

04;07;12

О влиянии амплитуды и фронта импульса напряжения на формирование сверхкороткого лавинного электронного пучка в газовом диоде

© В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 12 сентября 2006 г.)

В воздухе атмосферного давления экспериментально исследовано влияние амплитуды и переднего фронта импульса напряжения генератора РАДАН-303 на формирование в газовом диоде сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП). Показано, что при увеличении напряжения холостого хода генератора выше оптимального уменьшаются напряжение на промежутке, при котором генерируется СЛЭП, и амплитуда тока пучка.

PACS: 52.80.Tn

В работах [1–6] было показано, что максимальные амплитуды сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) достигаются при определенном напряжении холостого хода генератора. Увеличение длины разрядного промежутка приводит к повышению оптимального напряжения генератора, но максимальная амплитуда СЛЭП, начиная с некоторой длины промежутка, уменьшалась [6]. В [5] было высказано предположение, что при увеличении напряжения генератора реальная амплитуда тока пучка растет, но при этом снижается длительность импульса тока и суммарный заряд в пучке, что приводит из-за недостаточного разрешения аппаратуры к уменьшению регистрируемой амплитуды тока пучка. Однако измерения длительности тока пучка с разрешением 0.05 ns показали, что длительность тока пучка на полувысоте (~ 0.1 ns) при изменении напряжения генератора заметно не меняется [6].

В [7] было показано, что при субнаносекундной длительности импульса напряжения генератора (~ 150 ps на полувысоте в падающей волне) на амплитуду тока пучка существенное влияние оказывает предимпульс на фронте импульса напряжения. Так, увеличение длительности предимпульса на переднем фронте импульса напряжения от 2 до 3 ns привело к увеличению амплитуды тока пучка убегающих электронов в 2.7 раза. Однако увеличение переднего фронта импульса напряжения до ~ 2 ns привело в [7] к существенному (более чем на порядок) уменьшению амплитуды тока пучка. Последний результат отличался от данных, полученных в [1–6], где при длительности фронта импульса напряжения ~ 1 ns токи пучка были значительно больше. Отметим, что конструкция газовых диодов (изолятора и катода) в [7] и работах [1–6] существенно отличалась.

Цель данной работы — исследовать влияние амплитуды и переднего фронта импульса напряжения, подаваемого на газовый диод, на амплитуду тока пучка убегающих электронов и установить причину уменьшения тока СЛЭП при увеличении напряжения генератора.

Экспериментальные исследования были проведены с использованием генератора наносекундных импульсов РАДАН-303, который подробно описан в [8]. Генератор РАДАН-303 имел волновое сопротивление 45Ω и формировал импульсы напряжения с длительностью на полувысоте ~ 3 ns, амплитудой на согласованной нагрузке от 80 до 200 kV (напряжение холостого хода до 400 kV) и длительностью фронта импульса напряжения в передающей линии ~ 1.2 ns. Напряжение на газовом промежутке могло плавно изменяться при изменении зазора основного разрядника. Конструкция газового диода была подобна используемой в [1–6]. Катод был выполнен из стальной трубки диаметром 6 mm и толщиной стенки $50 \mu\text{m}$, закрепленной на металлическом стержне такого же диаметра. Плоский анод, через который осуществлялся вывод электронного пучка, был образован AlBe-фольгой толщиной $\sim 45 \mu\text{m}$ либо сеткой с прозрачностью по свету $\sim 50\%$. Расстояние между катодом и анодом изменялось от 5 до 20 mm. Эксперименты проводились при атмосферном давлении воздуха в газовом диоде.

Импульсы напряжения регистрировались емкостным делителем, а импульсы тока пучка — коллекторами с временным разрешением ~ 0.2 (коллектор № 1) и ~ 0.1 ns (коллектор № 2). Для измерения сигналов с емкостного делителя и коллекторов использовался цифровой осциллограф TDS6604 (6 GHz, 20 GS/s). Для соединения измерительных электродов с осциллографом применялись широкополосные коаксиальные кабели и аттенюаторы 142-NM фирмы Barth Electronics с полосой пропускания 30 GHz. Разрешение всей системы регистрации достигало 0.05 ns.

В данной работе не ставилась задача по абсолютным измерениям амплитуды пучка электронов с длительностью импульса на полувысоте ~ 0.1 ns, что является весьма сложной задачей. В качестве амплитуды тока пучка мы приводим отношение напряжения на коллекторе к волновому сопротивлению регистрационного

кабеля. При этом не учитывается разряд с коллектора через плазму, создаваемую электронным пучком между коллектором и фольгой. Кроме того, диаметр используемых коллекторов, которые устанавливались на оси газового диода, был в 2.5 раза меньше диаметра фольги, закрывавшей газовый диод.

Максимальные амплитуды тока пучка убегающих электронов за фольгой были получены при формировании в промежутке объемного (диффузного) разряда в виде струй с яркими точками на катоде и напряжении холостого хода генератора 240–280 кВ. Влияние напряжения генератора на амплитуду тока СЛЭП иллюстрирует рис. 1, где приведены осциллограммы импульсов тока пучка за фольгой и импульсов напряжения с емкостного делителя. Осциллограммы тока пучка и напряжения, подаваемые на осциллограф, синхронизированы во времени. Видно, что с ростом амплитуды напряжения генератора соответственно при увеличении dU/dt запаздывание появления пучка уменьшается, а при напряжении генератора 390 кВ — уменьшаются амплитуда напряжения на промежутке во время генерации СЛЭП и амплитуда тока пучка электронов (рис. 1, *c*). Из этих экспериментов следует, что уменьшение амплитуды тока СЛЭП при максимальных амплитудах импульсов напряжения холостого хода генератора связано с меньшими напряжениями на промежутке во время генерации тока пучка. Отметим, что напряжение на промежутке после генерации СЛЭП обычно существенно не уменьшалось. Это следует из осциллограмм импульсов напряжения на рис. 1, где регистрировалось суммарное напряжение падающей и отраженной от газового диода волн напряжения.

Для проверки зависимости СЛЭП от напряжения на промежутке были проведены дополнительные эксперименты при напряжениях холостого хода генератора ниже оптимального. Это позволило, не изменяя напряжения холостого хода генератора, варьировать длительность переднего фронта импульса напряжения и его ампли-

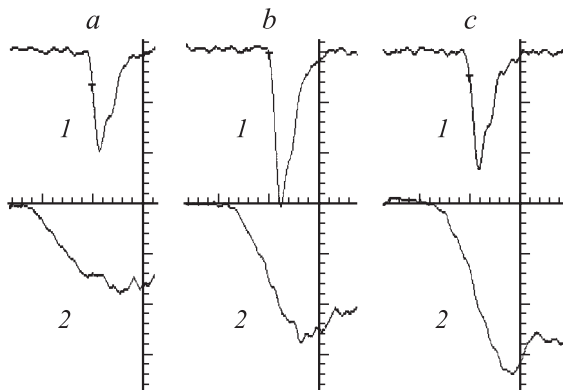


Рис. 1. Осциллограммы импульсов тока пучка электронов за фольгой (1) и напряжения с емкостного делителя (2) при зазоре 12 мм. Масштаб по горизонтали — 0.5 ns/div, масштаб по вертикали для тока с коллектора № 1 0.2 A/div (1) и для напряжения 64 kV/div (2). Напряжение холостого хода генератора 170 (*a*), 280 (*b*) и 390 кВ (*c*).

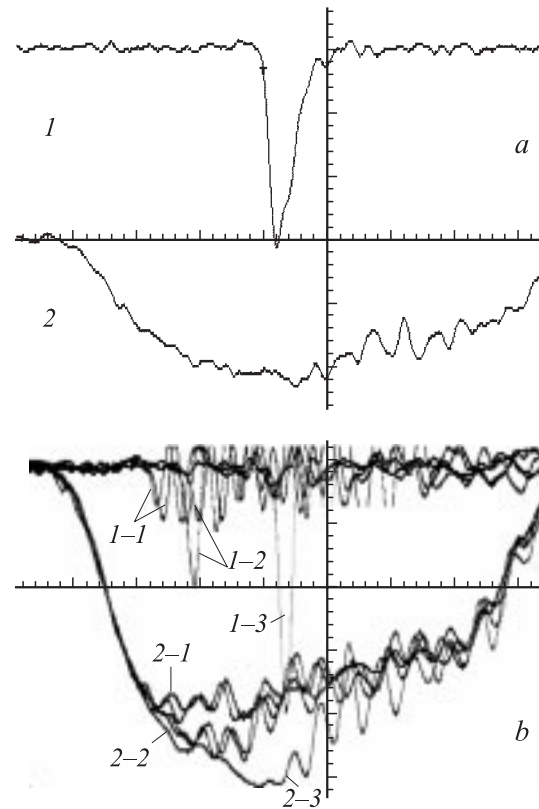


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока пучка электронов за фольгой (1) и напряжения с емкостного делителя (2). *a* — масштаб по вертикали для тока с коллектора № 1 0.2 A/div (1) и для напряжения 64 kV/div (2), зазор 12 мм; *b* — масштаб по вертикали для тока с коллектора № 2 0.4 A/div (1) и для напряжения 25.6 kV/div (3), зазор 11 мм. Масштаб по горизонтали 0.5 ns/div. Напряжение холостого хода генератора 170 (*a*) и 160 кВ (*b*).

туду во время генерации СЛЭП. На рис. 2, *a* показаны импульсы напряжения на промежутке и тока пучка при напряжении холостого хода генератора 170 кВ. При данном напряжении СЛЭП обычно регистрировался через 0.7 ns после подачи импульса напряжения на промежуток (рис. 1, *a*). Однако в одном из нескольких сотен импульсов фиксировалась большая задержка появления пучка электронов (~ 1.5 ns на рис. 2, *a*), при этом увеличилось напряжение во время генерации СЛЭП и амплитуда тока пучка (величина сигнала с коллектора). Амплитуда СЛЭП составила 0.6 А и была в 1.5 раза больше, чем при задержке СЛЭП ~ 0.7 ns. Данная амплитуда в 6 раз и более превышала амплитуду тока, зарегистрированную в [7] в подобных условиях.

При дальнейшем уменьшении напряжения холостого хода (рис. 2, *b*) можно было многократно наблюдать различные задержки при формировании СЛЭП. Для импульсов напряжения при которых СЛЭП генерировался через ~ 0.8 ns (осциллограммы 1-1 и 2-1), амплитуда тока пучка была наименьшей. С увеличением времени запаздывания до появления СЛЭП (осциллограммы 1-2, 2-2 и 1-3, 2-3) возрастало напряжение на промежутке

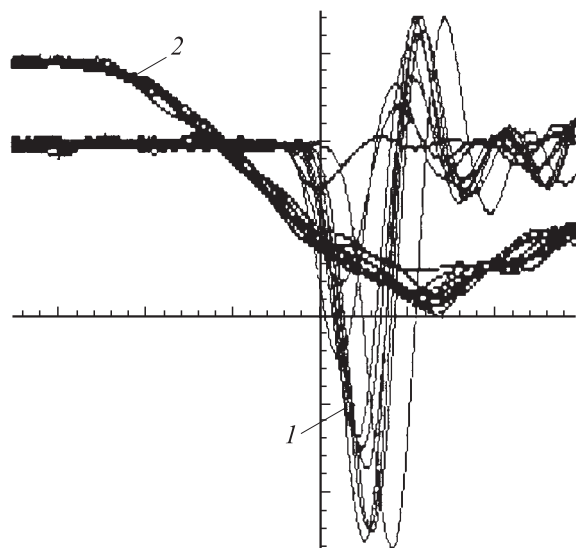


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока пучка электронов за фольгой (1) и напряжения с емкостного делителя (2). Масштаб по горизонтали 0.2 ns/div, масштаб по вертикали для тока с коллектора № 2 0.8 A/div (1) и для напряжения 64 kV/div (2). Напряжение холостого хода генератора 280 kV.

и амплитуда тока СЛЭП. При этом в момент появления СЛЭП на осциллограмме импульса напряжения появились осцилляции, и напряжение начинало уменьшаться. Следовательно, для получения максимальной амплитуды тока пучка за фольгой надо иметь максимальное напряжение на промежутке во время генерации СЛЭП, а длительность фронта импульса имеет меньшее значение. Кроме того, важно подобрать оптимальное расстояние между катодом и анодом, а также оптимальную конструкцию катода и газового диода. На рис. 3 приведены 10 импульсов напряжения и тока, полученные при оптимальных напряжениях холостого хода генератора и зазоре 11.5 mm для генератора РАДАН-303 и катода в виде трубочки. Максимальные амплитуды тока пучка регистрируются при максимальных напряжениях во время генерации СЛЭП. Из рис. 3 также следует, что при малых задержках до формирования СЛЭП амплитуда тока пучка уменьшается.

Согласно предложенному в [1] механизму, генерация СЛЭП происходит при достижении критического поля между фронтом волны ионизации, которая движется от катода, и анодом. На основе анализа представленных и опубликованных ранее [1–7,9] результатов мы полагаем, что волна ионизации в режимах, оптимальных для формирования СЛЭП, инициируется взрывом микроострий на катоде. Момент времени, соответствующий взрывной эмиссии на катоде, очень важен для формирования СЛЭП. Известно [8], что в генераторах РАДАН-303 имеется предимпульс на осциллограмме напряжения, амплитуда которого растет с ростом напряжения зарядки коаксиальных линий генератора (напряжения холостого хода генератора). При увеличении амплитуды напряжения холостого хода генератора напряжение на

промежутке во время предимпульса увеличивается, соответственно уменьшается задержка до взрыва микроострий на катоде [10] и, как мы предполагаем, задержка до прихода волны ионизации к аноду. Это приводит при больших напряжениях генератора к формированию СЛЭП при более низких напряжениях, чем в оптимальном режиме.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при увеличении напряжения холостого хода генератора РАДАН-303 выше оптимального напряжение на промежутке во время формирования СЛЭП в воздухе атмосферного давления уменьшается. Это приводит при больших напряжениях генератора к уменьшению амплитуды тока СЛЭП. Данный факт можно объяснить более ранним достижением порогового тока для взрывной эмиссии электронов, плазма которой инициирует волну ионизации в промежутке.

Автор благодарит В.Г. Шпака за предоставление генератора РАДАН-303, а также С.А. Шунайлова за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке Программы „Фундаментальные проблемы нано- и пикосекундной электроники большой мощности“.

Список литературы

- [1] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 3. С. 94–95.
- [2] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Орловский В.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. Вып. 11. С. 737–742.
- [3] Тарасенко В.Ф., Алексеев С.Б., Орловский В.М. и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 8. С. 30–34.
- [4] Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D. et al. // Laser and Particle Beams. 2004. Vol. 22. N 1. P. 75–82.
- [5] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Орловский В.М., Ткачев А.Н. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 30. С. 68–74.
- [6] Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. // Laser and Particle Beams. 2005. Vol. 23. N 4. P. 545–551.
- [7] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 35–44.
- [8] Яландин М.И., Шпак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [9] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [10] Месяц Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000.