

04

## Повторная контракция энергонапряженных импульсно-периодических разрядов

© В.М. Климкин

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск  
E-mail: ifmi@asd.tomsk.ru

Поступило в Редакцию 17 марта 2003 г.

Показано, что при размещении навески металла непосредственно в разрядном канале ограничение ресурса разрядных каналов импульсно-периодических лазеров на парах металлов вызвано повторной контракцией разряда (кроме разрядов в парах меди и золота). Сделан вывод о том, что автоматическая расконтракция импульсно-периодических разрядов, наблюдающаяся при введении в разряд паров металлов (эффект Петраша), — многокомпонентный процесс.

**Энергонапряженные разряды.** Потребности лазерных технологий, плазмохимии и других областей использования электрических разрядов инициировали обширные исследования нескольких видов неравновесных электрических разрядов в газах и газовых смесях. Начало этих работ приходится примерно на 1969 г., их основная задача — разработка методов введения в газ больших энергий. Результаты большого объема исследований изложены в значительном числе обзоров и монографий [1–5]. Согласно этим исследованиям, основной проблемой создания неравновесных газоразрядных систем является неустойчивость разрядов [6]. Под неустойчивостью разряда понимается сжатие неравновесного разряда в шнур (контракция), пинчевание (дополнительное сжатие шнура магнитным полем), развитие искры или дуги. Физические условия в плазме контрагированных разрядов близки к равновесным и непригодны для возбуждения лазеров и ряда других приложений электрических разрядов в газах (плазмохимия, обработка поверхностей и т.д.).

Практически одновременно (в 1971 г.) в другой области знаний — в импульсных газовых лазерах на парах металлов — было продемонстрировано уникальное достижение — введение в газ (смесь паров металлов

с инертными газами) около 2 kW средней мощности на один метр газоразрядного промежутка продольного неравновесного импульсно-периодического разряда [7]. Введение такой мощности обеспечивалось без прокачки газа. Основной особенностью этого разряда является его глубокая контракция в чистых инертных газах (назовем ее начальной) и автоматическая расконтракция при поступлении в разряд паров металла [8–12]. Автор предложил назвать это уникальное явление „эффектом Петраша“ [11,12].

В физике лазеров на парах металлов, несмотря на длительную историю их развития (в том числе до 1971 г. и после) и многочисленные исследования физических процессов, протекающих в плазме импульсно-периодического газового разряда, феномен высокой энергоемкости и устойчивости открытого в 1971 г. разряда долгое время не был осознан исследователями и технологами. Тем не менее в различных экспериментах с лазерами на парах металлов достигнуты следующие параметры разряда: объем возбуждаемой среды — 18 литров [13]; частота следования импульсов — 350 kHz [14]; длительность разряда в одиночном импульсе — 150  $\mu$ s [15]; длительность разряда на частоте 10 kHz — 1  $\mu$ s [16]; давление газовой среды — 5 atm [17]; средняя мощность лазерного излучения с одного активного элемента — 450 W [13]; вводимая в разряд, в одном активном элементе, средняя мощность — 45 kW [13].

На сегодняшний день импульсно-периодические разряды в смесях паров металлов с инертными газами являются наиболее энергоемкими и устойчивыми (разряд не контрагирует при перепаде температуры газа между осью разряда и пристеночной зоной — 2000 градусов).

**Эффект ограничения ресурса газоразрядных трубок.** Одним из условий получения неравновесных разрядов в газах является предыонизация газа в объеме газоразрядного промежутка. Например, для разрядов в эксимерных лазерах пороговая плотность электронов предыонизации составляет  $10^6$ – $10^7$   $\text{cm}^{-3}$ . В импульсно-периодических разрядах, применяемых для возбуждения лазеров на парах металлов, остаточная плотность электронов к концу межимпульсного интервала существенно больше —  $10^{12}$ – $10^{13}$   $\text{cm}^{-3}$ . Очевидно, что для этих разрядов предыонизации разрядного промежутка в общепринятом понимании не требуется. Тем не менее анализ условий существования импульсно-периодических разрядов в лазерах на парах металлов показывает,

что своеобразный процесс, напоминающий плазменную стабилизацию разряда, существует.

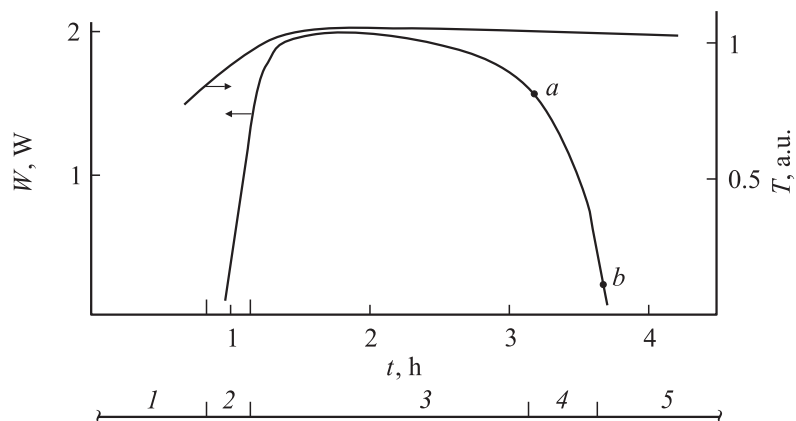
В связи с тем, что специальных исследований неравновесных импульсно-периодических разрядов не проводилось, целесообразно проанализировать характеристики разрядов, описанных в работах по наблюдению импульсно-периодического режима генерации лазеров на парах химических элементов. Этот анализ показывает, что разрядные каналы импульсно-периодических лазеров на парах металлов имеют существенно разный срок службы в зависимости от свойств химических элементов, пары которых вводятся в разряд.

Можно ввести следующую систематизацию элементов по сроку службы газоразрядных каналов. Химические элементы объединим в 3 группы — А, В, С, различающиеся по сроку службы газоразрядных каналов. Включим в группу А два элемента — Cu и Au. При введении смесей паров этих элементов с инертными газами в разряд наблюдается импульсно-периодический режим возбуждения со значительным сроком службы ( $> 2000$  h). Такой ресурс газоразрядных каналов близок ко времени полного выноса металла из рабочей зоны канала. Далее большой список элементов, на парах которых до сегодняшнего дня наблюдался только краткосрочный ( $1 \div 10$  h) режим импульсно-периодического разряда, включим в группу В. Наконец, отнесем к группе С газы (Kr, Xe и т.д.) и пары ряда элементов, в смесях которых с He и Ne расконтрагированный импульсно-периодический разряд не наблюдался совсем.

Учитывая, что группа А представлена только двумя элементами — Cu и Au, существует проблема расширения списка элементов, в парах которых импульсно-периодический разряд существует длительное время. Ниже приведены результаты исследований импульсно-периодических разрядов, показывающие, что ограничение срока службы газоразрядных каналов обусловлено совершенно необычной причиной — повторной контракцией разряда. Контракция возникает при металлизации внутренней поверхности газоразрядных каналов активных элементов слоем рабочего металла.

***Экспериментальное наблюдение повторной контракции разряда.***

Типичные эксперименты по наблюдению повторной контракции разряда были выполнены следующим образом. Наблюдалось старение активного элемента импульсно-периодического лазера на парах европия по изменениям выходной мощности, импульсного тока разряда, температуры



Типичные зависимости средней выходной мощности лазера (нижняя кривая) и температуры канала (верхняя кривая) от времени, цикл контракции энергонапряженного импульсно-периодического разряда: 1 — режим начальной контракции разряда; 2 — режим расконтракции; 3 — однородный разряд; 4 — режим страт; 5 — повторная контракция разряда; *a* — отмечено появление бегущих страт; *b* — появление плазменного шнура.

канала, боковому излучению разряда. После сборки и включения в цепь импульсно-периодического питания газоразрядной кюветы с разрядным каналом из  $\text{BeO}$  — керамики диаметром 1 см и длиной 40 см, заполненной He, содержащей свободно лежащую на внутренней поверхности канала навеску металлического Eu, средняя мощность генерации на переходе  $\lambda = 1.0019 \mu\text{m}$   $\text{Eu}^+$  при частоте следования импульсов возбуждения  $\nu = 10 \text{ kHz}$  типично составляла  $2 \div 3 \text{ W}$ . Однако в течение  $2 \div 3 \text{ h}$  работы активного элемента при неизменной оптимальной температуре канала (см. рисунок, верхняя кривая) мощность монотонно падала до уровня  $\sim 0.1 \text{ W}$  и менее, в том числе до полного прекращения генерации (см. рисунок, нижняя кривая). При этом визуально через стенку и с торца кюветы наблюдалось фундаментальное изменение режима разряда — разряд из однородного превращался вначале в разряд с бегущими или стоящими стратами, затем стягивался в шнур — контрагировал. И режим страт, и режим повторной контракции являются признаками потери разрядом устойчивости.

Разборка кюветы не выявила каких-либо нарушений в конструкции. Однако для повторного запуска лазера потребовалось заменить разрядный канал на свежий. При повторном запуске сценарий нарушения разряда повторился.

После нескольких экспериментов было установлено, что на внутренней поверхности отработавшего несколько часов и затем разобранный газоразрядного керамического канала и на аншлифах образцов керамики этого канала виден тонкий практически однородный слой металла. Удаление этого слоя травлением и повторная сборка кюветы приводили к восстановлению его работоспособности на следующие  $1 \div 3$  h и т.д.

Это явление наблюдалось в подобных экспериментах в разрядах с парами европия, бария, стронция и, следовательно, носит общий характер. С другой стороны, было установлено, что отработавшие ресурс газоразрядные каналы долгоживущих разрядов в парах меди и золота не имеют металлических пленок.

Таким образом, экспериментально показано, что малозаметное явление — покрытие разрядных каналов тонкой пленкой рабочего металла — нарушает эффект Петраша — процесс расконтракции разряда, наблюдаемый при введении в плазму легко ионизируемой добавки (паров металлов) и вызывает повторную контракцию разряда. Если использовать аналогию, то процесс металлизации стенки канала равносителен выключению системы предьонизации в технологии иницирования объемных разрядов в газах. Можно выделить 5 режимов развития разряда (см. рисунок).

Наблюдаемое явление — потеря устойчивости разряда при металлизации стенок газоразрядных каналов — указывает на существование процесса дополнительной ионизации газоразрядного промежутка в импульсно-периодических разрядах. Исследование этого явления может привести к разработке методов управления состоянием импульсно-периодических разрядов. Очевидно также, что процессы, протекающие при автоматической расконтракции импульсно-периодических разрядов, многокомпонентные.

В лазерах на парах металлов этот результат имеет прямое отношение к проблемам срока службы и масштабирования разрядных каналов.

Автор признателен своим коллегам В.Е. Прокопьеву и В.Г. Сокинову за помощь в проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] *Бычков Ю.И.* и др. Инжекционная электроника. Новосибирск: Наука, 1982.
- [2] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982.
- [3] *Велихов Е.П.* и др. Импульсные СО<sub>2</sub>-лазеры и их применение для разделения изотопов. М.: Наука, 1987.
- [4] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991.
- [5] *Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф.* Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991.
- [6] *Клайн Л.Э., Дэн Л.Ж.* Самостоятельные разряды с предыонизацией, используемые для накачки лазерных сред. *Хаас Р.А.* Устойчивость разрядов в эксимерных лазерах. // Газовые лазеры / Под ред. И. Мак-Даниеля и И.У. Нигэна. М.: Мир, 1986. С. 461–536.
- [7] *Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16. № 1. С. 40–42.
- [8] *Бохан П.А., Закревский Д.Э.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 4. С. 25–31.
- [9] *Букиун Л.М., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф.* // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 9. С. 1762–1764.
- [10] *Климкин В.М., Мальцев А.Н., Фадин Л.В.* // Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1978. С. 116–132.
- [11] *Климкин В.М.* Проблемы неустойчивости продольных импульсно-периодических разрядов в лазерах на парах металлов. Препринт ИОА СО РАН. Томск, 1999. 24 с.
- [12] *Klimkin V.M.* // Proceeding of SPIE. 2002. V. 4747. P. 164–179.
- [13] *Kanagai C., Auki N., Kobayashi N., Kimura H.* // Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium an Advanced Nuclear Energy Research. P. 673.
- [14] *Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Павлинский А.В., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Лябин Н.А.* // Тез. докл. симпозиума „Лазеры на парах металлов“. Ростов-на-Дону, 2000. С. 9.
- [15] *Бохан П.А., Климкин В.М., Прокопьев В.Е.* // Квантовая электроника. 1970. № 2. С. 29.
- [16] *Бохан П.А., Климкин В.М., Прокопьев В.Е., Монастырев С.С.* // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 6. С. 1365–1369.
- [17] *Bokhan P.A., Zavrevsky D.E.* // Proc. SPIE. 1994. V. 2110. P. 220–234.