

ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИЕВЫХ ДИОДАХ, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ВИСМУТА С ЭНЕРГИЕЙ 700 МЭВ

Н. А. Поклонский¹, Н. И. Горбачук¹, С. В. Шпаковский², В. А. Филипеня²,
Во Куанг Нья¹, Ю. А. Красицкая¹, В. А. Скуратов³, С. Б. Ластовский⁴

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, gorbachuk@bsu.by

²ОАО «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴Научно-практический центр НАН Беларусь по материаловедению

Тип радиационных дефектов, вводимых при облучении высокоэнергетическими тяжелыми ионами, отличается от типа дефектов, вводимых при облучении электронами или легкими ионами: высока вероятность образования скоплений радиационных дефектов и их комплексов [1]. Поведение радиационных дефектов и их скоплений при термическом отжиге представляет интерес, так как напрямую может сказаться на параметрах диодов. Цель работы — определение типа радиационных дефектов в кремниевых диодах, облученных ионами висмута с энергией 700 МэВ, флюенсом $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ и отожженных при температурах 250–350 °C.

Диоды изготавливались на пластинках *n*-Si с удельным сопротивлением 90 Ом·см (КОФ-90). Область *p*⁺-типа создавалась ионной имплантацией бора. Активная площадь *p*⁺*n*-перехода — 4,41 мм². Глубина залегания *p*⁺*n*-перехода — 3,5 мкм, толщина двойного электрического слоя при отсутствии напряжения смещения — 4,5 мкм. Контакты формировались напылением Al. Толщина слоя Al на контакте к *p*⁺-области — 1,5 мкм. Диоды облучались ионами Bi. Энергия облучения — 700 МэВ, флюенс — $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$. Имплантация проводилась со стороны *p*⁺-области. Диоды отжигались 30 мин на воздухе при температурах $T_{\text{an}} = 250, 300$ и 350 °C.

На рисунке 1 представлен DLTS-спектр исходных (vir) и облученных ионами висмута (энергия — 700 МэВ, флюенс — $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$) диодов до (irr) и после отжига при температурах 250, 300, 350 °C. На спектрах DLTS исходных диодов наблюдались два пика E5 и E6 для дефектов с энергетическими уровнями $E_c - 0,45 \pm 0,03 \text{ эВ}$, $E_c - 0,51 \pm 0,03 \text{ эВ}$. Данными дефектами могут быть либо дефекты упаковки, либо термодоноры, возникшие при разгоне примеси бора.

На спектрах облученных и неотожженных диодов присутствуют четыре пика. Рассчитанные из зависимостей Аррениуса значения энергетических уровней ловушек в запрещенной зоне, соответствующие пикам E1, E2, E4, составили: $E_c - 0,20 \pm 0,02 \text{ эВ}$; $E_c - 0,25 \pm 0,02 \text{ эВ}$, $E_c - 0,42 \pm 0,03 \text{ эВ}$. Положение энергетического уровня для пика E3 определить не удалось. Сопоставление с известными литературными данными [2] позволяет предположить, что за пик E1 ответственны комплексы $\text{VO}^{(-/0)}$ и к $\text{C}_i\text{C}_s^{(-/0)}$, за пик E2 — дивакансию в зарядовом состоянии -2 ($\text{V}_2^{(=/-)}$). Пики E3 и E4 вероятно представляют собой перекрытия сигналов от ди-

вакансий в зарядовом состоянии -1 ($V_2^{(-/-)}$) и нескольких различных многоваканционных комплексов [3].

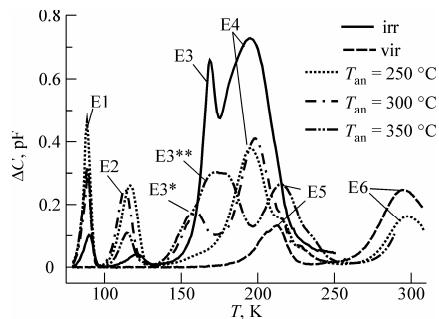


Рис. 1. Спектры DLTS исходных (vir), облученных ионами висмута (irr) и отожженных диодов. Значения времен выборки t_1 и t_2 , формирующих так называемое «окно скоростей эмиссии», составляли 5 и 10 мс соответственно. Температуры отжига указаны на рисунке

Отжиг при температуре 250 °С привел к исчезновению пика E_3 , уменьшению амплитуды пика E_4 и увеличению амплитуд пиков E_1 и E_2 . Рассчитанные значения энергетических уровней, соответствующих пикам DLTS, практически не изменились. Отжиг при 300 °С сопровождается появлением на спектрах DLTS пика E_3^* , которому соответствует энергетический уровень $E_t = E_c - 0,33 \pm 0,02$ эВ. Увеличение температуры отжига до 350 °С приводит к уменьшению амплитуд пиков E_1 и E_2 , исчезновению пика E_4 и появлению пика E_3^{**} ($E_t = E_c - 0,35 \pm 0,04$ эВ).

В верхней половине запрещенной зоны кремния дивакансия имеет два акцепторных уровня $E_c - 0,24$ эВ и $E_c - 0,41$ эВ [2]. Отжиг дивакансий происходит в интервале температур 250 – 300 °С. Поэтому после отжига при температуре $T_{an} = 250$ °С должно наблюдаться уменьшение амплитуд как пика E_2 , так и E_4 . Однако уменьшение амплитуды пика E_4 сопровождается ростом амплитуды пика E_2 (см. рис. 1). Это противоречит как известным данным по отжигу дивакансий [2], так и результатам, представленным на рис. 2. Сравнение ВАХ облученных и отожженных диодов показывает, что отжиг при 250 °С приводит к уменьшению обратных токов и прямого падения напряжения практически до уровня исходных диодов. Дальнейшее увеличение температуры отжига до 300 и 350 °С не приводит к значительным изменениям величины прямого падения напряжения и обратных токов. Подобные изменения ВАХ диодов свидетельствуют в пользу предположения об отжиге значительной части дивакансий при $T_{an} = 250$ °С. Поэтому наиболее вероятной причиной роста амплитуды пика E_2 является образование нового радиационного дефекта с энергетическим уровнем, близким к уровню $V_2^{(=/-)}$. В роли такого дефекта может выступать комплекс дивакансии и кислорода $V_2O^{(=/-)}$, который в зарядовом состоянии -2 имеет уровень $E_c - 0,23$ эВ [3]. Данные [3] согласуются с изменениями амплитуды пика E_2 на спектрах DLTS диодов при отжиге в интервале 250 – 350 °С.

Появление на спектрах DLTS пика, которому отвечает уровень $E_t \approx E_c - 0,33 \pm 0,02$ эВ, отмечено после отжига при температурах порядка 300 °C диодов, облученных ионами кремния [4], либо электронами [5]. Согласно [5], комплекс тривакансия-кислород обладает двумя акцепторными уровнями $E_t \approx E_c - 0,34$ эВ и $E_t \approx E_c - 0,46$ эВ и может образовываться при отжиге дивакансий. Следуя [5], можно предположить, что за пик Е3* отвечает дефект $V_3O^{(=/-)}$. Близким энергетическим уровнем обладает также тривакансия $V_3^{(=/-)}$ [5].

Изменения в составе дефектов при облучении и отжиге диодов прослеживаются также и на зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ от частоты f . Для исходных диодов зависимость $\operatorname{tg}\delta(f)$ не монотонна — наблюдается минимум в окрестности частоты 20 кГц (см. рис. 3). Облучение диодов приводит к росту низкочастотных ($f < 2$ кГц) потерь и появлению перегиба в окрестности 2 кГц. Отжиг диодов уже при $T_{an} = 250$ °C приводит к уменьшению $\operatorname{tg}\delta$ для частот $f < 2$ кГц. Наблюдается снижение потерь и в интервале частот от 2 до 200 кГц, однако особенность зависимости $\operatorname{tg}\delta(f)$, появившаяся в указанном интервале f после облучения диодов, не исчезает.

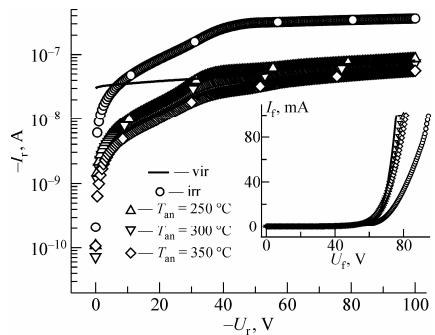


Рис. 2. ВАХ при обратном смещении исходных (vir), облученных ионами висмута (irr) и отожженных диодов. На вставке — ВАХ при прямом смещении. Температуры отжига указаны на рисунке

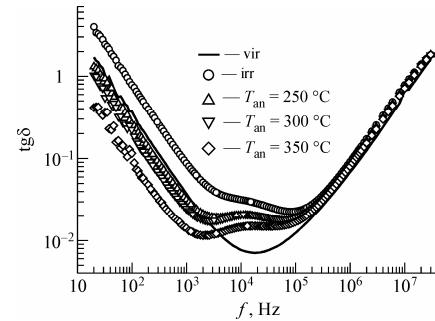


Рис. 3. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ от частоты f переменного тока исходных (vir), облученных ионами висмута (irr), и отожженных диодов. Температуры отжига указаны на рисунке

Сравнивая данные рис. 1, 2 и рис. 3, можно предположить, что главную роль в увеличении $\operatorname{tg}\delta$ для $f < 2$ кГц в облученных диодах играют дивакансы.

Установлено, что облучение диодов ионами висмута с энергией 700 МэВ, помимо А-центров и дивакансий, сопровождается образованием многовакансационных комплексов. Отжиг диодов при температуре 250 °C в течение 30 минут приводит к исчезновению значительной доли V_2 и образованию V_2O , в результате чего на порядок уменьшается величина обратных токов и $\operatorname{tg}\delta$. Увеличение T_{an} до 300 °C приводит к появлению на спектрах DLTS сигнала от дефекта с энергетическим уровнем $E_c - 0,33 \pm 0,02$ эВ (вероятно — комплекса V_3O , либо V_3).

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (договор Ф12Д-003) и ГПНИ
«Электроника и фотоника» (задание 1.1.04).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nastasi, M.* Ion implantation and synthesis of materials / M. Nastasi, J.W. Mayer.— Berlin: Springer, 2006.— 263 p.
2. *Eremin, V.* Effect of radiation induced deep level traps on Si detector performance / V. Eremin, E Verbitskaya, Z. Li // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.— 2002.— V. 476, No 3.— P. 537–549.
3. *Mikelsen, M.* Annealing of defects in irradiated silicon detector materials with high oxygen content / M. Mikelsen, E.V. Monakhov, G. Alfieri, B.S. Avset, J. Härkönen B.G. Svensson // J.Phys.: Condens Matter.— 2005.— V. 17, No 22.— P. S2247—S2253.
4. *Lalita, J.* Annealing studies of point defects in low dose MeV ion implanted silicon / J. Lalita, B.G. Svensson, C. Jagadish, A. Hallen // Nucl. Instr. and Meth. B.— 1997.— V. 127-128.— P. 69—73.
5. *Markevich, V.P.* Trivacancy and trivacancy-oxygen complex in silicon: Experiment and ab initio modeling / V.P. Markevich, A.R. Peaker, S.B. Lastovskii, L.I. Murin, J. Coutino, V.J.B. Torres, P.R. Briddon, L. Dobaczewski, E.V. Monakhov, B.G. Svensson // Phys. Rev. B.— 2009.— V. 80, No 23.— P. 235207-1—235207-7.