

Электродная система для электроразрядной наработки атомарного иода в импульсно-периодическом кислородно-иодном лазере с большим объемом активной среды

С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, С.В.Подлесных, К.Н.Фирсов

Исследованы возможности увеличения объема активной среды кислородно-иодного лазера (КИЛ) с импульсной электроразрядной наработкой атомарного иода. Проанализированы причины низкой устойчивости поперечного объемного самостоятельного разряда в электродных системах с металлическими катодами при типичных для КИЛ условиях ввода электрической энергии в газоразрядную плазму: низком давлении смесей, содержащих сильно электроотрицательный компонент; низком напряжении горения разряда; малых удельных энергокладах и большой длительности токового импульса. Разработана эффективная электродная система с катодом на основе анизотропно-резистивного материала, позволяющая реализовать устойчивый разряд в смесях иодида (CH_3I , $n\text{-C}_3\text{H}_7\text{I}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$) с кислородом и азотом при удельных энергокладах ~ 5 Дж/л, давлениях 10–25 Тор и объеме смеси 2.5 л.

Ключевые слова: импульсный химический кислород-иодный лазер, объемный самостоятельный разряд, анизотропно-резистивный материал, электроотрицательные газы, иодиды.

1. Введение

Интерес к исследованиям и разработке химического кислородно-иодного лазера (КИЛ) обусловлен возможностями его применений в промышленности (см. работу [1] и приведенные там ссылки). В ряде технологических приложений импульсно-периодический режим работы КИЛ с высокой пиковой мощностью предпочтительнее непрерывного [2]. Для реализации такого режима могут эффективно использоваться импульсные продольный [3, 4] или поперечный [2, 5] электрические разряды, которые зажигаются непосредственно в газовой среде лазера, состоящей из смеси синглетного кислорода с каким-либо из иодидов и буферными газами. Атомарный иод нарабатывается в смеси за относительно короткое время, определяемое длительностью разрядного тока, в результате диссоциации иодида электронным ударом, что и позволяет реализовать импульсный режим генерации лазера. Для создания КИЛ с большими объемами активной среды и, соответственно, большими энергиями излучения поперечный объемный самостоятельный разряд (ОСР) представляется более перспективным, чем продольный. В [2], где впервые продемонстрирована работа импульсно-периодического КИЛ с иницированием ОСР, разрядный объем был равен 52 см^3 . В работе [5] объем активной среды был увеличен до 625 см^3 . Удельный съем энергии излучения и в [2] и в [5] составлял ~ 1 Дж/л. Авторы обеих работ столкнулись с проблемой устойчивости ОСР в рабочих смесях КИЛ, что потребовало принятия специальных мер для его стабилизации. В [2] применялась резистивная стабилизация тока через отдельные секции катода, представлявшего собой ряд ме-

таллических стержней, нагруженных балластными сопротивлениями. В [5] использовались лезвийные электроды специального профиля, к которым ток подводился через ряд одинаковых индуктивностей [6]. Таким образом, низкая устойчивость ОСР может быть одним из основных препятствий при попытках увеличения энергетических характеристик КИЛ с импульсной электроразрядной наработкой атомарного иода.

Целью настоящей работы является исследование возможностей дальнейшего увеличения объема активной среды КИЛ с иницированием ОСР за счет совершенствования методов стабилизации разряда. Анализируются причины низкой устойчивости ОСР, предложена эффективная электродная система для получения ОСР в объеме ~ 2.5 л.

2. Экспериментальная установка

Моделирование условий получения ОСР в рабочих средах КИЛ проводилось для смесей $\text{RI}:\text{O}_2:\text{N}_2 = (5-10):(50-150):(150-500)$, где RI – иодиды CH_3I , $n\text{-C}_3\text{H}_7\text{I}$ или $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$. Относительно низкое суммарное давление исследуемых смесей газов (10–25 Тор) определялось характеристиками генераторов синглетного кислорода в различных установках.

В значительной мере именно из-за низкого давления рабочих смесей, используемых в [2, 5], возникают проблемы с реализацией устойчивого поперечного ОСР. Низкое давление при малом содержании в смеси сильно электроотрицательного компонента обуславливает, в свою очередь, низкое напряжение горения ОСР в реально достижимых разрядных промежутках 5–10 см и малые напряженности электрического поля E в положительном столбе разряда и на катоде. Вследствие этого, а также из-за малых средних удельных вкладов электрической энергии в плазму активной среды КИЛ с электроразрядной наработкой атомарного иода ($W_{\text{el}} = 2-10$ Дж/л [2, 5]) ОСР даже в форме самоиницирующегося объем-

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

ного разряда [7, 8] в системах со сплошными металлическими катодами имеет вид редко распределенных по промежутку диффузных каналов, привязанных к катодным пятнам, поскольку поверхностная плотность распределения этих пятен растет пропорционально произведению EW_{el} [7]. Большая длительность импульса разрядного тока, обусловленная большой емкостью конденсатора источника накачки (определяемой условием получения заданной величины W_{el} при низком напряжении на промежутке и, следовательно, низком зарядном напряжении конденсатора), также приводит к ухудшению однородности ОСР из-за развития плазменных неустойчивостей. Очевидно, что подобный разряд не позволяет сформировать активную среду КИЛ с необходимой для получения эффективной генерации однородностью.

Секционирование электродов в совокупности с резистивной или индуктивной стабилизацией тока [2, 5] дает возможность реализации ОСР, но при этом газоразрядной плазмой заполняется не весь объем разрядного промежутка, заданный профилем поверхности и внешними габаритами электродов, а лишь его часть, что уменьшает эффективную длину активной среды при крайне низких коэффициентах усиления слабого сигнала, характерных для КИЛ. В настоящей работе сделана попытка устранения указанных недостатков за счет применения для получения ОСР в рабочих средах КИЛ электродной системы с катодом на основе анизотропно-резистивного материала. Анизотропно-резистивная стабилизация ОСР была предложена в [9]. В [10, 11] на основе такой стабилизации в рабочих смесях мощных нецепных HF(DF)-лазеров получены ОСР с высокими удельными энерговкладами.

Схема установки, на которой проводились исследования, представлена на рис.1. Катод разрядного промежутка был выполнен следующим образом. Прямоугольная пластина толщиной 10 мм с размерами 12×65 см из анизотропно-резистивного материала, описанного в [10], была приклеена к пластине из дюралюминия токопроводящим клеем. Удельное сопротивление катода в направлении электрического поля, измеренное в отдельном эксперименте по зависимости напряжения на электродах от тока ОСР в SF_6 , составляло 26 Ом·см. Анод из дюралюминия имел профиль Чанга с параметром кривизны $K = 0.554$. Межэлектродное расстояние равнялось 5 см. Инициирование ОСР осуществлялось барьерным разря-

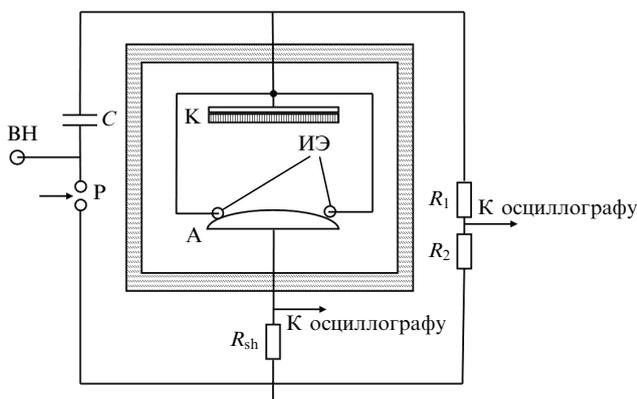


Рис.1. Электрическая схема установки:

ВН – высокое напряжение; Р – управляемый разрядник; А – анод; К – катод; ИЭ – иницирующий электрод; R_{sh} – токовый шунт; R_1 и R_2 – высоковольтный делитель напряжения; $C = 120$ нФ.

дом, который зажигался между двумя проводами в полиэтиленовой изоляции, натянутыми вдоль электродов и соединенными с катодом, и анодом при подаче на промежуток импульса напряжения. В экспериментах варьировались расстояние между проводами по горизонтали (рис.1) и расстояние от проводов до поверхности анода. По предварительным оценкам эта электродная структура должна была обеспечить получение ОСР в объеме $V = 5 \times 10 \times 50$ см. Электроды размещались в камере из оргстекла, имевшей на торцах окна для фотографирования разряда.

На промежуток разряжался конденсатор емкостью $C = 120$ нФ, зарядное напряжение варьировалось от 6 до 15 кВ ($W_{el} \sim 0.86 - 5$ Дж/л). Ток ОСР и напряжение на разрядном промежутке контролировались с помощью малоиндуктивного шунта и резистивного делителя напряжения соответственно.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

ОСР был получен во всех исследованных газовых смесях и для всех рассматриваемых энерговкладов. На рис.2 приведены типичные осциллограммы напряжения на электродах разрядного промежутка и тока ОСР. Видно, что длительность импульса тока τ составляет ~ 1 мкс. Модельный эксперимент с увеличением длительности тока посредством включения в разрядную цепь дополнительной индуктивности показал, что в рассматриваемой здесь электродной системе устойчивость ОСР сохраняется при длительностях τ , по крайней мере, до 1.5 мкс во всем диапазоне изменения зарядного напряжения. Это свидетельствует о возможности дальнейшего увеличения разрядного объема даже без секционирования источника накачки. Следует также отметить, что потери электрической энергии в самом анизотропно-резистивном катоде малы, поскольку его собственное сопротивление при такой большой площади ($\sim 10 \times 50$ см) не превышает 0.05 Ом при волновом сопротивлении разрядного контура $\rho = \sqrt{L/C} \approx 2.7$ Ом (L и C – индуктивность разрядного контура и емкость конденсатора источника накачки соответственно).

В процессе экспериментов было установлено, что распределение по разрядному промежутку вводимой в плазму ОСР энергии зависит не только от распределения на-

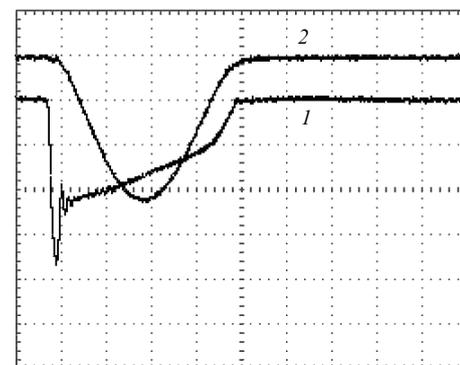


Рис.2. Осциллограммы напряжения на разрядном промежутке (1) и тока ОСР (2) в смеси $C_2H_5I:O_2:N_2 \approx 6:50:150$ при давлении 12 Тор, полученные при зарядном напряжении 11 кВ. Масштабы по вертикальной оси: напряжение – 2.2 кВ/дел., ток – 625 А/дел.; развертка 250 нс/дел.

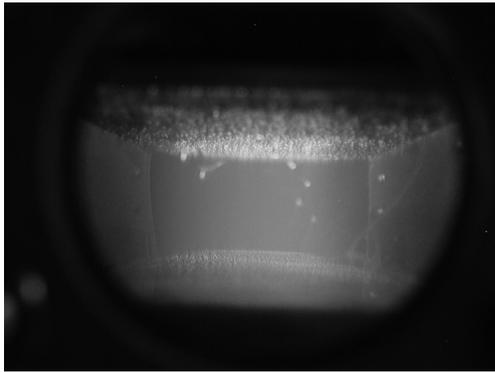


Рис.3. Фотография ОСР в смеси $C_2H_5I:O_2:N_2 \approx 6:50:150$ при давлении 12 Тор и зарядном напряжении 11 кВ.

пряженности электрического поля, задаваемого профилем поверхности электродов (в рассматриваемом случае профилем анода), но и от пространственного расположения инициирующих электродов (ИЭ, см. рис.1). В связи с этим проводилась оптимизация положения ИЭ по расстоянию между ними (расстояние по горизонтали на рис.1) и по расстоянию от них до поверхности анода (расстояние по вертикали на рис.1) с целью достижения максимально однородного распределения энерговклада. Распределение энерговклада контролировалось по фотографиям ОСР. Оптимальным оказалось положение ИЭ, показанное на рис.1: ИЭ касаются поверхности анода, расстояние между ними составляет 14 см.

На рис.3 для иллюстрации однородности газоразрядной плазмы при использовании анизотропно-резистивного катода представлена фотография ОСР, полученная при тех же условиях, что и осциллограммы напряжения и тока на рис.2. Видно, что практически вся поверхность катода плотно покрыта мелкими катодными пятнами, размер которых определяется диаметром токопроводящих углеродных нитей, образующих катод. На рис.4 приведено распределение интенсивности свечения газоразрядной плазмы по горизонтальной координате в плоскости, параллельной поверхности катода, полученное в результате обработки фотографии на рис.3 и качественно отражающее распределение энерговклада. Видно, что ширина распределения интенсивности по уровню 0.5 составляет ~ 7 см. Более плоское распределение может быть получено за счет соответствующего изменения параметра кривизны профиля анода.

4. Заключение

Таким образом, применение катода на основе анизотропно-резистивного материала позволяет решить проблему реализации поперечного ОСР в больших объемах рабочих смесей КИЛ с электроразрядной наработкой атомарного иода. Такой же катод с успехом использовался

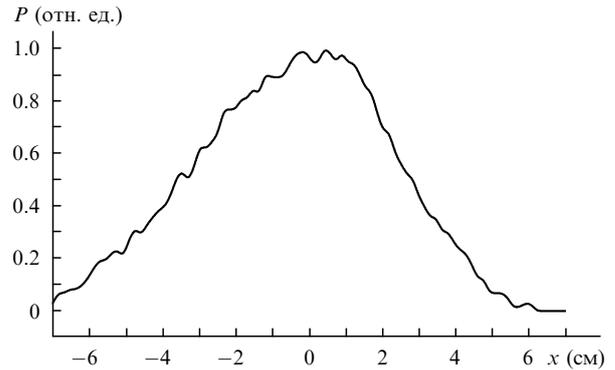


Рис.4. Распределение интенсивности свечения P разрядной плазмы по координате x в плоскости, параллельной поверхностям электродов.

авторами [11] в мощном импульсно-периодическом HF-лазере при частоте следования импульсов до 100 Гц и величинах W_{el} , превышающих 100 Дж/л. В связи с этим не вызывает сомнений возможность реализации импульсно-периодического режима и в случае применения исследованной электродной системы в КИЛ, для которых оптимальные значения W_{el} составляют 2–3 Дж/л [2, 5].

Авторы выражают искреннюю благодарность С.Д. Великанову, В.В.Калиновскому, В.Н.Михалкину и И.В. Севрюгину за инициирование работы и полезные обсуждения.

Работа частично поддержана РФФИ (гранты № 08-08-00242 и 09-02-00475).

1. Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **23**, 583 (1996).
2. Вагин Н.П., Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 127 (2001).
3. Zhang Rongyao, Chen Fang, et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1031**, 308 (1989).
4. Вагин Н.П., Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **32**, 609 (2002).
5. Великанов С.Д., Горелов В.Г., Гостев И.В., Калиновский В.В. и др. *Труды. Междунар. конф. «X Харитоновские тематические научные чтения. Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии»* (Саров, РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2008, с. 311–316).
6. 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).
7. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30**, 207 (2000).
8. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **33**, 489 (2003).
9. Канатенко М.А. *Письма в ЖТФ*, **9**, 214 (1983).
10. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Письма в ЖТФ*, **22**, 60 (1996).
11. Булаев В.Д., Куликов В.В., Петин В.Н., Югов В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 218 (2001).