

03;04;06;07;10

## О формировании рентгеновского излучения с высокой частотой следования импульсов при объемном наносекундном разряде в открытом газовом диоде

© В.Ф. Тарасенко,<sup>1</sup> С.К. Любутин,<sup>2</sup> С.Н. Рукин,<sup>2</sup> Б.Г. Словицкий,<sup>2</sup> И.Д. Костыря,<sup>1</sup> В.М. Орловский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

<sup>2</sup> Институт электрофизики УрО РАН,  
620016 Екатеринбург, Россия  
e-mail: rugin@ier.uran.ru

(Поступило в Редакцию 11 марта 2005 г.)

Проведены исследования сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) в воздухе атмосферного давления. За AlBe фольгой толщиной  $45\ \mu\text{m}$  получена амплитуда тока пучка  $> 100\ \text{A}$  при длительности импульса на полувысоте  $\sim 0.2\ \text{ps}$ . Показано, что при высоких частотах следования импульсов (вплоть до  $1.5\ \text{kHz}$ ) условия формирования СЛЭП сохраняются. При формировании объемного разряда в открытом газовом диоде с коаксиальными электродами за счет наносекундных импульсов высокого напряжения получено жесткое рентгеновское излучение ( $> 60\ \text{keV}$ ).

### Введение

В настоящее время импульсные и непрерывные источники рентгеновского излучения находят широкое применение в различных областях науки и техники. Обычно для получения рентгеновского излучения используют торможение электронного пучка на мишени из тяжелого металла, а для получения электронных пучков применяют вакуумные диоды, к которым прикладывается высокое напряжение с амплитудой в десятки сотни киловольт [1]. В работах [2–7] сообщалось о получении сверхкоротких лавинных электронных пучков (СЛЭП [3]) в газовых диодах при давлении  $1\ \text{atm}$  и выше, а в [8,9] — о применении субнаносекундных электронных пучков.

СЛЭП обладает уникальными свойствами. При заполнении газового диода воздухом атмосферного давления амплитуда импульса тока пучка на установках с оптимальной конструкцией газового диода (малые размеры и малая индуктивность [6,7]) составляет сотни ампер, а длительность импульса на полувысоте не превышает нескольких сот пикосекунд [3–7]. После оптимизации СЛЭП был использован для формирования объемного разряда в  $\text{CO}_2$  лазере атмосферного давления [8] и возбуждения катодолюминесценции в кристаллах [9]. Однако все предыдущие эксперименты по формированию СЛЭП проводились в режиме однократных импульсов или при малых частотах повторения (не более  $5\ \text{Hz}$ ). Тогда как в настоящее время разработаны генераторы наносекундных высоковольтных импульсов напряжения, работающие в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов  $1\ \text{kHz}$  и выше [10,11]. Так, в [11] экспериментально был реализован сверхбыстрый механизм коммутации тока в полупроводниках на основе туннельно-ударного ионизационного фронта. В резуль-

тате создан генератор с высокой частотой следования, на котором были получены в передающей  $50\ \Omega$  линии импульсы амплитуды  $150\text{--}160\ \text{kV}$ , длительностью  $1.4\ \text{ns}$  и временем нарастания  $200\text{--}250\ \text{ps}$ . Частота следования импульсов достигала  $3\ \text{kHz}$ .

Цель данной работы изучить характеристики СЛЭП в газовых диодах различной конструкции, а также исследовать возможность получения СЛЭП при высоких частотах следования импульсов. Для реализации второй цели использовался открытый газовой диод и регистрировалось рентгеновское излучение.

### Экспериментальная аппаратура и методики

При проведении работы применялась установка, подробно описанная в [11,12]. Для создания перенапряжения на туннельно-ударном обострителе использовался генератор коротких импульсов на основе *SOS*-диодов и промежуточного обострителя [12], работающего в режиме обычной ударно-ионизационной волны. Генератор обеспечивал амплитуду выходного напряжения  $220\ \text{eV}$  со временем нарастания около  $1\ \text{ns}$ . Оконечный туннельно-ударный обостритель располагался в начале передающей линии. После его срабатывания в линии формировался импульс со временем нарастания около  $250\ \text{ps}$ . Все линии генератора были заполнены трансформаторным маслом. Исследуемый газовый диод (рис. 1) был подобен диоду, описанному в работе [5], но имел две модификации. В первой газовый диод состоял из катода, расположенного на центральном электроде, и анода из фольги. Во второй был впервые применен открытый газовый диод без фольги, который использовался для получения рентгеновского излучения.

В проведенных экспериментах были исследованы параметры электронного пучка или(и) рентгеновского излучения с тремя катодами и двумя анодами различной конструкции. Катод № 1 (5) состоял из трубки диаметром 6 мм, изготовленной из стальной фольги толщиной 100 мкм. Катодом № 2 служил стальной шарик диаметром 17.4 мм. Катод № 3 был изготовлен из шарика диаметром 7 мм, который закреплялся на торце стальной трубки диаметром 6 мм. Анод № 1 (4) был плоским и изготовлялся из AlBe фольги толщиной 45 мкм. В качестве второго анода использовалась внутренняя металлическая поверхность корпуса газового диода (3), что обеспечивало более эффективное по сравнению с фольгой охлаждение анода при высоких частотах следования импульсов. В данном случае фольга убиралась и газовый диод был открытым.

В режиме 1 газовый диод исследовался с плоским анодом и катодами № 1 и 3, в этом случае пробой осуществлялся между торцом катодов и центральной частью плоского анода из фольги. Межэлектродный зазор при этом мог изменяться от 5 до 16 мм. Как мы уже отмечали, в режиме с открытым газовым диодом (режим 2) AlBe фольга убиралась, а пробой воздуха осуществлялся при малых частотах между торцом трубки (катод № 1) или боковой поверхностью шариков (катоды № 2 и 3) и кромкой цилиндрического корпуса газового диода. Электроды были расположены коаксиально, а межэлектродный зазор от катода № 1 до цилиндрической поверхности анода равнялся 21 мм, от катода № 2 — 15.3 мм и от катода № 3 — 20.5 мм. Так как во втором режиме фольга отсутствовала, то мы могли наблюдать и фотографировать интегральное свечение разряда. Применение режима 1 позволяло измерять параметры электронного пучка за фольгой. В режиме 2 наличие электронного пучка и его относительная интенсивность определялась с помощью дозиметра VICTOREEN 541R, который устанавливался на расстоянии 5 см от плоскости фольги перпендикулярно оси передающей линии генератора (рис. 1 (I)). В режиме пачек импульсов дозиметр и открытый диод позволяли проводить измерения при частоте следования импульсов в пачке до 1.5 кГц. Число импульсов в одной пачке варьировалось от 150 до 3 тысяч. Энергия электронов и квантов рентгеновского излучения для регистрации данным дозиметром должна была превышать 60 keV.

Для регистрации импульсов напряжения использовались емкостные делители напряжения, которые устанавливались в передающей линии генератора. Регистрация импульсов тока пучка осуществлялась с помощью малоиндуктивного коллектора диаметром 2 см, нагруженного на коаксиальный кабель. Импульсы с делителей и коллектора выводились на цифровой осциллограф TDS6604 с полосой пропускания 6 GHz, количество точек на 1 ns равнялось 20 (20 GS/s). Собственное время нарастания сигнала в измерительной системе не превышало 100 ns. Измерения проводились в режиме однократных импульсов и при частоте следования импульсов от 1.5

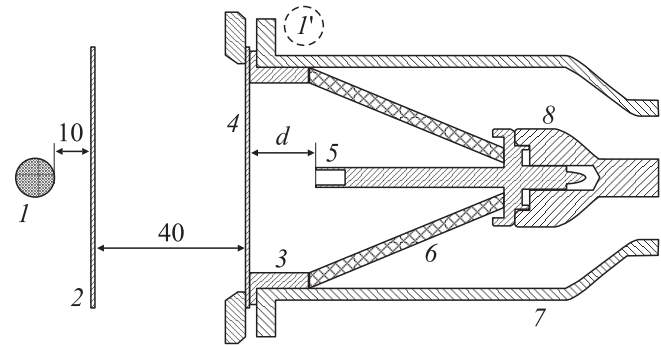
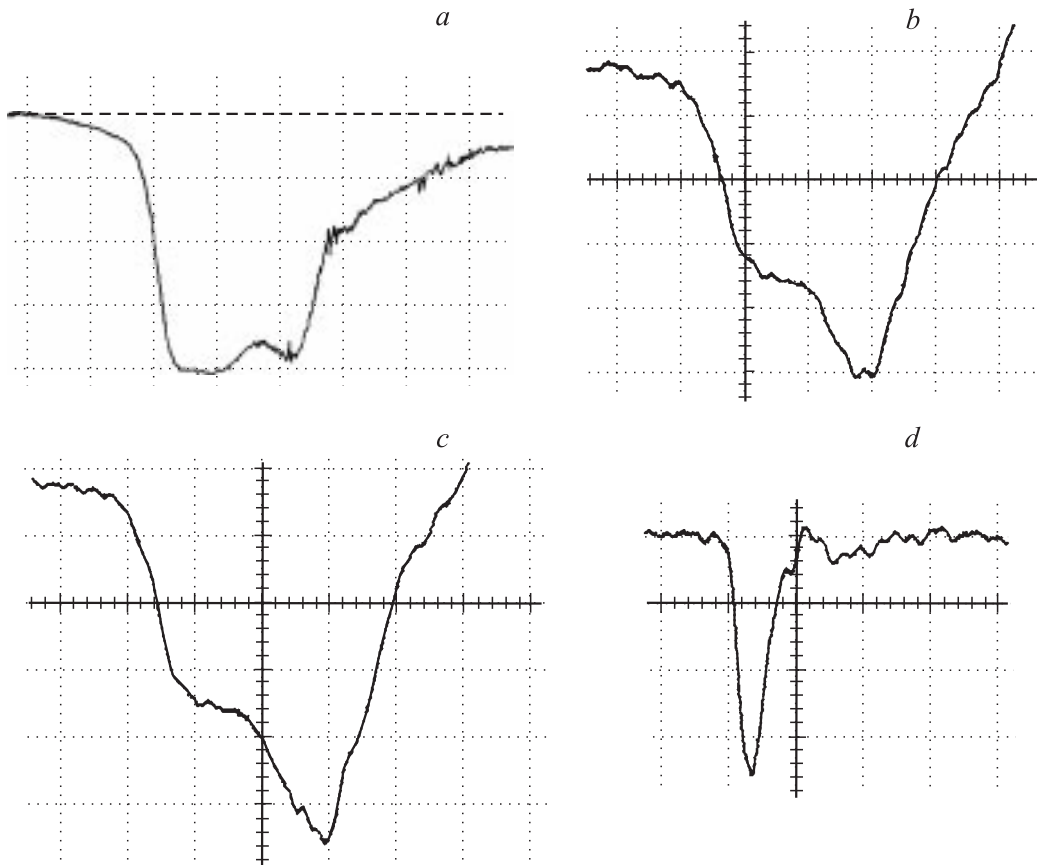


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 и I' — дозиметр, 2 — дополнительный экран, 3 — корпус газового диода (анод в режиме 2), 4 — фольга, 5 — катод, 6 — изолятор газового диода, 7 — корпус передающей линии, 8 — центральный проводник.

до 1500 Hz. При частоте 100 Hz, и более импульсы напряжения подавались на газовый диод отдельными пачками.

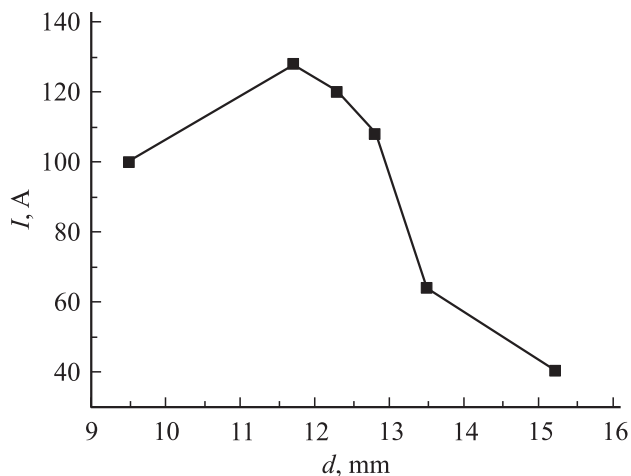
## Экспериментальные результаты и их обсуждение

В данной работе регистрировались падающая и отраженная волны импульса напряжения в передающей линии, осциллограммы тока пучка за фольгой, экспозиционная доза рентгеновского излучения, автограф электронного пучка и рассчитывалось распределение электронов по энергиям. На рис. 2, а показана форма импульса с емкостного делителя, установленного в передающей линии генератора. Импульс получен без влияния отражения от газового диода за счет удлинения передающей линии. Амплитуда импульса напряжения составила 156 kV, тока — 3.2 kA и длительность импульса на полувысоте — 1.4 ns. Импульс напряжения при срабатывании газового диода в первом режиме с катодом № 1 показан на рис. 2, b, а импульс тока пучка за фольгой на рис. 2, d. Амплитуда импульса падающей волны напряжения составила 134 kV, а отраженного импульса — 55 kV, что соответствует максимальному напряжению на промежутке ~ 190 kV и сопротивлению газового диода при этом напряжении ~ 120 Ω. Амплитуда СЛЭП (рис. 2, d) за фольгой в оптимальных режимах превышала 100 A, а его длительность на полувысоте составляла ~ 0.2 ns. Импульс напряжения для открытого газового диода с катодом № 1 показан на рис. 2, c. Возрастание амплитуды отраженного импульса обусловлено увеличением межэлектродного зазора в газовом диоде и сопротивления диода до ~ 170 Ω. Отметим, что после максимума на осциллограммах импульсов напряжения b и c наблюдается спад напряжения, что связано с уменьшением сопротивления разрядной плазмы в течение импульса. Зависимость амплитуды тока пучка за фольгой с катодом № 1 от величины межэлектродного зазора



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов напряжения (*a-c*) и тока пучка электронов (*d*), полученные при малой частоте следования импульсов. Масштаб по горизонтали для всех осциллограмм 0.5 ns/div, масштаб по вертикали 36 kV/div (*a-c*) и 30 A/div (*d*).

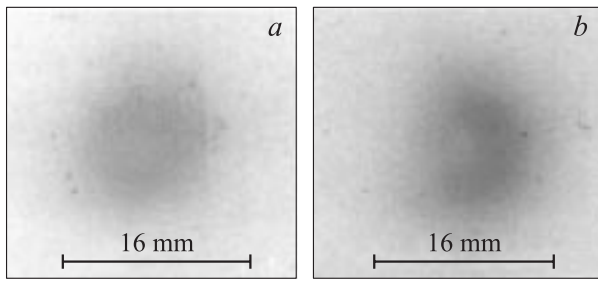
представлена на рис. 3. Максимальные токи пучка регистрировались при зазоре 11.7 mm. Замена катода № 1 на катод № 2 при работе в режиме однократных импульсов привела к уменьшению оптимального межэлектродного промежутка (до 7.5 mm). Ток пучка электронов при этом тоже уменьшился на  $\sim 30\%$ .



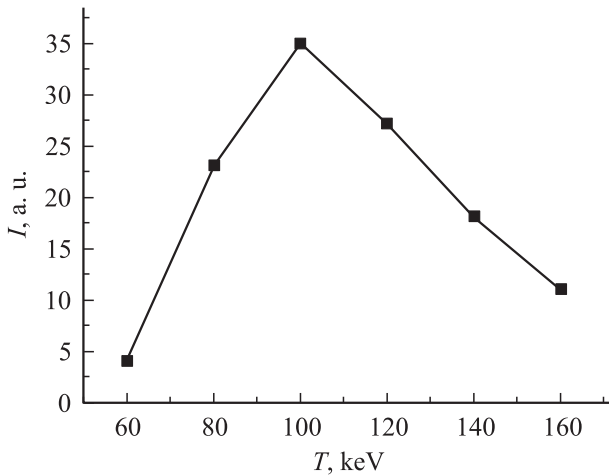
**Рис. 3.** Зависимость амплитуды СЛЭП от межэлектродного зазора в режиме 1 при однократных импульсах. Катод № 1.

Отметим, что при проведении измерений регистрировался значительный разброс в амплитуде тока пучка электронов, особенно в неоптимальных режимах. Однако максимальные амплитуды при проведении нескольких серий стабильно воспроизводились, а стабильность работы газового диода повышалась после предварительной тренировки в импульсно-периодическом режиме. В данной работе мы приводим максимальные амплитуды тока пучка. На рис. 4 показаны автографы электронного пучка, полученные за Al фольгой толщиной 10 и 70  $\mu\text{m}$ . Во втором случае число импульсов для получения автографа было увеличено с 450 до 1350. Диаметр автографа электронного пучка, полученного в плоскости фольги, составил  $\sim 16$  mm. На рис. 5 приведено распределение электронов по энергиям, полученное методом фольг. Максимум в распределении наблюдается при энергиях электронов  $\sim 100$  keV. Достаточно большая часть электронов имела энергию более 140 keV. Сокращение длительности фронта импульса напряжения по сравнению с длительностью фронта импульса напряжения ускорителя РАДАН-303 [5,6] привело к увеличению энергии электронов СЛЭП.

Наиболее важный результат был получен при исследовании открытого диода и работе в импульсно-периодическом режиме (рис. 6). При использовании



**Рис. 4.** Автографы СЛЭП после алюминиевой фольги толщиной 10 (а) и 70 м (b). Межэлектродный зазор 11.7 мм, катод № 1.

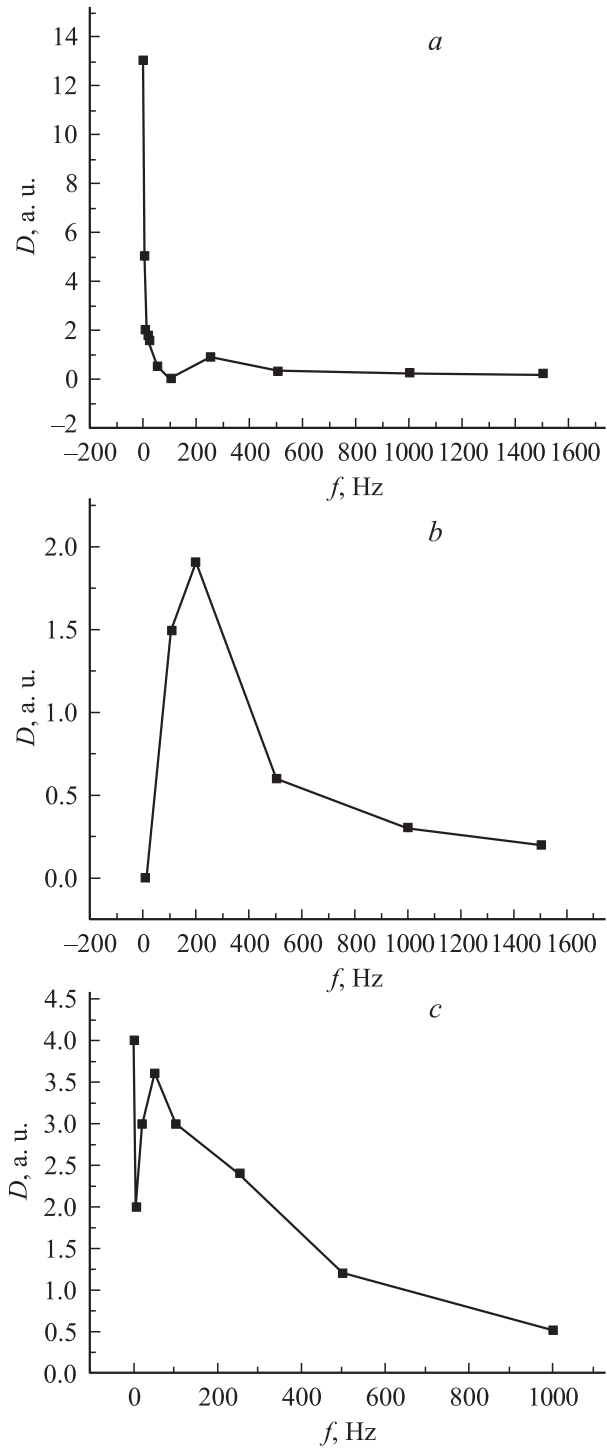


**Рис. 5.** Распределение электронов в СЛЭП по энергиям. Межэлектродный зазор 11.7 мм, катод № 1.

катода № 1 (рис. 6, а) максимальная экспозиционная доза рентгеновского излучения за первые 150 импульсов регистрировалась при частоте следования импульсов 1.5 Hz и менее. При увеличении частоты импульсов до 100 Hz экспозиционная доза уменьшалась, и при 100 Hz используемый дозиметр за 450 импульсов не регистрировал рентгеновского излучения. Однако при дальнейшем увеличении частоты следования импульсов рентгеновское излучение снова начинало регистрироваться. Второй максимум был получен при частоте ~ 200 Hz, а при изменении частоты импульсов от 0.5 до 1.5 kHz экспозиционная доза рентгеновского излучения за 150 импульсов уменьшилась лишь в два раза.

При использовании катода № 2 (рис. 6, б) минимальная доза регистрировалась при частоте следования импульсов 1.5 Hz, а максимум наблюдался также при частоте ~ 200 Hz. Изменение частоты импульсов от 0.5 до 1.5 kHz экспозиционная доза рентгеновского излучения за 150 импульсов уменьшилась не более чем в три раза. При этом экспозиционная доза с катодом № 2 была в 1.5 раз больше, чем с катодом № 1. При использовании катода № 3 (рис. 6, в) максимальная доза, так же как и с катодом № 1, регистрировалась при частоте следования

импульсов 1.5 Hz, однако второй максимум наблюдался при более низкой частоте следования импульсов — ~ 50 Hz. Таким образом, во всех трех случаях рентгеновское излучение было получено при высоких частотах следования импульсов, а изменение частоты импульсов и



**Рис. 6.** Зависимости экспозиционной дозы рентгеновского излучения за 150 импульсов от частоты следования импульсов при использовании открытого газового диода с катодом № 1 (а), 2 (б) и 3 (с).

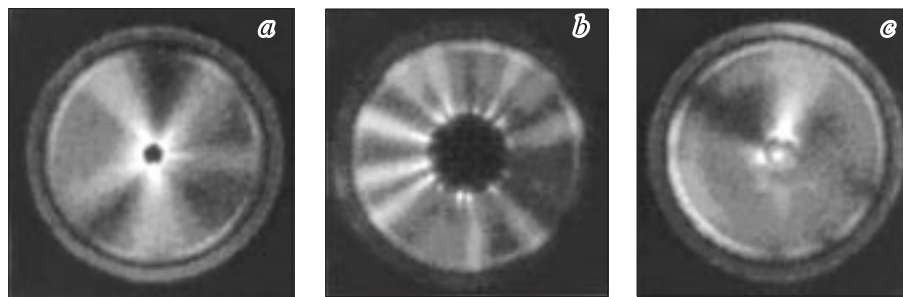


Рис. 7. Излучение объемного разряда в открытом диоде за один импульс с катодом № 1 (а), 2 (b) и 3 (с).

конструкции катода влияло на величину экспозиционной дозы рентгеновского излучения.

При установке перед дозиметром в плоскости (2) на рис. 1 свинцового экрана толщиной 5 mm рентгеновское излучение во всех режимах не регистрировалось, а при установке в том же месте экрана из алюминия толщиной 170  $\mu\text{m}$  показания дозиметра существенно не изменялись. В позиции дозиметра (1') на рис. 1 за боковой стенкой газового диода и корпусом передающей линии рентгеновское излучение за 450 импульсов также не регистрировалось.

Визуальные наблюдения и фотографии интегрального свечения в газовом диоде показали, что разряд в газовом диоде при однократных импульсах является объемным и сконцентрирован в местах с наибольшим усилением электрического поля (рис. 7). При использовании катода № 3 разряд был наиболее однородным (рис. 7, с) и часть тока замыкалась на центральную часть шарика. При малой частоте импульсов и малом количестве импульсов в пачке также наблюдается объемный разряд в виде перекрывающихся струй с яркими точками на конце трубки (катод № 1) [6] или на поверхности шара (катод № 2), находящейся на минимальном расстоянии от анода.

При больших частотах и значительном числе импульсов в одной пачке (более 50 импульсов) характер разряда в межэлектродном промежутке начинает изменяться, но его объемный характер сохраняется. С увеличением частоты следования импульсов и числа импульсов в пачке область между электродами, занимаемая разрядом, начинает расширяться. Объемный разряд меньшей плотности возникал между катододержателем и внутренней металлической поверхностью цилиндрического анода. При дальнейшем увеличении частоты следования импульсов и количестве импульсов в пачке ( $\sim 1000$  и более) в промежутке появляются яркие каналы.

Отметим, что экспозиционная доза рентгеновского излучения в режимах 1 (с фольгой) и 2 (открытый газовый диод) при использовании катода № 1 отличалась всего на 20% и составила соответственно 16 и 13 миллирентген за 150 импульсов при частоте следования импульсов 1.5 Hz. Дозиметр в обоих случаях располагался на расстоянии 5 cm от плоскости фольги.

Обсудим полученные результаты. При подаче на промежуток импульса высокого напряжения с субнаносекундной длительностью переднего фронта в области у анода при приближении фронта плазмы, который движется от катода, достигается критическое поле [3] и формируется СЛЭП. Амплитуда и энергия СЛЭП зависят от многих факторов [6], в том числе и от частоты следования импульсов. Рентгеновское излучение с энергией квантов  $> 60 \text{ keV}$  в основном генерируется при торможении электронного пучка на аноде. Данные исследования впервые показали, что условия формирования СЛЭП сохраняются при высокой частоте следования импульсов, в том числе в пачке из 150 импульсов, которые следуют с частотой 1.5 kHz.

Второй максимум на зависимости экспозиционной дозы рентгеновского излучения от частоты обусловлен расширением области, занимаемой разрядом. По-видимому, при увеличении частоты следования импульсов в областях с наибольшей плотностью тока при больших частотах следования импульсов плазма не успевает рекомбинировать и условия формирования СЛЭП ухудшаются (за счет уменьшения градиента электрического поля у анода). При уменьшении плотности тока за счет расширения разрядной области в сторону передающей линии условия формирования СЛЭП реализуются уже в областях с меньшей плотностью тока, что приводит к формированию рентгеновского излучения при высоких частотах следования импульсов. И хотя величина измеренной экспозиционной дозы при высоких частотах повторения (0.5 kHz и выше) была меньше, чем при более низких частотах, однако рентгеновское излучение с энергией квантов более 60 keV стабильно регистрировалось дозиметром.

## Выводы

Таким образом, в данной работе проведены исследования сверхкороткого лавинного электронного пучка в воздухе атмосферного давления. Впервые показано, что при высоких частотах следования импульсов (вплоть до 1.5 kHz) условия формирования СЛЭП сохраняются. Рентгеновское излучение, формируемое электронами с энергией более 60 keV, регистрируется при использова-

нии наносекундных импульсов высокого напряжения и формирования объемного разряда в открытых газовых диодах, заполненных воздухом атмосферного давления. Обнаружена немонотонность экспозиционной дозы рентгеновского излучения при изменении частоты следования импульсов. По-видимому, нелинейную зависимость экспозиционной дозы рентгеновского излучения от частоты следования импульсов можно использовать для повышения стабильности срабатывания обострительных разрядников в импульсно-периодическом режиме. За AlBe фольгой толщиной 45  $\mu\text{m}$  получена амплитуда тока пучка  $> 100 \text{ A}$  при длительности импульса на полувысоте  $\sim 0.2 \text{ ns}$ .

Авторы благодарят В.Г. Шпака за поддержку данной работы и С.А. Шунайлова за помощь при проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] *Месяц Г.А.* // Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [2] *Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2003. Вып. 10. С. 29–35.
- [3] *Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А.* // Изв. вузов. Физика. 2003. № 3. С. 9–95.
- [4] *Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Орловский В.М., Ткачев А.Н., Шунайлов С.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. Вып. 11. С. 737–742.
- [5] *Тарасенко В.Ф., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И., Орловский В.М., Алексеев С.Б.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. № 21. С. 1–6.
- [6] *Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D., Alekseev S.B., Orlovskii V.M.* // Laser and Particle Beams. 2004. Vol. 22. N 1. P. 75–82.
- [7] *Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 20. С. 35–41.
- [8] *Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Квантовая электрон. 2003. Т. 31. С. 1059–1061.
- [9] *Липатов Е.И., Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Алексеев С.Б., Рыбка Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 6. С. 29–33.
- [10] *Gubanov V.P., Korovin S.D., Pegel I.V., Roitman A.M., Rostov V.V., Stepchenko A.S.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. Vol. 25. N 2. P. 258–265.
- [11] *Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Цыранов С.Н.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 5. С. 36–46.
- [12] *Аличкин Е.А., Любутин С.К., Пономарев А.В., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г.* // ПТЭ. 2002. № 4. С. 106–111.
- [13] *Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.* // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.