

## Определение мгновенной эффективной энергии тормозного излучения рентгеновских трубок

**В. Ф. ДВОРЯНКИН, Ю. М. ДИКАЕВ, А. А. КУДРЯШОВ, А. А. СОКОЛОВСКИЙ**

*Описана методика определения мгновенной эффективной энергии тормозного излучения рентгеновских трубок системой из двух полупроводниковых детекторов на основе эпитаксиальных структур GaAs и электронной схемы измерения, которая позволяет определять эффективную энергию пучка рентгеновского излучения с погрешностью 5 % в диапазоне энергий 20 – 80 кэВ в условиях нелинейности крутизны фотоотклика детектора.*

**Ключевые слова:** мгновенная эффективная энергия, тормозное рентгеновское излучение, эпитаксиальные структуры GaAs, фотоотклик детектора, мощность экспозиционной дозы, пульсации рентгеновского излучения.

*The method of instantaneous effective energy of the bremsstrahlung X-ray tubes determination by system of two semiconductor detectors is described. Detectors are based on epitaxial GaAs structures and circuit electronics of measurement allowing to determine the X-ray beam effective energy with error 5 % in 20 – 80 keV energy range in nonlinearity condition of detector photosensitivity steepness.*

**Key words:** instantaneous effective energy, bremsstrahlung X-ray, epitaxial GaAs structures, detector photosensitivity, exposure dose rate, output ripple X-ray.

При эксплуатации рентгеновской трубки время экспозиции составляет от нескольких секунд до их долей. Возникает необходимость мгновенного измерения эффективной энергии пучка рентгеновского излучения. Эффективная энергия тормозного излучения рентгеновских трубок определяется по толщине слоя половинного ослабления пучка в различных материалах, например, в алюминии или меди [1]. Однако необходимость подбирать соответствующую толщину фильтра делает невозможным быстрый анализ энергетических параметров рентгеновского излучения. Удобнее использовать фильтры постоянной толщины с системой детекторов, которая позволяет реализовать методику измерений. Ниже предложена и описана методика определения эффективной энергии тормозного излучения рентгеновских трубок с применением двух полупроводниковых детекторов на основе эпитаксиальных структур GaAs [2] и электронной схемы. Методика измерения усложняется тем, что фотоотклик GaAs-детектора (наведенный фототок под действием рентгеновского излучения) в общем случае зависит от энергии излучения. Необходимо установить эту зависимость для адекватного определения энергии излучения. Нами разработана методика для экспрессного определения эффективной энергии рентгеновского тормозного излучения в диапазоне 20—80 кэВ.

Тормозное рентгеновское излучение, возникающее под действием высокого напряжения на рентгеновской трубке, характеризуется эффективной энергией. Эффективная энергия тормозного излучения, зависящая от высокого напряжения на трубке, определяется по коэффициенту ослабления пучка в поглощающих материалах. Пучок тормозного излучения содержит фотоны с различными энергиями (смешан-

ный спектр излучения). При прохождении излучения через поглощающий материал его спектр изменяется и сдвигается в область более высоких энергий. Интенсивность излучения, прошедшего через поглотитель толщиной  $d$ , определяется как [1]:

$$I = I_0 \exp(-\mu_{\text{эф}} d), \quad (1)$$

где  $I$  и  $I_0$  — интенсивности прошедшего и падающего излучений;  $\mu_{\text{эф}}(E_{\text{эф}})$  — линейный коэффициент ослабления пучка моноэнергетического излучения с эффективной энергией  $E_{\text{эф}}$ , определяемый по таблицам для известного материала поглотителя [3].

Фототок детектора, расположенного в пучке прошедшего излучения, линейно зависит от интенсивности (мощности дозы):

$$J = SI, \quad (2)$$

где  $S = S(E_{\text{эф}})$  — фотоотклик детектора, в общем случае зависящий от  $E_{\text{эф}}$ .

Детектор, для которого фотоотклик не зависит от энергии потока, удобно использовать в качестве измерителя мощности дозы излучения. Задача усложняется, когда такая зависимость имеется. С помощью двух детекторов можно построить систему, которая с определенной точностью контролировала бы эффективную энергию тормозного излучения для задач дозиметрии. Если другой идентичный детектор с такой же крутизной фотоотклика расположен рядом в пучке падающего излучения, то доля поглощенной энергии будет определяться как

$$\Delta = (J_0 - J) / J_0 = 1 - [S(E_{эф}) / S(E_{эф0})] \exp(-\mu_{эф} d), \quad (3)$$

где  $E_{эф}$  и  $E_{эф0}$  — эффективные энергии прошедшего и падающего излучений.

Формула (3) справедлива и для нелинейной зависимости  $J(I)$ , но при условии  $J_0 - J \ll J_0$ . В приближении  $\mu_{эф} d \ll 1$  и  $|S(E_{эф}) - S(E_{эф0})| \ll S(E_{эф0})$  соотношение (3) запишется следующим образом:

$$\Delta \approx \mu_{эф} d + 1 - S(E_{эф}) / S(E_{эф0}). \quad (4)$$

Таким образом, при монотонно возрастающей зависимости  $S(E_{эф})$  получаем  $\Delta < \mu_{эф} d$ , а при монотонно убывающей:  $\Delta > \mu_{эф} d$ .

Для однозначного определения  $\mu_{эф}$  и нахождения  $E_{эф}$  для известного материала поглотителя из измерений  $J_0$  и  $J$ , прежде всего, необходимо установить зависимость  $S(E_{эф})$  фотодетектора. Такая зависимость фототоклика эпитаксиального GaAs-детектора от эффективной энергии тормозного рентгеновского излучения приведена на рис. 1. Максимальное значение получено при напряжении на рентгеновской трубке 90 кВ, что соответствует эффективной энергии фотонов 35 кэВ. Эффективную энергию рентгеновского излучения регулировали высоким напряжением на трубке и заградительным поглощающим фильтром. Измеренные значения не зависели от анодного тока трубки.

Зависимость доли поглощенной энергии от значения эффективной энергии рентгеновского излучения, рассчитанная по (3), при использовании алюминиевого поглотителя толщиной  $d = 1$  мм по схеме двух детекторов приведена на рис. 2 (кривая 1). Там же (кривая 2) представлена табличная зависимость  $\mu_{эф}(E_{эф})$ . Как видно из графиков,  $\Delta < \mu_{эф} d$  при  $E_{эф} < 35$  кэВ и больше этого значения при  $E_{эф} > 35$  кэВ.

Погрешность определения  $E_{эф}$  складывается из погрешности установления зависимости  $S(E_{эф})$  фотодетектора (см. рис. 1) и погрешности измерения  $\Delta$  [см. (3)]. Так как высокое

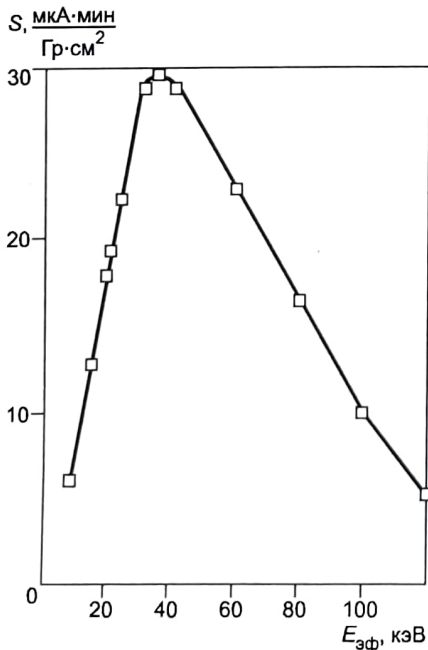


Рис. 1. Зависимость фототоклика детектора на GaAs от энергии рентгеновского излучения  $E_{эф}$ . Активная поверхностная площадь детектора 4 мм<sup>2</sup>

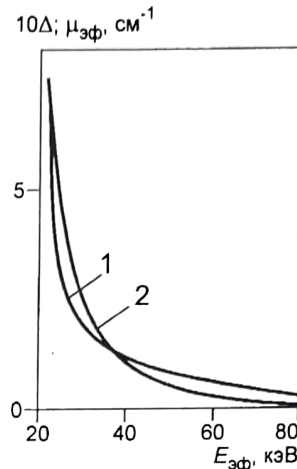


Рис. 2. Зависимости доли поглощенной энергии  $\Delta$  (кривая 1) и коэффициента ослабления  $\mu_{эф}$  в алюминии (кривая 2) от эффективной энергии рентгеновского пучка  $E_{эф}$

напряжение на рентгеновской трубке устанавливали с погрешностью 5 %, в соответствии с [1] эффективную энергию тормозного излучения определяли с погрешностью 2 — 3 %. Измерение  $\Delta$  осуществляли с погрешностью 2 %. Таким образом, используя данные графические зависимости, можно по результатам измерения  $\Delta$  определять эффективную энергию пучка рентгеновского излучения с погрешностью 5 % в диапазоне энергий 20 — 80 кэВ. Для измерений с той же погрешностью в диапазоне энергий до 120 кэВ разумнее использовать поглотитель из меди.

Структурная схема системы для определения эффективной энергии приведе-

на на рис. 3. Два детектора, изготовленных на основе эпитаксиальных структур GaAs [2], с активной поверхностной площадью каждого 4 мм<sup>2</sup> подобраны идентичными по фототоклику. Значения крутизны фототоклика детекторов отличаются не более чем на 2 %. Перед вторым детектором установлен фильтр из алюминия толщиной  $d = 1$  мм. Операционный усилитель с низким входным током работает в режиме преобразователя тока в напряжение. Такая схема при отсутствии сигнала дает наименьшее выходное напряжение смещения (менее 1 мВ). Емкости  $C$  в цепях обратной связи усилителей снижают шумы, возникающие от пульсаций рентгеновского излучения частотами выше 100 Гц [4]. Флуктуации наблюдаются как из-за временной нестабильности пуч-

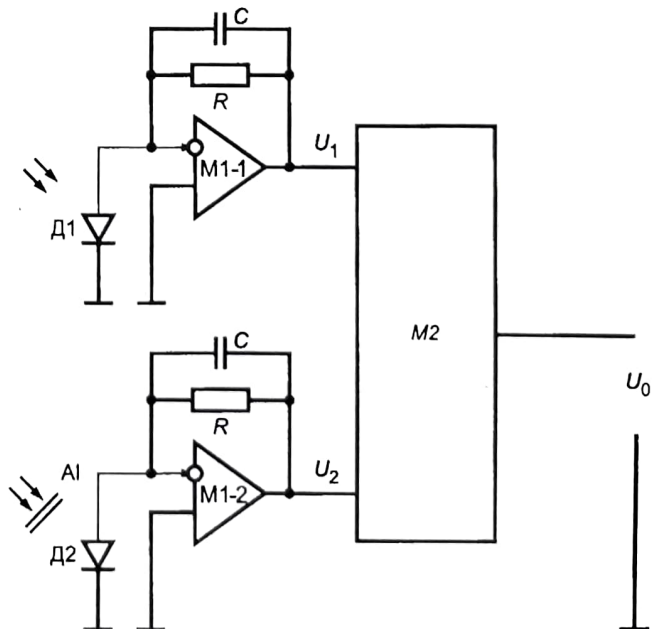


Рис. 3. Структурная схема измерения эффективной энергии: M1 — AD822; M2 — AD734; D1, D2 — GaAs-детекторы

ка тормозного излучения [5], так и при регистрации фотонов одновременно двумя детекторами [6]. Выходное напряжение микросхемы M2

$$U_0 = 10(U_1 - U_2) / U_1, \quad (5)$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  — выходные напряжения сигналов соответственно от первой и второй пары детектор-усилитель.

В соответствии с (3) имеем  $U_0 = -10\Delta$ .

При измерениях коэффициента ослабления пучка воспроизводимость не менее 98 %. Методика позволяет расширить диапазон измеряемой энергии до 120 кэВ при использовании медного фильтра вместо алюминиевого.

### Литература

1. **Клюев В. В. и др.** Рентгентехника: Справочник. В 2-х кн. — М.: Машиностроение, 1992. — Кн. 1. — С. 27.
2. **Ахмадуллин Р. А. и др.** // Письма в ЖТФ. — 2002. — Т. 28. — № 1. — С. 34.
3. **Немец О. Ф., Гофман Ю. В.** Справочник по ядерной физике. — Киев: Наукова думка, 1975.
4. **Дворянкин В. Ф. и др.** // ПТЭ. — 2002. — № 2. — С. 159.
5. **Дворянкин В. Ф. и др.** // ПТЭ. — 2001. — № 3. — С. 156.
6. **Глаубер Р.** // Квантовая оптика и квантовая радиофизика / Пер. с англ. и фр. — М.: Мир, 1966. — С. 91.

*Дата одобрения 07.04.2003 г.*