

Исследование влияния удельной мощности накачки на энергию излучения и КПД эксимерного газоразрядного KrCl-лазера (223 нм)

А.М.Ражев, А.А.Жушков

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния удельной мощности накачки на энергию генерации и КПД эксимерного газоразрядного KrCl-лазера (223 нм), работающего на смесях Ne–Kr–HCl и He–Kr–HCl. Найдены оптимальные значения удельной мощности накачки, при которых достигаются максимальные значения полного КПД и энергии генерации KrCl-лазера. Для смеси Ne–Kr–HCl оптимальная удельная мощность накачки находится в диапазоне 5.0–5.5 МВт/см³, а для смеси He–Kr–HCl – в диапазоне 5.8–6.5 МВт/см³. Впервые на смеси Ne–Kr–HCl получена энергия генерации KrCl-лазера 700 мДж при КПД 1.0 %.

Ключевые слова: эксимерный KrCl-лазер, удельная мощность накачки, энергия генерации, КПД.

1. Введение

Известно, что наряду с широко используемыми эксимерными ArF- и KrF-лазерами с длинами волн излучения 193 и 248 нм эксимерный KrCl-лазер с длиной волны генерации 223 нм может успешно применяться в различных технологических, фотохимических, биофизических и медицинских приложениях. Это связано с тем, что ряд материалов и биологических тканей имеет максимальное поглощение вблизи 220 нм, поэтому эффективность взаимодействия лазерного излучения с $\lambda = 223$ нм с этими веществами максимальна. Для успешного внедрения эксимерного газоразрядного KrCl-лазера необходимо найти условия оптимального возбуждения, при которых максимальная энергия генерации достигается при максимальном полном КПД лазера. В связи с этим исследование влияния параметров накачки на эффективность генерации KrCl-лазера является актуальным. В данной работе под полным КПД лазера (далее просто КПД) понимается отношение энергии генерации лазера к энергии, запасенной в накопительной емкости системы возбуждения.

Из многочисленных публикаций, посвященных исследованиям эксимерных лазеров, известно, что наиболее важным параметром, влияющим на величину энергии генерации и КПД лазера, является удельная мощность (интенсивность) накачки активной среды. Однако в разных работах удельная мощность накачки определяется по-разному. В настоящей работе, как и в [1], удельная мощность накачки активной среды $W = E_{st}/(V\tau)$, где E_{st} – энергия, запасенная в обостряющей емкости; V – активный объем; τ – длительность по основанию первого полупериода тока разряда. Вследствие разного состава газовой смеси и различий в процессах, протекающих в пла-

зме лазеров на разных эксимерных молекулах, будут различаться и оптимальные значения удельной мощности накачки, при которых достигаются максимальные КПД и энергия генерации. Для наиболее широко применяемых эксимерных лазеров на молекулах ArF (193 нм), KrF (248 нм) и XeCl (308 нм) оптимальные удельные мощности накачки определены достаточно точно [1–5]. Так, например, для эксимерного газоразрядного XeCl-лазера оптимальная удельная мощность накачки является наименьшей и составляет 1.0 МВт/см³ [1–3]. Для KrF- и ArF-лазеров на неоновых смесях оптимальная удельная мощность накачки W выше (1.8–2.5 МВт/см³) [1], а для этих же лазеров на гелиевых смесях она равна 3.0–4.0 и 4.5–5.0 МВт/см³ соответственно [4, 5].

Анализ работ [6–12], посвященных газоразрядному KrCl-лазеру, показал, что результаты исследований, связанные с определением оптимальных параметров накачки этого лазера, являются противоречивыми.

Авторы работ [6, 7] для получения максимальных значений энергии генерации и КПД η рекомендовали $W = 24$ МВт/см³. При этом в [6] для KrCl-лазера на смеси Ne–Kr–HCl с активным объемом 70 см³ была получена энергия генерации $E = 180$ мДж при $\eta = 0.3$ %; в работе [7] за счет оптимизации добротности резонатора энергия генерации этого лазера была увеличена до 220 мДж при $\eta = 0.4$ %. Сообщение об оптимальной удельной мощности накачки, равной 24 МВт/см³, вызывает сомнения, т. к. из содержания статьи не ясно, каким методом была получена эта величина и как в системе возбуждения с перезарядкой емкости при запасаемой энергии 17 Дж в обостряющей емкости оказалась энергия, равная 21 Дж [6]. Поэтому удельная мощность накачки в 24 МВт/см³ является явно завышенной.

В работах [8–12] для достижения максимальных энергий генерации и КПД были предложены другие значения W . В [8] сообщалось, что в KrCl лазере с активным объемом $90 \times 3.6 \times 1.5$ см на смеси Ne–He–Kr–HCl при $W \sim 1.5$ МВт/см³ были получены $E = 600$ мДж и $\eta = 0.3$ %. В этой работе удельная мощность накачки определялась аналогично [1]. В работе [9] в лазере с активным объемом $60 \times 3.6 \times 1.5$ см на смеси Ne–Kr–HCl энергия

А.М.Ражев, А.А.Жушков. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: razhev@laser.nsc.ru, azh@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 20 ноября 2007 г., после доработки – 5 мая 2008 г.

150 мДж и КПД около 0.5 % были получены при $W \sim 1.5$ МВт/см³. Однако определение удельной мощности накачки в этой работе дано не было. Максимальная энергия генерации КгСl-лазера в экспериментах [9] составила 350 мДж при $\eta = 0.3$ %. В [10] сообщалось о создании КгСl-лазера на смеси Ne–Kг–НСl с энергией генерации 150 мДж при $\eta = 0.8$ %. Однако в этой работе отсутствуют параметры возбуждения. В [11] представлены результаты исследований КгСl-лазеров разных конструкций. В частности в лазере с активным объемом $60 \times 3.6 \times 1.5$ см на смеси Ne–Kг–НСl при удельной мощности накачки 2.0 МВт/см³ были получены энергия генерации 650 мДж и КПД 0.65 %. Согласно данным работы [11] для лазера, описанного в [10], энергия генерации 150 мДж и КПД 0.8 % получены при $W = 5.5$ МВт/см³. Для оценки удельной мощности накачки авторы использовали формулу $W = U_d J_d / V$, где U_d и J_d – напряжение и ток разряда соответственно, а V – активный объем. Эта оценка удельной мощности накачки отличалась от использованной в настоящей работе и в [1] тем, что в [11] не учитывалось время введения энергии в разряд. Поэтому, согласно [1], при учете времени введения энергии в разряд удельная мощность будет составлять не 5.5 МВт/см³, а примерно 2.2–2.5 МВт/см³.

В [12] в результате оптимизации параметров системы возбуждения и разрядной камеры в КгСl-лазере удельная мощность накачки возросла до 3.0 МВт/см³, что позволило в этом лазере с активным объемом $50 \times 2.7 \times 0.7$ см на смеси Ne–Kг–НСl получить энергию генерации 250 мДж при КПД 0.8 %.

Из приведенных выше результатов сложно сделать заключение об оптимальных параметрах накачки КгСl-лазера, при которых достигаются максимальные значения энергии и КПД лазера. Целью настоящей работы было создание мощного высокоэффективного КгСl-лазера на смесях с буферными газами Ne и Ne. Основная задача при этом заключалась в определении оптимальных параметров накачки этого лазера и в первую очередь – оптимального диапазона удельной мощности накачки.

Использование гелия в качестве буферного газа в активных смесях КгСl-лазеров, описанных в [6, 7, 10, 11], приводило к значительному снижению энергии излучения. По аналогии с ArF- и KrF-лазерами [4, 5] можно предположить, что это связано с использованием относительно низких удельных мощностей накачки (2.0–3.0 МВт/см³) и что для гелиевых смесей также требуется более высокая мощность накачки, чем для неоновых смесей. В работе [13] показано, что увеличение удельной мощности накачки КгСl-лазера на смеси Ne–Kг–НСl от 2.2 до 6.3 МВт/см³ приводит к росту энергии генерации от 120 до 300 мДж, а КПД – от 0.35 % до 0.5 %.

Найденные в работе [13] параметры накачки для КгСl-лазера на гелиевых смесях не являются точными, т. к. при оценке удельной мощности накачки активный объем считался неизменным, т. е. его увеличение за счет увеличения ширины разряда с ростом зарядного напряжения, наблюдаемое в экспериментах, не учитывалось. Отсюда следует, что значение удельной мощности накачки, полученное в работе [13], является правильным только при зарядном напряжении 28 кВ. При меньших зарядных напряжениях значения удельной мощности накачки являются заниженными, а при больших – завышенными. Это обстоятельство было учтено нами при исследованиях, проведенных в [4, 5, 14, 15].

Целью данной работы было экспериментальное исследование влияния параметров активной среды и удельной мощности накачки на эффективность эксимерного газоразрядного КгСl-лазера и определение условий, при которых достигаются максимальная энергия генерации этого лазера и максимальный КПД.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, использованная в данной работе, а также аппаратура и методы измерений были описаны нами в [13]. Напомним только, что система возбуждения включала в себя LC-инвертор с искровым разрядником РУ-65, автоматическую УФ предыонизацию и низкоиндуктивный разрядный контур. Для увеличения удельной мощности накачки активной среды требовалось снизить потери энергии, запасенной в LC-инверторе. С этой целью в систему возбуждения была включена дополнительная индуктивность на участке цепи между LC-инвертором и низкоиндуктивным разрядным контуром. Влияние этой индуктивности на удельную мощность накачки эксимерных ArF- и KrF-лазеров подробно описано нами в работах [4, 14, 15]. Такое изменение схемы возбуждения позволяет изменять удельную мощность накачки в широких пределах: в зависимости от параметров активной среды (состава и давления газовой смеси, геометрии разрядного промежутка) она может достигать 6.0–7.0 МВт/см³.

В экспериментах использовалась разрядная камера, в которой расстояние между основными электродами составляло 2.2 см, а длина активной части была равна 60 см. Исследования показали, что ширина зоны разряда определяет активный объем лазера и является переменной величиной, зависящей от зарядного напряжения U_{ch} и состава газовой смеси, в частности от сорта буферного газа. Ширина зоны разряда определялась по методике, описанной в работе [15]. Получено, что в эксимерном КгСl-лазере при увеличении зарядного напряжения от 20 до 32 кВ ширина зоны разряда в смеси Kг–НСl с буферным газом Ne увеличивалась от 0.45 до 0.9 см, а с буферным газом Ne – от 0.4 до 0.8 см. Таким образом, при неизменных межэлектродном промежутке и активной длине активный объем изменялся от 60 см³ при $U_{ch} = 20$ кВ до 120 см³ при $U_{ch} = 32$ кВ в неоновой смеси, а в гелиевой смеси – от 50 до 100 см³ при тех же зарядных напряжениях. Эти результаты использовались при последующих оценках удельной мощности накачки.

Автоматическая УФ предыонизация осуществлялась двумя рядами искровых промежутков, расположенных сбоку от одного из основных электродов [4]. Разрядная камера герметизировалась плоскопараллельными пластинами из MgF₂, служившими одновременно элементами оптического резонатора. В состав резонатора входило также внешнее плоское диэлектрическое зеркало с коэффициентом отражения на длине волны излучения 223 нм, равным 97 %. Оптическая длина резонатора составляла 120 см.

3. Результаты и их обсуждение

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований энергетических и временных параметров излучения эксимерного газоразрядного КгСl-лазера в зависимости от параметров накачки и состава

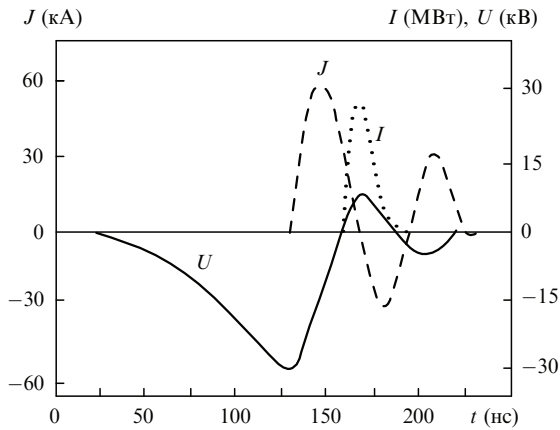


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения U на обостряющей емкости, тока разряда J и лазерного излучения I для KrCl-лазера на смеси Ne : Kr : HCl = 89.9 : 10 : 0.1 при $p = 4.2$ атм и $U_{ch} = 22$ кВ.

газовой смеси. Для гелиевой смеси результаты таких исследований частично описаны в [13]; в настоящей работе учтено изменение активного объема при различных уровнях накачки, что позволило получить более точные значения удельной мощности накачки и определить оптимальный диапазон, в котором достигается максимальный КПД этого лазера.

В экспериментах состав активной газовой смеси оптимизировался по максимальной энергии генерации. Было получено оптимальное соотношение компонентов газовой смеси Ne : Kr : HCl = 89.9 : 10 : 0.1, которое использовалось при проведении дальнейших исследований.

На рис. 1 представлены осциллограммы импульсов напряжения U на обостряющей емкости, тока разряда J и импульса излучения I для KrCl-лазера на смеси Ne – Kr – HCl при зарядном напряжении $U_{ch} = 22$ кВ и полном давлении $p = 4.2$ атм. Видно, что задержка между началом импульса УФ предыонизации и началом импульса тока разряда равна 125 нс, при этом обостряющая емкость заряжается до напряжения 30 кВ. Длительность импульса тока разряда по основанию, или время введения энергии в разряд, равна 40 нс. Задержка между началом импульса тока разряда и началом импульса генерации составляет 35 нс, длительность импульса излучения на полувысоте равна 15 ± 1 нс.

На рис. 2 показаны зависимости напряжения U на обостряющей емкости, тока разряда J и удельной мощности накачки W от зарядного напряжения U_{ch} для смеси Ne – Kr – HCl. Как следует из рисунка, с увеличением зарядного напряжения от 20 до 32 кВ напряжение U на обостряющей емкости увеличивается от 28 до 41 кВ, а ток разряда J быстро растет от 60 до 85 кА. При этом было получено, что для каждого значения U_{ch} существует оптимальное значение p , которое с ростом зарядного напряжения увеличивается от 4.0 до 5.0 атм. Для смеси Ne : Kr : HCl = 84.9 : 15 : 0.1 напряжение на обостряющей емкости растет от 27 до 41 кВ, ток разряда – от 55 до 90 кА, а давление смеси – от 2.4 до 4.0 атм [13].

С использованием полученных результатов были проведены оценки удельной мощности накачки для неоновых и гелиевых смесей, сделанные аналогично работе [1] с учетом изменения величины активного объема вследствие изменения ширины зоны разряда. Для смеси Ne : Kr : HCl = 89.9 : 10 : 0.1 было получено, что с увеличением U_{ch} от 20 до 32 кВ активный объем растет от 60 до

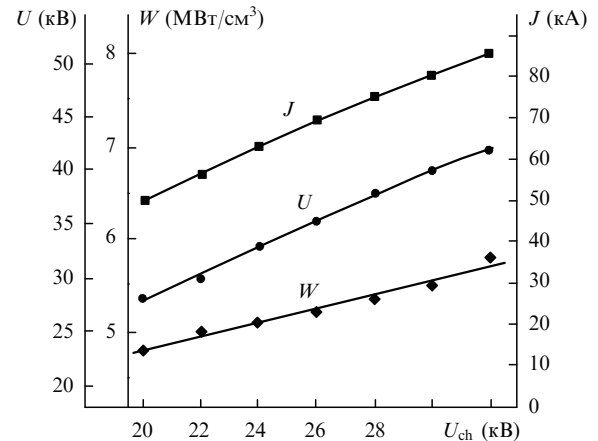


Рис. 2. Зависимости напряжения U на обостряющей емкости, тока разряда J и удельной мощности накачки W от зарядного напряжения U_{ch} для смеси Ne : Kr : HCl = 89.9 : 10 : 0.1.

120 см³. Тогда при длительности первого полупериода тока разряда (по основанию) $\tau = 40$ нс удельная мощность накачки W растет от 4.8 до 5.8 МВт/см³ (рис. 2).

С учетом зависимости активного объема от зарядного напряжения были уточнены значения W для смеси Ne : Kr : HCl = 84.9 : 15 : 0.1, приведенные в работе [13]. Получено, что с ростом U_{ch} от 20 до 32 кВ при увеличении активного объема лазера от 50 до 100 см³ и $\tau = 40$ нс W изменяется от 5.4 до 6.8 МВт/см³.

Использование таких значений удельной мощности накачки приводит к увеличению энергии генерации и КПД KrCl-лазера вне зависимости от сорта буферного газа. На рис. 3 представлены зависимости энергии генерации E и КПД η для KrCl-лазера на смесях Ne – Kr – HCl и Ne – Kr – HCl от зарядного напряжения U_{ch} . Из рис. 3, а видно, что с ростом зарядного напряжения от 20 до 32 кВ энергия генерации KrCl-лазера на неоновой смеси увеличивается от 270 до 750 мДж, а КПД при этом изменяется слабо (от 0.9 % до 1.0 %). Отметим, что энергия генерации 700 мДж при КПД 1.0 % в данной работе получена впервые. Эти результаты достигнуты за счет использования удельной мощности накачки 5.5 МВт/см³. В экспериментах была измерена длительность импульса излучения, равная на полувысоте 15 ± 1 нс, что соответствовало импульсной мощности 47 МВт. В KrCl-лазере на гелиевой смеси зависимости энергии генерации и КПД от зарядного напряжения (рис. 3, б) были получены нами ранее [13]. Из результатов, представленных на этом рисунке, следует, что энергия генерации и КПД лазера на гелиевой смеси ниже, чем на неоновой смеси. При этом их зависимости от зарядного напряжения аналогичны зависимостям для неоновой смеси. С ростом зарядного напряжения от 20 до 32 кВ энергия генерации лазера увеличивалась от 130 до 330 мДж, а КПД при этом изменялся слабо (около 0.5 %). Последнее можно объяснить незначительным ростом удельной мощности накачки при увеличении запасаемой энергии. Это связано с увеличением активного объема лазера за счет увеличения ширины разряда.

Проведенные исследования показали, что для эффективной работы KrCl-лазера необходимо, чтобы удельная мощность накачки W превышала 5.0 МВт/см³.

Таким образом, в настоящей работе были определены оптимальные значения параметров накачки для KrCl-лазера на смесях Ne – Kr – HCl и Ne – Kr – HCl, при

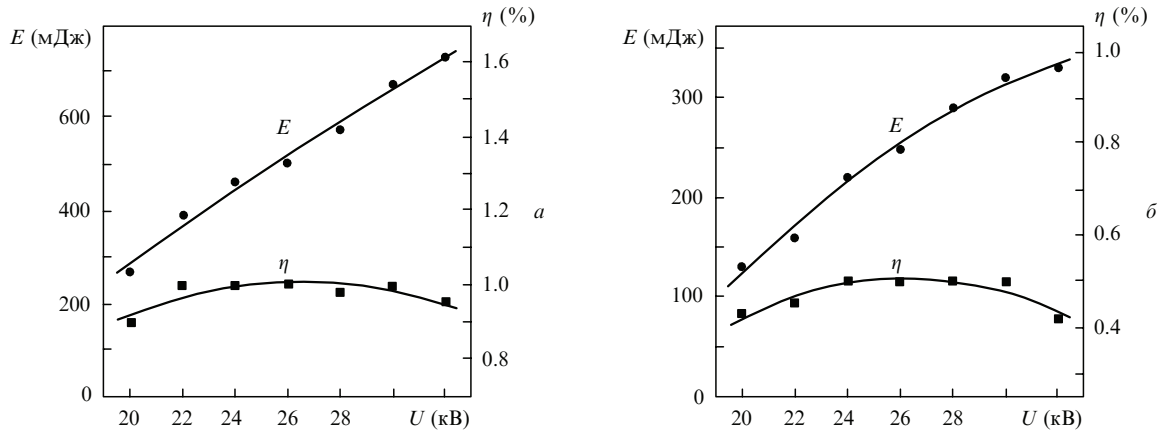


Рис.3. Зависимости энергии генерации E и КПД η от зарядного напряжения U_{ch} для KrCl-лазера на смесях Ne:Kr:HCl = 89.9:10:0.1 (а) и Ne:Kr:HCl = 84.9:15:0.1 (б).

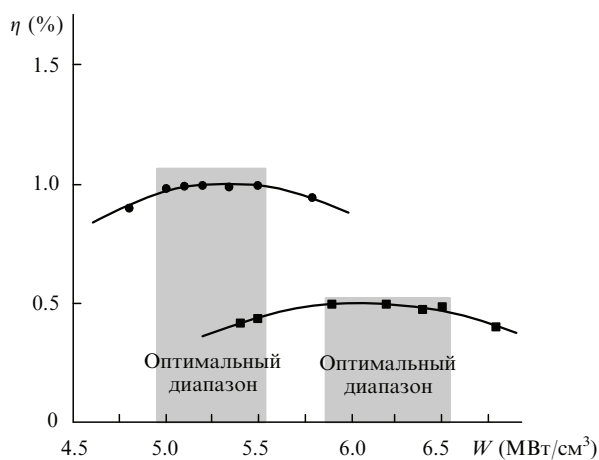


Рис.4. Зависимости КПД η от удельной мощности накачки W для KrCl-лазера на смесях Ne-Kr-HCl (●) и Ne-Kr-HCl (■).

которых достигаются максимальные значения КПД. На рис.4 представлены зависимости КПД эксимерного KrCl-лазера на смесях Ne-Kr-HCl и Ne-Kr-HCl от удельной мощности накачки W . Видно, что в случае смеси Ne-Kr-HCl оптимальная удельная мощность составляет 5.0–5.5 МВт/см³, а для смеси Ne-Kr-HCl она равна 5.8–6.5 МВт/см³.

4. Заключение

Экспериментально исследованы зависимости энергии излучения и КПД эксимерного газоразрядного KrCl-лазера (223 нм) от удельной мощности накачки. Для KrCl-лазера, работающего на смесях Ne-Kr-HCl и Ne-Kr-HCl, найдены оптимальные значения удельной мощности накачки, при которых достигаются максимальные КПД и энергия излучения. Получено, что в KrCl-лазере, работающем на смесях с буферным газом неоном, опти-

мальная удельная мощность накачки составляет 5.0–5.5 МВт/см³. При замене неона гелием это значение возрастает до 5.8–6.5 МВт/см³. В газоразрядном KrCl-лазере на смеси Ne:Kr:HCl = 89.8:10:0.2 при $W = 5.5$ МВт/см³ впервые получены энергия излучения 700 мДж и КПД 1.0 %.

Авторы выражают глубокую благодарность Е.С.Каргапольцеву и Д.С.Чуркину за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-02-16149-а).

1. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А. *Квантовая электроника*, **22** (6), 533 (1995).
2. Борисов В.М., Брагин И.Е., Виноходов А.Ю., Водчиц В.А. *Квантовая электроника*, **18** (2), 183 (1991).
3. Miyazaki K., Hasama T., Yamada K., et al. *J. Appl. Phys.*, **60**, 2721 (1986).
4. Ражев А.М., Щедрин А.И., Калюжная А.Г., Рябцев А.В., Жупиков А.А. *Квантовая электроника*, **34** (10), 901 (2004).
5. Ражев А.М., Щедрин А.И., Калюжная А.Г., Жупиков А.А. *Квантовая электроника*, **35** (9), 799 (2005).
6. Armandillo E.A., Luches A., Nassisi V., Perrone M. R. *Appl. Phys. Lett.*, **42** (10), 860 (1983).
7. Luches A., Nassisi V., Perrone M.R. *Opt. Commun.*, **51** (5), 315 (1984).
8. Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **12**, 171 (1986).
9. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **16** (12), 2409 (1989).
10. Верховский В.С., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **22** (1), 9 (1995).
11. Panchenko A.N., Tarasenko V.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31** (7), 1231 (1995).
12. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **28** (2), 136 (1999).
13. Ражев А.М., Жупиков А.А., Каргапольцев Е.С. *Квантовая электроника*, **34** (2), 95 (2004).
14. Razhev A.M., Schedrin A.I., Kalyuzhnaya A.G., Zhupikov A.A. *Ukr. J. Phys.*, **50** (9), 922 (2005).
15. Razhev A.M., Zhupikov A.A. *Appl. Phys. B.*, **81**, 1113 (2005).