

03;04;10

## Субнаносекундный электронный пучок, сформированный в газовом диоде при высоком давлении

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

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

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

Поступило в Редакцию 19 апреля 2004 г.

Показано, что субнаносекундные электронные пучки в газовых диодах формируются при высоких давлениях (в гелии до 6 atm, в азоте до 4 atm). При заполнении диода воздухом атмосферного давления получена амплитуда тока пучка более 240 А при длительности импульса на полувысоте  $\sim 0.2$  ns и плотности тока пучка  $\sim 40$  А/см<sup>2</sup>.

1. В работах [1–6] была показана возможность формирования сильноточных электронных пучков в газовых диодах, которые заполнялись до давления 1 atm молекулярными и атомарными газами, а также их смесями. Была зарегистрирована значительная амплитуда тока пучка (за AlBe фольгой толщиной 40  $\mu$ m в воздухе  $\sim 70$  А и в гелии  $\sim 200$  А). Длительность импульса тока на полувысоте при этом не превышала 0.3 ns. Значение среднего по зазору параметра  $E/p = U/dp$  составляло  $\sim 0.1$  kV/(cm · Torr), где  $U$  — напряжение на промежутке,  $d$  — величина межэлектродного зазора,  $p$  — давление газа. Это было намного меньше критического  $E_{cr}/p$  для формирования убегающих электронов [7]. Для объяснения этих результатов в [1,3,4] было высказано предположение, что критическое поле достигается в прианодной области при расширении плазменной области за счет движения фронта ионизации от катода к аноду. Субнаносекундный электронный пучок, который в воздухе имел амплитуду в десятки ампер, был назван СЛЭП-пучком (субнаносекундный лавинный электронный пучок) [4]. Однако при давлениях выше одной атмосферы эксперименты не проводились, и было не ясно, реально ли получать сильноточные пучки электронов при высоких давлениях в газовых диодах. Можно было предположить, что если механизм формирования электронных пучков, предложенный

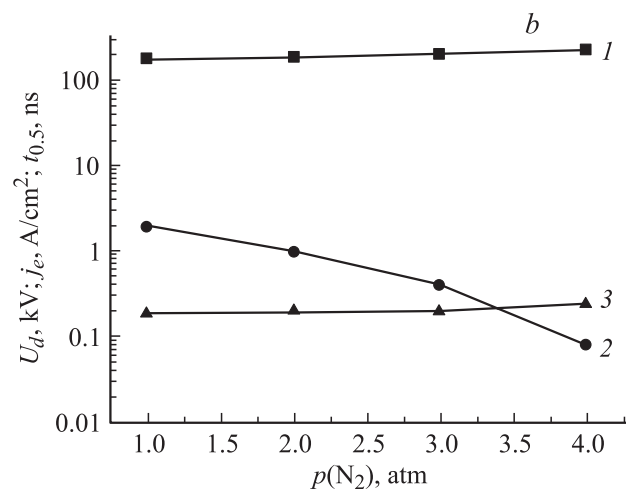
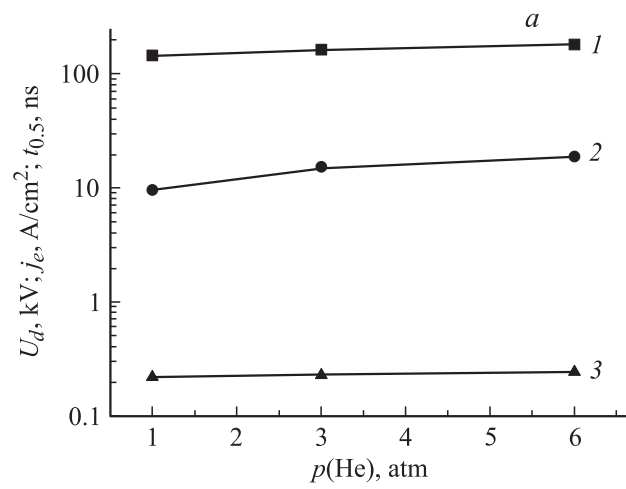
в [1,3,4], справедлив, то увеличение давления не должно существенно повлиять на формирование субнаносекундных электронных пучков в газовых диодах. С увеличением давления критическое поле [5,7] все равно будет достигаться, только на пропорционально меньших расстояниях между плазмой, расширяющейся от катода, и анодом. Отметим, что для выполнения этого предположения увеличение давления газа в диоде не должно нарушать объемный характер разряда в течение времени  $\sim 1$  ns.

Цель данной работы — исследовать возможность формирования электронного пучка при давлении в газовом диоде выше атмосферного.

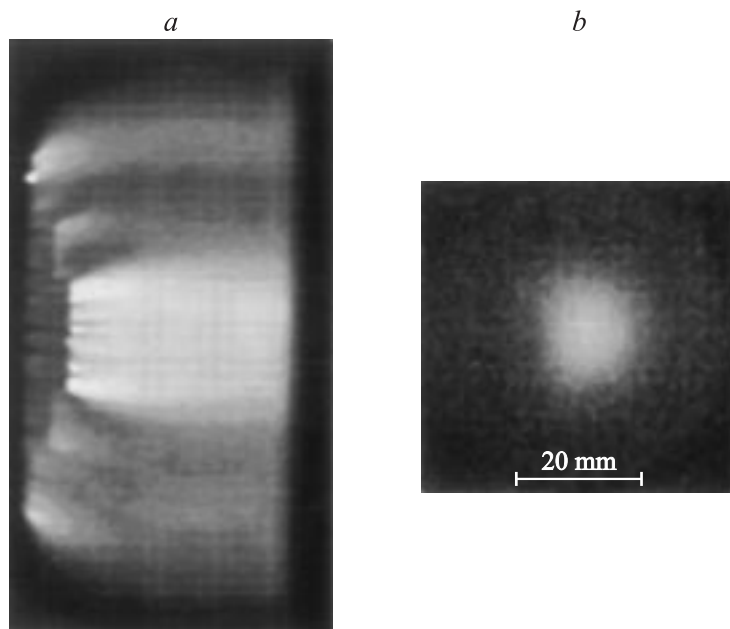
2. При проведении работы использовались два генератора, с помощью которых формировались импульсы напряжения длительностью 1–2 наносекунды и фронтом  $\sim 0.5$  ns и менее, а также два газовых диода различной конструкции. Оба газовых диода имели плоский анод и катод малого размера, что обеспечивало дополнительное усиление электрического поля у катода. В генератор импульсов 1 (СИНУС) [8] была встроена дополнительная передающая линия с волновым сопротивлением  $40 \Omega$ , а также была предусмотрена возможность повышения давления гелия и азота в газовом диоде до 6 atm. Модернизированный генератор формировал на согласованной нагрузке  $40 \Omega$  импульс с напряжением  $\sim 180$  kV и длительностью на полувывоте  $\sim 1.5$  ns, при фронте импульса напряжения  $\sim 0.5$  ns. Катод (№ 1) представлял собой набор трех цилиндров (диаметры 12, 22, 30 mm) из Ti фольги толщиной  $50 \mu\text{m}$ , вставленных друг в друга [1–3].

Генератор 2 был подобен генераторам РАДАН-220 [9] и формировал на разрядном промежутке импульс напряжением с амплитудой  $\sim 200$  kV, но имел меньшую длительность импульса  $\sim 1$  ns, а также минимальные, для данных условий, размеры и индуктивность газового диода. Эксперименты на генераторе 2 проводились при давлении воздуха 1 atm с катодом № 2, который был выполнен из стальной трубки диаметром 6 mm и толщиной стенки  $50 \mu\text{m}$  [4]. Анод для обоих генераторов был образован AlBe фольгой толщиной  $40 \mu\text{m}$ . Зазор газового промежутка изменялся от 10 до 20 mm.

Для регистрации сигналов с емкостного делителя, коллекторов и шунтов применялся осциллограф TDS-7405 с полосой 4 GHz, имеющий 20 GS/s (20 точек на 1 ns). Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом.



**Рис. 1.** Зависимость амплитуды импульсов напряжения (1), плотности тока пучка электронов (2) и длительности тока пучка на полувысоте (3) от давления гелия (а) и азота (b). Генератор (1).



**Рис. 2.** Фотографии свечения разряда в гелии при давлении 6 atm и межэлектродном зазоре 16 mm (*a*) и автографа электронного пучка (*b*). Генераторы 1 и 2 соответственно.

3. В данной работе была существенно расширена область давлений, при которых формируется электронный пучок. В частности, электронный пучок впервые был получен при давлении в газовом диоде шесть атмосфер. На рис. 1 приведены зависимости амплитуды напряжения на промежутке, плотности тока пучка и длительности импульса тока на полувысоте, полученные в гелии (*a*) и в азоте (*b*). Видно, что амплитуда тока и его длительность на полувысоте практически не изменяются с ростом давления гелия до 6 atm. При этом разряд оставался объемным (рис. 2, *a*). Уменьшение тока пучка в азоте при давлении 2–4 atm связано с уменьшением области, занимаемой объемным разрядом, и контрагированием разряда при давлении  $\sim 4$  atm. Длительность импульсов тока пучка при измерениях с разрешением

$\sim 0.1$  ns в гелии и азоте существенно не отличалась и составляла на полувысоте  $\sim 0.2$  ns. Установлено, что регистрируемая длительность импульса тока пучка зависела от диаметра коллектора и была минимальной при малых размерах коллектора. По-видимому, плазма, расширяющаяся за счет движения фронта ионизации от катода, в разных точках подходит к аноду не одновременно, соответственно время достижения критического поля также имеет разброс и длительность импульса полного тока больше, чем длительность с малой площади анода. Средняя энергия электронов пучка за фольгой для генератора 1 при давлении гелия 1–6 atm составила  $\sim 70$  keV. Все эти данные подтверждают предположение [1,3,4] о формировании пучка электронов между фронтом плазмы, расширяющейся за счет движения фронта ионизации от катода, и анодом при достижении критического поля.

Была обнаружена очень сильная зависимость амплитуды тока пучка за фольгой от размеров и индуктивности газового диода. В воздухе при атмосферном давлении с минимальной индуктивностью газового диода на генераторе 2 с катодом № 2 амплитуда тока пучка за фольгой составила  $\sim 240$  А при длительности импульса на полувысоте  $\sim 0.2$  ns. Автограф электронного пучка показан на рис. 2, *b*. Видно, что диаметр пучка превышает 4 см и имеется центральная часть диаметром  $\sim 1.5$  см с большой плотностью тока пучка, которая составляла в среднем  $\sim 40$  А/см<sup>2</sup>. Мы считаем, что очень малые амплитуды импульсов тока пучка, получаемые ранее в газовых диодах при атмосферном давлении (см. обзор [10]), обусловлены большой индуктивностью используемых газовых диодов.

4. Интерпретация полученных результатов следующая. При подаче на промежуток импульса напряжения с длительностью переднего фронта 1 ns и менее на катоде, который имеет малый радиус кривизны, электрическое поле максимально. Поставка электронов в промежуток осуществляется вначале за счет автоэлектронной эмиссии, которая может усиливаться за счет положительного заряда ионов, а затем за счет взрывной эмиссии электронов. При этом усиление поля у катода достаточно для формирования быстрых электронов. Быстрые электроны обеспечивают предыонизацию промежутка, формирование объемного разряда в прикатодной области, а также расширение плазмы со скоростью  $\sim 10^9$  см/с и более за счет движения фронта ионизации к аноду. При этом часть электронов на границе расширяющейся

плазмы ускоряется как за счет положительного напряжения на аноде, так и за счет их выталкивания с поверхности электронного облака. Данный механизм приводит к формированию пучка электронов субнаносекундной длительности. Передний фронт импульса тока пучка определяется передним фронтом импульса напряжения, который имеет субнаносекундную длительность. Кроме того, за счет уменьшения расстояния между плазмой и анодом и дополнительного увеличения электрического поля на фронте импульса напряжения между плазмой и анодом, длительность переднего фронта импульса тока пучка оказывается короче, чем у импульса напряжения. Субнаносекундная длительность заднего фронта импульса тока пучка определяется большой скоростью распространения плазмы после достижения критического поля в локальной области у анода и выравниванием электрического поля в промежутке после прихода плазмы на анод. При данном механизме условия формирования субнаносекундных электронных пучков могут реализоваться в различных газах, в том числе и при высоких давлениях. Для получения наибольших амплитуд тока пучка в газовом диоде должен формироваться объемный разряд.

5. Таким образом, проведенные исследования впервые продемонстрировали, что при увеличении давления гелия до 6 атм и азота до 4 атм условия формирования электронных субнаносекундных пучков сохраняются, и указанные давления не являются предельными. Отметим, что за счет бомбардировки анода быстрыми электронами может создаваться анодная плазма, и тогда, при определенных условиях, критическое поле будет достигаться в области между катодной и анодной плазмой.

Авторы благодарят С.Д. Коровина за поддержку данной работы.

## Список литературы

- [1] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 10. С. 29–35.
- [2] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 16. С. 45–53.
- [3] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М. и др. // ПТЭ. 2003. № 4. С. 81–84.

- [4] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. № 3. С. 94–95.
- [5] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Орловский В.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. С. 737–742.
- [6] Тарасенко В.Ф., Шнак В.Г., Шунайлов С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 21. С. 1–6.
- [7] Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. С. 264–269.
- [8] Губанов В.П., Коровин С.Д., Пегель И.В. и др. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 110–118.
- [9] Яландин М.И., Шнак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [10] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. № 7. С. 49–82.