

06;12

## Характеристики фотовольтаического рентгеновского детектора на основе эпитаксиальной структуры арсенида галлия

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

Институт радиотехники и электроники РАН,  
141190 Фрязино, Московская область, Россия  
e-mail: vfd217@ire216.msk.su

(Поступило в Редакцию 26 декабря 2006 г.)

Исследованы характеристики фотовольтаического рентгеновского детектора на основе эпитаксиальной структуры  $p^+ - n - n' - n^+$  арсенида галлия, выращенной методом газофазной эпитаксии. Приведены типичные вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики эпитаксиальных структур и профиль встроенного электрического поля в обедненной области  $n$ -GaAs. С помощью облучения детектора  $\gamma$ -излучением измерена эффективность сбора заряда в фотовольтаическом детекторе без смещения и при напряжении смещения 17 В. Показано, что фотовольтаический рентгеновский детектор на основе GaAs может работать без смещения при комнатной температуре. Измерена чувствительность детектора в зависимости от эффективной энергии рентгеновского излучения и угла падения рентгеновских фотонов.

PACS: 07.85.Fv, 81.05.-t

Известны два типа полупроводниковых приборов, используемых для детектирования рентгеновского излучения:  $p-i-n$ -диоды [1] и диоды Шоттки [2], работающие при напряжении обратного смещения. Довольно высокое напряжение обратного смещения ( $1-2 \text{ V}/\mu\text{m}$ ) приводит к увеличению шума, возникающего из-за токов утечки. Типичные токи утечки для этих детекторов составляют  $10-30 \text{ nA}/\text{mm}^2$  при комнатной температуре [2]. Для уменьшения токов утечки и снижения шума необходимо охлаждение детектора.

Авторами был разработан [3] фотовольтаический рентгеновский детектор на основе эпитаксиальных структур GaAs, работающий без обратного смещения и при комнатной температуре. Фотовольтаический эффект, т.е. создание фотоэлектродвижущей силы [4], возникает в полупроводниковой структуре при поглощении рентгеновских фотонов, которые генерируют носители тока — электрон-дырочные пары. Эти носители тока должны разделяться внутренним электрическим полем, возникающим в неоднородной полупроводниковой структуре, состоящей из областей с различными типами проводимости. В разработанном рентгеновском детекторе фотовольтаический эффект создается в эпитаксиальной структуре  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs.

В данной работе представлены результаты исследования электрических свойств эпитаксиальной структуры  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs. и основные характеристики фотовольтаических рентгеновских детекторов, изготовленных на основе этих структур.

Эпитаксиальные структуры были выращены на подложках  $n^+$ -GaAs (100), легированных Si ( $n \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), газофазной эпитаксией и состояли из трех эпитаксиальных слоев: верхнего слоя  $p^+$ -GaAs толщиной  $1-2 \mu\text{m}$  и  $p \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , активного слоя  $n$ -GaAs толщиной  $60-100 \mu\text{m}$  и  $n \approx 10^{11}-10^{13} \text{ cm}^{-3}$  и буферного слоя

$n'$ -GaAs толщиной  $2-3 \mu\text{m}$  и  $n \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Изготовление таких структур позволило решить две основные проблемы в создании эффективных рентгеновских детекторов: выращивание эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs с низкой концентрацией носителей тока максимальной толщины и создание обедненной области по всей толщине слоя  $n$ -GaAs с высокой напряженностью встроенного электрического поля. Нам удалось получить структуры  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs с толстым (до  $100 \mu\text{m}$ ) слоем  $n$ -GaAs и малым количеством дефектов в виде пирамид роста. Омические контакты к эпитаксиальным структурам изготавливали вакуумным осаждением тонких пленок Al/Ga и Ni/Ga/Au на переднюю и заднюю поверхности структуры соответственно.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур показали, что они аналогичны характеристикам обычных солнечных элементов. Типичная ВАХ эпитаксиальной структуры без освещения рентгеновским излучением приведена на рис. 1. При освещении рентгеновским излучением ВАХ сдвигается вниз по оси ординат (ось тока). Наибольший интерес представляет поведение отрицательной ветви ВАХ, так как оно определяет темновой ток детектора.

На рис. 2 представлена типичная вольт-фарадная характеристика эпитаксиальной структуры  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs. Из рисунка видно, что емкость почти постоянна вплоть до напряжения  $0.4 \text{ V}$ . Это позволило предположить, что обедненная область простирается по всей металлургической толщине высокоомного эпитаксиального слоя  $n$ -GaAs.

Фотовольтаический детектор рентгеновского излучения может работать в режиме тока короткого замыкания и режиме разомкнутой цепи. Более предпочтительно использование работы детектора в режиме тока короткого замыкания, поскольку сигнал детектора при этом изменяется линейно в зависимости от мощности

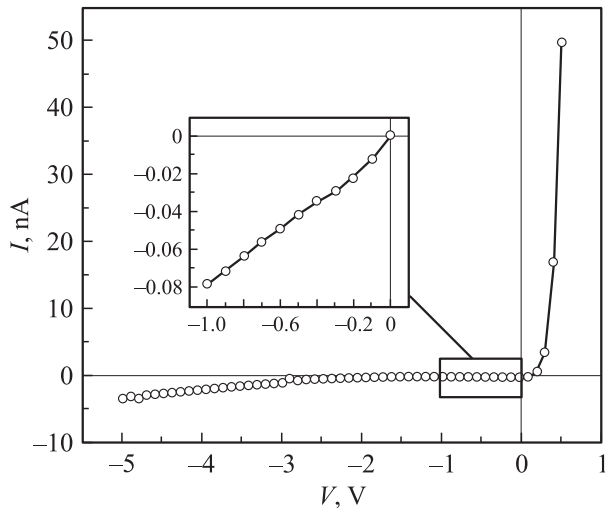


Рис. 1. Типичная ВАХ эпитаксиальной структуры  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs.

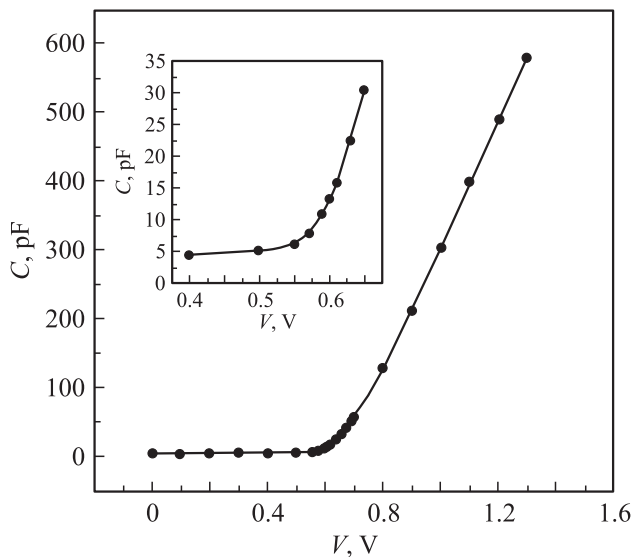


Рис. 2. Типичная вольт-фарадная характеристика эпитаксиальной структуры  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs.

дозы рентгеновского излучения. Это подтверждено нами экспериментально (рис. 3).

Высокопроизводительный фотовольтаический детектор должен эффективно собирать носители заряда, генерированные при облучении рентгеновскими квантами. Максимальный сигнал детектора получается только тогда, когда и электроны, и дырки, создаваемые в обедненной области эпитаксиальной структуры при облучении рентгеновскими фотонами, полностью собираются. Эффективность сбора носителей заряда определяется толщиной обедненной области и длиной сбора носителей тока

$$L_c = (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) E,$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — подвижности электронов и дырок соответственно,  $\tau_n$  и  $\tau_p$  — времена жизни электронов и

дырок,  $E$  — встроенное электрическое поле в обедненной области. Низкая эффективность сбора заряда может быть обусловлена наличием в слое  $n$ -GaAs глубоководных ловушек типа EL-2, которые уменьшают произведение  $\mu\tau$ . Другим фактором, влияющим на эффективность сбора заряда, является встроенное электрическое поле, которое служит источником фототока в фотовольтаическом рентгеновском детекторе. Профиль встроенного электрического поля в обедненной области эпитаксиальной структуры  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs был определен методом индуцирования тока электронным пучком в сканирующем электронном микроскопе Philips SEM515. Для получения профиля встроенного электрического поля пучок электронов был направлен нормально торцу эпитаксиальной структуры. На рис. 4 показан профиль встроенного электрического поля в эпитаксиальной структуре  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs с обедненной областью толщиной  $80 \mu\text{m}$ . Из рисунка можно видеть, что встроенное электрическое поле существует в пределах всего активного слоя  $n$ -GaAs.

Эффективность сбора заряда в фотовольтаическом рентгеновском детекторе была измерена при облучении фотонами  $\text{Am}^{241}$  с энергией  $60 \text{ keV}$  при напряжении смещения  $0$  и  $17 \text{ V}$ . Измерения показали, что эффективность сбора заряда без смещения и со смещением практически одинакова и равна  $93.4$  и  $93.6\%$  соответственно.

Главной характеристикой фотовольтаического рентгеновского детектора является сигнал детектора, который

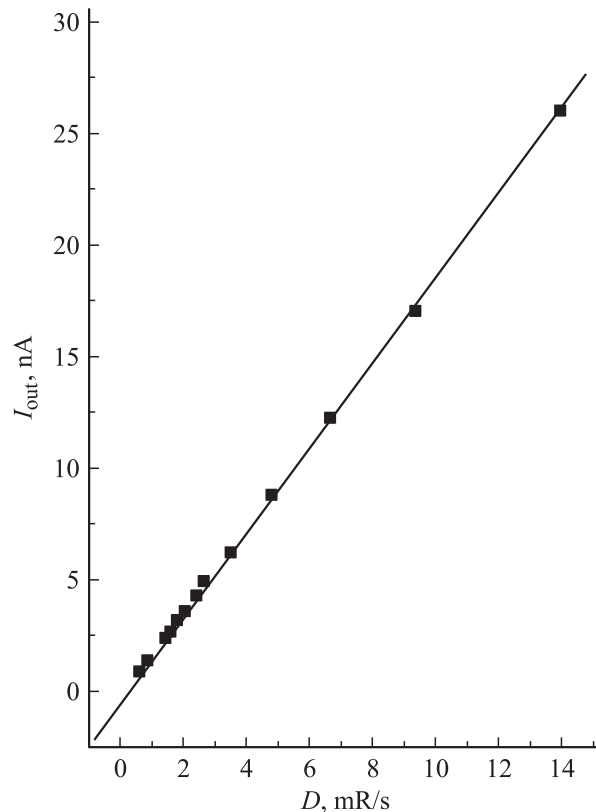


Рис. 3. Зависимость сигнала детектора от мощности дозы рентгеновского излучения.

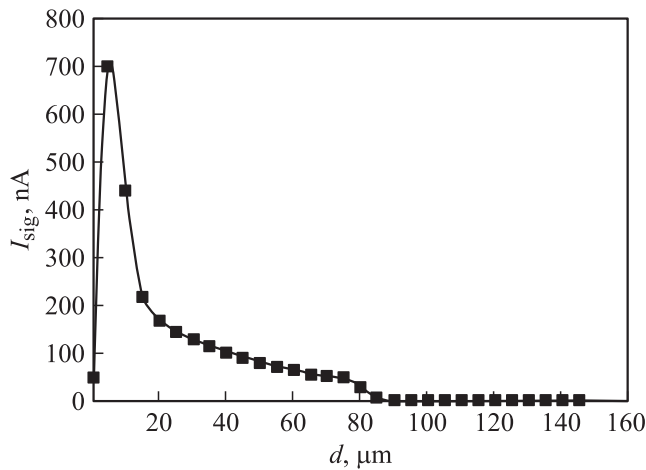


Рис. 4. Профиль встроенного электрического поля в эпитаксиальной структуре  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs.

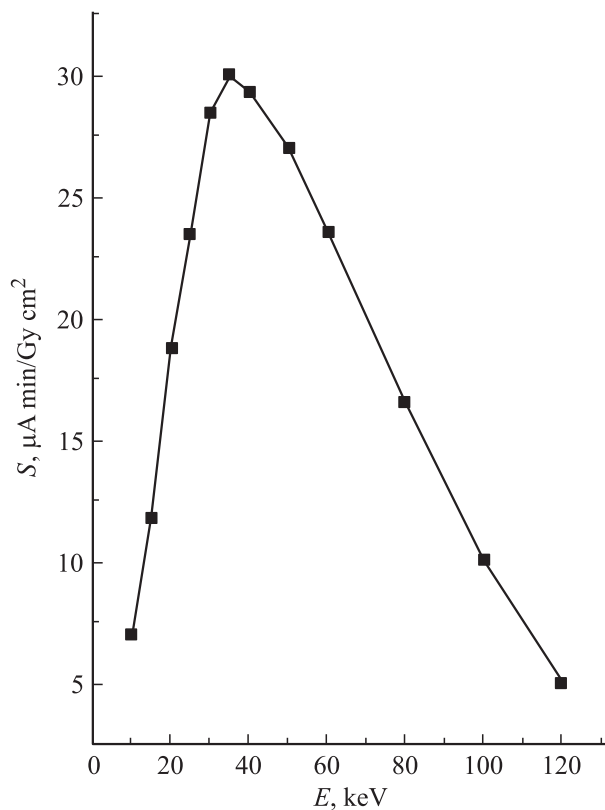


Рис. 5. Зависимость чувствительности фотовольтаического детектора на основе GaAs от эффективной энергии рентгеновского излучения.

зависит от чувствительности детектора и его площади. На рис. 5 приведена зависимость чувствительности фотовольтаического рентгеновского детектора на основе GaAs от эффективной энергии рентгеновского излучения в диапазоне 7–120 keV. Зависимость имеет максимум при 35 keV, равный  $30 \mu\text{A} \cdot \text{min}/\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$ . Выше 35 eV чувствительность снижается, но с мень-

шей скоростью, чем линейный коэффициент поглощения рентгеновских фотонов в GaAs.

Чувствительность рентгеновского детектора при одной и той же площади определяется квантовой эффективностью детектора и эффективностью сбора носителей заряда. Квантовая эффективность фотовольтаического рентгеновского детектора на основе эпитаксиальной структуры  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs ограничивается толщиной слоя  $n$ -GaAs. Нами определено, что при толщине слоя  $n$ -GaAs больше  $100 \mu\text{m}$  резко увеличивается количество дефектов в виде пирамид роста. Чтобы повысить чувствительность детектора, можно использовать геометрию падения рентгеновских фотонов под скользким углом, что обеспечит большую длину поглощения рентгеновских фотонов без увеличения толщины слоя  $n$ -GaAs. На рис. 6 приведены результаты измерения чувствительности детектора в зависимости от угла падения рентгеновских фотонов при трех эффективных энергиях рентгеновского излучения. Из рисунка видно, что чувствительность детектора увеличивается с уменьшением угла падения рентгеновских фотонов и тем резче, чем выше эффективная энергия рентгеновского излучения. Однако сигнал детектора при этом уменьшается, и для его повышения необходимо увеличивать площадь детектора.

В заключение нужно отметить, что фотовольтаические рентгеновские детекторы на основе эпитаксиальных структур  $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs по своим характеристикам не уступают рентгеновским детекторам на основе Ge, но работают без напряжения смещения и при комнатной температуре. Разработанный нами рент-

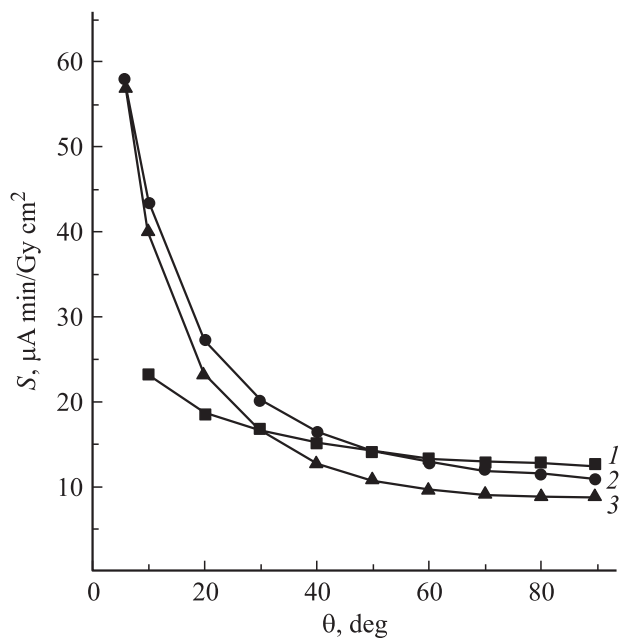


Рис. 6. Зависимость чувствительности фотовольтаического детектора на основе GaAs от угла падения рентгеновских фотонов при разных значениях эффективной энергии. 1 — 25.2, 2 — 56.3, 3 — 79.3 eV.

геновский детектор уже находит различные технические применения.

Авторы выражают благодарность Артемову В.В. и Воробьеву А.П. за помощь в исследовании свойств детектора.

## Список литературы

- [1] *McGregor D.S., Hermon H.* // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 1998. Vol. 410. P. 101–124.
- [2] *Batter C.M.* // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. Vol. 395. P. 1–9.
- [3] *Ахмадуллин Р.А., Дворянкин В.Ф., Дворянкина Г.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 1. С. 34–38.
- [4] *Ландау Л.Д.* Сборник трудов / Под ред. Е.М. Лифшица. М.: Наука, 1969. Т. 1. 512 с.