

02:04:07;12

## **Возбуждение уровня $6^3P_1$ атома ртути при накачке смеси паров ртути и аргона импульсно-периодическим наносекундным разрядом**

© Л.М. Василяк, А.В. Красночуб, М.Е. Кузьменко,  
С.В. Костюченко

Московский физико-технический институт

Поступило в Редакцию 21 июля 1997 г.

Экспериментально исследован импульсно-периодический наносекундный разряд в смеси паров ртути и аргона. Показано, что концентрация атомов ртути в состоянии  $6^3P_1$  составляет около 50% от общей концентрации.

Дуговой разряд низкого давления в смесях ртуть-аргон применяется как эффективный источник преобразования энергии в излучение резонансных линий атома ртути с длиной волны 185 nm ( $6^1P_1-6^1S_0$ ) и 254 nm ( $6^3P_1-6^1S_0$ ). Переход к динамическому разряду с микросекундной длительностью импульсов тока в таких смесях приводит к увеличению эффективности выхода УФ излучения [1–3]. Нами проведено исследование разряда с наносекундной длительностью импульсов в смеси паров ртути и аргона, который происходит в виде высокоскоростной волны ионизации [4].

Разряд зажигался в цилиндрической кварцевой трубке с внутренним диаметром 13.5 mm и межэлектродным расстоянием 77 см. Давление аргона при нормальных условиях 3 Torr. Давление ртути равнялось давлению насыщенного пара при температуре холодной точки разрядной трубки. Холодная точка создавалась с помощью системы охлаждения. Разрядная трубка окружена заземленным металлическим экраном с внутренним диаметром 40 mm. Импеданс разрядной ячейки в предположении металлической проводимости плазмы 60.5  $\Omega$ . Разрядная ячейка включена в разрыв коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50  $\Omega$ .

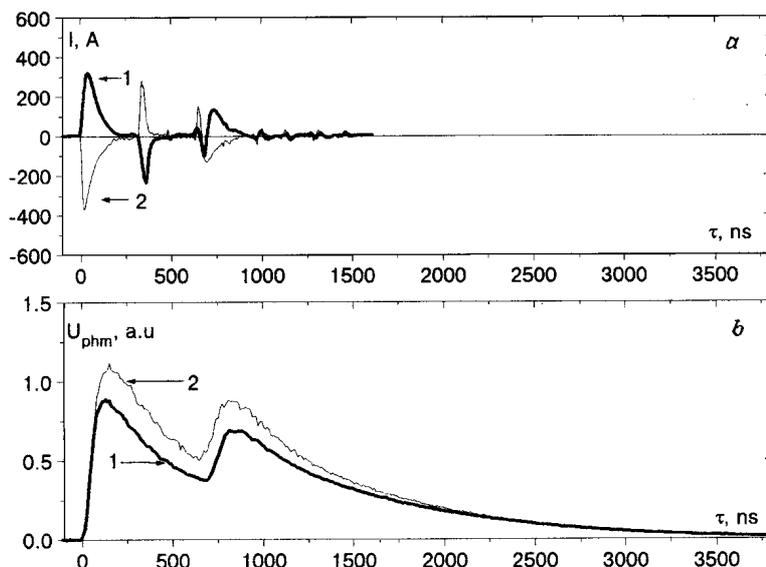
Импульсно-периодический разряд возбуждался знакопеременными импульсами с параметрами: положительная полярность — амплитуда 15.9 kV, фронт 28 ns, полуширина 82 ns; отрицательная полярность — 18.5 kV, 12 ns, 61 ns соответственно. Измерения проводились при частоте следования импульсов 330 Hz. Прошедшие через разрядную ячейку импульсы поглощались нагрузкой 50  $\Omega$ . Из-за всегда существующего рассогласования ячейки и линии происходит отражение части падающего импульса обратно в линию. Эта часть импульса в силу конструктивных особенностей отражается от генератора импульсов и приходит на разрядную ячейку через 640 ns после прихода исходного импульса. Энергия, поглощенная в разряде, определялась по осциллограммам с шунтов обратного тока по методике [5], с учетом падающего и переотраженного импульса. Средняя электрическая мощность разряда равна  $30 \pm 6$  W.

При помощи монохроматора МУМ-1, фотоумножителя ФЭУ-100 и осциллографа Tektronix TDS-640A (500 Hz) исследовалась временная динамика интенсивности линии 254 nm с временным разрешением 3 ns. Линейность ФЭУ-100 при импульсной нагрузке проверялась отдельно [6].

Средняя мощность излучения в диапазоне 210–280 nm измерялась при помощи фотоэлемента ФЭУ. Мощность излучения линии 254 nm определялась с учетом измеренной относительной интенсивности спектральных линий и спектральной чувствительности ФЭУ.

Восстановленная по осциллограммам пиковая мощность излучения  $\approx 800$  W. На рисунке приведены типичные осциллограммы с шунта обратного тока и с ФЭУ при температуре холодной точки 40°C (давление паров ртути 6 mTorr).

Для мгновенной мощности излучения можем записать  $P(t) = A_{\text{eff}} \cdot N_a \cdot \hbar\omega$  [7], где  $A_{\text{eff}}$  — эффективная вероятность выхода излучения из плазмы,  $N_a$  — число атомов в состоянии  $6^3P_1$ ,  $\hbar\omega$  — энергия кванта. Эффективная вероятность выхода излучения  $A_{\text{eff}} \leq A_{\text{rad}}$ , где  $A_{\text{rad}} = 1/\tau_{\text{rad}} = 8.3 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$  [8] — вероятность испускания кванта изолированным атомом. Вследствие заселения уровня  $6^3P_1$  электронным ударом из основного состояния, а также с уровней  $6^3P_{0,2}$  и радиационными переходами с более высоколежащих уровней  $1/A_{\text{eff}} \leq \tau$ , где  $\tau$  — определяемое по осциллограммам время спада интенсивности излучения линии 254 nm при аппроксимации в виде  $I = I_0 \exp(-(t - t_0)/\tau)$ . Тогда можем записать  $1/\tau_{\text{rad}} > A_{\text{eff}} \geq 1/\tau$ .



Осциллограммы: *a* — с шунта обратного тока; *b* — сигналов с ФЭУ. 1 — положительная, 2 — отрицательная полярность импульсов.

Отсюда  $P(t)/(A_{\text{rad}}\hbar\omega V) < n_a \leq (P(t)\tau)/(\hbar\omega V)$ , где  $n_a$  — усредненная по сечению разряда концентрация атомов в состоянии  $6^3P_1$ ,  $V$  — объем разрядной трубки.

В [6] получено, что в стационарном разряде при давлении паров ртути 7 мТорг усредненная по сечению разрядной трубки концентрация атомов в состоянии  $6^3P_1$  составила  $2.1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , что составляет примерно 0.1% от общего числа атомов ртути в разряде. Диаметр разрядной трубки 36 мм, давление аргона 4 Торг, ток разряда 0.45 А. В нашем случае при давлении ртути 6 мТорг  $n_a$  находится в пределах  $3 \cdot 10^{12} \div 7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , что составляет 2 ÷ 5% от общего количества атомов ртути в разряде. При уменьшении давления паров ртути пиковая мощность излучения линии 254 нм в импульсно-периодическом разряде возрастает. И при давлении паров ртути 1.4 мТорг  $n_a$  составляет  $5 \cdot 10^{12} \div 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , т.е. 10 ÷ 50% от общего количества атомов ртути в разряде.

Таким образом, при переходе от стационарного к импульсному разряду при одинаковом давлении паров ртути нам удалось повысить в импульсе заселенность резонансного состояния атома ртути более, чем в 10 раз по сравнению со стационарным разрядом. Показано, что существуют условия протекания импульсно-периодического разряда, при которых доля заселенности состояния  $6^3P_1$  атома ртути составляет десятки процентов от общего количества атомов ртути в разряде. При этом импульсная мощность в УФ области достигает 1 kW при средней электрической мощности разряда  $30 \pm 6$  W.

## Список литературы

- [1] Миленин В.М., Тимофеев Н.А. // ЖТФ. 1978. Т. 48. В. 10. 2060–2061.
- [2] Миленин В.М., Тимофеев Н.А. // Светотехника. 1981. В. 4. С. 6–7.
- [3] Миленин В.М., Панасюк Г.Ю., Тимофеев Н.А. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. В. 4. С. 447–453.
- [4] Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263–286.
- [5] Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Кириллин А.В. // ТВТ. 1975. Т. 13. В. 1. С. 40–44.
- [6] Балабанов В.В., Василяк Л.М., Красночуб А.В. // ПТЭ. 1997. В. 3. С. 127–129.
- [7] Уваров Ф.А., Фабрикант В.А. // Опт. и спектр. 1965. Т. 28. В. 4. С. 562–570.
- [8] Егоров В.С., Толмачев В.А., Ключарев А.Н. // Справочник констант элементарных процессов с участием атомов, ионов, электронов, фотонов / Под ред. Г.А. Жиглинского СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1994. 336 с.