

Варизонный фотоэлектрический детектор ионизирующих излучений

© Л. Дапкус, К. Пожела, Ю. Пожела[†], А. Шиленас, В. Юцене, В. Ясутис

Институт физики полупроводников,
01108 Вильнюс, Литва

(Получена 21 июня 2004 г. Принята к печати 4 июля 2004 г.)

Гетероструктура — варизонный слой $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на $n\text{-GaAs}$ -подложке — исследована в качестве детектора рентгеновского излучения и α -частиц с фотоэлектрическим откликом. Получено, что ампер-ваттная чувствительность детектора достигает 0.13 А/Вт. Вольт-ваттная чувствительность превышает 10^6 В/Вт. Исследовано влияние облучения α -частицами с энергией 5.48 эВ (^{241}Am) на чувствительность детектора. Установлено, что при дозе облучения до $5 \cdot 10^9$ частиц/см² чувствительность детектора падает в 1.5–2 раза. Дальнейшее увеличение дозы облучения до $4 \cdot 10^{10}$ частиц/см² не меняет чувствительности детектора.

1. Введение

Исследование поведения варизонных детекторов ионизирующего излучения при облучении α -частицами показало, что радиационная стойкость детекторов с оптическим откликом значительно выше, чем детекторов с токовым откликом [1]. Показано, что скорость рекомбинации неравновесных носителей заряда в варизонном кристалле при дозе облучения α -частицами с энергией 5.48 МэВ (^{241}Am) $n_d = 10^9$ частиц/см² растет в десятки раз. Соответственно снижается число носителей заряда, собираемых варизонным полем кристалла, или токовый отклик варизонного детектора.

Оптический отклик (люминесценция) через широкозонное окно варизонного кристалла при той же дозе облучения снижается лишь в 1.5 раза благодаря увеличению скорости излучательной рекомбинации при облучении α -частицами [1].

Однако внешний квантовый выход оптического излучения из-за малого угла полного внутреннего отражения на переходе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ –воздух оказывается очень низким (менее 2%). Поэтому для избежания потерь излучения на переходе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ –воздух целесообразно собирать генерируемое оптическое излучение внутри кристалла, помещая фотодетектор (GaAs p – n -переход) на широкозонной стороне варизонной структуры. Такие структуры с фотоэлектрическим откликом на p – n -переходе использовались в качестве детекторов ионизирующих излучений в ряде работ [2,3].

В настоящей работе исследованы детекторы рентгеновского излучения и α -частиц с фотоэлектрическим откликом и рассмотрено влияние на их характеристики облучения α -частицами.

2. Варизонный детектор ионизирующих излучений с фотоэлектрическим откликом

На рис. 1 схематически показана структура детектора. Она представляет собой выращенный методом жидкофазной эпитаксии дырочный варизонный слой

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на электронной GaAs -проводящей подложке. Доля Al составляет $x = 0.4$ у подложки и $x = 0$ у поверхности варизонного слоя. Выращены структуры трех типов детекторов, отличающиеся толщиной варизонного слоя: $L = 18$ (D18), 25 (D25), 50 мкм (D50).

Детектируемое излучение направлялось на структуру с узкозонной стороны варизонного слоя. В качестве источника ионизирующего излучения использовалось рентгеновское излучение с характеристической линией 8 кэВ (Cu-анод). Источником α -частиц с энергией 5.48 МэВ был ^{241}Am .

Фотоэлектрическим откликом детектора является фотоэдс (или ток), возникающая на $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ p – n -переходе при поглощении в нем рекомбинационного излучения неравновесных электронно-дырочных пар, генерируемых в варизонном слое внешним ионизирующим излучением. Величина фотоэлектрического отклика определяется скоростью генерации внешним ионизирующим излучением электронно-дырочных пар и внутренним квантовым выходом рекомбинационного излучения.

Скорость генерации пар определяется мощностью поглощаемого излучения P_{abs} и минимальной энергией, необходимой для рождения электронно-дырочной пары E_{th} . Для GaAs $E_{th} = 4$ эВ.

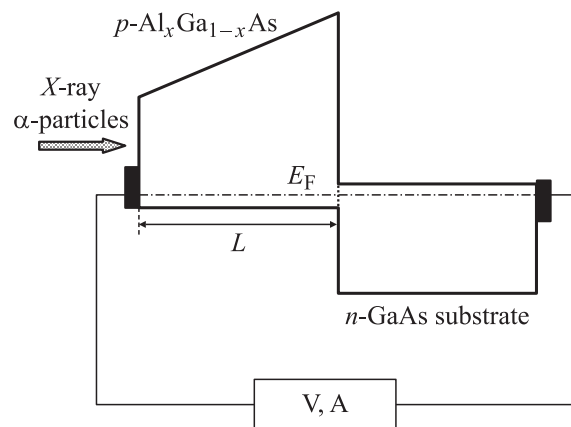


Рис. 1. Структура фотоэлектрического детектора и схема измерений.

[†] E-mail: pozela@pfi.lt

Внутренний квантовый выход равен

$$\eta = \frac{1}{1 + \tau_r/\tau_{nr}}, \quad (1)$$

где τ_r — время излучательной и τ_{nr} — безызлучательной рекомбинации электронно-дырочных пар.

Половина рекомбинационного излучения доходит до p - n -перехода с широкозонной стороны, а остальная часть падает туда лишь в результате переизлучения. Эффективный квантовый выход рекомбинационного излучения в широкозонную часть варизонного кристалла можно оценить так:

$$\eta_{ef} = \frac{1}{2} \eta \left(1 + \frac{1}{2} \eta + \frac{1}{4} \eta^2 + \dots \right). \quad (2)$$

Ток короткого замыкания GaAs p - n -перехода равен

$$I_{ph} = \frac{P_{abs}}{E_{th}} \eta_{ef}. \quad (3)$$

Фотоэдс на p - n -переходе

$$U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_s + I_{ph}}{I_s}, \quad (4)$$

где I_s — ток насыщения p - n -перехода, q — заряд электрона, kT — температура.

Фототок I_{ph} тем выше, чем короче время излучательной рекомбинации. Инерционность детектора также определяется этим временем. В рассматриваемых нами структурах $\tau_r \approx 10^{-9}$ с достигается путем высокой степени легирования варизонного кристалла акцепторами Zn ($p \approx 10^{18}$ см $^{-3}$), являющимися центрами излучательной рекомбинации.

На рис. 2 показаны экспериментальные результаты измерений фотоэлектрического отклика в зависимости от поглощенной мощности рентгеновского излучения с энергией 8 кэВ для трех детекторов с различными толщинами варизонного слоя: $L = 18$ (D18), 25 (D25), 50 мкм (D50).

Токовая чувствительность равна $\beta_I = 0.13$ А/Вт для D18 и D25 и $\beta_I = 0.07$ А/Вт для D50. Соответственно эффективный квантовый выход равен для образцов D18 и D25 $\eta_{ef} = 0.52$ и для D50 $\eta_{ef} = 0.27$.

Малый эффективный квантовый выход для образца с толстым варизонным слоем (D50) следует связывать с поглощением рекомбинационного излучения в самом слое.

Максимальный ток, который может быть получен при $\eta_{ef} = 1$, $I_{max} = 0.25P_{abs}$. Вольт-ваттная чувствительность детектора превышает 10^6 В/Вт при $P_{abs} \approx 50$ нВт/мм 2 . На рис. 2 для сравнения приведены экспериментально измеренные характеристики кремниевого p - i - n -детектора рентгеновского излучения.

Отметим, что токовый отклик кремниевого детектора рентгеновского излучения, благодаря более низкой

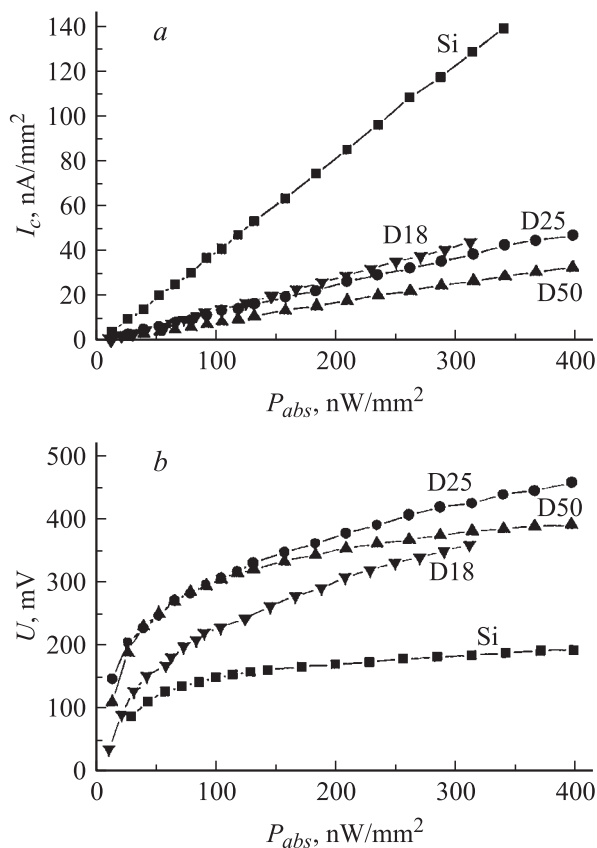


Рис. 2. Токовый I_c (a) и вольтовый U (b) отклик фотоэлектрических детекторов (D18, D25, D50) в зависимости от поглощенной мощности P_{abs} рентгеновского излучения. Для сравнения приведены характеристики Si p - i - n -детекторов рентгеновского излучения.

пороговой энергии E_{th} (Si) для создания электронно-дырочной пары, в 3 раза выше, чем у варизонного Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As-детектора.

Эдс, возникающая на p - n -переходе в случае Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As/GaAs, в 2 раза больше, чем на кремниевом p - n -переходе, из-за меньшего значения тока насыщения j_s в более широкозонном Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As, чем кремний (рис. 2, b).

3. Поведение варизонного детектора с фотоэлектрическим откликом при облучении α -частицами

Источник α -частиц (^{241}Am) помещался непосредственно у поверхности с узкозонной стороны варизонного слоя. Глубина проникновения α -частиц с энергией 5.48 Мэв через Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As слой — около 21 мкм. В образце D18 проникновение α -частиц захватывало GaAs p - n -переход, а в образцах D25 и D50 α -частицы останавливались в варизонном Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As слое не доходя до p - n -перехода.

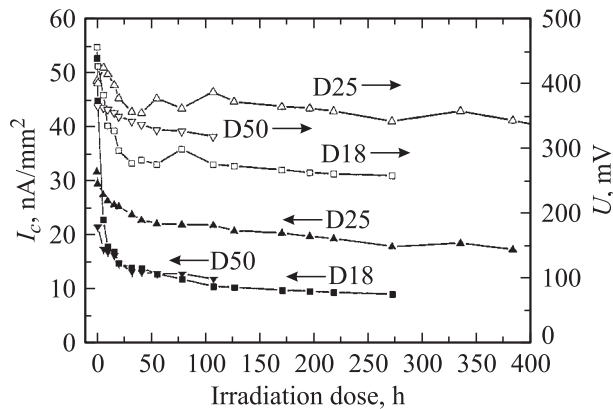


Рис. 3. Токовый I_c и вольтовый U отклик фотоэлектрических детекторов (D18, D25, D50) при падающей мощности рентгеновского излучения $P = 3.7 \cdot 10^{-5}$ Вт/см² в зависимости от дозы предварительного облучения α -частицами. Доза облучения указана в часах. 1 ч облучения соответствует дозе 10^8 α -частиц/см².

На рис. 3 показана зависимость фотоэлектрического отклика детектора рентгеновского излучения от времени облучения α -частицами. Доза облучения составляла 10^8 α -частиц/см² в 1 ч.

Во всех образцах наблюдается падение величины I_{ph} тока и фотоэДС U с ростом дозы облучения α -частицами. В образце D18 уменьшение I_{ph} и U особенно сильно на первоначальном этапе облучения: после 20 ч облучения токовый отклик падает в 8 раз, а вольтовый отклик — в 2 раза. Столь резкое падение чувствительности структуры при малых дозах облучения следует связывать со структурными нарушениями в области GaAs p - n -перехода. В образцах D25 и D50, где α -частицы не достигают GaAs p - n -перехода, уменьшение чувствительности с ростом дозы облучения происходит более плавно. В образце D25 после 100 ч чувствительность детектора падает в 1.5 раза. При дозе облучения выше 100 ч чувствительность детекторов D18 и D25 очень слабо зависит от повышения дозы облучения. Таким образом, эффективный квантовый выход, а значит, и отношение скоростей рекомбинаций с излучением и без излучения, не меняется с ростом дозы облучения выше 10^{10} частиц/см². Образованные α -частицами дефекты в $Al_xGa_{1-x}As$ -слое увеличивают скорость излучательной рекомбинации, и рост скорости безызлучательной рекомбинации полностью компенсируется ростом скорости излучательной рекомбинации.

Таким образом, предварительно облученные детекторы оказываются весьма радиационно стойкими приборами.

4. Спектр α -частиц

На рис. 4 показан спектр амплитуд собираемого заряда при облучении α -частицами с энергией 5.48 МэВ (²⁴¹Am) варизонного детектора с фотоэлектри-

ческим откликом D50 при различных дозах предварительного облучения α -частицами.

Амплитуда собираемого заряда равна:

$$Q(\varphi) = n_0 \eta_{ef} \frac{\exp(-\gamma L)}{\gamma} (\exp(\gamma l_a \cos \varphi) - 1), \quad (5)$$

где L — толщина варизонного слоя, l_a — длина трека α -частицы, φ — угол падения α -частицы на варизонный слой, γ — коэффициент поглощения рекомбинационного излучения в широкозонную сторону варизонного слоя, $n_0 \eta_{ef}$ — число рекомбинирующих с излучением электронно-дырочных пар, созданных α -частицей.

Из-за конечности размеров источника α -частиц и детектора угол φ изменяется в широких пределах, что определяет уширение максимума спектра, соответствующего энергии α -частицы.

Величина η_{ef} определяется отношением τ_r/τ_{nr} и зависит от дозы предварительного облучения. Экспериментально наблюдается сдвиг амплитуд собираемого заряда в сторону меньших значений с ростом дозы облучения α -частицами (см. рис. 4). Это означает превышение роста скорости безызлучательной над ростом скорости излучательной рекомбинации с увеличением дозы облучения, как это наблюдалось и в случае детектирования рентгеновского облучения (рис. 3).

Отметим, что число импульсов в максимуме спектра не уменьшается при уменьшении амплитуд Q с ростом дозы облучения варизонного детектора с токовым откликом.

Однако после облучения α -частицами свыше 20 ч (доза облучения $2 \cdot 10^9$ частиц/см²) варизонный детектор перестает быть спектрометром энергии частиц, так как максимум, соответствующий энергии α -частицы, сдвигается в область высокого фонового излучения (рис. 4).

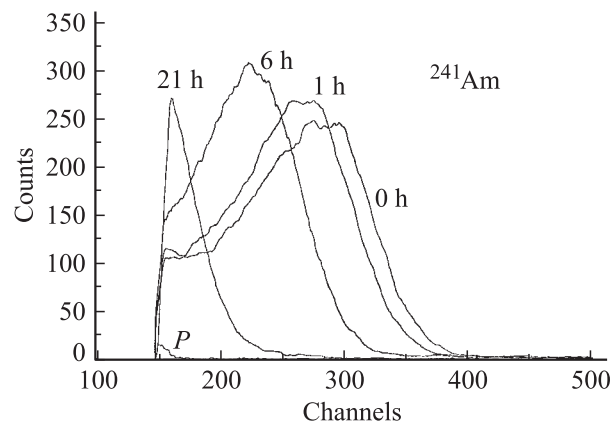


Рис. 4. Спектр амплитуд токового отклика варизонного фотоэлектрического детектора на излучение α -частиц при различных дозах предварительного облучения α -частицами. Доза облучения указана в часах. P — фоновый сигнал в отсутствие источника α -частиц.

5. Заключение

Варизонный слой $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $n\text{-GaAs}$ на широкозонной стороне образует структуру детектора ионизирующего излучения с фотоэлектрическим откликом. Рекомбинационное излучение генерированных ионизирующим излучением электронно-дырочных пар в варизонном слое детектируется фотодиодом $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$.

Токовая чувствительность фотоэлектрического детектора рентгеновского излучения с энергией 8 кэВ составляет 0.13 А/Вт поглощенной мощности. Вольтовая чувствительность превышает 10^6 В/Вт.

Токовая чувствительность в 3 раза ниже, а вольтовая в 2 раза выше, чем у кремниевого детектора рентгеновского излучения.

Токовая и вольтовая чувствительность детекторов с толщиной варизонного слоя выше 25 мкм, облученных α -частицами с энергией 5.48 МэВ, снижается в 1.5 раза при дозе облучения $5 \cdot 10^9$ частиц/см². Дальнейшее повышение дозы облучения до $4 \cdot 10^{10}$ частиц/см² не меняет чувствительности.

Снижение чувствительности обусловлено ростом скорости безызлучательной рекомбинации в варизонном слое при облучении α -частицами. При дозе облучения выше $5 \cdot 10^9$ частиц/см² отношение скоростей излучательной и безызлучательной рекомбинации остается постоянным. Эффективный квантовый выход рекомбинационного излучения и чувствительность детектора не меняются при дальнейшем облучении α -частицами.

Рост скорости излучательной рекомбинации выше 10^9 с⁻¹ обеспечивает высокое быстродействие детектора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Литовского государственного фонда науки и образования (программа „CERN-Vilnius-RD“).

Список литературы

- [1] Л. Дапкус, К. Пожела, Ю. Пожела, А. Шиленас, В. Юцене, В. Ясутис. ФТП, **38**, 1147 (2004).
- [2] В.М. Андреев, В.Н. Блинов, В.А. Носенко, О.Г. Резванов, В.Н. Родионова. ФТП, **8**, 4227 (1974).
- [3] A. Silenas, J. Pozela, K.M. Smith, K. Pozela, V. Jasutis, L. Dapkus, V. Juciene. Nucl. Instrum. Meth. A, **487**, 54 (2002).

Редактор Л.В. Беляков

A photoelectric graded-gap detector for ionizing radiation

L. Dapkus, K. Požela, J. Požela, A. Šilėnas, V. Juciėnė, V. Jasutis

Semiconductor Physics Institute,
01108 Vilnius, Lithuania

Abstract The heterostructure: representing a graded-gap $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layer on the $n\text{-GaAs}$ substrate is investigated as an X-ray and α -particle detector with photoelectric response. It has been obtained that the current-power sensitivity achieves 0.13 A/W. The volt-power sensitivity exceeds 10^6 V/W.

The influence of the α -particles radiation (the energy of 5.48 MeV) on the detector sensitivity is investigated. It is shown that the detector sensitivity decreases by 1.5 times under the radiation dose of $5 \cdot 10^9$ particles/cm². The further increase of the radiation dose up to $4 \cdot 10^{10}$ particles/cm² does not change the detector sensitivity.