

Системы формирования разряда в импульсно-периодическом кислородно-йодном 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-йодного лазера с электроразрядной наработкой атомарного йода при использовании для зажигания объемного разряда индуктивно стабилизированного лезвийного и анизотропно-резистивного катодов. 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 широком диапазоне и увеличить удельный съём лазерной энергии (до 2,4 Дж/л).

Введение

Для наработки атомарного йода в импульсных кислородно-йодных лазерах (КИЛ) применяются фотодиссоциационный и электроразрядный методы [1–3]. При электроразрядном получении атомов йода 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 йодидов и буферного газа (азот, гелий, аргон).

В импульсно-периодическом режиме атомарный йод, как правило, нарабатывается в условиях поперечного ОДР за счет диссоциации йодида электронным ударом. Устойчивость ОДР и степень заполнения газоразрядной плазмой рабочего объема являются главными факторами, от которых зависит эффективность наработки атомарного йода и в конечном счете КПД импульсно-периодического (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]

*Квантовая электроника. 2014. № 1. Т. 44.

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 йода при использовании двух указанных электродных систем, что и является основной целью настоящей работы.

1. Экспериментальная установка

Рабочая среда лазера формировалась введением газообразного йодида 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 торр. В зоне разряда в синглетном состоянии находилось 50–60 % кислорода.

Смесь продувалась горизонтально между электродами, расположенными сверху и снизу потока (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.

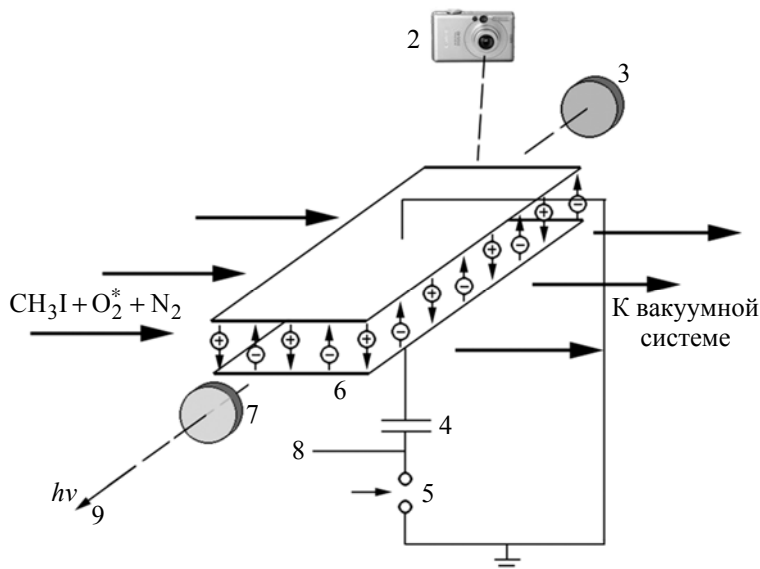


Рис. 1. Схема ИП КИЛ: 1 – анод; 2 – фотокамера; 3 – сферическое глухое зеркало; 4 – конденсатор; 5 – разрядник; 6 – катод; 7 – плоское полупрозрачное зеркало; 8 – подвод высокого напряжения; 9 – выход лазерного излучения

На промежутке 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 (Orhir) с пироэлектрической головкой, форма импульса излучения регистрировалась фотодиодом ФД-10Г.

Лезвийный катод, подробно описанный в [7], имел размер (длина \times ширина) 50×15 см, анизотропно-резистивный – 45×12 см. Удельное сопротивление анизотропно-резистивного слоя толщиной 10 мм в направлении электрического поля составляло $26 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, 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 йода 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 разме-

ром 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 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.

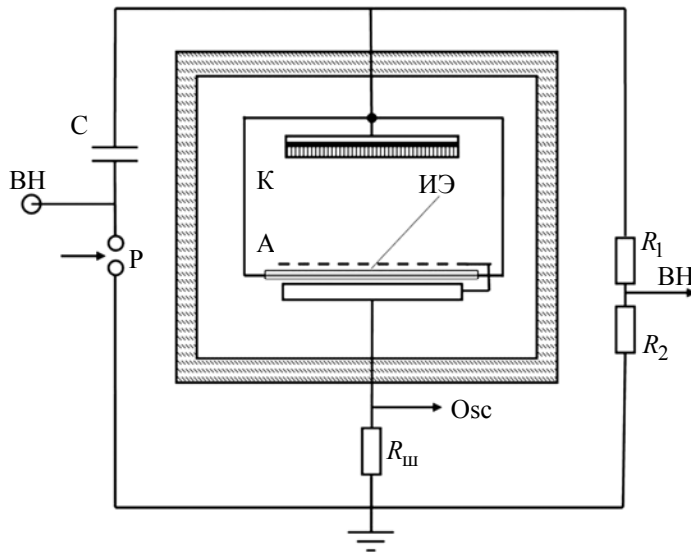


Рис. 2. Электрическая схема установки с сетчатым анодом и анизотропно-резистивным катодом: ВН – высокое напряжение; P – управляемый разрядник; А – анод; К – катод; С – конденсатор; ИЭ – инициирующий электрод; $R_{ш}$ – токовый шунт; R_1 , R_2 – высоковольтный делитель напряжения

В модельных экспериментах с использованием смеси йодида 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 энерго-вклада по промежутку.

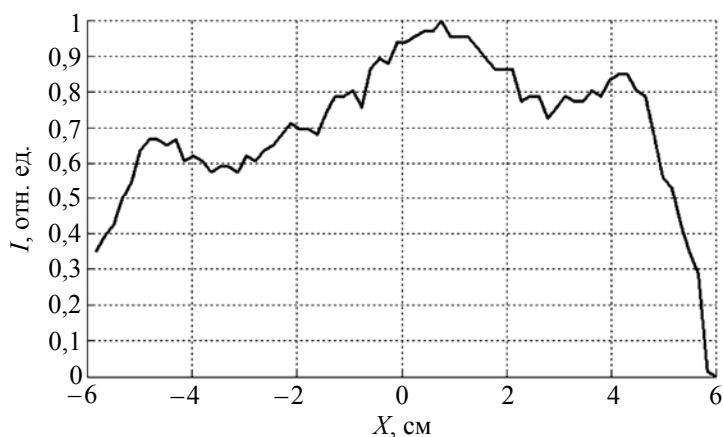


Рис. 3. Распределение интенсивности свечения разрядной плазмы I по координате X в плоскости, параллельной поверхностям электродов (начало отсчета находится на оптической оси). Сетчатый анод, анизотропно-резистивный катод

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

2.1. 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 таблице 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.

Усредненные параметры лазерных импульсов

Конструкция катода (его размер)	Энергия излучения, Дж	Удельный энергоъем, Дж/л	Длительность импульса генерации по полуамплитуде, мкс
Резистивный катод (5×45 см)	2,75	2,4	50
Лезвийный катод (5×50 см)	2,32	1,9	60

Из таблицы видно, что удельный энергоъем 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 съем энергии излучения в случае с резистивным электродом оказывается выше.

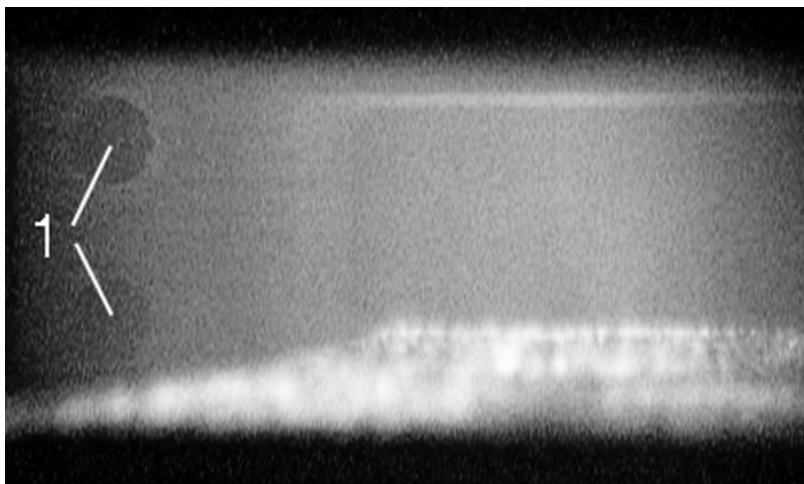


Рис. 4. Фотография ОДР в ИП КИЛ. Электродная система с анизотропно-резистивным катодом (нижний электрод) и сетчатым анодом (1 – диагностические окна камеры)

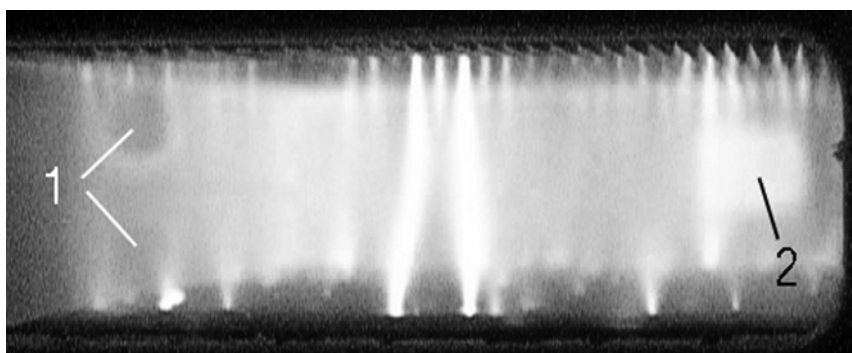


Рис. 5. Фотография ОДР в ИП КИЛ. Система с индуктивно стабилизированным лезвийным катодом: 1 – диагностические окна камеры; 2 – окно для вывода излучения

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 таблицы 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 йода для обеих систем оказываются близкими.

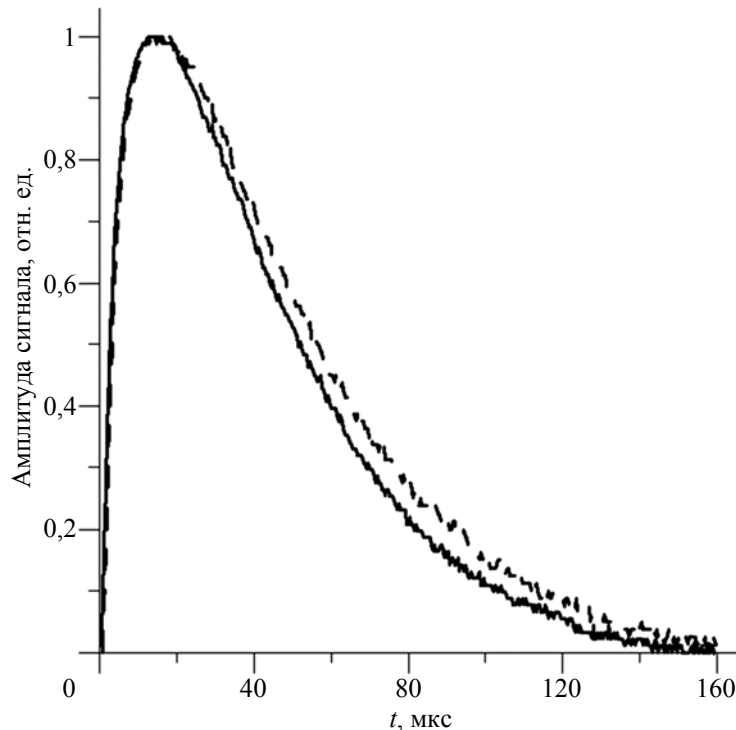


Рис. 6. Нормированные импульсы излучения ИП КИЛ в системах электродов с индуктивно стабилизированным лезвийным (---) и анизотропно-резистивным (—) катодами

2.2. 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 йода 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 йода.

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, 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 значение, необходимое 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 HF-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 йода и, вероятно, кислорода. Следует также отметить, что исследование механизмов разрушения угольного катода в газоразрядной плазме ИП КИЛ при относительно малых энергокладах представляет самостоятельный интерес для физики газового разряда и возможных приложений обнаруженного эффекта.

3. Заключение

Установлено, что в рабочей среде ИП КИЛ при близких удельных вкладах энергии в плазму разряда система с анизотропно-резистивным катодом позволяет получить, по сравнению с индуктивно стабилизированным лезвийным катодом, более устойчивый и однородный электрический разряд, что ведет к увеличению удельного съема 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 йода и кислорода. Физика и химия подобного процесса остаются невыясненными.

Работа поддержана грантом РФФИ № 12-08-00321.

Список литературы

1. Балан Н. Ф., Гизатуллин Р. М., Дубровский А. В. и др. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. С. 1587.

2. Вагин Н. П., Юрышев Н. Н. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. С. 127.
3. Басов Н. Г., Вагин Н. П., Крюков П. Г. и др. // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. С. 1893.
4. Yuryshv N. N. // Proc. 34 AIAA Plasma and Lasers Conf., Orlando, USA, 2003. P. 3620.
5. Rongyao Zhang, Fang Chen, Xueqin Song etc. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 1989. Vol. 1031. P. 308.
6. Вагин Н. П., Юрышев Н. Н. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. С. 609.
7. Великанов С. Д., Горелов В. Г., Гостев И. В. и др. // Труды международной конференции X Харитоновские тематические научные чтения «Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. С. 311.
8. Борисов В. П., Бурцев В. В., Великанов С. Д. и др. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. С. 225.
9. Великанов С. Д., Казанцев С. Ю., Калиновский В. В. и др. // Труды международной конференции «14th International Conference on Laser Optics – 2010». – Санкт-Петербург, 2010. С. 69.
10. Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Подлесных С. В., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 5. С. 397.
11. Канатенко М. А. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. С. 214.
12. Месяц Г. А., Королев Ю. Д. // УФН. 1986. Т. 148, № 1. С. 101.
13. Осипов В. В. // УФН. 2000. Т. 170, № 3. С. 225.
14. Аполлонов В. В., Байцур Г. Г., Прохоров А. М., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14, № 10. С. 1940.
15. Аполлонов В. В., Белевцев А. А., Казанцев С. Ю., Сайфулин А. В., Фирсов К. Н. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30, № 3. С. 207–214.
16. Аполлонов В. В., Казанцев С. Ю., Орешкин В. Ф., Фирсов К. Н. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. С. 60.
17. Булаев В. Д., Куликов В. В., Петин В. Н., Югов В. И. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 3. С. 218.

Discharge formation systems for generating atomic iodine in a pulse-periodic oxygen-iodine laser

V. I. Aksinin, S. A. Antsiferov, S. D. Velikanov, A. Yu. Gerasimov, I. V. Gostev,
S. Yu. Kazantsev, V. V. Kalinovskii, V. V. Konovalov, I. G. Kononov, V. N. Mikhalkin,
S. V. Podlesnykh, I. V. Sevryugin, K. N. Firsov

Generation characteristics of a pulse-periodic oxygen-iodine laser with the electro-discharge production of atomic iodine were compared with inductively stabilised edged or anisotropic-resistive cathodes used for ignition of the volume discharge. It was found that at equal specific electrical energy depositions to the gas-discharge plasma, the system with the anisotropic-resistive cathode provides a more stable and uniform volume discharge with the possibility of varying the composition and pressure of working mixtures over a wide range and a greater specific extraction of laser energy is observed (up to 2,4 J/L).