

# Поведение варизонных детекторов ионизирующих излучений при облучении $\alpha$ -частицами

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

Институт физики полупроводников,  
2600 Вильнюс, Литва

(Получена 25 февраля 2004 г. Принята к печати 26 февраля 2004 г.)

Исследовано влияние облучения  $\alpha$ -частицами на величину токового и оптического отклика варизонных детекторов  $\alpha$ -частиц и рентгеновского излучения в системе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ . Установлено, что снижение величины как токового, так и оптического отклика обусловлено ростом скорости безызлучательной рекомбинации при увеличении дозы облучения  $\alpha$ -частицами.

## 1. Введение

Варизонные гетероструктуры  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$  используются в качестве детекторов ионизирующих излучений, причем как с токовым [1–4], так и с оптическим откликом [5–8].

В первом случае варизонное поле используется для собирания заряда, генерируемого ионизирующим излучением в объеме варизонного слоя. Эффективность собирания заряда в этом случае определяется параметром

$$\beta = t_{\text{dr}}/\tau_{\text{rec}}, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{rec}}$  — время жизни,  $t_{\text{dr}}$  — время дрейфа неравновесных носителей заряда через варизонный слой.

Во втором случае чувствительность детектора определяется квантовым выходом конверсии ионизирующего излучения в световое излучение и эффективностью вывода последнего через широкозонное окно варизонного кристалла. Внутренний квантовый выход

$$\eta = \frac{1}{1 + \tau_r/\tau_{nr}} \quad (2)$$

определяется отношением скоростей излучательной ( $\tau_r^{-1}$ ) и безызлучательной ( $\tau_{nr}^{-1}$ ) рекомбинации.

В обоих случаях эффективность работы детектора определяется временем жизни неравновесных носителей — параметром, чувствительным к различного рода дефектам, возникающим в кристалле при его облучении ионизирующими частицами. При этом в зависимости от соотношения изменений скоростей излучательной и безызлучательной рекомбинации оптический отклик детектора может как расти, так и падать с дозой облучения [9].

В настоящей работе исследовано действие облучения  $\alpha$ -частицами на характеристики варизонных  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -детекторов  $\alpha$ -частиц и рентгеновского излучения.

## 2. Анализатор спектра $\alpha$ -частиц

В работах [4,10] показано, что варизонная структура может быть использована в качестве детектора  $\alpha$ -частиц, действующего без приложенного внешнего

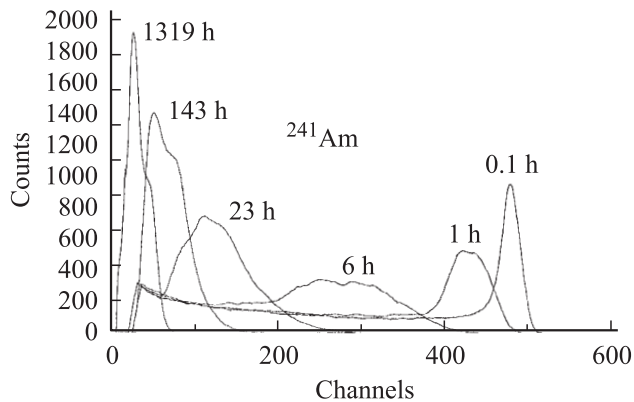
смещения. В настоящей работе для детектирования  $\alpha$ -частиц использовалась варизонная гетероструктура  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/p^+\text{-GaAs}$ . На подложке  $p^+\text{-GaAs}$  выращивались варизонный слой  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной 25 мкм и с его узкозонной стороны слой  $n\text{-GaAs}$  толщиной до 2 мкм. Площадь детектора 1 мм<sup>2</sup> была меньше, чем площадь источника  $\alpha$ -частиц (<sup>241</sup>Am). Генерированные в кристалле электронно-дырочные пары собирались варизонным полем к переходу  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$ , где разделялись. Измерялся токовый отклик, соответствующий величине собранного заряда. В варизонном слое  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной 25 мкм  $\alpha$ -частицы с энергией 5.48 МэВ полностью поглощаются. При градиенте состава от  $x = 0$  до 0.35 на толщине слоя варизонное поле 120 В/см обеспечивает дрейфовую скорость электронов  $5 \cdot 10^5$  см/с и время пролета электронов через весь слой  $t_{\text{dr}} \lesssim 5$  нс. Если время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau_{\text{rec}} > 10^{-8}$  с, то столь короткое время пролета обеспечивает 100-процентную эффективность сбора заряда, генерированного в слое, без приложения какого-либо внешнего напряжения к слою  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . В слабо легированной структуре  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$ , не подвергнутой облучению  $\alpha$ -частицами, экспериментально измеренная эффективность сбора заряда при облучении рентгеновским излучением от источника с медным анодом была близка к 100%.

Благодаря высокой эффективности собирания заряда экспериментально определен спектр амплитуд токового отклика структуры при облучении  $\alpha$ -частицами показывает хорошее разрешение (5%) спектральной линии, соответствующей энергии  $\alpha$ -частиц 5.48 МэВ (см. рис. 1).

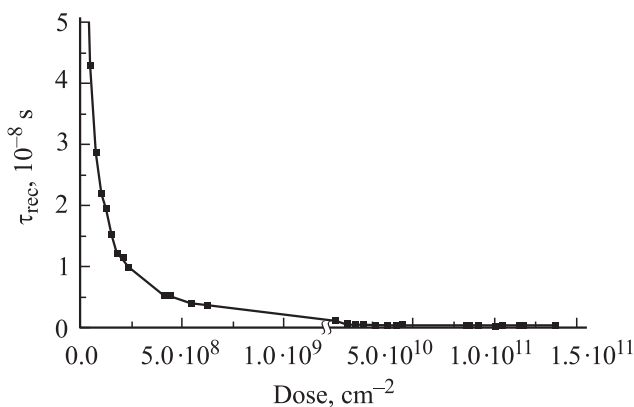
Дальнейшее облучение  $\alpha$ -частицами слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ведет к уменьшению времени рекомбинации электронно-дырочных пар,  $\tau_{\text{rec}}$ , и соответственно к уменьшению величины собираемого заряда.

Изменение в результате облучения  $\alpha$ -частицами амплитуды  $a_\alpha$  собираемого заряда относительно амплитуды  $a_0$  в отсутствие облучения определяется изменением величины  $\tau_{\text{rec}}$ :

$$\frac{a_\alpha}{a_0} = \frac{\tau_{\text{rec}}}{t_{\text{dr}}} [1 - \exp(-t_{\text{dr}}/\tau_{\text{rec}})]. \quad (3)$$



**Рис. 1.** Спектры амплитуд токового отклика варизонного детектора на излучение  $\alpha$ -частиц при различных дозах предварительного облучения  $\alpha$ -частицами. Источник —  $^{241}\text{Am}$ . Указана длительность облучения в часах.



**Рис. 2.** Время жизни неравновесных носителей  $\tau_{\text{rec}}$  в варизонной структуре в зависимости от дозы облучения  $\alpha$ -частицами. Интенсивность облучения —  $1.04 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  в 1 ч.

На рис. 1 показаны спектры амплитуд собираемого заряда, измеренные при различных дозах облучения  $\alpha$ -частицами. Как видим, резкое падение амплитуды  $a_\alpha$  собираемого заряда наблюдается уже при относительно малых дозах облучения. Большое начальное падение величины собираемого заряда связано также с тем, что при облучении кристалла  $\alpha$ -частицами с узкозонной стороны наибольший заряд возникает в конце трека  $\alpha$ -частицы. При уменьшении времени жизни носители заряда в конце трека первые выпадают из числа собираемых в узкозонной части.

Измерения изменений амплитуды токового отклика при рентгеновском облучении в зависимости от дозы облучения  $\alpha$ -частицами подтвердили уменьшение эффективности сбора заряда в варизонном слое, вызванное уменьшением времени жизни носителей.

Вычисленные из эксперимента изменения времени жизни носителей заряда согласно (3) показаны на рис. 2. Как видим, возникшие в результате бомбардировки  $\alpha$ -частицами дефекты в кристалле  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  резко снижают время жизни неравновесных носителей.

При дозе облучения  $\alpha$ -частицами выше  $n_d = 10^8 \text{ cm}^{-2}$  кристалл даже не может быть использован для исследования спектра  $\alpha$ -частиц. Однако структура  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  продолжает счет всех  $\alpha$ -частиц и после дозы облучения  $\alpha$ -частицами выше  $n_d = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  (см. рис. 1), т. е. структура  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  как счетчик  $\alpha$ -частиц является радиационно стойким прибором.

### 3. Рентгенолюминесценция варизонного слоя

Оптический отклик детектора на рентгеновское излучение, проявляющийся в виде люминесценции через широкозонную часть варизонного слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , определяется конкуренцией между излучательной и безызлучательной рекомбинацией. Облучение  $\alpha$ -частицами увеличивает скорости как излучательной, так и безызлучательной рекомбинации. Детекторы с оптическим откликом могут оказаться более радиационно стойкими.

Для исследования рентгенолюминесценции были выращены пластины варизонного полупроводника  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с размерами  $5 \times 6 \text{ мм}^2$ , толщиной  $90 \text{ мкм}$  с градиентом состава от  $x = 0$  до  $0.2$ .

Люминесценция наблюдалась с широкозонной стороны пластины с помощью CCD-камеры. Люминесценция возбуждалась излучением от рентгеновского источника с Cu-анодом (характерная линия  $8 \text{ кэВ}$ ). Коэффициент поглощения рентгеновских фотонов с такой энергией в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  составляет  $\mu \approx 400 \text{ см}^{-1}$  [7]. Рентгенолюминесценция возбуждалась в слое пластины  $\sim 25\text{--}30 \text{ мкм}$  со стороны облучения рентгеновскими лучами.

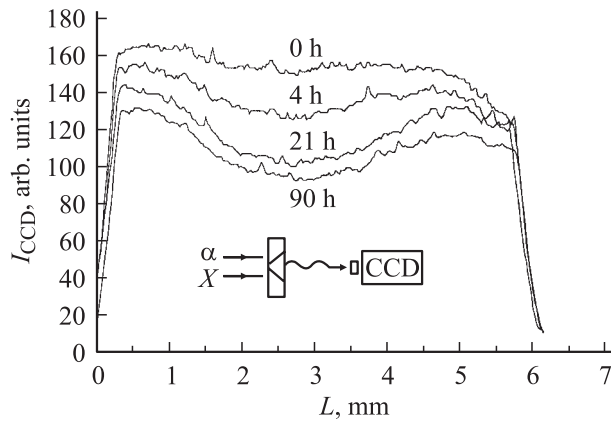
Источник  $\alpha$ -частиц ( $^{241}\text{Am}$ ) с размерами  $1 \times 2 \text{ мм}^2$  помещался вблизи поверхности середины варизонной пластины. Поскольку размеры источника были меньше, чем размеры пластины  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , интенсивность облучения  $\alpha$ -частицами, а тем самым доза получаемой радиации, на краях образца была на 2 порядка меньше, чем в центре пластины, непосредственно под источником.

На рис. 3 показана зависимость интенсивности рентгенолюминесценции  $I_{\text{CCD}}$ , регистрируемая вдоль координаты  $L$ , при возбуждении рентгеновским излучением с узкозонной стороны от дозы облучения  $\alpha$ -частицами с той же стороны.

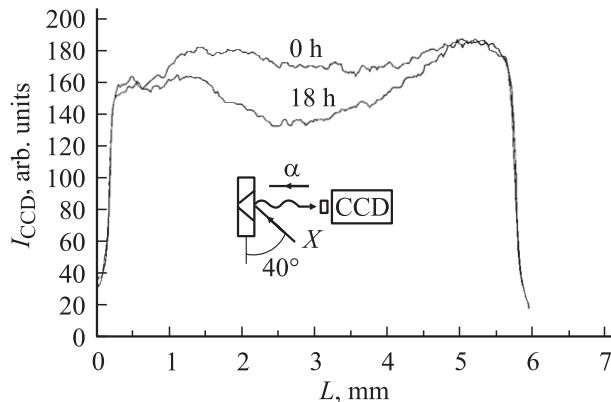
Исследования спектра люминесценции показали, что излучение идет из слоя толщиной  $20\text{--}25 \text{ мкм}$  в узкозонной части кристалла, где поглощаются  $\alpha$ -частицы и рентгеновское излучение.

Рентгенолюминесценция через широкозонное окно, возбуждаемая рентгеновским излучением с широкозонной стороны, проникающим на глубину  $\sim 25 \text{ мкм}$ , не зависит от дозы облучения  $\alpha$ -частицами с узкозонной стороны (рис. 4).  $\alpha$ -Частицы поглощаются на глубине  $20 \text{ мкм}$  и не достигают широкозонной стороны пластины толщиной  $90 \text{ мкм}$ .

Наблюдаемая с помощью CCD-камеры зависимость интенсивности рентгенолюминесценции от координаты  $L$  объясняется координатной зависимостью дозы



**Рис. 3.** Изменение интенсивности рентгенолюминесценции в зависимости от дозы облучения  $\alpha$ -частицами (указана длительность облучения в часах). На вставке — схема измерений: рентгенолюминесценция наблюдается с широкозонной стороны варизонного кристалла с помощью CCD-камеры, но возбуждается рентгеновским излучением с узкозонной стороны кристалла; облучение  $\alpha$ -частицами осуществляется с узкозонной стороны.



**Рис. 4.** Изменение интенсивности рентгенолюминесценции, возбуждаемой с широкозонной стороны варизонного кристалла, в зависимости от дозы облучения  $\alpha$ -частицами с широкозонной стороны (указана длительность облучения в часах). Варизонная структура предварительно облучалась  $\alpha$ -частицами в течение 90 ч с узкозонной стороны. На вставке — схема эксперимента.

облучения  $\alpha$ -частицами. На краях пластины, где доза радиации в десятки раз меньше, чем в центре, интенсивность рентгенолюминесценции практически не зависит от облучения  $\alpha$ -частицами.

В центре пластины интенсивность люминесценции падает с ростом дозы радиации. Однако наблюдаемое падение значительно меньше в сравнении с уменьшением токового отклика (рис. 1). Это обстоятельство мы связываем с тем, что токовый отклик определяется суммарной скоростью излучательной и безызлучательной рекомбинации, а за оптический отклик (за люминесценцию) ответственно отношение  $\tau_r/\tau_{nr}$  — см. уравнение (2).

Сравнение изменения амплитуды токового отклика с изменением амплитуды оптического отклика при облучении  $\alpha$ -частицами в течение 90 ч позволяет оценить, что скорость излучательной рекомбинации увеличилась на порядок. Однако из-за роста скорости безызлучательной рекомбинации интенсивность люминесценции все же уменьшается в 1.5 раза. Это значительно меньше, чем уменьшение токового отклика в 5 раз при облучении  $\alpha$ -частицами в течение 90 ч (рис. 1).

Следовательно, детекторы с оптическим откликом оказываются значительно более радиационно стойкими в сравнении с детекторами с токовым откликом.

## 4. Заключение

Облучение  $\alpha$ -частицами варизонного слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  приводит к увеличению скоростей излучательной и безызлучательной рекомбинации неравновесных носителей, генерируемых в слое ионизирующим излучением (рентгеновским и  $\alpha$ -частицами).

В результате токовый отклик варизонного детектора ионизирующих излучений падает на порядок при дозе облучения более  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Интенсивность оптического отклика (рентгенолюминесценции), несмотря на увеличение скорости излучательной рекомбинации, также падает с ростом дозы облучения вследствие доминирующего роста скорости безызлучательной рекомбинации. При дозе облучения  $10^{10} \text{ см}^{-2}$  интенсивность рентгенолюминесценции падает лишь в 1.5 раза.

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

## Список литературы

- [1] А.С. Волков. ФТП, **15**, 1105 (1981).
- [2] J. Požela, K. Požela, A. Šilėnas, V. Jasutis, L. Dapkus, A. Kindurys, V. Jucienė. ФТП, **36**, 124 (2002). [Semiconductors, **36**, 116 (2002)].
- [3] A. Silėnas, J. Pozela, K.M. Smith, K. Pozela, V. Jasutis, L. Dapkus, V. Juciene. Nucl. Instrum. Meth. A, **487**, 54 (2002).
- [4] В.М. Андреев, В.Н. Блинов, В.А. Носенко, О.Г. Резванов, В.Н. Родионова. ФТП, **8**, 1227 (1974).
- [5] А.С. Волков, Г.В. Царенков. ФТП, **11**, 1709 (1977).
- [6] J. Požela, K. Požela, A. Šilėnas, V. Jasutis, L. Dapkus, V. Jucienė. Nucl. Instrum. Meth. A, **460**, 41 (2001).
- [7] K. Požela, J. Požela, A. Šilėnas, V. Jasutis, L. Dapkus, V. Jucienė. Nucl. Instrum. Meth. A, **460**, 119 (2001).
- [8] K. Pozela, J. Pozela, L. Dapkus, V. Jasutis, A. Silėnas, K.M. Smith, R.A. Bendorius. Nucl. Instrum. Meth. A, **466**, 58 (2001).
- [9] W. Lu, Y.L. Ji, G.B. Chen, N.Y. Tang, X.C. Chen, S.C. Shen, Q.X. Zhao, M. Willander. Appl. Phys. Lett., **83**, 4300 (2003).
- [10] A. Silėnas, K. Pozela, L. Dapkus, V. Jasutis, V. Juciene, J. Pozela, K.M. Smith. Nucl. Instrum. Meth. A, **509**, 30 (2003).

Редактор Л.В. Шаронова

## Behaviour of graded-gap detectors for ionizing radiation under alpha-particle irradiation

*L. Dapkus, K. Požela, J. Požela, A. Šilėnas, V. Jucienė, V. Jasutis*

Semiconductor Physics Institute,  
2600 Vilnius, Lithuania

**Abstract** The effect of alpha-particle irradiation on the current and optical responses of graded-gap  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  detectors for alpha-particle and X-ray radiation is investigated. It is shown that the decrease of both current and optical responses is caused by the growth of the non-radiation recombination rate on increasing the irradiation dose of alpha particles.