

03;04;10

## Пучок электронов, сформированный в газонаполненном диоде при атмосферном давлении воздуха и азота

© С.Б. Алексеев, В.М. Орловский, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 9 декабря 2002 г.

Сформированы электронные пучки при атмосферном давлении молекулярных газов в диоде. В диоде, заполненном воздухом, получена амплитуда пучка  $\sim 20$  А при энергии электронов  $\sim 70$  keV. Предполагается, что основная часть убегающих электронов при низких начальных значениях параметра  $E/p \sim 0.1$  kV/cm · Torr формируется в пространстве между катодной плазмой и анодом. При распространении плазмы от катода к аноду электрическое поле между фронтом плазмы и анодом увеличивается и  $E/p$  достигает критического значения.

1. Вопросам формирования электронных пучков в газонаполненных диодах посвящено большое количество работ, см., например, [1–9] и ссылки в этих работах. Большой интерес представляют работы [2–4], в которых сообщалось о получении электронных пучков или рентгеновского излучения при давлении молекулярного газа в диоде порядка 1 atm. Однако при атмосферном давлении воздуха число ускоренных электронов было мало  $\sim 10^9$  [2–4], что при длительности импульса 1 ns соответствует амплитуде тока пучка за фольгой  $\sim 0.2$  А. В работе [5] сообщалось о получении электронного пучка в воздухе с длительностью  $\sim 1$   $\mu$ s и током 1 kA. Однако на данной установке промежуток анод–катод предварительно заполнялся плазмой, которая за счет энерговклада  $\sim 20$  kJ имела малую концентрацию при подаче на промежуток импульса напряжения. В условиях работ [6–8] электронный пучок формировался при высоких  $E/p > 1$  kV/cm · torr. ( $E$  — напряженность электрического поля,  $p$  — давление газа).

Целью данной работы было получить пучок электронов в диоде, заполненном воздухом или азотом до атмосферного давления, а также проанализировать причину формирования электронного пучка при высоких давлениях газов в диоде и малых значениях параметра  $E/p$ .

2. Эксперименты проводились с использованием двух генераторов наносекундных импульсов, которые описаны в [10,11], и четырех катодов. Генератор 1 имел волновое сопротивление  $30 \Omega$  и формировал на согласованной нагрузке импульс напряжением  $\sim 200 \text{ kV}$  и длительностью на полувысоте  $\sim 3 \text{ ns}$  при фронте импульса напряжения  $\sim 1 \text{ ns}$  [10]. Катод № 1 представлял собой набор трех цилиндров (диаметры 12, 22, 30 mm) из Ti фольги толщиной  $50 \mu\text{m}$ , вставленных друг в друга и закрепленных на дюралевой подложке диаметром 36 mm таким образом, что они имели общую ось и высота колец от меньшего к большему уменьшалась на 2 mm соответственно. Катод № 2 был выполнен из графита в виде таблетки диаметром 29 mm, края которой были закруглены и которая была выпуклой в сторону фольги с радиусом кривизны 10 cm. Расстояние между катодом и анодом равнялось 10–28 mm.

Генератор 2 имел волновое сопротивление  $20 \Omega$  и формировал на разрядном промежутке импульс напряжением с амплитудой до  $220 \text{ kV}$  и длительностью на полувысоте  $\sim 2 \text{ ns}$  при фронте импульса напряжения  $\sim 0.3 \text{ ns}$  [11]. Катод № 3 имел форму трубки диаметром 6 mm и был изготовлен из титановой фольги толщиной  $50 \mu\text{m}$ . Катод № 4 был изготовлен из графита в виде таблетки диаметром 6 mm со скругленными краями. Расстояние между катодом и анодом равнялось 16 mm.

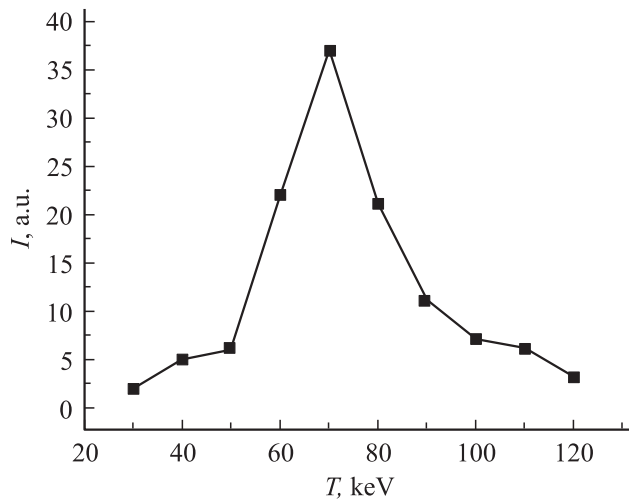
Вывод электронного пучка осуществлялся через AlBe фольгу толщиной  $45 \mu\text{m}$ . Ток пучка измерялся с помощью графитового электрода, установленного на расстоянии 10 mm от фольги в воздухе или в вакууме и соединенного низкоомным шунтом с корпусом ускорителя. Распределение электронов по энергиям определялось методом фольг. Энергию электронного пучка измеряли калориметром ИМО-2Н. Кроме того, фотографировалось свечение люминофора под действием электронного пучка. Для регистрации сигналов с шунтов использовался осциллограф TDS-332.

3. Значения амплитуды тока за фольгой приведены в таблице. На установке 1 был получен электронный пучок при давлении 1 atm. в воздухе, азоте, гелии и смеси  $\text{CO}_2\text{--N}_2\text{--He}$  как в режиме однократных импульсов, так и с частотой повторения до 5 Hz. На установке 2 была

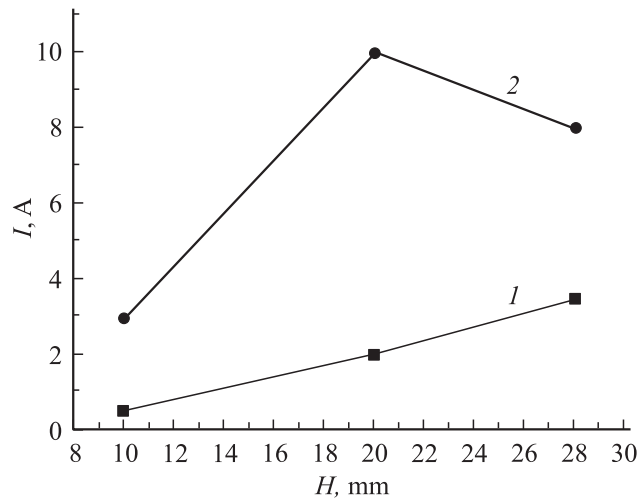
Ток пучка электронов за фольгой при давлении различных газов в диоде 1 atm.

Тип генера- тора/тип катода	Зазор катод–анод, mm	Ток пучка $I$ , А			
		N <sub>2</sub>	воздух	He	CO <sub>2</sub> :N <sub>2</sub> :He = 1 : 1 : 3
1 / № 1	20	2	10	25	He измеряли
1 / № 1	28	3.5	8	60	12
1 / № 2	28	—	—	200	He измеряли
2 / № 3	16	13.8	He измеряли	He измеряли	” ”
2 / № 4	16	20	” ”	” ”	” ”

получена наибольшая амплитуда электронного пучка в воздухе, которая составила 20 А, что более чем на порядок превышает амплитуду тока, полученную ранее в [2–4]. Максимум на распределении электронов пучка по энергии для генератора 1 с катодом № 1 при давлении воздуха в диоде 1 atm. соответствовал энергии электронов  $\sim 95$  keV, а для генератора 2 с катодом № 4  $\sim 70$  keV (рис. 1). На рис. 2 приведена

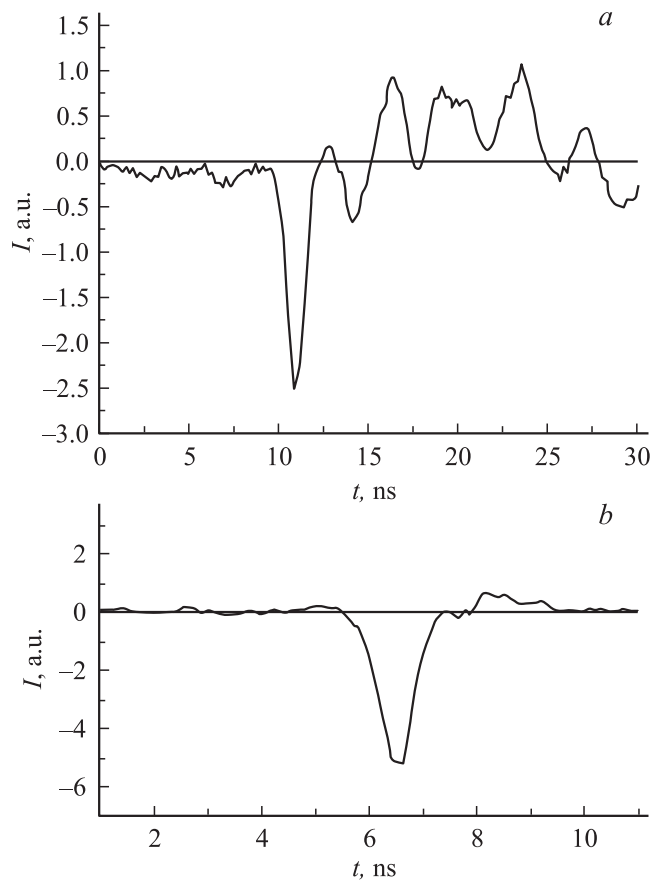


**Рис. 1.** Распределение электронов по энергиям в пучке за фольгой при давлении воздуха в диоде 1 atm. (генератор 2, катод № 4).



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды тока пучка электронов за фольгой от зазора в газовом диоде при давлении 1 atm. для N<sub>2</sub> (1) и воздуха (2).

зависимость тока пучка, выведенного за фольгу, от расстояния между электродами при давлении 1 atm. Увеличение зазора между катодом и фольгой до 28 mm приводило при использовании генератора 1 к увеличению тока пучка в азоте, а в воздухе максимум амплитуды тока регистрировался при зазоре 20 mm. Отметим сильное влияние конструкции катода на форму разряда в диоде и на амплитуду тока пучка. Различные формы разряда для различных катодов и межэлектродных расстояний ранее наблюдались в [1,2,4]. Так же как и в работах [2,4], мы регистрировали электроны с энергией, превышающей напряжение, приложенное к диоду, но их концентрация была существенно меньше концентрации электронов в максимуме кривой распределения электронов пучка по энергиям. Длительность импульса тока пучка была меньше длительности фронта импульса напряжения и составляла ~ 1 ns на полувысоте для обоих генераторов (рис. 3). Разрешение нашей системы регистрации составляло также ~ 1 ns. Энергия пучка электронов, измеренная калориметром ИМО-2Н, при заполнении диода воздухом составила 1.2 mJ для генератора 1 и 1.6 mJ для генератора 2. Длительность импульса тока, рассчитанная из энергии пучка, средней энергии электронов и амплитуды тока, составляла 1–1.5 ns.



**Рис. 3.** Импульс тока пучка электронов за фольгой (давление воздуха в диоде 1 atm.) при измерении пучка: *a* — в воздухе (генератор 1, катод № 1), *b* — в вакууме (генератор 2, катод № 4).

4. В условиях нашего эксперимента начальное значение параметра  $E/p$  было малым и соответствовало правой ветви кривой Пашена. Критерий появления убегающих электронов, согласно [9], следующий:  $E_c/p = 3.88 \cdot 10^3 Z/I$ , где  $E_c$  — критическое поле в  $V/cm \cdot Torr$ ,  $Z$  — атомный номер,  $I$  — средняя энергия неупругих потерь в электрон-воль-

тах. Для воздуха  $I = 15\text{--}80\text{ eV}$ , что дает  $E_c/p = 0.8\text{--}3.5\text{ kV/cm} \cdot \text{Тогг}$ . Для зазора  $20\text{--}28\text{ mm}$  при начальном напряжении на промежутке  $\sim 200\text{ kV}$  мы имеем  $E/p \sim 0.09\text{--}0.13\text{ kV/cm} \cdot \text{Тогг}$ . Следовательно, напряжение, которое прикладывается к промежутку в данных экспериментах, мало для формирования убегающих электронов. Полученные результаты можно объяснить следующим образом. При пробое газа в промежутке образуется плазма в виде каналов или облака. Плазма за единицы доли наносекунд переключает промежутки. При движении плазменного облака или канала (каналов), которые появляются на катоде и имеют большую проводимость по сравнению с остальной частью промежутка, происходит перераспределение электрического поля вдоль промежутка и в части промежутка между плазмой и фольгой достигается критическое поле. Данный механизм объясняет формирование убегающих электронов и рентгеновского излучения при низких полях и высоких давлениях. Электрическое поле на катоде и в промежутке может усиливаться за счет геометрического фактора. Для реализации предлагаемого механизма нужна высокая скорость нарастания напряжения на промежутке, так как при пробое на фронте импульса плазма „закачивает“ промежутки. Подобный механизм имеет место и при других формах импульсных разрядов, например, при разряде в длинных трубках [12] и при поверхностном разряде [13]. Отметим, что при появлении убегающих электронов с достаточно большой энергией у катода, например за счет усиления поля на микроостриях, эти электроны могут проходить достаточно большие расстояния без потерь энергии и при сравнительно малых значениях параметра  $E/p$  [14].

5. Таким образом, при сравнительно малых значениях параметра  $E/p$  получен электронный пучок при атмосферном давлении молекулярных и атомарных газов. Диоды, наполненные газами при давлении  $1\text{ atm}$ . и более, могут найти применение для получения электронных пучков малой длительности (доли наносекунд). Для сохранения условий формирования пучка убегающих электронов при увеличении давления газа в диоде необходимо сокращать длительность фронта импульса напряжения.

Авторы выражают благодарность LLNL (контракт В506095) и доктору В. Хассону (V. Hasson) за поддержку данной работы, а также С.Д. Коровину и В.Г. Шпаку за предоставление генераторов наносекундных импульсов.

## Список литературы

- [1] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. // ЖТФ. 1969. Т. 39. В. 8. С. 1530–1533.
- [2] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 3. С. 564–568.
- [3] Бабич Л.П., Лойко Т.В. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 188–189.
- [4] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. В. 7. С. 49–82.
- [5] Коляда Ю.Е. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 16. С. 52–56.
- [6] Колбычев Г.В., Колбычева П.Д., Пташник И.В. // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 2. С. 59–67.
- [7] Сорокин А.Р. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 9. С. 14–21.
- [8] Бохан А.П., Бохан П.А. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 11. С. 21–27.
- [9] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [10] Губанов В.П., Коровин С.Д., Пегель И.В. и др. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 110–118.
- [11] Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г. и др. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146–149.
- [12] Асиновский Э.И., Марковец В.В., Поляков Д.Н. и др. // Теплофизика высоких температур. 1985. Т. 23. № 3. С. 606–608.
- [13] Дашук П.Н., Кулаков С.Л. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 2. С. 69–73.
- [14] Бабич Л.П., Донской Е.Н., Зеленский К.Ф. и др. // УФН. 2002. Т. 382. № 1. С. 31–33.