

Системы формирования разряда для наработки атомарного иода в импульсно-периодическом кислородно-иодном лазере

В.И.Аксинин, С.А.Анциферов, С.Д.Великанов, А.Ю.Герасимов, И.В.Гостев,
С.Ю.Казанцев, В.В.Калиновский, В.В.Коновалов, И.Г.Кононов,
В.Н.Михалкин, С.В.Подлесных, И.В.Севрюгин, К.Н.Фирсов

Проведено сравнение генерационных характеристик импульсно-периодического кислородно-иодного лазера с электро-разрядной наработкой атомарного иода при использовании для зажигания объемного разряда индуктивно стабилизированного лезвийного и анизотропно-резистивного катодов. Иницирование разряда осуществлялось излучением барьерного разряда со стороны сетчатого анода. Установлено, что при одинаковых удельных вкладах электрической энергии в газоразрядную плазму система с анизотропно-резистивным катодом позволяет реализовать более устойчивый и однородный объемный разряд с возможностью вариации состава и давления рабочих смесей в широких диапазонах и увеличить удельный съем лазерной энергии (до 2.4 Дж/л). При больших частотах следования разрядных импульсов (50–100 Гц) и длительностях серий импульсов (более 1 мин) наблюдалась эрозия поверхности анизотропно-резистивного катода.

Ключевые слова: импульсно-периодический кислородно-иодный лазер, атомарный иод, однородный диффузный разряд, анизотропно-резистивный катод, энерговклад.

1. Введение

Для наработки атомарного иода в импульсных кислородно-иодных лазерах (КИЛ) применяются фотодиссоциационный и электроразрядный методы [1–3]. При электроразрядном получении атомов иода используются импульсные продольный [4–6] и поперечный [2, 4, 7] однородные диффузные разряды (ОДР), которые формируются непосредственно в рабочей среде лазера, состоящей из смеси синглетного кислорода с одним из иодидов и буферного газа (азот, гелий, аргон).

В импульсно-периодическом режиме атомарный иод, как правило, нарабатывается в условиях поперечного ОДР за счет диссоциации иодида электронным ударом. Устойчивость ОДР и степень заполнения газоразрядной плазмой рабочего объема являются главными факторами, от которых зависит эффективность наработки атомарного иода и в конечном счете КПД импульсно-периодического КИЛ (ИП КИЛ). Известны разные методы стабилизации ОДР. В работе [2], например, применялась резистивная стабилизация тока через отдельные секции катода, представлявшего собой ряд металлических стержней, нагруженных балластными сопротивлениями. В работе [7] использовались лезвийные электроды специального профиля, а подвод тока к лезвиям осуществлялся через ряд одинаковых балластных индуктивностей [8]. В работах [9, 10] ОДР в большом объеме

газовой среды реализовывался за счет применения анизотропно-резистивного катода на основе тонких углеродных нитей, впервые предложенного в [11].

Очевидно, что степень заполнения рабочего объема газоразрядной плазмой будет зависеть от степени дискретности катода (отношение площади поверхности электрода, покрываемой разрядом, к полной площади) даже в режиме устойчивого горения ОДР. Следовательно, от степени дискретности будет зависеть и эффективность генерации ИП КИЛ. Так, например, в лезвийной электродной системе, подробно описанной в [7], расстояние между отдельными лезвиями катода составляло ~3 мм, в то время как поверхность анизотропно-резистивного катода практически полностью была покрыта разрядом [9, 10]. Поэтому представляет несомненный интерес прямое сравнение генерационных характеристик ИП КИЛ с электроразрядной наработкой атомарного иода при использовании двух указанных электродных систем, что и является основной целью настоящей работы.

2. Экспериментальная установка

Рабочая среда лазера формировалась введением газообразного иодида CH_3I в поток смеси синглетного кислорода с буферным газом (азот). Как правило, рабочая смесь имела соотношение парциальных давлений компонентов $\text{CH}_3\text{I}:\text{O}_2:\text{N}_2 \approx 6:120:320$ при суммарном давлении 12–15 Тор. В зоне разряда в синглетном состоянии находилось 50%–60% кислорода.

Смесь продувалась горизонтально между электродами, расположенными сверху и снизу потока, как показано на рис.1. Зеркала резонатора (длина резонатора 1670 мм) находились справа и слева по направлению потока. Радиус кривизны глухого зеркала составлял 10 м, вывод излучения осуществлялся через плоское выходное зеркало. Фотографирование разряда проводилось через специальные диагностические окна под небольшим углом к оптической оси лазера.

В.И.Аксинин, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, С.В.Подлесных, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: k_firsov@rambler.ru
С.А.Анциферов, С.Д.Великанов, А.Ю.Герасимов, И.В.Гостев, В.В.Калиновский, В.В.Коновалов, В.Н.Михалкин, И.В.Севрюгин. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: kalinovsky@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 28 июня 2013 г., после доработки – 1 августа 2013 г.

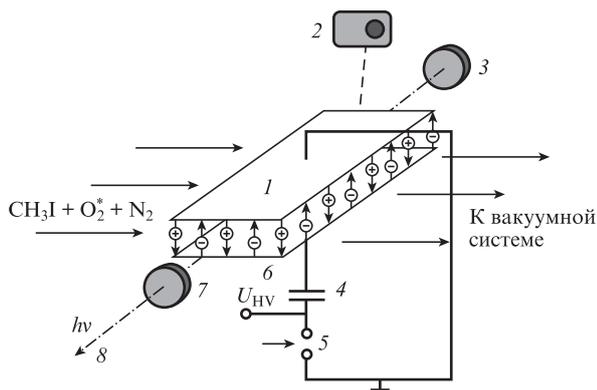


Рис.1. Схема ИП КИЛ:

1 – анод; 2 – фотокамера; 3 – сферическое глухое зеркало; 4 – конденсатор; 5 – разрядник; 6 – катод; 7 – плоское полупрозрачное зеркало; 8 – выходное лазерное излучение; U_{HV} – высокое напряжение.

На промежуток с межэлектродным расстоянием $d = 5$ см разряжался конденсатор емкостью $C = 100\text{--}300$ нФ, заряжаемый до напряжения $U_{HV} = 6\text{--}12$ кВ. Ток ОДР и напряжение на разрядном промежутке контролировались с помощью малоиндуктивного шунта и резистивного делителя напряжения соответственно. Частота следования разрядных импульсов варьировалась от 10 до 100 Гц. Параметры излучения ИП КИЛ контролировались в каждом импульсе. Энергия излучения измерялась калориметром (Orphir) с пирозлектрической головкой, форма импульса излучения регистрировались фотодиодом ФД-10Г.

Лезвийный катод, подробно описанный в [7], имел размер (длина×ширина) 50×15 см, анизотропно-резистивный – 45×12 см. Удельное сопротивление анизотропно-резистивного слоя толщиной 10 мм в направлении электрического поля составляло 26 Ом·см, слой был приклеен к латунной пластине проводящим клеем.

Как отмечалось нами ранее [9, 10], основной проблемой получения ОДР в рабочих смесях КИЛ с импульсной электроразрядной наработкой атомарного иода является, независимо от типа стабилизации, обеспечение равномерного распределения плотности тока по поверхности катода в условиях предельной компактности электродов. Под предельно компактной электродной системой имеется в виду система с геометрией, в которой разряд практически полностью покрывает поверхность катода (например, плоского катода с острыми краями). В такой геометрии электрическое поле значительно больше на краях разрядного промежутка, чем в его центральной зоне, что приводит, если не предпринимать специальных мер, к стягиванию тока разряда на края и, следовательно, к неравномерному распределению характеристик активной среды лазера по рабочему объему. Поэтому в условиях предельной компактности электродной системы реализация ОДР с близким к равномерному распределением энерговклада по промежутку в типичных для ИП КИЛ рабочих смесях с низким давлением и малым содержанием сильно электроотрицательного компонента является основной проблемой.

В таких условиях инициирование объемного разряда возможно лишь за счет фотоэффекта на катоде, поскольку обычные методы формирования объемного самостоятельного разряда (предыонизация газа в промежутке, заполнение промежутка электронами за счет их дрейфа в электрическом поле, реализация условий для получения

самоиницирующегося объемного разряда) [12–15], как показал анализ, проведенный в [9, 10], применить не удастся. Распределение вводимой в газ электрической энергии по разрядному промежутку в ИП КИЛ зависит как от степени однородности электрического поля, так и от распределения освещенности, создаваемой источником инициирования ОДР (например, барьерным разрядом), по поверхности катода. Так, например, при равномерном освещении поверхности плоского катода с острыми краями ОДР из-за краевого усиления электрического поля будет стянут на края промежутка, а при освещении части поверхности катода разряд загорится лишь в засвеченной зоне. Вследствие этого в условиях предельной компактности электродной системы краевое усиление электрического поля в разрядном промежутке необходимо компенсировать либо за счет определенного (трудно рассчитываемого) профиля анода (электрополевого выделение центральной зоны разрядного промежутка), как это делалось в [9, 10], либо за счет засветки поверхности катода УФ излучением со стороны анода таким образом, чтобы максимум освещенности и, следовательно, максимум плотности фотоэлектронов (фотоэффект на катоде) достигались в центральной зоне поверхности катода. В настоящей работе был реализован второй вариант инициирования ОДР.

Электрическая схема установки, на которой реализуется вариант источника подсветки (засветки катода) со стороны анода, приведена на рис.2 для случая, когда катодом служит анизотропно-резистивный электрод. Анодом является сетка из нержавеющей стали с прозрачностью $\sim 60\%$. Сетка натянута на специальный каркас и соединена с пластиной из дюралюминия размером 45×10 см. На пластину, с шагом 1.5 см в продольном направлении, намотан провод в полиэтиленовой изоляции диаметром 3 мм, соединенный с катодом. Расстояние между сеткой и пластиной составляет 1 см. Провод служит инициирующим электродом, между его поверхностью и поверхностью дюралюминиевой пластины загорается барьерный разряд при подаче на разрядный промежуток импульса высокого напряжения, что позволяет инициировать электроны с поверхности катода за счет фотоэффекта. Легко показать, что при такой геометрии подсветки максимум освещенности достигается в центральной зоне поверхности

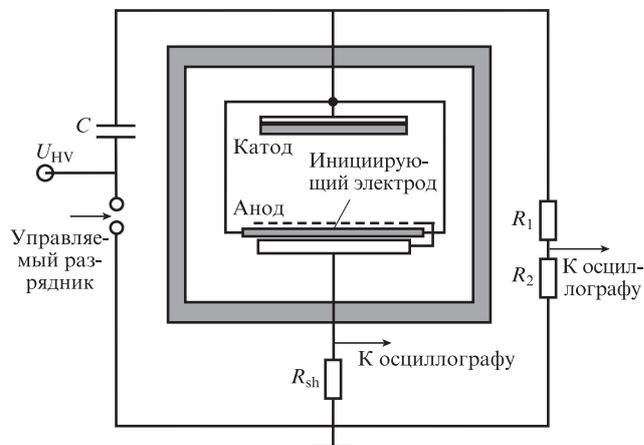


Рис.2. Электрическая схема установки с сетчатым анодом и анизотропно-резистивным катодом:

C – конденсатор; R_{sh} – токовый шунт; R_1 и R_2 – резисторы высоковольтного делителя напряжения.

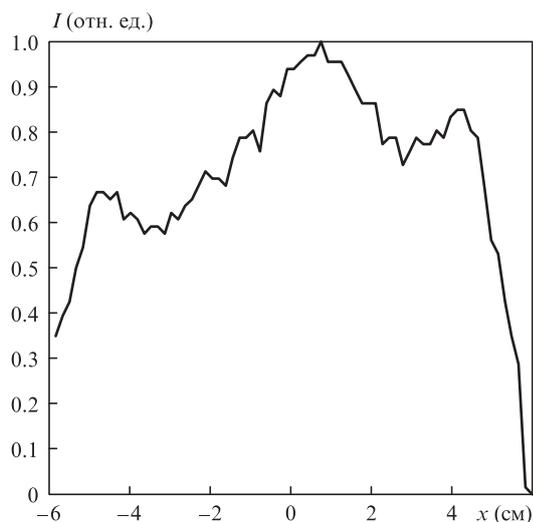


Рис.3. Распределение интенсивности свечения разрядной плазмы I по координате x в плоскости, параллельной поверхностям электродов (система с анизотропно-резистивным катодом). Начало отсчета находится на оптической оси.

сти катода, что и дает возможность компенсировать краевое усиление электрического поля в разрядном промежутке. Полный размер сетчатого анода составлял 50×18 см. Анод использовался как с анизотропно-резистивным, так и с лезвийным катодом.

В модельных экспериментах с использованием смеси иодида с воздухом были получены фотографии ОДР в электродной системе с анизотропно-резистивным катодом и описанным выше сетчатым анодом, позволившие построить пространственное распределение интенсивности свечения газоразрядной плазмы I в разрядном промежутке. Пример такого распределения по горизонтальной оси x (параллельной поверхностям электродов и проходящей через оптическую ось лазерной системы) приведен на рис.3. Видно, что для системы двух плоских электродов ширина распределения интенсивности свечения плазмы ОДР по уровню 0.5 значительно больше, чем для системы электродов с анодом, имеющим профиль Чанга [10], и разряд полностью покрывает поверхность катода. На качественном уровне это распределение отражает распределение энергоклада по промежутку.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Сравнительные характеристики ИП КИЛ с анизотропно-резистивным и индуктивно стабилизированным лезвийным катодами

В данной серии пусков ИП КИЛ емкость конденсатора $C = 300$ нФ, а зарядное напряжение $U_{HV} = 7$ кВ. В

Табл.1. Усредненные параметры лазерных импульсов.

Конструкция катода (его размер)	Энергия излучения (Дж)	Удельный энергоусъем (Дж/л)	Длительность импульса генерации на полувысоте (мкс)
Резистивный (12×45 см)	2.75	2.4	50
Лезвийный (15×50 см)	2.32	1.9	60

табл.1 приведены усредненные параметры лазерного импульса за серию при частоте следования импульсов 10 Гц. Отклонение энергии излучения в импульсе от среднего за один пуск значения не превышало 11%. Благодаря большой скорости газового потока в разрядной камере, заведомо обеспечивающей смену газа в разрядном промежутке за время между разрядными импульсами, средняя энергия излучения в серии практически не зависела от частоты следования импульсов при ее изменении от 10 до 100 Гц. При работе установки в режиме однократных импульсов энергия излучения также мало отличалась от средней энергии в импульсно-периодическом режиме.

Из табл.1 видно, что удельный энергоусъем в случае использования анизотропно-резистивного катода на 25% превышает аналогичный параметр для системы с лезвийным катодом. Полная энергия излучения лазера ограничена объемом активной среды, заключенным в каустике резонатора (1.15 и 1.22 л для систем с анизотропно-резистивным и лезвийным катодами соответственно). Полный разрядный объем (2.7 и 3.75 л для систем с анизотропно-резистивным и лезвийным катодами соответственно) значительно превышает объем среды, находящийся в каустике резонатора. Поэтому при использовании соответствующего резонатора можно рассчитывать на более чем двукратное увеличение энергии излучения. На рис.4 и 5 приведены фотографии ОДР при работе ИП КИЛ с анизотропно-резистивным и лезвийным катодами соответственно. Видно, что анизотропно-резистивная стабилизация позволяет реализовать заметно более однородный разряд. В случае с лезвийным катодом разряд также имеет диффузный характер, но представляет собой набор диффузных струй, меняющих свое положение от импульса к импульсу, т.е. газоразрядная плазма заполняет не весь рабочий объем. В итоге это приводит к тому, что удельный

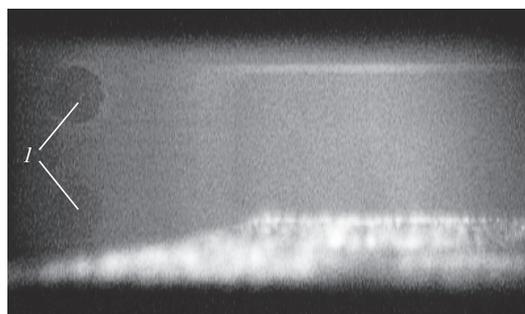


Рис.4. Фотография ОДР в рабочей среде ИП КИЛ, полученная при использовании электродной системы с анизотропно-резистивным катодом (нижний электрод) и сетчатым анодом: 1 – диагностические окна камеры.

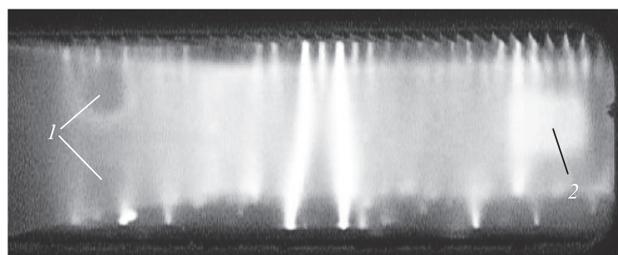


Рис.5. Фотография ОДР в рабочей среде ИП КИЛ, полученная при использовании системы с индуктивно стабилизированным лезвийным катодом: 1 – диагностические окна камеры; 2 – окно для вывода излучения.

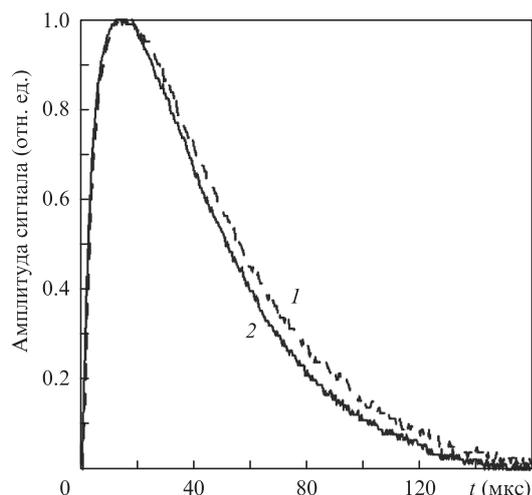


Рис.6. Нормированные импульсы излучения ИП КИЛ при использовании электродных систем с индуктивно стабилизированным лезвийным (1) и анизотропно-резистивным (2) катодами.

съем энергии излучения в случае с резистивным электродом оказывается выше.

ОДР при использовании анизотропно-резистивного катода оказывается более устойчивым при вариациях различных параметров: разрядного напряжения, состава среды, давления и др. Лезвийные электроды требуют более аккуратного подбора параметров газовой среды и более точного их сохранения в процессе работы лазера.

На рис.6 представлены нормированные импульсы излучения, зарегистрированные при работе лазера с лезвийным и анизотропно-резистивным катодами. Как следует из табл.1 и рис.6, длительности импульсов излучения лазера в системах с резистивным и лезвийным катодами, практически одинаковы. Таким образом, можно полагать, что, несмотря на большое различие в однородности разрядов, получаемые в них концентрации атомарного иода для обеих систем оказываются близкими.

3.2. Электродная система с анизотропно-резистивным катодом при больших частотах следования разрядных импульсов

Из представленных выше результатов следует, что электродная система на основе анизотропно-резистивной стабилизации разряда имеет ряд преимуществ при функционировании ИП КИЛ с электроразрядной наработкой атомарного иода по сравнению с системой индуктивно стабилизированных лезвийных электродов. Основными преимуществами анизотропно-резистивной системы являются высокая устойчивость ОДР при большой длительности разрядного тока, хорошая воспроизводимость энергии генерации ИП КИЛ от импульса к импульсу в серии пусков, эффективная наработка атомарного иода.

Приведенные выше результаты были получены при частотах следования разрядных импульсов до 10 Гц и продолжительности пусков от 5 до 10 с. При переходе к частотам следования импульсов 50–100 Гц возникла весьма неприятная проблема. В начале серии пусков в отдельных импульсах наблюдалась контракция ОДР, затем, при последующих пусках, искровым разрядом стал заканчиваться практически каждый импульс. Характерно, что искра не была привязана к конкретному месту на поверхности катода, она перемещалась по разрядному

промежутку от импульса к импульсу. При этом скорость газового потока заведомо превышала величину, необходимую для устойчивой работы системы при таких частотах следования разрядных импульсов, т. е. контракция не могла быть связана с неполным выносом из промежутка отработанного газа. При возврате к режиму однократных импульсов после выполнения серии пусков при частоте, близкой к 100 Гц, также наблюдалась контракция ОДР. При визуальном осмотре катода были обнаружены многочисленные прожоги анизотропно-резистивного материала, рассредоточенные по поверхности электрода, причем они уходили в глубь материала на несколько миллиметров.

Таким образом, проведенные эксперименты показали непригодность анизотропно-резистивного катода на основе углеродной нити при продолжительной работе ИП КИЛ с большими частотами следования импульсов. Полученный отрицательный результат оказался неожиданным, поскольку катоды из точно такого же материала успешно эксплуатируются в нецепных электроразрядных НФ-лазерах при удельных вкладах электрической энергии более 100 Дж/л, токах до 100 кА и частотах следования импульсов 50–100 Гц [14–17]. В нашем же случае в плазму вводилась электрическая энергия не более 6 Дж при удельных вкладах, не превышающих 2 Дж/л.

Причины разрушения анизотропно-резистивного электрода на углеродной основе в ИП КИЛ в настоящее время далеки от понимания и требуют дальнейшего изучения. Из общих соображений можно полагать, что они связаны с составом рабочей среды ИП КИЛ, в частности с взаимодействием углеродной плазмы в катодном пятне с атомами иода и, вероятно, кислорода. Следует также отметить, что исследование механизмов разрушения угольного катода в газоразрядной плазме ИП КИЛ при относительно малых энерговкладах представляет самостоятельный интерес для физики газового разряда и возможных приложений обнаруженного эффекта.

4. Заключение

Установлено, что в рабочей среде ИП КИЛ при близких удельных вкладах энергии в плазму разряда система с анизотропно-резистивным катодом позволяет по сравнению с индуктивно стабилизированным лезвийным катодом получить более устойчивый и однородный электрический разряд, что ведет к увеличению удельного сема лазерной энергии. Одним из следствий этого является также хорошая воспроизводимость энергии генерации от импульса к импульсу в серии пусков. При частотах следования импульсов ИП КИЛ 50–100 Гц наблюдалось разрушение материала анизотропно-резистивного катода, появлялись множественные прожоги поверхности электрода, через которые разряд замыкался на металлическую подложку электрода. Выдвинуто предположение о том, что причиной разрушения является взаимодействие углеродной плазмы в катодном пятне с атомами иода и кислорода. Физика и химия подобного процесса остаются невыясненными.

Работа поддержана грантом РФФИ № 12-08-00321.

1. Балан Н.Ф., Гизатуллин Р.М., Дубровский А.В., Катулин В.А., Куров А.Ю., Мнацаканян Э.А., Николаев В.Д., Петров А.Л., Пичкасов В.М., Свистун М.И., Скобелев П.О. *Квантовая электроника*, 16, 1587 (1989).

2. Вагин Н.П., Юрышев Н.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 127 (2001).
3. Басов Н.Г., Вагин Н.П., Крюков П.Г., Нурлигареев Д.Х., Пазюк В.С., Юрышев Н.Н. *Квантовая электроника*, **11**, 1893 (1984).
4. Yuryshv N.N. *Proc. 34 AIAA Plasma and Lasers Conf.* (Orlando, Florida, 2003).
5. Rongyao Zhang, Fang Chen, Xueqin Song, Qingzhou Xu, Changqing Huan, Qi Zhuang, Cunhao Zhang. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1031**, 308 (1989).
6. Вагин Н.П., Юрышев Н.Н. *Квантовая электроника*, **32**, 609 (2002).
7. Великанов С.Д., Горелов В.Г., Гостев И.В., Калиновский В.В., Комиссаров И.А., Коновалов В.В., Михалкин В.Н., Николаев В.Д., Севрюгин И.В., Смирнов А.В., Соболев Р.Е., Шорников Л.Н. *Труды Междунар. конф. «X Харитоновские тематические научные чтения. Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии»* (РФЯЦ–ВНИИЭФ, Саров, 2008, с.311–316).
8. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д., Воронов С.Л., Воронин В.В., Запольский А.Ф., Золотов М.И., Кириллов Г.А., Мищенко Г.М., Подавалов А.М., Селемир В.Д., Урлин В.Д., Фролов Ю.Н., Циберев В.П. *Квантовая электроника*, **30**, 225 (2000).
9. Velikanov S.D., Kazantsev S.Yu., Kalinovsky V.V., Kononov I.G., Mikhalkin V.N., Podlesnyh S.V., Sevryugin I.V., Firsov K.N. *Techn. Program 14-th Int. Conf. on Laser Optics «LO-2010»* (St. Petersburg, Russia, 2010, TuR2-p11, p.69).
10. Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Подлесных С.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **40**, 397 (2010).
11. Канатенко М.А. *Письма в ЖТФ*, **9**, 214 (1983).
12. Месяц Г.А., Королев Ю.Д. *УФН*, **148** (1), 101 (1986).
13. Осипов В.В. *УФН*, **170** (3), 225 (2000).
14. Аполлонов В.В., Байцур Г.Г., Прохоров А.М., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **14**, 1940 (1987).
15. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30**, 207 (2000).
16. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Письма в ЖТФ*, **22**, 60 (1996).
17. Булаев В.Д., Куликов В.В., Петин В.Н., Югов В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 218 (2001).