УДК 537.52; 537.523.3

И.Д. КОСТЫРЯ*, В.Ф. ТАРАСЕНКО***

ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭКРАНА В ГАЗОВОМ ДИОДЕ НА ГЕНЕРАЦИЮ ПУЧКА УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ¹

Проведены исследования сверхкороткого лавинного электронного пучка (с.л.э.п.), генерируемого в воздухе атмосферного давления, при размещении диэлектрических экранов в газовом диоде ускорителя СЛЭП-150. Получено, что установка экрана в любом месте разрядного промежутка не приводит к увеличению амплитуды с.л.э.п., а число убегающих электронов за анодом из алюминиевой фольги плавно уменьшается при перемещении пленки из лавсана толщиной 50 мкм от анода к катоду. Показано, что при установке лавсановой пленки на расстоянии 3 мм от катода и увеличении ее толщины от 50 до 100 мкм число электронов за анодной фольгой резко уменьшается (примерно в 4 раза). Тогда как при увеличении толщины лавсановой пленки до 100 мкм на расстояниях от катода 1 и 11 мм число электронов уменьшается не более чем на 30 %. Предполагается, что установка диэлектрической пленки в газовый диод на расстоянии 3 мм от катода существенно влияет на продвижение фронта волны ионизации. Это приводит при увеличении толщины диэлектрической пленки к быстрому уменьшению амплитуды с.л.э.п.

Ключевые слова: пучок убегающих электронов, с.л.э.п., пленки в газовом диоде, атмосферное давление воздуха.

Введение

Пучок убегающих электронов за анодом из фольги в воздухе атмосферного давления был с помощью шунта впервые зарегистрирован в 1974 г. [1]. Критическое электрическое поле для убегания электронов и генерации рентгеновского излучения при атмосферном давлении наиболее легко достичь в гелии при использовании разрядного промежутка с катодом, имеющим малый радиус кривизны [2]. К настоящему времени накоплен значительный опыт по получению и регистрации пучков убегающих электронов в различных газах повышенного давления, в том числе с субнаносекундным временным разрешением (см. бзоры [3, 4]).

Однако результаты многих экспериментальных и теоретических работ, посвященных изучению генерации пучков убегающих электронов при повышенных давлениях, не согласуются между собой. Это требует проведения дальнейших экспериментальных и теоретических исследований различных режимов убегания электронов в газах повышенного давления. Например, в работах [5, 6], как мы считаем, ошибочно утверждалось, что установка в газовом диоде тонких пленок из диэлектрика приводит к существенному увеличению амплитуды тока пучка убегающих электронов. Эта ошибка была повторена в работе [7], где сообщалось о получении амплитуды тока убегающих электронов ~ 2 кА в воздухе атмосферного давления. Причем фронт импульса напряжения в экспериментах [7] составлял ~ 5 нс, а газовый диод имел большие размеры и индуктивность. Как показывают наши исследования, ток пучка в работе [7] был завышен более чем на три порядка. В работе [8] было установлено, что при использовании диэлектрических пленок для вывода с.л.э.п. основной вклад в сигнал с коллектора может давать емкостной ток. В [9, 10], исследования динамического емкостного тока были проведены с временным разрешением до ~ 0.02 нс. Было показано, что амплитуда динамического емкостного тока может превышать амплитуду с.л.э.п. на два порядка и более.

Влияние диэлектрической пленки на ток пучка убегающих электронов в работе также исследовалось в [11]. Было показано, что при установке лавсановой пленки толщиной 50 мкм на расстоянии 1 мм от анода из фольги ток пучка уменьшился на 30–40 %, а при дальнейшем приближении пленки к катоду (на 3 и 5 мм) ток пучка за фольгой продолжил уменьшаться. Однако подробного исследования влияния диэлектрических пленок на число убегающих электронов в с.л.э.п. ранее не проводилось. В работе [11] использовалась лавсановая пленка только толщиной 50 мкм и ток пучка измерялся только при трех положениях пленки в газовом диоде.

Цель данной работы – исследовать влияние пленок из лавсана различной толщины, которые помещались в газовый диод на разных расстояниях от катода, на генерацию сверхкороткого лавинного электронного пучка в воздухе атмосферного давления.

¹ Работа выполнена в рамках государственно задания ИСЭ СО РАН по теме №13.1.3.

Экспериментальная аппаратура

На газовый диод подавались импульсы напряжения от генератора СЛЭП-150 [3]. Амплитуда импульсов напряжения в падающей волне составляла ~ 150 кВ, длительность импульса на полувысоте 1 нс при фронте импульса ~ 0.3 нс. Катодом служила трубка из нержавеющей стали, изготовленная из фольги толщиной 100 мкм. Диаметр катода был равен 6 мм. Анод был плоский и изготовлялся из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм или металлической сетки с различной прозрачностью. Фотография газового диода со стороны генератора показана на рис. 1.

Диаметр газового диода у фольги (внутренний диаметр изолятора 3) равнялся 54 мм. Во всех опытах газовый диод был заполнен атмосферным воздухом при давлении 0.1 МПа. Эксперименты проводились в режиме однократных импульсов. На рис. 2 приведена фотография коллектора, который был отсоединен от газового диода.



Рис. 1. Фотография газового диода со стороны генератора: I — потенциальный катод диаметром 6 мм, 2 — кольцо с наклеенной лавсановой плёнкой, 3 — изолятор газового диода, 4 — металлический корпус генератора СЛЭП 150



Рис. 2. Фотография коллектора, устанавливаемого за анодной фольгой: I – приёмная часть коллектора диаметром 20 мм, 2 – корпус коллектора

Анодная фольга толщиной 10 мкм из A1 располагалась между корпусом генератора СЛЭП-150 и корпусом коллектора. В ряде экспериментов алюминиевой фольга заменялась сетками с различной прозрачностью. Расстояние между анодной фольгой и катодом составляло в данных экспериментах 12 мм. Диэлектрические экраны из лавсановой плёнки толщиной 50 мкм устанавливались в промежутке с дискретностью 2 мм. Каждый из экранов крепился на изготовленном из капролона кольце. Диаметр каждого кольца обеспечивал нужное положение экрана в промежутке. Набор капролоновых колец позволял устанавливать расстояние (h=1, 3, 5, 7, 9, 11 мм) между торцом катода и лавсановым экраном. Расстояние между катодом и плоскостью анода при изменении положения экранов не изменялось. Для регистрации с.л.э.п. за алюминиевой фольгой устанавливался коллектор (рис. 2). Сигнал с коллектора передавался с помощью коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом. Диаметр приёмной части коллектора, изготовленного из алюминия, равнялся 20 мм.

Регистрация импульсов тока пучка (с.л.э.п.) или числа убегающих электронов осуществлялась осциллографом DPO70604 (6 ГГц, 25 выборок за наносекунду) либо TDS3034 (300 МГц, 2.5 выборки за наносекунду). Интегральное свечение разряда в газовом диоде фотографировалось фотокамерой Зенит-11 на фотоплёнку РФ-3.

Результаты и их обсуждение

Основные результаты приведены на рис. 3–6. Зависимость амплитуды с.л.э.п. от расстояния между катодом и экраном представлена на рис. 3.

При работе без лавсаной пленки в газовом диоде и с пленкой, расположенной у анодной фольги, амплитуды с.л.э.п. отличались менее чем на 10 %. Установка лавсановой пленки в газовый диод ускорителя СЛЭП-150 не дала увеличения амплитуды с.л.э.п. во всех экспериментах. При

приближении пленки к катоду амплитуда с.л.э.п. плавно уменьшалась. Замена анодной фольги на металлическую сетку с высокой прозрачностью и размером ячейки более чем 0.2×0.2 мм приводила к увеличению сигнала с коллектора за счет регистрации вместе со с.л.э.п. динамического емкостного тока. Причем величина сигнала зависела от размера отдельной ячейки в сетке. Ранее соотношение амплитуд с.л.э.п., емкостного тока и динамического емкостного тока подробно исследовалось в работах [8–10]. Результаты экспериментов по изучению емкостного тока и динамического емкостного, полученные в настоящей работе, согласуются с результатами работ [8–10].

Для расстояний d=1, 3 и 11 мм были проведены измерения тока пучка за фольгой в зависимости от толщины лавсанового экрана при неизменном междуэлектродном зазоре 12 мм. Зависимости представлены на рис. 4, 5 и 6.

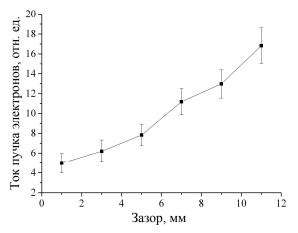


Рис. 3. Зависимость амплитуды с.л.э.п. за алюминиевой анодной фольгой от расстояния между катодом и экраном из лавсановой плёнки

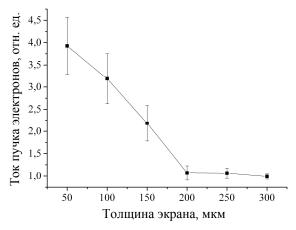


Рис. 4. Зависимость амплитуды с.л.э.п. от толщины экрана из лавсановой плёнки для $h=1\,$ мм и междуэлектродного (катод — анод) зазора $12\,$ мм

Наименьшая амплитуда с.л.э.п. при толщине пленки 50 мкм регистрировалась, как видно на рис. 3 и 4, при расположении экрана у катода. Однако увеличение толщины экрана по-разному влияло на амплитуду с.л.э.п. При установке лавсановой пленки на расстоянии 3 мм от катода и увеличении ее толщины от 50 до 100 мкм число электронов за анодной фольгой резко уменьшается (примерно в 4 раза) (рис. 5). Тогда как при увеличении вдвое толщины лавсановой пленки на расстояниях 1 и 11 мм от катода число электронов за фольгой уменьшается не более чем на 30 %. При всех положениях экрана с.л.э.п. был зарегистрирован за анодной фольгой при толщине экрана до 300 мкм. Это указывает на наличие электронов в пучке с энергией более 100 кэВ.

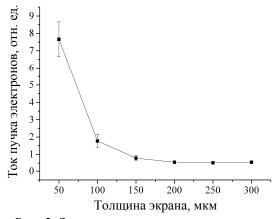


Рис. 5. Зависимость амплитуды с.л.э.п. от толщины экрана из лавсановой плёнки для $h=3\,$ мм и междуэлектродного (катод – анод) зазора 12 мм

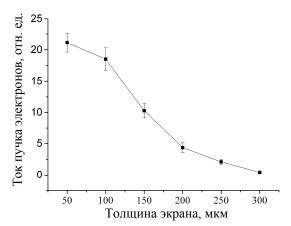


Рис. 6. Зависимость амплитуды с.л.э.п. от толщины экрана из лавсановой плёнки для $h=11\,$ мм и междуэлектродного (катод – анод) зазора 12 мм

При h = 1, 3 и 11 мм и толщине лавсанового экрана 50 мкм было проведено фотографирование разряда. В этих экспериментах анодная фольга была заменена сеткой из проволочек из стали,

натянутых параллельно друг другу с шагом 4 мм на металлическое кольцо. Диаметр проволочек равнялся 0.2 мм. При установке лавсановой пленки на расстоянии 1 мм хорошо видны катодные пятна и свечение плазмы на кромке катода, а также более яркое пятно в центре. При удалении пленки от катода яркость центрального пятна увеличивается, катодные пятна при этом также видны. Форма разряда при разных положениях экрана отличается, как и амплитуда с.л.э.п. за фольгой.

Наблюдаемое изменение амплитуды с.л.э.п. от расстояния экрана от катода, а также от толщины экрана при различном его положении в промежутке можно объяснить влиянием экрана на формирование и продвижение фронта волны ионизации. Кроме того, часть быстрых электронов, которые еще не набрали достаточной энергии, поглощается лавсановой пленкой. При h=1 мм формирование волны ионизации у катода наиболее затруднено и амплитуда с.л.э.п. минимальна. При h=3 мм, по-видимому, с увеличением толщины экрана наиболее сильно замедляется скорость фронта волны ионизации и это приводит к резкому уменьшению амплитуды с.л.э.п. Расположение тонкого (50 мкм) экрана у анодной фольги не оказывает заметного влияния на амплитуду с.л.э.п. поскольку экран уже не влияет ни на формирование, ни на продвижение фронта волны ионизации и генерацию с.л.э.п. Кроме того, убегающие электроны при приближении к аноду успевают набрать максимальную энергию и проходят через тонкую пленку.

Заключение

Таким образом, в данной работе исследовано влияние диэлектрических пленок, помещаемых в газовый диод, на амплитуду с.л.э.п. Подтверждено, что при использовании для вывода тока пучка из газового диода диэлектрические пленки необходимо учитывать влияние динамического емкостного тока. Показано, что установка лавсановой пленки в промежуток приводит к уменьшению амплитуды тока пучка убегающих электронов. При аноде из диэлектрической пленки, даже при установке перед ней металлической сетки с крупной ячейкой, величина динамического емкостного тока может существенно превышать амплитуду с.л.э.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 564—568.
- 2. Frankel S., Highland V., Sloan T., Van Dyck, Wales W. // Nuclear Instruments and Methods. -1966. -V. 44. -P. 345–348.
- 3. Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V. // Plasma Devices and Operation. 2008. V. 16. No. 4. P. 267-298.
- 4. Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F. // International Review of Physics (I.R.E.PHY.). 2012. V. 6. No. 2. P. 165-195.
- 5. Королев В.С., Мальцев А.Н. // Изв. вузов. Физика. 1992. Т. 35. $\ M$ 2. С. 7–9.
- 6. Королев В.С., Мальцев А.Н. // Изв. вузов. Физика. 1993. Т. 36. № 6. С. 67—70.
- 7. Maltsev A. N. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2006. V. 34. No. 4. P. 1166-1174.
- 8. Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 11. С. 118–122.
- 9. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Burachenko A.G., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Baksht E.Kh., Yan P. // Review of Scientific Instruments. 2013. V. 84. P. 053506.
- 10. Tarasenko V.F., Shao T., Rybka D.V., Zhang Ch., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Yan P., Baksht E.Kh. // High Voltage Engineering. 2013. V. 39. No. 9. P. 2207-2214.
- 11. Месяц Г.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 4. С. 71—80.
 - *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.14.

- **Национальный исследовательский Томский государственный университет,
- г. Томск, Россия

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

Костыря Игорь Дмитриевич, ведущ. инженер лаб. оптических излучений;

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., зав. лаб. оптических излучений ИСЭ, профессор каф. квантовой электроники и фотоники ТГУ.

I.D. KOSTYRYA, V.F. TARASENKO

GENERATION OF RUNAWAY ELECTRON BEAMS IN GAS DIODE WITH DIELECTRIC FILMS

The purpose of this paper to study the influence of dielectric thin films placed in the gas diode on generation of supershort avalanches electron beam (SAEB) in atmospheric pressure air. Experiments were conducted using a generator SLEP-150, as well as gas diode with tubular cathode and anode from metal foil or mesh. Found that the number of electrons for anode foil smoothly increases as you move from the film 50 μ m thick by lavsan the cathode to the anode. Demonstrates that when you install the lavsan film at a distance 3 mm from the cathode and increase its thickness from 50 up to 100 μ m number of electrons for stamping reduced about 4 times. While installing lavsan films at a distance of 1 and 11 mm from the cathode, increasing its thickness from 50 up to 100 μ m, leads to a reduction in the number of electrons for the foil no more than 20 %. Increase in amplitude SAEB with dielectric films in gas diode in the experiments was not recorded.

Keywords: runaway electrons beam, supershot avalanches electrons beam, dielectric film in gas diode, air of atmospheric pressure.

REFERENCES

- 1. Tarasova L.V., Khudyakova L.N., Loiko T.V., Tsukerman V.A. (1974). Soviet Physics Technical Physics, 19, 351–355.
- 2. Frankel S., Highland V., Sloan T., Van Dyck, Wales W. (1966). Nuclear Instruments and Methods, 44, 345–348.
- 3. Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V. (2008). *Plasma Devices and Operation*, 16(4), 267–298.
- 4. Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F. (2012). International Review of Physics (I.R.E.PHY.), 6(2), 165-195.
- 5. Korolev V.S., Maltsev A.N. (1992). Izv. vuzov. Fiz., 35(2), 7–9.
- 6. Korolev V.S., Maltsev A.N. (1993). Izv. vuzov. Fiz., 36(6), 67–70.
- 7. Maltsev A.N. (2006). IEEE Transactions on Plasma Science, 34(4), 1166–1174.
- 8. Kostyrya I.D., Tarasenko V.F. (2006). *Technical physics*, 51(11), 1512–1516.
- Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Burachenko A.G., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Baksht E.Kh., Yan P. (2013). Review of Scientific Instruments, 84, 053506.
- 10. Tarasenko V.F., Shao T., Rybka D.V., Zhang Ch., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I. Yan, P., Baksht E.Kh. (2013). *High Voltage Engineering*, 39(9), 2207–2214.
- 11. Mesyats G.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I. (2008). Technical Physics Letters, 34(2), 169-173.