

06;12

Исследование свойств фотовольтаических детекторов рентгеновского излучения на основе эпитаксиальных структур GaAs

© В.Ф. Дворянкин, Ю.М. Дикаев, А.А. Кудряшов

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинское отделение,
141190 Фрязино Московской области, Россия
e-mail: vfd217@ire216.msk.su

(Поступило в Редакцию 23 июля 2003 г.)

Представлены результаты исследования под действием тормозного рентгеновского излучения нового фотовольтаического детектора на основе эпитаксиальных структур GaAs, работающего без напряжения смещения и при комнатной температуре. Из измерений фотоотклика детектора рассчитана эффективность преобразования поглощенной энергии в ток короткого замыкания в диапазоне энергий фотонов от 12 до 120 keV. В этом диапазоне энергий процесс поглощения в GaAs определяется фотоэлектрическим эффектом. Максимальное значение эффективности преобразования в GaAs для тормозного рентгеновского излучения находится при энергии 80 keV. Для увеличения поглощения рентгеновских фотонов предложена и рассчитана схема наклонного облучения тонкого 50 мкм детектора. При этом значительный эффект проявляется для жесткого рентгеновского излучения.

В предложенном ранее новом фотовольтаическом детекторе рентгеновского излучения, который изготавливается на основе эпитаксиальных структур GaAs, сбор носителей заряда при поглощении фотонов осуществляется без напряжения смещения и при комнатной температуре [1]. Для энергий рентгеновских фотонов от 12 до 120 keV процесс их поглощения в GaAs определяется фотоэлектрическим эффектом: испускание фотоэлектронов из атомов с кинетической энергией $E_{ph} = E - E_c$, где E — энергия поглощения фотона, $E_c \approx 12$ keV — энергия связи электронов на K — оболочках атомов Ga и As.

Квантовый выход внутреннего фотоэлектрического эффекта представляется пропорционально зависимым как

$$\eta = k \cdot E_{ph}, \quad (1)$$

где k — коэффициент эффективности преобразования поглощенной энергии в фотоэлектроны, зависящий от свойств материала детектора.

Этот коэффициент можно определить экспериментально. Количество поглощенных рентгеновских фотонов в активной области детектора определяется по закону Ламберта [2]

$$N = N_0 [1 - \exp(-\mu \cdot d)], \quad (2)$$

где N_0 — количество рентгеновских квантов, падающих на единицу поверхности детектора; μ — линейный коэффициент поглощения материала детектора; d — толщина активного слоя поглощения фотонов.

Ток короткого замыкания, вырабатываемый детектором на единицу площади, можно представить в виде

$$J = q\eta N = IS, \quad (3)$$

где q — заряд электрона, I — интенсивность рентгеновского излучения, S — фотоотклик детектора.

Зависимость фотоотклика детектора от энергии падающих рентгеновских фотонов из формул (1)–(3) будет равна

$$S = (kqN_0/I) \cdot (E - E_c) \cdot [1 - \exp(-\mu \cdot d)]. \quad (4)$$

Зависимость (4) справедлива и для тормозного рентгеновского излучения с эффективной энергией, соответствующей E . Коэффициент поглощения μ в зависимости от энергии рентгеновского излучения для GaAs определяется по таблицам [2].

Данный детектор чувствителен к тормозному рентгеновскому излучению в диапазоне от 8 до 120 keV и для толщины активного слоя поглощения фотонов $d = 50$ мкм в режиме тока короткого замыкания имеет максимум при эффективной энергии излучения 35 keV, экспериментальные значения S которых приведены в работе [3]. Из этих значений рассчитаны зависимости (kqN_0/I) по формуле (4), которые представлены на рис. 1, а. Максимальное значение для $E = 80$ keV соответствует наиболее эффективному преобразованию энергии поглощенных фотонов в фототок, при котором процесс преобразования рожденных первичных высокоэнергетических электронов во вторичные низкоэнергетические электроны осуществляется с наименьшими потерями на образование фононов и плазмонов. Для моноэнергетического излучения максимальное значение эффективности преобразования в GaAs соответствует 60 keV [1]. В нашей работе использовался смешанный пучок рентгеновского (тормозного) излучения, где для эффективности энергии фотонов 80 keV в пучке количество фотонов с $E < 80$ keV больше, чем с $E > 80$ keV. В диапазоне энергий фотонов 20–60 keV наблюдается линейная зависимость, которую можно представить как

$$(kqN_0/I) = KE, \quad (5)$$

где $K \cong 0.2 [\mu\text{A} \cdot \text{min} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{keV}^{-2}]$ — коэффициент пропорциональности.

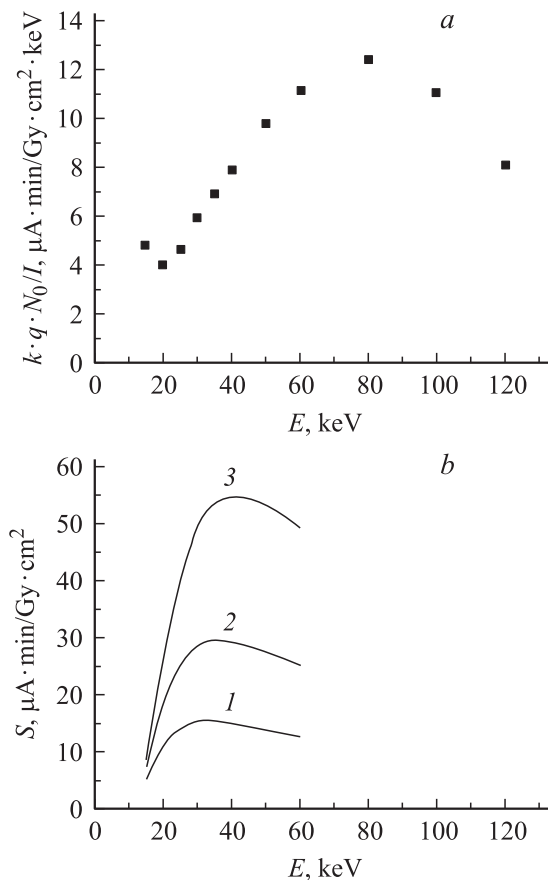


Рис. 1. Зависимости эффективности преобразования поглощенной энергии в фототок (*a*) и фотоотклика GaAs детектора от эффективной энергии рентгеновского излучения (*b*). $d = 25$ (1), 50 (2), $100 \mu\text{m}$ (3).

Подставляя (5) в (4), можно рассчитать в данном линейном диапазоне энергий фотонов зависимость $S = S(E)$ для разных значений d , которые представлены на рис. 1, *b*. Как видно из графиков, при увеличении активного слоя поглощения фотоотклик детектора возрастает, а максимальное значение сдвигается в область более жесткого излучения.

Фотоотклик детектора можно увеличить при облучении его под скользящими углами падения луча. При этом толщина активного слоя поглощения фотонов станет

$$d_{\theta} = d / \cos \theta, \quad (6)$$

где θ — угол падения по нормали рентгеновских лучей.

Увеличение угла θ приводит к увеличению глубины поглощения d_{θ} фотонов в активном слое поглощения. Из формулы (4) при замене (6) видно, что изменение фотоотклика детектора в режиме тока короткого замыкания аналогично графической зависимости, представленной на рис. 1, *b*. Однако при ограниченной линейной длине детектора L вырабатываемый им фототок будет пропорционален апертуре $L \cos \theta$ и соответствовать значению

$$J_{\theta} = jL \cos \theta. \quad (7)$$

Если сигнал уменьшается при увеличении угла (по формуле (7)), то фотоотклик детектора увеличивается (по формуле (4)) (рис. 2). При одной и той же апертуре при увеличении угла падения можно повысить сигнал от фотодетектора в несколько раз в зависимости от энергии фотонов. Значительный эффект проявляется для более жесткого рентгеновского излучения. Таким образом, детектор с тонким активным слоем поглощения фотонов можно использовать для регистрации более жесткого рентгеновского излучения, когда он слабо реагирует при нормальном падении излучения.

Интересен случай, когда излучение падает в торец детектора. При этом сигнал пропорционален апертуре детектора d , а толщина активного слоя поглощения фотонов будет определяться длиной L . Отношение сигналов детектора при торцевом и нормальном облучении детектора будет

$$J_{\theta=90}/J_{\theta=0} = (d/L) [1 - \exp(-\mu L)] / [1 - \exp(-\mu d)], \quad (8)$$

которое для тонкого ($\mu d \ll 1$) и протяженного ($\mu L \gg 1$) детектора становится равной $1/(\mu L)$, а для слабопоглощающего детектора это отношение стремится к 1, что

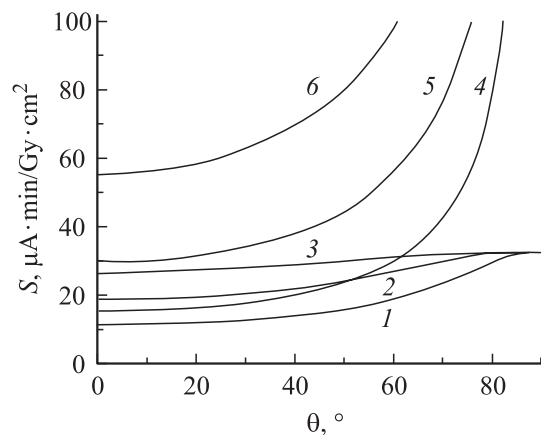


Рис. 2. Зависимости фотоотклика детектора от угла падения к его поверхности и энергии фотонов. $E = 20$ (1–3), 40 keV (4–6); $d = 25$ (1, 4); 50 (2, 5); $100 \mu\text{m}$ (3, 6).

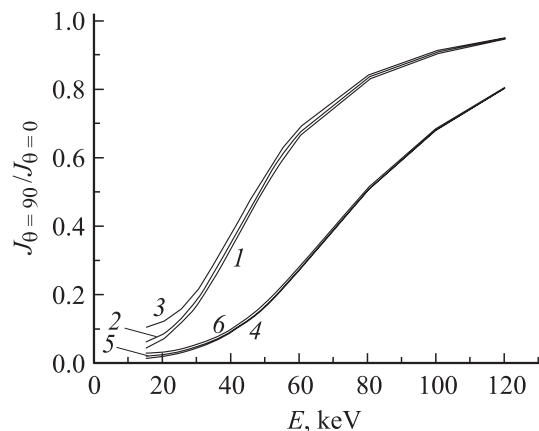


Рис. 3. Ток детектора при облучении его в торец $L = 1$ (1–3), 4 mm (4–6); $d = 25$ (1, 4); 50 (2, 5); $100 \mu\text{m}$ (3, 6).

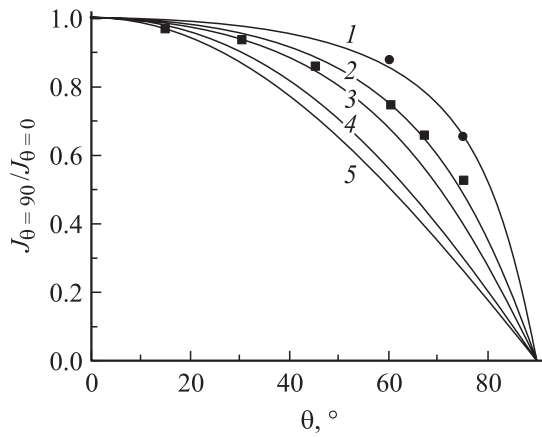


Рис. 4. Ток детектора от угла облучения его фотонами. $\mu \cdot d = 1/3$ (1), $2/3$ (2); 1 (3), 2 (4), 4 (5). ■ — $E = 23$ keV, $\mu = 130$ cm⁻¹, $d = 50$ μ m; • — $E = 30$ keV, $\mu = 62$ cm⁻¹, $d = 50$ μ m.

наблюдается для жесткого рентгеновского излучения. На рис. 3 представлены отношения (8) в зависимости от энергии фотонов для разной толщины детектора d .

На рис. 4 представлена зависимость (при $\theta < \arccos(d/L)$)

$$J_{\theta}/J_{\theta=0} = \cos \theta [1 - \exp(-\mu d_{\theta})] / [1 - \exp(-\mu d)] \quad (9)$$

от угла падения фотонов. Следует заметить, что формулы (8) и (9) не зависят от природы рождения фотоэлектронов, квантового выхода и справедливы во всем диапазоне чувствительности детектора. Так же на рис. 4 представлены экспериментальные значения фототока детектора, соответствующего толщине активного слоя поглощения 50 μ m, полученные при разных энергиях фотонов. Таким образом, измеряя значения сигнала детектора под разными углами падения лучей, можно определить толщину активного слоя поглощения путем подбора d в формуле (9) для наиболее полного соответствия с расчетными значениями.

Облучение детекторов с дозой 6000 Рентген не вызвало заметных ухудшений чувствительности S , что делает его перспективным в продолжительном применении.

Список литературы

- [1] Ахмадуллин Р.А., Дворянкин В.Ф., Дворянкина Г.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 26. Вып. 1. С. 34–38.
- [2] Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975. 218 с.
- [3] Дворянкин В.Ф., Дикаев Ю.М., Кудряшов А.А. и др. // Измерительная техника. 2003.