

УДК 621.315.592

## Особенности изменения электрических параметров кремниевых $p^+-n-n^+$ -структур, облученных электронами

*А.М. Мусаев*

*Исследовано влияние электронного облучения с энергией электронов 4 МэВ на изменение основных электрофизических характеристик диффузионных кремниевых  $p^+-n-n^+$ -структур. Показано, что в зависимости от дозы облучения существенно изменяются эффективность введения и характер распределения радиационных дефектов в различных областях структур. Приведено физическое обоснование наблюдаемых эффектов.*

PACS: 61.82.Fk

*Ключевые слова:*  $p-n$ -структура, кремний, электронное облучение, радиационные дефекты, прямое напряжение, обратный ток, барьерная емкость, температура.

### Введение

Как известно, электронное облучение приводит к образованию в кристалле кремния всего набора рекомбинационных центров (РЦ). Эффективность образования РЦ в кремнии зависит от содержания в кристалле не только легирующих, но и фоновых примесей, в первую очередь, кислорода, который входит в состав радиационных дефектов как вакансионных, так и межузельных:  $(C_i - C_s)$  – межузельный углерод – узловой углерод и  $(C_x - O_y)$  типов, где  $(x, y = 1, 2, 3)$  – межузельный углерод – межузельный кислород. Основными РЦ в  $n$ -Si, которые оказывают влияние на вышеприведенные характеристики  $p-n$ -структур являются акцепторные уровни: А-центр ( $E_c - 0,18$  эВ), а также дивакансия, которой соответствуют три энергетических уровня в запрещенной зоне кремния [1].

Существенным фактором, определяющий эффективность введения глубоких РЦ в запрещенной зоне кремния, являются концентрация и зарядовое состояние вступающих в квазихимическую реакцию первичных радиационных дефектов [2, 3]. Зарядовое состояние компонентов первичных радиационных дефектов зависит от условий радиационного облучения.

В данной работе исследовано влияние величины интегрального потока электронов на изме-

нение основных электрофизических параметров диффузионных кремниевых  $p-n$ -структур с учетом зарядового состояния первичных радиационных дефектов в области пространственного заряда структур.

### Постановка эксперимента

Исследования проводились на диффузионных  $p^+-n-n^+$ -структурах, изготовленных на базе  $n$ -Si<P> с удельным сопротивлением  $\rho = 40$  Ом/см. Структуры изготавливались по диффузионной технологии с применением в качестве диффузанта бора и фосфора. Глубина залегания  $p-n$ -перехода составляла  $\sim 125$  мкм, толщина структуры  $\sim 250$  мкм, площадь –  $1,4 \times 1,4$  мм<sup>2</sup>. Отбор образцов для исследований производился по одинаковым характеристикам  $p-n$ -структур.

Облучение проводилось на линейном импульсном ускорителе электронов при температурах образцов 20 °С и 250 °С. Энергия облучающих электронов составляла 4 МэВ. Интегральный поток (флюенс) электронов варьировался от  $D = 0,8 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> до  $D = 1,3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. После облучения структуры подвергались изотермическому отжигу при 300 °С в течение получаса, а потом при 200 °С в течение 10 часов. Измерение параметров  $p-n$ -структур проводилось до и после облучения.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости  $U_1/U_0(D)$  изменения относительного падения прямого напряжения на  $p-n$ -структурах при различных значениях прямых токов в зависимости от интегрального потока электронов. Здесь  $U_0$  и  $U_1$  величины прямого напряжения на структурах до и после облучения, соответственно.

Мусаев Ахмед Магомедович, вед. научн. сотр.

Институт физики им. Х.И. Амирханова, Дагестанский НЦ РАН.

Россия, 367003, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94.

Е-mail: [akhmed-musaev@yandex.ru](mailto:akhmed-musaev@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 15 января 2013 г.

© Мусаев А.М., 2013

Облучение в диапазоне интегрального потока электронов  $0,5 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2} - 1,3 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$  при  $20^\circ \text{C}$  приводит к уменьшению прямого падения напряжения. Возможными причинами данного эффекта являются расширение области пространственного заряда (ОПЗ) в процессе облучения и неоднородный профиль времени жизни неравновесных носителей заряда части базовой области структур, прилегающей к ОПЗ, которые могут привести к уменьшению напряженности тормозящего электрического поля структуры. Кроме того, к уменьшению прямого падения напряжения при небольших дозах облучения может привести и увеличение подвижности электронов в базовой области структуры. В работах [4, 5] рассмотрены различные модели немонотонной зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках от концентрации рекомбинационных центров. Наиболее близкая модель рассмотрена в работе [6], где показано, что увеличение подвижности носителей в *n*-Si с ростом концентрации рассеивающих центров связано с введением определенной концентрации радиационных акцепторных центров «нейтрализации», генерируемых вблизи положительно заряженных ионных центров фосфора, которые частично нейтрализуют ионизированные примесные атомы, и, тем самым, приводят к снижению эффективности рассеяния и повышению подвижности.

Исследовались также в зависимости от *D* изменения относительного значения обратного тока  $I_1/I_0$ , где  $I_0$  и  $I_1$  – величины обратного тока до и после облучения, соответственно. Эти измерения прово-

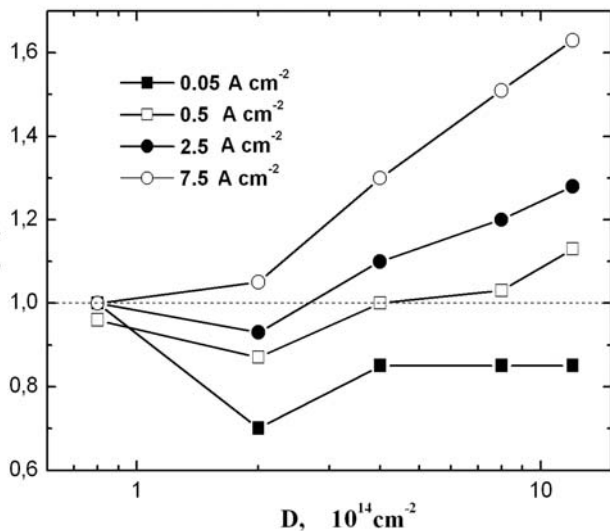


Рис. 1 Зависимость изменения относительного падения прямого напряжения  $UI/U_0$  на *p*-*n*-структурах (при значениях плотности прямых токов  $JF = 0,05; 0,5; 2,5; 7,5 \text{ A/cm}^2$ ) в зависимости от интегрального потока электронов *D*.

дились при приложенных обратных напряжениях, равных  $U_{\text{обр.}} = 10, 50, 100, 200 \text{ В}$ . Результаты этих экспериментов отражены на рис. 2.

Для необлученных кремниевых *p*-*n*-структур характерным является преобладание тока термогенерации над остальными компонентами обратного тока. Электронное облучение структур приводит к неоднозначному изменению обратного тока, что обусловлено увеличением или уменьшением скорости генерации носителя, в основном, в области пространственного заряда, определяемого концентрацией глубоких уровней.

Возможной причиной уменьшения обратных токов при определенных дозах облучения является то, что при данных дозах облучения диффузионные потоки создаваемых облучением вакансий и междоузельных атомов направлены к дефектам кристаллической решетки. Дефекты, создающие вокруг себя напряжения сжатия, служат стоками для вакансий (геттеры), а напряжения растяжения – стоками для междоузельных атомов кремния [7]. Кроме того, при определенных дозах облучения возможно образование комплексов  $PV_2^-$  вследствие перехода *E*-центров с отрицательным зарядом в нейтральное зарядовое состояние. Указанные процессы приводят к нейтрализации электрически активных примесей, в результате чего обратные токи структур уменьшаются.

На рис. 3 приведены зависимости изменений относительных величин барьерных емкостей структур  $C_1/C_0$  от интегрального потока электронов *D* при различных приложенных обратных напряжениях, а именно,  $U_{\text{обр.}} = 0; 1; 5; 50 \text{ В}$ .

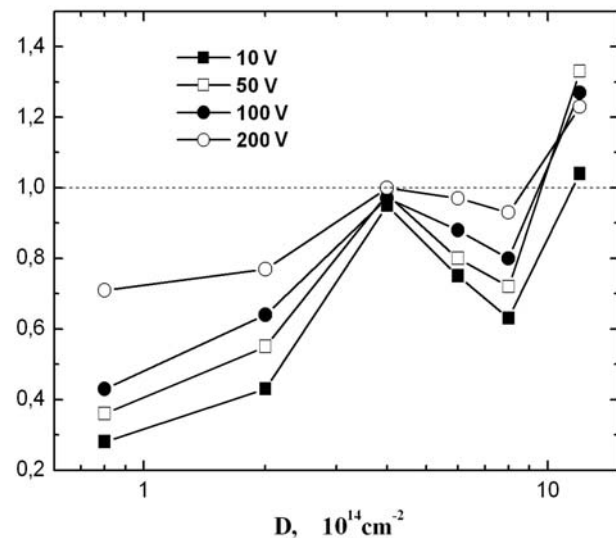


Рис. 2 Зависимость изменения относительного значения обратного тока  $I_1/I_0$  от флюенса *D* при различных обратных напряжениях  $U_{\text{обр.}}$ .

Поведение барьерной емкости  $p$ - $n$ -перехода во многом определяется параметрами глубоких уровней в базовой области структуры [8]. Уменьшение барьерных емкостей при введении РД связано с проявлением компенсации мелких доноров глубокими акцепторами. Как видно из результатов измерений, зависимости  $C_1/C_0(D)$  имеют неоднозначный характер. При 20 °С сечение захвата вакансии атомом фосфора в  $n$ -Si вследствие кулоновского притяжения, примерно, в 20 раз больше сечения ее захвата электрически неактивным межузельным кислородом [2]. Поэтому в  $n$ -Si при 20 °С скорость образования  $E$ -центров превышает скорость образования  $A$ -центров. Данное обстоятельство приводит к существенному расширению ОПЗ, которая и определяется, в основном, образованием акцепторных  $A$ - и  $E$ -центров. Расширение ОПЗ в процессе облучения приводит к ограничению дальнейшего накопления РЦ в ОПЗ. Это связано с тем, что генерация пар Френкеля при облучении происходит в слое ОПЗ, где свободные электроны отсутствуют. Поэтому данные первичные вакансии, в основном, остаются электрически нейтральными и не участвуют в образовании вторичных радиационных дефектов. После удаления  $E$ -центров посредством отжига структур в базовой области структуры, прилегающей к ОПЗ, остается небольшая концентрация  $A$ -центров. При больших интегральных дозах облучения, когда все примесные атомы оказываются связанными в комплексы, доминирующим дефектом может оказаться образование дивакансии  $V_2$ .

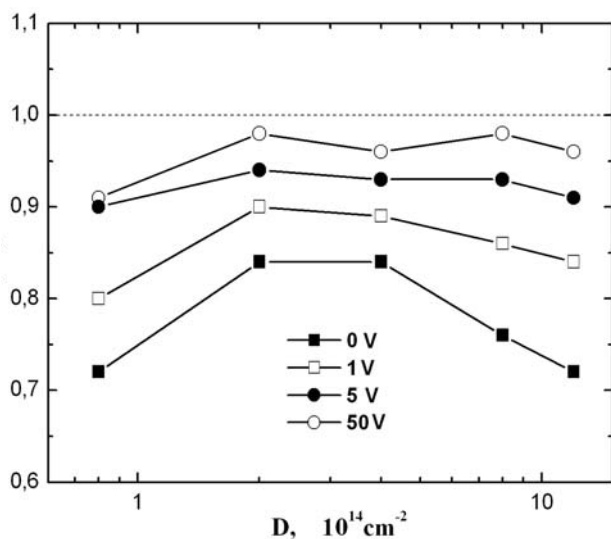


Рис. 3 Зависимость изменения относительного значения барьерных емкостей  $C_1/C_0$  от флюенса  $D$  для различных обратных напряжений. Здесь  $C_0$  и  $C_1$  – величины барьерных емкостей до и после облучения, соответственно.

Анализ зависимостей в виде  $(S/C)^2$  и  $(S/C)^3$  от приложенного обратного напряжения для структур, облученных при больших значениях  $D$ , показывает, что они имеют нелинейный характер. Это может быть связано с присутствием в области пространственного заряда несколько типов РЦ с различными концентрациями, а также с распределением их в базовой области структур с некоторым градиентом.

Исходя из вышеприведенного, можно предположить, что уменьшение значения  $C_1/C_0$  при больших дозах облучения (когда  $D > 8,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) связано с образованием акцепторных комплексов дивакансий  $V_2$ , которые стабильны до температур 400–500 °С [9].

### Заключение

Эксперименты показывают, что электрофизические характеристики кремниевых  $p^+n$ -структур сложным образом зависят от дозы электронного облучения, которые определяются, в основном, характером распределения концентраций РЦ в различных областях структур. Существенное влияние в образовании РЦ и комплексов радиационных дефектов в структурах имеет зарядовое состояние дефектов и примесей. При высокотемпературном облучении в данном диапазоне доз уменьшение падения прямого напряжения и уменьшение обратных токов структур не наблюдаются, что, возможно, связано со снижением при высокой температуре влияния зарядового состояния дефектов и примесей в образовании устойчивых РЦ.

### Литература

1. Коришунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. –Мн.: Наука и техника, 1978.
2. Козлов В.А., Козловский В.В. // ФТП. 2001. Т. 35. № 7. С. 769
3. Пагава Т.А. // ФТП. 2005. Т. 39. № 4. С. 424
4. Литвиненко А.Г., Мурын Л.И., Ткачев В.Д. // ФТП. 1977. Т. 11. № 8. С. 1586
5. Другова А.А., Холоднов В.А. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. № 1. С. 23.
6. Видалго Е.Н., Гайдар Г.П., Гирий В.А. // Неорганические материалы. 1986. Т. 22. № 4. С. 533
7. Казакевич Л.А., Луганов П.Ф., Ткачев В.Д. // ФТП. 1980. Т. 14. № 1. С. 128
8. Берман Л.С., Лебедев А.А. // Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. –Л.: Наука, 1981
9. Пагава Т.А. // ФТП. 2006. Т. 40. № 8. С. 919

## Peculiarities of changes in electrical properties of the silicon $p^+-n-n^+$ -structures irradiated with electrons

*A.M. Musaev*

Kh.I. Amirkhanov Institute of Physics,  
Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.  
94 Yaragsky str., Makhachkala, 367003, Russia  
E-mail: akhmed-musaev@yandex.ru

*The effect of electron irradiation with energy 4 MeV on change of the basic electrical characteristics of the silicon diffused  $p^+-n-n^+$ -structures is researched. It is shown that the efficiency of injection and distribution of radiation defects in different regions of the structures significantly depend on an irradiation dose. We give a physical explanation for the observed effects.*

*PACS:* 61.82.Fk

*Keywords:* p-n-structures, silicon, electron irradiation, radiation defect, direct voltage drop, inverse current, barrier capacitance, temperature

Bibliography — 9 references.

*Received January 15, 2013*