

Д.А. Муслимов, А.С. Лелюхин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ПИКОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО СКОРОСТИ ЗАТУХАНИЯ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ДЕТЕКТОРЕ

Аннотация

В статье предложен прямой радиационный метод измерения практического пикового напряжения по величине скорости затухания тормозного излучения в веществе линейного дискретного полупроводникового детектора. Описана методика формирования абсорбционных кривых. Представлены результаты исследований, выполненных на математической модели абсорбционного киловольтметра.

Спектральный состав тормозного излучения в общем случае зависит от приложенного анодного напряжения, формы кривой напряжения, материала анода и угла наклона анода и эквивалентной суммарной фильтрации. Для характеристики условий генерации излучения новым стандартом на дозиметрические приборы, используемые для неинвазивного измерения анодного напряжения [1], предписывается использовать практическое пиковое напряжение (PPV). Согласно стандарту, PPV определяется как «постоянный потенциал, образующий такой же контраст воздушной кермы за определенным фантомом, что и напряжение испытываемой формы».

На практике измерение PPV , как правило, осуществляют косвенным двухдетекторным методом путем регистрации зависимости пикового напряжения (kVp) от времени и расчета PPV по прилагаемой в стандарте методике. Прямые измерения PPV по контрасту воздушной кермы, ввиду громоздкости рентгенооптической схемы метода измерений, реализуют только в лабораторных условиях.

Суть предлагаемого нового радиационного метода измерения PPV заключается в регистрации кривой затухания тормозного излучения в веществе дискретного полупроводникового детектора и в последующем определении скорости затухания излучения, сопоставленной значениям PPV посредством калибровочной характеристики.

Для формирования абсорбционной кривой предлагается использовать линейный дискретный полупроводниковый детектор, размещаемый в потоке излучения таким образом, что каждый предыдущий канал детектирования служит фильтром для последующего (рис. 1).

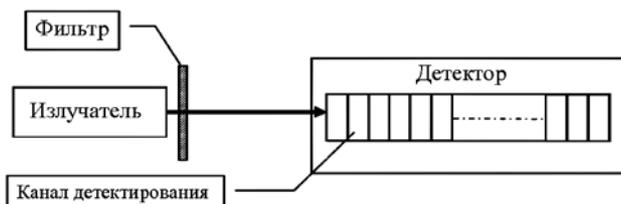


Рис. 1. Схема формирования абсорбционной кривой

В том случае, если линейка детекторов работает в счетном режиме, регистрируемые абсорбционные кривые имеют вид гипербол, на которых можно выделить как минимум три области: начальный участок, где происходит быстрое квазилинейное затухание излучения, обусловленное потерей фотонов низких энергий; участок перегиба, характеризующийся изменением эффективной энергии пучка и повышением жесткости излучения; участок ниже точки перегиба, отвечающий «практически однородному» излучению с «неизменной» эффективной энергией пучка [2].

На рис. 2 в качестве примера приведены абсорбционные кривые, зарегистрированные с помощью линейного детектора на основе арсенида галлия. По оси абсцисс отложен номер канала детектирования, по оси ординат – десятичный логарифм приведенного к максимуму значения яркостного сигнала, зарегистрированного в каждом из каналов детектирования.

Нетрудно видеть, что если по оси абсцисс откладывать величину, равную произведению линейной плотности материала детектора $\rho \cdot d$ ($г/см^2$) на номер канала детектирования i , то угловой коэффициент абсорбционной кривой будет иметь размерность массового коэффициента ослабления квадратный сантиметр на грамм. При этом форма абсорбционной кривой при прочих равных условиях полностью определяется спектральным составом излучения, воздействующего на детектор.

Характер затухания излучения в пределах нескольких первых каналов детектирования позволяет определить скорость затухания как угловой коэффициент прямой, аппроксимирующей абсорбционную кривую на ее начальном участке.

Для оценки возможности определения PPV по скорости затухания тормозного излучения была разработана математическая модель абсорбционного киловольтметра в среде MathCAD и проведено исследование влияния величины пульсации анодного напряжения на результаты измерений.

Задание спектрального распределения тормозного излучения диагностической трубки с вольфрамовым анодом ($Z = 79$) выполнялось с помощью формулы Крамерса, учитывающей поглощение в ослабляющем фильтре [4]:

$$N(E, U_a) = 8,8 \cdot 10^8 \cdot Z \cdot I_a \cdot \left(\frac{e \cdot U_a}{E} - 1 \right) \times \exp(-\mu_{Al}(E) \cdot \rho_{Al} \cdot d_{Al}), \quad (1)$$

где E – энергия квантов, кэВ; U_a – заданный постоянный потенциал анода, кВ; e – заряд электрона, Кл; I_a – ток анода, мА; $\mu_{Al}(E)$ – массовый коэффициент ослабления алюминия, см²/г; ρ_{Al} – плотность алюминия, г/см³; d_{Al} – толщина алюминиевого фильтра, см.

Имитация анодного напряжения $U(t)$, действующего за время экспозиции t , во всех случаях, кроме однополупериодного выпрямления, осуществлялась с помощью гармонической функции вида

$$U(t) = U_a - U_0 \cdot \left(1 - \left| \cos \left(\pi \cdot \frac{t}{T} \right) \right| \right),$$

где U_0 – амплитуда напряжения пульсации, кВ; T – период колебаний, с. В случае однополупериодного выпрямления полагалось, что $U = U_0$, и использовалась функция вида

$$U(t) = \begin{cases} U - U_0 \cdot \left(1 - \cos \left(\pi \cdot \frac{t}{T} \right) \right), \\ \text{если } \left[U - U_0 \cdot \left(1 - \cos \left(\pi \cdot \frac{t}{T} \right) \right) \right] > 0; \\ 0, \text{ если } \left[U - U_0 \cdot \left(1 - \cos \left(\pi \cdot \frac{t}{T} \right) \right) \right] \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Практическое пиковое напряжение, соответствующее заданной форме анодного напряжения, вычислялось согласно выражению, предложенному в стандарте [1]:

$$PPV_{inv} = \frac{\sum_{i=1}^m w(U_i) U_i}{\sum_{i=1}^m w(U_i)}, \quad (3)$$

где U_i – анодное напряжение в киловольтах, соответствующее i -выборке $U(t)$; $w(U_i)$ – весовая функция.

Для формирования абсорбционной кривой рассчитывался приведенный к максимуму сигнал C_n в каждом из n -каналов детектирования по формуле

$$C_n = \sum_{i=20}^{U_a} \left[N(E_i, U_a) \cdot \exp(-n \cdot (\mu(E_i)_{GaAs} \cdot \rho_{GaAs} \cdot d_{GaAs})) \times (1 - \exp(-\mu(E_i)_{GaAs} \cdot \rho_{GaAs} \cdot d_{GaAs})) \right] / \sum_{i=20}^{U_a} \left[N(E_i, U_a) \cdot (1 - \exp(-\mu(E_i)_{GaAs} \cdot \rho_{GaAs} \cdot d_{GaAs})) \right], \quad (4)$$

где $\mu(E_i)_{GaAs}$ – массовый коэффициент ослабления арсенида галлия, см²/г; ρ_{GaAs} – плотность арсенида галлия, г/см³; d_{GaAs} – толщина отдельного канала детектирования, см. Шаг дискретизации спектра по энергии составлял 1 кэВ.

Таблица 1

Среднее отклонение PPV_{rad} от PPV_{inv} при различных величинах суммарной фильтрации и пульсаций анодного напряжения

d_{Al} , см	Отклонение, δ , %		
	r , 3 %	r , 15 %	r , 100 %
0,1	0,46	0,43	7,12
0,3	0,15	0,36	4,66
0,5	0,16	0,32	3,25

Далее в пределах нескольких первых каналов детектирования выполнялась линейаризация исходных данных путем перехода к новым переменным $X_n = n$, $Y_n = \ln C_n$. В новых переменных исходные данные задавались эмпирической зависимостью $Y = kX + b$, где коэффициенты k и b рассчитывались методом наименьших квадратов штатными

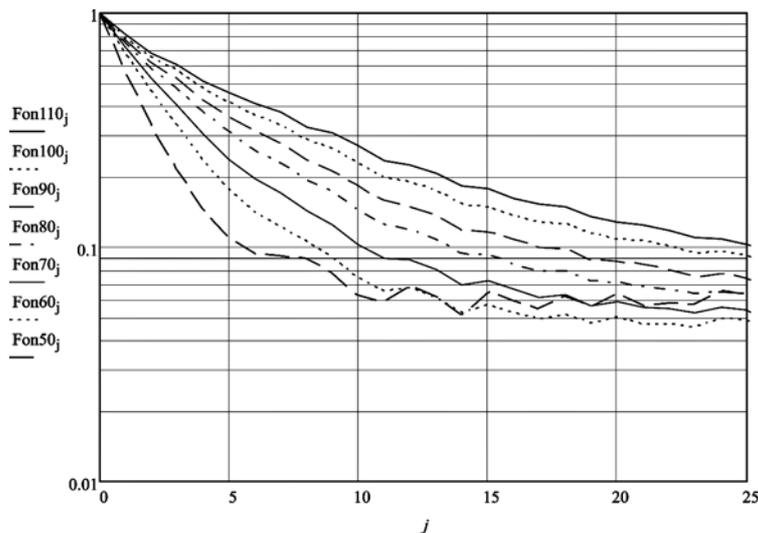


Рис. 2. Семейство абсорбционных кривых, соответствующих напряжениям на аноде рентгеновской трубки 50, 60, 70, 80, 90, 100 и 110 кВ [3]

Результаты измерения PPV_{rad} и суммарной фильтрации излучения $d_{Al\ rad}$ при заданных величинах пульсации r в зависимости от амплитудного значения анодного напряжения U_a

$r, \%$	$d_{Al}, \text{см}$	$U_a, \text{кВ}$	$PPV_{inv}, \text{кВ}$	$PPV_{rad}, \text{кВ}$	$\Delta PPV, \%$	$d_{Al\ rad}, \text{см}$	$\Delta d_{Al}, \%$
3,0	0,2	50,0	49,5	46,7	5,6	0,21	6,5
3,0	0,2	70,0	69,2	68,9	0,5	0,21	5,5
3,0	0,2	90,0	89,0	82,7	7,1	0,22	7,5
3,0	0,2	110,0	108,8	112,8	3,6	0,21	5,0
3,0	0,3	50,0	49,5	47,1	4,8	0,31	3,0
3,0	0,3	70,0	69,2	69,0	0,4	0,31	3,7
3,0	0,3	90,0	89,0	82,5	7,4	0,32	5,3
3,0	0,3	110,0	108,8	113,7	4,5	0,31	3,7
15,0	0,2	50,0	47,6	43,6	8,4	0,21	6,5
15,0	0,2	70,0	66,5	66,5	0,1	0,21	5,5
15,0	0,2	90,0	85,4	80,3	6,0	0,21	7,0
15,0	0,2	110,0	104,4	92,3	11,6	0,22	8,0
15,0	0,3	50,0	47,6	44,1	7,4	0,31	2,7
15,0	0,3	70,0	66,5	66,6	0,1	0,31	3,3
15,0	0,3	90,0	85,4	80,2	6,1	0,31	4,7
15,0	0,3	110,0	104,4	91,8	12,0	0,32	5,7
100,0	0,2	50,0	45,9	41,0	10,7	0,19	5,0
100,0	0,2	70,0	62,0	62,2	0,3	0,19	3,0
100,0	0,2	90,0	78,0	74,8	4,1	0,20	0,5
100,0	0,2	110,0	93,8	84,3	10,2	0,21	3,0
100,0	0,3	50,0	45,9	41,3	9,9	0,29	4,7
100,0	0,3	70,0	62,0	62,2	0,4	0,29	2,3
100,0	0,3	90,0	78,0	74,6	4,4	0,30	0,7
100,0	0,3	110,0	93,8	83,8	10,7	0,31	2,7
Среднее отклонение, %					5,7		4,4

средствами MathCAD. Угловой коэффициент прямой k при известных параметрах детектора ($\rho_{GaAs} = 5,32 \text{ г/см}^3$; $d_{GaAs} = 0,02 \text{ см}$) определяет скорость затухания тормозного излучения в веществе детектора.

Калибровку модели осуществляли путем расчета скорости затухания излучения при заданных постоянных потенциалах анода в диапазоне от 50 до 120 кВ с шагом 10 кВ. По полученным данным находили эмпирические зависимости в виде полиномиальных функций четвертого порядка для каждого значения величины суммарной фильтрации излучения в интервале от 0,1 до 0,5 см Al.

С помощью модели абсорбционного киловольтметра было проведено исследование влияния величины пульсации анодного напряжения r (%) на результаты измерения PPV по скорости затухания излучения PPV_{rad} . Кривые затухания излучения строились для пульсаций 3, 15 и 100 % в диапазоне анодных напряжений 50...110 кВ при суммарной фильтрации 0,1; 0,3; 0,5 см Al. Затем рассчитывалась скорость затухания излучения и по калибровочным кривым находились значения практического пикового напряжения PPV_{rad} .

Среднее по диапазону напряжений отклонение значений практического пикового напряжения PPV_{rad} измеренного с помощью математической модели абсорбционного киловольтметра, от результатов прямого расчета PPV_{inv} по заданной выше формуле отражает табл. 1.

Нетрудно видеть, что при малых величинах пульсации различия в значениях инвазивных и неинвазивных измерений не превышают 1 %, что удовлетворяет требованиям стандарта. Однако при пульсации 100 % отклонение достигает 7 %.

Анализ полученных данных показал, что увеличение суммарной фильтрации излучения ведет к уменьшению отклонения результатов измерений PPV_{rad} от расчетных значений PPV_{inv} . В наибольшей степени этот эффект проявляется в случае максимальной пульсации анодного напряжения.

Поскольку суммарная фильтрация рентгеновского пучка, как правило, неизвестна, необходимо было перейти к калибровке системы по двум параметрам – постоянному потенциалу анода и толщине фильтра. В этом случае калибровочная характеристика представляет собой поверхность, что обеспечивает возможность измерения как практическо-

го пикового напряжения PPV_{rad} , так и величины суммарной фильтрации излучения $d_{Al,rad}$.

Для формирования калибровочной поверхности с помощью математической модели абсорбционного киловольтметра рассчитывали скорость затухания излучения при постоянных потенциалах анода и различной фильтрации излучения. В результате была сформирована таблица исходных данных, задающих дискретное представление скорости затухания $V = \{v_i\}$, ($i = 1, 2, \dots, m$) от величины постоянного потенциала анода U_a и толщины d_{Al} эквивалентного алюминиевого фильтра.

По полученным значениям скорости затухания находили эмпирическую зависимость в виде уравнения поверхности, в наименьшей степени уклоняющейся от экспериментальных данных в точках $MXY = \{(U_{ai}, d_i)\}$, ($i = 1, 2, \dots, m$).

Для поиска эмпирической зависимости использовали функцию пакета MathCAD

$$f(U_a, d) := \text{interp}\left(A, MXY, V, \begin{pmatrix} U_a \\ d \end{pmatrix}\right),$$

возвращающую поверхность k -го порядка. В нашем случае рассчитывали полиномиальную функцию второго порядка в виде $f(U_a, d) = A_9 \cdot U_a^2 + A_8 \cdot U_a + A_7 + A_6 \cdot d + A_5 \cdot d^2 + A_4 \cdot U_a \cdot d$, где A_j – элементы вектора коэффициентов регрессии, заданные функцией: $A := \text{regress}(MXY, V, k)$.

Расчет осуществляли по 21-й экспериментальной точке, образуемой значениями постоянного анодного напряжения в интервале от 50 до 110 кВ с шагом 10 кВ и значениями суммарной фильтрации 0,1; 0,3 и 0,5 см Al.

В результате были найдены неизвестные коэффициенты в записанном выше уравнении регрессии:

$$A^T = (3 \ 3 \ 2 \ 0.015 \ 20.404 \ -32.657 \ 40.449 \ -0.366 \ 1.697 \times 10^{-3}).$$

Оценку достоверности калибровки модели абсорбционного киловольтметра осуществляли путем нахождения отношения отклонения значений эмпирической функции от экспериментальных данных к норме вектора

$$\|V\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m V_i^2}; \quad \delta = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m (f(U_a, d) - V_i)^2}}{\|V\|}.$$

Согласно расчету $\delta = 0,011$, что говорит об относительно хорошем приближении опытных данных.

Далее было проведено исследование влияния фильтрации излучения на результаты измерения практического пикового напряжения. Для этого с помощью модели абсорбционного киловольтметра рассчитывали скорость затухания излучения при заданной пульсации и суммарной фильтрации в диапазоне анодных напряжений. Результаты расчетов отражает табл. 2.

Согласно табл. 2, отклонение результатов измерения практического пикового напряжения по скорости затухания излучения PPV_{rad} от результатов инвазивного измерения PPV_{inv} составляет в среднем 6 %. Причем наблюдается значительный разброс абсолютной величины отклонений в диапазоне амплитудных значений анодных напряжений. Последнее может быть обусловлено относительно малым количеством исходных данных, по которым строилась калибровочная характеристика абсорбционного киловольтметра.

В целом результаты исследования показали, что по скорости затухания тормозного излучения в веществе линейного дискретного детектора можно оценивать величину PPV . Причем в случае калибровки абсорбционного киловольтметра по двум параметрам появляется возможность измерения как PPV , так и эквивалентной суммарной фильтрации рентгеновского пучка. Однако следует отметить, что реализация предложенного метода измерений возможна в том случае, если сигнал, считанный с каждого канала детектирования, пропорционален числу эффективно поглощенных квантов и не зависит от их энергии. Применение в качестве детекторного материала вещества, отличного от арсенида галлия, может привести к необходимости схемотехнического решения задачи обеспечения счетного режима работы детектора.

Список литературы:

1. ГОСТ Р МЭК 61676-2006 Медицинское электрическое оборудование. Дозиметрические приборы, используемые для неинвазивного измерения напряжения на рентгеновской трубке в диагностической радиологии.
2. Хараджа Ф.Н. Общий курс рентгенотехники. – М.-Л.: Энергия, 1966. С. 400.
3. Муслимов Д.А., Лелюхин А.С. Определение эффективной энергии рентгеновского пучка по скорости затухания излучения в полупроводниковом детекторе // Материалы III Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика-2010». Сб. материалов. Т. 2. – М., 2010. С. 100-103.
4. Жутяев С.Г., Смелик Г.И., Мишкинис А.Б., Мишкинис Б.Я., Чикирдин Э.Г. Спектральное распределение тормозного излучения в рентгеновских трубках с вольфрамовым анодом // Медицинская техника. 2001. № 4. С. 3-5.

Дмитрий Алексеевич Муслимов,
аспирант,

Александр Сергеевич Лелюхин,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии
радиоэлектронных средств,
ГОУ ВПО «Оренбургский
государственный университет»,
г. Оренбург,
e-mail: muslimov_dima@mail.ru