

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЕМКОСТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ

Л.Ф. Макаренко<sup>1)</sup>, Н.И. Замятин<sup>2)</sup>, С.Б. Ластовский<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский государственный университет, г. Минск

<sup>2)</sup> Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна,

<sup>3)</sup> Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, г. Минск

Изучено влияние распределения дефектов с глубокими уровнями в виде скоплений на интерпретацию данных релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), полученных для кремниевых структур, облученных нейтронами. Обнаружена зависимость амплитуды пика РСГУ двукратно заряженных дивакансий от температуры его появления. Показано, что наблюдаемый сигнал РСГУ связан с дефектами, находящимися вне кластеров дефектов, а температурная зависимость амплитуды связана с изменением распределения электрического потенциала вокруг кластеров.

### Введение

В настоящее время метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ или DLTS) является основным методом определения параметров (энергетических уровней, сечений захвата носителей заряда) и концентраций электрически активных центров в полупроводниковых барьерных структурах. В случае более или менее равномерного распределения точечных дефектов в объеме исследуемых структур он дает, как правило, достаточно полную информацию об их параметрах, которая может быть использована для последующего прогнозирования влияния дефектов с глубокими уровнями на рабочие характеристики приборов. Однако, в ряде случаев в результате внешних воздействий в полупроводниках возникают скопления точечных дефектов, либо протяженные дефекты. Такая ситуация имеет место, например, при проведении ионной имплантации и последующих технологических обработок в процессе изготовления приборных структур, а также при облучении ядерными частицами высоких энергий (нейтронами, протонами, дейтронами и др.) при эксплуатации приборов в специальных условиях.

В этом случае в кристалле полупроводника возникают локальные области с повышенной концентрацией нарушений структуры (кластеры дефектов) и, как следствие появляются внутренние электрические поля, которые оказывают существенное влияние на электронные и атомные процессы с участием дефектов. В частности, наличие кластеров дефектов изменяет скорость рекомбинации в полупроводниках и полупроводниковых приборах [1, 2].

С ростом температуры обработки кристалла происходит эволюция кластеров, которая сопровождается изменением их дефектного состава, размеров формы. Исследованию эволюции кластеров дефектов в полупроводниках посвящено множество работ, в которых использовались самые разнообразные экспериментальные методики. Однако, как правило, согласованная интерпретация экспериментальных данных о структуре и свойствах кластеров дефектов, полученных различными методами, весьма затруднительна. Это связано, в частности с использованием сильно упрощенных моделей, для описания свойств исследуемых объектов. Поэтому разработка аде-

кватных моделей кластеров дефектов в полупроводниках имеет большое значение. Целью данной работы является разработка модели, позволяющей интерпретировать данные РСГУ в кремниевых диодах, облученных реакторными нейтронами.

### Экспериментальные результаты

В работе использовались тестовые детекторные структуры, изготовленные на основе эпитаксиального кремния с удельным сопротивлением 200 Ом·см (изготовитель – SiS, Эрфурт, Германия). Оба типа диодов имели структуру  $p^+ - n - p^+$  типа. Области сильного легирования ( $p^+$  и  $n^+$ ) располагались по обе стороны пластины и были получены ионной имплантацией. Область  $p^+$  типа, располагающаяся на лицевой стороне пластины, имела размеры  $2.5 \times 2.5 \text{ мм}^2$  и была окружена охранным кольцом.

Структуры облучались нейтронами реактора типа TRIGA (Любляна, Словения). Флюенс нейтронов составлял  $\Phi = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Для исследования кинетики взаимодействия дефектов применяли метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Измерения релаксации емкости проводились на частоте 1 МГц.

На рис. 1 (кривые 1 и 2) показаны спектры РСГУ электронных ловушек, образующихся в облученном нейтронами кремнии n-типа, как сразу после облучения так и после отжига при температуре 200 °С. Для сравнения приведен также спектр РСГУ аналогичного диода, облученного электронами (кривая 3).

Пик E1 возникает в результате ионизации двух дефектов – комплекса кислород-вакансия (V-O) и пары межузельный углерод-углерод в узле (C<sub>i</sub>-C<sub>s</sub>). Оба этих дефекта имеют уровни, близкие к Eс-(0.16-0.17) эВ. Пик E2 связан с эмиссией электрона двукратно отрицательным состоянием дивакансии (V<sup>-</sup>), которое характеризуется уровнем Eс-0.24 эВ. Однократно ионизованное состояние дивакансии имеет уровень вблизи Eс-0.42 эВ и дает вклад в пик E4. Кроме этих дефектов в спектре проявляются другие ловушки, с ионизацией которых связаны пики E3 и частично E4. Особенностью спектров РСГУ кремниевых структур, облученных нейтронами, является уширение пика E4 и малая относительная амплитуда пика E3. Эти особенности проявляются, если сравнивать

спектр структур, облученных нейтронами и электронами (Рис. 1, кривые 1 и 3, соответственно).

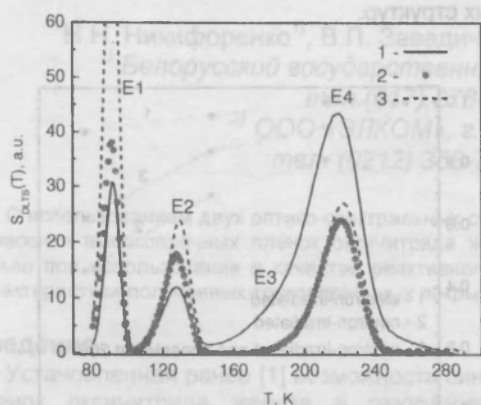


Рис.1. Спектры РСГУ, полученные для детекторных структур, облученных нейтронами (1, 2) и электронами (3). Спектры 1 и 3 получены сразу после облучения, а спектр 2 после дополнительного отжига при 200 °С в течение 30 минут.

Другой особенностью спектров РСГУ является зависимость амплитуды пика E2, соответствующего более мелкому уровню дивакансии, от температуры его регистрации. Эта температура меняется в зависимости от окна скоростей (Рис. 2). Как видно из рисунка амплитуда пика E2 уменьшается с ростом температуры его появления. В работе [3] такое поведение пика связывали с расположением дивакансий внутри кластера дефектов. Однако, в этой работе было обнаружено подобное уменьшение амплитуды другого пика дивакансии – E4, в то время как у нас его амплитуда пика не падает, а даже несколько увеличивается.

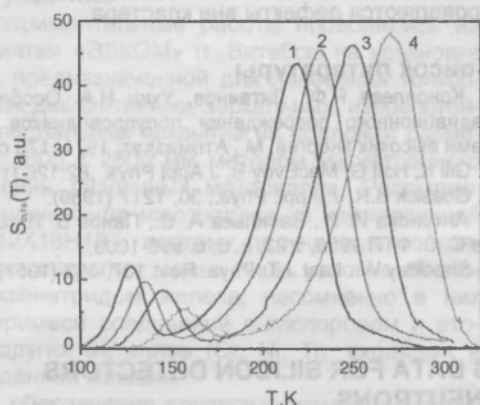


Рис.2. Зависимость амплитуды сигнала РСГУ ( $S$ ) пиков, связанных с дивакансией, от окна скоростей: 1 –  $w_r=95$   $c^{-1}$ , 2 –  $w_r=380$   $c^{-1}$ , 3 –  $w_r=1900$   $c^{-1}$ , 4 –  $w_r=9500$   $c^{-1}$ .

Для проверки связи обнаруженной температурной зависимости пика было проведено исследование поведения пиков дивакансий в структурах, облученных электронами. Оказалось, что амплитуда пика E2 в таких структурах практически не зависит от температуры (Рис. 3).

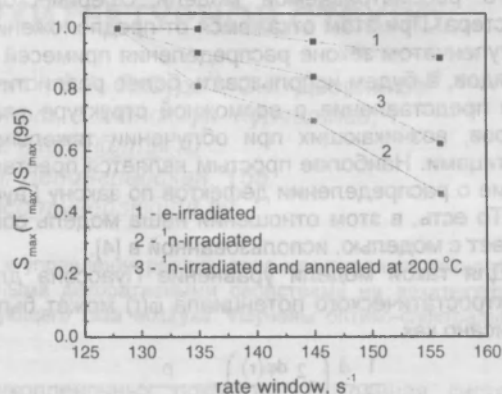


Рис.3. Зависимость амплитуды сигнала РСГУ ( $S$ ) от температуры появления пика E2. 1 – облучение электронами, 2 – облучение нейтронами, 3 – облучение нейтронами и последующий отжиг 200 °С.

На основании этого факта можно сделать вывод, что, действительно, обнаруженная зависимость есть следствие наличия областей скопления дефектов. Но для корректной интерпретации такой зависимости необходимо более детальное изучение возможных причин ее появления.

#### Численное моделирование распределения потенциала вокруг сферического кластера дивакансий

Наиболее часто для анализа влияния кластеров дефектов на электрические свойства облученных полупроводников используется модель Госсика [3]. Эта модель предполагает сферический кластер и ступенчатое распределение зарядов внутри и вокруг кластера. Она сыграла важную роль в понимании физических процессов электронной проводимости и рекомбинации в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Используя модель Госсика, были получены аналитические решения уравнения Пуассона для некоторых важных предельных случаев. В то же время полное рассмотрение даже этой простейшей модели требует решения алгебраических уравнений высоких степеней, что возможно только численно.

В работе [4] для интерпретации данных РСГУ был разработан аналитический подход для функции распределения дефектов в кластере по закону Гаусса. Анализ полученных в этой работе экспериментальных данных позволил определить ряд параметров кластеров, в предположении, что они состоят из дивакансий. Следует, однако, отметить, что с математической точки зрения процедура решения рассматриваемой задачи в некоторых местах выглядит сомнительной. Повидимому, проблема достаточно полного и корректного описания свойств кластеров дефектов может быть решена только численно. В настоящее время имеется весьма развитое математическое обеспечение для решения такого рода задач, поэтому такой подход описания свойств кластеров дефектов может быть реализован достаточно просто.

Рассмотрим его применение для наиболее часто рассматриваемой модели сферического кластера. При этом откажемся от предположения о ступенчатом законе распределения примесей и зарядов, а будем использовать более реалистичные представления о возможной структуре кластеров, возникающих при облучении тяжелыми частицами. Наиболее простым является представление о распределении дефектов по закону Гаусса. То есть, в этом отношении наша модель совпадает с моделью, использованной в [4].

Для такой модели уравнение Пуассона для электростатического потенциала  $\phi(r)$  может быть записано как

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{d\phi(r)}{dr} \right) = -\frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0},$$

где плотность электрического заряда  $\rho(r, \phi)$  есть

$$\rho(r) = e \left( N_d - n(\phi) - N_{VV}(r) \cdot f_{VV} - N_A(r) \cdot f_A \right).$$

Концентрация электронов подчиняется распределению Больцмана

$$n = N_d \exp\left(\frac{e\phi}{kT}\right).$$

Функция заполнения дивакансий  $f_{VV}$  определяется как обычная функция заполнения двухвалентного дефекта [4].

В модели также учитывается возможное образование при облучении другого глубокого акцепторного центра с концентрацией  $N_A$ . Предполагалось, что и дивакансии, и другой глубокий акцептор распределены по заданному закону. Для расчетов использовались граничные условия:

$$\left. \frac{d\phi}{dr} \right|_{r=0} = 0 \text{ и } \phi \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0.$$

Полученная краевая задача решалась методом пристрелки с использованием метода Нумерова.

На рис. 4 показано рассчитанное по рассмотренной модели распределение дивакансий в двукратно отрицательно заряженном состоянии при двух температурах, соответствующих экспериментальным наблюдениям пика РСГУ (Рис.3). Как видно из рисунка, с повышением температуры имеет место уменьшение общего числа дивакансий, доступных обнаружению методом РСГУ, что согласуется с полученными экспериментальными данными. Аналогичная картина была получена и для дивакансии в однократно ионизованном состоянии, что противоречит данным, показанным

на Рис. 2. Из этого можно сделать вывод о несоответствии рассмотренной модели экспериментальным данным, полученным нами для детекторных структур.

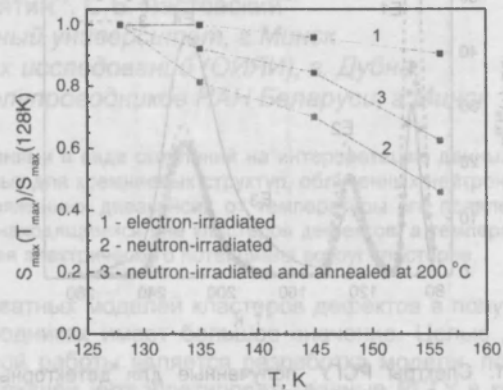


Fig. 4. Рассчитанное распределение дивакансий в двукратно отрицательно заряженном состоянии. Максимальная концентрация дивакансий в центре кластера –  $N_{\max} = 5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Длина Дебая ( $L_D$ ) – 0.6 мкм.

Полученные нами зависимости амплитуд пиков дивакансии возможны только, если предположить, что подавляющая доля регистрируемых центров находится вне кластера.

### Закключение

Таким образом, можно сделать вывод, что численное моделирование является полезным средством адекватной интерпретации РСГУ спектроскопии приборных структур, содержащих кластеры дефектов. Именно использование моделирования позволило нам установить, что в спектрах РСГУ облученных нейтронами детекторов проявляются дефекты вне кластера.

### Список литературы

1. Коноплева Р.Ф., Литвинов, Ухин Н.А. Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий. М., Атомиздат, 1971, 176 с.
2. Gill K, Hall G, MacEvoy B. J Appl Phys., 82:126 (1997)
3. Gossick B.R. J. Appl. Phys., 30, 1217 (1959).
4. Антонова И. В., Васильев А. В., Панов В. И., Шаймев С. С. ФТП 1988, т 23. в. 6, с. 998-1003.
5. Shockley W., Last J.T. Phys. Rev. 107, 392 (1957).

## USE OF SIMULATION TO INTERPRET DLTS DATA FOR SILICON DETECTORS IRRADIATED WITH NEUTRONS

L.F. Makarenko<sup>1</sup>, N.I. Zamyatin<sup>2</sup>, S.B. Lastovski<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>3</sup> Institute of Solid State and Semiconductor Physics, Minsk, Belarus

The influence of deep level defects distributed in clusters on the interpretation of deep level transient spectroscopy (DLTS) data has been investigated for silicon detector structures irradiated with neutrons. Temperature dependence of DLTS peak amplitude has been found for the peak related to doubly negative charged divacancy. It has been shown that this effect is related to electrostatic potential redistribution around defect cluster when crystal temperature is changed.