

# Импульсно-периодический HF-лазер с большим разрядным промежутком, работающий на смеси F<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>

Б.С.Александров, Е.А.Климук, К.А.Кутумов, Б.Лакур, В.Пуэш, Г.А.Трошиненко

*Реализован эффективный импульсно-периодический (ИП) HF-лазер, иницируемый барьерным электрическим разрядом с разрядным промежутком 10 см. В моноимпульсном режиме для нецепного и цепного процессов соответственно получен удельный энергосъем  $E/V$ , составивший 3 и 23 Дж/л, и технический КПД  $\eta$ , равный 3.4 % и 26 %. В ИП режиме работы лазера при частоте следования импульсов 10 Гц на обедненной фтор-водородной смеси (20 % F<sub>2</sub>, 5 % H<sub>2</sub>) средняя мощность лазера составила 43 Вт ( $E/V \sim 10$  Дж/л,  $\eta = 11.3$  %). Численное моделирование работы лазера для условий, соответствующих импульсно-периодическому режиму при длине активной зоны около 0.5 м, показало возможность получения удельного энергосъема в отдельном импульсе примерно 15 Дж/л и технического КПД вплоть до 20 %. Экспериментально для таких условий при длине активной среды 0.37 м получен удельный энергосъем в моноимпульсном режиме  $\sim 14$  Дж/л, что хорошо согласуется с расчетными значениями.*

**Ключевые слова:** импульсный HF-лазер, нецепная и цепная реакции, барьерный разряд, удельный энергосъем.

## 1. Введение

Импульсно-периодический (ИП) режим работы лазера расширяет возможности его использования для различных научных и технологических приложений (например, при обработке материалов, в медицине, при контроле загрязнения атмосферы, создании лазерного ракетного двигателя) по сравнению с моноимпульсным и непрерывным режимами. Создание цепного химического (работающего на цепной химической реакции) лазера с большим разрядным промежутком и высокой эффективностью в импульсно-периодическом режиме является актуальной задачей. Использование цепной химической реакции  $\{F - H_2 \rightarrow HF(v) - H, H - F_2 \rightarrow HF(v) - F\}$  в электро-разрядном лазере приводит к восьмикратному увеличению удельных выходных параметров по сравнению с нецепным процессом [1].

Высокие удельные характеристики импульсного химического HF/DF-лазера (ИХЛ) достигаются благодаря высокому ( $\sim 130$  ккал/моль) энергосъему химической реакции F<sub>2</sub>–H<sub>2</sub> (D<sub>2</sub>), обеспечивающему накачку колебательно-вращательных уровней излучающих молекул вплоть до уровней с  $v = 6$  (8). Смена отработанной смеси в ИП режиме осуществляется организацией направленного газового потока. В активном объеме и газовом тракте лазера из-за выделения энергии периодически возникают пики давления и температуры, так что ударные волны, акустические возмущения и фронт горения распростра-

няются вверх и вниз по потоку. Эти явления создают ряд проблем, влияющих на стабильность работы импульсно-периодического химического лазера (ИПХЛ). Ранее высказывалось предположение, что добавление тяжелых газов-разбавителей SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> во фторводородную смесь должно снижать скорость горения, а также пиковые значения температуры и давления после иницирования излучения. Изучение скорости горения показало, что замена одноатомных газов-разбавителей (He, Ar) многоатомными (SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>) приводит к ее снижению от детонационной (около 2 км/с) до дозвуковых (единицы и десятки м/с) [2].

Расчеты показывают, что скорость горения незначительно зависит от давления, так что для смесей с активными компонентами F<sub>2</sub>–H<sub>2</sub> (D<sub>2</sub>), обеспечивающими высокие энергетические характеристики ИПХЛ, она может составлять 1–10 м/с (рис.1). Исходя из этого мы предложили способ обновления рабочей смеси в активном объеме ИПХЛ путем сноса фронта горения потоком све-

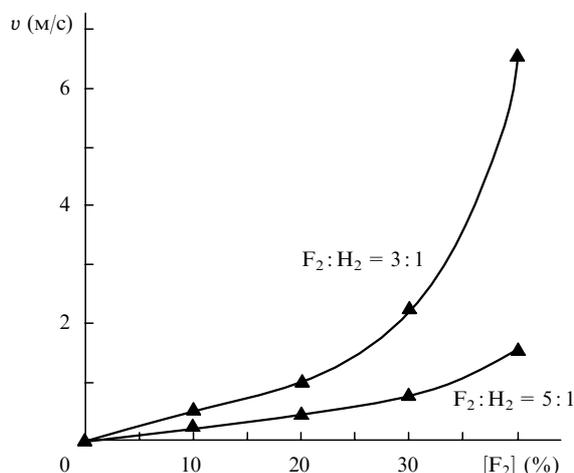


Рис.1. Зависимости скорости горения  $v$  смеси F<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>–SF<sub>6</sub> от объемной концентрации фтора при  $p = 10$  кПа.

Б.С.Александров, Е.А.Климук, К.А.Кутумов, Г.А.Трошиненко.  
ФГУП Российский научный центр «Прикладная химия», Россия,  
197198 С.-Петербург, просп. Добролюбова, 14;  
e-mail: gtroshchinenko@rscac.spb.ru  
В.Лакур, В.Пуэш. Universite Paris-Sud, Laboratoire de Physique des  
Gaz et des Plasmas, 91405, Orsay, France;  
e-mail: bernard.lacour@pgp.u-psud.fr, vincent.puech@pgp.u-psud.fr

Поступила в редакцию 8 июня 2005 г., после доработки – 13 июля 2005 г.

жего газа со скоростью, превышающей скорость фронта горения. Данный способ позволяет реализовать высокую частоту следования импульсов  $f$ , т.к. он не зависит от скорости срабатывания клапанных устройств – в отличие от другого способа, основанного на прерывании подачи водорода (дейтерия) [3, 4].

Для достижения ожидаемой эффективности у газово-го тракта ИПХЛ должны быть гладкие стенки и он не должен иметь выступающих элементов системы иницирования. Такие элементы, как лампы-вспышки, используемые для предыонизации электроды, многоэлектродная плата и т.п., могут вызвать преждевременный поджиг смеси, а также препятствовать удалению акустических возмущений из активного объема лазера.

Был разработан и изучен эффективный способ иницирования электрического разряда HF(DF)-ИХЛ с помощью стабилизирующих барьерных электродов, изготовленных из полупроводниковой сегнетокерамики. Электроды показали себя простыми и надежными в эксплуатации, они не требуют точной регулировки и обеспечивают высокий энергозатрат в однородный разряд (до 100 Дж/л).

В работе [5] был продемонстрирован маломасштабный HF-ИПХЛ, иницируемый барьерным разрядом и работающий на смеси  $F_2 - H_2$  при  $f \lesssim 50$  Гц, с активным объемом  $1.4 \times 3.3 \times 12$  см (1.4 см – размер разрядного промежутка) [5]. В настоящей работе представлены результаты исследования работы HF-ИПХЛ с  $f = 10$  Гц, барьерным электрическим разрядом и увеличенным до 10 см разрядным промежутком.

## 2. Экспериментальная установка

Установка состоит из следующих основных систем. Газовая система обеспечивает подачу компонентов лазерной смеси с заданным составом и расходом в лазерное устройство и создает условия для работы лазера в проточном режиме как на цепных, так и нецепных смесях. Приготовление газовых предсмесей (окислительная смесь  $F_2 - SF_6 - O_2$ , газовая смесь  $SF_6 - N_2$  для разрядников системы иницирования и для обдува окон и электродов разрядной камеры) производилось заранее в отдельных емкостях. Максимальная скорость потока газа в лазерном канале составляла 2.5 м/с, а расход основных компонентов газовой смеси был равен 4 л/с. Система иницирования запитывалась высоким напряжением от заряд-

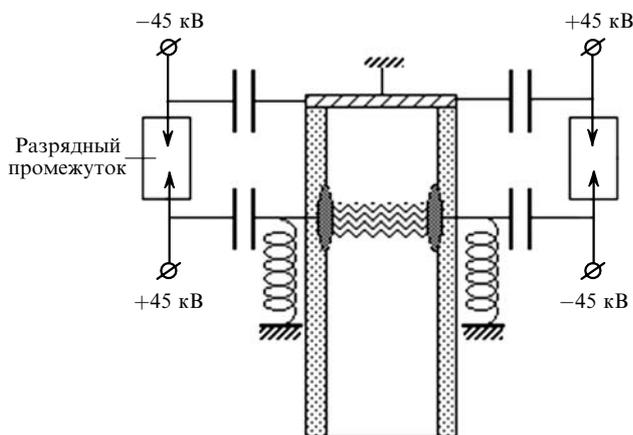


Рис.2. Схема генератора импульсного напряжения.

ного устройства. Использовался емкостной генератор импульсов с учетверением напряжения (рис.2).

Для снижения индуктивности разрядной цепи генератор импульсного напряжения (ГИН) был изготовлен из двух блоков, каждый из которых состоял из двух конденсаторов и одного разрядника. ГИН располагался с двух сторон разрядной камеры и работал следующим образом.

Накопительные конденсаторы заряжаются от биполярного источника до напряжения, например,  $\pm 45$  кВ, как показано на рис.2. После команды от иницирующего прибора одновременно запускаются разрядники, и на электродах разрядной камеры возникают импульсы напряжения с амплитудой  $\pm 90$  кВ относительно земли, которые и генерируют разряд в активном объеме. Применение барьерных электродов, изготовленных из полупроводниковой керамики, позволяет добиться однородного разряда в лазерной газовой смеси при давлениях до 12–13 кПа.

Максимальный энергозапас ГИНа, состоящего из четырех низкоиндуктивных конденсаторов емкостью 9.52 нФ каждый, равнялся 38.5 Дж. Контроль заряда конденсаторов в импульсно-периодическом режиме осуществлялся с помощью низкочастотного делителя напряжения. Для измерения формы импульсов и тока разряда применялись шунты и резистивные делители напряжения. Энергозатрат в разрядный объем вычислялся по осциллограммам тока и напряжения.

Система диагностики обеспечивала измерение всех основных характеристик работы лазера – давления и температуры, импульсов тока и напряжения ГИНа, энергетических и временных параметров импульсов излучения, характеристик системы синхронизации.

Устройство лазера показано на рис.3. Активный объем лазера составлял  $4.1 \times 10 \times 11$  см (10 см – разрядный промежуток, 11 см – размеры вдоль оптической оси). Расстояние между зеркалами резонатора (выходное и глухое

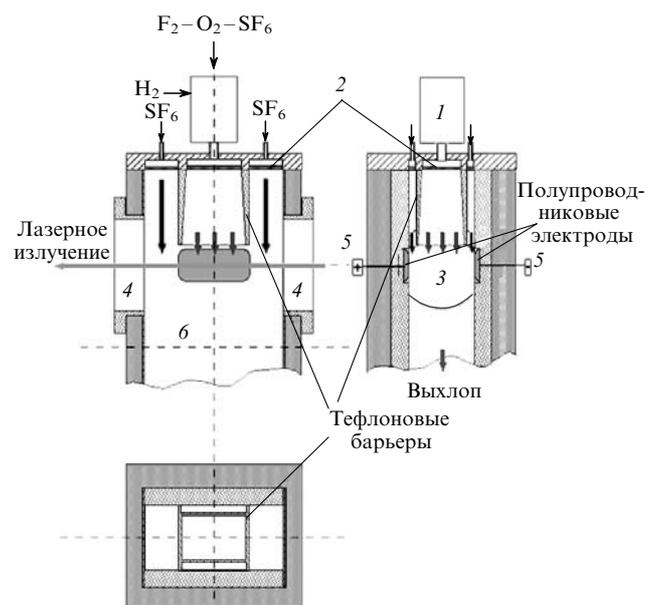


Рис.3. Схема лазера с барьерным разрядом:

1 – смеситель; 2 – газораспределительные головки с пористым распределителем газа; 3 – разрядная камера со встроенными панелями электродов барьерного разряда; 4 – флюоритовые окна для вывода излучения; 5 – электровыводы ГИНа; 6 – гаситель ударных волн и акустических возмущений.

зеркала с коэффициентами отражения  $\sim 0.30$  и  $\sim 0.96$  соответственно) было равно 0.7 м. Окна лазера и боковые поверхности барьерных электродов обдувались газом SF<sub>6</sub>.

### 3. Результаты экспериментов

В соответствии с расчетами [6] существует сильная зависимость скорости горения от содержания водорода в лазерной смеси. Таким образом, для определения состава смеси необходимо изучить влияние водорода на энергию  $E$  лазерного импульса при фиксированном содержании фтора. Такая зависимость была получена при фиксированном содержании фтора и удельном энергокладе  $W = 61$  Дж/л. Как видно из рис.4, при изменении содержания водорода в 2 раза (от 4 % до 8 %) энергия меняется только на 20 % – 30 %. Так что приемлемая газовая смесь для работы ИПХЛ может содержать минимальное количество водорода.

Эксперименты в импульсно-периодическом режиме вначале были проведены на нецепной смеси состава SF<sub>6</sub>: H<sub>2</sub> = 9:1 при  $f = 10$  Гц. В этом случае средняя мощность лазера составляла 13 Вт. Эксперименты на цепных смесях проводились при скорости газового потока около 2.5 м/с, а объемное содержание фтора варьировалось вплоть до 30 %. Содержание водорода поддерживалось в пределах 4 % – 5 %. Как видно из рис.5, средняя мощность лазера возрастает до 43 Вт, когда содержание фтора составляет примерно 20 %, однако резко падает с дальнейшим его увеличением.

Хорошая воспроизводимость лазерных импульсов в серии (рис.6), так же как и однородные отпечатки на фоточувствительной бумаге при ее экспонировании излучением ИПХЛ, были получены только при содержании фтора не более 20 %. Известно (см. рис.1), что увеличение содержания фтора в газовой смеси приводит к сильному возрастанию скорости горения и, как следствие, к возникновению ряда проблем, связанных с удалением продуктов горения из активного объема лазера. В этих условиях остаточный HF, содержащийся в активном объеме, может стать причиной снижения средней мощности лазера. Простейший способ устранения данного явления может заключаться в увеличении скорости потока.

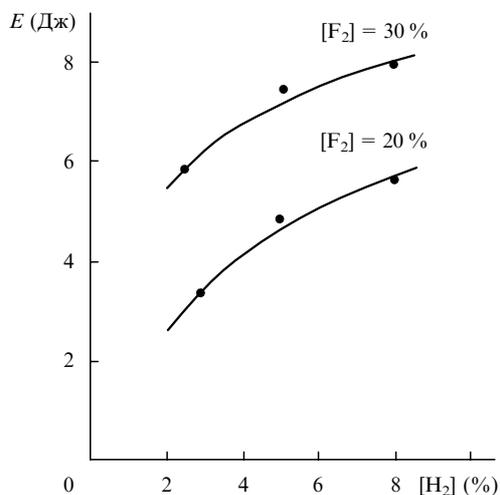


Рис.4. Зависимости энергии  $E$  лазерного импульса от объемной концентрации водорода в газовой смеси F<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub> при  $p = 10$  кПа,  $W = 61$  Дж/л и [F<sub>2</sub>] = 20 % и 30 %.

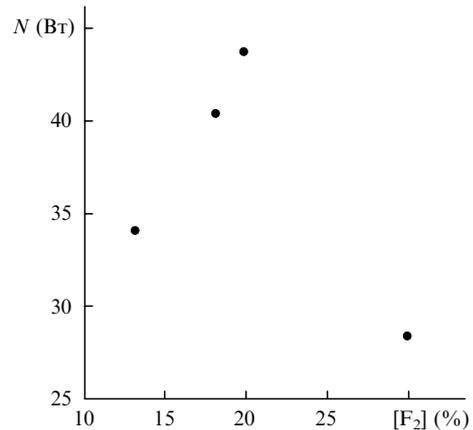


Рис.5. Зависимость средней мощности  $N$  ИПХЛ от объемной концентрации фтора в газовой смеси при  $p = 9$  кПа, [H<sub>2</sub>] = 5 %,  $f = 10$  Гц.

### 4. Оценка возможности увеличения лазерных характеристик

Экспериментальные результаты, изложенные в предыдущем разделе, получены при сравнительно малой длине активной среды ( $L_{\text{акт}} = 0.11$  м). Ранее для фотоиницируемого цепного импульсного HF(DF)-лазера с давлением активной среды 1.12 атм [7] было показано, что удельный энергоотъем лазера  $E/V$  (энергия выходного излучения, снятая с единицы объема активной среды) возрастает с увеличением  $L_{\text{акт}}$  в некотором диапазоне. Рост эффективности лазерной генерации объясняется следующим образом. При снижении порога генерации  $K_{\text{th}}$  в процесс стимулированного излучения вовлекаются дополни-

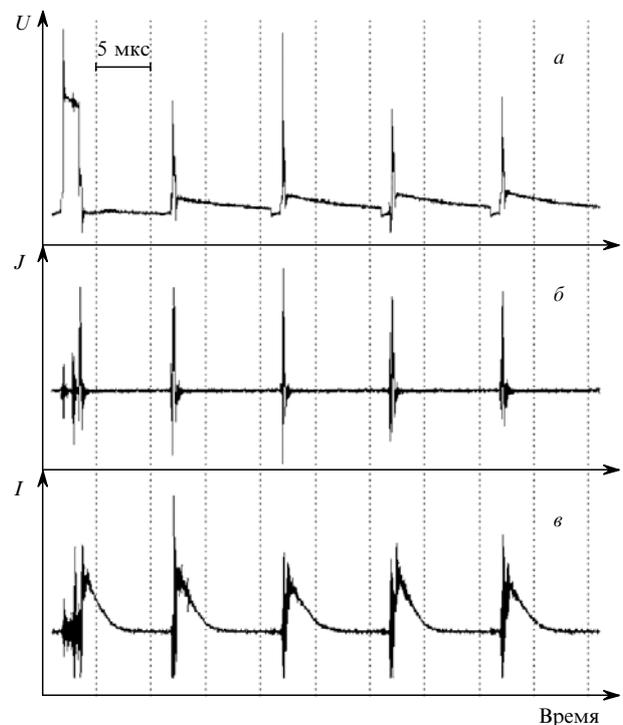


Рис.6. Оциллограммы напряжения разряда  $U$ , тока разряда  $J$  и интенсивности лазерного излучения  $I$  серии из пяти лазерных импульсов (части временной шкалы между отдельными импульсами опущены) для смеси F<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub> при  $p = 10$  кПа, [F<sub>2</sub>] = 18 %, [H<sub>2</sub>] = 5 % и  $f = 10$  Гц (цена деления 0.5 мкс).

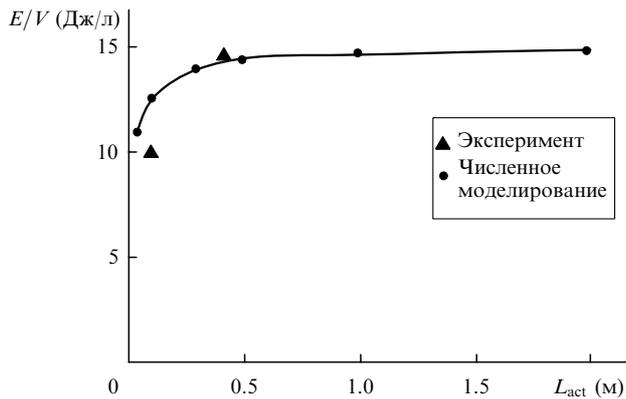


Рис. 7. Зависимость удельного энергосъема лазера  $E/V$  от длины активной среды  $L_{\text{акт}}$  для смеси состава  $F_2:H_2:O_2:SF_6 = 20:5.3:1.4:73.3$  при  $p = 11.5$  кПа,  $R_1 = 0.98$  и  $R_2 = 0.3$ .

тельные колебательно-вращательные переходы, поскольку коэффициент усиления малого сигнала для этих переходов становится равным или превышает  $K_{\text{th}}$ . Порог генерации определяется по формуле  $K_{\text{th}} = -\ln(R_1 R_2)/(2L_{\text{акт}})$ , где  $R_1, R_2$  – коэффициенты отражения зеркал резонатора. Поэтому увеличение  $L_{\text{акт}}$  приводит к росту удельного энергосъема лазера. Представляет интерес выяснить, увеличивается ли значение  $E/V$  для HF-лазера с электро-разрядным иницированием при существенно меньшем давлении (0.1 атм).

В фотоиницируемом HF(DF)-лазере парциальное давление молекул  $F_2$  на порядок превышает таковое в лазере, инициируемом электрическим разрядом. Однако вследствие более низкой эффективности фотоиницирования суммарная концентрация атомов F и H в первом лазере в несколько раз меньше, чем во втором. Соответственно скорость цепной химической реакции и коэффициент усиления слабого сигнала в фотоиницируемом HF(DF)-лазере меньше, а увеличение эффективности генерации с увеличением длины активной среды проявляется очевидным образом в более широком диапазоне – в пределах нескольких метров.

Математическая модель процессов в активной среде импульсного цепного HF-лазера аналогична модели, которая использовалась ранее для численного исследования в случае фотоиницирования [7]. Поскольку коэффициент усиления слабого сигнала в лазерной среде HF-лазера, инициируемого электрическим разрядом, существенно превышает порог генерации  $K_{\text{th}}$ , то заметный рост удельного энергосъема происходит только при  $L_{\text{акт}} < 0.5$  м (рис. 7); при  $L_{\text{акт}} > 0.5$  м он становится незначительным. Величина коэффициента усиления слабого сигнала наиболее мощных лазерных переходов намного превышает

$10^{-1}$ , а порог генерации  $K_{\text{th}} = 1.22 \text{ м}^{-1}$  при  $R_1 = 0.98$ ,  $R_2 = 0.3$ ,  $L_{\text{акт}} = 0.5$  м.

При исследовании HF/DF-ИХЛ, инициируемого барьерным разрядом, была испытана лазерная камера с длиной активной среды  $L_{\text{акт}} = 0.37$  м. Эксперименты показали хорошую стабильность и однородность барьерного разряда. В условиях работы ИПХЛ (20 %  $F_2$ , 5 %  $H_2$ ) в моноимпульсном режиме получен удельный энергосъем лазера  $\sim 14$  Дж/л, что хорошо согласуется с численным прогнозом.

## 5. Заключение

Реализован эффективный импульсно-периодический HF-лазер с длиной активной среды 11 см и частотой следования импульсов 10 Гц, инициируемый барьерным электрическим разрядом с межэлектродным промежутком 10 см. Барьерный электрический разряд длительностью около 120 нс продемонстрировал высокую стабильность, надежность и однородность при удельных энерговкладах до 60 Дж/л.

В импульсно-периодическом режиме работы при частоте следования импульсов 10 Гц на обедненной фторводородной смеси (20 %  $F_2$ , 5 %  $H_2$ ) получена средняя мощность лазера 43 Вт (для одного лазерного импульса  $E/V \sim 10$  Дж/л, что меньше соответствующего значения, полученного в моноимпульсном режиме [8]).

Численное моделирование предсказывает увеличение выходной энергии при увеличении длины активной среды в условиях, соответствующих экспериментам, при  $f = 10$  Гц. Возможность достижения удельного энергосъема лазера более 15 Дж/л и технического КПД вплоть до 20 % – 25 % является реальной для лазерного устройства с длиной активной среды около 0.5 м, инициируемого барьерным разрядом. При использовании активной среды, состав которой оптимален для ИП режима (20 %  $F_2$ , 5 %  $H_2$ ), в моноимпульсном режиме получен удельный энергосъем лазера  $\sim 14$  Дж/л при длине активной среды 0.37 м, что хорошо согласуется с численным прогнозом.

1. Lacour B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5120**, 521 (2003).
2. Башкин А.С., Колчин В.И. и др. *Квантовая электроника*, **6**, 1822 (1979).
3. Thayer W.J., Buanadonna V.R., Sherman W.D. *AIAA J.*, **18**, 657 (1980).
4. Lempeacher R., Woodroff J. *AIAA J.*, **17**, 490 (1979).
5. Kutumov C.A., Klimuk E.A., Troshchenko G.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 601 (1998).
6. Зельдович Я.Б. *Кинетика и катализ*, **2**, 305 (1961).
7. Азаров М.А., Александров Б.С., Дроздов В.А., Трошиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **30**, 30 (2000).
8. Азаров М.А., Климук Е.А., Кутумов К.А., Трошиненко Г.А., Лакур Б. *Квантовая электроника*, **34**, 1023 (2004).