

03; 04

АНОМАЛЬНЫЙ ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ КАК СТАЦИОНАРНЫЙ ИСТОЧНИК БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ КИЛОВОЛЬТНОГО ДИАПАЗОНА

Ю. С. Акишев, Н. А. Дятко, А. П. Напартович,
П. И. Перетьяко

1. В последние годы резко возрос интерес к лазерам на электронных переходах инертных газов (ЛЭПИГ), в которых заселение верхнего рабочего уровня осуществляется за счет рекомбинации, а очистка нижнего — с помощью пеннинговских процессов. Для накачки ЛЭПИГ наряду с электронными пушками [1] используются также разряды, имеющие на стадии пробоя и установления составляющую электронного тока с энергией 1—15 кэВ [2].

Актуальным в настоящее время является создание ЛЭПИГ с высоким уровнем средней мощности. Для создания квазистационарного или стационарного ЛЭПИГ высокой мощности, на наш взгляд, перспективным может оказаться использование катодной области тлеющего разряда. Настоящая работа посвящена исследованиям активной среды, возбуждаемой электронами катодного свечения сильно аномального тлеющего разряда в инертных газах при средних давлениях.

2. В экспериментах использовался мелко секционированный катод из 104 титановых штырей диаметром 1 мм, торцы которых заделаны заподлицо в керамику и отстоят друг от друга на 3.3 мм. К каждому из элементов катода подключалось балластное сопротивление 68 кОм. Анодом служила латунная сетка с проницаемостью 0.6. Среднее токовое сечение разряда $S=18 \text{ см}^2$, межэлектродное расстояние 1—2 мм. Для сохранения паспортной чистоты используемого гелия (99.99 %) эксперименты проводились при слабой прокачке газа. Давление газа $p=10\text{—}70 \text{ Тор}$.

Квазистационарный разряд создавался коммутацией заряженной конденсаторной батареи на межэлектродный промежуток. Длительность импульса составляла $10^{-3}\text{—}10^{-1} \text{ с}$. В экспериментах регистрировались осциллограммы разрядного тока I_p и напряжения U_p на промежутке.

Активная среда, возбуждаемая электронами катодной области, проходящими сквозь сетчатый анод, исследовалась спектроскопически. Применялся оптический многоканальный анализатор спектра видимого диапазона. Система регистрации позволяла снимать пространственное распределение интенсивностей спектральных линий в области за анодом (координата x) с разрешением 1 мм и временным разрешением 1 мс.

3. В результате экспериментов удалось реализовать почти стационарный устойчивый тлеющий разряд в гелии при степенях аномальности катодной области, на два-три порядка превышающей нормальную. Напряжение на разрядном промежутке, фактически катодное падение, составляло при этом 1.5—2 кВ. Плотность тока разряда в поперечном сечении у анода достигала $I_p = 250 \text{ мА/см}^2 \cdot \text{Тор}^2$.

В бесполом пространстве за сетчатым анодом визуально наблюдалось яркое красно-желтое свечение, простирающееся на 1—2 см в зависимости от

p и $I_p(U_p)$. Оказалось, что яркость излучения активной области в гелии определяется в основном пятью спектральными линиями атомов He

$$5016\text{\AA} (2^1S - 3^1P), 7065\text{\AA} (2^0P - 3^3S), 5876\text{\AA} (2^3P - 3^3D), \\ 4472\text{\AA} (2^3P - 4^3D), 6678\text{\AA} (2^1P - 3^2D)$$

и двумя линиями He⁺

$$6560\text{\AA} (4^2F - 6^2G), 4859\text{\AA} (4^2F - 8^2G).$$

Пространственное распределение интенсивностей указанных линий за анодом снималось при давлениях 10, 30, 50 и 70 Тор в диапазоне $U_p = 1-2$ кВ. На рис. 1. приведено распределение интенсивности линии $\lambda = 6560 \text{\AA}$ (He⁺) для $U_p = 1.5$ кВ. Координата $x=0$ соответствует положению сетчатого анода. При давлениях 10 и 30 Тор наблюдался максимум интенсивности, отстоящий от анода на 2—3 мм, при $p=50$ Тор максимум с точностью до 1 мм не разрешался.

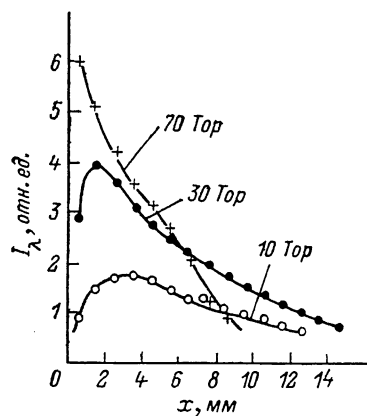


Рис. 1.

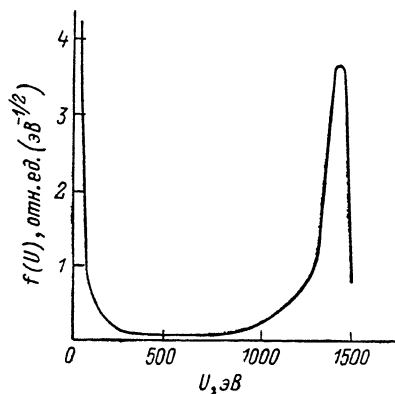


Рис. 2. Функция распределения электронов по энергиям.

$x=0$, $U_p=1.5$ кВ, $p=30$ Тор.

С изменением U_p от 1 до 2 кВ относительная интенсивность линий и протяженность свечения по x увеличивались приблизительно в два раза. Распределение интенсивностей остальных линий спектра имело аналогичный характер.

4. Для выяснения характеристик пучка электронов, вылетающих за сетчатый анод, и условий возбуждения газа за сеткой проводилось численное моделирование методом Монте-Карло. При этом предполагалось, что все приложенное к промежутку напряжение падает в катодном слое, спадание поля в котором происходит по линейному закону. Температура газа принималась равной 300 К. Ширина катодного слоя оценивалась по формуле l [см] = $0.5/p$ [Тор]. Дифференциальное сечение упругого рассеяния электрона на атоме He бралось из [3-5], суммарное сечение возбуждения электронных уровней из [6], а угловая зависимость его считалась такой же, как и в случае упругого рассеяния. Полное сечение ионизации бралось из [7]. Спектр вторичных электронов задавался формулой, приведенной в [8]. Расчетная процедура строилась таким образом, что отслеживались только электроны с энергией, большей потенциала возбуждения электронных уровней.

В расчетах получена функция распределения электронов по энергиям сразу за анодом. Рассчитаны также интенсивность рождения электрон-ионных пар и интенсивность возбуждения электронных уровней в зависимости от x . На рис. 2 показан типичный вид функции распределения электронов для одного из режимов; концентрация электронов пропорциональна площади под кривой. Из рисунка следует, что за сетку вылетает пучок быстрых электронов с характерной энергией, немного меньшей потенциала, приложенного к разрядному

промежутку. Согласно расчетам, на один «стартовавший» с катода электрон приходится (в зависимости от условий) 0.35—0.5 быстрых электронов.

Распределение интенсивности рождения ион-электронных пар по координате x для $p=30, 50$ и 70 Тор и $U_p=1.5$ кВ представлено на рис. 3. Интенсивность возбуждения электронных уровней (для всех рассмотренных случаев) примерно в два раза ниже интенсивности ионизации и имеет ту же зависимость по координате. Это соответствует соотношению сечений ионизации и возбуждения для энергий электронов в диапазоне 0.5—2 кэВ.

Ионы He_2^+ , образовавшиеся при ионизации электронным ударом, в наших условиях достаточно быстро конвертируют в ионы He_2^+ . Заселение электронных уровней атомов гелия происходит как в процессе возбуждения электронным ударом, так и в процессе диссоциативной рекомбинации He_2^+ . Поэтому экспериментальные зависимости интенсивности излучения уровней He и He^+ и рассчитанные зависимости интенсивности ионизации (возбуждения) от координаты, как видно из рис. 1, 3, допускают качественное сопоставление (немонотонность указанных зависимостей по координате, характерный размер «глубины проникновения» пучка электронов при различных параметрах разряда и среды).

5. Таким образом, проведенные эксперименты и расчеты показали, что задача стационарного возбуждения верхних лазерных уровней ЛЭПИГ может быть решена с применением тлеющего разряда в сильно аномальном режиме. При этом, по-видимому, могут достигаться более высокие удельные характеристики из-за больших сечений возбуждения и ионизации при энергиях электронов 1—2 кэВ. Однако эти особенности, связанные с меньшей энергией электронов и почти стационарным режимом работы, могут влиять на кинетику процессов накачки и опустошения лазерных уровней. Поэтому необходимы исследования лазерных характеристик активной среды с точки зрения выбора смеси, режимов разряда, влияния чистоты газов и т. д.

В заключение авторы выражают благодарность П. А. Свотину за предоставление программы и помощь в проведении расчетов.

Список литературы

- [1] Басов Н. Г., Данильчев В. А. // УФН. 1986. Т. 148. № 1. С. 55—100.
- [2] Бункин Ф. В., Держиев В. И., Лампуш Е. Л. // Квантовая электрон. 1986. Т. 13. № 12. С. 2531—2533.
- [3] Register D. F., Trajmar S., Srivastava S. K. // Phys. Rev. 1980. Vol. 21. N 4. P. 1134—1151.
- [4] Tansen R. N., Heer F. I., Lundken H. I., Wingerden B. // J. Phys. B. 1976. Vol. 9. N 2. P. 185—213.
- [5] Byron F. W., Joachain C. I. // Phys. Rev. 1977. Vol. 15A. N 1. P. 122—146.
- [6] Дятко Н. А., Кочетов И. В., Напартович А. П., Тарап М. Д. Препринт ИАЭ. № 3842. Москва, 1983. 31 с.
- [7] Kieffer L. I., Dunn G. H. // Rev. Mod. Phys. 1966. Vol. 38. N 1. P. 1—35.
- [8] Opal C. B., Peterson W. K., Beatty E. C. // J. Chem. Phys. 1971. Vol. 55. N 8. P. 4100—4106.

Поступило в Редакцию
17 июня 1988 г.

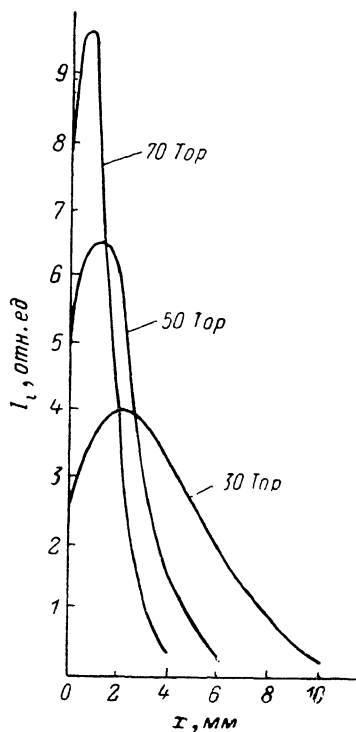


Рис. 3. Распределение интенсивности рождения электрон-ионных пар.

$x=0$ соответствует положению анода, $U_p=1.5$ кВ.