

10

## Источник электронов и режим ускорения пикосекундного пучка в газовом диоде с неоднородным полем

© Г.А. Месяц, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

E-mail: mesyats@pran.ru

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

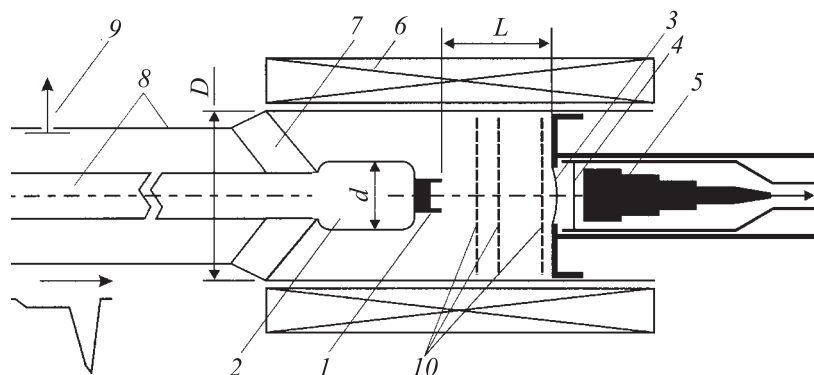
E-mail: yalandin@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 10 апреля 2007 г.

Экспериментально показано, что в воздушном промежутке при атмосферном давлении и резко неоднородном поле на катоде при подаче субнаносекундного высоковольтного импульса формируется пучок убегающих электронов в прикатодной области. Пучок имеет длительность не более 50 ps, что меньше времени пролета электронами зазора катод–анод в режиме непрерывного ускорения. Длительность пучка не менялась при вариации зазора от 6 до 26 mm. Времяпролетные измерения энергии частиц пикосекундного пучка в дрейфовом канале за анодной фольгой газового диода находятся в соответствии с численным расчетом динамики ускорения электронов в вакуумном приближении.

PACS: 51.50.+v, 52.59.Tb, 52.80.Tn

В работах [1,2] экспериментально исследовались и сравнивались динамические эмиссионные характеристики электронного диода с ненакаливаемым катодом в условиях вакуумной изоляции и газового заполнения. Особенностями экспериментальной схемы являлось резко неоднородное распределение потенциала в ускоряющем промежутке, обусловленное геометрией электродов: трубчатый графитовый катод и плоский анод (алюминиевая фольга или сетка). Для регистрации полного тока пучка электронный диод и датчик тока помещались в аксиальное магнитное поле  $\sim 1$  Т. Было показано, что при амплитуде напряжения на катоде газового диода  $\sim 150$  kV для формирования электронного пучка достаточно длительности ускоряющего импульса, сравнимой с временем ускорения электрона в аналогичном по конфигурации вакуумном диодном промежутке. В [1] также было высказано предположение, что увеличение тока в газонаполненном диоде возможно с ростом площади



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1, 2 — графитовый катод и катодный электрод; 3, 4 — анодная фольга и фольга, экранирующая коллектор датчика тока (Al,  $15 \mu\text{m}$ ); 5 — ступенчатая передающая линия датчика тока пучка; 6 — импульсный соленоид; 7 — проходной изолятор „масло–вакуум (газ)“; 8 — электроды передающей линии; 9 — емкостной делитель напряжения; 10 — три положения пленочной диафрагмы в зазоре диода.  $D = 47 \text{ mm}$ ;  $d = 17 \text{ mm}$ ;  $L = 6\text{--}26 \text{ mm}$ .

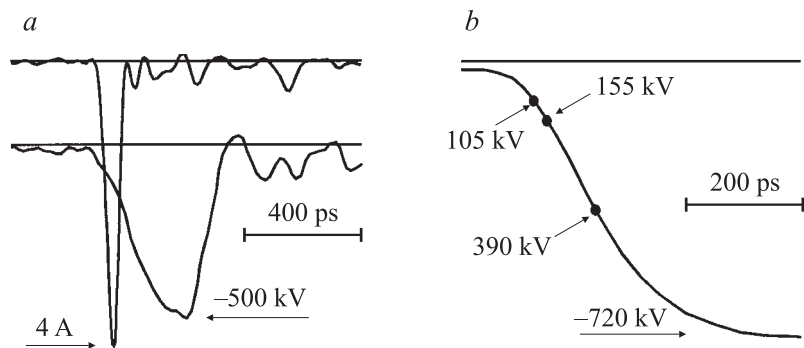
катода, если обеспечить такое же значение электрического поля на его кромке. Это было продемонстрировано в специальном эксперименте [2], где в качестве нагрузки субнаносекундного высоковольтного генератора применялся ленточный газонаполненный диод с лезвийным фольговым катодом длиной 200 mm, работавший в режиме бегущей волны ускоряющего напряжения. Анализ механизма инициирования инжекции пучка в газовом диоде для условий экспериментов [1,2] приведен в работе [3], где было высказано предположение, что реальная длительность тока электронов может составлять  $10^{-11} \text{ s}$  из-за автоэлектронной природы убегающих электронов.

В настоящей работе продолжено изучение режимов формирования электронного пучка в ускорительном диоде [1] с конфигурацией, показанной на рис. 1. При проведении настоящих исследований были использованы новые экспериментальные методы. В частности, разработан токовый датчик пучка с временным разрешением лучше 30 ps, и применен цифровой осциллограф реального времени с полосой регистрации 15 GHz (Tektronix TDS6154C, аналоговая переходная характеристика — 28 ps, дискретизация — 25 ps). Задачей работы являлось

экспериментальное доказательство автоэлектронного характера иницирования пикосекундного пучка в газовом промежутке [3], уточнение его длительности, определение пространственной области инжекции и момента формирования по отношению к фронту ускоряющего напряжения, а также условий, определяющих этот момент и соответственно энергию электронного пучка.

Датчик электронного пучка представлял дисковый коллектор диаметром 10 mm, образованный торцом вакуумной 5-ступенчатой передающей линии с входным волновым сопротивлением  $\sim 7 \Omega$  и 50-омным выходом. Без влияния отражений на выходе линии могли регистрироваться сигналы с длительностью до 300 ps. Коллектор экранировался алюминиевой фольгой (15  $\mu\text{m}$ ). Величина зазора фольга–коллектор и профиль коллектора в координатах  $R-Z$  оптимизировались в численной модели, построенной в рамках кода KARAT [4]. В результате оптимизации датчик обеспечивал расчетную неискажающую трансформацию токового импульса падающего пучка и передачу по линии соответствующего сигнала с фронтом короче 20 ps. Вместе с фольгой перед коллектором мог устанавливаться дисковый коллиматор пучка с узкими симметричными радиальными щелями. Аналогичный коллиматор по необходимости монтировался у анодной фольги вакуумного диода. Применение таких коллиматоров позволило отказаться от использования коаксиальных аттенуаторов в кабельном тракте регистрации, в результате чего датчик тока подключался непосредственно к осциллографу широкополосным кабелем (Times-Microwave SFT-304, частота отсечки 23 GHz) без каких-либо дополнительных коаксиальных соединителей. Такой режим применялся в измерениях с предельным разрешением по времени, а также в тех случаях, когда было недопустимо включать в кабельный тракт любые элементы, вносящие дополнительную задержку по времени, при этом измеряемые амплитуды сигналов отличались в  $10^2$ – $10^3$  раз. Последнее было характерно при сравнении режимов работы диода с вакуумной и газовой изоляцией. В то время как в диоде мог быть атмосферный воздух или вакуум, дрейфовый участок между анодной фольгой и датчиком тока пучка вакуумировался всегда.

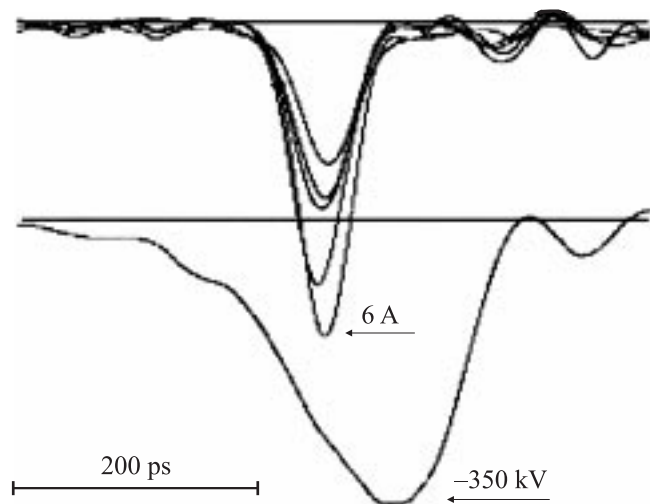
С использованием отмеченной техники и подходов в экспериментах было показано, что длительность токового импульса электронного пучка с точностью  $\pm 5$  ps не зависит от величины ускоряющего зазора атмосферного диода, который варьировался в пределах 6–26 mm. При этом даже наименьшую зарегистрированную длительность пучка на полувывоте в 45 ps (рис. 2, *a*) следует признать оценкой сверху, поскольку



**Рис. 2.** *a* — осциллограммы тока пучка газового диода с минимальной зарегистрированной длительностью на полувысоте 45 ps (верхний луч) и импульс ускоряющего напряжения (нижний луч). Зазор катод–анод  $L = 11$  mm; фокусирующее магнитное поле 1 Т. Относительной привязки осциллограмм тока и напряжения по времени нет. *b* — изменение „стартового“ напряжения инжекции пучка газового диода на фронте ускоряющего импульса при вариации зазора диода и геометрии кромки катода. Амплитуды напряжения приведены для режима холостого хода.

фронт импульса (32–34 ps) был фактически на уровне переходной характеристики осциллографа, а спад — еще короче (23–25 ps). Вне зависимости от зазора диода длительность пучка принципиально не менялась как для катодов с различной геометрией кромки, так и для катодов одинаковой формы, но изготовленных из материалов с отличающимися эмиссионными характеристиками: графита или нержавеющей стали. Как и в работе [1], не было отмечено принципиальных изменений длительности пучка с удлинением импульса напряжения (рис. 2, *b*), если его фронт не менялся. При заданном зазоре диода выяснено, что для идентичной геометрии катодов из упомянутых материалов момент инжекции пучка относительно фронта ускоряющего импульса оставался постоянным. В то же время регистрируемая амплитуда тока для стального катода была типично в 10–20 раз выше и при определенном зазоре диода и геометрии кромки катода диаметром 6 mm достигала 15–20 А.

При фиксированном положении датчика тока в дрейфовой камере была проведена регистрация импульса тока электронов за анодной фольгой газового диода в условиях, когда в его зазоре длиной 11 mm в

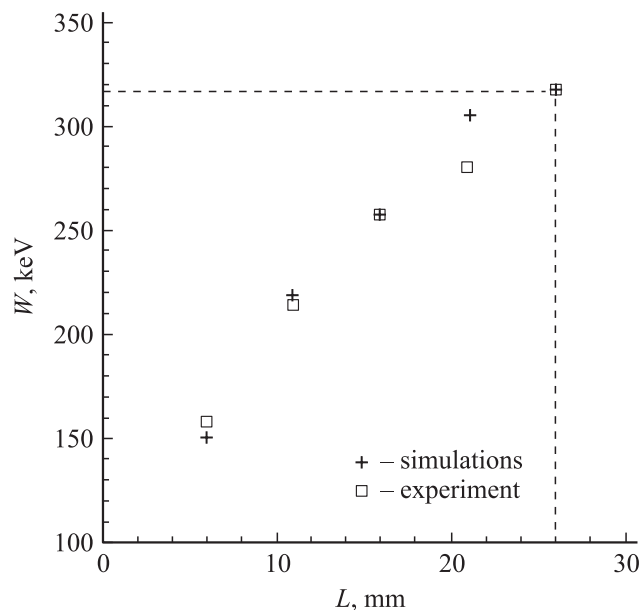


**Рис. 3.** Верхний луч — изменение амплитуды импульса тока пучка газового диода при сканировании ускоряющего зазора диафрагмой из лавсановой пленки. Последовательно (со снижением амплитуды тока) показаны режимы регистрации: без диафрагмы; диафрагма перед коллектором датчика тока; диафрагма внутри диодного зазора в 1, 4 и 6 мм от анодной фольги. Зазор катод–анод  $L = 11$  мм; фокусирующее магнитное поле 1 Т. Нижний луч — ускоряющий импульс. Относительной привязки осциллограмм тока и напряжения по времени нет. Амплитуда напряжения приведена для режима холостого хода.

различных точках по продольной координате устанавливалась диафрагма из лавсановой пленки ( $50\ \mu\text{m}$ ) без металлизации, перекрывавшая весь диод в радиальном направлении. При этом было отмечено, что регистрируемое амплитудное ослабление тока пучка диафрагмой, расположенной в диоде на расстоянии 1 мм от анода, весьма близко к ослаблению такой же пленкой, установленной перед коллектором пучка (30–40 и 20–30% соответственно) в случае, когда в диоде диафрагма не устанавливалась. Было показано, что электроны простреливают пленку с постепенным снижением амплитуды тока пучка по мере смещения диафрагмы по направлению от анода к катоду (рис. 3). Это показывает, что электроны ускоряются до энергий, достаточных для прохождения сквозь пленку, уже вблизи катода.

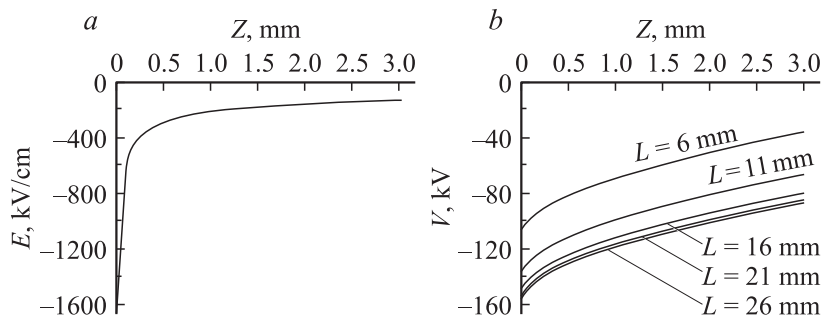
Как и в работах [1,2], в представленных выше экспериментах не предпринималось попыток оценить энергию электронов методом фильтров. Сравнивая импульс тока пучка на осциллографах с полосой 6 и 15 GHz, становится ясно, что в условиях ограничения полосы регистрации осциллографа и датчика тока нельзя получить корректную информацию об ослаблении тока электронов пакетами фольг и восстанавливать по этим данным энергетические спектры частиц. Более адекватным методом оценок эффективной энергии электронов в сгустке с характерной пространственной длительностью  $\sim 10$  mm можно считать времяпролетный метод. В настоящих экспериментах для времяпролетных измерений датчик тока пучка смещался в дрейфовой камере от ближайшего положения к анодной фольге на фиксированное расстояние, составляющее 30 mm. Синхронизация запуска осциллографа осуществлялась по наиболее крутому участку фронта импульса ускоряющего напряжения и не имела видимой нестабильности. Изменение времени дрейфа пучка фиксировалось по точке на полувысоте фронта импульса с токового датчика. При этом использовались осциллограммы, усредненные по серии из 10 включений, которые воспроизводились от серии к серии без существенных расхождений.

Времяпролетные измерения дают возможность не только оценить эффективную энергию электронов в сгустке (рис. 4), но и определить момент инжекции пучка на фронте импульса ускоряющего напряжения (рис. 2, *b*). Важным обстоятельством являлось то, что до момента пробоя газового промежутка напряжение на катоде  $U(t)$  определяется достаточно корректно из-за очевидного режима холостого хода при инжекции токов амперного уровня. При выключенном срезающем разряднике высоковольтного генератора амплитуда импульса на катоде могла достигать  $\sim 700$  kV за 400 ps (рис. 2, *b*). Геометрия диода (рис. 1) и параметры импульса напряжения (рис. 2, *b*) использовались в полномасштабной численной модели времяпролетных измерений, построенной в рамках кода КАРАТ в приближении вакуумного режима ускорения в диоде. На начальном этапе моделирования был определен момент инжекции тока на фронте  $U(t)$ , для которого при зазоре диода в 26 mm достигалось соответствие экспериментальных и численных времяпролетных измерений энергии электронов (точка 155 kV на рис. 2, *b*). Затем, для использованного в экспериментах катода диаметром 6 mm с помощью кода SAM [5] было рассчитано нормальное электрическое поле  $E_{\perp}$  в центре эмитирующей кромки толщиной 100  $\mu$ m, аппроксимированной полутораидальным профилем. В нашем



**Рис. 4.** Эффективная энергия электронов пикосекундного пучка, измеренная времяпролетным способом при изменении ускоряющего зазора от 6 до 26 мм, и соответствующие расчетные данные численной модели времяпролетных измерений. Диаметр катода — 6 мм, кромка — 0.1 мм, материал — нержавеющая сталь. Ускоряющий импульс, как на рис. 2, *b*.

случае выполнялось условие  $E_{\perp} \equiv E_Z \approx 1500 \text{ kV/cm}$ . На следующем этапе, когда изучалась динамика пролета пучком тестового дрейфового участка с уменьшением зазора катод–анод, момент инжекции пучка на фронте  $U(t)$  смещался в расчетах таким образом, чтобы на кромке катода обеспечивалось неизменное значение  $E_{\perp}$ . Для наименьшего зазора диода в 6 мм „стартовое“ напряжение составило, например,  $\sim 105 \text{ kV}$  (рис. 2, *b*). В результате для численной модели „вакуумного“ ускорения в диоде были получены значения эффективной энергии пучка (рис. 4), которые практически совпадают с экспериментальными, найденными для случая газовой изоляции. На рис. 5 показаны распределения электрического поля  $E_Z(z)$  и потенциала  $V(z)$ , рассчитанные при различных стартовых напряжениях на катоде методом [5] для



**Рис. 5.** Расчетные распределения электрического поля на интервале 0–3 мм от кромки катода по направлению к аноду (а) и потенциала на этом же интервале (b) при вариации полного зазора диода от 6 до 26 мм. Распределения построены для значений „стартового“ напряжения инжекции пучка газового диода, смещающегося на фронте ускоряющего импульса от –105 до –155 кV (рис. 2, b).

условий совпадения эксперимента и модели (рис. 4). На первых 2–3 мм зазора, который варьировался от 6 до 26 мм, распределение  $E_z(z)$  точно совпадает, а зависимость  $V(z)$  только параллельно смещается. Последнее означает идентичность темпа набора энергии электронами, т.е. неизменные условия для перехода их в режим непрерывного ускорения.

Определяющая роль электрического поля в плане выбора напряжения инжекции пучка была специально проверена для фиксированного зазора катод–анод, но при существенном изменении геометрии кромки. При постоянном внешнем диаметре катода, изготовленного из нержавеющей стали, толщина кромки была увеличена с 0.1 до 1 мм, а радиус скругления составил 0.5 мм. В этом случае „рабочая точка“ инжекции на фронте ускоряющего импульса (рис. 2, b) сместилась в сторону большего напряжения, до 390 кV, т.е. в такой степени, чтобы вновь обеспечить на катоде поле  $E_{\perp} \sim 1500$  кV/cm. Это привело к согласованному росту измеряемой времяпролетным методом эффективной энергии электронов до  $\sim 500$  keV. Такая энергия достигается потому, что за время пролета электронами ускоряющего промежутка со скоростью, меньшей скорости света, напряжение на диоде существенно возрастает по отношению к „стартовому“ (390 кV в данном случае). Заметим, что данный факт при корректном учете большого резерва



амплитуды напряжения в режиме холостого хода в ряде случаев может объяснить неоднократно отмеченную экспериментальную регистрацию электронов с так называемой „аномально высокой энергией“.

В дополнение к выводам работы [1] следует отнести новую полученную информацию о сравнении моментов инжекции пучка диода при атмосферном заполнении и его вакуумировании. Было выяснено, что момент инжекции пучка в вакууме и газе совпадает с точностью измерений, но это явно реализуется только для катодов с нетренированной кромкой. Надо полагать, что в начале вакуумного токового импульса присутствуют „те же самые“ электроны, что и для случая с газом. При тренировке стального катода в вакуумных условиях вследствие эффекта полировки [6] быстро нарастает задержка эмиссии тока:  $\sim (40-60)$  ps за 100 включений (с параметрами импульса напряжения, показанными на рис. 2, а). По мере такой полировки в вакууме обнаружилось коррелированное смещение момента инжекции пучка и на контрольных включениях диода в режиме атмосферного заполнения. Амплитуда пучка атмосферного диода при этом постепенно снижалась, а затем ток прекращался совсем. Картина инжекции, однако, восстанавливалась как в вакууме, так и в газе после механической регенерации микрорельефа на кромке катода. Диод с графитовым катодом давал аналогичную картину роста задержки эмиссии, но при гораздо более длительной тренировке, что согласуется с данными исследований [7,8]. Можно утверждать, что наряду с макроскопическим полем на катоде для инжекции пучка в газовом промежутке критично усиление поля на неоднородностях микрорельефа поверхности, т.е. действительно имеет место автоэмиссионное инициирование [3]. В этом аспекте становится понятной роль низковольтного наносекундного предимпульса напряжения [1], предварительное воздействие которого инициирует больше микроскопических автоэммиттеров электронов. Инжектированные при этом электроны в низком электрическом поле не могут перейти в режим непрерывного ускорения, но способны создать некоторый фон ионизованного газа вблизи автоэммиттеров, который с ростом напряжения на пикосекундном фронте наряду с автоэмиссионными электронами будет источником дополнительных ускоряемых электронов. По-видимому, в дальнейшем переходе автоэлектронной эмиссии во взрывную следует искать одну из возможных причин быстрого прекращения инжекции пучка в атмосферном промежутке с резко неоднородным распределением потенциала. При взрыве автоэммиттера создается плотная плазма, которая в движении уже за время  $\sim 10^{-11}$  s резко меняет картину

искажения поля в области  $\sim 100$  nm, и в результате принципиально меняются начальные условия ухода электронов в режим непрерывного ускорения.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

— наблюдаемый за анодной фольгой газонаполненного диода пучок образован электронами, инжектированными с катодной кромки и из примыкающей к ней области газа, ионизованного этими частицами;

— пучок проходит в режиме непрерывного ускорения весь зазор диода;

— длительность пучка меньше времени пролета зазора диода и не превышает 50 ps;

— момент инжекции пучка убегающих электронов определяется некоторым критическим электрическим полем на катоде.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 06-08-08115, 06-08-00637.

## Список литературы

- [1] Месяц Г.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 35–44.
- [2] Shunailov S.A., Shpak V.G., Yalandin M.I. // Conf. Gude and Abstracts of 1st Euro-Asian Pulsed Power Conf. Chengdu, China: Institute of Fluid Physics CAEP, 2006. P. 72.
- [3] Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85. В. 2. С. 119–122.
- [4] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [5] Туунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П. SAM-Интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1989. № 89–159.
- [6] Месяц Г.А. и др. // ДАН СССР. 1976. Т. 227. № 6. С. 1335–1337.
- [7] Коровин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 19. С. 30–39.
- [8] Гущин А.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 22. С. 84–94.