

Особенности формирования активной среды в короткоимпульсном электроразрядном ХеСl-лазере

Ю.Н.Панченко, Н.Г.Иванов, В.Ф.Лосев

Экспериментально исследовано влияние условий горения разряда на параметры выходного излучения и эффективность работы электроразрядного ХеСl-лазера с длительностью импульса накачки 20 нс. Показано, что в разряде, состоящем из выраженных макронеоднородностей, реализуется максимальный удельный энергосъем с активной среды ~ 3.9 Дж·л⁻¹·атм⁻¹. Максимальная эффективность лазера 2.7 % достигается при плотностях тока разряда, равных 1.2–1.4 кА/см².

Ключевые слова: эксимерный лазер, активная среда, неоднородность среды, КПД лазера, удельный энергосъем.

1. Введение

В настоящее время эксимерные электроразрядные лазеры остаются наиболее эффективными источниками когерентного излучения в УФ области спектра и продолжают привлекать внимание ученых в связи с необходимостью поиска новых режимов накачки и улучшения параметров генерации. Длительность импульса излучения данных лазеров обычно составляет 15–200 нс. Поскольку активной средой при этом служит газоразрядная плазма, то для каждой длительности импульса накачки существуют вполне определенные параметры плазмы, обеспечивающие наибольшую энергию и эффективность генерации. В связи с этим изучение условий формирования плазмы и влияния ее параметров на выходные характеристики лазера, а также поиск оптимальных режимов накачки для конкретной длительности импульса генерации являются актуальными задачами.

В большинстве экспериментальных работ, где проводились исследования активной среды электроразрядных эксимерных лазеров, отмечается, что основной причиной, приводящей к снижению выходных характеристик генерации, является развитие неоднородностей в газоразрядной плазме. Динамика развития неоднородностей исследовалась в ряде экспериментальных [1–5] и теоретических [6, 7] работ. В [1–4, 8, 9] регистрировались неоднородности разряда, «прорастающие» с поверхности катода. При этом в одном случае [3, 8, 9] неоднородности были привязаны к ярким катодным пятнам, в другом [4] они имели место в отсутствие катодных пятен (плотность тока разряда в этой работе составляла 100–250 А/см²). Причина образования неоднородностей в одних работах [3, 8–10] связывается с неоднородной эмиссией электронов и образованием катодных пятен, в других работах [11, 12] делается предположение, что наличие неоднородностей вызвано недостаточным перекрытием электронных лавин в разрядном промежутке.

В [6] рассматривается теоретическая модель, объясняющая преждевременное окончание импульса генерации за счет развития неоднородностей разного пространственного масштаба. Так, макронеоднородности, представляющие собой каналы размером $\sim 0.5–1$ мм, приводят к истощению галогена в них и последующему образованию искры. Микронеоднородности разряда размером 0.01–0.1 мм согласно этой модели могут существенно рассеивать лазерное излучение.

Влияние макро- и микронеоднородностей на параметры излучения наблюдалось нами ранее в работе [13], где было показано, что разрядная плазма с разными типами неоднородности имеет разные физические свойства. Так, в областях разряда с макронеоднородностями усиление происходит в течение всего импульса накачки (~ 100 нс), а там, где проявляются микронеоднородности, усиление за десятки наносекунд сменяется поглощением.

Указанные выше работы посвящены исследованиям разряда с длительностью импульса тока на полувысоте ~ 100 нс и более. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования разряда накачки ХеСl-лазера при длительности тока ~ 20 нс и изучается влияние неоднородностей разряда на характеристики лазерного излучения.

2. Экспериментальная установка и методики измерений

Эксперименты проводились с электроразрядным ХеСl-лазером, принципиальные электрические схемы возбуждения которого приведены на рис.1. Накопительная емкость C_1 набиралась из конденсаторов ТДК (30 кВ, 2.7 нФ), разрядная емкость C_2 – из конденсаторов КВИ-3 (16 кВ, 0.47 нФ). В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ1-1000/25. УФ предыонизация разрядного промежутка осуществлялась автоматически при зарядке разрядной емкости. Искровые промежутки предыонизации располагались на расстоянии 30 мм от оси разряда с шагом 20 мм. Зазоры в промежутках изменялись от 0.5 до 2 мм. Electroды разряда имели длину рабочей поверхности 650 мм, ширина межэлектродного зазора составляла 22 мм. Рабочая поверхность электродов пред-

Ю.Н.Панченко, Н.Г.Иванов, В.Ф.Лосев. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 8 июня 2005 г.

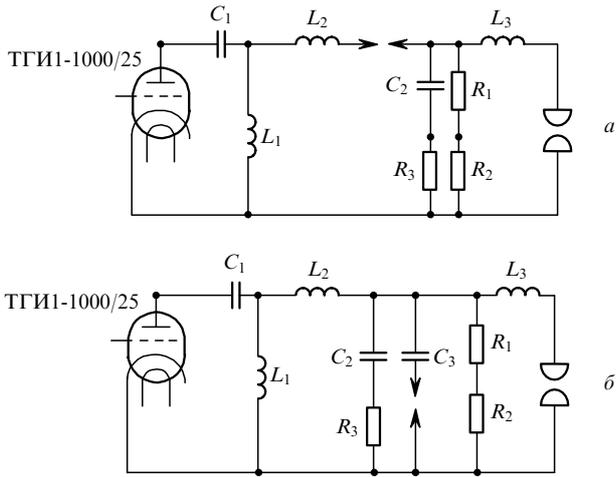


Рис.1. Принципиальные электрические схемы, используемые в эксперименте.

ставляла собой элемент сферической поверхности, радиус которой изменялся в ходе экспериментов. Применялся плоскопараллельный резонатор длиной 950 мм, образованный кварцевой пластиной и внешним зеркалом с коэффициентом отражения 97%. Рабочей средой служила смесь газов Ne–Xe–HCl при общем давлении $p = 3 - 4$ атм.

Регистрация вольт-амперных характеристик разряда осуществлялась с помощью токового шунта, измеряющего ток одной из разрядных емкостей, а также омического делителя напряжения. При регистрации напряжения присутствовала индуктивная составляющая, которая учитывалась в расчетах характеристик разряда. Энергия выходного излучения измерялась измерителем мощности и энергии излучения ИМО-2Н, импульс излучения – с помощью фотоприемника ФЭК-22СПУ, осциллограммы тока, напряжения и форма импульса излучения регистрировались на осциллографах Tektronix TDS 3014, 3032. Фотографии свечения разряда снимались через ослабляющие фильтры в видимой области спектра с помощью CCD-камеры VNC-703. Пространственная форма лазерного излучения регистрировалась на фотобумаге.

3. Экспериментальные результаты

Первоначальные эксперименты были проведены с целью определения мощности накачки, при которой реализуется максимальная эффективность лазера. При этом использовалась электрическая схема возбуждения лазера, приведенная на рис.1,а. Была взята смесь Ne: Xe: HCl = 1000:15:1 при общем давлении $p = 4$ атм. Зарядное напряжение U_0 не изменялось и составляло 23 кВ.

С использованием электродов с радиусом рабочей поверхности 60 мм в межэлектродном промежутке формировался однородный объемный разряд. Объем активной среды был равен $1.2 \times 2.2 \times 65$ см, максимальная плотность разрядного тока составляла 0.6 кА/см². Из осциллограмм, представленных на рис.2,а, видно, что импульс лазерного излучения длится до конца накачки (~100 нс). В этот интервал времени укладываются два периода колебаний разрядного тока. Автограф лазерного пучка (отпечаток излучения на фотобумаге), показанный на рис.2,б, демонстрирует высокую однородность распре-

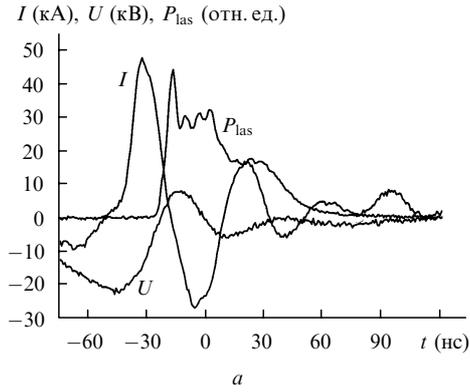


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения U , тока I и мощности генерации P_{las} (а), а также автограф лазерного пучка (б) для смеси Ne: Xe: HCl = 1000:15:1 с давлением $p = 3.5$ атм при $C_1 = 36.5$ нФ, $C_2 = 22.4$ нФ, $R_c = R_a = 60$ мм (где R_c – радиус катода, R_a – радиус анода), зарядном напряжении $U_0 = 23$ кВ и энергии излучения $E_{las} = 100$ мДж.

деления его интенсивности. Тем не менее в этом режиме эффективность лазера (относительно энергии, запасенной в разрядной емкости) не превышала 1.9%.

При уменьшении радиусов электродов до 30 мм ширина разряда уменьшилась до 5 мм, а плотность тока выросла до 1.4 кА/см². В этом случае эффективность лазера достигла 2.7%. Типичные вольт-амперные характеристики и импульс излучения в данном режиме возбуждения показаны на рис.3,а. Из рис.3,б, где представлен автограф лазерного пучка, видно, что интенсивность излучения вблизи катода имеет неоднородное распределение. Фотография интегрального по времени свечения разряда в этом режиме приведена на рис.4. На поверхности катода имеется выраженный светящийся слой, который через темное пространство соединен с основным объемным разрядом диффузными токовыми каналами. В местах привязки этих каналов к катодному слою не наблюдается каких-либо видимых катодных пятен [4, 14].

При дальнейшем уменьшении радиуса электродов до 15 мм ширина разряда уменьшалась до 3 мм, что соответствует средней плотности тока $2.3 - 2.5$ кА/см². При этом в разряде наблюдались крупномасштабные неоднородности, полностью перекрывающие разрядный промежуток. В данном режиме накачки эффективность лазера не превышала 1.7%.

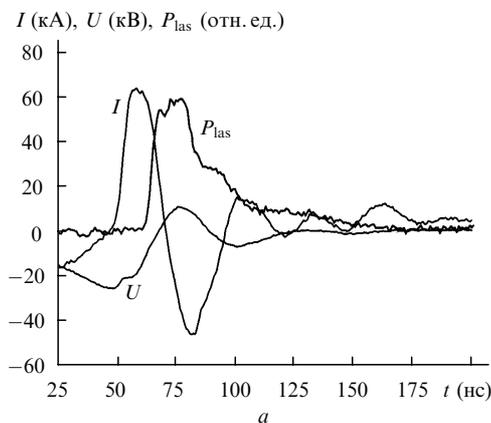


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения U , тока I и мощности генерации P_{las} (а), а также автограф лазерного пучка (б) для смеси Ne: Xe: HCl = 1000:15:1 с давлением $p = 4$ атм при $C_1 = 36.5$ нФ, $C_2 = 22.4$ нФ, $R_c = R_a = 30$ мм, $U_0 = 23$ кВ и $E_{las} = 175$ мДж.



Рис.4. Интегральное по времени свечение разряда для смеси Ne:He:HCl = 1000:15:1 с давлением $p = 4$ атм при $C_1 = 36.5$ нФ, $C_2 = 22.4$ нФ, $R_c = R_a = 30$ мм и $U_0 = 23$ кВ. Справа – увеличенный фрагмент участка разряда.

С целью изучения влияния неоднородностей разряда на эффективность работы лазера были проведены исследования, в ходе которых осуществлялась либо неоднородная электронная эмиссия с катода, либо неоднородная начальная предыонизация. Для увеличения неоднородности эмиссии электронов мы использовали неполированные электроды с радиусом рабочей поверхности 30 мм. При этом для смеси Ne:He:HCl = 1000:15:1 свечение разряда было более неоднородным, чем показанное на рис.4. При увеличении концентрации HCl в смеси до отношения $[Ne]/[HCl] = 300 - 800$ разряд практически полностью состоял из множества токовых диффузных каналов. Тем не менее на поверхности катода по-прежнему регистрировалось свечение только катодного слоя в отсутствие отдельных катодных пятен. На рис.5 представлены осциллограммы тока, напряжения и импульса генерации, а также автограф лазерного пучка в данном режиме. Энергия выходного излучения при этом составляла 150 мДж, что соответствует эффективности лазера 2%.

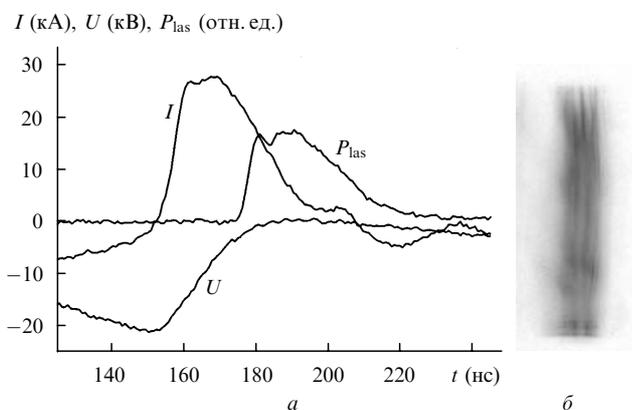


Рис.5. Осциллограммы импульсов напряжения U , тока I и мощности генерации P_{las} (а), а также автограф лазерного пучка (б) для смеси Ne:He:HCl = 833:16:1 с давлением $p = 4$ атм при $C_1 = 39.8$ нФ, $C_2 = 35$ нФ, $R_c = 20$ мм, $R_a = 40$ мм, $U_0 = 22$ кВ и $E_{las} = 150$ мДж.

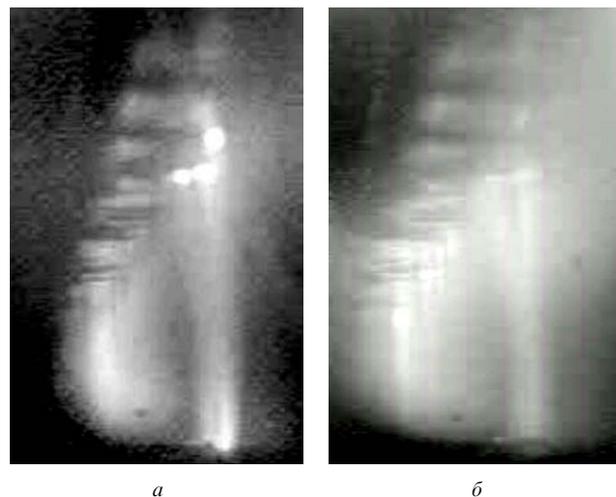


Рис.6. Интегральное по времени свечение разряда для смесей Ne:He:HCl = 500:10:1 (а) и 1190:10:1 (б) с давлением $p = 4$ атм при $C_1 = 36.5$ нФ, $C_2 = 22.4$ нФ, $R_c = R_a = 60$ мм и $U_0 = 23$ кВ.

В экспериментах исследовалось также влияние материала электродов на характер горения разряда. Для электродов, изготовленных из разных материалов (алюминий, сталь 12Х18Н9Т, латунь, латунь с электрохимическим покрытием никелем), поведение разряда и характеристики выходного излучения мало различались в диапазоне удельных мощностей накачки 1.2–3.3 МВт/см³. Однако если свойства поверхности катода менялись по длине, регистрировалось расслоение разряда. Наличие на никелированном электроде локальных зон с меньшей адгезией приводило к отсутствию свечения разряда в этих местах (рис.6). Существование и расположение катодных пятен определялись не границей зон с разной адгезией, а локальным усилением электрического поля (на отдельном стоящем микроострие или на крае электрода). После шлифовки поверхности электрода или изменения его профиля на торцах катодные пятна исчезали. Микроострие на катоде и связанное с ним катодное пятно, снижали лазерную энергию более чем на 40%. В то же время неоднородность электрического поля $\Delta E/E$ порядка 2%, обусловленная разным расстоянием между электродами, практически не оказывала влияния на характер выходного излучения.

В экспериментах по изучению влияния степени и однородности предыонизации на выходную энергию лазерного излучения использовалась электрическая схема, приведенная на рис.1,б. Уровень предыонизации был снижен за счет уменьшения величины емкости, заряжаемой через искровые промежутки. Кроме того, сами промежутки располагались на расстоянии 55 мм от оси разряда с шагом 30 мм. Рабочие радиусы катода и анода в данном случае были равны 30 мм. Для смеси Ne:He:HCl = 1000:20:1 и $p = 4$ атм энергия лазерного излучения составила 60 мДж. По регистрируемым осциллограммам было заметно существенное увеличение сопротивления разряда. С уменьшением давления смеси до 3.5 атм и концентрации галогена до соотношения Ne:HCl = 1150:1 сопротивление разряда уменьшалось и энергия излучения возрастала до 80 мДж, однако эффективность лазера не превышала 1%. В то же время свечение разряда было однородным и сравнимо с показанным на рис.4. Можно предположить, что в таком разряде имели место

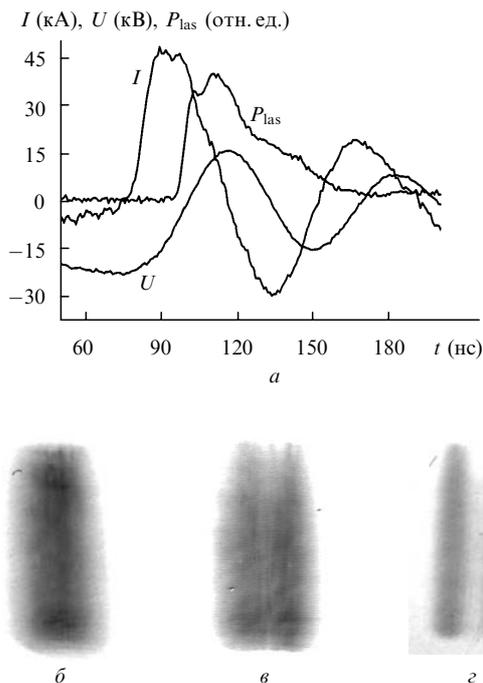


Рис. 7. Осциллограммы импульсов напряжения U , тока I и мощности генерации P_{las} (а), а также автографы лазерного пучка (δ – ζ) для смесей Ne:He:HCl = 1000:15:1 (δ), 1285:30:1 (ϵ) и 2000:30:1 (ζ) с давлением $p = 3.6$ атм при $C_1 = 39.8$ нФ, $C_2 = 32$ нФ, $R_c = R_a = 30$ мм, $U_0 = 22$ кВ, $E_{las} = 210$ (δ), 185 (ϵ) и 80 мДж (ζ).

микронеоднородности, которые в определенный момент начинали поглощать лазерное излучение [13].

Кроме вышеописанных неоднородностей необходимо также отметить ту, при которой в распределении интенсивности лазерного пучка по ширине разряда имелся провал в центре. Данный тип неоднородности наблюдался для режима накачки с максимальной эффективностью лазера при уменьшении концентрации галогена в смеси ниже оптимальной. В этом случае увеличивалось время запаздывания генерации относительно начала тока разряда. Для смеси Ne:He:HCl = 1300:20:1 и $p = 3.6$ атм эффективность лазера снижалась до 2.4%. С дальнейшим уменьшением концентрации галогена в смеси эффективность продолжала падать, а провал в распределении интенсивности в центральной части пучка еще более возрастал (рис. 7). При этом с уменьшением концентрации галогена однородность свечения разряда улучшалась, а область максимального свечения соответствовала провалу в распределении интенсивности лазерного пучка.

4. Обсуждение результатов

Из проведенных экспериментальных исследований можно заключить, что для работы лазера в эффективном режиме при длительности накачки ~ 20 нс требуется высокая плотность разрядного тока ($\sim 1.2 - 1.4$ кА/см²). При этом в разряде вблизи катода регистрируется множество незавершенных плазменных диффузных каналов, перекрывающихся на некотором удалении от катода. Расстояние, на котором это происходит при заданной мощности накачки, растет с увеличением концентрации галогена в смеси выше оптимальной. В пределе диффузные каналы могут полностью перекрыть разрядный про-

межуток. В этом случае объемный разряд переходит в разряд, практически полностью состоящий из макронеоднородностей. В предположении, что каналы равноудалены друг от друга как по ширине, так и по длине разряда, оценочный расчет дает удельный энергосъем с такой активной среды, равный 3.9 Дж·л⁻¹·атм⁻¹. При этом эффективность лазера остается достаточно высокой (2%). В то же время при более однородном горении разряда и максимальной эффективности удельный энергосъем не превышал 1.2 Дж·л⁻¹·атм⁻¹, что является типичным значением для электроразрядных ХеСl-лазеров.

Согласно экспериментальным данным можно также полагать, что в исследуемом разряде могут иметь место неоднородности двух типов: микро- и макронеоднородности. Их природа, на наш взгляд, обусловлена следующим. Первоначально, на этапе роста тока разряда, вблизи катода всегда имеется конечное число электронных лавин вследствие ограниченности вторичной эмиссии. В дальнейшем в зависимости от энергии, вложенной в разряд, и концентрации HCl в смеси неоднородность концентрации электронов вблизи катода может распространиться на весь объем в виде микро- либо макронеоднородности.

Мы полагаем, что при малой концентрации галогенонесителя и высокой мощности накачки ток разряда во всем межэлектродном промежутке за короткое время начинает протекать через множество токовых микроиней. Право на такое предположение дают результаты нашей предыдущей работы [13], где микронеоднородности были зафиксированы непосредственно при усилении излучения. В зависимости от длительности накачки такая среда может как усиливать, так и поглощать лазерное излучение. Последнее свойство позволяет объяснить наблюдаемый в одной из серий экспериментов провал в распределении интенсивности в центре лазерного пучка. С уменьшением плотности мощности накачки (при радиусе электродов 60 мм) такого провала не наблюдалось.

При увеличении концентрации HCl увеличивается время его выгорания в микронеоднородностях, имеющих вблизи катода, вместе с тем увеличиваются конкуренция между микроканалами и возможность их перехода к макроканалам. При этом, на наш взгляд, происходит смена механизма эмиссии электронов с катода вследствие нарастания проводимости плазмы. Так, если при существовании множества микроканалов вторичная фото- и ионно-электронная эмиссия может быть достаточной для их поддержания, то при уменьшении числа каналов и увеличении плотности тока в них возможен переход к автоэлектронной эмиссии из-за перераспределения поля в межэлектродном промежутке. Увеличение эмиссии электронов с катода, в свою очередь, ведет к быстрому росту поперечного размера неоднородности. Крутой передний фронт тока, протекающего через разряд, позволяет создать достаточно большое число равноценных центров автоэлектронной эмиссии. Последнее подтверждается исследованием поверхности катода после его работы: на ней обнаруживались многочисленные локальные следы эрозии без микрократеров. Однако наличие на электроде отдельных микроострий приводит к резкому увеличению электрического поля в этих областях и созданию условий, достаточных для возникновения взрывной эмиссии, что внешне проявляется в виде ярких катодных пятен и связанных с ними диффузных каналов.

5. Заключение

Таким образом, основными результатами работы являются следующие:

– Максимальная эффективность электроразрядного ХеСl-лазера с длительностью импульса накачки 20 нс достигается при плотностях тока разряда 1.4 кА/см² и составляет 2.7 %.

– При плотностях тока накачки 0.6–1.4 кА/см² реализован режим горения разряда с выраженным светящимся слоем на поверхности металлического катода без видимых катодных пятен.

– При плотностях тока более 1.2 кА/см² в разряде всегда формируются неоднородности. Вид неоднородности определяется, главным образом, концентрацией галогена в смеси. При отношении концентраций [Ne]/[HCl] = 800 и менее разряд в основном состоит из макронеоднородностей, а при отношении [Ne]/[HCl] = 1500 и более – из микронеоднородностей. При большей концентрации Хе в смеси скорость формирования неоднородностей увеличивается.

– В разряде, состоящем из завершенных макронеоднородностей, реализуется максимальный удельный энер-

госъем с активной среды, равный ~ 3.9 Дж·л⁻¹·атм⁻¹ при достаточно высокой эффективности лазера (~ 2 %).

1. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. *Физика импульсного пробоя газов* (М.: Наука, 1991).
2. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. *Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
3. Taylor R.S. *Appl. Phys. B*, **41**, 1 (1986).
4. Dreiskemper R., Botticher W. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **23**, 987 (1995).
5. Osborne M.R., Hutchinson M.H.R. *J. Appl. Phys.*, **59**, 711 (1986).
6. Kushner M.J. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **19**, 387 (1991).
7. Демьянов А.В., Кочетов И.В., Напартович А.П., Капителли М., Лонго С. *Квантовая электроника*, **22**, 673 (1995).
8. Генкин С.А., Королев Ю.Д., Месяц Г.А., Хузеев А.П. *ДАН СССР*, **253**, 606 (1980).
9. Makarov M. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **28**, 1083 (1995).
10. Belasri A., Voeuf J.P., Pitchford L.C. *J. Appl. Phys.*, **74**, 1553 (1993).
11. Осипов В.В., Лисенков В.В. *Оптика атмосферы и океана*, **10**, 1260 (1997).
12. Levatter J.I., Lin S.C. *J. Appl. Phys.*, **51**, 210 (1980).
13. Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 293 (2001).
14. Treshchalov A., Lissovski A., Chikeev E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 253 (2001).