

УДК 53.082, 538.95

**ТРАНСПОРТ ЭЛЕКТРОНОВ В НАНОСТРУКТУРНОМ ДИОДЕ В МОМЕНТ
ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ**

© 2013 г.

Е.В. Волкова, С.В. Оболенский

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

obolensk@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 26.12.2012

Проведено моделирование процессов формирования кластера радиационных дефектов в диоде с нанометровыми размерами активной области. Исследованы процессы переноса электронов в момент радиационного воздействия и обсуждена информативность гипотетического эксперимента, позволяющего провести анализ пикосекундных процессов стабилизации кластера радиационных дефектов.

Ключевые слова: наноразмерные приборы, радиационное воздействие, динамика формирования кластера дефектов.

Известно, что при воздействии быстрых частиц в результате каскадных смещений атомов происходит ионизация полупроводника и формируются стабильные кластеры радиационных дефектов (КРД) [1–5], которые являются препятствием для движения электронов. Размеры активных областей современных приборов нанoeлектроники составляют несколько десятков нанометров, что сравнимо с размерами кластеров дефектов. В таких условиях радиационная стойкость прибора, фактически, будет определяться вероятностью «попадания» единичного кластера в активную область прибора [3]. Процессы возникновения и стабилизации КРД имеют пикосекундные характерные времена и экспериментально изучены недостаточно, что не позволяет предсказывать поведение наноприборов непосредственно в момент попадания в них быстрой частицы.

В приборах нанoeлектроники времена пролета носителей заряда через активную область прибора составляют величину $\sim 10^{-13}$ с, что меньше характерного времени формирования и/или стабилизации КРД [3]. Это позволяет сделать предположение о том, что измерение зависимости тока наноприборов от времени в момент формирования единичного кластера может позволить анализировать динамику этого процесса. Проблема регистрации указанного процесса состоит в вероятностном характере возникновения КРД и необходимости привлечения измерительного оборудования терагерцового диапазона частот, что обуславливает трудоемкость и высокую стоимость эксперимента, реализуемого на ускорителях и/или импульсных нейтронных реакторах. Цель данной работы – моделирование транспорта электронов в нано-

структурном диоде в момент возникновения КРД и анализ информативности и трудоемкости проведения указанного эксперимента по облучению прибора.

В работе проводилось моделирование динамики формирования кластера дефектов, возникающих при облучении нейтронами спектра деления в структуре современных КВЧ приборов с размерами активных областей ~ 50 нм. Спектр нейтронов пересчитывался в спектр первичных атомов, а далее расчет процесса формирования КРД проводился с использованием известной программы TRIM в модели Кинчина–Пиза [1].

На первом этапе моделирования рассчитывался процесс формирования и стабилизации КРД, определялись координаты старта радиационно-генерированных электронов, генерированных точечных радиационных дефектов и моделировался процесс возникновения области пространственного заряда КРД как целого (рис. 1 и 2).

На втором этапе проводился расчет процесса переноса электронов и определялась зависимость тока наноразмерного диода от времени. Транспорт электронов моделировался методом Монте-Карло с учетом ионизованных электронов и разогрева полупроводниковой структуры. Использовался подход, приведенный в [2, 3]. Зависимости параметров полупроводникового материала от температуры учитывались согласно данным [6], однако следует отметить, что для температур свыше 600°C температурные зависимости параметров, характеризующих баллистический транспорт электронов, изучены слабо.

Образование КРД происходит в течение 10^{-13} – 10^{-12} с и приводит к сильному локальному

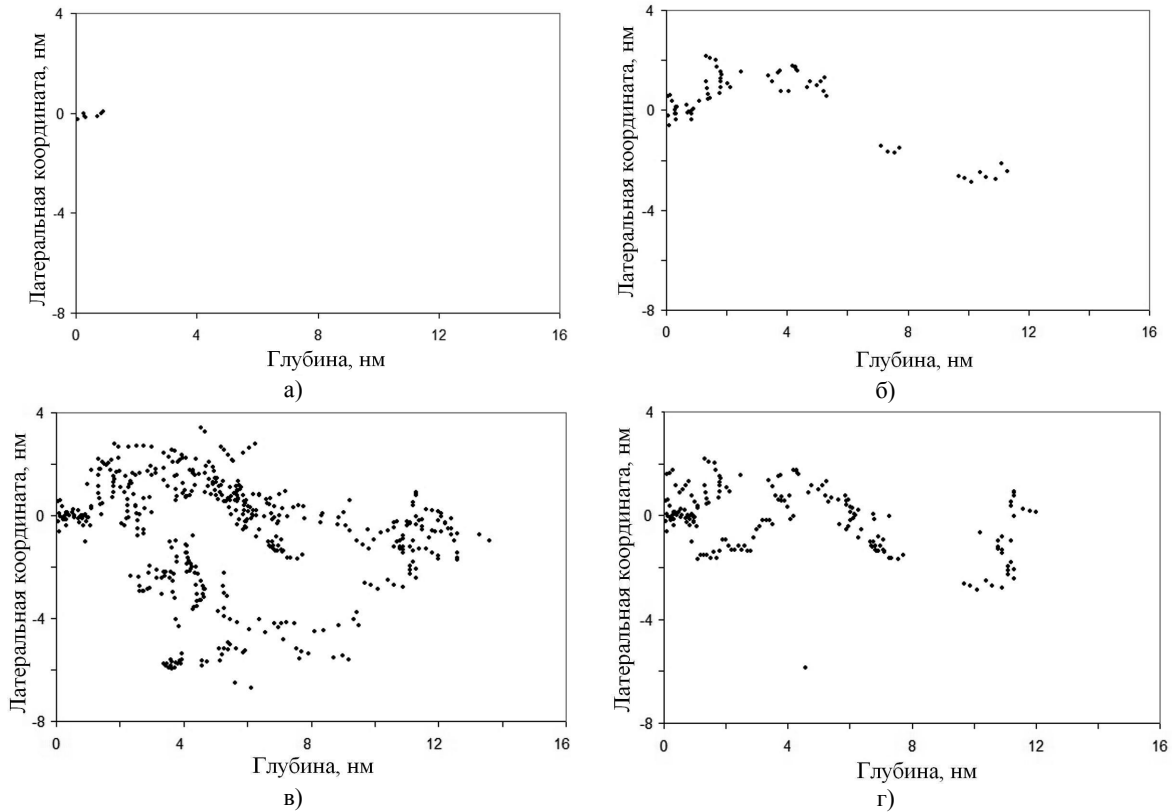


Рис. 1. Динамика формирования каскада столкновений: а) $t=1 \cdot 10^{-14}$ с; б) $t=5 \cdot 10^{-14}$ с; в) $t=1 \cdot 10^{-13}$ с; г) $t=5 \cdot 10^{-13}$ с

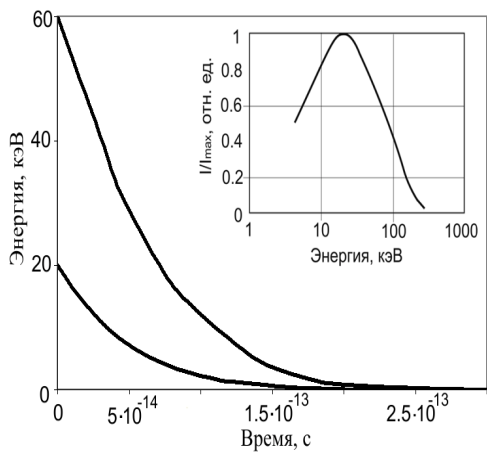


Рис. 2. Расчетная зависимость энергии первичных атомов Ga, возникших при взаимодействии с быстрым нейтроном в GaAs, от времени. Начальная энергия первичного атома соответствует максимуму и среднему значению в спектре распределения первичных атомов Ga от их энергии (спектр изображен на врезке)

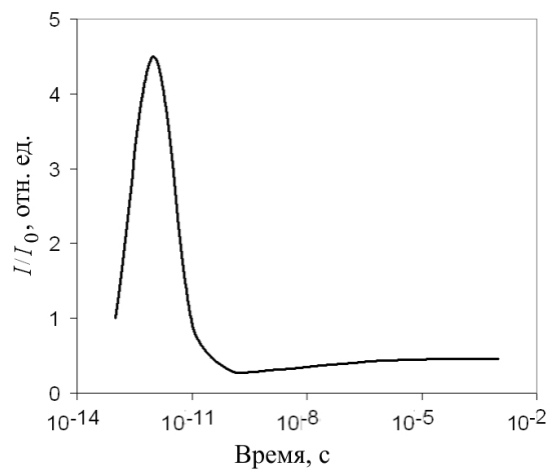


Рис. 3. Расчетная зависимость тока наноприбора от времени в момент формирования кластера радиационных дефектов в активной области прибора. I_0 – ток до облучения

разогреву вещества внутри каскада: температура каскада достигает нескольких тысяч градусов, а давление – десятка тысяч бар [4, 5]. Через $10^{-12} - 10^{-10}$ с после формирования температура и давление внутри каскада падают почти до начальных значений [4], а процесс дальнейшей стабилизации идет за счет диффузии радиационных дефектов.

Характерное время ухода ионизированных электронов из активной области составляет

$10^{-12} - 10^{-11}$ с, что обуславливает частичное временное разделение тока ионизации и тока прибора, определяемого рассеянием на точечных радиационных дефектах и области пространственного заряда (ОПЗ) КРД в целом. В работе предполагалось, что формирование ОПЗ КРД происходит за время $\sim 10^{-11} - 10^{-10}$ с [5]; при этом показано, что ток диода спадает до минимума, а затем, в течение $\sim 10^{-6} - 10^{-3}$ с, увеличивается по мере отжига первичных точечных радиацион-

ных дефектов (рис. 3). Дальнейшая стабилизация тока за счет процессов медленной релаксации радиационных дефектов в диапазоне минут и часов в работе не рассматривалась.

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что анализ зависимостей тока диода от времени в момент формирования КРД позволит уточнить характерные временные константы процессов стабилизации КРД и исследовать особенности процессов диффузии радиационных дефектов и формирования стабильной области пространственного заряда кластера. Таким образом, проведение предполагаемого эксперимента обосновано и позволит существенно продвинуться в понимании фемто- и пикосекундной физики процессов взаимодействия излучения с веществом.

Работа поддержана грантом ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Список литературы

1. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969. 311 с.
2. Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Ломако В.М. Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия. Минск: Университетское, 1992. 219 с.
3. Оболенский С.В. Моделирование структуры кластера радиационных дефектов в полупроводниках при нейтронном облучении // Изв. вузов: Электроника. 2002. № 6. С. 31–38.
4. Коноплева Р.Ф., Остроумов В.Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. М.: Атомиздат, 1975. 128 с.
5. Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. Радиационная физика полупроводников. Киев: Наукова думка, 1979. 332 с.
6. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.

ELECTRON TRANSPORT IN A NANOSTRUCTURED DIODE AT RADIATION-INDUCED DEFECT CLUSTER FORMATION

E.V. Volkova, S.V. Obolensky

The simulation of radiation defect cluster formation processes in a diode with a nano-sized active region has been carried out. The electron transport processes at the moment of radiation exposure have been studied. The information content of a hypothetical experiment to analyze picosecond processes of radiation defect cluster stabilization is discussed.

Keywords: nanoscale devices, radiation exposure, dynamics of defect cluster formation.