

04;07;12

Возбуждение ультрафиолетового излучения импульсно-периодическим разрядом в ксеноне

© Д.Л. Глебов, О.Н. Крютченко, Д.А. Морозов, М.В. Чиркин

Рязанский государственный педагогический университет им. С.А. Есенина,
390000 Рязань, Россия
e-mail: chirkin@rspu.ryazan.ru

(Поступило в Редакцию 23 марта 2005 г.)

Экспериментально исследованы оптико-электрические характеристики импульсно-периодического разряда в ксеноне в условиях, когда произведение межэлектродного расстояния на давление газа находится в диапазоне 4–20 Torr·cm. Продемонстрирована высокая эффективность преобразования вкладываемой энергии в вакуумное ультрафиолетовое излучение при поддержании разряда импульсами напряжения длительностью 0.1 μs в диапазоне частот повторения 1–10 kHz. Доказана связь полученного результата с быстрым расширением отрицательного свечения, происходящим при каждом зажигании разряда. Найдены условия, при которых разряд не сопровождается нагревом и распылением катода.

Импульсно-периодический разряд в ксеноне при давлениях 10–40 Torr как источник вакуумного ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 145–190 nm был исследован в работах [1,2]. Разряд возбуждался в двухэлектродных промежутках с расстоянием между катодом и анодом 1–5 mm. Для преобразования ультрафиолетового излучения в видимый диапазон использовался люминофор $Zn_2SiO_4:Mn$. Было показано, что световая отдача по мощности значительно возрастает при уменьшении длительности импульсов напряжения, поддерживающих разряд: при длительности меньше 0.2 μs световая отдача оказывается на один–два порядка больше по сравнению с отрицательным свечением разряда постоянного тока. Позднее было обнаружено [3], что уменьшение от 2 до 0.3 μs длительности импульсов, поддерживающих разряд в ячейках промышленной газоразрядной индикаторной панели, наполненной ксеноном, сопровождается двукратным ростом интенсивности ультрафиолетового излучения. Однако причина столь эффективного преобразования вкладываемой энергии в ультрафиолетовое излучение остается неизвестной.

В работе [4] при зажигании разряда в смеси Ne–Xe (10%) импульсным напряжением амплитудой 190–220 V обнаружено перемещение к катоду границы отрицательного свечения со скоростью 10^6 – $2.5 \cdot 10^6$ cm/s. Известно, что испускание ультрафиолетового излучения вызвано процессами, инициируемыми ионизацией газа пучком электронов около границы отрицательного свечения [5]. В связи с этим правомерен вопрос: может ли перемещение катодной границы свечения привести к образованию возбужденных атомов и димеров ксенона в большем объеме по сравнению со стационарным разрядом?

В настоящей работе приведены результаты экспериментов, выполненных с целью идентификации расширения отрицательного свечения как механизма эффективного преобразования вкладываемой энергии в ультрафиолетовое излучение при поддержании разряда в ксеноне периодической последовательностью коротких импульсов напряжения.

Для экспериментов использован макет, представляющий собой две идентичные стеклянные ячейки с внутренним размером $20 \times 20 \times 6$ mm, одна из которых имеет на внутренней стенке покрытие из люминофора (Eu,Ba)MgAl₁₀O₁₇. Обе ячейки содержат по два параллельных проволочных электрода из сплава никеля с железом длиной 20 mm, диаметром 0.15 mm, расположенных на расстоянии 3 mm друг от друга. Макет был размещен на откачном посту с соответствующими датчиками остаточного давления, которое превышало $2 \cdot 10^{-6}$ Torr. Давление ксенона с макете контролировалось вакуумметром ВДГ-1.

На анод макета подавались импульсы напряжения с амплитудой 200–800 V, частотой следования 1–10 kHz и длительностью 60–450 ns (по уровню 0.5). Катод был заземлен через измерительное сопротивление (50 Ω). Время нарастания переднего фронта импульса напряжения от $0.1 \cdot U_{max}$ до $0.9 \cdot U_{max}$ составляло 40 ns и не изменялось в процессе экспериментов. Импульсы напряжения и тока, протекающие через газоразрядный промежуток, контролировались двухканальным широкополосным осциллографом. Импульс напряжения поступал на вход осциллографа через частотно-независимый делитель. На второй вход осциллографа подавался сигнал, пропорциональный импульсу тока разряда, из которого предварительно был исключен ток смещения через „холодный“ газоразрядный промежуток. Для этого на входы дифференциального усилителя поступали сигналы с сопротивлений в цепи катода и соединенной с анодом последовательной RC-цепочки (емкость конденсатора подобрана равной „холодной“ межэлектродной емкости).

Для регистрации излучений люминофора и разряда использован импульсный фотоэлектронный умножитель в составе системы, содержащей линзовый объектив с фокусным расстоянием 2.8 cm, формирующий увеличенное в два раза изображение разрядного промежутка, в плоскости которого размещена диафрагма регулируемой ширины. Пространственное разрешение составляет 0.1 mm. Непосредственно за диафрагмой расположен

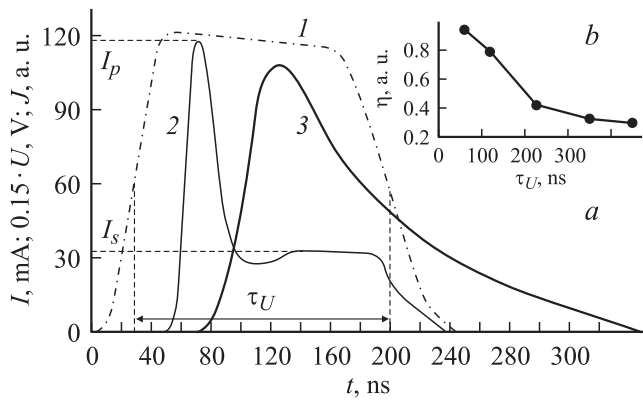


Рис. 1. Влияние продолжительности возбуждения на характеристики импульсно-периодического разряда. *a* — осциллограммы напряжения (1), тока (2), излучения люминофора (3); *b* — зависимость световой отдачи по мощности от длительности импульсов напряжения.

фотоэлектронный умножитель ФЭУ-115, инерционность которого характеризуется временем 5 ns. Вся система регистрации смонтирована на механической каретке, позволяющей с помощью микрометрического винта осуществлять ее перемещение в плоскости изображения. Импульсы оптического излучения зарегистрированы с помощью осциллографа, обладающего временным разрешением 2 ns.

На рис. 1, *a* приведены осциллограммы напряжения $U(t)$, тока $I(t)$, протекающего через ячейку, и анодного тока фотоэлектронного умножителя $J(t)$, пропорционального интенсивности излучения люминофора, полученные при давлении ксенона 15 Torr и частоте повторения импульсов 1 kHz. На переднем фронте осциллограммы тока имеется пик с амплитудой I_p , затем происходит быстрый спад тока, сменяющийся постепенным нарастанием с тенденцией к насыщению. Примерно через 120 ns ток разряда стабилизируется около установившегося значения $I_s \approx 0.3 \cdot I_p$. Амплитуда токового пика I_p , установившееся значение тока I_s и амплитуда импульса излучения люминофора практически не зависят от длительности импульсов напряжения; увеличение последней приводит лишь к более продолжительному существованию квазистационарной стадии, характеризующейся установившимся значением тока.

Количественным критерием степени эффективности преобразования в ультрафиолетовое излучение вкладываемой в разряд энергии является световая отдача по мощности η

$$\eta = \frac{\int_0^T J(t) dt}{\int_0^T U(t) I(t) dt}, \quad (1)$$

где T — период повторения импульсов.

Полученные результаты представлены на рис. 1, *b* в форме зависимости световой отдачи η от длительности

импульсов напряжения τ_U при неизменном периоде их повторения. Наибольшая эффективность достигнута при длительности импульсов напряжения менее 100 ns, что недостаточно для формирования квазистационарного разряда. В этой ситуации эффективность преобразования энергии в излучение в четыре раза больше по сравнению со случаем $\tau_U > 300$ ns, когда аномальный тлеющий разряд находится в основном в квазистационарной стадии. Таким образом, источники ультрафиолетового излучения в ксеноне с максимальной эффективностью создаются вследствие процессов, происходящих при появлении отрицательного свечения, сопровождающегося характерным пиком на осциллограмме тока.

На рис. 2 представлены осциллограммы, зарегистрированные в случае коротких импульсов напряжения ($\tau_U \approx 70$ ns) при частоте повторения 1 kHz. Кроме импульсов напряжения, тока и излучения люминофора приведены импульсы оптического излучения из прианодной и прикатодной областей, полученные с использованием

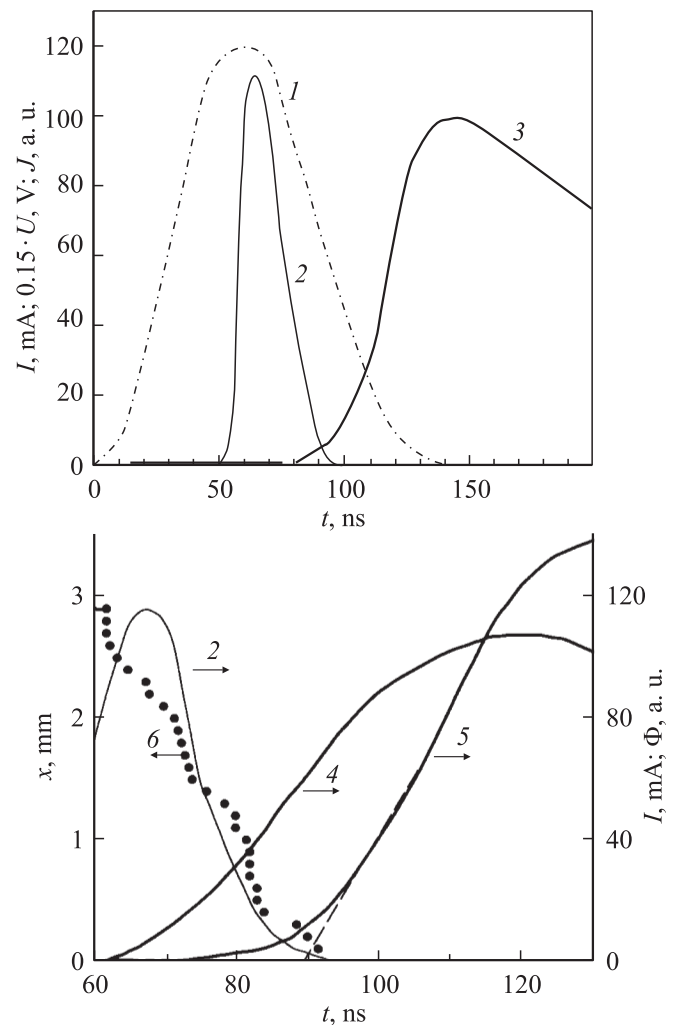


Рис. 2. Расширение отрицательного свечения при зажигании разряда: 1 — напряжение; 2 — ток; 3 — излучение люминофора; 4, 5 — оптическое излучение из прианодной и прикатодной областей; 6 — положение границы отрицательного свечения.

макета, не содержащего покрытия из люминофора. Для определения зависимости задержки появления излучения от расстояния x между центром области регистрации и катодом оптическая система перемещалась от анода к катоду с шагом 0.1 mm. Результаты регистрации положений границы свечения приведены на рис. 2 (точки). Отрицательное свечение расширяется по направлению к катоду со скоростью $\sim 10^7$ cm/s, что на два порядка превышает дрейфовую скорость ионов ксенона в условиях эксперимента. Увеличение амплитуды импульсов напряжения и уменьшение давления ксенона сопровождаются экспоненциальным ростом скорости перемещения границы свечения.

Сопоставление скорости перемещения границы свечения с амплитудой пика на осциллограмме тока I_p , а также соответствие во времени токового пика и процесса расширения свечения позволяют интерпретировать ток, протекающий в прикатодной области на стадии появления свечения, как ток смещения, вызванный сжатием области между катодом и отрицательным свечением. Если период повторения импульсов оказывается меньше $50 \mu\text{s}$, осциллограмма тока искажается: на переднем фронте появляется „ступенька“, высота которой растет при дальнейшем уменьшении периода, а задержка между началом импульса напряжения и появлением тока сокращается до полного исчезновения. Пик тока на переднем фронте осциллограммы, характерный для режима расширения отрицательного свечения, при частоте повторения импульсов, превышающей 25 kHz, отсутствует. Исследование пространственного распределения оптического излучения разряда показало, что при малых периодах повторения импульсов ($T < 40 \mu\text{s}$) описанное выше расширение отрицательного свечения не реализуется. Вместе с этим значительно уменьшается амплитуда импульса излучения люминофора: при частоте повторения 100 kHz она оказывается в 5 раз меньше, чем при частоте 10 kHz. Аналогичные результаты получены при увеличении давления ксенона до 70 Torr.

Высокую эффективность преобразования в ультрафиолетовое излучение вкладываемой энергии в режиме расширения отрицательного свечения подтверждает следующий эксперимент. В ячейке зажигался сначала импульсно-периодический разряд с частотой повторения импульсов 10 kHz, а затем разряд постоянного тока. Условия поддержания обоих разрядов выбраны таким образом, чтобы средний световой поток, испускаемый люминофором, в обоих случаях оказался одинаков. Для сравнения эффективности использованы средняя мощность, вкладываемая в импульсно-периодический разряд

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t)dt, \quad (2)$$

и мощность P_{DC} , вкладываемая в разряд постоянного тока. Сопоставление приведенных в таблице результатов показывает, что эффективность возбуждения ультрафиолетового излучения при переходе к импульсно-периодическому разряду увеличивается на два порядка.

Давление ксенона, Torr	Импульсно-периодический разряд, $\tau_U=100$ ns			Разряд постоянного тока		
	I_p , mA	U_{\max} , V	$\langle P \rangle$, mW	I_{DC} , mA	U_{DC} , V	P_{DC} , W
15	34	675	4	5.45	235	1.28
30	54	675	6	5.7	219	1.25

Таким образом, поддержание в ксеноне импульсно-периодического разряда в условиях, когда каждое зажигание сопровождается перемещением границы отрицательного свечения к катоду со скоростью порядка 10^7 cm/s, приводит к более эффективному возбуждению ультрафиолетового излучения по сравнению с квазистационарным разрядом. В случае реализации данного механизма длительность импульсов напряжения целесообразно ограничить моментом времени, когда свечение приблизится к границе катода (100 ns для выполненных экспериментов). При таком режиме разряд не сопровождается разогревом и интенсивным распылением катода. Полученный результат открывает возможность создания эффективного газоразрядного источника вакуумного ультрафиолетового излучения без использования катодов с защитным покрытием, например из ртути.

Список литературы

- [1] Mikoshiba S., Schinada S., Shirai S. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. N 10. P. 3720–3726.
- [2] Okamoto Y., Fukushima M. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. Vol. 26. N 7. P. 1100–1103.
- [3] Чижиков А.Е. // Изв. РАН. Сер. Физ. 1998. Т. 62. № 10. С. 2034–2038.
- [4] Ganter R., Callegari Th., Ouyang J. et al. // Proc. 15th Intern. Symposium on Plasma Chemistry. Orlean, 2001. Vol. 2. P. 1335–1340.
- [5] Герасимов Г.Н., Крылов Б.Е., Логинов А.В. и др. // УФН. 1992. Т. 162. № 5. С. 123–159.