

04;07;12

## Характеристики излучения импульсного разряда в ксеноне

© Д.В. Рыбка,<sup>1</sup> Е.Х. Бакшт,<sup>1</sup> М.И. Ломаев,<sup>1</sup> В.Ф. Тарасенко,<sup>1</sup> М. Кришнан,<sup>2</sup> Дж. Томпсон<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия<sup>2</sup> Alameda Applied Sciences Corporation,  
CA 94577 San Leandro, USA  
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 25 мая 2004 г.)

Приводятся результаты экспериментального исследования характеристик излучения сильноточного импульсного разряда в ксеноне. Конечной целью исследований является создание источника спонтанного излучения в УФ области спектра ( $\lambda \leq 250$  nm), служащего для управления высоковольтным коммутатором на основе кристалла алмаза.

### Введение

Источники спонтанного излучения на основе импульсного или непрерывного разряда в газах или парогазовых смесях в настоящее время широко распространены и имеют большое практическое значение [1–4]. Перспективными источниками излучения в УФ области спектра являются импульсные лампы со свободным расширением разряда в плотных газах — шаровые импульсные лампы [4]. Отличительные особенности таких ламп — короткая длительность и высокая мощность излучения, высокая (десятки тысяч градусов) температура плазмы разряда, широкий спектр излучения, содержащий непрерывную составляющую, а также малый размер газоразрядного объема, позволяющий эффективно концентрировать излучение на облучаемом объекте с помощью оптических элементов. Разряд в ксеноне по сравнению с другими инертными газами имеет наибольший градиент потенциала и наименьшее падение напряжения в приэлектродных областях, поэтому он наиболее выгоден с точки зрения эффективности работы лампы [1]. Указанные особенности ксеноновых шаровых ламп целесообразно использовать при разработке эффективного недорогого источника излучения для управления высоковольтным коммутатором на основе кристалла алмаза [5–7]. К настоящему времени показана возможность управления таким коммутатором с помощью электронного пучка [8] и лазера УФ диапазона [9]. Однако при промышленном выпуске коммутатора использование лазеров или ускорителей нецелесообразно по причине их высокой стоимости. В связи с этим возникла необходимость разработки недорогого импульсного источника УФ излучения, предназначенного для управления коммутатором на основе алмаза. При этом необходимо, чтобы большая часть излучения приходилась на диапазон длин волн  $\lambda \leq 250$  nm, что соответствует полосе фундаментального поглощения кристалла алмаза ( $\lambda \leq 225$  nm) и поглощению на примесях [10,11]. Желательно также, чтобы длительность импульса излучения такого источника не превышала нескольких микросекунд.

Настоящая работа посвящена исследованию характеристик излучения плазмы свободно расширяющегося разряда в ксеноне и является продолжением исследований, начатых в [12].

### Экспериментальная установка и методика эксперимента

Экспериментальная установка состояла из генератора с емкостным накопителем энергии, нагруженного на импульсную газоразрядную лампу. Использовалась импульсная лампа с межэлектродным расстоянием 5 mm, запоненная ксеноном. Цилиндрическая колба с внутренним диаметром 20 mm была выполнена из кварца с пропусканием излучения в области спектра 200–250 nm не менее 85%. При срабатывании лампы регистрировались электрические и оптические характеристики разряда.

Электрическая схема установки (рис. 1) состояла из включенных последовательно импульсной лампы ( $F$ ), накопительного конденсатора  $C_0$  и коммутатора тригatronного типа ( $S$ ). Зарядка конденсатора  $C_0$  осуществлялась через сопротивление  $R$ . Зарядное напряжение  $U_0$  составляло 12 kV, величина накопительной емкости  $C_0$  — 3.3 или 233 nF. Период собственных колебаний контура  $\tau$  составлял соответственно 0.08 или 0.85  $\mu$ s.

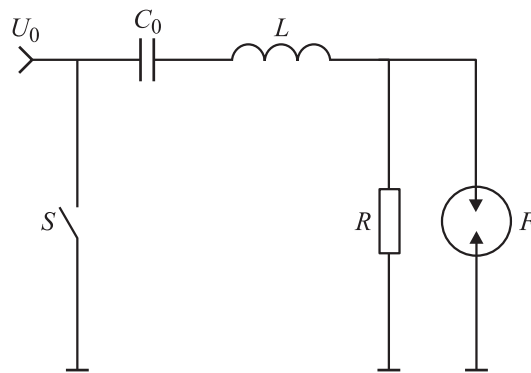


Рис. 1. Электрическая схема установки.

Система регистрации характеристик излучения разряда включала в себя спектрометр EPP2000C-25 (производство компании StellarNet Ink, США) с фотоприемником на основе CCD-линейки и фотоземлет коаксиальный ФЭК-22СПУ. Спектрометр предназначался для регистрации спектрального распределения энергии излучения в диапазоне от 200 до 850 nm в относительных единицах. ФЭК-22СПУ использовался для регистрации временного хода мощности излучения разряда. Для данного прибора известна кривая спектральной чувствительности от 200 до 650 nm в абсолютных единицах. Совокупность данных, получаемых с ФЭК-22СПУ и спектрометра, обеспечивает возможность определения спектрального распределения энергии излучения в абсолютных единицах в диапазоне спектральной чувствительности ФЭК-22СПУ.

Свечение разряда фотографировалось с помощью CCD-камеры „SensiCam“. Для синхронизации момента зажигания разряда с работой CCD-камеры разрядный промежуток лампы подсвечивался излучением слабого искрового разряда в воздухе. Система регистрации импульсов тока разряда и напряжения на электродах лампы включала соответственно токовый шунт и резистивный делитель напряжения.

В качестве модели алмазного коммутатора использовался фотодетектор на основе природного кристалла алмаза Па типа компании Alameda Applied Science Corporation (США). Электрическая схема фотодетектора была аналогична использовавшейся в работе [9] и представляла собой последовательно соединенные детектор, накопительный конденсатор и сопротивление нагрузки. Зарядное напряжение на конденсаторе составляло 250 V.

## Экспериментальные результаты и обсуждение

В ходе экспериментов регистрировались импульсы тока разряда, напряжения на электродах, мощности излучения, спектр излучения разряда и динамика свечения разряда в видимой области спектра.

На рис. 2 представлены осциллограммы тока, напряжения и мощности излучения разряда в ксеноне ( $C_0 = 233$  nF,  $U_0 = 12$  kV) при давлении 550 Torr, а также временная зависимость подводимой к разряду мощности. Видно, что более 70% всей вложенной в разряд энергии вкладывается в течение первого полупериода колебаний. В разряд вкладывалось 36% запасенной в конденсаторе  $C_0$  энергии, остальная энергия рассеивалась в коммутаторе. Энергия излучения в диапазоне длин волн 200–250 nm составила 4.2% от энергии, вложенной в разряд. Полная энергия излучения в области 200–850 nm составила  $\sim 1$  J, пиковая мощность излучения  $\sim 500$  kW. Длительность свечения разряда на полувысоте составила 1.6  $\mu$ s, излучаемая мощность достигала максимального значения через  $\sim 700$  ns после зажигания разряда.

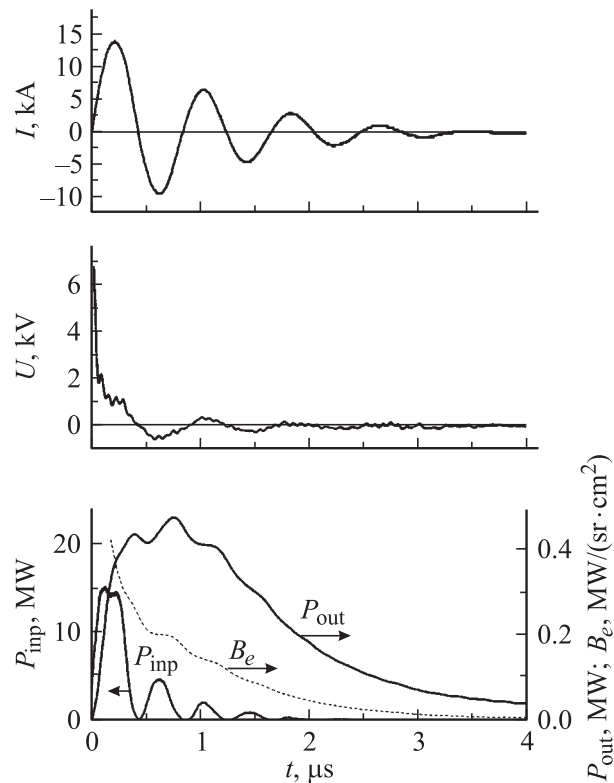


Рис. 2. Осциллограммы тока разряда  $I$ , напряжения на разрядном промежутке  $U$ , излучаемой мощности  $P_{out}$ , временная зависимость энергетической яркости разряда  $B_e$  и подводимой к разряду мощности  $P_{inp}$ .

После окончания ввода энергии в разряд плазма продолжала светить еще в течение нескольких микросекунд.

Спектральная плотность энергии излучения разряда приведена на рис. 3. Видно, что большая часть энергии излучения лежит в УФ области спектра.

Снятые с помощью CCD-камеры фотографии разряда в ксеноне (для контура с  $\tau \sim 0.85$  и  $0.08$   $\mu$ s) показали,

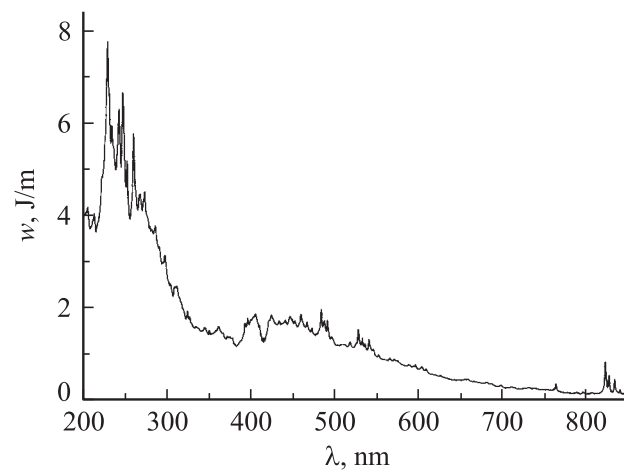


Рис. 3. Спектральная плотность энергии излучения разряда.

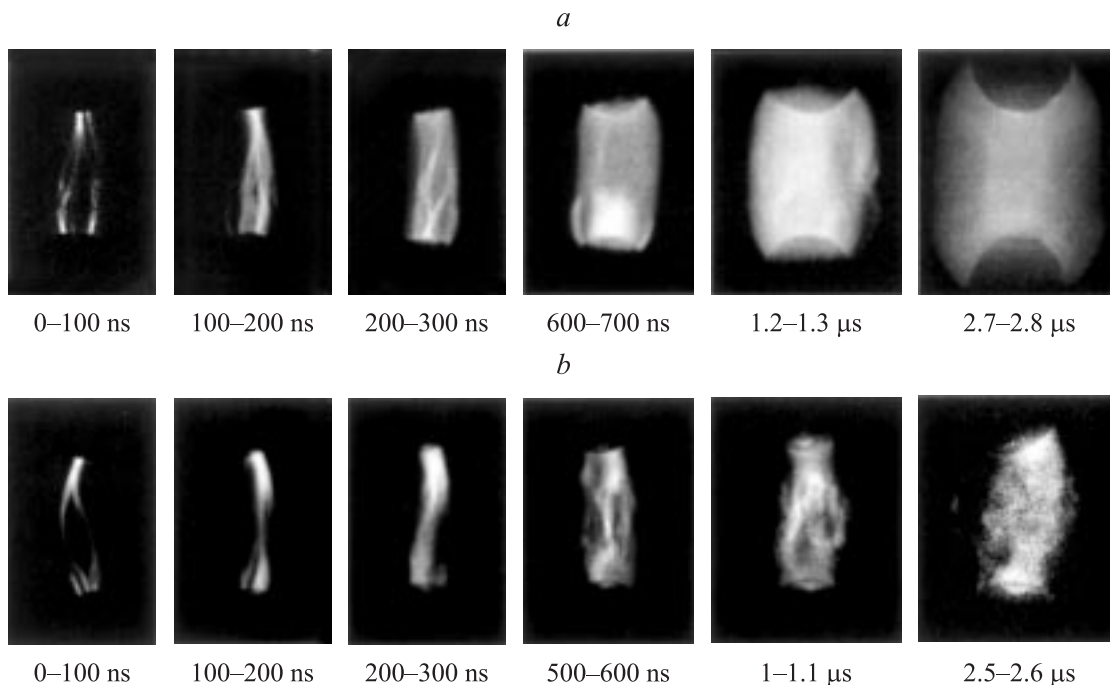


Рис. 4. Разряд в различные моменты времени.  $C_0 = 233$  (а),  $3.3$  нФ (б).

что практически всегда происходил многоканальный пробой разрядного промежутка (рис. 4). В дальнейшем отдельные каналы расширялись и сливались в один, часто уже через  $\sim 200$  ns.

Как известно [3], пространственное распределение излучения импульсных ламп в основном определяется формой и распределением яркости светящегося объема плазмы. Поэтому регистрация изменения пространственного распределения свечения плазмы с течением времени представляет определенный интерес и с этой точки зрения.

На рис. 4, а приведено свечение разряда ( $C_0 = 233$  нФ,  $p = 550$  Torr) в различные моменты времени. Видно, что с течением времени по мере расширения светящейся области увеличивается и однородность свечения плазмы разряда.

При значительном уменьшении накопительной емкости неоднородность плазмы сохранялась практически до полного окончания ее свечения. Это видно на рис. 4, б, где  $C_0 = 3.3$  нФ,  $U_0 = 12$  кВ,  $p = 550$  Torr. Длительность свечения на полувысоте составила 220 ns. Максимум излучаемой мощности приходится на первые 150 ns, когда в разрядном промежутке присутствует несколько каналов.

Фотографии свечения дали возможность оценить радиус и скорость расширения токового канала, среднюю по сечению плотность тока разряда, а также энергетическую яркость разряда в различные моменты времени. Результаты этих оценок для  $C_0 = 233$  нФ приведены на рис. 5 и 2 соответственно. Оценка перечисленных величин справедлива, начиная с момента времени  $t \sim 200$  ns,

когда в разряде присутствует один токовый канал (значения энергетической яркости разряда и плотности тока вычислены с использованием аппроксимации зависимости радиуса канала от времени).

При воздействии излучения разряда ( $C_0 = 233$  нФ,  $\tau = 1.1$  μs,  $p = 550$  Torr) на алмазный детектор наблюдалось отличие формы импульса тока в цепи детектора от формы импульса мощности излучения (рис. 6). Это связано, с отличием временного хода излучаемой мощности в диапазоне длин волн  $\lambda \leq 300$  nm, регистрируемой детектором, от временного хода излучаемой мощности в диапазоне 200–650 nm, соответствующем области чувствительности ФЭК-22СПУ. Укорочение им-

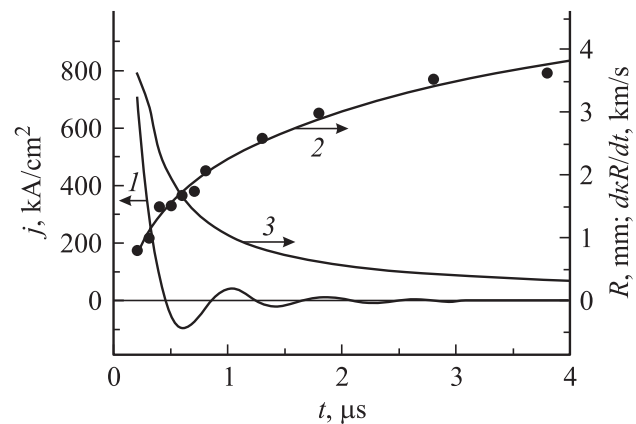
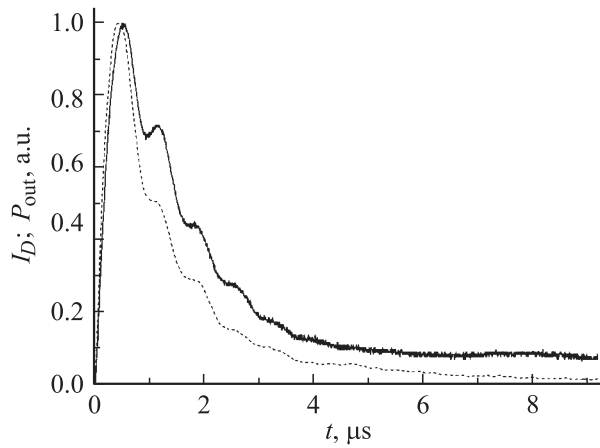


Рис. 5. Плотность тока разряда (1), радиус разрядного канала (2) и скорость расширения разрядного канала (3). Значки — экспериментальные значения радиуса разрядного канала.



**Рис. 6.** Осциллограммы импульсов тока в цепи детектора  $I_D$  (пунктир) и излучения разряда  $P_{out}$  (сплошная кривая).

пульса излучения в диапазоне 200–300 nm по сравнению с импульсом излучения в диапазоне 200–650 nm наблюдалось в аналогичных условиях в [13].

## Заключение

В данной работе проведены исследования спектральных, энергетических и временных характеристик импульсного разряда в ксеноне, а также исследование динамики свечения разряда с помощью CCD-камеры. При давлении 550 Torr энергия излучения в диапазоне длин волн 200–850 nm составила  $\sim 1$  J, в диапазоне длин волн 200–250 nm энергия излучения составила  $\sim 0.3$  J с эффективностью преобразования введенной в разряд энергии в излучение 4.2%. Максимальная энергетическая яркость разряда  $> 400$  kW/(sr · cm<sup>2</sup>), пиковая мощность излучения  $\sim 500$  kW. Полученные результаты позволяют рассматривать перспективу использования импульсной ксеноновой лампы для управления высоковольтным коммутатором на основе кристаллов алмаза.

Настоящая работа проведена при финансовой поддержке фонда CRDF (проект RP2-538-TO-02) и NATO (проект EST.CLG.9495401).

## Список литературы

- [1] Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991. 720 с.
- [2] Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.
- [3] Импульсные источники света / Под ред. И.С. Маршака. М.: Энергия, 1978. 472 с.
- [4] Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том IV / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. 233 с.
- [5] Bharadwaj P.K., Code R.F., van Driel H.M., Walentynowicz E. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 43. N 2. P. 207.
- [6] Ho P. T., Lee C.H., Stephenson J.C., Cavanagh R.R. // Optics Commun. 1983. Vol. 46. N 3,4. P. 202.

- [7] Glinski J., Gu X.-J., Code R.F., van Driel H.M. // Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 45. N 3. P. 260.
- [8] Prasad R.R., Gensler S.W., Qi N., Krishnan M., Loubriel G. // Proc. SAE Aerospace Power Systems Conf. Mesa, 1999. P. 193.
- [9] Липатов Е.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Шейн Дж., Кришнан М. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 12. С. 1115.
- [10] Field J.E. The Properties of Diamond. London: Academ. Press, 1979.
- [11] Бокый Г.Б., Безруков Г.Н., Клоев Ю.А., Налетов А.М., Непша В.И. Природные и синтетические алмазы. М.: Наука, 1986.
- [12] Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Липатов Е.И., Кришнан М., Томпсон Дж., Паркс Д. // Изв. вузов. Физика. 2004. Вып. 1. С. 81–84.
- [13] Lisenko A.A., Lomaev M.I., Rybka D.V., Tarasenko V.F. // Proc. SPIE. Vol. 4977. P. 434–437.