

06.2;12

## Фотовольтаические детекторы рентгеновского излучения на основе эпитаксиальных структур GaAs

© Р.А. Ахмадуллин, В.Ф. Дворянкин, Г.Г. Дворянкина,  
Ю.М. Дикаев, М.Г. Ермаков, О.Н. Ермакова, А.И. Крикунов,  
А.А. Кудряшов, А.Г. Петров, А.А. Телегин

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинская часть  
E-mail: vfd217@ire216.msk.su

Поступило в Редакцию 14 августа 2001 г.

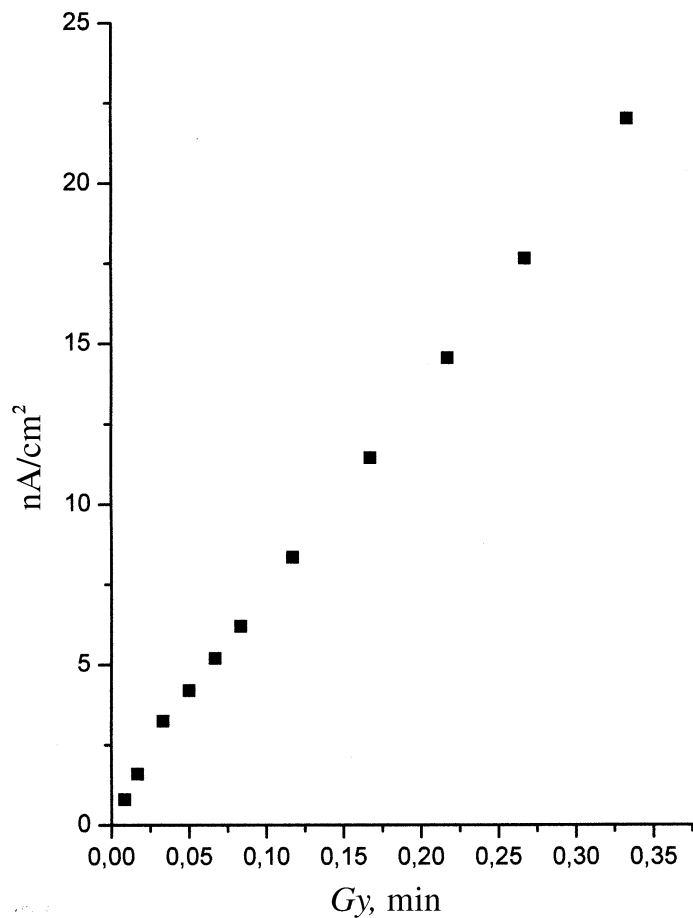
Предложен новый фотовольтаический детектор рентгеновского излучения на основе эпитаксиальных структур GaAs ( $p^+ - n - n' - n^+$ ), который работает с высокой эффективностью сбора носителей заряда без напряжения смещения и при комнатной температуре. Структуры выращены методом газофазной эпитаксии на сильнолегированных подложках  $n^+$ -типа. Диапазон чувствительности к рентгеновскому излучению находится в диапазоне эффективных энергий от 8 до 120 KeV. Максимальный отклик детектора в режиме тока короткого замыкания составляет  $30 \mu\text{A} \cdot \text{min}/\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$ . Измерен сигнал детектора от  $\gamma$ -излучения радиоактивного изотопа  $^{137}\text{Cs}$  [660 KeV].

В детекторах рентгеновского излучения на основе диодов  $p-i-n$ -структур и диодов с барьером Шоттки для достижения высокой эффективности сбора носителей заряда используются высокие напряжения обратного смещения [1]. Так, для GaAs требуется смещение порядка  $1-2 \text{V}/\mu\text{m}$ , что вызывает значительные токи утечки при комнатной температуре  $10-30 \text{nA}/\text{mm}^2$  [2,3]. Фотовольтаические полупроводниковые детекторы предпочтительнее тем, что токи утечки крайне малы, так как они могут работать без напряжения смещения. Нами разработаны фотовольтаические детекторы рентгеновского излучения на основе эпитаксиальных структур GaAs [4], которые работают с высокой эффективностью сбора носителей заряда без напряжения смещения и при комнатной температуре.

Эпитаксиальные структуры GaAs ( $p^+ - n - n' - n^+$ ) выращивались методом газофазной эпитаксии на сильнолегированных подложках

$n^+$ -GaAs толщиной  $400 \mu\text{m}$ . Структура состоит из трех эпитаксиальных слоев: верхний  $p^+$ -GaAs сильнолегированный слой толщиной  $1\text{--}2 \mu\text{m}$ , активный  $n$ -GaAs слаболегированный слой толщиной  $80\text{--}100 \mu\text{m}$  и нижний  $n$ -GaAs буферный слой толщиной  $2\text{--}5 \mu\text{m}$  ( $n' = 5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ). На верхний слой и на подложку снизу наносились омические контакты. Толщина обедненной области в эпитаксиальном слое  $n$ -GaAs контролировалась путем измерения вольт-фарадных характеристик этих диодов. При этом производился тщательный отбор структур, в которых толщина обедненной области была близка к толщине активного эпитаксиального слоя. Конфигурация встроенного электрического поля в обедненной области оптимизировалась путем изменения концентрации донорной примеси в эпитаксиальном слое  $n$ -GaAs. Критерием оптимальной конфигурации встроенного поля служила эффективность сбора носителей заряда. Эффективность сбора носителей заряда определялась с использованием изотопа  $^{241}\text{Am}$  [60 KeV] как при нулевом смещении, так при обратном смещении напряжения 17 V. Эффективность сбора заряда детектора оказалась равна соответственно 93.4 и 93.6%.

При энергиях рентгеновских фотонов меньше 120 KeV процесс их поглощения в GaAs определяется фотоэлектрическим эффектом. В результате фотоэлектрического эффекта имеет место конверсия энергии фотонов в кинетическую энергию фотоэлектронов и Оже-электронов. Кинетическая энергия фотоэлектронов определяется разностью между энергией фотона и энергией связи электронов в атомах Ga и As. Поскольку фотоэлектрический эффект имеет место только на связанных электронах, то его поперечное сечение максимально для  $K$ -оболочек атомов Ga и As. Энергии связей электронов на  $K$ -оболочках атомов Ga и As равны 10.371 KeV и 11.871 KeV [5] соответственно. При энергиях фотонов больше 12 KeV фотоэлектроны, рожденные в результате фотоэлектрического эффекта, могут иметь значительную кинетическую энергию. Двигаясь в обедненной области, высокоэнергетические электроны при потере энергии на ионизацию будут создавать большое количество вторичных низкоэнергетических электронов, которые могут принимать участие в генерации электронно-дырочных пар. Энергия, необходимая для одной электронно-дырочной пары в GaAs, равна 4.2 eV. Энергии Оже-электронов, рожденные за счет  $K$ -LL Оже-переходов в атомах Ga и As, равны 7.705–8.027 и 8.742–9.654 KeV соответственно [6]. Оже-электроны также вносят вклад в генерацию электронно-дырочных пар. Внутренний квантовый выход фотоэлектрического эффекта при



Фототок детектора под действием  $\gamma$ -излучения.

рентгеновском облучении GaAs несомненно будет иметь большую величину. Фототок вырабатываемый детектором в режиме тока короткого замыкания зависит от квантового выхода и его можно представить в виде:  $i = \eta q N_q$ , где  $\eta$  — квантовый выход внутреннего фотоэлектрического эффекта,  $q$  — заряд электрона,  $N_q$  — количество рентгеновских фотонов, падающих на поверхность детектора.

Диапазон чувствительности к рентгеновскому излучению фотовольтаического детектора на эпитаксиальных структурах GaAs измерен для тормозного спектра излучения рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом и находится в диапазоне эффективных энергий от 8 до 120 KeV. Максимальный отклик детектора в режиме тока короткого замыкания, нормированный на поверхностную мощность дозы излучения, установлен при эффективной энергии 35 KeV. Его величина составляет  $30 \mu\text{A} \cdot \text{min}/\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$ . Фототок детектора линейно зависит от мощности дозы при фиксированной энергии облучения. Чувствительность детектора для энергий излучения свыше 35 KeV уменьшается, но гораздо медленнее, чем уменьшение коэффициента поглощения для GaAs [7]. Это, по-видимому, объясняется высокой эффективностью конверсии энергии рентгеновских фотонов в электрический заряд в эпитаксиальных структурах GaAs. Детектор был испытан на чувствительность к  $\gamma$ -излучению. На рисунке представлена зависимость сигнала детектора от мощности дозы радиоактивного излучения изотопа  $^{137}\text{Cs}$  [660 KeV]. Как видно из рисунка, фототок детектора имеет излом при мощности дозы 0.03 Gy/min. При энергиях поглощающихся фотонов 660 KeV детектор работает в режиме твердотельной ионизационной камеры. Процессом поглощения  $\gamma$ -фотонов в GaAs является неупругое комптоновское рассеяние, при котором образуются электрон отдачи и вторичный рентгеновский фотон. Комптоновские электроны отдачи, по нашим приближенным оценкам, имеют энергию 237 KeV с длиной свободного пробега в GaAs около 100  $\mu\text{m}$  [8].

На основе эпитаксиальных структур GaAs нами созданы фотовольтаические детекторы для малодозовой медицинской рентгенографической аппаратуры.

## Список литературы

- [1] *Bencivelli W., Bertini R., Bertolucci E.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1994. V. 338. P. 549–555.
- [2] *Buttar C.M.* // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1997. V. 395. P. 1–9.
- [3] *Butes R.L., Manolopoulos S.M., Mathieson K.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1999. V. 434. P. 1–14.
- [4] *Ahmadullin R.A., Dvoryankin V.F., Ermakov M.G.* et al. // Proc. 5th International Conference "Applications of Semiconductor Detectors in Nuclear Physical Problems". Riga, Latvia: Book of Abstracts, 1998. P. 84.

- [5] Карлсон Т.А. Фотоэлектронная и Оже-спектроскопия. Л: Машиностроение, 1980. 491 с.
- [6] Larkins F.P. // J. Phys. B: Atom. and Molec. Phys. 1976. V. 8. P. 47–58.
- [7] Сторм Э., Исраэль Х. Сечение взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0.001–100 MeV и элементов с 1 по 100): Справочник / Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1973. 256 с.
- [8] Gledhill J.A. // J. Phys. A: Math. Nucl. and Gen. Phys. 1973. V. 6. P. 1420–1428.