

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В АЗОТЕ И ГЕЛИИ ПРИ НИЗКОМ НАПРЯЖЕНИИ НА ГАЗОВОМ ДИОДЕ

Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко, Е.А. Хрущ

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

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

Экспериментально зафиксировано, что во время зажигания разряда в атмосфере азота и гелия при низком напряжении на газовом диоде (~25 кВ) происходит генерация пучка убегающих электронов, причем режимы генерации могут быть различными, и зависят от давления газа. Запаздывание момента начала генерации электронного пучка относительно начала спада напряжения на промежутке составляло менее 1 нс. На основе влияния поперечного магнитного поля 0,016 Тл на поведение электронного пучка предполагается, что наносекундный электронный пучок при низких давлениях генерируется у катода. Показано влияние подсветки на генерацию электронного пучка.

В работах [1–6] (см. также обзоры [7–9] и ссылки в них) сообщалось о получении электронных пучков за фольгой газовых диодов, заполненных газами повышенного давления. В этих работах на промежуток подавались импульсы напряжения с амплитудой более 100 кВ. Электронный пучок был получен как на переднем, так и на заднем фронте импульса напряжения во время увеличения проводимости промежутка [7–9]. Как показали последние измерения, длительность тока пучка убегающих электронов на полувысоте при давлении различных газов 1000 гПа составляет ~0,1 нс [4–6, 9]. Известно также об исследованиях рентгеновского излучения из газовых диодов [10, 11] и пучков электронов за сетчатым анодом [12, 13] при малых амплитудах импульсов напряжения ≤20 кВ. Однако в [10–13] использовались осциллографы со сравнительно низким временным разрешением. Кроме того, при низких напряжениях на газовом диоде область генерации электронного пучка и коллектор разделялись сеткой, а, как известно, для вывода пучка убегающих электронов лучше использовать тонкую фольгу. Последнее обстоятельство влияло на точность измерений параметров электронного пучка.

Цель данной работы – исследовать параметры пучка убегающих электронов в азоте и гелии при малом напряжении на промежутке (~25 кВ) и определить в этих условиях время запаздывания генерации пучка и его длительность. При проведении исследований параметры пучка электронов измерялись за металлизированной пленкой, а временное разрешение коллектора и осциллографа было не хуже 0,1 нс.

Экспериментальная установка состояла из разрядной камеры и импульсного кабельного генератора [14]. Внутренний диаметр камеры равнялся ~50 мм. Использовались две конфигурации электродов. Конфигурация электродов № 1 была образована плоским анодом и выпуклым катодом из нержавеющей стали с магнелиевым напылением. Диаметр катода равнялся 20 мм, радиус кривизны 12 мм. Конфигурация электродов № 2 была образована плоским анодом и катодом с малым радиусом кривизны, что приводило к усилению электрического поля у катода. Катод с малым радиусом кривизны был выполнен в виде трубки диаметром ~5 мм из титановой фольги толщиной 50 мкм. Для измерения тока разряда плоский анод был

соединен с корпусом камеры через шунт, состоящий из соединенных параллельно 60 пленочных чип-резисторов с величиной сопротивления 3,3 Ом каждый. При регистрации пучка убегающих электронов анод был выполнен из двух металлических сеток с прозрачностью 64 %, между которыми помещалась металлизированная (слой алюминия толщиной 0,2 мкм) пленка из кимфоли (C₁₆H₁₄O₃) толщиной 2 мкм, или фольга из алюминия толщиной 3 мкм. Расстояние между катодом и анодом обычно составляло 6 мм (конфигурация электродов № 1), или 12 мм (конфигурация электродов № 2). За анодом из сеток с фольгой на расстоянии 9 мм устанавливался коллектор с временным разрешением не хуже 0,1 нс.

В ряде экспериментов в разрядном промежутке присутствовало поперечное магнитное поле (со средней индукцией по оси камеры $\langle B \rangle = 0,016$ Тл), которое создавалось двумя самарий-кобальтовыми магнитами. С помощью фотопленки, расположенной непосредственно за сетчатым анодом, за 200 импульсов регистрировался автограф электронного пучка. Фотопленка была помещена в светонепроницаемый конверт.

В ходе работы проводились оценочные расчеты отклонения пучка электронов при движении в поперечном магнитном поле. Для этого использовалось уравнение движения электрона в скрещенных электрических и магнитных полях при наличии столкновений:

$$m_e \frac{dv_e}{dt} = eE + ev_e \times B - m_e v_e \cdot v_p,$$

где m_e – масса электрона, e – его заряд, v_e – скорость электрона, E – вектор напряженности электрического поля, B – вектор магнитной индукции, $v_p = \sigma_{ea} \cdot n_a \cdot v_e$ – эффективная частота потери импульса, σ_{ea} – сечение электрон-атомных взаимодействий, n_a – концентрация атомов в газе.

Проводились также эксперименты с подсветкой разрядного промежутка излучением барьерного разряда. При подаче импульса высокого напряжения на катод барьерный разряд зажигался между катодом и поверхностью двух кварцевых трубок с внешним диаметром 5 мм, внутри которых помещалась медная фольга. Кварцевые трубки размещались параллельно с двух сторон катода, а медная

фольга соединялись с корпусом газового диода. Спектральный состав излучения барьерного разряда специально не исследовался.

Эксперименты были проведены при заполнении камеры гелием либо азотом при давлении $133...10^5$ Па. Генератор формировал на катоде импульсы напряжения амплитудой 25 кВ, длительностью ~ 90 нс и временем нарастания ~ 5 нс. Отраженные от разрядного промежутка импульсы тока и напряжения поглощались в генераторе. Для регистрации сигналов с емкостного делителя и коллектора применялся осциллограф TDS-6604 с полосой пропускания 6 ГГц и осциллограф TDS-3054B с полосой пропускания 500 МГц.

В ходе экспериментов регистрировались напряжение на электродах и ток разряда, а также напряжение на электродах и ток электронного пучка в гелии и азоте при разном давлении газов.

При подаче на межэлектродный промежуток импульса напряжения амплитудой 25 кВ и длительностью 90 нс промежуток пробивался и, в зависимости от давления газа, формировался объемный либо контрагированный разряд. Характерные осциллограммы тока и напряжения разряда представлены на рис. 1. Время запаздывания пробоя в отсутствие внешней предыонизации изменялось случайным образом и могло составлять десять и более наносекунд (при повышенных давлениях). Предыонизация промежутка стабилизировала время запаздывания пробоя. Так, при давлении гелия 10^3 Па это запаздывание составило $\sim 4...5$ нс.

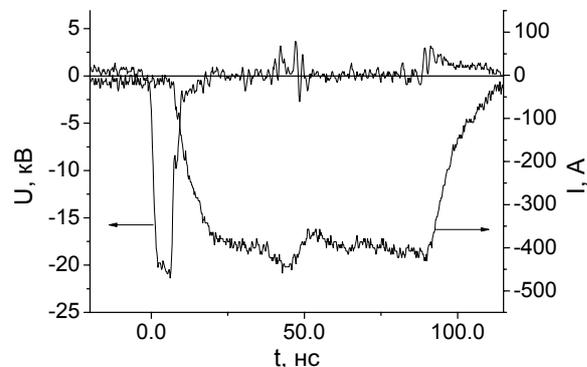


Рис. 1. Ток разряда в гелии и напряжение на электродах для конфигурации электродов № 1 в отсутствие подсветки. Давление гелия $4 \cdot 10^4$ Па

При регистрации пучка убегающих электронов в гелии было замечено, что с уменьшением давления меняется режим генерации убегающих электронов. Для конфигурации электродов № 1 при высоких давлениях гелия ($\sim 8 \cdot 10^4$ Па) реализуется режим генерации СЛЭП (сверхкороткого лавинного электронного пучка [3, 4]) длительностью на полувысоте ~ 200 пс (~ 400 пс по основанию). Разумеется, здесь и ниже даны приближительные значения границ интервалов с различными режимами генерации убегающих электронов. Отметим, что длительность СЛЭП на полувысоте в данных условиях (напряжение на промежутке ~ 25 кВ) оказалась в два раза

больше, чем при подаче на этот же газовый диод импульса напряжения в сотни киловольт [4]. В области давлений гелия $\leq 8 \cdot 10^4$ Па реализуется один из следующих вариантов: однопиковый режим генерации убегающих электронов (длительность импульса $\sim 1,5...3$ нс), двухпиковый режим (длительность первого пика $\sim 1...1,5$ нс, второго пика $\sim 1,5...3$ нс, причем второй пик по амплитуде больше первого), СЛЭП, либо смешанный режим, когда вначале генерируется СЛЭП, а затем – электронный пучок большей длительности. На рис. 2 приведена характерная осциллограмма пучка убегающих электронов, соответствующая смешанному режиму генерации. При давлении гелия $8 \cdot 10^3$ Па разряд загорался уже не в межэлектродном промежутке, а между основанием катодного штока, на котором крепился катодный электрод, и стенками камеры. Амплитуда тока электронного пучка при изменении давления гелия колебалась в широких пределах, достигая при давлении $2,4 \cdot 10^4$ Па максимального значения $\sim 0,1...0,2$ А. Для конфигурации электродов № 2 также наблюдались смешанный и другие варианты режимов генерации при давлении $\leq 2 \cdot 10^4$ Па (величина межэлектродного зазора 12 мм). Запаздывание момента начала генерации электронного пучка относительно начала спада напряжения на промежутке составляло менее 1 нс.

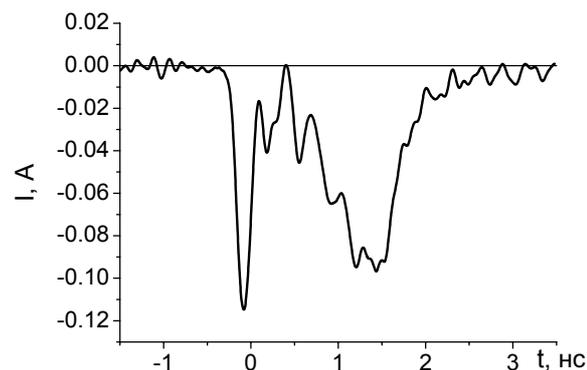


Рис. 2. Ток пучка убегающих электронов. Разряд в гелии при давлении $2,4 \cdot 10^4$ Па. Конфигурация электродов № 1

Для азота при регистрации пучка убегающих электронов наблюдалась подобная картина: в области давлений $8 \cdot 10^3...1,6 \cdot 10^4$ Па регистрировался СЛЭП, при давлении $\leq 4 \cdot 10^3$ Па – наблюдались различные режимы генерации электронного пучка; при давлении $\leq 8 \cdot 10^2$ Па разряд загорался уже не в межэлектродном промежутке, а между основанием катодного штока, на котором крепился катодный электрод, и стенками камеры. Амплитуда тока электронного пучка при изменении давления азота также колебалась в широких пределах. Максимальные значения тока пучка $\sim 0,2...0,3$ А регистрировались при давлении азота $4 \cdot 10^3...8 \cdot 10^3$ Па. Для конфигурации электродов № 2 (величина межэлектродного зазора 12 мм) в области давлений $\sim 1,33 \cdot 10^3...2,66 \cdot 10^4$ Па наблюдался СЛЭП, а при давлении $\leq 8 \cdot 10^2$ Па наблюдались различные режимы генерации электронного пучка. Запаздывание момента начала генерации электронного пучка отно-

сительно начала спада напряжения на промежутке, как и для разряда в гелии, составляло менее 1 нс.

В экспериментах с поперечным магнитным полем ($\langle B \rangle = 0,016$ Тл) регистрировались автографы электронного пучка в присутствии магнитного поля и без него. Фотографии автографов пучка при давлении гелия $6 \cdot 10^3$ Па изображены на рис. 3. Перекрестия на фотографиях автографов – тень от проволочек, закрепленных на сетчатом аноде. Видно, что магнитное поле вызывает смещение электронного пучка.

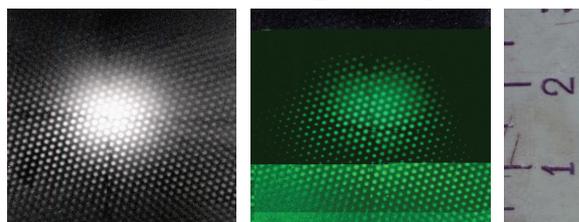


Рис. 3. Автографы электронного пучка в отсутствии магнитного поля и с магнитным полем в разрядном промежутке. Справа – фотография линейки. Гелий, $6 \cdot 10^3$ Па

Эксперименты показали, что при давлении гелия $\leq 6 \cdot 10^3$ Па электронный пучок локализован в небольшой области диаметром менее сантиметра. Увеличение давления гелия увеличивает также рассеяние пучка в газе, что приводит к возрастанию площади электронного пучка и его автографа и отсутствию четких границ. Потому зафиксировать отклонение пучка в магнитном поле уже труднее. При давлении гелия $6 \cdot 10^3$ Па отклонение пучка в магнитном поле составило 2,8 мм, что практически совпадает с оценками смещения, рассчитанными с помощью приведенного выше ура-

внения движения электрона в скрещенных полях при условии, что напряжение на промежутке 25 кВ и электроны начинают ускоряться в области катода. Это соответствие позволяет предполагать, что наносекундный электронный пучок формируется у катода.

Отметим, что основной причиной почернения фотопленки являлся электронный пучок. Для проверки этого между конвертом с фотопленкой и анодом помещалась Al-фольга толщиной 10 мкм. Через такую фольгу электронный пучок не проходит, а рентгеновское излучение ослабляется незначительно. Эксперимент показал, что в присутствии Al-фольги 200 импульсов для получения автографа недостаточно, следовательно, почернение фотопленки вызывается электронным пучком.

Эксперименты с подсветкой межэлектродного промежутка (конфигурация электродов № 1) излучением барьерного разряда показали, что она влияет на генерацию пучка убегающих электронов. Так, при давлении гелия $8 \cdot 10^4$ Па и подсветке межэлектродного промежутка электронный пучок за анодом отсутствовал. В условиях подсветки промежутка электронный пучок за анодом отсутствовал также в азоте при давлении $1,6 \cdot 10^4$ Па. Такое влияние подсветки на генерацию СЛЭП можно объяснить отсутствием необходимой для этого волны ионизации, так как весь промежуток в присутствии подсветки ионизируется одновременно [8]. При использовании подсветки концентрация электронов в промежутке увеличивается более равномерно и критическое поле, необходимое для режима убегания, у анода при повышенных давлениях гелия и азота не достигается.

Работа доложена на VIII Международной конференции «Atomic and Molecular Pulsed Lasers», Tomsk, 10–14 September, 2007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. Быстрые электроны и рентгеновское излучение наносекундных импульсных разрядов в газах при давлениях 0,1–760 Тор // Журнал технической физики. – 1974. – Т. 44. – № 3. – С. 564–568.
2. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. О генерации электронов аномальной энергии при наносекундных разрядах в плотных газах // Журнал технической физики. – 1978. – Т. 48. – № 8. – С. 1617–1620.
3. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. Формирование пучка электронов и объемного разряда в воздухе при атмосферном давлении // Известия вузов. Физика. – 2003. – № 3. – С. 94–95.
4. Tarasenko V.F., Shunailov S.A., Shpak V.G., Kostyrya I.D. Supershort electron beam from air filled diode at atmospheric pressure // Laser and Particle Beams. – 2005. – V. 23. – № 4. – P. 545–551.
5. Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. О динамике формирования субнаносекундного электронного пучка в газовом и вакуумном диоде // Письма в журнал технической физики. – 2006. – Т. 32. – № 1. – С. 35–44.
6. Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. О формировании субнаносекундных импульсов тока пучка большой плотности в газовом диоде при низких давлениях // Письма в журнал технической физики. – 2006. – Т. 32. – № 21. – С. 69–75.
7. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов // Успехи физических наук. – 1990. – Т. 160. – № 7. – С. 49–82.
8. Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. Механизм убегания электронов в плотных газах и формирование мощных субнаносекундных электронных пучков // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174. – № 9. – С. 953–971.
9. Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д. О формировании объемных наносекундных разрядов, субнаносекундных пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения в газах повышенного давления // Известия вузов. Физика. – 2005. – № 12. – С. 40–50.
10. Frankel S., Highland V., Sloan T., Van Dyck, Wales W. Observation of X-rays from spark discharges in a spark chamber // Nuclear Instruments and Methods. – 1966. – V. 44. – P. 345–348.
11. Кремнев В.В., Курбатов Ю.А. Исследование рентгеновского излучения из газового разряда в высоких электрических полях // Журнал технической физики. – 1972. – Т. 42. – № 4. – С. 795–799.
12. Бохан П.А., Колбычев Г.В. Генерация сильнооточных импульсных электронных пучков в газе среднего давления // Журнал технической физики. – 1981. – Т. 51. – № 9. – С. 1823–1831.
13. Сорокин А.П. Влияние компенсационных токов на открытый разряд // Письма в журнал технической физики. – 2003. – Т. 29. – № 10. – С. 15–22.
14. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

Поступила 31.10.2007 г.