

Калибровка детекторов ионизирующих излучений с помощью пучка убегающих электронов субнаносекундной длительности, генерируемого разрядом в открытой атмосфере при высоких перенапряжениях

Л. П. Бабич, Т. В. Лойко,
А. В. Родигин

Электрический разряд в воздухе при атмосферном давлении в условиях многократных перенапряжений генерирует электронный пучок субнаносекундной длительности. На примерах измерения временного разрешения трактов регистрации, включающих различные детекторы ионизирующих излучений, демонстрируется эффективность использования пучка для калибровки детекторов с субнаносекундным разрешением. Основным преимуществом такого способа калибровки является отсутствие вакуумированной ускорительной трубки, малогабаритность источника электронов и большой эксплуатационный ресурс.

Введение

Источники пучков ускоренных электронов на основе генераторов субнаносекундных импульсов высокого напряжения [1–4] используются в различных областях науки и техники: в исследованиях быстротекающих процессов и релаксационных явлений в веществе, для калибровки детекторов ионизирующих излучений и т. п. Генерация и ускорение электронов осуществляются в вакуумированной ускорительной трубке, включающей диод с ненакаливаемым катодом, к которому прикладывается импульс напряжения субнаносекундной длительности с амплитудой порядка сотен кВ. Такие источники позволяют в режиме интенсивной автоэлектронной и взрывной эмиссии получать токи ускоренных электронов порядка сотен и тысяч ампер. Субнаносекундные импульсы электронов меньшей интенсивности могут быть получены более простым методом на основе эффекта убегания электронов [5, 6] при разрядах в открытой атмосфере в условиях многократных перенапряжений относительно напряжения статического пробоя газоразряд-

ного промежутка (см., например, [7–14]). Вследствие преионизации газа импульсом убегающих электронов разряды при достаточно больших межэлектродных расстояниях носят объемный характер, подобно разрядам, предназначенным для накачки лазеров с внешней преионизацией [15]. Целью настоящей работы является демонстрация возможностей такого подхода к калибровке детекторов импульсов ионизирующих излучений наносекундной и субнаносекундной длительности. Основное его преимущество – исключение вакуумированной ускорительной трубки, т. е. отпадает потребность в вакуумном производстве, включающем последовательность довольно сложных технологических процессов. Ток газоразрядных импульсов ускоренных электронов достаточен для получения сигналов на современных осциллографах с амплитудой несколько вольт; современная техника регистрации позволяет записать форму импульса тока электронов и таким образом продемонстрировать возможности использования импульса для временной калибровки детекторов ионизирующих излучений.

Постановка экспериментов

Источник импульсов высокого напряжения. В наших экспериментах с убегающими электронами высоких энергий в плотных газах в качестве источника импульсов высокого напряжения используется высоковольтный блок разработанного во ВНИИЭФ малогабаритного генератора рентгеновского излучения [16, 17]. Блок размещен в заполненном трансформаторным маслом цилиндрическом корпусе высотой 20 см и диаметром 11 см. Основными его элементами являются импульсный повышающий трансформатор и разрядник-обостритель, формирующий субнаносекундный фронт импульса напряжения. Используются разрядники Р-48, Р-43, Р-49 с напряжением пробоя 100, 150, 200 кВ соответственно [18]. Высоковольтная (накопительная) емкость разрядного контура генератора равна $C_0 \approx 50$ пФ, индуктивность $L_0 \approx 80$ нГ. Газоразрядная камера включает диод с ненакаливаемым катодом, который соединяется последовательно с разрядником. Амплитуда импульса высокого напряжения на диоде с субнаносекундным фронтом в режиме холостого хода, который измеряется в открытом воздухе при большом межэлектродном расстоянии или заполнении камеры трансформаторным маслом, зависит от используемого разрядника и достигает 300–320 кВ [9–11]. Ресурс такого газоразрядного генератора ускоренных электронов определяется ресурсом разрядника и составляет $\sim 10^6$ включений.

Характеристики импульсов убегающих электронов. При подаче импульса высокого напряжения с субнаносекундным фронтом на газоразрядном диоде с межэлектродным расстоянием сантиметрового диапазона в открытой атмосфере реализуются многократные перенапряжения и развивается разряд, в котором генерируются субнаносекундные импульсы убегающих электронов с восстановленной длительностью менее 0,25 нс [10] с энергиями в диапазоне сотен кэВ [7–13]. Количество убегающих электронов, которое традиционно измеряется по заряду емкости как среднее за несколько десятков импульсов, не превышает $\sim (0,5-1) \cdot 10^9$ 1/имп. при использовании в качестве катодов металлических стержней с различной кривизной рабочей поверхности [7–13]. Распределение электронов по энергиям, измеренное методом магнитной спектроскопии, показано на рис. 1 для одной из конфигураций газоразрядного промежутка, которая характеризуется, в основном, радиусом кривизны рабочей поверхности катода r_{cath} и межэлектродным расстоянием d [8–11]. Энергетическое распределение достигает максимального значения при энергии $\epsilon_m \approx 270$ кэВ, существенно превышающей eU_{max} , соответствующую максимальному значению импульса напряжения, реализующегося во время разряда (электроны аномальной энергии [7–12]). Измеренная ширина распределения $\Delta\epsilon_{\text{meas}} \approx 60$ кэВ. Поскольку распределение получено за сотни импульсов, то на $\Delta\epsilon_{\text{meas}}$ влиял разброс ($\sim 10\%$) амплитуды напряжения пробоя разрядника-обострителя и амплитуды напряжения, реализующегося на газовом промежутке. $\Delta\epsilon_{\text{meas}}$ зависела

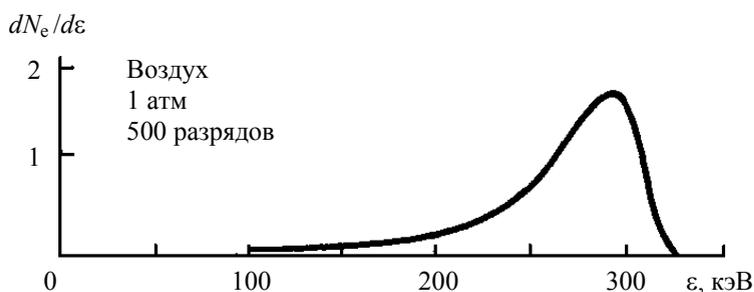


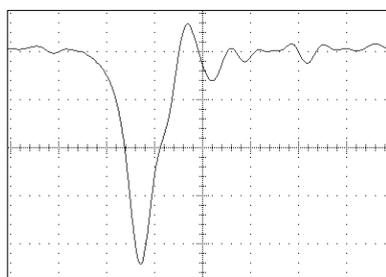
Рис. 1. Распределение электронов по энергиям при разрядах в воздухе [8–11]. В режиме холостого хода амплитуда импульса напряжения 270 кВ, $d = 20$ мм, $r_{\text{cath}} = 200$ мкм, плоский анод из алюминиевой фольги толщиной 8 мкм, $N_e \approx (0,5-1) \cdot 10^9$ e^- /разряд

от ширины щелевых диафрагм коллиматора, на нее влияло рассеяние в материале входного окна спектрометра, в результате чего распределение электронов сильно уширено. Поэтому собственная ширина распределения в одном разряде $\Delta\varepsilon_{\text{intr}}$ намного меньше $\Delta\varepsilon_{\text{meas}}$, так что $\varepsilon_m \gg \Delta\varepsilon_{\text{intr}}$, и можно говорить о почти моноэнергетическом пучке электронов.

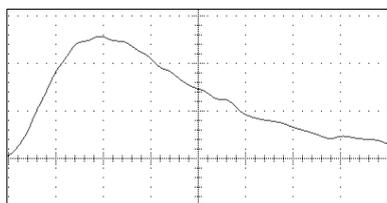
В настоящей работе высоковольтный блок генератора включал разрядник Р-43 на напряжение $\sim 140-150$ кВ, так что в режиме холостого хода на газоразрядном диоде реализовался импульс напряжения с амплитудой $\sim 250-270$ кВ. Разряды осуществлялись в открытой атмосфере в цилиндрической камере с плоским изолятором диаметром 10 см, изготовленным из органического стекла толщиной 1 см. Конструкция камеры включает газоразрядный диод. Использовались два варианта катода: стальной стержень диаметром 12 мм с конической рабочей поверхностью и углом заострения вершины $2\alpha = 60^\circ$ («острый катод») и пять параллельных друг другу лезвий, изготовленных из тантала и закрепленных ортогонально плоскому диску диаметром 10 мм на фокусирующем цилиндре. Катоды из серии параллельных лезвий используются в вакуумных диодах для формирования однородных по сечению пучков ускоренных электронов [19]. Анод плоский, изготовлен из алюминиевой фольги толщиной 15 мкм. Межэлектродное расстояние варьировалось в диапазоне $d = 15-20$ мм.

Экспериментальные результаты

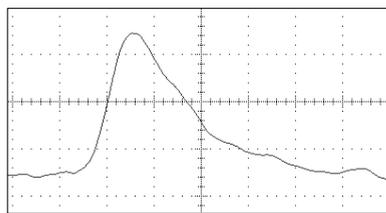
Для измерений временных параметров импульса убегающих электронов использовалась система регистрации, включающая коллектор, в качестве которого использовался алюминиевый диск диаметром 20 мм, располагавшийся вне газоразрядного диода на расстоянии 7 мм от анода. Сигнал с коллектора по радиочастотному кабелю длиной 8 м подавался непосредственно на осциллограф TDS 3052B с полосой пропускания 500 МГц. Типичная осциллограмма импульса тока электронов показана на рис. 2,а. Длительность импульса $\Delta t_{0,5} \approx 0,7$ нс. Амплитуда сигнала на осциллографе составляет $\sim 4-5,5$ В. При проведении измерений по калибровке детекторов важна плотность потока излучения Φ , в котором находится детектор, поскольку именно значением Φ определяется амплитуда сигнала с детектора. Плотность падающего на коллектор потока убегающих электронов, генерируемого разрядом, оцененная по амплитуде сигнала на осциллографе, составляет $\Phi_e \approx (1,1-1,5) \cdot 10^8$ $1/\text{см}^2$. Характерный поперечный размер пучка на аноде, определенный как расстояние от оси пучка, на котором Φ_e уменьшается приблизительно на порядок величины, равен 3 см. Поскольку современные детекторы ионизирующих излучений отличаются миниатюрностью и, следовательно, поля облучения с большой апертурой не требуются, газоразрядные



а

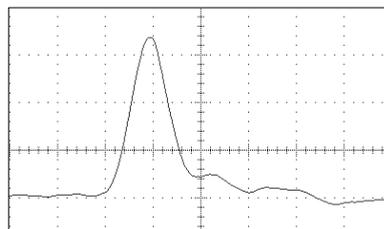


РОРОР

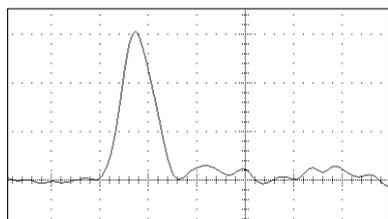


Б10

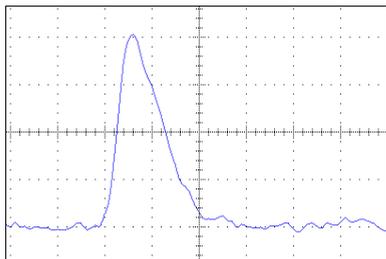
б



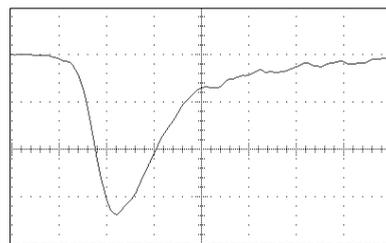
Б18



в



г



д

Рис. 2. Экспериментальные типичные осциллограммы: а – ток электронного пучка, $\Delta t_{0,5} \approx 0,7$ нс, фотоэлемент СДФ-14; б – свечение сцинтилляторов: РОРОР ($\Delta t_{0,5} \approx 3,6$ нс); Б10 ($\Delta t_{0,5} \approx 1,6$ нс), Б18 ($\Delta t_{0,5} \approx 0,9$ нс); в – ток электронного пучка, $\Delta t_{0,5} \approx 2,0$ нс, полупроводниковый детектор СПИД 11-04; г – рентгеновское излучение, $\Delta t_{0,5} \approx 2,8$ нс; д – ФЭУ СНФТ8 и Б15, свечение оргстекла, $\Delta t_{0,5} \approx 0,8$ нс. Развертка: а, б, д – 1 нс на клетку; в, г – 2 нс на клетку

импульсы электронов удобны для калибровки. Далее приводятся примеры измерения временного разрешения трактов регистрации с различными детекторами.

Калибровка детекторов, включающих сцинтиллирующие пластмассы. Для измерения длительности импульсов ионизирующих излучений используются сцинтиллирующие пластмассы, в которых люминесценция возбуждается падающим на них излучением, затем люминесценция регистрируется фотоэлементом или фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). В наших экспериментах использовались три пластмассы: РОРОР с разрешающим временем на полувысоте $\tau_{0,5} \sim 3$ нс, Б10 ($\tau_{0,5} \sim 1,4$ нс) и Б18 ($\tau_{0,5} \sim 0,2$ нс) [20–22]. Диск из пластмассы диаметром 20 мм и толщиной 2 мм помещался на окне регистрирующего прибора. Люминесценция регистрировалась фотоэлементом СДФ-14 ($\tau_{0,5} \sim 0,2$ нс) [22]. Типичные осциллограммы свечения, записанные на осциллографе TDS 3052B, приведены на рис. 2,б. При регистрации свечения пластмасс РОРОР и Б10,

чтобы получить на осциллографе сигнал в несколько вольт, детектор располагался на расстоянии ~ 5 см от окна газоразрядной камеры. Световой выход пластмассы Б18, обладающей субнаносекундной длительностью свечения, значительно меньше, поэтому в экспериментах с Б18 детектор располагался вплотную к аноду. Длительность зарегистрированных импульсов на полувысоте осциллограмм, равная $\Delta t_{0,5} \approx 3,6$ нс (РОРОР), $\Delta t_{0,5} \approx 1,6$ нс (Б10), $\Delta t_{0,5} \approx 0,9$ нс (Б18), есть временное разрешение трактов регистрации, включающих указанные сцинтилляционные детекторы.

Калибровка полупроводниковых детекторов. С помощью импульсов убегающих электронов можно измерять временное разрешение полупроводниковых детекторов, если толщина входного окна детектора такова, что окно пропускает достаточное число электронов. Возможности калибровки детекторов такого типа с помощью убегающих электронов демонстрируются на примере измерения разрешающего времени системы, включавшей полупроводниковый детектор СППД11-04, окно которого выполнено из алюминия толщиной 100 мкм. Детектор располагался на расстоянии 5 см от анода газоразрядного диода, типичная осциллограмма показана на рис. 2,в. Для получения осциллограммы с амплитудой несколько вольт сигнал с детектора СППД11-04, амплитуда которого составляла около 100 В, ослаблялся с помощью делителей СДНР5. Полученная длительность импульса $\Delta t_{0,5} \approx 2$ нс является разрешающим временем такой системы регистрации, включающей детектор СППД11-04.

Калибровка рентгеновских детекторов. Рентгеновское излучение, возбуждаемое импульсами убегающих электронов, можно использовать для калибровки детекторов рентгеновского излучения на основе сцинтиллирующих пластмасс и ФЭУ. В наших экспериментах рентгеновское излучение является, в основном, тормозным излучением убегающих электронов в аноде [9, 11, 23]. Излучение регистрировалось с помощью цилиндрического сцинтиллятора Б15 диаметром 5 см и длиной 10 см ($\tau_{0,5} \sim 0,8$ нс) и ФЭУ СНФТ-8 ($\tau_{0,5} \sim 1,5$ нс). Сцинтиллятор и ФЭУ размещались в стальном защитном корпусе с толщиной стенок 1 мм. Облучаемый торец сцинтиллятора находился на расстоянии 40 см от анода. Осциллограмма рентгеновского излучения, записанная на осциллографе TDS 3052B, приведена на рис. 2,г. Длительность зарегистрированного импульса $\Delta t_{0,5} \approx 2,8$ нс соответствует разрешающему времени системы регистрации.

Калибровка черенковских детекторов. Черенковские детекторы весьма эффективны для измерений длительности сверхкоротких импульсов ионизирующих излучений в связи с безынерционностью процесса излучения Вавилова – Черенкова и отсутствием постлюминесценции. Поскольку излучение Вавилова – Черенкова возбуждается одновременно с люминесценцией радиатора, в качестве последнего необходимо использовать вещества с низким уровнем люминесценции, например оргстекло (полиметилметакрилат). Излучение Вавилова – Черенкова является пороговым процессом и в оргстекле возбуждается электронами с энергиями выше 178 кэВ [24, 25].

Нами были предприняты попытки в экспериментах с диодом с «острым катодом» зарегистрировать черенковское излучение фотоэлементом СДФ-14. В качестве радиатора использовался диск оргстекла диаметром 2 см и толщиной 2 мм. Однако генерируемый поток убегающих электронов оказался недостаточно интенсивен, чтобы сигнал достоверно превысил уровень «наводок». Выход электронов удалось повысить в $\sim 4,5$ раза в конфигурации с катодом из набора лезвий. Плотность потока электронов, падающих на коллектор, повысилась до $\Phi_e = (0,5-0,7) \cdot 10^9$ 1/см², что позволило зарегистрировать черенковское излучение, располагая СДФ-14 с диском из оргстекла на аноде разрядной камеры. В экспериментах с таким катодом амплитуда сигнала с коллектора достигала $\sim 20-25$ В. Зарегистрированная осциллограмма приведена на рис. 2,д. Длительность сигнала $\Delta t_{0,5} \approx 0,8$ нс, амплитуда 0,5–0,7 В.

На рис. 2 длительность некоторых сигналов довольно велика (~ 1 нс), так что вклад самого осциллографа (полоса 500 МГц) в длительность регистрируемого сигнала несуществен. Но в сигналы с длительностью менее 1 нс вклад осциллографа необходимо учитывать. На рис. 3 приведе-

ны осциллограммы тока самого электронного пучка на коллектор (рис. 3,а) и возбуждаемых пучком импульсов свечений пластмассы Б18 (рис. 3,б) и оргстекла (рис. 3,в), зарегистрированные осциллографом Le Croy Wavemaster-8500A с полосой пропускания 5 ГГц. Длительность импульса убегающих электронов $\Delta t_{0,5} \approx 0,15$ нс, люминесценции Б18 – $\Delta t_{0,5} \approx 0,65$ нс, свечения оргстекла – $\Delta t_{0,5} \approx 0,4$ нс. Уже столь малая длительность свечения оргстекла (короче свечения специально разработанной для измерений субнаносекундных импульсов излучений пластмассы Б-18) является аргументом в пользу того, что регистрируется черенковское излучение электронов, а не люминесценция оргстекла.

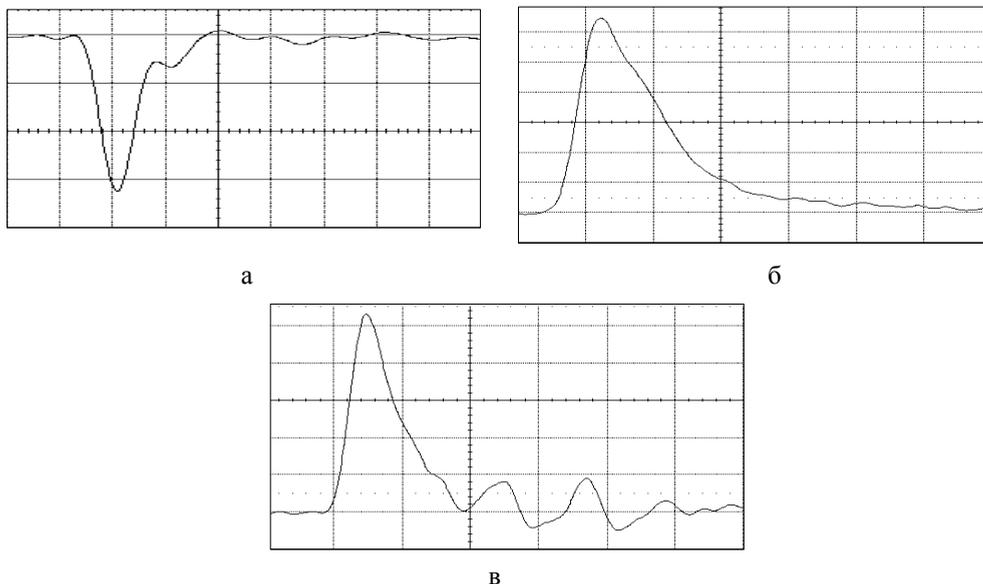


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы: а – ток электронного пучка, $\Delta t_{0,5} \approx 0,15$ нс; б – свечение сцинтиллятора Б18, $\Delta t_{0,5} \approx 0,65$ нс; в – свечение оргстекла $\Delta t_{0,5} \approx 0,40$ нс. Развертка: а – 0,2 нс на клетку; б, в – 0,5 нс на клетку

Люминесценция оргстекла. Как отмечалось выше, в черенковских детекторах в качестве радиатора часто используется оргстекло, поскольку оно обладает низким уровнем люминесценции. При регистрации излучения Вавилова – Черенкова в экспериментах с γ -квантами в области энергий ~ 1 МэВ вклад люминесценции составляет $\sim 2-7\%$ [25]. Представляет интерес оценить вклад люминесценции в регистрируемый сигнал при более низких энергиях излучения, характерных для источников ускоренных (в том числе убегающих) электронов и рентгеновского излучения на основе генераторов, подобных описанным в работах [1–4, 16, 17], и генератора, используемого в настоящей работе, а также измерить длительность люминесценции оргстекла. Для возбуждения только одной люминесценции оргстекла необходимы пучки с энергией электронов ниже пороговой энергии излучения Вавилова – Черенкова 178 кэВ. Поскольку энергия убегающих электронов, генерируемых в газовом разряде, $\epsilon_e \approx 270$ кэВ превышает порог, ее необходимо уменьшить, для чего на окне газоразрядной камеры размещался фильтр из алюминиевой фольги толщиной 150 мкм. Потери энергии электронов в такой фольге и в слое воздуха между анодом и радиатором согласно, например, данным [27] оцениваются в ~ 100 кэВ, и естественно ожидать, что свечение, возбуждаемое электронами, прошедшими фильтр, в такой постановке является люминесценцией оргстекла.

Эксперименты выполнены в той же конфигурации разрядного промежутка, что и описанные выше эксперименты по регистрации черенковского излучения, с катодом из набора параллельных лезвий. С помощью ФЭУ СНФТ-8 ($\tau_{0,5} \sim 1,5$ нс) регистрировалось свечение, возбуждаемое отфильтрованным потоком электронов в радиаторе из оргстекла. Использовался стандартный блок оргстекла диаметром 5 см и длиной 10 см, покрытый для улучшения светосбора белой эмалью ВЛ 548. Электроны облучали торец блока, который размещался на расстоянии 8 см от окна разрядной камеры. Осциллограмма возбуждаемого свечения приведена на рис. 4,а. Длительность импульса свечения $\Delta t_{0,5} \approx 8$ нс. Чтобы исключить вклад люминесценции эмалевого покрытия, оно было удалено. Осциллограмма свечения блока оргстекла с удаленным покрытием приведена на рис. 4,б. Длительность импульса $\Delta t_{0,5} \approx 2,2$ нс. Столь значительная разница в длительности свечения свидетельствует о том, что в первом случае регистрировалась в основном люминесценция эмалевого покрытия.

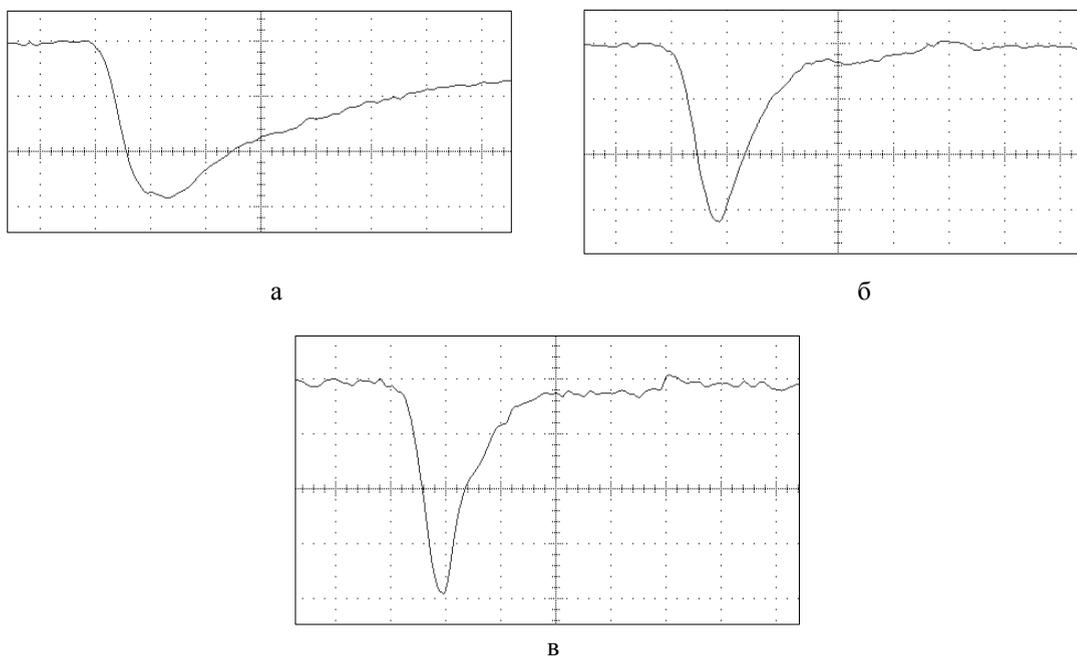


Рис. 4. Осциллограммы свечения блока оргстекла: а – люминесценция отражающего покрытия, $\Delta t_{0,5} \approx 8$ нс; б – люминесценция оргстекла, $\Delta t_{0,5} \approx 2,2$ нс; в – черенковское излучение оргстекла, $\Delta t_{0,5} \approx 1,6$ нс. Развертка 2 нс на клетку

В зарегистрированную длительность свечения $\Delta t_{0,5} \approx 2,2$ нс входит не только длительность люминесценции оргстекла, но и разрешающее время системы регистрации. Последнее определялось путем регистрации черенковского излучения, возбуждаемого электронным пучком в блоке оргстекла. Напомним, что в связи с отсутствием послесвечения длительность черенковского излучения определяется длительностью возбуждающего импульса электронов. Фильтр из алюминиевой фольги толщиной 150 мкм удалялся с окна газоразрядной камеры, на которое помещалась диафрагма диаметром 5 мм с целью уменьшения потока электронов до уровня, обеспечивающего регистрируемый сигнал свечения в линейной области ФЭУ. Зарегистрированная осциллограмма черенковского свечения приведена на рис. 4,в. Длительность импульса $\Delta t_{0,5} \approx 1,6$ нс соответствует разрешающему времени системы регистрации. Отсюда длительность люминесценции оргстекла

оценивается как $\Delta t_{0,5} \sim \sqrt{(2,2)^2 - (1,6)^2} \sim 1,5$ нс. С учетом того, что энергия электронов в измерениях люминесценции уменьшена на ~ 100 кэВ, а выход люминесценции прямо пропорционален полному пробегу электронов, который почти обратно пропорционален их энергии, вклад люминесценции в амплитуду сигнала составляет 25 % при регистрации черенковского излучения электронов с энергией ~ 270 кэВ.

Заключение

1. Длительность пучка электронов, генерируемого высоковольтным разрядом при многократных перенапряжениях в открытой атмосфере, не превышает $\Delta t_{0,5} \approx 0,15$ нс, что существенно меньше измеренной ранее [10, 11] длительности 0,25 нс. Собственная длительность пучка короче 0,1 нс, так как согласно данным [28] в процессе транспортировки по кабелю длиной 8 м сигнал уширяется на 0,1 нс.

2. На примерах регистрации импульсных характеристик детекторов, включающих сцинтилирующие пластмассы РОРОР, Б10, Б18 и фоторегистраторы СДФ-14 и СНФТ-8, и характеристик полупроводникового детектора СППД11-04 показано, что с помощью импульса электронов, генерируемого разрядом в открытой атмосфере, можно в субнаносекундном диапазоне определять временное разрешение трактов регистрации, включающих разнообразные детекторы ионизирующих излучений.

3. С помощью катода, включающего узел из серии эмитирующих лезвий, выход убегающих электронов из разряда в открытой атмосфере повышен в $\sim 4,5$ раза по сравнению с выходом в традиционной для наших экспериментов конфигурации с катодом с однородной эмитирующей поверхностью и даже по сравнению с выходом в конфигурации с «острым катодом» [8–11]. Благодаря повышенному выходу электронов удалось впервые зарегистрировать излучение Вавилова – Черенкова субнаносекундного импульса убегающих электронов в оргстекле и продемонстрировать возможность калибровки черенковских детекторов таким импульсом.

4. Измеренная длительность люминесценции оргстекла, возбуждаемой субнаносекундным импульсом убегающих электронов, равна $\Delta t_{0,5} \approx 1,5$ нс. Вклад люминесценции в амплитуду регистрируемого сигнала при использовании оргстекла в качестве радиатора при регистрации излучения Вавилова – Черенкова убегающих электронов с энергией ~ 270 кэВ не превышает 25 %.

5. Энергия убегающих электронов, генерируемых разрядами в открытой атмосфере при многократных перенапряжениях, измерялась различными методами [7–14]. Указанная здесь энергия ~ 270 кэВ измерена методом магнитной спектрометрии [8–11]. Генерация излучения Вавилова – Черенкова в радиаторе из оргстекла свидетельствует о том, что энергия убегающих электронов в столь плотной среде, как воздух при атмосферном давлении, во всяком случае, не ниже порога излучения Вавилова – Черенкова 178 кэВ в оргстекле.

Список литературы

1. Ковальчук Б. М., Месяц Г. А., Шпак В. Г. Генератор высоковольтных субнаносекундных электронных пучков // ПТЭ. 1978. № 6. С. 73–75.
2. Желтов К. А. Пикосекундные сильноточные электронные ускорители. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

3. Белкин Н. В., Тараканов М. Ю., Тарасов М. Д. Портативный генератор субнаносекундных импульсов быстрых электронов // ПТЭ. 1987. № 6. С. 133–134.
4. Яландин М. И., Шпак В. Г. Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
5. Wilson C. T. R. The acceleration of beta-particles in strong electric fields such as those of thunder-clouds // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1925. Vol. 22. P. 534–538.
6. Eddington A. S. The source of stellar energy // Suppl. to Nature. 1926. Vol. 2948. P. 25–32.
7. Тарасова Л. В., Худякова Л. Н., Лойко Т. В., Цукерман В. А. Быстрые электроны и рентгеновское излучение наносекундных импульсных разрядов в газах при давлениях 0,1–760 Торр // ЖТФ. 1974. Т. 44. С. 564.
8. Бабич Л. П., Лойко Т. В. Энергетические спектры и временные параметры убегающих электронов при наносекундном пробое плотных газов // ЖТФ. 1985. Т. 55. С. 956–958.
9. Бабич Л. П., Лойко Т. В., Цукерман В. А. Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов // УФН. 1990. Т. 160. Вып. 7. С. 49–82.
10. Бабич Л. П., Лойко Т. В. Генерация субнаносекундного импульса электронов и рентгеновского излучения при высоковольтных разрядах в атмосфере // ПТЭ. 1989. № 2. С. 188–189.
11. Babich L. P. Highenergy phenomena in electric discharges in dense gases: theory, experiment and natural phenomena. Arlington, Virginia: Futurepast Inc., 2003.
12. Бабич Л. П., Лойко Т. В. Особенности регистрации импульсов убегающих электронов высоких энергий и рентгеновского излучения, генерируемых высоковольтными наносекундными разрядами в атмосфере // Физика плазмы. 2010. Т. 36. С. 287–294.
13. Бабич Л. П., Лойко Т. В. Субнаносекундные импульсы убегающих электронов, генерируемые в атмосфере импульсами высокого напряжения микросекундной длительности // Докл. РАН. 2009. Т. 429. С. 35–39.
14. Месяц Г. А., Яландин М. И., Реутова А. Г. и др. Пикосекундные пучки убегающих электронов в воздухе // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 34–51.
15. Месяц Г. А., Королев Ю. Д. Объемный разряд высокого давления в газовых лазерах // УФН. 1986. Т. 148. С. 101–122.
16. Цукерман В. А. Портативные источники рентгеновских лучей // Вестник АН СССР. 1971. № 11. С. 18–25.
17. Белкин Н. В., Комяк Н. И., Пеликс Е. А., Цукерман В. А. Миниатюрный генератор наносекундных импульсов рентгеновских лучей // ПТЭ. 1972. № 2. С. 194–195.
18. Авилов Э. А., Белкин Н. В., Дудин А. В. и др. Импульсный стабильный разрядник высокого давления // Там же. 1973. № 1. С. 137–139.
19. Бабич Л. П., Донской Е. Н., Лойко Т. В. и др. Характеристики электронного пучка ускорителя МИН-1 и его поведение в воздухе // Там же. 2000. № 4. С. 82–85.
20. Фюнфер Э., Нейерт Г. Счетчики излучений. – М.: Гос. изд-во литературы в обл. науки и техники, 1961.

21. Андреещев Б. А., Аведисян В. С., Веронян С. М. и др. Быстродействующий пластмассовый сцинтиллятор СПС-Б18 // ПТЭ. 198. № 3. С. 67–68.
22. Веретенников А. И., Горбачев В. М., Предеин Б. А. Методы исследования импульсных излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
23. Бабич Л. П. Тормозное излучение электронов в средах с внешним электрическим полем // ЖТФ. 1972. Т. 42. С. 1617–1619.
24. Jelly J. V. Cherenkov's radiation and its application. London. – NY – Paris – LA: Pergamon press, 1958.
25. Альбиков З. А., Веретенников А. И., Козлов О. В. Детекторы импульсного ионизирующего излучения. – М.: Атомиздат, 1978.
26. Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения. – М.: Атомиздат, 1974.
27. Ефимов И. Е. Радиочастотные линии передач. – М.: Советское радио, 1964.

Calibration of Detectors of Ionizing Emissions by Means of Runaway Electron Beam of Subnanosecond Duration Generated by Discharge in Open Atmosphere at High Overvoltages

L. P. Babich, T. V. Loiko, A. V. Rodigin

Electric discharge in air at atmospheric pressure under conditions of multiple overvoltages generates electron beam of subnanosecond duration. By measuring the resolution time of registration lines including various detectors of ionizing emissions, efficiency is demonstrated of the beams for calibration of detectors with subnanosecond resolution time. The main advantage of such calibration method of is the absence of evacuated acceleration tube, small overall dimensions of the electron source and big operational resource.