

10;12

Расчет и экспериментальная отработка комптоновского преобразователя энергии гамма- и рентгеновского излучений в электрический ток

© В.Н. Грызун, Г.Г. Катраев, А.К. Чернышев

Российский федеральный ядерный центр
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 7 марта 2000 г. В окончательной редакции 8 августа 2000 г.)

Кратко описан метод расчета и экспериментальная отработка комптоновского генератора электрического тока, получена его токовая чувствительность к единичному γ -кванту $\eta = 7.0 \cdot 10^{-21} \frac{\text{A}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s}}{\gamma}$. При достаточных потоках γ -квантов его ток может служить для зарядки батарей, а при импульсной запитке генератора потоком γ -квантов импульс электрического тока способен включить аппаратуру, взорвать металлическую проволочку синхронно с импульсом γ -квантов. Генератор может быть использован в качестве детектора излучения прямой зарядки для измерения дозы, мощности дозы и формы импульса излучения.

Введение

Взаимодействие с веществом направленных потоков излучений электромагнитной природы с высокой энергией γ -квантов приводит к направленному движению высокоэнергетических заряженных частиц, т. е. к протеканию радиационно-стороннего электрического тока (I_{st} с плотностью \mathbf{j}_{st}), а также к разделению зарядов в веществе с образованием в нем тока низкоэнергетичных заряженных частиц — тока, наведенного излучением проводимости, т. е. электрического тока утечки (I_σ с плотностью \mathbf{j}_σ) в нашем случае в направлении, противоположном I_{st} [1].

Отмеченные явления в практике приводят к ряду отрицательных последствий при работе приборов в радиационном поле. В то же время они могут быть использованы в ряде специальных устройств для получения положительного эффекта [2].

Предлагаемая работа посвящена устройствам для получения положительного эффекта, созданного направленным движением высокоэнергетичных заряженных частиц. Устройства такого типа являются преобразователями энергии гамма-рентгеновских излучений в энергию электрического тока. По своему назначению эти устройства бывают двух типов; генераторы тока и детекторы излучения прямой зарядки [3]. По конструкции и методам расчета они совпадают (см. (6) настоящей работы). Так как в рассматриваемом в работе диапазоне энергий излучений 0.5–10 MeV преобладает комптоновское рассеяние γ -квантов на связанных электронах атомов диэлектрика конструкции, то назовем оба типа устройств комптоновскими генераторами тока (КГ). Конструктивно КГ представляет собой диэлектрический промежуток произвольной геометрии с двумя металлическими электродами на его границах или систему таких промежутков.

В работе приводится расчет и калибровка устройства в виде плоского диска с обкладками из медной фольги толщиной $5 \cdot 10^{-5}$ м и промежутка d между ними, заполненного полиэтиленом $(\text{CH}_2)_n$ или фторопластом $(\text{CF}_2)_n$. Рассматриваемый диапазон энергий γ -квантов, химический состав материалов промежутка и размер d таковы, что позволяют в нашем случае пренебречь эффектом образования пар и вкладом тонких обкладок в процесс образования I_{st} и I_σ конструкции.

Электродинамическая задача в облучаемом γ -квантами промежутке с конденсированным диэлектриком

Задача для расчета электрического поля в диэлектрическом промежутке КГ в радиационном поле имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{j}_{st} - \mathbf{j}_\sigma) = \text{div}(\mathbf{j}_{st} - \sigma \mathbf{E}),$$

$$\text{div} \mathbf{D} = \text{div}(\epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}) = \rho. \quad (1)$$

Здесь σ — наведенная излучением удельная проводимость диэлектрика; \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля в диэлектрике, \mathbf{D} — вектор электрического смещения; ϵ_0 — электрическая постоянная, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ρ — плотность объемного заряда в диэлектрике, t — время. Задача (1) решается вследствие наличия исследованных зависимостей материальных параметров конкретного диэлектрика (σ , ϵ , \mathbf{j}_{st}) от параметров радиационного поля: спектра, дозы, мощности дозы, времени воздействия и релаксации параметров после воздействия, а также от внешних условий, сопровождающих радиационное поле. Решение системы (1) по пространству в условиях, когда даже для нижнего края диапазона энергий γ -квантов их пробег [4] в диэлектрике много

больше d без рассмотренных явных зависимостей параметров диэлектрика от параметров воздействующего радиационного поля, имеет вид

$$I_g(t) = \frac{d}{dt}(CV) + \left(\frac{1}{R_\sigma(t)} + \frac{1}{R_n} \right) V = I_c + I_\sigma + I_n. \quad (2)$$

Здесь $I_g(t)$ — ток генератора как функция $\mathbf{j}_{st}(t)$; V — разность потенциалов между обкладками генератора, наведенная излучением; C — емкость промежутка; R_σ — сопротивление утечки промежутка; R_n — сопротивление нагрузки; I_n — ток, ответвленный во внешнюю цепь; I_c — ток зарядки емкости промежутка. Хотя в выражении (2) генерационной функцией является только $I_g(t)$, индуцируемое излучением электрическое поле в промежутке, которым определяются энергетические и токовые возможности КГ, зависит и от других материальных параметров диэлектрика. Поэтому полный расчет КГ предполагает расчет и калибровку трех материальных параметров диэлектрика ($\sigma, \varepsilon, \mathbf{j}_{st}$) в их зависимости от параметров радиационного поля и геометрии конструкции. Но так как при использовании диэлектрических промежутков как генератора тока, запитываемых γ -излучением, целевая установка заключается в получении значимых величин I_n , то, согласно (2), идеальный случай будет в режиме короткого замыкания $I_n = I_g(t)$. Практически стремятся осуществить режим, близкий к режиму короткого замыкания. В этом случае током утечки можно пренебречь по сравнению с током $I_g(t)$ и, согласно (2), получим $I_n \cong I_g(t) - I_c$. Выбирая конструкцию генератора и нагрузку таким образом, чтобы время установления разности потенциалов между обкладками генератора было много меньше времени воздействия излучения, достигнем случая $I_g(t) \cong I_n$. Поэтому данная работа посвящена только расчету тока генератора $I_g A(t)$ и его чувствительности к излучению, экспериментальной проверке данного расчета и не касается расчета и калибровки проводимости и диэлектрической проницаемости диэлектрика.

1) Расчет тока и чувствительности комптоновского генератора. Основные источники γ -полей (особенно импульсных) имеют непрерывный спектр γ -квантов. Определить токовые и энергетические возможности КГ экспериментальным методом калибровки в этих условиях не представляется возможным, поскольку не существует достаточно большого набора калиброванных источников приемлемой мощности, перекрывающих весь непрерывный спектр γ -излучения. Поэтому без расчетных методов здесь в принципе не обойтись. В таких случаях разрабатывается расчетный метод определения чувствительности КГ по току, предложенный расчетный метод тестируется по амплитуде с помощью экспериментального определения чувствительности КГ на имеющихся калиброванных монохроматических статических источниках γ -излучения и по повторяемости током КГ формы воздействующего γ -излучения на импульсном источнике с известной или измеряемой

формой излучения. При этом совпадение расчетных и экспериментально измеренных значений чувствительности тестирует как сам метод расчета, так и технологию изготовления КГ.

Пусть на плоский КГ нормально к его поверхности падает поток гамма-квантов (γ) $N_0 \frac{\gamma}{\text{cm}^2}$. Пусть γ -кванты в потоке распределены с некоторой спектральной плотностью. Тогда групповой спектр γ -квантов, нормированный на единицу, имеет вид

$$f(E)\Delta E = \frac{\Delta N_E}{N_0}. \quad (3)$$

Здесь E — энергия γ -квантов [MeV], ΔN_E — число квантов в потоке с энергией в интервале $\Delta E = E_2 - E_1$, $f(E)$ — плотность распределения γ -квантов в потоке по энергии [MeV $^{-1}$].

Далее пусть распределение γ -квантов в потоке по времени, нормированное на единицу, имеет вид

$$\varphi(t)\Delta t = \frac{\Delta N_t}{N_0}. \quad (4)$$

Здесь ΔN_t — число γ -квантов в потоке, приходящее в интервале времени $\Delta t = t_2 - t_1$, $\varphi(t)$ — плотность распределения γ -квантов в потоке по времени [s $^{-1}$] описывает форму импульса излучения.

Введем обозначения $\mu(E)$ — коэффициент ослабления γ -излучения в диэлектрике, $\delta(E)$ — средняя проекция перемещения электрона отдачи в диэлектрике на первоначальное направление движения падающего кванта, q — заряд электрона. Тогда модуль плотности радиационно-стороннего тока в диэлектрике запишется

$$j_{st}(x, t) = -qN_0 \varphi(t) \int_0^{E_{gr}} \mu(E) \exp(-\mu(E)x) \delta(E) f(E) dE, \quad (5)$$

где E_{gr} — максимальное значение энергии γ -квантов в потоке; x — пространственная координата, совпадающая с направлением падения γ -квантов на КГ и отсчитываемая от его передней обкладки.

Выражение (5) показывает, что плотность радиационно-стороннего тока повторяет во времени форму воздействующего излучения. $I_g(t)$ в (2) выражается через $\mathbf{j}_{st}(x, t)$, являясь сверткой $\mathbf{j}_{st}(x, t)$ по пространству с учетом плотности распределения электронов отдачи в диэлектрике и с учетом коэффициента передачи их заряда на обкладку КГ, который зависит от геометрической формы диэлектрического промежутка.

Опуская промежуточные выкладки, приведем готовое выражение $I_g(t)$ плоского КГ для условий облучения на статическом монохроматическом γ -источнике при нормальном падении γ -квантов на плоскость КГ, равномерном облучении по площади обкладки S и при толщине диэлектрика, много меньшей пробега γ -квантов в нем

$$I_g(t) = 0.5S qN_0 \varphi(t) \delta \mu^2 d. \quad (6)$$

Заметим, что в выражениях (5) и (6) $N_0 \varphi(t)$ представляет плотность потока γ -квантов и является мгновенной мощностью воздействующего потока, определяет повторяемость во времени формы воздействующего излучения током генератора. В случае статического γ -источника $N_0 \varphi(t)$ является постоянной во времени плотностью потока γ -квантов; обозначим ее через Φ_0 . Определим чувствительность КГ по току как ток, обеспечиваемый генератором при плотности потока γ -квантов, равной единице. Тогда для условий облучения на статическом γ -источнике "Эталон-3" из радионуклида Co_{27}^{60} с эффективной энергией γ -квантов, равной 1.253 MeV, и для геометрических размеров использованного КГ расчетное значение чувствительности η составит величину

$$\eta = \frac{I_g}{\Phi_0} = 0.5S q \delta \mu^2 d = 6.71 \cdot 10^{-21} \frac{\text{A} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}}{\gamma}.$$

Калибровка генератора на статической установке γ -излучения «Эталон-3»

Цель калибровки — измерение чувствительности КГ к γ -квантам установки с источником из радионуклида Co_{27}^{60} . Чувствительность определяется как отношение тока КГ к проходящей через последний плотности потока γ -квантов.

1) Средства измерений. Установка "Эталон-3", аттестованная ВНИИМ им. Д.И. Менделеева как вторичный рабочий эталон значений экспозиционной дозы (ЭД) и мощности экспозиционной дозы (МЭД) (свидетельство № 39/91). Участвующие в измерениях приборы — усилитель У5-11, дозиметр М2300, вольтметр Щ1516, ЭКВМ ДЗ-28 аттестованы ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и отраслевой лабораторией измерительной техники.

При калибровке использовался источник активностью $\sim 100 \text{Ci}$, ось пучка γ -квантов которого проходила перпендикулярно через центр плоскости рабочего объема КГ. Передняя стенка последнего располагалась в 57 см от центра источника.

2) Измерения и результаты. Однородный (в пределах $\pm 3\%$) коллимированный поток γ -квантов равномерно облучал поверхность КГ. Используя дозиметр М2300, относительным методом были определены различия в значениях МЭД при различных диаметрах коллиматора, а также значение МЭД при $l = 57 \text{cm}$ по аттестованной точке ($l = 150 \text{cm}$). Достоверность измеренного значения МЭД с погрешностью 2.5% подтверждена законом МЭД $\cdot l^2 = \text{const}$. Взято среднее.

Плотность потока γ -квантов Φ_γ ($\gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) связана с мощностью экспозиционной дозы МЭД ($\mu \text{r/s}$) соотношением $1.70 \cdot 10^3 \gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{s} = 1 \mu \text{r/s}$. Используя измеренное значение МЭД на 57 см от центра источника, здесь получено значение $\Phi_\gamma = 1.51 \cdot 10^8 \gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$.

Чувствительность КГ к γ -квантам источника определялась по формуле

$$\eta_\gamma = \frac{U}{\Phi_\gamma \cdot R_n} = 7.0 \cdot 10^{-21} \frac{\text{A} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}}{\gamma},$$

где $R_n = 1.01 \cdot 10^{11} \Omega$ — значение измерительного сопротивления усилителя У5-11; $U(V) = U_2 - U_1$, где U_2 — среднее напряжение на пластинах КГ под облучением, U_1 — среднее без облучения.

Средние значения напряжений получены из десятков наблюдений, каждое из которых представляет усредненное на ДЗ-28 значение напряжения, полученное из 100–300 мгновенных отсчетов вольтметра Щ1516.

Систематические погрешности отдельного измерения: $\pm 3\%$ — погрешность МЭД на 57 см от источника, $\pm 4\%$ — погрешность переходного коэффициента между МЭД и Φ_γ , $\pm 2\%$ — погрешность измерения R_n . Погрешностями Щ1516 и М2300 при относительных измерениях ввиду их малости можно пренебречь. Случайная погрешность отдельного измерения складывается из случайных погрешностей измерения напряжений и не превышает $\pm 6\%$ при доверительной вероятности 0.95.

Таким образом, суммарная относительная погрешность отдельного измерения чувствительности КГ, определенная согласно Государственному стандарту 8.207, не превышает $\pm 9\%$ при доверительной вероятности 0.95. Разброс воспроизводимости результатов не превышал $\pm 3.5\%$. Отличие расчетного значения чувствительности КГ от экспериментального равно 4.1% укладывается в погрешность калибровки и обусловлено практически устранимой известной систематической погрешностью расчета.

Результаты исследования генератора на быстром импульсном графитовом ядерном реакторе

Цель обработки на быстром импульсном графитовом реакторе (БИГР) [5] — зарегистрировать форму импульса тока КГ, запитываемого импульсным γ -излучением реактора, и сравнить ее с формой импульса излучения реактора, регистрируемого его штатной методикой [5]. Качественным параметром этого сравнения является сама форма сравниваемых импульсов, количественным — длительность импульса по времени на полувысоте его амплитудного значения.

КГ был установлен на расстоянии 84 см от поверхности активной зоны реактора.

Результаты

Длительность импульса тока КГ, измеренная по экспериментальной осциллограмме на половине высоты его амплитуды, составила $3.25 \cdot 10^{-3} \text{s}$. Указанное значение отличается на 0.31% от временного интервала на

полувысоте реакторного импульса, зарегистрированного его штатной методикой. Это отличие укладывается в погрешность измерения в $\pm 10\%$ при регистрации обоих значений.

Сравнение формы импульса тока КГ с формой импульса излучения реактора показало их полное соответствие.

Заключение

1. Ввиду невозможности экспериментального определения методом калибровки электродинамических радиационных характеристик диэлектрического промежутка, запитываемого потоком γ -квантов непрерывного спектра, из-за отсутствия калиброванных статических монохроматических γ -источников приемлемой мощности, перекрывающих весь непрерывный спектр импульсных источников γ -квантов, реализован расчетный метод определения этих характеристик, основанный на решении электродинамической краевой задачи в промежутке и учитывающий спектр и плотность потока γ -квантов. Приведено решение задачи для плоской геометрии, которое функционально связывает ток и разность потенциалов между обкладками генератора с параметрами радиационного поля.

2. Проведено экспериментальное тестирование расчетного метода учета спектра (радионуклид Co_{27}^{60}) и интенсивности (импульсный ядерный реактор) потока γ -квантов. Эксперименты показали, что расчетная и экспериментальная чувствительности генератора по току различались на 4.1%, а зарегистрированные форма и длительность импульсов генератора отличались на 0.31% от формы и длительности импульсов ядерного реактора, зарегистрированных его штатной методикой. Указанные различия с запасом укладываются в погрешность измерений и подтверждают правильность метода расчета и надежность технологии изготовления КГ.

3. Совпадение расчетного и экспериментального значений чувствительности КГ по току имеет более широкое значение, чем тестирование метода расчета тока конкретного генератора. По существу оно является тестированием метода расчета радиационно-стороннего тока диэлектрика как такового.

4. Полученные результаты показывают, что диэлектрический промежуток преобразует энергию квантов электромагнитного поля высокой частоты $2 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{21}$ Hz в энергию импульса электрического тока с длительностью, равной длительности экспозиции радиационного поля. Энергию тока можно накапливать в батареях, использовать для включения аппаратуры либо взрыва металлической проволоки синхронно с воздействующим излучением, преобразовывать в энергию электромагнитного импульса с частотой, соответствующей длительности экспозиции радиационного поля.

5. Результаты расчета и эксперимента показывают, что генератор тока может быть использован в качестве

детектора прямой зарядки для измерения формы импульса излучения γ -квантов любого спектра; для измерения дозы и мощности излучения в случаях монохроматического излучения γ -квантов; когда спектр γ -квантов непрерывен, но до опыта известен или измеряется в опыте; спектр непрерывен, неизвестен, но от опыта к опыту меняется незначительно ($\sim 10\%$).

Список литературы

- [1] Gross B.J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. N 5. P. 1635–1641.
- [2] Gross B.J. // Radiation Research. 1961. Vol. 14. P. 117–125.
- [3] Иванов В.И. Дозиметрия ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1964. 264 с.
- [4] Сторм Э., Исразль Х. Сечения взаимодействия γ -излучения. Справочник. М.: Атомиздат, 1973. 256 с.
- [5] Кувшинов М.И., Колесов В.Ф., Воинов А.М., Смирнов И.Г. // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1988. Вып. 1. С. 3–12.