

ИЗЛУЧЕНИЕ ВАВИЛОВА – ЧЕРЕНКОВА СУБНАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ГЕНЕРИРУЕМОГО РАЗРЯДОМ В ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРЕ

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

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Впервые наблюдалось излучение Вавилова – Черенкова пикосекундного ($\Delta t_{0,5} \approx 0,15$ нс) импульса убегающих электронов (УЭ) высоких энергий, генерируемых электрическим разрядом в открытой атмосфере. Измеренная длительность излучения $\Delta t_{0,5} \approx 0,4$ нс, ограничена временным разрешением системы регистрации. Впервые со стопроцентной достоверностью установлено, что спектр УЭ в столь плотной среде как воздух атмосферного давления простирается гораздо выше энергии 178 кэВ.

Введение

Черенковские детекторы широко используются для измерений импульсов ионизирующих излучений высоких энергий в связи с безинерционностью излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ) и отсутствием постлюминесценции [1, 2]. Пороговый характер ИВЧ гарантирует получение достоверной информации о том, что распределение по энергиям частиц, возбуждающих ИВЧ, простирается в область энергий выше порога. Поскольку ИВЧ сопровождается люминесценцией, в качестве радиатора используются вещества с низким уровнем люминесценции, в частности, широко используется оргстекло (полиметилметакрилат) [1, 2]. В предлагаемом сообщении впервые наблюдалось ИВЧ пикосекундного импульса убегающих электронов (УЭ) высоких энергий, генерируемых электрическим разрядом в столь плотной среде как воздух атмосферного давления. Впервые со стопроцентной достоверностью установлено, что спектр УЭ при разрядах в открытой атмосфере простирается выше пороговой энергии ИВЧ в оргстекле: 178 кэВ.

Постановка экспериментов

В качестве источника импульсов высокого напряжения используется высоковольтный блок малогабаритного рентгеновского аппарата [3] с емкостью $C_0 \approx 50$ пФ и индуктивностью $L_0 \approx 80$ нГн. Основными его элементами являются импульсный повышающий трансформатор и разрядник, формирующий субнаносекундный фронт импульса напряжения. В настоящей работе использовался

разрядник Р-43 на напряжение ~ 140 – 150 кВ [4], обеспечивающий в режиме холостого хода импульс напряжения с субнаносекундным фронтом и амплитудой ~ 250 – 270 кВ. Разряды выполнялись в камере, включающей диод с ненакаливаемым катодом, соединенный с разрядником последовательно. Энергия и выход УЭ зависит от конфигурации диода, которая характеризуется, прежде всего, радиусом кривизны рабочей поверхности катода r_{cath} и межэлектродным расстоянием d . Использовались два катода: стальной стержень диаметром 12 мм с конической рабочей поверхностью и углом заострения вершины $2\alpha = 60^\circ$ («острый катод») [5–7] и пять параллельных друг другу лезвий, изготовленных из тантала и закрепленных ортогонально поверхности плоского диска диаметром 10 мм на фокусирующем цилиндре [8]. Анод – плоский, изготовленный из алюминиевой фольги толщиной 15 мкм. В описываемых экспериментах межэлектродное расстояние d варьировалось в диапазоне 15–20 мм.

Импульс тока УЭ регистрировался коллектором, 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. В качестве радиатора ИВЧ использовался диск из оргстекла диаметром 2 см и толщиной 2 мм, который размещался за анодом. ИВЧ и люминесценция радиатора регистрировались фотоэлементом СДФ-14 (разрешающее время на полувысоте $\tau_{0,5} \sim 0,2$ нс) и ФЭУ СНФТ-8 ($\tau_{0,5} \sim 1,5$ нс).

Характеристики импульсов убегающих электронов

При подаче импульса высокого напряжения с субнаносекундным фронтом на газоразрядном диоде в открытой атмосфере реализуются многократные перенапряжения и развивается разряд, в котором генерируется субнаносекундный импульс УЭ с энергией в диапазоне сотен кэВ [5–7]. В случае достаточно больших межэлектродных расстояний d развивается объемный разряд, подоб-

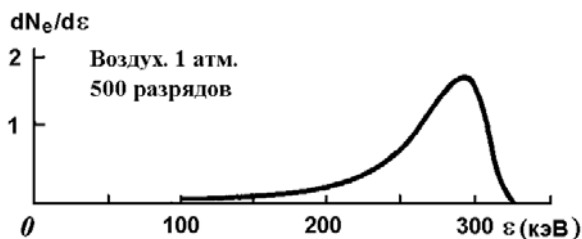


Рис. 1. Распределение электронов по энергиям [6]. В режиме холостого хода амплитуда импульса напряжения ~ 270 кВ. Межэлектродное расстояние $d = 20$ мм, радиус кривизны рабочей поверхности катода $r_{\text{cath}} = 200$ мкм, анод — алюминиевая фольга толщиной 8 мкм. $N_e \approx (0,5-1) \cdot 10^9$ e^- /разряд.

ный разряду с внешней предионизацией [9]. Установлено, что именно в объемных разрядах реализуется максимальный выход УЭ с максимальной энергией [6]. Количество УЭ, регистрируемых коллектором, не превышает величин $\sim (0,5-1) \cdot 10^9$ при использовании в качестве катодов металлических стержней с различной кривизной рабочей поверхности [5–7]. Распределение электронов по энергиям иллюстрируется на рис. 1 для одной из конфигураций диода. Распределение достигает максимального значения при энергии $\epsilon_m \approx 270$ кэВ, существенно превышающей величину eU_{max} , соответствующую максимальному значению импульса напряжения, реализующегося во время разряда (электроны аномальной энергии [6]). Измеренная ширина распределения $\Delta\epsilon_{\text{meas}} \approx 60$ кэВ. Поскольку для измерения распределения требовались сотни импульсов, то на величину $\Delta\epsilon_{\text{meas}}$ влиял разброс ($\sim 10\%$) амплитуды напряжения пробоя разрядника и амплитуды напряжения, реализующегося на диоде. По этой причине, а также вследствие рассеяния в веществе и геометрических факторов, распределение сильно уширено. Поэтому собственная ширина распределения в каждом отдельном разряде $\Delta\epsilon_{\text{intr}}$ намного меньше $\Delta\epsilon_{\text{meas}}$, так что $\epsilon_m \gg \Delta\epsilon_{\text{intr}}$, и можно говорить о почти моноэнергетическом пучке электронов.

Типичная осциллограмма импульса тока УЭ, генерируемого разрядом в диоде с катодом из серии лезвий, иллюстрируется на рис. 2а. Длительность импульса на полувысоте $\Delta t_{0,5} \approx 0,15$ нс.

Регистрация излучения Вавилова – Черенкова

Попытки зарегистрировать ИВЧ в экспериментах с «острым катодом», оказались безуспешными: генерируемый импульс УЭ не обеспечивал сигнал с коллектора, достоверно превышающий

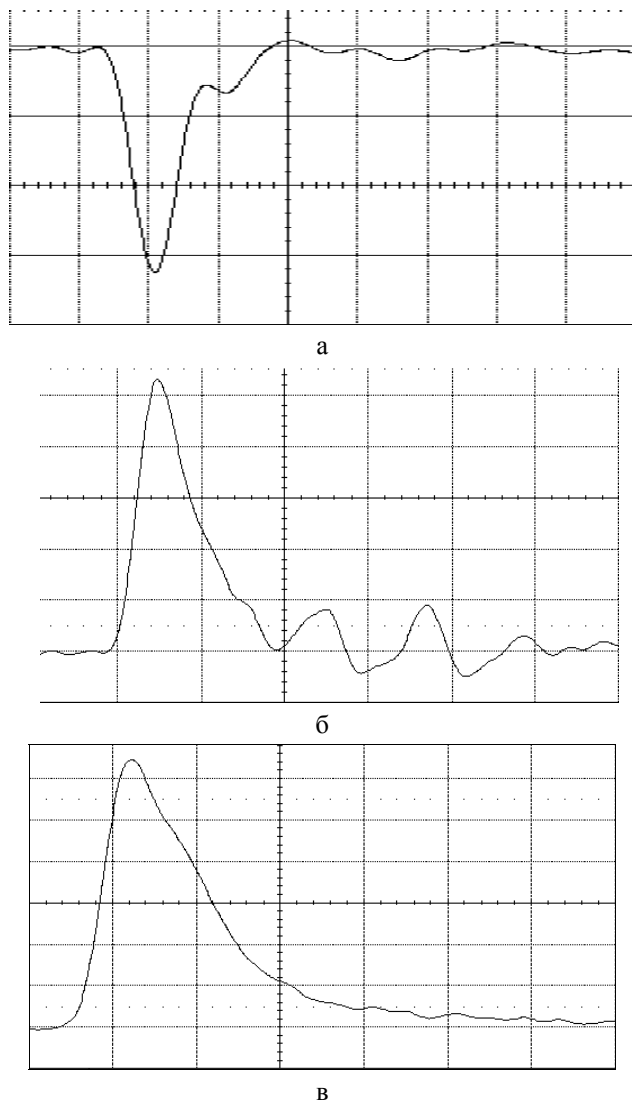


Рис. 2. Ток убегающих электронов на коллектор, $\Delta t_{0,5} \approx 0,15$ нс (а); свечение оргстекла, $\Delta t_{0,5} \approx 0,40$ нс (б); свечение сцинтиллятора Б18, $\Delta t_{0,5} \approx 0,65$ нс (в). Развертка: а — 0,2 нс на клетку; б, в — 0,5 нс на клетку. СДФ-14 ($\tau_{0,5} \sim 0,2$ нс), осциллограф Le Croy Wavemaster-8500A с полосой пропускания 5 ГГц

уровень электромагнитных наводок. В конфигурации с катодом из набора лезвий число УЭ увеличивается в 4–5 раз, плотность потока электронов,

падающих на коллектор, достигает величины $\sim(0,5-0,7) \cdot 10^9$ $1/\text{см}^2$, что позволяет, располагая фотоэлемент СДФ-14 с радиатором из оргстекла непосредственно на аноде, регистрировать ИВЧ.

На рис. 2 приведены осциллограммы свечений оргстекла и «быстрой» сцинтиллирующей пластмассы Б18 ($\tau_{0,5} \sim 0,2$ нс) [10], возбуждаемых импульсом УЭ. Длительность свечения оргстекла $\Delta t_{0,5} \approx 0,4$ нс, люминесценции пластмассы Б18 – $\Delta t_{0,5} \approx 0,65$ нс. Уже столь малая длительность свечения оргстекла, короче свечения пластмассы Б18, специально разработанной для измерений субнаносекундных импульсов излучений, является аргументом в пользу того, что регистрируется ИВЧ, а не люминесценция. Для повышения достоверности нами выполнено исследование относительного вклада люминесценции оргстекла.

Вклад люминесценции оргстекла

При регистрации ИВЧ в экспериментах с γ -излучения в области энергий квантов ~ 1 МэВ вклад люминесценции составляет величину $\sim 2-7\%$ [2].

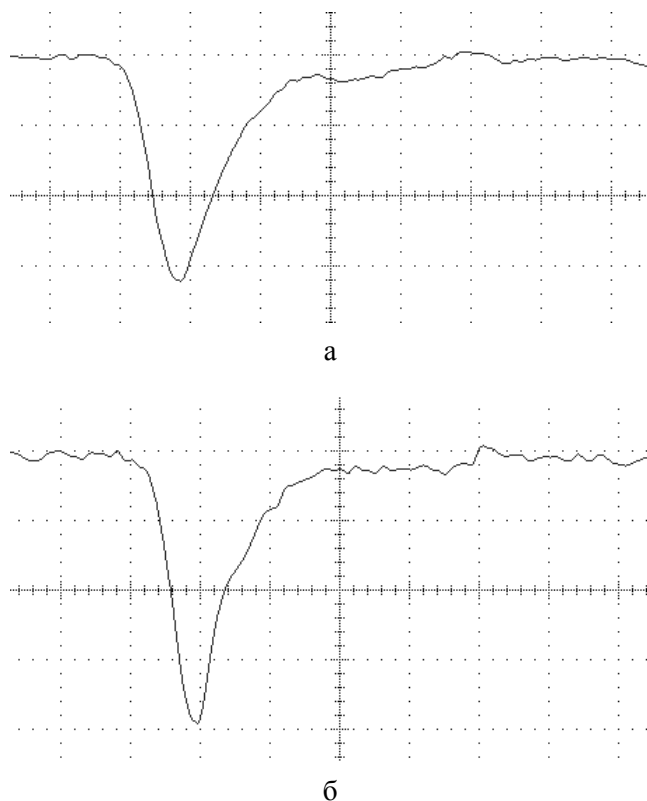


Рис. 3. Осциллограммы свечения блока оргстекла: люминесценция оргстекла, $\Delta t_{0,5} \approx 2,2$ нс (а); излучение Вавилова – Черенкова в оргстекле, $\Delta t_{0,5} \approx 1,6$ нс (б). Развертка 2 нс на клетку. ФЭУ СНФТ-8 ($\tau_{0,5} \sim 1,5$ нс), осциллограф TDS 3052B с полосой пропускания 500 МГц.

Представляет интерес оценить вклад люминесценции в регистрируемый сигнал при более низких энергиях, характерных для источников ускоренных электронов и рентгеновского излучения на основе генераторов, подобных описанным в работах [3, 11–14], в том числе, генератора, используемого в настоящей работе, а также измерить длительность люминесценции оргстекла. Поскольку энергия УЭ $\epsilon_e \approx 270$ кэВ превышает порог ИВЧ в оргстекле 178 кэВ, то для возбуждения только люминесценции энергию электронов необходимо понизить в область ниже порога. С этой целью на выходе газоразрядной камеры помещался алюминиевый фильтр толщиной 150 мкм. Поскольку потери энергии электронов в такой фольге и в слое воздуха толщиной 8 см между анодом и радиатором согласно данным [15] оцениваются величиной ~ 100 кэВ, естественно ожидать, что свечение, возбуждаемое в оргстекле электронами, прошедшими фильтр, в такой постановке является люминесценцией.

Эксперименты выполнены в конфигурации 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, в качестве которого использовался стандартный блок оргстекла диаметром 5 см и длиной 10 см. Электроны облучали торец блока, который размещался на расстоянии 8 см от анода. Осциллограмма свечения блока приведена на рис. 3а. Длительность импульса $\Delta t_{0,5} \approx 2,2$ нс.

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 ИВЧ, возбуждаемого импульсом УЭ в блоке оргстекла. Напомним, что в связи с отсутствием послесвечения длительность ИВЧ определяется длительностью возбуждающего импульса электронов ($\Delta t_{0,5} \approx 0,15$ нс). 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 в линейной области ФЭУ. Зарегистрированная осциллограмма ИВЧ приведена на рис. 3б. Длительность импульса $\Delta t_{0,5} \approx 1,6$ нс, соответствует разрешающему времени системы регистрации. Отсюда длительность люминесценции оргстекла оценивается величиной $\Delta t_{0,5} \sim \sqrt{(2,2)^2 - (1,6)^2} \sim 1,5$ нс. Поскольку выход люминесценции прямо пропорционален полному

пробегу электронов, который почти обратно пропорционален их энергии, то с учетом поправки, учитывающей уменьшение энергии электронов на величину ~ 100 кэВ, вклад люминесценции в амплитуду сигнала оценивается величиной $\sim 25\%$ при регистрации ИВЧ электронов с энергией ~ 270 кэВ.

Эффект тормозного излучения

Одновременно с ИВЧ неизбежно генерируется тормозное излучение. Поскольку длительность импульсов тормозного излучения и ИВЧ одинаковы и близка к длительности накачивающего импульса УЭ, невозможно различить импульсы ИВЧ и тормозного излучения по их длительности. Поэтому, сравнение энергетических выходов W_{ch} и W_{br} обоих видов излучения является единственным способом доказать, что регистрируется ИВЧ, а не тормозное излучение. Невозможно, однако, в эксперименте надежно выделить ИВЧ на фоне тормозного излучения именно из-за одинаковой длительности обоих импульсов. Чтобы сравнить W_{ch} и W_{br} , вычислим их отношение.

Используя классическую формулу для числа фотонов, излучаемых в области длин волн между λ_1 и λ_2 [1], энергия ИВЧ, излучаемая электроном на пути длиной $l(\varepsilon_{th})$, на котором его энергия уменьшается до пороговой величины ε_{th} , определяемой соотношением $\beta(\varepsilon_{th})n=1$, вычисляется следующим образом [1]:

$$W_{ch} = 2\pi\alpha \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 \lambda_1} \hbar \Delta\omega \int_0^{l(\varepsilon_{th})} \left(1 - \frac{1}{\beta(x)^2 n^2} \right) dx. \quad (1)$$

Используя формулу для эффективного излучения тормозного излучения в низкочастотной области [17], энергию тормозного излучения электрона, излученную на пути $l(\lambda_2)$, на котором его энергия уменьшится до $\varepsilon(\lambda_2) = hc/\lambda_2$, может быть вычислена следующим образом:

$$W_{br} = \frac{8}{3} r_e^2 a m c^2 N \sum_i k_i Z_i^2 \hbar \Delta\omega \cdot \int_0^{l(\lambda_2)} \varepsilon(x) dx. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) $r_e = e^2/mc^2$ – классический радиус электрона, $\alpha = e^2/\hbar c$ – постоянная

тонкой структуры, $\beta = \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{mc^2 + \varepsilon} \right)^2}$, v и ε –

скорость и кинетическая энергия электрона, $\Delta\omega$ – диапазон частот, соответствующий области длин волн $\lambda_1 - \lambda_2 = (300-600)$ нм наивысшей чувствительности фото-ячейки СДФ-14, $n = 1,495$ – показатель преломления плексигласа [1], $\varepsilon_{th} \approx 176,4$ кэВ пороговая энергия электронов в плексигласе [1], $N = \frac{N_{Av} \cdot \rho}{M}$ – концентрация молекул плексигласа, $\rho = 1,19$ г/см³ – массовая плотность плексигласа, $N_{Av} \approx 6,025 \cdot 10^{23}$ 1/гмоль – число Авогадро. Химический состав плексигласа близок к $C_5H_8O_2$ [1]; соответственно, $M = 100$ г/гмоль, атомное число Z_i и число k_i атомов, составляющих молекулу плексигласа соответственно равны $Z_i = 6, 1, 8$ и $k_i = 5, 8, 2$.

Используя формулу для удельных энергетических потерь электронов на ионизацию и возбуждение атомарных частиц радиатора [18]

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = -\frac{2\pi e^4}{\varepsilon} N \cdot \sum_i k_i Z_i \cdot \ln \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_{ion}} \approx -\frac{\text{const}}{\varepsilon}, \quad (3)$$

интегрирование по x можно заменить интегрированием по ε в области от начальной энергии ε_0 в точке $x = 0$ до ε_{th} в формуле (1) или $\varepsilon(\lambda_2) = hc/\lambda_2 \approx 2.06$ эВ в формуле (2). Эффективную «энергию ионизации» [18] в рассматриваемом случае можно вычислить следующим образом: $\varepsilon_{ion} (eV) \approx 13,5 \cdot \sum_i k_i Z_i / \sum_i k_i$.

Искомое отношение имеет следующий вид:

$$\frac{W_{br}}{W_{ch}} = \frac{8}{3\pi} \frac{r_e^2 N \lambda_1 (\varepsilon_0 - \varepsilon(\lambda_2)) \cdot \sum_i k_i Z_i^2}{\left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \cdot \left((\varepsilon_0^2 - \varepsilon_{th}^2) (1 - n^{-2}) - 2n^{-2} \ln \frac{\varepsilon_0 + 2}{\varepsilon_{th} + 2} \right)}, \quad (4)$$

где энергия дается в единицах $mc^2 \approx 510$ кэВ.

Эта формула с начальной энергией $\varepsilon_0 = \varepsilon_m/mc^2 \approx 270/510$ электронов, облучающих плексиглас – радиатор, дает отношение $W_{br}/W_{ch} \approx 1,2 \cdot 10^{-4}$, означающее, что ИВЧ доминирует в области чувствительности детектора. Заметим, что квантовые поправки к формулам (1) и (2) и релятивистская поправка к формуле (3) в интересую-

щем нас диапазоне энергий являются близкими к единице множителями.

Толщина радиатора, 2 мм, была выбрана из условия, чтобы она превышала полный пробег электронов с начальной энергией $\varepsilon_0 = 270$ кэВ, который согласно формуле (3) с

$\ln \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_{ion}} \approx \ln \frac{(\varepsilon_0 + \varepsilon(\lambda_2))}{\varepsilon_{ion}}$ равен 0,77 мм. Фактически

пробег электрона меньше из-за углового рассеяния. Следовательно, формула (2), полученная в предположении, что электрон полностью теряет энергию в мишени, верна.

Заключение

1. В конфигурации с катодом, выполненным из серии эмитирующих лезвий, выход УЭ из разряда в открытой атмосфере повышен в ~4–5 раз по сравнению с выходом в традиционной для наших экспериментов конфигурации катода [5–7]. Измеренная длительность импульса УЭ $\Delta t_{0,5} \approx 0,15$ нс. Благодаря повышенному выходу УЭ удалось впервые зарегистрировать излучение Вавилова – Черенкова субнаносекундного импульса УЭ разряда в открытой атмосфере. Измеренная длительность излучения в оргстекле $\Delta t_{0,5} \approx 0,4$ нс, фактическая длительность не превышает длительности импульса УЭ.

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

3. Энергия УЭ, генерируемых разрядами в открытой атмосфере при многократных перенапряжениях, измерялась фольговыми (см., например, [5–7, 16–19] и цитируемую литературу) и магнитными [6, 19] спектрометрами. Регистрировались электроны с энергией, превышающей величину, соответствующую амплитуде импульса напряжения, реализующуюся во время разряда (электроны аномальной энергии) [6, 19]. По поводу реальности этого эффекта высказываются сомнения [18]. Генерация излучения Вавилова – Черенкова в оргстекле свидетельствует о том, что распределение УЭ по энергиям, генерируемое разрядами в столь плотной среде как воздух при атмосферном давлении, простирается в область энергий гораздо выше порога излучения Вавилова – Черенкова 178 кэВ в оргстекле. Этот результат согласуется со спектром электронов, измеренным методом магнитной

спектрометрии [6, 19] (рис. 1) и является серьезным аргументом в пользу реальности эффекта генерации электронов аномальной энергии в дополнение к приведенным в статье [19] аргументам, основанным на экспериментальных данных. Представляет интерес регистрация излучения Вавилова – Черенкова в радиаторе с порогом выше 178 кэВ, но ниже энергии УЭ в максимуме распределения $\varepsilon_m \sim 270$ кэВ, зарегистрированной с помощью магнитного спектрометра (рис. 1).

Список литературы

1. Jelly J. V. Cherenkov's radiation and its application. Pergamon press. London. New York. Paris. Los Angeles. 1958.
2. Альбилов З. А., Веретенников А. И., Козлов О. В. Детекторы импульсного ионизирующего излучения. Москва. Атомиздат. 1978.
3. Цукерман В. А. Портативные источники рентгеновских лучей // Вестник Академии наук. 1971. № 11. С. 18–25.
4. Авилов Э. А., Белкин Н. В., Дудин А. В. и др. Импульсный стабильный разрядник высокого давления // ПТЭ. 1973. № 1. С. 137–139.
5. 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.
6. 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.
7. Бабич Л. П., Лойко Т. В. Субнаносекундные импульсы убегающих электронов, генерируемые в атмосфере импульсами высокого напряжения микросекундной длительности // ДАН. 2009. Т. 429. С. 35–39.
8. Бабич Л. П., Донской Е. Н., Лойко Т. В. и др. Характеристики электронного пучка ускорителя МИН-1 и его поведение в воздухе. // ПТЭ. 2000. № 4. С. 82–85.
9. Месяц Г. А., Королев Ю. Д. Объемный разряд высокого давления в газовых лазерах. // УФН. 1986. Т. 148. С. 101–122.
10. Андреещев Б. А., Аведисян В. С., Веронян С. М. и др. Быстродействующий пластмассовый сцинтиллятор СПС-Б18 // ПТЭ. 1988. № 3. С. 67–68.
11. Ковальчук Б. М., Месяц Г. А., Шпак В. Г. Генератор высоковольтных субнаносекундных электронных пучков // ПТЭ. 1978. № 6. С. 73–75.

12. Желтов К. А. Пикосекундные сильноточные электронные ускорители. Москва. Энергоатомиздат. 1991.
13. Белкин Н. В., Тараканов М. Ю., Тарасов М. Д. Портативный генератор субнаносекундных импульсов быстрых электронов // ПТЭ. 1987. № 6. С. 133–134.
14. Яландин М. И., Шпак В. Г. Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
15. Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения. Москва. Атомиздат. 1974.
16. Alekseev S. B., Orlovski V. M. and Tarasenko V. F. Electron Beams Formed in a Diode Filled with Air or Nitrogen at Atmospheric Pressure // Tech. Phys. Lett., 2003. Vol. 29. No. 5. P. 411–413.
17. Yalandin M. I., Mesyats G. A., Reutova A. G. et al. Limitation of runaway electron beam duration in air-filled gap with inhomogeneous field // Tech. Phys. Lett. 2011. Vol. 37. No. 4. P. 371–375.
18. Yalandin M. I., Mesyats G. A., Reutova A. G. et al. Picosecond runaway electrons beams in air // Физика плазмы 2012. Т. 38. С. 34–51. Plasma Phys. Rep. 2012. Vol. 38. Issue 1. P. 29–45.
19. Babich L. P., Loiko T. V. Whether abnormal energy electrons are being produced in electric discharges in dense gases. // Pis'ma v ZhETF. 2015. Vol. 101. Iss. 11. P. 830–835. JETP Lett. 2015. Vol. 101. No. 11. P. 735–739.