

УДК 621.384.65

ГЕНЕРАТОР ЗАТРАВОЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Ю. Ф. Бондарь, Г. П. Мхеидзе, Н. И. Петров

Для проведения поисковых работ по обнаружению нового фундаментального явления пробоя на убегающих электронах изготовлен источник затравочных электронов на 200 – 250 кВ. В качестве генератора импульсных напряжений выбрана двойная формирующая линия, выполненная на высоковольтных кабелях. Методом Монте-Карло исследуются параметры инжектируемого в атмосферу пучка в зависимости от начальной энергии электронов.

Существование нового вида электрического пробоя газа, получившего название пробоя на быстрых электронах, было предсказано теорией [1, 2]. Такой пробой может существовать не только в газах, но и в жидких и твердых веществах, как в постоянных, так и переменных или стохастических полях. Пробой развивается при наличии быстрых затравочных электронов (ЗЭ). Предполагается, что обнаруженные в атмосфере потоки рентгеновского и гамма излучения при грозовых явлениях (в том числе гигантских высотных разрядах между облаками и ионосферой) обусловлены пробоем воздуха на убегающих электронах, причем роль затравочных частиц выполняют вторичные электроны с энергией порядка 1 МэВ , создаваемые космическими лучами.

Моделирование условий, возникающих в грозовых облаках, и обнаружение убегающих электронов в лабораторном эксперименте представляется важной задачей.

Предварительные эксперименты на генераторе ИСТРА ВНИЦ ВЭИ (напряжение до 9 МВ), проведенные в отсутствие затравочных электронов, не обнаружили убегающих электронов. Схема предполагаемого эксперимента по выявлению убегающих электронов при наличии ЗЭ, представлена на рис. 1. Напряжение от генератора ИСТРА 1 подается на сетку-анод 2. В бункере 3 располагается генератор затравочных электронов (ГЗЭ), состоящий из генератора импульсного напряжения (ГИН) 4 и высоковольтного диода

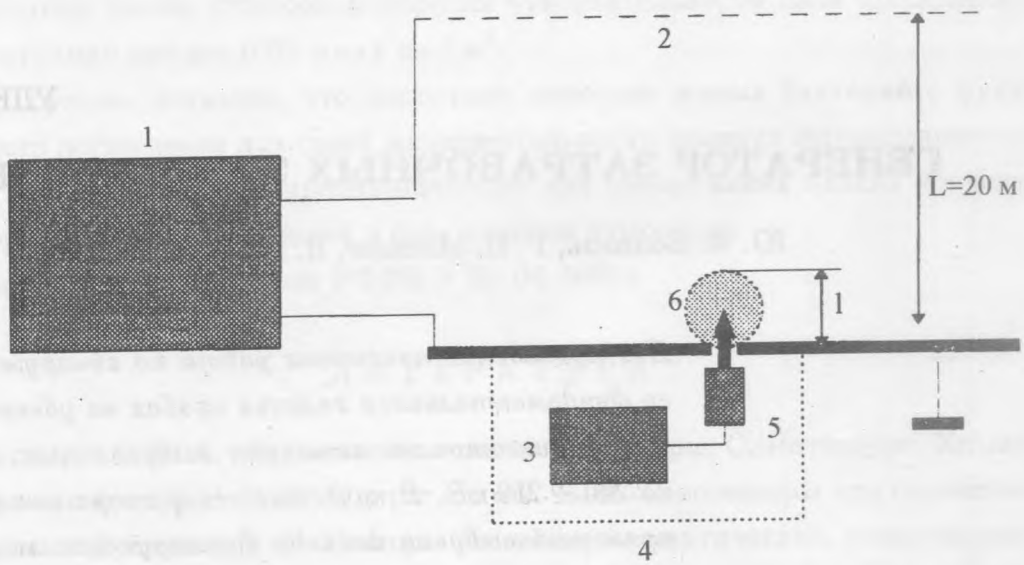


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 - генератор ИСТРА ВНИЦ ВЭИ (9 МВ), 2 - сетка-анод, 3 - бункер, 4 - генератор импульсного напряжения (150 - 250 кВ), 5 - источник электронов (диод), 6 - затравочные электроны.

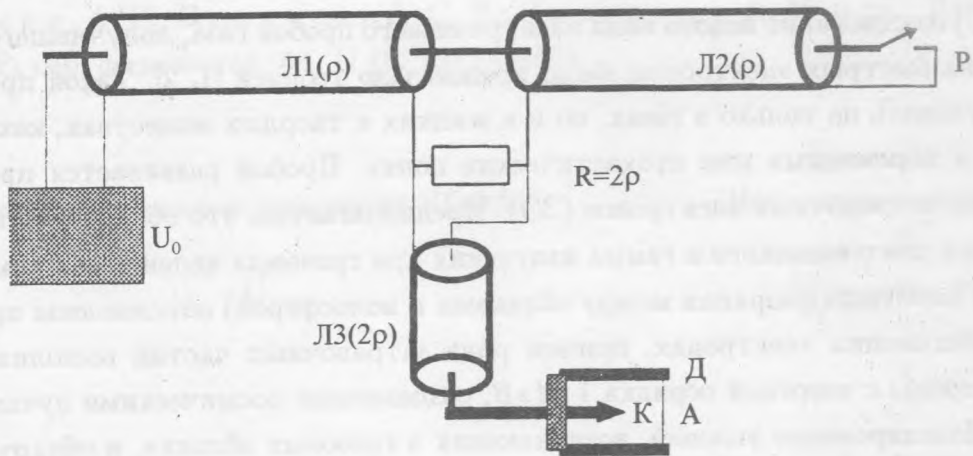


Рис. 2. Схема генератора первичных электронов.

(источника электронов) 5. Пучок электронов инжектируется в межэлектродное пространство и образует облако затравочных электронов (ОЗЭ) 6. Протяженность облака равна l .

Создаваемый источник затравочных электронов должен удовлетворять ряду усло-

вий. Основное – возможность варьировать энергию, ток и угловое распределение инжектируемых в атмосферу электронов, а также временную привязку к генератору ИСТРА.

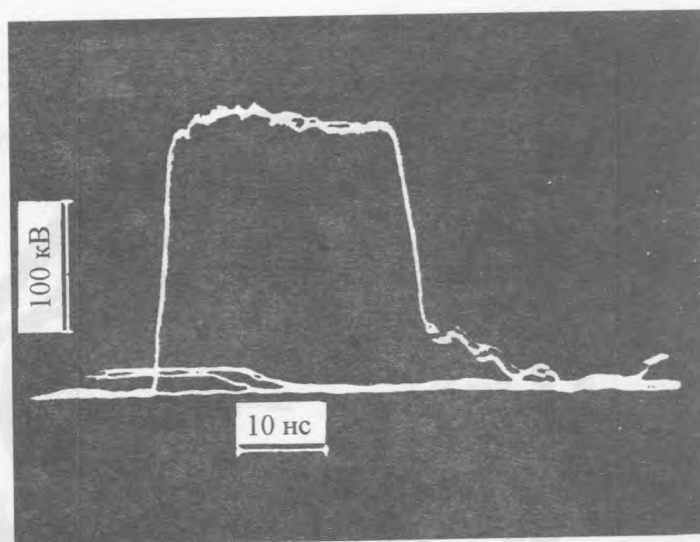


Рис. 3. Осциллограмма импульса напряжения.

Для получения импульсов напряжения в сотни κB прямоугольной формы в наносекундном диапазоне длительности обычно используют одинарные или двойные (рис. 2) линии. В качестве генератора импульсного напряжения выбрана двойная формирующая линия, выполненная на высоковольтных (до 300 – 400 κB) коаксиальных кабелях Л1 и Л2 с волновым сопротивлением $\rho \approx 25 \text{ Ом}$ (от длины линий зависит длительность генерируемого импульса). Запуск ГИН осуществляется управляемым разрядником Р. Для зарядки линий используется выпрямитель с выходным напряжением U_0 . Генерированное напряжение кабелем Л3 (с волновым сопротивлением $2\rho \approx 50 \text{ Ом}$) подается на высоковольтный диод Д. Пучок, формируемый в диоде с взрывоэмиссионным катодом К, через выходное окно (титановая фольга) в аноде А инжектируется в атмосферу. Кабельный вариант выбран из-за простоты исполнения, удобства эксплуатации и удовлетворительных параметров генерируемого импульса напряжения (малая величина отношения времен нарастания и спада импульса к длительности плато). Импульс на согласованной нагрузке представлен на рис. 3. Общий вид генератора и используемых диодов дан на рис. 4.

Для корректного проведения эксперимента по выявлению убегающих электронов (регистрируя сами электроны или обусловленное ими тормозное излучение) необходимо

четкое разделение убегающих и затравочных электронов. Для этого необходимо знание параметров ОЗЭ, т.е. первичных электронов. Кроме того, знание этих параметров необходимо и для теоретического исследования задачи.

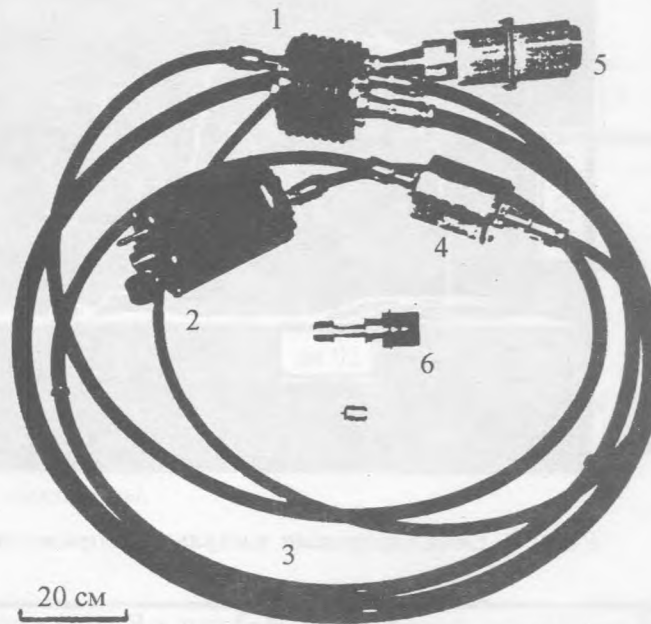


Рис. 4. Внешний вид кабельного генератора импульсного напряжения. 1 – выходной блок, 2 – управляемый разрядник, 3 – кабельные линии, 4 – блок зарядки, 5 – блок нагрузки (контейнер с диодом), 6 – диоды (на напряжения 250 кВ и 1 МВ).

Прохождение электронного пучка через фольгу и распространение его в воздухе исследовалось методом Монте-Карло. Учитывались упругие и неупругие столкновения. Расчеты проводились для пучка электронов с нулевыми начальными угловым и энергетическим разбросами. Энергия электронов варьировалась в пределах $E = 120 - 350$ кэВ. Толщина титановой фольги $\Delta = 50$ мкм. Рабочий газ – воздух в нормальных условиях (давление $P_0 = 1$ атм, температура $T = 20^\circ\text{C}$). Начальное число пробных частиц (т.е. частиц, инжектированных в фольгу) $N_0 = 10000 - 30000$. После прохождения фольги в воздух попадает N_{in}^G частиц. Часть из них, N_{rev}^G , возвращается обратно в фольгу. Остановившимися в газе считаются частицы, энергия которых в результате столкновений становится меньше 10 кэВ (число их N_{stop}^G). В процессе взаимодействия с воздухом образуется N_δ^G вторичных δ -электронов. Средняя энергия частиц, инжектированных из

фольги в газ E_{pas}^F , а суммарная энергия пучка W_{in}^G . Суммарная энергия "вернувшихся"

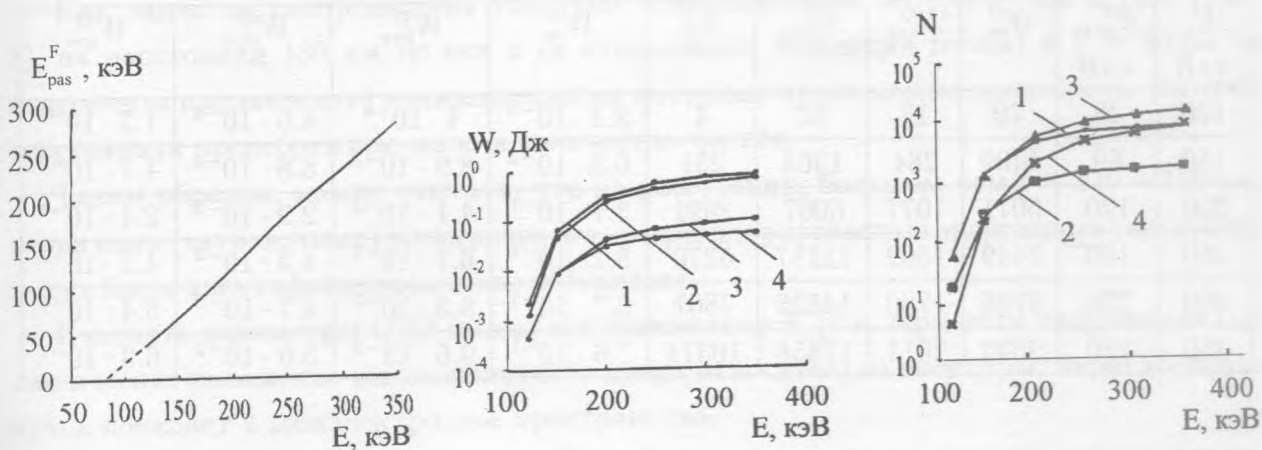


Рис. 5. Зависимость средней энергии прошедших фольгу частиц от первичной энергии.

Рис. 6. Зависимости W_{in}^G (1), W_{ion}^G (2), W_{rev}^G (3) и W_{stop}^G (4) от первичной энергии электронов E .

Рис. 7. Зависимости N_{in}^G (1), W_{rev}^G (2), N_{stop}^G (3) и N_{δ}^G (4) от первичной энергии электронов E .

из газа в фольгу частиц W_{rev}^G . Суммарная энергия остановившихся в газе частиц W_{stop}^G . Суммарная энергия, потраченная на ионизацию W_{ion}^G . Параметры электронного пучка (ток и длительность импульса при данном значении E) при расчете подбирались так, чтобы начальная энергия пучка (т.е. энергия, сообщенная пучку электронов в диоде) составляла 1 Дж. Некоторые результаты расчета приведены в табл. 1.

На рис. 5 дана зависимость средней энергии E_{pas}^F частиц, прошедших фольгу толщиной $\Delta = 50$ мкм, от начальной энергии E . Электроны с энергией 70 – 80 кэВ полностью застрянут в фольге выходного окна анода.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчетов

E , кэВ	$E_{рас}^F$, кэВ	N_{in}^G	N_{rev}^G	N_{stop}^G	N_{δ}^G	W_{in}^G	W_{rev}^G	W_{stop}^G	W_{ion}^G
120	38	70	17	57	4	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
150	69	1409	284	1364	251	$6.5 \cdot 10^{-2}$	$8.9 \cdot 10^{-3}$	$8.8 \cdot 10^{-3}$	$4.7 \cdot 10^{-2}$
200	120	5071	1077	6067	2091	$3.1 \cdot 10^{-1}$	$4.1 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-1}$
250	180	7449	1562	11157	5270	$5.2 \cdot 10^{-1}$	$6.7 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-2}$	$4.2 \cdot 10^{-1}$
300	230	8706	1780	14520	7807	$6.7 \cdot 10^{-1}$	$8.3 \cdot 10^{-2}$	$4.7 \cdot 10^{-2}$	$5.4 \cdot 10^{-1}$
350	280	9530	2014	17858	10374	$7.6 \cdot 10^{-1}$	$9.6 \cdot 10^{-2}$	$5.0 \cdot 10^{-2}$	$6.3 \cdot 10^{-1}$

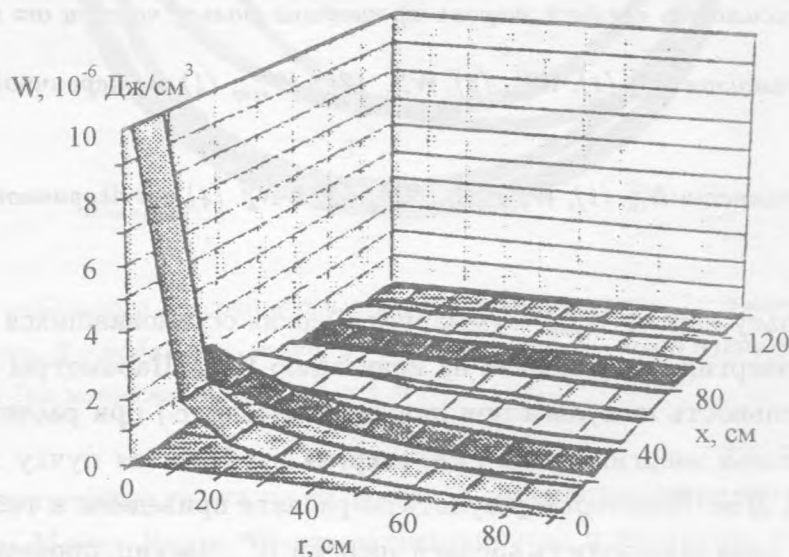


Рис. 8. Распределение удельных ионизационных потерь пучка.

Рис. 6 иллюстрирует зависимости энергии W_{in}^G инжектированного в газ после прохождения фольги пучка (кривая 1), ионизационных потерь пучка W_{ion}^G (кривая 2), суммарной энергии W_{rev}^G "вернувшихся" в фольгу частиц (кривая 3) и суммарной энергии W_{stop}^G остановившихся в газе частиц (кривая 4) от первичной энергии электронов E .

Зависимости числа частиц, инжектированных в газ N_{in}^G (кривая 1), "вернувшихся" в фольгу W_{rev}^G (кривая 2), остановившихся в газе N_{stop}^G (кривая 3) и образованных в

процессе взаимодействия пучка с воздухом вторичных электронов N_s^G (кривая 4) от первичной энергии электронов E представлена на рис. 7.

Как видно из распределения удельных ионизационных потерь пучка в газе (рис. 8), на расстоянии 130 см по оси x (в направлении инжекции пучка) и $r = 95$ см (в поперечном направлении) ионизационными потерями пучка можно пренебречь. На этих расстояниях пренебрежимо мало и количество частиц.

Таким образом, можно считать, что на расстоянии, большем чем $l \approx 130 - 150$ см, первичных (затравочных) электронов нет и зарегистрированные энергичные электроны могут быть идентифицированы как убегающие.

Изменять параметры ОЗЭ можно как изменением E (т.е. зарядного напряжения U_0) так и меняя положение высоковольтного диода относительно апертуры, через которую пучок попадает в межэлектродное пространство.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 98-02-16715).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] G u r e v i c h A. V. et al., Phys. Lett., A, **165**, 463 (1992).
- [2] R o u s s e l - D u p r e R. and G u r e v i c h A. V. J. Geophys. Res., A, **101**, no. 2, 2297 (1996).

Институт общей физики РАН

Поступила в редакцию 18 января 1999 г.