

09;10;12

## Электроны с повышенной энергией в наносекундном электронном пучке вакуумного диода

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

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

(Поступило в Редакцию 4 сентября 2006 г.)

Исследованы характеристики отпаянного вакуумного диода ИМА3-150Э, подключенного к генератору наносекундных импульсов РАДАН-220. В электронном пучке за фольгой зарегистрированы электроны с повышенной энергией (превышающей напряжение на диоде). Показано, что электроны с повышенной энергией появляются на фронте импульса тока, длительность тока пучка этих электронов составляет 200–450 ps на полувысоте, а их амплитуда достигает десятков ампер.

PACS: 42.60.Jf

### Введение

В настоящее время импульсные ускорители электронов и рентгеновские аппараты находят широкое применение в различных областях науки и техники [1]. Для создания таких приборов используются различные генераторы, в частности малогабаритные наносекундные генераторы серии „РАДАН“ [2]. На выходе генератора устанавливается вакуумный диод или рентгеновская трубка, и генератор становится ускорителем электронов или рентгеновским аппаратом соответственно.

При проведении исследований с применением электронных пучков необходимо знать характеристики электронного пучка. Наиболее важные параметры — это амплитуда тока пучка, его длительность и форма, распределение электронов по энергиям, а также распределение плотности тока пучка по сечению выходного окна вакуумного диода. Такие исследования проводились в ряде работ [3–6]. В частности, было показано [3,4], что при использовании генератора РАДАН-220 с отпаянной электронной трубкой ИМА3-150Э [7] амплитуда тока пучка составляет 500–1000 А. В недавней работе [6] были получены энергетические спектры электронного пучка ускорителей с генераторами РАДАН-ЭКСПЕРТ и РАДАН-220, а также измерено пространственное распределение поглощенной дозы при облучении пучком электронов. В спектре электронов пучка, максимальная амплитуда которого составила ~ 500 А, были зарегистрированы электроны с повышенной энергией, т.е. имеющие энергию большую, чем напряжение, формируемое генератором. Для генератора РАДАН-220 это напряжение пробоя обострительного разрядника.

О существовании в электронном пучке, формируемом в вакуумном диоде, электронов с повышенной энергией (превышающей приложенное напряжение в несколько раз) известно давно [8]. Проведенные ранее исследования не позволяют однозначно трактовать механизм появления электронов с энергией, большей, чем они

могут приобрести благодаря прикладываемому к вакуумному диоду напряжению. Высказывались различные предположения о физическом механизме этого явления. Так, в одной из первых работ по регистрации электронов с повышенной энергией [8] говорится о том, что электроны могут приобретать большую энергию, ускоряясь в электрических полях. Эти поля возникали при перераспределении тока в процессе сжатия плазменного шнура вакуумного разряда или в локальных электрических полях, появляющихся в результате развития неустойчивостей плазменного шнура (типа перетяжек и разрывов). Возможной причиной появления сильных электрических полей называется также внутренняя неустойчивость вакуумных дуг, определяемая неустойчивостью катодного пятна на металлах. В работе [9] перенапряжения, вызывающие появление электронов с повышенной энергией, связывают с большими значениями  $dI/dt$  при срыве общего тока, возникающего в режиме неустойчивого токоотбора. В работе [10] электроны с повышенной энергией были также зарегистрированы в режиме неустойчивого токоотбора. В [10] был сделан вывод о том, что предельная энергия электронов с повышенной энергией  $E_{lim}$  не зависит от длительности напряжения ( $10^{-8}$ – $10^{-7}$  s) и величины межэлектродного зазора ( $d = 4$ – $32$  mm), а определяется максимальной энергией электронов в пучке ( $E_{max} = 150$ – $300$  keV): для многоострийного катода  $E_{lim} \approx 3E_{max}$ , а для одиночного острия  $E_{lim} \approx 2E_{max}$ . В этой же работе было высказано предположение о том, что аномальные электроны могут появляться из-за стохастического ускорения электронов в плазме катодного факела на ленгмюровской турбулентности, возбуждаемой при развитии электронно-дрейфовой неустойчивости. Известно также, что напряжение на промежутке может увеличиваться (вплоть до двукратного) при зарядке емкости вакуумного диода [2].

В работе [11] электроны с повышенной энергией возникали при транспортировке субнаносекундного электронного пучка в дрейфовой камере. Их появление

объясняется автоускорением части электронов в поле волны пространственного заряда, возбуждаемой в плотном электронном потоке.

Отметим, что большая часть публикаций, в которых рассматривались вопросы, связанные с электронами повышенной энергии, вышла в свет несколько десятилетий назад и что ни в одной из экспериментальных работ, выполненных ранее, не ставилась задача установить время появления электронов с повышенной энергией и измерять длительность импульса тока пучка этих электронов. Наличие современной аппаратуры позволяет провести более точные измерения с необходимым для этого субнаносекундным временным разрешением.

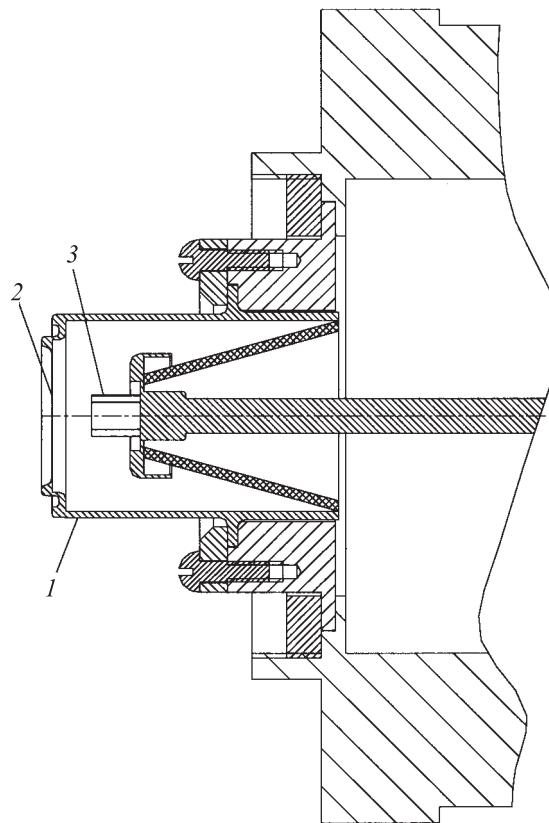
Целью настоящей работы является исследование характеристик отпаянного вакуумного диода ИМА3-150Э, работающего в режиме взрывной электронной эмиссии при питании от генератора наносекундных импульсов РАДАН-220, и регистрация времени появления электронов с повышенной энергией в электронном пучке.

## Экспериментальная установка и методики

При проведении экспериментов использовался малогабаритный генератор РАДАН-220 [2,4], к которому подсоединялась отпаянная электронная трубка ИМА3-150Э [7]. Передняя часть ускорителя с электронной трубкой изображена на рис. 1. Ток электронного пучка измерялся датчиками тока. Использовались низкоомный шунт ( $0.1 \Omega$ ), приемная часть которого была образована дисковым электродом диаметром  $38 \text{ mm}$ , и коллектор диаметром  $20 \text{ mm}$ , нагруженный на пятидесятиомный кабель, подробно описанный в [12]. На поверхности, обращенной к выходному окну диода, у обоих датчиков были сделаны треугольные насечки глубиной  $\sim 1 \text{ mm}$ . Временное разрешение первого датчика было не хуже  $0.2 \text{ ns}$ , а второго —  $0.1 \text{ ns}$ .

Для измерения тока электронного пучка использовался также алмазный детектор компании AASC [13]. Алмазный детектор представлял собой природный кристалл с минимальным содержанием примесей размером  $3 \times 1 \times 0.5 \text{ cm}$  с напыленными Ti/Pt/Au контактами и зажатый в  $50 \Omega$  коаксиальный держатель. На детектор подавалось напряжение до  $1 \text{ kV}$ . Электроны пучка генерировали электронно-дырочные пары в алмазном кристалле, которые, двигаясь во внешнем электрическом поле, формировали токовый сигнал. Временное разрешение детектора составляло  $\sim 0.2\text{--}0.4 \text{ ns}$ .

Энергетический спектр электронного пучка определялся по ослаблению тока пучка после прохождения тонких фильтров, изготовленных из алюминиевой фольги различной толщины. Для регистрации электрических сигналов использовался осциллограф Tektronix марки TDS-6604 с полосой пропускания  $6 \text{ MHz}$ .

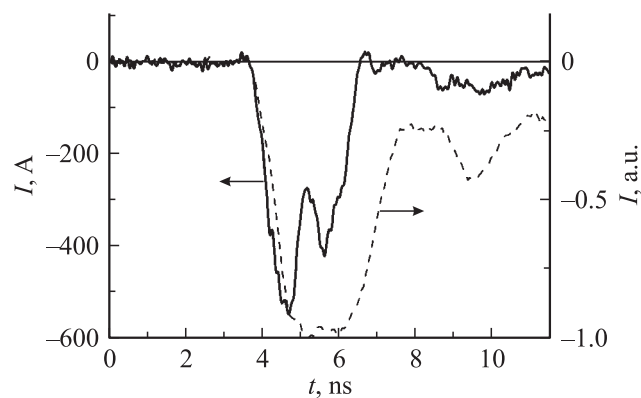


**Рис. 1.** Передняя часть ускорителя РАДАН-220. 1 — электронная трубка ИМА3-150Э, 2 — бериллиевое окно, 3 — катод.

Кроме того, регистрировались импульсы рентгеновского излучения с помощью полупроводникового детектора СПД11-04, временное разрешение которого составляло  $\sim 1.5 \text{ ns}$ .

## Экспериментальные результаты

На рис. 2 показана осциллограмма тока электронного пучка, выходящего из вакуумного диода через Ве-фольгу. Видно, что ток пучка состоит из двух импульсов, причем

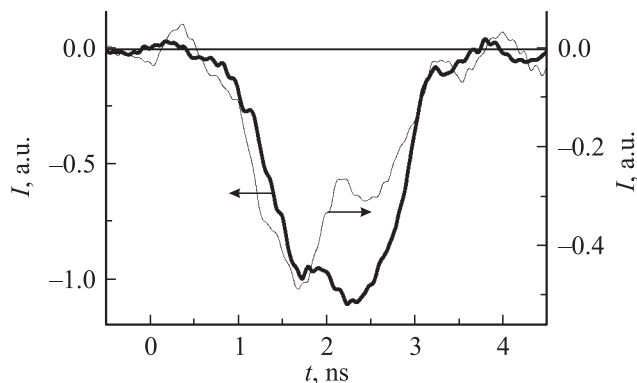


**Рис. 2.** Осциллограммы тока электронного пучка.

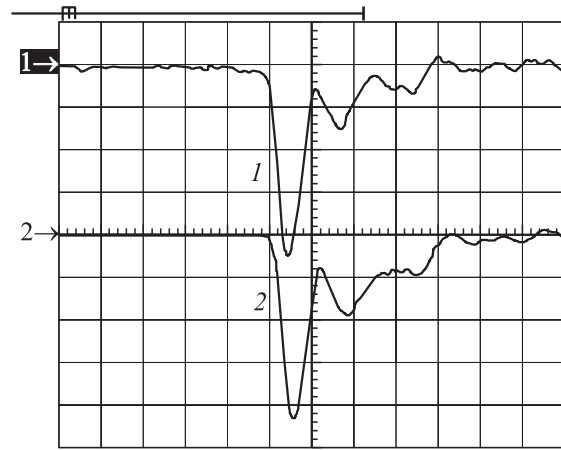
на первом можно выделить два пика разной амплитуды. Наличие двух импульсов при увеличении зазора в вакуумном диоде, питаемом от генератора РАДАН-220 регистрировалось ранее в [3,5,6], в том числе с электронной трубкой ИМАЗ-150Э [6]. Появление второго импульса связано с отражением импульса напряжения от вакуумного диода, а затем от противоположного конца формирующей линии генератора. Так как второй импульс имел на порядок меньшую амплитуду и сравнительно низкую энергию электронов, далее основное внимание уделено исследованию параметров первого импульса. Максимальная амплитуда тока пучка в данных экспериментах составила  $\sim 550$  А, что близко к амплитудам тока, приведенным в работе [6]. Ранее в работах [3,4] сообщалось, что амплитуда тока пучка в этих условиях может достигать 0.8 и 1 кА соответственно. Разницу в амплитудах тока пучка можно объяснить использованием различных сборок генератора РАДАН-220, разбросом в параметрах вакуумных диодов ИМАЗ-150Э, а возможно, и использованием различных коллекторов и систем регистрации тока пучка.

Осциллограммы тока пучка при регистрации с помощью алмазного детектора приведены на рис. 2 (пунктир). Некоторое затягивание импульсов тока по сравнению с импульсами, снятыми с помощью низкоомного шунта, обусловлено, как и в [13], высокой интенсивностью воздействия на кристалл алмаза. Первый импульс имеет гладкую вершину, так как из-за малого поперечного сечения кристалла алмаза на него попадали электроны только из центральной части электронного пучка (рис. 3).

На рис. 3 изображены осциллограммы тока электронного пучка, прошедшего через диафрагму диаметром 3 мм и расположенную в центре пучка (жирная линия) и на расстоянии 4.5 мм от центра (тонкая линия). Из осциллограмм следует, что с течением времени плотность тока пучка перераспределяется. На периферии пучка амплитуда тока уменьшается, а в центральной области несколько увеличивается. По-видимому, это свя-



**Рис. 3.** Осциллограммы тока электронного пучка, прошедшего через диафрагму диаметром 3 мм и расположенную в центре пучка (жирная линия) и на расстоянии 4.5 мм от центра (тонкая линия).



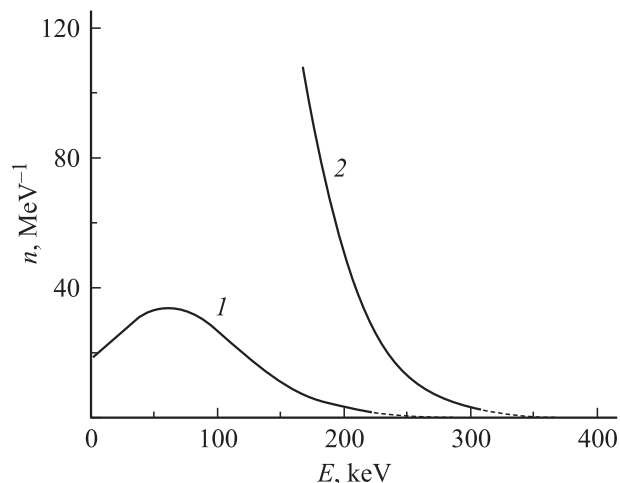
**Рис. 4.** Осциллограммы импульсов рентгеновского излучения при использовании фильтров из диэлектрика для отсечки электронного пучка. 1 — фильтр из стеклотекстолита толщиной 2 мм; 2 — фильтр из лавсановых пленок общей толщиной 0.8 мм. Масштаб по горизонтали 4 ns/div.

зано с расширением катодной плазмы в сторону анода вакуумного диода.

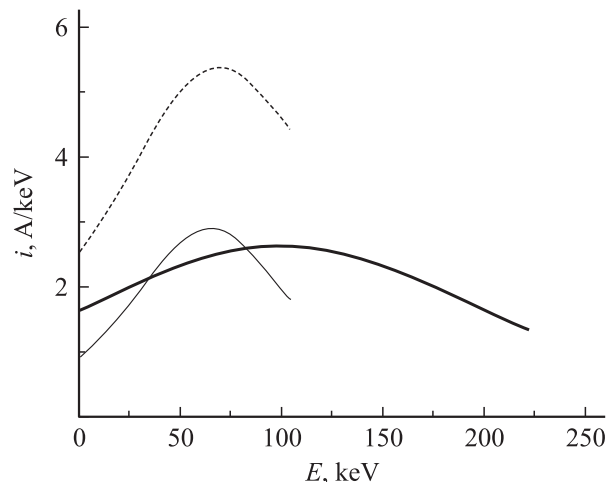
На рис. 4 приведены осциллограммы импульсов рентгеновского излучения при использовании фильтров из диэлектрика для отсечки электронного пучка. Задержка по времени первого пика на осциллограмме относительно второго примерно совпадает с задержкой между двумя импульсами электронного пучка (рис. 2). При увеличении толщины фильтра амплитуда второго импульса уменьшается, и за медной фольгой толщиной 0.7 мм второй пик не регистрировался. Осциллограмма первого рентгеновского импульса была гладкой, на ней отсутствовали пикеты, соответствующие пикетам на первом импульсе тока электронного пучка. Это можно связать с малым временным разрешением детектора СППД11-04.

В процессе экспериментов был определен спектр электронов, прошедших через бериллиевое окно вакуумного диода. На рис. 5 изображены полученные результаты. Спектр, соответствующий кривой 1 на рис. 5, представляет собой спектр электронного пучка, вышедшего из вакуумного диода. Видно, что спектр электронов имеет максимум, соответствующий энергии электронов  $\sim 65$  keV. Спектр, соответствующий кривой 2 на рис. 5, построен с учетом того, что электронный пучок проходит 0.2 мм бериллиевой фольги, прежде чем выйти из диода. Отсутствие максимума на кривой 2 объясняется большой толщиной бериллиевое окна диода и его низкой прозрачностью для электронов с энергией меньше 250 keV [4].

Отметим, что за алюминиевой фольгой большой толщины ( $\geq 0.25$  мм) амплитуда тока пучка была нестабильной от импульса к импульсу, и в ряде случаев ток пучка вообще не регистрировался. Поэтому при построении распределения электронов по энергиям вместо усредненных значений прошедшего электрического



**Рис. 5.** Энергетический спектр электронного пучка. 1 — спектр электронного пучка, вышедшего из вакуумного диода; 2 — спектр электронного пучка проходящего 0.2 mm бериллиевой фольги. Пунктир — часть спектра для электронов с максимальной энергией в данной области.



**Рис. 6.** Спектры для первого (жирная линия) и второго (тонкая линия) пучков токового импульса, а также их суммарный спектр (пунктир).

заряда брались его значения для импульсов тока с максимальной амплитудой. Рис. 5 (пунктир) — точки на кривых, соответствующие толщине алюминиевой фольги  $d \geq 0.25$  mm.

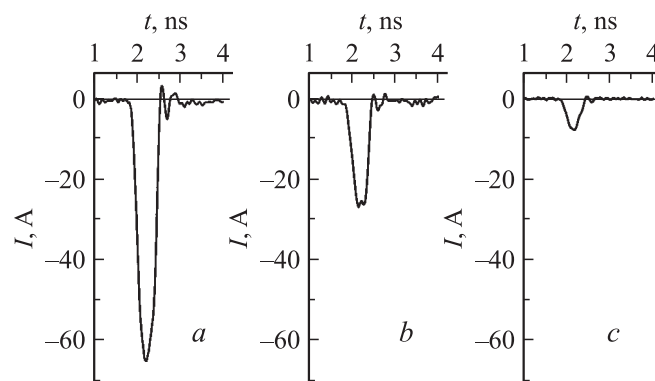
Как известно [4], напряжение, обеспечиваемое генератором РАДАН-220, составляет  $\sim 220$  kV. Поэтому электроны с энергией, большей чем 220 keV (рис. 5, кривая 2), являются электронами с повышенной энергией.

Нами также было построено спектральное распределение для максимальных амплитуд первого и второго пика в первом импульсе тока электронного пучка (рис. 2,3). На рис. 6 изображены спектральные распределения для первого (жирная линия) и второго (тонкая линия) пиков токового импульса, а также их

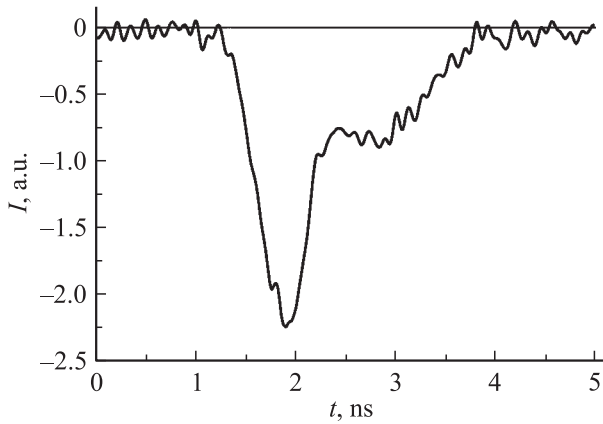
суммарный спектр (пунктир). Спектр для второго пика токового импульса обрывается на значении энергии электронов  $\sim 110$  keV, так как для больших значений энергии, требующих прострела пучком большей толщины алюминиевой фольги при снятии спектра, второй пикоч на токовом импульсе исчезал. Максимум суммарного спектра соответствует энергии электронов  $\sim 70$  keV, что близко к значению для максимума на рис. 4, кривая 1. Данное положение максимума на распределении электронов по энергиям отличаются от положения центрального максимума, полученного в работе [6]. Это может быть связано с тем, что методика определения распределения электронов по энергиям с помощью фильтров из фольги не учитывает углового распределения. Электроны, движущиеся под углом к центральной оси, имеют большие потери энергии, поэтому максимум на распределении электронов по энергиям для данной методики сдвинут в сторону меньших энергий. Однако методика, применяемая в [6], дает значительную часть электронов с повышенной энергией и максимум для электронов с малой энергией. Для уточнения этих данных необходимо проведение дополнительных исследований распределений электронов по энергиям в вакуумных диодах, использующих катоды в режиме взрывной эмиссии электронов.

На рис. 7 приведены осциллограммы тока пучка, прошедшего Al-фильтры большой толщины. Для фильтра толщиной 0.25 mm (что соответствует прохождению электронов с энергией  $\geq 220$  keV) амплитуда тока пучка составила 65 A, для 0.28 ( $\geq 240$ ) — 27, фильтра 0.32 mm ( $\geq 260$  keV) — 7 A.

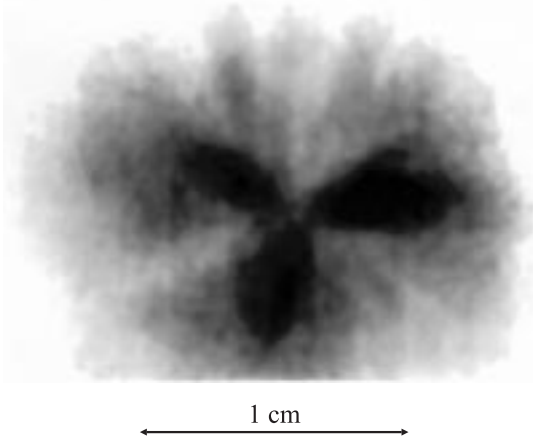
Для того чтобы узнать, в какой момент времени генерируются электроны с повышенной энергией (большей, чем энергия электронов, ускорившихся при максимальном приложенном напряжении), электронный пучок пропусклся через сплошную медную фольгу толщиной 0.1 mm и такую же фольгу с отверстием диаметром 3 mm по центру пучка. При прохождении пучка через сплошную медную фольгу ток пучка был по форме аналогичен току, приведенному на рис. 7, с. Ток пучка после прохождения фольги с отверстием



**Рис. 7.** Осциллограммы тока пучка, прошедшего Al-фильтр толщиной 0.25 (a), 0.28 (b) и 0.32 mm (c).



**Рис. 8.** Ток электронного пучка после прохождения медной фольги с отверстием.



**Рис. 9.** Автограф электронного пучка.

изображен на рис. 8 и представляет собой суперпозицию тока, прошедшего через отверстие (рис. 3) и тока электронов с повышенной энергией, прошедших через медную фольгу (рис. 7,с). Видно, что электроны с повышенной энергией возникают на фронте импульса тока пучка. Длительность тока пучка электронов с повышенной энергией при росте их энергии уменьшалась  $\sim$  с 450 до 200 ps на полувысоте (толщина Al-фильтра при этом менялась от 0.25 до 0.35 mm). Напомним, что на осциллограммах тока пучка, прошедшего через диафрагму диаметром 3 mm, отсутствует пикочок тока в начальный момент (рис. 3). Это обусловлено сравнительно малой амплитудой тока электронов с повышенной энергией, которая не превышала нескольких десятков ампер.

Автограф электронного пучка, полученный за один импульс, показан на рис. 9. Видно неоднородное распределение плотности тока пучка (более темные участки) как по радиусу, так и по диаметру. Полученные неоднородности в структуре пучке подобны полученным в [14]

для трубчатого катода. Распределения поглощенной дозы, снятые за десятки импульсов отличаются большей однородностью по диаметру и плавно уменьшаются по радиусу относительно центральной оси электронной трубки [6].

## Заключение

Таким образом, в данной работе подтверждено, что электронная трубка ИМА3-150Э, работающая в режиме взрывной эмиссии электронов при питании от генератора РАДАН-220, генерирует электроны с повышенной энергией. Показано, что электроны с повышенной энергией возникают на фронте импульса тока пучка, и их импульс имеет длительность на полувысоте 200–450 ps. Установлено, что появление пучка электронов с повышенной энергией нестабильно и что стабильность появления пучка электронов за толстыми фольгами ( $\geq 0.25$  mm) ухудшается при увеличении толщины Al-фольги. Показано, что плотность тока электронного пучка перераспределяется в течение импульса тока, уменьшаясь на периферии пучка быстрее, чем в центральной области. Данные, полученные в результате исследования работы трубки ИМА3-150Э с генератором РАДАН-220, могут оказаться полезными в ряде конкретных приложений, например при возбуждении газовых сред электронным пучком с целью получения спонтанного и стимулированного излучения [15], а также при исследовании катодolumинесценции кристаллов [16].

Выяснение причины появления электронов с повышенной энергией требует проведения дополнительных исследований, как экспериментальных, так и теоретических. На наш взгляд, появление электронов с повышенной энергией нельзя связывать с увеличением напряжения на промежутке, например, за счет зарядки малой емкости межэлектродного зазора. Хорошо известно, что увеличение напряжения на вакуумном диоде приводит к пропорциональному возрастанию амплитуды тока пучка. В данных экспериментах длительность импульса тока электронов с аномальной энергией составляла 200–450 ns на полувысоте (в зависимости от их энергии) и мало изменялась от импульса к импульсу. Соответственно пик на импульсе напряжения должен был бы иметь примерно ту же длительность, что должно приводить к существенному увеличению амплитуды тока пучка. Однако амплитуда всего тока пучка существенно не изменялась, а амплитуды тока пучка электронов с повышенной энергией электронов и стабильность их появления были разными для различных энергий электронов. При толщине Al-фольги  $\sim 0.25$  mm электроны с повышенной энергией регистрировались в среднем в одном из двух импульсов тока. При толщине фольги  $\sim 0.32$  mm электроны с повышенной энергией регистрировались в среднем в одном из десяти импульсов тока.

По-видимому, дополнительное ускорение небольшой части электронов до энергий, превышающих напряжение на промежутке, обусловлено влиянием отрицательного заряда, движущегося облака электронов. Подобный механизм для вакуумного диода предлагался в [11], а для газовых разрядов в [17,18].

## Список литературы

- [1] *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [2] *Яландин М.И., Шпак В.Г.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [3] *Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В.* и др. // ПТЭ. 1987. № 4. С. 175–177.
- [4] *Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г.* и др. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146–149.
- [5] *Нагорный Д.Ю., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* и др. // ПТЭ. 1990. № 3. С. 169–172.
- [6] *Афанасьев В.Н., Бычков В.Б., Ларцев В.Д.* и др. // ПТЭ. 2005. № 5. С. 1–5.
- [7] *Павловская Н.Г., Кудрявцева Т.В., Дронь Н.А.* и др. // ПТЭ. 1973. № 1. С. 22–24.
- [8] *Худякова Л.Н., Гутникова Е.К., Тарасова Л.В.* // ЖТФ. 1964. Т. 34. Вып. 11. С. 2044–2047.
- [9] *Мхеидзе Г.П., Корон Е.Д.* // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 5. С. 837–879.
- [10] *Будаев С.П., Кошелев В.И., Тимофеев М.Н.* // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 9. С. 1917–1921.
- [11] *Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Ульмаскулов М.Р.* и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 7. С. 65–69.
- [12] *Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D.* // Laser and Particle Beams. 2005. Vol. 23. N 4. P. 545–551.
- [13] *Липатов Е.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф.* и др. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 12. С. 1115–1117.
- [14] *Шпак В.Г.* // ПТЭ. 1980. № 3. С. 165–167.
- [15] *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. XI-4. Газовые и плазменные лазеры / Отв. ред. С.И. Яковленко. М.: Физматлит, 2005. 820 с.*
- [16] *Соломонов В.И., Михайлов С.Г.* Импульсная катодолуминесценция и ее применение для анализа конденсированных сред. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 182 с.
- [17] *Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А.* // Изв. вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 3. С. 94–95.
- [18] *Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I.* // Plasma Devices and Operations. 2005. Vol. 13. N P. 231–279.