

ВЛИЯНИЕ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПРОФИЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЫРОК В p -БАЗЕ КРЕМНИЕВЫХ n^+ - p -СТРУКТУР, ОБЛУЧЕННЫХ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

Д. Н. Жданович¹, С. Б. Ластовский¹, Л. Ф. Макаренко², В. П. Маркевич³,
И. Ф. Медведева⁴, Д. А. Огородников¹

¹⁾ Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: zhdanovich_d@iftp.bas-net.by

²⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: Makarenko@bsu.by

³⁾ Университет г. Манчестер, M13 9PL Манчестер, Англия, e-mail: V.Markevich@manchester.ac.uk

⁴⁾ Белорусский государственный медицинский университет, пр. Дзержинского, 83, 220116 Минск, Беларусь, e-mail: medvedeva@iftp.bas-net.by

Изучена кинетика инжекционного отжига собственных междоузельных атомов кремния в двукратно положительном зарядовом состоянии в p -области кремниевых n^+ - p -структур, облученных альфа-частицами. Показано, что зависимости концентрации дефектов от прошедшего через n^+ - p -структуру электрического заряда Q имеют нелинейный характер.

Ключевые слова: кремний; альфа-частица; глубокий уровень; радиационно-индуцированный центр; инжекция.

EFFECT OF ELECTRON INJECTION ON THE HOLE DISTRIBUTION PROFILE IN THE p -BASE OF SILICON n^+ - p -STRUCTURES IRRADIATED WITH ALPHA PARTICLES

D. N. Jdanovich¹, S. B. Lastovskii¹, L. F. Makarenko², V. P. Markevich³,
I. F. Medvedeva⁴, D. A. Aharodnikau¹

¹⁾ Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus, 220072 Minsk, Belarus

²⁾ Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

³⁾ The University of Manchester, Manchester M13 9PL, United Kingdom

⁴⁾ Belarusian State Medical University, Dzerzhinsky av. 83, Minsk, Belarus

Corresponding author: D. N. Jdanovich (zhdanovich_d@physics.by)

The kinetics of injection annealing of intrinsic interstitial silicon atoms in a doubly positive charge state in the p -region of silicon n^+ - p -structures irradiated with alpha particles was studied. It was shown that the dependences of the defect concentration on the electric charge Q passed through the n^+ - p -structure are nonlinear.

Key words: silicon; alpha particle; deep level; radiation-induced center; injection.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] исследовалась эффективность введения радиационно-индуцированных центров (РИЦ) при облучении альфа-частицами кремниевых n^+ - p -структур, находящихся под обратным смещением и без смещения. Наблюдалось уменьшение эффективности введения РИЦ в область пространственного заряда (ОПЗ) по сравнению с нейтральной p -областью. Примечательно, что после облучения инжекция неосновных носителей заряда в базу n^+ - p -структур приводила к выравниванию профилей распределения дырок в ОПЗ и остальной части базы [1, 3]. Установить природу инжекционно зависимого дефекта в [1–2] не удалось. Авторы предположили, что этот дефект с энергетическим уровнем $E_c - 0,14$ эВ может быть двойным или расщепленным междоузлем кремния, либо комплексом междоузельный кремний – междоузельный углерод. Авторы работы [3] сопоставили результаты DLTS-спектроскопии облученных образцов с известными литературными данными [4–10] и заключили следующее. Различие в скорости удаления дырок в ОПЗ и нейтральной части p -базы в процессе облучения связано с особыми свойствами собственных междоузельных атомов кремния I_{Si} . К таким свойствам относятся достаточно высокая термическая стабильность I_{Si} в двукратно положительном зарядовом состоянии в p -Si и высокая подвижность в других зарядовых состояниях. Так, в работах [4, 5] утверждается, что I_{Si}^{+2} являются одним из доминирующих электрически активных дефектов, вводимых облучением альфа-частицами и протонами при температурах ниже 300 К в кристаллы p -Si. При равновесных условиях I_{Si}^{+2} может существовать в p -Si в течение довольно длительного времени при комнатной температуре. Энергия активации отжига дефекта оценивается в 1,1–1,3 эВ [6]. Примечательной особенностью является чрезвычайно сильная чувствительность I_{Si}^{+2} к инжекции неосновных носителей заряда [4, 5]. При инжекции электронов дефекты исчезали даже при криогенных (4 К) температурах [7, 8]. Было высказано предположение, что ин-

жекция неосновных носителей может приводить к появлению некоторых атермических механизмов диффузии I_{Si} [8–10].

В работах [1–3] исследовалась инжекционная зависимость I_{Si}^{+2} при пропускании через n^+p -структуры постоянного прямого тока. Представляет интерес возможность исследования кинетики инжекционного отжига I_{Si}^{+2} при импульсном характере тока путем контроля профиля распределения дырок в p -базе облученных альфа-частицами кремниевых n^+p -структур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовались диодные n^+p -структуры, изготовленные на пластинах кремния с эпитаксиальным слоем, легированным бором ($\rho \sim 18 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) толщиной 33 мкм (подложка КДБ-0,005). P - n -переход формировался имплантацией фосфора в p -базу с последующим отжигом при 1420 К в атмосфере азота и кислорода. Глубина залегания p - n -перехода составляла 10–12 мкм, площадь – $6,25 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. В качестве омических контактов напылялся алюминий толщиной 4,5 мкм. Концентрация кислорода в эпитаксиальных слоях определялась по скорости трансформации дивакансии в дефект дивакансия – кислород (V_2O) [11]. Концентрация кислорода была близка к $2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ во всех образцах эпитаксиального кремния. Концентрация углерода была ниже предела обнаружения $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Готовые диодные n^+p -структуры имели в области комнатных температур обратные токи не более 10^{-9} А при $U_{обр} = 100 \text{ В}$, прямое падение напряжения $U_{пр0} = 0,80 \text{ В}$ при прямом токе $I_{пр} = 150 \text{ мА}$ и время жизни ННЗ в базовой p -области $t_0 = 2,6\text{--}2,8 \text{ мкс}$.

Облучение образцов осуществлялось альфа-частицами с энергией $\sim 5 \text{ МэВ}$ в течение 950 мин. при температуре 290–294 К. Поверхностная активность источника составляла $2 \cdot 10^7 \text{ Бк/см}^2$. Распределение концентрации РИЦ в p -Si, создаваемых при облучении таким поверхностным источником, приводится в работе [12].

Инжекционный отжиг облученных n^+p -структур проводился импульсами прямого тока прямоугольной формы с амплитудой 0,6 А на автоматизированной установке измерения времени жизни неосновных носителей заряда. Для эффективного рассасывания инжектированных в p -базу электронов после выключения импульсов образец находился под постоянным обратным смещением –6 В. Длительность импульсов составляла 20 мкс, а интервал времени между ними – 6,3 мс. Количество импульсов задавалось встроенным генератором тока.

В работе определялось распределение концентрации носителей заряда $p(x)$ в базовых областях диодных n^+p -структур до, после облучения и инжекции неосновных носителей заряда из анализа вольтфарадных характеристик. Метод основан на определении зависимости емкости барьера Шоттки или резко асимметричного p - n -перехода от обратного напряжения смещения $U_{см}$. Барьерная емкость измерялась при $T = 290 \text{ К}$ на частоте 1 МГц с помощью измерителя LCR E7-12.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны профили концентрации подвижных носителей заряда $p(d)$ в базовой p -области диодных n^+p -структур до и после облучения альфа-частицами в течение 950 мин. при 290 К, а также после пропускания прямого тока $I_{пр} = 0,6 \text{ А}$ в течение 1 мин. при 290 К. Вводимые облучением РИЦ компенсируют основную легирующую примесь, то есть уменьшают концентрацию основных носителей заряда.

Наиболее сильные изменения концентрации дырок наблюдаются вблизи границы p - n -перехода при $d = 2$ –6 мкм. По мере удаления от p - n -перехода изменения значения p выражены слабее. Так, при $d = 3$ мкм концентрация дырок уменьшилась в 5,7 раза, а при $d = 8$ мкм – 1,7. Данный факт свидетельствует о том, что глубина проникновения альфа-частиц в p -область порядка 10–12 мкм. В самом деле, для кремния пробег α -частиц с $E = 5$ МэВ составляет порядка 25 мкм [12]. Учитывая толщины слоев омического контакта и n^+ -области облучаемых n^+ - p -структур, глубина проникновения α -частиц в p -область должна составлять порядка 10–12 мкм.

Результаты, представленные на рис. 1, согласуются с полученными ранее данными по облучению альфа-частицами таких же образцов в пассивном электрическом режиме (без обратного смещения) [3]. После пропускания прямого тока концентрация дырок частично восстанавливается. Так, при $d = 3$ мкм восстановленная доля концентрации дырок составила $(p_I - p_\Phi)/(p_0 - p_\Phi) = 0,4$, а при $d = 7$ мкм – 0,49. Здесь p_0 – концентрация дырок на глубине d от границы n^+ - p -перехода до облучения, p_Φ – после облучения и p_I – после пропускания тока. Дальнейшая инжекция неосновных носителей заряда в p -базу, а также дополнительный термический отжиг образцов при 373 К в течение 30 мин. не приводят к изменениям зависимости $p(d)$.

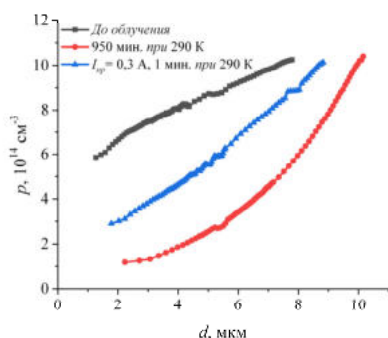


Рис. 1. Профили концентрации подвижных носителей заряда в базовой p -области n^+ - p -структур до и после облучения альфа-частицами в течение 950 мин при 290 К, а также после пропускания прямого тока $I_{пр} = 0,6$ А в течение 1 мин при 290 К

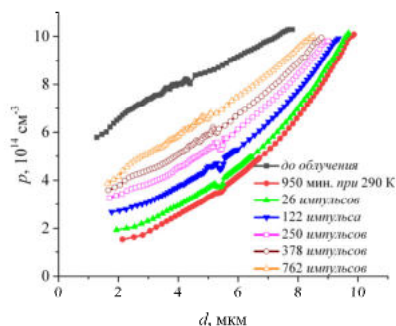


Рис. 2. Профили концентрации подвижных носителей заряда в базовой p -области n^+ - p -структур до и после облучения альфа-частицами в течение 950 мин при 290 К и после пропускания импульсов прямого тока амплитудой 0,6 А длительностью 20 мкс при 290 К

На рис. 2 представлены профили концентрации подвижных носителей заряда $p(d)$ в базовой p -области n^+ - p -структур до и после облучения альфа-частицами в течение 950 мин. при 290 К и после пропускания импульсов прямого тока амплитудой 0,6 А длительностью 20 мкс при 290 К. Суммарное количество импульсов для каждой зависимости $p(d)$ приведено на графике. В целом вид полученных зависимостей до и после облучения соответствует таковому на рис. 1. Здесь также наблюдается уменьшение концентрации дырок после облучения и частичное восстановление после инжекции неосновных носителей заряда.

Для заметного восстановления значений p импульсным током требуется подать на облученную n^+ - p -структуру десятки импульсов, а для полного отжига основного ком-

пенсирующего РИЦ I_{Si}^{+2} – свыше 600 импульсов (рис. 2). Большее количество импульсов (> 600 шт.) практически не влияет на зависимость $p(d)$. Для каждого значения d можно найти разницу $p_I - p_\Phi$. Один дефект I_{Si}^{+2} удаляет из валентной зоны две свободные дырки. С учётом этого, из анализа зависимостей $0,5(p_I - p_\Phi)$ от d можно определить распределение концентрации дефектов N_I по глубине p -области и изменения $N_I(d)$ с возрастанием числа инжекционных импульсов (рис. 3).

В течение одного импульса через n^+p -переход протекает электрический заряд, равный $1,2 \cdot 10^{-5}$ Кл. Зная количество импульсов можно получить зависимости концентрации собственных междоузельных атомов от величины электрического заряда Q , прошедшего через образец (рис. 4). Зависимости N_I от Q имеют нелинейный характер. Кривые $N_I(Q)$ при $d = 3-7$ мкм практически совпадают друг с другом.

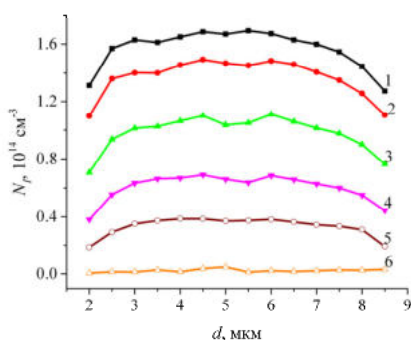


Рис. 3. Зависимости N_I от d после разного количества импульсов: 1 – 0; 2 – 26; 3 – 122; 4 – 250; 5 – 378; 6 – 634

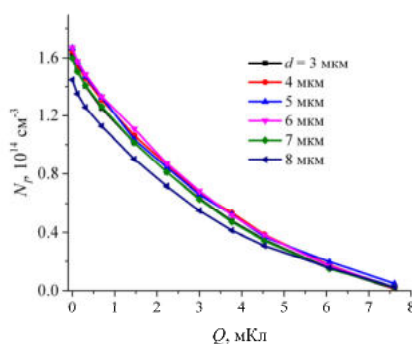


Рис. 4. Зависимости N_I от количества инжектированных электронов n при разных значениях d

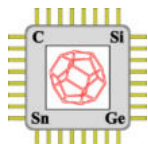
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено облучение альфа-частицами с энергией 5 МэВ в течение 950 мин. при 290 К n^+p -структур, изготовленных на эпитаксиальном p -Si с $\rho \sim 18$ Ом·см. После облучения через n^+p -структуры пропускались импульсы прямого тока прямоугольной формы длительностью 20 мкс и амплитудой 0,6 А. Методом вольтфарадных характеристик получены профили концентрации дырок $p(d)$ в p -области после разного количества прошедших импульсов. Из зависимостей $p(d)$ рассчитаны профили распределения концентрации $N_I(d)$ инжекционно-зависимых РИЦ, которыми предположительно являются собственные междоузельные атомы кремния в двукратно положительном зарядовом состоянии. Получены зависимости N_I от величины прошедшего через n^+p -структуру электрического заряда Q . Показано, что зависимости $N_I(Q)$ имеют нелинейный характер и при $d = 3-7$ мкм практически совпадают друг с другом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Кучинский, П.В. Влияние сильного электрического поля на скорость введения и пространственное распределение радиационных дефектов в кремнии / П.В. Кучинский, В.М. Ломако, А.П. Петрунин // Письма ЖТФ. – 1985. – Т. 11, № 5. – С. 309–311.
2. Кучинский, П.В. Инжекционная, электрополевая и термическая перестройка радиационных дефектов в р-кремнии / П.В. Кучинский, В.М. Ломако, А.П. Петрунин // ФТП. – 1989. – Т. 23, № 9. – С. 1625–1628.
3. Aharodnikau, D.A. The role of Si self-interstitial atoms in the formation of electrically active defects in reverse-biased silicon n+-p diodes upon irradiation with alpha particles / D.A. Aharodnikau [et al.] // Physica Status Solidi A. – 2021. – Vol. 218. – 2100104 (1 of 7).
4. Mukashev B.N., Self-interstitials in irradiated silicon / B.N. Mukashev, Kh.A. Abdullin, Y.V. Gorelkinskii // Mater. Sci. Forum. – 1997. – Vol. 258–263. – P.541–546.
5. Abdullin, Kh.A. New defect states in irradiated p-type silicon / Kh.A. Abdullin [et al.] // Phys. Lett. A. – 1990. – Vol. 144, № 3. – P. 198–200.
6. Makarenko, L.F. Kinetics of self-interstitials reactions in p-type silicon irradiated with alpha particles / L.F. Makarenko [et al.] // Phys. B. – 2012. – Vol. 407, № 15. – P. 3016–319.
7. Watkins G.D. A review of ESR studies in irradiated silicon / G.D. Watkins // Radiation Damage in Semiconductors, (ed. by P. Baruch) Dunod, Paris, – 1964). P. 97–114.
8. Watkins, G.D. Metastable defects in silicon: hints for DX and EL2? / G.D. Watkins // Semicond. Sci. Technol. – 1991. – Vol. 6, № 10B. – P. B111–B120
9. Jones, R. The self-interstitial in silicon and germanium / R. Jones [et al.] // Mater. Sci. and Eng. B – 2009. – Vol. 159-160. – P. 112–116.
10. Myers, S.M. Model of defect reactions and the influence of clustering in pulse-neutron-irradiated Si / S.M. Myers, P.J. Cooper, W.R. Wampler // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 104, № 4. – P. 044507.
11. Markevich, V.P. Donor levels of the divacancy-oxygen defect in silicon / V.P. Markevich [et al.] // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – P. 012004 (1 of 6).
12. Makarenko, L.F. Reactions of interstitial carbon with impurities in silicon particle detectors / L.F. Makarenko [et al.] // J. Appl. Phys. – 2007. – Vol. 101. – P. 113537 (1 of 6).

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ



ВУЗОВСКАЯ НАУКА, ПРОМЫШЛЕННОСТЬ,
МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Материалы
XI Международной научной конференции

Минск, 16–18 октября 2024 г.

Научное электронное издание

Минск, БГУ, 2025

ISBN 978-985-881-739-8

© БГУ, 2025