

03;04;10

О формировании субнаносекундных импульсов тока пучка большой плотности в газовом диоде при низких давлениях

© *Е.Х. Бакшт, М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко*

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

Поступило в Редакцию 10 мая 2006 г.

Исследовано формирование электронного пучка в различных газах при низких и средних давлениях и наносекундных длительностях импульса напряжения. Показано, что субнаносекундная длительность импульса тока пучка в гелии, водороде, неоне, азоте, аргоне, метане, элегазе, криптоне и ксеноне реализуется как при атмосферном давлении, так и при давлении в единицы-десятки Торр. При длительности импульса на полувысоте ~ 250 ps в гелии получена плотность тока пучка за фольгой более 2 kA/cm^2 . Показано, что при переходе от условий формирования сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) к условиям формирования электронного пучка вакуумного диода амплитуда тока уменьшается, а длительность импульса тока пучка и длительность его переднего фронта возрастают.

PACS: 85.30.Tv, 85.35.-p

1. В работах [1–6] было показано, что длительность импульсов тока пучка, формируемого в газовых диодах при атмосферном давлении различных газов, составляет на полувысоте ~ 100 ps. Это позволяет создавать сравнительно простые ускорители субнаносекундных электронных пучков, в которых на газовый диод подаются наносекундные импульсы высокого напряжения. Исследования, проведенные в [7], показали, что при уменьшении давления гелия до 300 Торр короткая (~ 200 ps) длительность импульсов тока пучка на полувысоте не изменилась. Однако начиная с некоторого давления, которое зависело от сорта используемого газа (гелий, неон, криптон), ток пучка и его длительность на полувысоте начинали увеличиваться. Отметим, что исследования в работе [7] были проведены для гелия при временном

разрешении системы регистрации ~ 0.2 ns, а для неона и криптона разрешение системы регистрации было ~ 1 ns.

Цель настоящей работы — экспериментально исследовать возможность формирования субнаносекундных импульсов тока пучка с длительностью импульса на полувывоте ~ 0.1 – 0.3 ns при малых давлениях различных газов в газовом диоде и импульсах напряжения наносекундной длительности.

2. Эксперименты проводились с использованием газового диода, конструкция которого приведена в работе [8]. Катодом служила трубка из стальной фольги толщиной $50 \mu\text{m}$ и диаметром ~ 6 mm. Вывод электронного пучка осуществлялся через AlBe фольгу толщиной $45 \mu\text{m}$. За AlBe фольгой в экспериментах с большими токами устанавливалась медная фольга толщиной $250 \mu\text{m}$ с отверстием диаметром 0.56 mm на оси газового диода. Ток пучка выводился через это отверстие, что позволяло уменьшить амплитуду сигнала на коллекторе и измерять плотности тока пучка в режимах с большими амплитудами тока пучка. Расстояние между анодом и катодом во всех экспериментах равнялось 14 mm. В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-220, формировавший импульсы напряжения с амплитудой ~ 220 kV, длительностью импульса на полувывоте ~ 2 ns и временем нарастания ~ 0.5 ns [9]. Ток пучка электронов измерялся с помощью коллектора. Коллектор состоял из металлического конуса, образующего с корпусом линию с волновым сопротивлением 50Ω . Линия соединялась с коаксиальным кабелем, также имеющим волновое сопротивление 50Ω . Основание конуса, обращенное к фольге, имело диаметр 20 mm. Для регистрации сигналов с коллектора использовался цифровой осциллограф TDS6604 (6 GHz, 20 GS/s). Применялись широкополосный коаксиальный кабель и аттенюаторы 142-NM фирмы Barth Electronics с полосой пропускания 30 GHz. Разрешение системы регистрации достигало 0.05 ns. Газовый диод откачивался форвакуумным насосом и заполнялся различными газами.

3. Предварительно зависимости амплитуды тока пучка от давления газа были сняты в гелии, водороде, неоне, азоте, аргоне, метане, элегазе, криптоне и ксеноне. Во всех газах при давлении 0.3 – 1 atm были получены электронные пучки с длительностью ~ 0.1 ns. Отметим, что длительность сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП [10]) ~ 0.1 ns для гелия, неона, азота, аргона, метана, элегаза, криптона и ксенона зарегистрирована впервые. Ранее [1–6] длительность

импульса тока пучка в газовом диоде ~ 0.1 ns была зарегистрирована только в воздухе и водороде. Во всех газах при уменьшении давления было зарегистрировано увеличение амплитуды тока пучка электронов за фольгой. Давление, при котором увеличивалась амплитуда тока пучка, зависело от сорта газа. Это давление было максимально для гелия и убывало в следующей последовательности используемых газов: водород, неон, азот, аргон, метан, элегаз, криптон и ксенон. Однако, в отличие от результатов, полученных для гелия на газовом диоде большего размера, питаемом от генератора СИНУС [7], длительность тока пучка при уменьшении давления существенно не изменялась до сравнительно низких давлений.

На рис. 1, *a* приведена зависимость максимальной плотности тока пучка, регистрируемой коллектором, и длительности импульса тока на полувысоте для гелия. В этих экспериментах ток пучка выводился через отверстие диаметром 0.56 mm в медной фольге толщиной 250 μm , установленной после AlBe фольги. Если дополнительная медная фольга с отверстием отсутствовала, то амплитуда сигнала с коллектора намного превышала допустимые амплитуды сигналов для данной системы регистрации. Из рис. 1, *a* видно, что максимальная плотность тока пучка $> 2 \text{ kA/cm}^2$ была получена при давлении гелия $\sim 23 \text{ Torr}$. Длительность импульса на полувысоте при этом составила $\sim 0.25 \text{ ns}$. Распределение плотности тока пучка на поверхности фольги оценивалось по свечению специальной пленки (рис. 1, *b*). Данная пленка была слабо чувствительна к рентгеновскому излучению. Свечение наблюдалось по всему диаметру фольги ($\varnothing 3 \text{ cm}$), а в центре имела область яркого свечения, соответствующая максимальной плотности пучка. Площадь этой области составляла $\sim 0.5 \text{ cm}^2$. Соответственно амплитуда тока пучка при низком давлении гелия превышает 1 kA. При дальнейшем уменьшении давления гелия амплитуда тока пучка начинала уменьшаться, а при давлении менее 1 Torr режим работы диода соответствовал режиму работы вакуумного диода с большим зазором.

Отметим, что еще в работе [11] было замечено, что при давлении гелия $\sim 22 \text{ Torr}$ наблюдается увеличение числа электронов, выводимых за фольгу (до 10^{12}). Однако применявшаяся в [11] система регистрации не позволила провести измерения длительности импульса тока пучка. Кроме того, генератор и газовый диод, использовавшиеся в [11], не были оптимальны для получения СЛЭП. Последнее обстоятельство не позволило в [11] получить при давлении гелия $\sim 22 \text{ Torr}$ ток пучка электронов с амплитудой более 1 kA.

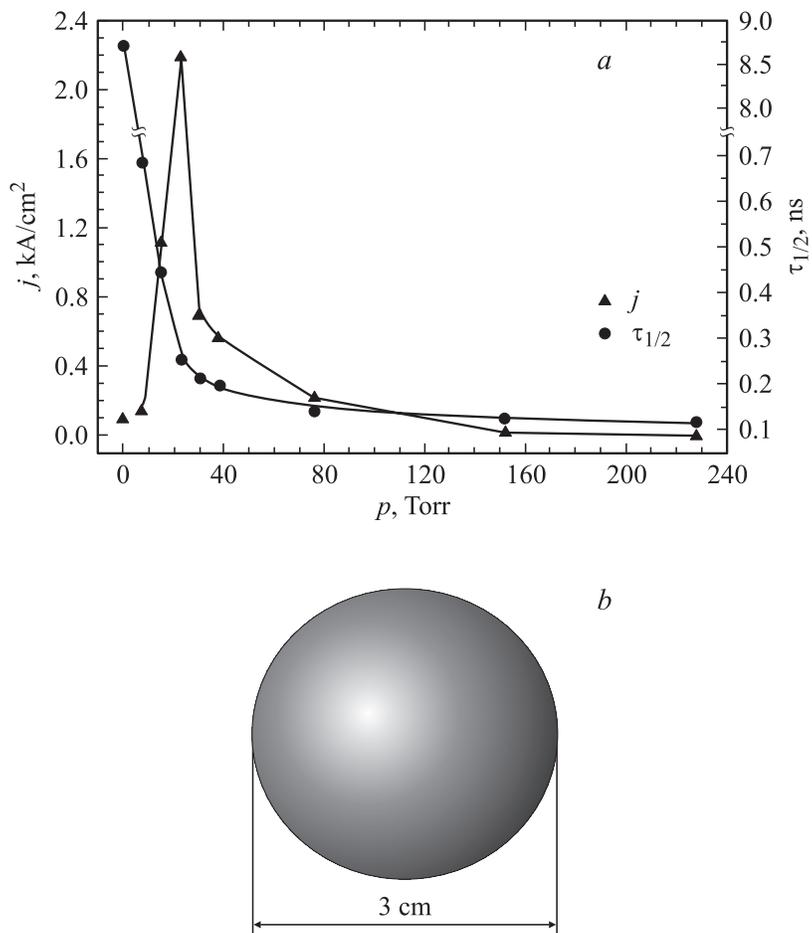


Рис. 1. Зависимости длительности импульса тока пучка $\tau_{1/2}$ и плотности тока за AlBe фольгой j от давления гелия (а). Фотографии свечения пленки под воздействием пучка электронов (б).

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов тока пучка для различных давлений гелия. При давлениях до ~ 20 Torr форма тока пучка соответствует режиму СЛЭП, для которого характерна субнаносекундная длительность тока пучка на полувывоте (рис. 2, *a-c*), а изменяя давление гелия в газовом диоде, можно управлять длительностью тока пучка на полувывоте. При работе в режиме вакуумного диода и переходном режиме наблюдается увеличение длительности переднего фронта импульса тока. При давлении менее 1 Torr форма импульса тока пучка соответствует режиму работы вакуумного диода с зазором больше оптимального. Первый пик соответствует длительности импульса напряжения генератора РАДАН-220, но имеет сравнительно малую амплитуду. Относительно малая амплитуда тока пучка при откачке диода до форвакуума обусловлена большим межэлектродным зазором промежутка. Сопротивление диода было значительно больше оптимального, и импульс напряжения отражался от диода с тем же знаком. После отражения от противоположного конца коаксиальной линии генератора РАДАН-220 формировался второй пик тока пучка [12]. Увеличение амплитуды второго пика обусловлено расширением катодной плазмы. Так как сопротивление вакуумного диода при большом зазоре значительно больше оптимального, энергия в линии генератора оставалась и после двух проходов импульса напряжения, соответственно это приводило к удлинению импульса тока пучка (рис. 2, *d*). Отметим, что в [12] использовался генератор РАДАН-220 с малым зазором между катодом и фольгой (~ 2.6 mm) в вакуумном диоде. Это позволило получить ток пучка электронов ~ 2 кА.

4. Таким образом, проведенные исследования показали, что при давлении 0.3–1 atm во всех исследованных газах (гелий, водород, неон, азот, аргон, метан, элегаз, криптон и ксенон, а также в воздухе) длительность импульса тока пучка на полувывоте составляет ~ 0.1 ns. Показано, что уменьшение давления в газовом диоде (до единиц-десятков Torr) приводит к увеличению амплитуды тока пучка без существенного увеличения длительности импульса тока на полувывоте. При длительности импульса на полувывоте ~ 250 ps в гелии получена плотность тока пучка за фольгой более 2 kA/cm². Показано, что при переходе от условий формирования сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) к условиям формирования пучка в вакуумном диоде амплитуда тока уменьшается, а длительность импульса тока пучка и длительность его переднего фронта возрастают.

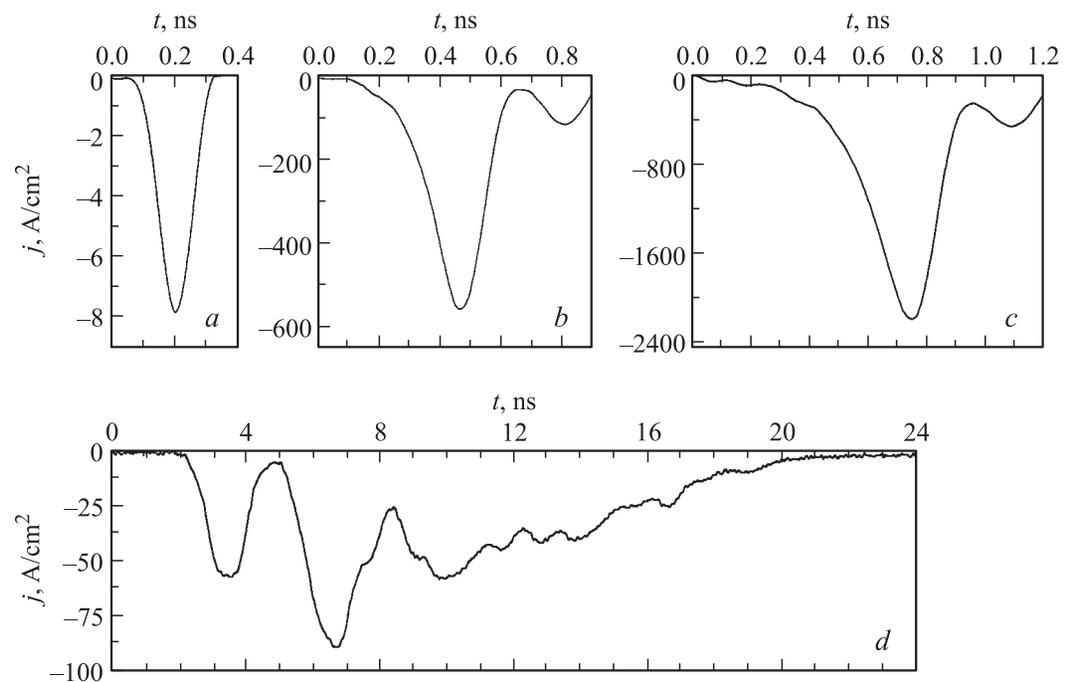


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока пучка за AlBe фольгой при давлениях гелия 230 (a), 40 (b), 23 (c) и 0.1 Torr (d).

Полученные результаты указывают на возможность создания ускорителей электронов с субнаносекундной регулируемой длительностью электронного пучка на основе газовых диодов, заполненных различными газами до давления в единицы-десятки Торр. При этом наибольшие амплитуды тока пучка достигаются в легких газах (гелий, неон, водород), а для питания газовых диодов можно использовать высоковольтные наносекундные генераторы с длительностью переднего фронта импульса напряжения ~ 1 ns.

Список литературы

- [1] Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. // Laser and Particle Beams. 2005. V. 23. N 4. P. 545–551.
- [2] Tarasenko V.F., Костыря И.Д. // Изв. вузов. Физика. 2005. Т. 48. № 12. С. 40–51.
- [3] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.А. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 35–44.
- [4] Tarasenko V.F. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. N 8. P. 1077–1079.
- [5] Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I., Shunailov S.A., Kostyrya I.D., Tkachev A.N. // Laser physics. 2006. V. 16. N 3. P. 526–533.
- [6] Андреев Ю.А., Костыря И.Д., Кошелев В.И., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 105–111.
- [7] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 12. С. 89–93.
- [8] 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.
- [9] Закулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146–149.
- [10] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 3. С. 94–95.
- [11] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 3. С. 564–568.
- [12] Нагорный Д.Ю., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. // ПТЭ. 1990. № 3. С. 169–172.