доработан узел диаметального вентилятора, и скорость прокачки газа через межэлектродный промежуток увеличилась от 18 до 20 м/с. В результате в варианте с двухсторонней предыонизацией частота  $f_{lim}$  для смеси с гелием возросла до 2400 Гц (средняя мощность лазерного излучения  $\sim 27$  Вт), а для смеси без гелия – до 1750 Гц.

Для проверки стабильности энергии импульсов излучения серия из 100 импульсов с частотой повторения 2 кГц регистрировалась на засвеченной и проявленной фотобумаге. Фотобумага закреплялась на вращающемся диске. Скорость вращения выбиралась такой, чтобы отпечатки от соседних импульсов не накладывались друг на друга. На фотобумагу проецировалась ближняя зона генерации. Визуально не наблюдалось различий в отпечатках лазерных импульсов, полученных при использовании активной смеси  $H_2:SF_6 = 9.5:66.5$  Тор (напряжение зарядки накопительной емкости 22 кВ).

#### 4. Заключение

Применение в электроразрядном химическом HF-лазере пластинчатых электродов, расположенных под острым углом к его оптической оси, позволило реализовать рекордно высокую частоту повторения импульсов (2400 Гц) при низкой скорости газового потока в межэлектродном промежутке ( $\sim 20$  м/с). Ширина лазерного пучка в ближней зоне ( $\sim 9$  мм) почти на порядок превышает ширину разрядного промежутка анодно-катодной пары. Показано, что расположение искр предыонизатора вверх или вниз по потоку газа незначительно влияет на предельную частоту повторения импульсов. Дальнейшее увеличение частоты повторения (до 3–4 кГц) может быть получено при повышении давления гелия в активной смеси. Для работы с такими смесями требуется увеличить напряжение на разрядном промежутке.

Представляется перспективным использование нового электродного узла и для создания  $CO_2$ -лазеров с высокой частотой повторения импульсов. Предпосылкой для этого является формирование однородного диффузного разряда в активной смеси  $CO_2$ -лазера при частоте повторения импульсов до 4 кГц.

1. Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А., Ельцов А.В., Иванов А.С. *Квантовая электроника*, **30**, 783 (2000).
2. Kakizaki K., Fujimoto J., Mizoguchi H., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5377**, 1805 (2004).
3. Буцыкин И.Л., Великанов С.Д., Евдокимов П.А., Запольский А.Ф., Ковалев Е.В., Кодола Б.Е., Пегоев И.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 957 (2001).
4. Андраманов А.В., Кабаев С.А., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Селемир В.Д. *Квантовая электроника*, **35**, 311 (2005).
5. Андраманов А.В., Кабаев С.А., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Селемир В.Д. Патент России № 2244990 от 10.04.03; *БИ*, № 2, 610 (2005).
6. Андраманов А.В., Кабаев С.А., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Писецкая А.В., Селемир В.Д. *Квантовая электроника*, **35**, 359 (2005).
7. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Селемир В.Д. *Квантовая электроника*, **30**, 7 (2000).