

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.342

ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ
НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР GaAs

© 2013 г. В. Ф. Дворянкин, Г. Г. Дворянкина, Ю. М. Дикаев, М. Г. Ермаков,
А. А. Кудряшов, А. Г. Петров, А. А. Телегин

*Институт радиотехники и электроники им. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1*

E-mail: vfd217@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 22.03.2012 г.

После доработки 21.05.2012 г.

Представлены результаты исследований свойств нового фотовольтаического рентгеновского детектора, изготовленного на основе эпитаксиальной структуры $p^+-n-n'-n^+$ -GaAs, выращенной методом газофазной эпитаксии. Измерена чувствительность детектора к рентгеновскому излучению в диапазоне эффективных энергий 7–120 кэВ. Разработаны многоканальные линейные рентгеновские детекторы и с их помощью получены цифровые изображения высокого качества.

DOI: 10.7868/S0032816213010217

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время рентгеновские системы, в которых изображение фиксируется на пленке или фотопластинке, уходят в прошлое из-за недостаточного динамического диапазона и сложностей при обработке фотоматериала. Кроме того, в медицинской рентгенографии, как всегда остро, стоит проблема снижения дозовой нагрузки на пациента. Хорошие результаты получены при использовании в рентгенографии сцинтилляторов в качестве детекторов, однако, и они имеют недостатки, такие как послесвечение и недостаточный срок службы. Например, на сайте одного из ведущих производителей сцинтилляционных детекторов на основе CsI фирмы Hamamatsu (www.hamamatsu.com) можно найти следующие данные: после поглощения дозы 80 Гр чувствительность детектора падает на 10%, через 100 мс после выключения засветки послесвечение составляет 1%, что приводит к размытию изображения. Поэтому в рентгенографии все более широко применяются полупроводниковые детекторы.

Для детектирования рентгеновского излучения обычно используются полупроводниковые приборы двух типов: $p-i-n$ -диоды [1] и диоды Шоттки [2], работающие при напряжении обратного смещения 1–2 В/мкм, что приводит к увеличению шумов, возникающих из-за токов утечки. Для понижения уровня шума требуется охлаждение детектора.

Нами был разработан [3] фотовольтаический рентгеновский детектор на основе эпитаксиальной структуры арсенида галлия, эффективно работающий при комнатной температуре.

Фотовольтаический эффект, т.е. электродвижущая сила, возникает в полупроводниковой структуре при поглощении рентгеновских фотонов, которые генерируют носители тока – электрон-дырочные пары. Эти пары разделяются внутренним электрическим полем эпитаксиальной структуры со слоями различного типа проводимости. Мы использовали для этого эпитаксиальную структуру $p^+-n-n'-n^+$ -GaAs.

В данной работе представлены обобщенные результаты исследований свойств разработанного нами рентгеновского детектора, а также описаны созданные нами для получения рентгеновских изображений многоэлементные детекторы.

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ

Эпитаксиальные структуры $p^+-n-n'-n^+$ -GaAs выращивались методом газофазной эпитаксии на легированных кремнием подложках n^+ -GaAs(100) ($n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$) диаметром 2 дюйма и толщиной 500 мкм. Требовалось: а) вырастить высокоомный слой GaAs максимальной толщины и б) создать по всей толщине обедненную область. Выращивание эпитаксиальных слоев арсенида галлия большой толщины методом газофазной эпитаксии усложнялось малой скоростью роста и несовершенствами поверхности растущего слоя, такими как, например, пирамиды роста. Разработанная нами технология позволила получать эпитаксиальные слои n -GaAs с низкой концентрацией дефектов типа EL-2.

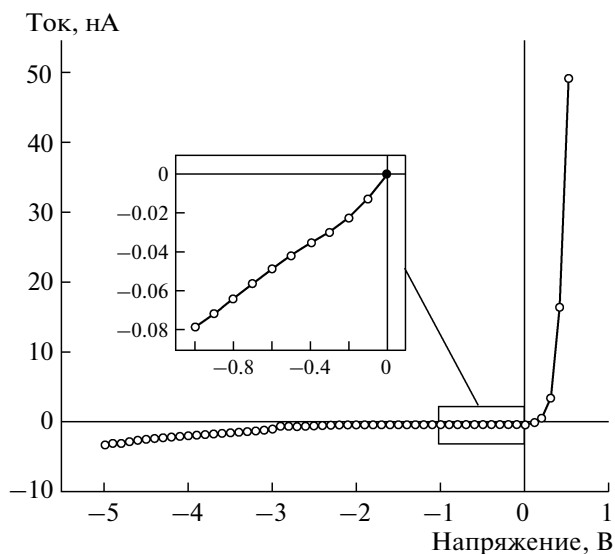


Рис. 1. Типичная вольт-амперная характеристика эпитаксиальной структуры $p^+-n-n^+-n^+$ -GaAs без освещения.

Эпитаксиальная структура состоит из трех слоев: верхний слой p -GaAs ($p \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 1–2 мкм, слой n -GaAs ($n \sim 10^{11}–10^{13} \text{ см}^{-3}$) толщиной 60–100 мкм и буферный слой n' -GaAs ($n' \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) толщиной 2–3 мкм. Омические контакты наносились вакуумным осаждением пленок Al/Cr и Ni/Ga/Au на верхнюю и нижнюю поверхности структуры соответственно.

Исследование вольт-амперных характеристик структуры показало, что они аналогичны вольт-амперным характеристикам солнечных батарей. Особенно важна обратная ветвь характеристики, так как она определяет темновой ток детектора и, следовательно, шумы. На рис. 1 приведена типичная вольт-амперная характеристика эпитаксиальной структуры без освещения. При освещении рентгеновским излучением характеристика смещается вниз по оси ординат.

Фотовольтаический детектор может работать в двух режимах: в режиме тока короткого замыкания и в режиме разомкнутого контура. Более предпочтительно использовать режим тока короткого замыкания, так как в этом случае сигнал детектора изменяется линейно с интенсивностью рентгеновского излучения, в то время как в случае разомкнутого контура эта зависимость логарифмическая.

При воздействии рентгеновского излучения на фотовольтаический детектор в режиме тока короткого замыкания в нем возникает ток

$$I_{\text{кз}} = Ne, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, а N – поток поглощенных рентгеновских фотонов с энергией больше ширины запрещенной зоны. На рис. 2 приведена зави-

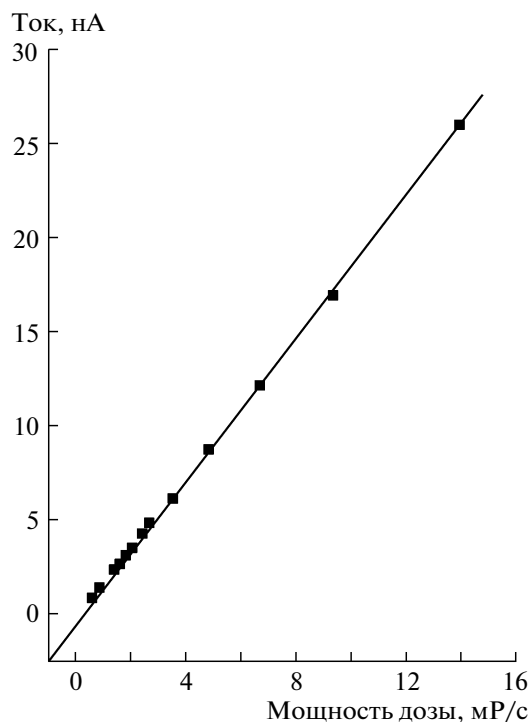


Рис. 2. Зависимость тока короткого замыкания от мощности дозы рентгеновского излучения.

симость тока короткого замыкания от мощности дозы рентгеновского излучения для описываемого детектора. Видно, что эта зависимость линейная.

Исследование вольт-фарадных характеристик позволило нам контролировать обедненную область в эпитаксиальном слое n -GaAs и оценить концентрацию носителей тока $n = N_d - N_a$ (N_d – концентрация доноров, N_a – концентрация акцепторов).

На рис. 3 приведена типичная вольт-фарадная характеристика фотовольтаического рентгеновского детектора. Согласно рисунку, емкость остается почти постоянной до напряжения смещения 0.4 В. Это позволяет предположить, что обедненная область распространяется на всю металлургическую толщину высокоомного эпитаксиального слоя n -GaAs. Наличие обедненной области по всей толщине высокоомного слоя важно тем, что это обеспечивает максимальный сбор заряда.

Для эффективной работы детектора необходимо максимально полный сбор генерированных под воздействием облучения носителей тока – как электронов, так и дырок. Эффективность сбора носителей тока определяется толщиной обедненной области и длиной сбора носителей тока:

$$L_c = (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) E, \quad (2)$$

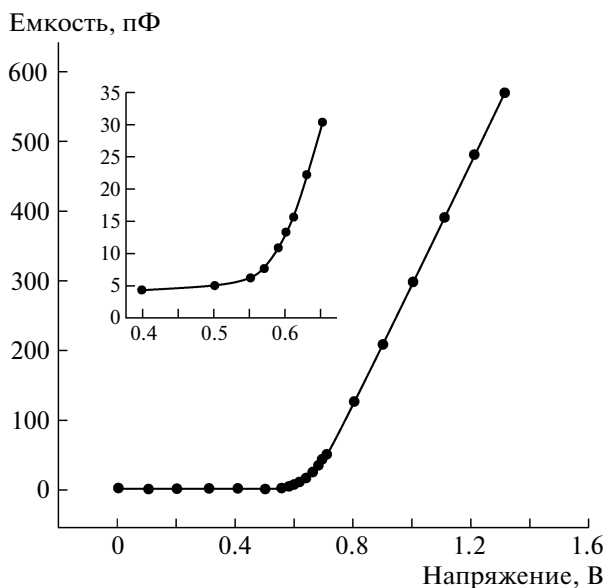


Рис. 3. Типичная вольт-фарадная характеристика фотovoltaического рентгеновского детектора.

где μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок; τ_n и τ_p – времена жизни электронов и дырок; E – напряженность встроенного электрического поля в обедненной области.

Время жизни избыточных носителей заряда, возникших под действием рентгеновского излучения в обедненной области, является важным параметром для обеспечения эффективного сбора заряда. Низкая эффективность сбора может быть связана с наличием в слое n -GaAs глубоких ловушек типа EL-2, что приводит к уменьшению величины произведения подвижности на время жизни. Снижение концентрации EL-2-центров до $\leq 10^{13} \text{ см}^{-3}$ позволило увеличить время жизни до $\sim 200 \text{ нс}$.

Следует отметить, что длина сбора заряда уменьшается, если на детектор подается напряжение смещения в прямом направлении, а также в случае работы детектора в режиме разорванного контура, когда преобладает транспорт носителей посредством диффузии. Большое влияние на работу детектора оказывает наличие обедненной области. Концентрация примесей и носителей тока вне обедненной области сбалансированы, и, следовательно, плотность заряда равна нулю. Обедненная область почти не содержит подвижных носителей, и, следовательно, в ней имеется большой градиент электрического поля благодаря зарядам ионизированных примесей. Толщина обедненной области определяется выражением

$$W = \left[\frac{\varepsilon}{2\pi e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (V + \Phi_B) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

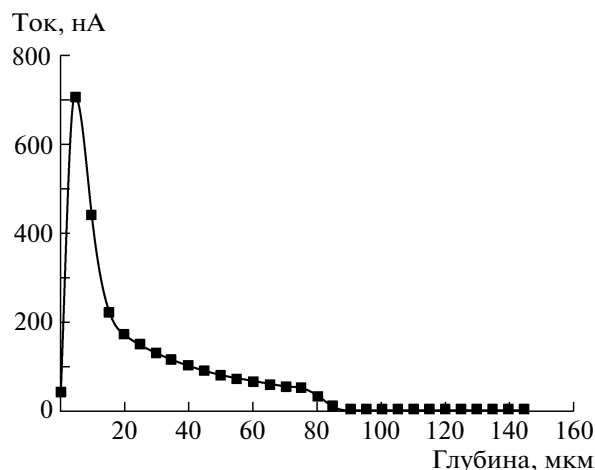


Рис. 4. Профиль встроенного электрического поля в структуре $p^+-n-n'-n^+$ -GaAs с шириной обедненной области 80 мкм.

где ε – диэлектрическая постоянная; e – заряд электрона; N_a и N_d – концентрации акцепторов и доноров в p^+ - и n -слоях структуры; V – приложенное напряжение; Φ_B – потенциал встроенного поля p - n -перехода.

Ширину обедненной области можно регулировать технологией изготовления эпитаксиальной структуры $p^+-n-n'-n^+$ -GaAs или применением обратного смещения к переходу. Генерированные в обедненной области электрон-дырочные пары разделяются и ускоряются под воздействием встроенного электрического поля и попадают в области, где они являются основными носителями. Носители тока, генерированные вне обедненной области, но на расстоянии меньше, чем длина свободного пробега от него, будут диффундировать в обедненную область и дрейфовать в ней.

Встроенное электрическое поле является источником фототока в детекторе. Чтобы получить достаточно сильное поле в обедненной области, важно тщательно контролировать общее количество примесей. Мы провели прямые измерения встроенного электрического поля в структуре $p^+-n-n'-n^+$ -GaAs методом наведенного тока электронным пучком (метод EBIC). Структура перехода исследовалась при помощи сканирующего электронного микроскопа Philips SEM515. Профиль встроенного электрического поля в структуре с шириной обедненной области 80 мкм приведен на рис. 4. Согласно рисунку, встроенное электрическое поле существует по всей толщине эпитаксиального слоя n -GaAs.

Эффективность сбора заряда была измерена при облучении фотонами ^{241}Am с энергией 60 кэВ при напряжениях смещения 0 и 17 В. Измерения показали, что эффективность сбора заряда равна

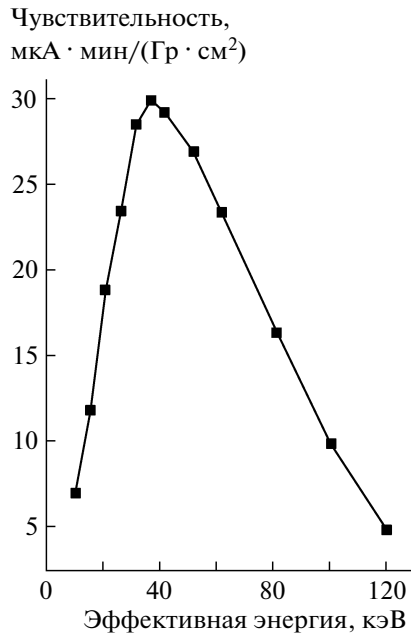


Рис. 5. Зависимость чувствительности детектора от эффективной энергии рентгеновского излучения.

93.4% и 93.6% соответственно, т.е. практически одинакова.

Основной характеристикой рентгеновского детектора является его чувствительность, которая определяется как

$$S = \frac{I_{ph}}{DA}, \quad (4)$$

где I_{ph} — фототок, D — мощность дозы рентгеновского облучения, A — рабочая площадь детектора.

На рис. 5 приведена зависимость чувствительности детектора от эффективной энергии рентгеновского излучения в диапазоне 7–120 кэВ. Максимальная чувствительность достигалась при энергии 35 кэВ и составляла в среднем ~ 30 мкА \times мин/(Гр \cdot см²). Выше 35 кэВ чувствительность падает, но не так быстро, как линейный коэффициент поглощения рентгеновского излучения в GaAs, что, вероятнее всего, связано с каскадными процессами в эпитаксиальной структуре.

Квантовая эффективность фотовольтаического детектора ограничивается толщиной слоя n -GaAs эпитаксиальной структуры. Для улучшения положения можно использовать скользящее падение рентгеновских фотонов, что увеличивает расстояние, на котором они поглощаются, без увеличения действительной толщины слоя. Зависимость чувствительности детектора от угла падения приведена на рис. 6.

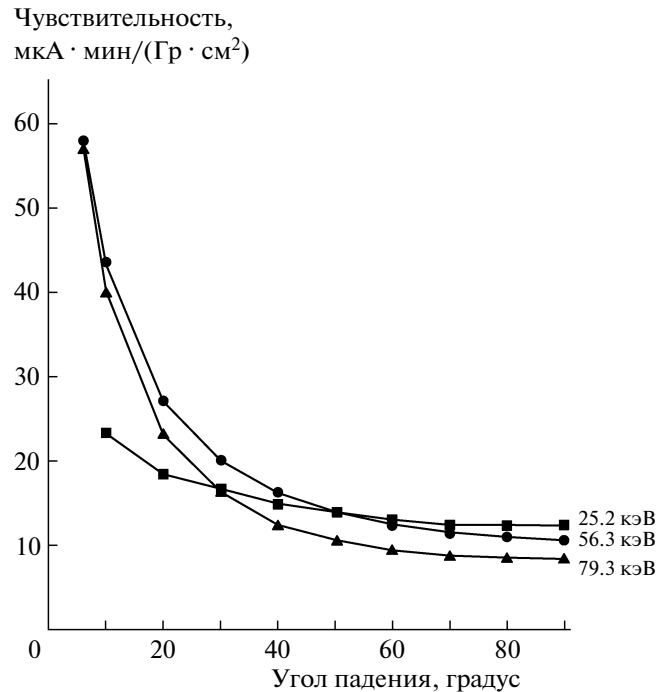


Рис. 6. Зависимость чувствительности детектора от угла падения при различных значениях эффективной энергии (цифры у кривых).

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДЕТЕКТОРА МЕТОДОМ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Для разделения пикселей многоэлементного детектора производится скрайбирование, что делает структуру очень хрупкой при глубине реза более 100 мкм, особенно при уменьшении размера пиксела и шаге < 200 мкм. Поэтому мы попытались разделить пиксели при помощи фотолитографии, а для полного разделения фототоков отдельных пикселей были использованы охранные кольца. В нашем случае шаг составлял 108 мкм. Конструкция детектора изображена на рис. 7. Между пикселями наносился в качестве охрannого кольца алюминиевый проводник, соединенный электрически с контактом на слое n^+ (катоде). В слое p^+ и частично в слое n -GaAs вытравливались канавки на глубину 8–10 мкм, которые разделяли проводящий p^+ -слой между контактами анода и охранным кольцом. Для предотвращения бокового растравливания использовалось анизотропное травление в растворе HCl–KBrO₃–H₂O. Это позволило вести травление по определенным кристаллографическим направлениям. Сопротивление между соседними пикселями составляло 10^6 Ом. Профили сигнала от трех соседних пикселей приведены на рис. 8.

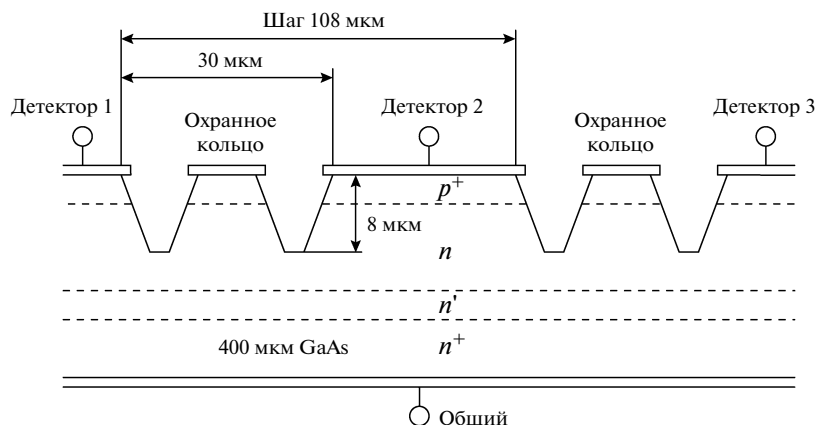


Рис. 7. Структура рентгеновского детектора с охранными кольцами.

4. БИЛИНЕЙНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ДЕТЕКТОР

Для повышения пространственного разрешения можно уменьшить шаг многоэлементного детектора и соответственно размер пиксела, что, однако, приводит к уменьшению полезного сигнала. Частично решить эту проблему позволяет использование билинейной конструкции.

Линейный многоэлементный детектор представляет собой ряд пикселей, расположенных вдоль оси Ox с расстоянием d между их центрами (рис. 9а). Изображение получается при сканировании вдоль оси Oy . Билинейные детекторы состоят из двух линейных детекторов, сдвинутых один относительно другого на $d/2$, причем оси

линеек также находятся на расстоянии $d/2$ друг от друга (рис. 9б, 9в) [4].

Изготовленные нами билинейные детекторы состояли из $2 \times 512 = 1024$ пикселей с шагом 800 мкм. Измеренное пространственное разрешение составляло 1.2 пар линий/мм, контрастная чувствительность — не хуже 1% и отношение максимального сигнала к шуму — более 2000. Считывающая электроника работала в режиме, близком к току короткого замыкания [3]. В качестве иллюстра-

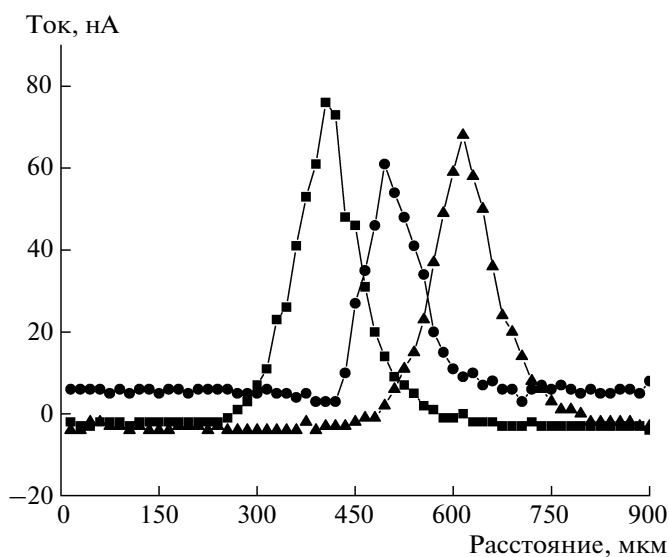


Рис. 8. Профили сигналов от трех соседних пикселей рентгеновского детектора с шагом 108 мкм с охранными кольцами.

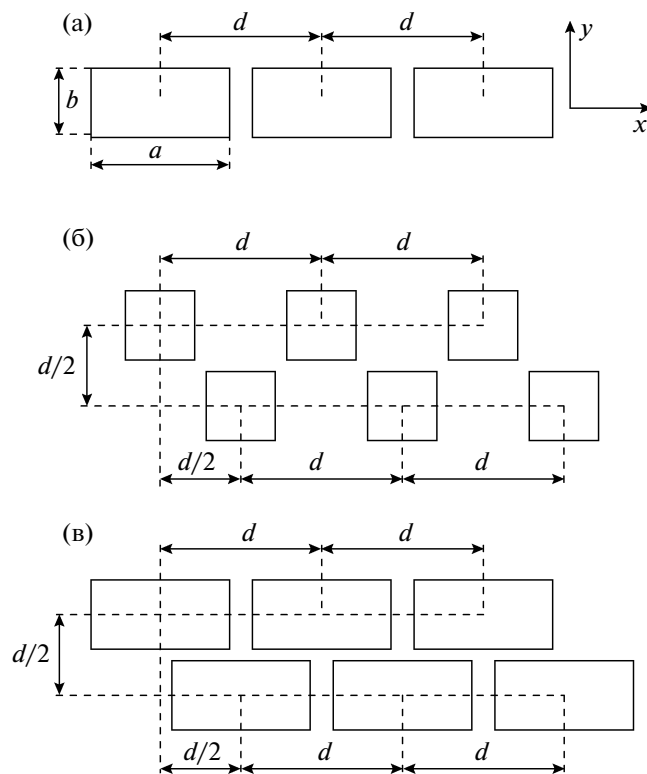


Рис. 9. Разновидности построения линейных детекторов.

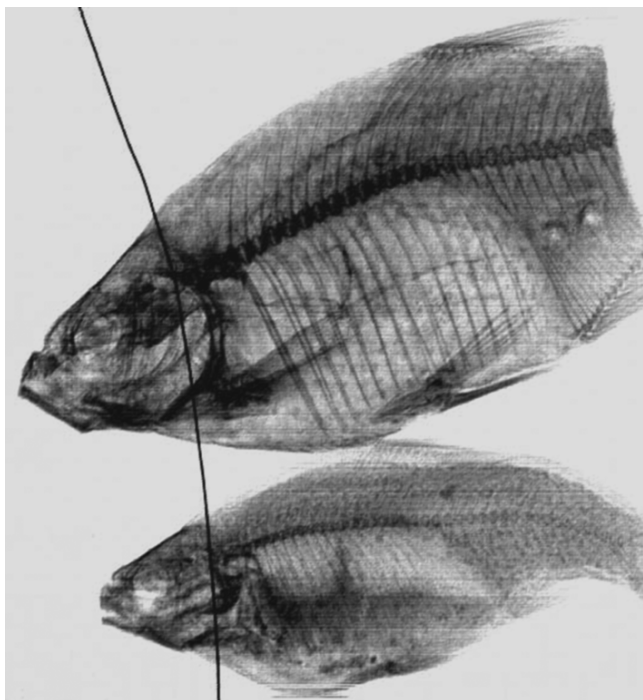


Рис. 10. Рентгеновский снимок рыб.

ции на рис. 10 приведено полученное с помощью билинейного детектора изображение рыб. Поле изображения составляет 20×20 см. Напряжение на трубке, излучающей тормозное рентгеновское излучение, было 60 кВ, анодный ток 3 мА, использован медный фильтр толщиной 0.1 мм, ширина щели коллиматора составляла 1 мм. Сканирование осуществлялось со скоростью 8 см/с. При этом дозовая нагрузка составила ≤ 5 мкГр на снимок в плоскости детектора. Это соответствует наилучшим образцам отечественных и зарубежных флюорографов.

5. СТОЙКОСТЬ ДЕТЕКТОРА К РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Эпитаксиальный GaAs-детектор был подвергнут непрерывному облучению рентгеновским излучением. После получения дозы 80 Гр уменьшения чувствительности к рентгеновскому излучению не наблюдалось.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы свойства рентгеновского детектора на основе эпитаксиальной структуры $p^+ - n - n' - n^+$ -GaAs. Детектор эффективно работает без напряжения смещения при комнатной температуре. Чувствительность детектора к рентгеновскому излучению, измеренная в диапазоне эффективных энергий 7–120 кэВ, достигает максимального значения ~ 30 мкА · мин/(Гр · см²) при 35 кэВ. На основе эпитаксиальной структуры GaAs сконструированы многоканальные линейные детекторы рентгеновского излучения. Получены рентгеновские изображения хорошего качества. Разработанные фотovoltaические рентгеновские детекторы могут использоваться в медицинской диагностике, при неразрушающем контроле, на таможне и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McGregor D.S., Hermon H.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section. 1997. V. A395. Issue 1. P. 101.
2. *Battar C.M.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Section. 1997. V. A395. Issue 1. P. 1.
3. *Ахмадуллин Р.А., Дворянкин В.Ф., Дворянкина Г.Г. и др.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 1. С. 34.
4. *Bosiers J., Vermeiren J., Sevenhans J.* // Proc. SPIE. 1995. V. 591. P. 67.