

6. *Калин Б. Н., Скоров Д. М., Якушин В. Л.* Проблемы выбора материалов для термоядерных реакторов // Радиационная эрозия. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 32–36.
7. *Ивановский А. Л.* Квантовая химия в материаловедении // Нанотубулярные формы вещества. Екатеринбург: УрО РАН. 1999.
8. *Котосонов А. С.* Электропроводность углеродных материалов со структурой квазидвумерного графита // Физика твердого тела Т. 31, вып. 8. С. 146–152.
9. *Tsuzuku T.* // Carbon. 1979. V.17, № 2. P. 293–301
10. *Matsubara K., Tsudzuku T., Sigihara K.* // Phys. Rev. B. 1991. V.44, № 21. P. 11845–11851.

ПЕРЕСТРОЙКА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ОТЖИГЕ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ С $p^+ - n$ ПЕРЕХОДОМ, ОБЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ ЗОЛОТА

Нгуен Тхи Тхань Бинь

ВВЕДЕНИЕ

Радиационные дефекты (РД), возникающие при облучении кремния или структур на его основе электронами либо ионами, являются эффективными центрами рекомбинации неравновесных носителей заряда. Поэтому радиационные технологии широко используются для оптимизации параметров силовых быстродействующих приборов. Облучение высокоэнергетическими тяжелыми ионами дает возможность минимизировать увеличение прямого падения напряжения, наблюдающееся из-за компенсации легирующей примеси РД, и, следовательно, может рассматриваться как перспективное направление развития радиационных технологий модификации полупроводниковых приборов. Однако информация о РД, вводимых таким облучением на сегодня не полна. Это обусловлено сложностью процессов дефектообразования для случая высоких энергий и больших масс ионов, а также комплексным и многостадийным характером трансформации дефектов, локализованных в областях скопления, при термическом отжиге структур.

Цель работы – изучение перестройка РД при отжиге кремниевых диодов с $p^+ - n$ -переходом, облученных ионами золота с энергией 1,7 ГэВ.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Диоды изготавливались на пластинах однородно легированного фосфором монокристаллического кремния с удельным сопротивлением 90 Ом·см (КОФ-90, плоскость (111), толщина 460 мкм). Область анода

p^+ -типа создавалась ионной имплантацией бора с энергия 60 кэВ и флюенсом $5,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с последующим отжигом дефектов и разгонкой примеси в окислительной атмосфере. Глубина залегания p^+n -перехода составляла $x_j \approx 12$ мкм. Активная площадь p^+n -перехода составляла $9,43 \text{ мм}^2$. Оцененная из измерений вольт-фарадных характеристик толщина двойного электрического слоя p^+n -перехода в исходных диодах при $U = 0$ составляла $\approx 4,5$ мкм. Для создания омического контакта к базе в непланарную сторону кремниевой пластины проводилась имплантация ионов фосфора. Контакты формировались напылением Al (толщина слоя 4.5 мкм) с последующим вжиганием при температуре $475 \text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере азота.

Диоды облучались ионами золота (энергия – 1,7 ГэВ, флюенс – 10^8 см^{-2}). Облучение проводилось в направлении, перпендикулярном плоскости p^+n -перехода с стороны p^+ -области. Согласно расчетам, выполненным с помощью программы TRIM, средний проективный пробег ионов золота в бислоистой структуре Al/Si составил 92 мкм. Максимум профиля распределения первичных вакансий находился на расстоянии 87,5 мкм от поверхности кремния. Расстояние δ между границей p^+n -перехода ($N_A = N_D$ – без учета компенсации легирующей примеси радиационными дефектами) и максимумом распределения первичных вакансий составляло ≈ 75 мкм. После облучения проводился изохронный отжиг в интервале температур $T_{\text{ан}}$ 150 – 400 $^\circ\text{C}$ с шагом 25 $^\circ\text{C}$.

DLTS-спектры регистрировались на частоте 1 МГц с помощью спектрометра CE-6 (НПООО “ОМНИТЕЛ”, г. Минск РБ). Напряжение заполнения ловушек и время заполнения составляли $U_p = -4 \text{ В}$, $t_p = 10 \text{ мс}$, соответственно. Напряжения эмиссии и время эмиссии – $U_e = -19 \text{ В}$, $t_p = 15 \text{ мс}$, соответственно. Спектры DLTS регистрировались в интервале температур 80–300 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На спектре-DLTS облученных и неотожженных диодов (рис. 1) присутствуют 3 пика, которые по энергии активации [1] определяются как пики соответствующие А-центрам (E1: $E = E_C - 0,20 \text{ эВ}$), дивакансиям в двукратно (E2: $E = E_C - 0,23 \text{ эВ}$) и однократно (E4: $E = E_C - 0,40 \text{ эВ}$) отрицательном зарядовых состояниях. Наблюдаемое отклонение в амплитуде и форме пиков E2 и E4 говорит о том, что пик E4, представляет собой наложение пиков от дивакансий и E-центров и, может быть, центров C_i-P_s [3, 4].

Отжиг до температуры 200 $^\circ\text{C}$ сохраняет указанные пики на спектрах DLTS но изменяет их форму (рис. 1). После отжига при температуре

150–200 °С амплитуда пика E1 увеличивается, E2 – практически не изменяется, E4 – уменьшается. Отжиг при температуре 200 °С приводит также к тому, что на спектрах DLTS проявляется пик E3, исчезающий в просе отжига при $T_{an} = 225$ °С (рис. 2). Рост амплитуды пика E1 может быть связан с увеличением концентрации А-центров, за счет вакансий, освобождающихся при отжиге Е-центров.

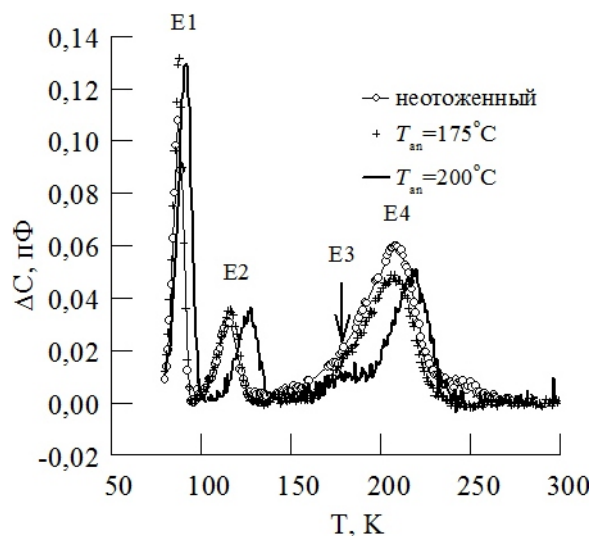


Рис. 1. Спектр DLTS диодов облученных флюенсом ионов золота 10^8 см⁻² и отожженных при $T_{an} = 175$ °С, 200 °С

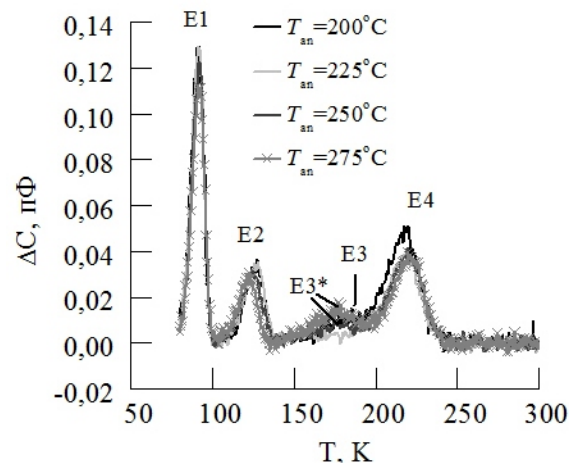


Рис. 2. Спектр DLTS диодов облученных флюенсом ионов золота 10^8 см⁻² и отожженных при $T_{an} = 200$ °С, 225 °С, 250 °С, 275 °С

Отжиг при температурах 200–275 °С (рис. 2) приводит к уменьшению амплитуд пиков E2 и E4. При $T_{an} = 250$ °С наблюдается формирование пика E3* ($E = E_C - 0,33 \pm 0,02$ эВ). Исходя из этого, можно предположить что, отжиг дивакансий происходит с формированием других центров, которые имеют энергию активации, сопоставимую с энергией активации дивакансий. Глубина залегания уровня, соответствующего пику E3* близка к известным значениям характерным для центров V_3 и V_3O [2]. При дальнейшем отжиге $T_{an} > 275$ °С (рис. 3) амплитуда пиков E2 и E4 существенно уменьшается, амплитуда пика E3* увеличивается. Подобное изменение амплитуд пиков возможно связано с увеличением концентрации многовакансионных центров, происходящем одновременно с отжигом (диссоциацией) дивакансий.

Отжиг при 350 °С приводит к заметному снижению амплитуды пика от А - центров и исчезновению пика E3*. Амплитуда пиков E2 и E4 фактически не изменяется. Известно, что дивакансии отжигаются при температуре 250–275 С. Поэтому пики E2 и E4 на спектрах DLTS диодов, отожженных при температурах > 300 °С можно связать с центрами V_2O [5]. После отжига при температурах $T_{an} > 375$ °С все пики фактически исчезают.

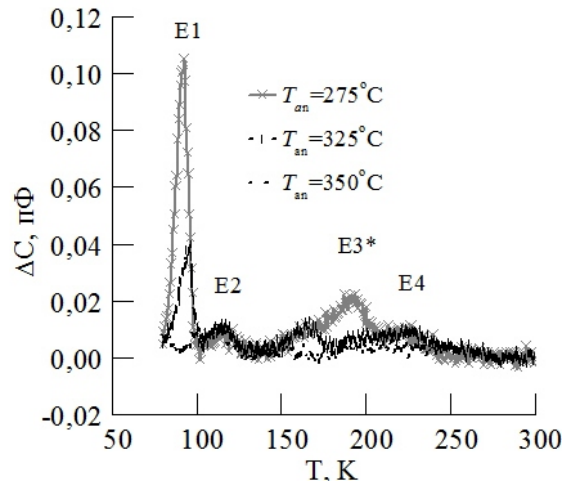


Рис. 3. Спектр DLTS диодов облученных флюенсом ионов золота 10^8 см^{-2} и отожженных при $T_{\text{ан}}=275 \text{ °C}$, 325 °C , 350 °C

Таким образом, в ходе отжига облученных диодов наблюдается перестройка радиационных центров, с образованием многовакансионных комплексов и комплексов V_2O .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом DLTS исследованы диоды, облученные ионами золота с энергией 1,7 ГэВ флюенсом 10^8 см^{-2} и изохронно отожженные в интервале температур 150–400 °C. Показано, что в процессе низкотемпературного (150–175 °C) отжига наблюдается увеличение концентрации А-центров. Установлено что при отжиге в интервале температур 250–325 °C наблюдается формирование центра, энергетическое положение уровня которого позволяет связать его с центрами V_3 либо V_3O .

Литература

1. 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. (M. Moll, Radiation damage in silicon prtices detectors. Ph.D. Thesis University of Hamburg, 1999).
2. Markevich V. P. Trivacancy and trivacancy-oxygen complexes in silicon: Experiments and ab initio modeling/ V. P. Markevich, A. R. Peaker, S. B. Lastovskii, L. I. Murin, J. Coutinho, V. J. B. Torres, P. R. Briddon, L. Dobaczewski, E. V. Monakhov, and B. G. Svesson // Phys Rev A. 2009. B 80 (235207).
3. Вербицкая Е. М. Роль кислорода в нестабильности углеросодержащих радиационных дефектов в кремнии // ФиТП. 1993. Т. 27. В 11/12.
4. Антонова И. В. Трансформация при отжиге электрически активных дефектов в кремнии, имплантированном ионами высоких энергий // ФиТП. 2006. Т40. В .
5. Monakhov E. V. Formation of double acceptor center during divacancy annealing in low-doped high-purity oxygenated Si // Phys Rev B. 2002. V 65 (233207).