

03;04;06;10

Источник рентгеновского излучения из открытого газового диода при формировании сверхкороткого лавинного электронного пучка

© В.Ф. Тарасенко, С.К. Любутин, Б.Г. Словиковский, И.Д. Костыря

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: rugin@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 11 марта 2005 г.

При формировании объемного разряда в открытом газовом диоде с коаксиальными электродами, заполненном воздухом атмосферного давления, получено жесткое рентгеновское излучение. Показано, что при высоких частотах следования импульсов (вплоть до 1.5 kHz) условия формирования сверхкоротких лавинных электронных пучков сохраняются.

1. В работах [1–6] сообщалось о получении субнаносекундных электронных пучков в газовых диодах при давлении 1 ат и выше, а также об их применении. Сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП [7]) обладает уникальными свойствами. На установках с оптимальной конструкцией газового диода (малые размеры и малая индуктивность [3,4]) при заполнении газового диода воздухом атмосферного давления амплитуда импульса тока пучка составляла сотни ампер, а длительность импульса на полувысоте не превышала нескольких сотен пикосекунд [2–4,7]. СЛЭП был использован для формирования объемного разряда в CO₂-лазере атмосферного давления [5] и для возбуждения катодоллюминесценции в кристаллах [6]. Однако все предыдущие эксперименты по формированию СЛЭП проводились в режиме однократных импульсов или при малых частотах повторения (не более 5 Hz). Тогда как в настоящее время разработаны генераторы наносекундных высоковольтных импульсов напряжения, работающие в импульсно-периодическом режиме с чистотой 1 kHz и выше [8,9]. Так, в [9] был создан твердотельный генератор с частотой следования импульсов

до 3.5 кГц, на котором были получены в передающей 50 Ω линии импульсы напряжения амплитудой 150–160 кВ, длительностью 1.4 нс и временем нарастания 200–250 нс.

Цель данной работы — исследовать возможность получения СЛЭП при высоких частотах следования импульсов.

2. При проведении работы применялась установка, подробно описанная в [9,10], и газовый диод. Для создания перенапряжения на туннельно-ударном обострителе использовался генератор коротких импульсов на основе SOS-диодов и промежуточного обострителя [10], работающего в режиме обычной ударно-ионизационной волны. Генератор обеспечивал амплитуду выходного напряжения 220 кВ со временем нарастания около 1 нс. Оконечный туннельно-ударный обостритель располагался в начале передающей линии. После его срабатывания в линии формировался импульс со временем нарастания около 250 пс. Все линии генератора были заполнены трансформаторным маслом. Газовый диод был подобен описанному в [2] и состоял из катода, расположенного на центральном электроде, и анода В экспериментах использовались два катода и два анода различной конструкции. Катод № 1 состоял из трубки диаметром 6 мм, изготовленной из стальной фольги толщиной 100 μm . Катодом № 2 служил стальной шарик диаметром 17.4 мм. Анод № 1 был плоским и изготовлялся из AlBe фольги толщиной 45 μm . В качестве второго анода (№ 2) использовалась внутренняя металлическая поверхность корпуса газового диода, что обеспечивало эффективное охлаждение анода при высоких частотах следования импульсов.

Газовый диод в режиме 1 исследовался с плоским анодом и катодом № 1, в этом случае пробой осуществлялся между торцом катода № 1 и центральной частью плоского анода. Межэлектродный зазор при этом мог изменяться от 9 до 16 мм. Применение первого режима позволяло измерять параметры электронного пучка за фольгой. В режиме 2 с открытым газовым диодом AlBe фольга убиралась, а пробой воздуха осуществлялся между торцом трубки (катод № 1) или боковой поверхностью шарика (катод № 2) и кромкой цилиндрического корпуса газового диода. Электроды были расположены коаксиально, а межэлектродный зазор от катода № 1 до цилиндрической поверхности анода равнялся 21 мм, а от катода № 2 — 15.3 мм. Так как во втором режиме фольга отсутствовала, то имелась возможность наблюдать и фотографировать интегральное свечение разряда. Во втором режиме наличие электронного пучка и его относительная интенсивность опре-

делялись с помощью дозиметра VICTOREEN 541R, который устанавливался на расстоянии 5 см от плоскости фольги перпендикулярно оси катода. В режиме пачек импульсов дозиметр и открытый диод позволяли проводить измерения при частоте следования импульсов до 1.5 кГц. Число импульсов в одной пачке варьировалось от 150 до 3 тысяч.

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 ps. Измерения проводились в режиме однократных импульсов и при частоте следования импульсов от 1.5 до 1500 Hz. При частоте 100 Hz и более импульсы напряжения подавались на газовый диод отдельными пачками.

3. На рис. 1, *a* 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. 1, *b*, а импульс тока пучка за фольгой на рис. 1, *d*. Амплитуда импульса падающей волны напряжения составила 134 kV, а отраженного импульса 55 kV, что соответствует сопротивлению газового диода $\sim 120 \Omega$ и максимальному напряжению на нем 189 kV. Амплитуда СЛЭП (рис. 1, *d*) за фольгой в оптимальных режимах превышала 100 А. Импульс напряжения для открытого газового диода с катодом № 1 показан на рис. 1, *c*. Возрастание амплитуды отраженного импульса обусловлено увеличением межэлектродного зазора в газовом диоде и сопротивления диода до $\sim 170 \Omega$. Отметим, что после максимума на осциллограммах импульсов напряжения *b* и *c* наблюдается спад напряжения, что связано с уменьшением сопротивления разрядной плазмы в течение импульса.

Наиболее важный результат был получен при исследовании открытого диода и работе в импульсно-периодическом режиме. При

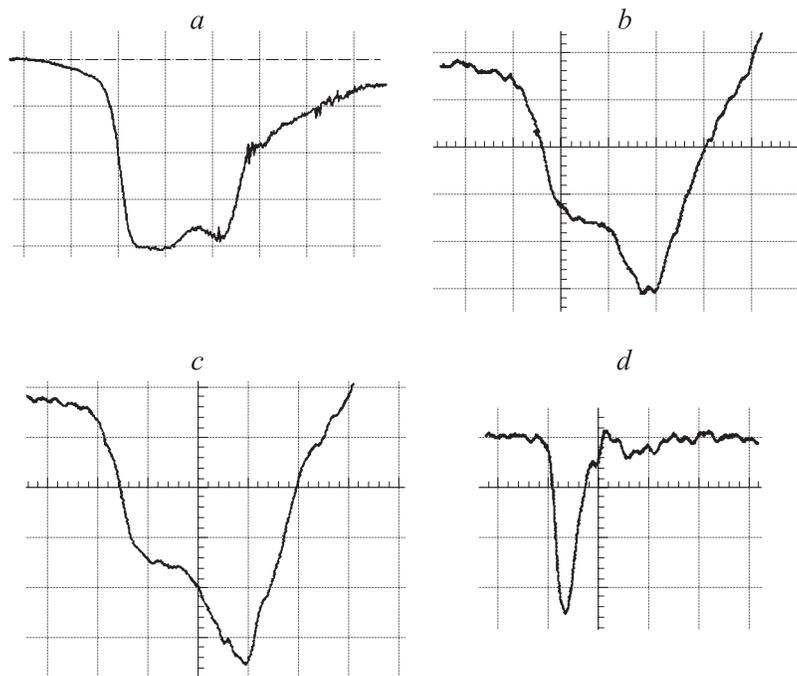


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения (*a, b, c*) и тока пучка электронов (*d*), полученные при малой частоте следования импульсов. Масштаб по горизонтали для всех осциллограмм 0.5 ns/div , масштаб по вертикали 39 kV/div (*a, b, c*) и 30 A/div (*c*).

использовании катода № 1 максимальная экспозиционная доза рентгеновского излучения 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 рентгеновское излучение. Однако при дальнейшем увеличении частоты следования импульсов рентгеновское излучение снова начинало регистрироваться. Второй максимум был получен при частоте $\sim 200 \text{ Hz}$, а при изменении частоты импульсов от 0.5 до 1.5 kHz экспозиционная доза рентгеновского излучения в пересчете на 150 импульсов уменьшилась лишь в два раза.

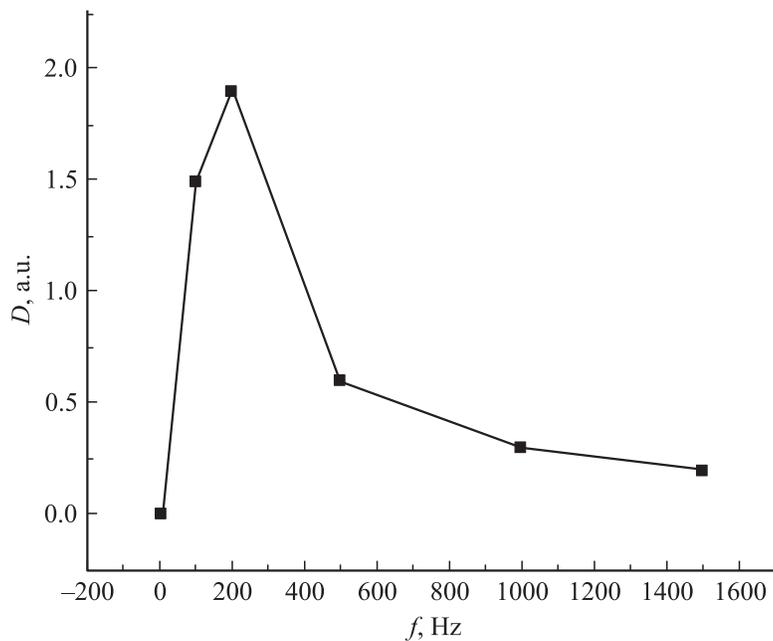


Рис. 2. Зависимость экспозиционной дозы рентгеновского излучения от частоты следования импульсов при использовании открытого газового диода с катодом № 1.

При использовании катода № 2 (рис. 2) минимальная доза регистрировалась при частоте следования импульсов 1.5 Hz, а максимум наблюдался также при частоте ~ 200 Hz. При изменении частоты импульсов от 0.5 до 1.5 kHz экспозиционная доза рентгеновского излучения в пересчете на 150 импульсов уменьшилась не более чем в три раза. При частоте 1.5 kHz экспозиционная доза с катодом № 2 была в 1.5 раза больше, чем с катодом № 1. При установке перед дозиметром свинцового экрана толщиной 5 mm рентгеновское излучение во всех режимах не регистрировалось, а при установке перед дозиметром экрана из алюминия толщиной 170 μm показания дозиметра существенно не изменялись.

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. При малой частоте импульсов и малом количестве импульсов в пачке также наблюдается объемный разряд в виде расширяющихся струй с яркими точками на конце трубки (катод № 1) или на части 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, занимаемая разрядом, начинает расширяться. При дальнейшем увеличении частоты следования импульсов и количестве импульсов в пачке (~ 1000 и более) в промежутке появляются яркие каналы. Отметим, что экспозиционная доза рентгеновского излучения в режиме 1 и режиме 2 при использовании катода № 1 отличалась всего на 20% и составила соответственно 16 и 13 миллирентген за 150 импульсов при частоте 1.5 Hz. Дозиметр в обоих случаях располагался на расстоянии 5 см от плоскости фольги.

4. 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 [11] и формируется СЛЭП. Амплитуда и энергия СЛЭП зависят от многих факторов [3], в том числе и от частоты следования импульсов. Данные исследования впервые показали, что условия формирования СЛЭП сохраняются при высоких частотах следования импульсов. Рентгеновское излучение в основном генерируется при торможении электронного пучка на аноде. Вторым максимумом 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 прорекомбинировать и условия формирования СЛЭП ухудшаются (за счет уменьшения градиента электрического поля у анода при формировании разряда). При уменьшении плотности тока за счет расширения разрядной области условия формирования СЛЭП реализуются в областях с меньшей плотностью тока, и рентгеновское излучение регистрируется при высоких частотах следования импульсов.

5. Таким образом, в данной работе 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 использовании наносекундных импульсов высокого напряжения и формировании объемного разряда в открытых газовых диодах, заполненных воздухом атмосферного давления. Обнаруженную немонотонность экспозиционной дозы рентгеновского излучения при изменении частоты следования импульсов, по-видимому, можно использовать для повышения стабильности срабатывания обострительных разрядников при высоких частотах следования импульсов.

Авторы благодарят В.Г. Шпака и С.Н. Рукина за поддержку данной работы, С.А. Шунайлова за помощь при проведении экспериментов и В.М. Орловского за создание коллектора для регистрации субнаносекундного пучка электронов.

Список литературы

- [1] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 10. С. 29–35.
- [2] Тарасенко В.Ф., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И., Орловский В.М., Алексеев С.Б. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 21. С. 1–6.
- [3] Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D., Alekseev S.B., Orlovskii V.M. // Laser and Particle Beams. 2004. V. 22. N 1. P. 75–82.
- [4] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 20. С. 36–41.
- [5] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. С. 1059–1061.
- [6] Липатов Е.И., Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Алексеев С.Б., Рыбка Д.В. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 6. С. 29–33.
- [7] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. № 3. С. 94–95.
- [8] Gubanov V.P., Korovin S.D., Pegel I.V., Roitman A.M., Rostov V.V., Stepchenko A.S. // IEEE Transaction on Plasma Science. 1997. V. 25. N 2. P. 258–265.
- [9] Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Цыранов С.Н. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 5. С. 36–46.
- [10] Аничкин Е.А., Любутин С.К., Пономарев А.В., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г. // ПТЭ. 2002. № 4. С. 106–111.
- [11] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.