

DLTS СПЕКТРОСКОПИЯ КОМПЛЕКСОВ РАДИАЦИОННЫЙ ДЕФЕКТ - ОСТАТОЧНАЯ ПРИМЕСЬ В КРЕМНИИ

Б.А. Комаров¹⁾, И.Ф. Медведева¹⁾, Л.И. Мурин¹⁾, В.Е. Гусаков¹⁾, П.В. Кучинский²⁾, J.L. Lindstrom³⁾
¹⁾ИФТТ НАБ, 220072, г. Минск, ул. П. Бровки 17, т. 284-12-90, e-mail: murin@iftt.bas_net.by
²⁾НИИ ПФП, 220064, г. Минск, ул. Курчатова 7, т. 2775945, e-mail: paliichuk@pfp.bsu.unibel.by
³⁾Solid State Physics, University of Lund, Box 118, SE-22100, Sweden

Методом DLTS исследовано образование комплексов радиационный дефект - остаточная примесь в кремнии. Установлено, что термические обработки облученных быстрыми электронами Si p⁺-n переходов приводят к активации остаточной примеси Fe и образованию комплексов Fe+(O-V) и Fe+W на ранней (100-200°C) стадии отжига основных радиационных дефектов. Обнаруженные комплексы электрически активны (электронная E5(0.368эВ, $\sigma_n=6.76 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$) и дырочная H2(0.184эВ, $\sigma_p=2.97 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$) ловушки) и проявляют высокую термическую стабильность.

Введение

Современная технология выращивания кремния позволяет получать совершенные монокристаллы с малым содержанием остаточных примесей (за исключением О и С). Последующие технологические этапы создания полупроводниковых структур приводят к неконтролируемому введению дефектов и примесей, которые могут существенно влиять на параметры готовых полупроводниковых приборов. Например, проблема контроля примеси железа является в настоящее время одной из наиболее злободневных в технологии кремниевых структур (см., обзор [1] и ссылки там).

Одним из методов контроля электрически неактивных остаточных примесей является их радиационно-стимулированная активация (например, контроль содержания кислорода по формированию А-центра (O-V) в облученном кремнии).

В настоящей работе представлены результаты исследования методом емкостной спектроскопии новых комплексов остаточная примесь Fe - радиационный дефект (РД), формируемых радиационно-термическими обработками в кремниевых p⁺-n переходах.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследование взаимодействия остаточных примесей с радиационными дефектами проводилось методом DLTS на установке Semitrap DLS-83D [2]. Объектами исследования были Si p⁺-n переходы, изготовленные диффузией В (T_{диф}=1150°C) в p-Cz-Si(P) с $\rho=20 \text{ Омсм}$ и облученные быстрыми электронами (E=7МэВ, F=3*10¹⁴ см⁻²) при комнатной температуре.

В не облученных (контрольных) образцах в верхней половине запрещенной зоны (3-3) ловушек электронов не обнаружено. В то время как в нижней половине 3-3 наблюдается широкая полоса с двумя максимумами в районе температур 225К (H_{0.36}, N_{0.36}=2*10¹¹ см⁻³) и 275К (H_{0.51}, N_{0.51}=8*10¹⁰ см⁻³).

В облученных структурах наблюдается спектр РД, представленный на рис.1 (кривые с номером 1). Облучение приводит к

формированию в верхней половине 3-3 следующих ловушек электронов: E1(0.166эВ, $\sigma_n=1.08 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$; А-центр, C_i-C_s) [3-10], E2(0.241эВ, $\sigma_n=4.98 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$; W²) [5,7], E3(0.309эВ, $\sigma_n=1.04 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$) не показана, E4(0.424эВ, $\sigma_n=2.06 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$; W¹, Е-центр) [3,5]. В нижней половине 3-3 вводится ловушка дырок H1(0.363эВ, $\sigma_p=1.55 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$; C_i-O) [11].

Для активации процессов взаимодействия остаточных примесей с РД проводились термические обработки облученных структур. На рис.1 показана трансформация спектра DLTS (кривые 2,3) на начальной стадии изохронного отжига при T=100-175°C. Наблюдается отжиг ловушек E1, E2 и E4 с одновременным формированием новых ловушек E5(0.368эВ, $\sigma_n=6.76 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$) и H2(0.184эВ, $\sigma_p=2.97 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$). На рис.2 представлены результаты изохронного отжига (30мин.) до 400°C. Анализ экспериментальных результатов позволил выделить следующие характерные особенности. Во-первых, наблюдается ранняя стадия (T_{отж}=100-175°C) практически полного отжига центра E1 с накоплением в той же концентрации ловушки E5. Последующий отжиг при T=200-300°C сопровождается отжигом ловушки E5 с частичным восстановлением ловушки E1 (стадия отрицательного отжига). В дальнейшем отжиг ловушек E1 и E5 происходит синхронно вплоть

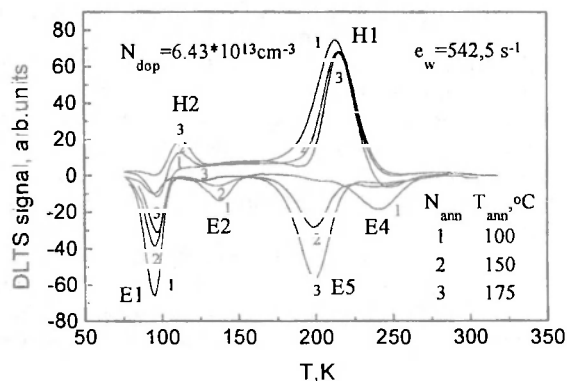


Рис. 1. DLTS спектр РД в Si p⁺-n переходах, облученных быстрыми электронами, и его трансформация при термических обработках

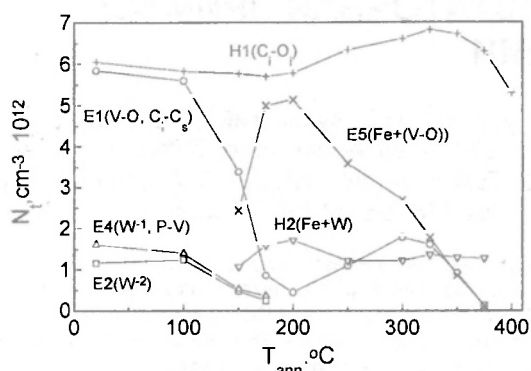


Рис.2. Изохронный (30мин.) отжиг введенных РД

до 400°C. Во-вторых, стадия отжига ловушек E2 и E4 совпадает с появлением в равной концентрации ловушки H2 стабильной до 400°C. Отметим, что стадия формирования ловушки H2 коррелирует со стадией образования ловушки E5.

Анализ литературных данных показал, что в кристаллах Cz-Si, не подвергавшихся высокотемпературным обработкам, А-центр стабилен до 350 °C и отжигается без образования новых электрически активных дефектов [3,4]. В кристаллах с повышенным содержанием остаточных примесей наблюдались как аномально ранний ($T_{отж} = 100-150^\circ\text{C}$) отжиг А-центра, так и образование новых глубоких акцепторных центров, в том числе и дефекта $D_{0.36}$, природа которого долгое время оставалась невыясненной [5-10,12-15].

Предположение о том, что за раннюю стадию отжига А-центра ответственны примесные атомы быстро диффундирующих металлов (Fe, Cr и др.), впервые было высказано в работе [9]. Позднее, в работе [13] было показано, что действительно специальное легирование исходных структур железом приводит к ранней стадии ($T_{отж}=100-150^\circ\text{C}$) отжига А-центров и к появлению в равной концентрации новой электронной ловушки ($E_{0.36}$, $\sigma_n=4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$), которая была идентифицирована как комплекс $[\text{Fe}+(\text{V}-\text{O})]$.

Наиболее вероятно, что ловушка E5, образование которой наблюдалось в наших структурах, также является комплексом $[\text{Fe}+(\text{V}-\text{O})]$. Об этом свидетельствует как идентичность параметров обоих центров, так и аналогичное поведение при отжиге. Кроме того, проявление в необлученных образцах ловушки $H_{0.36}$ также свидетельствует о присутствии междоузельных атомов железа (донорный уровень Fe расположен у $E_v+0.36 \text{ эВ}$ [1]).

В отличие от работы [13], где ловушки в нижней половине запрещенной зоны не исследовались, нами наблюдалась новая ловушка H2. Ее образование хорошо

коррелирует с ранним отжигом дивакансии (концентрация Е-центров в наших кристаллах была незначительной). По-видимому, W является также, как и V-O, эффективным центром захвата для подвижных междоузельных атомов железа. Вероятно при данных температурах может реализоваться механизм формирования донорно-акцепторных пар, подобных при взаимодействии Fe^+ с В в р-типе Si [16]. Обращаем внимание на высокую термическую стабильность комплекса W+Fe.

Таким образом, можно заключить, что неконтролируемое введение примесных атомов железа на промежуточных этапах формирования р-п структур и их последующее взаимодействие с РД приводит к образованию новых комплексов, ответственных за раннюю стадию отжига А-центра и W. Образующиеся комплексы V-O+Fe и W+Fe проявляют электрическую активность и могут оказывать существенное влияние на свойства облученных структур.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке фонда ИНТАС-Беларусь (97-0824) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Ф99-286).

Список литературы

1. Istratov A.A., Hieslmaier H. and Weber E.R. // Appl. Phys. -1999. -A69-44p.
2. Ferenczi G., Boda J., Pavelka T. // Phys. Stat. Solidi. - 1986. - A94. - k119.
3. Walker J.W. and Sah C.T. // Phys. Rev. B. - 1973. - V7, №10. - p.4587.
4. Берман Л.С., Витман Р.Ф., Шуман В.Б. // ФТП. - 1975. - т.9, №12. - с.311.
5. Kimerling L.C. // Inst. Phys. Conf. Ser. №31. - 1979. Ch.2 - p.221.
6. Barnes C.E. // J. of El. Mat. - 1979. - V8, №4. - p.437.
7. Brotherton S.D., Bradley P. // J. Appl. Phys. - 1982. -V53, №8 - p.5720.
8. Берман Л.С., Воронков В.Б., Кожух М.Л., Кушавиц К.Ш., Толстобров М.Г. // ФТП. - 1986. - т.20, №5. - с.110.
9. Макаренко Л.Ф., Маркевич В.П., Мурич Л.И., Ткачев В.Д. // Доклады АН БССР. - 1981. - Т. XXV. - №11 - с.988.
10. Медведева И.Ф., Макаренко Л.Ф., Маркевич В.П., Мурич Л.И. // Вести АН БССР. - 1991. - №3. - с.19.
11. Murin L.I. // Phys. Status Sol. (a) - 1987-V.101. - k107.
12. Кучинский П.В., Ломако В.М., Шахлевич Л.Н. // Письма в ЖЭТФ - 1987. - Т.45, №7 -с.350.
13. Shi-pu You, Min Gong, Ji-yong Chen and Corbett J.W. // J. Appl. Phys. - 1988. V.63, №2. - p.324.
14. Svenson B.G., Lindstrom J.L., Corbett J.W. // Appl. Phys. Lett. - 1985. - V.48. - p.841.
15. Lindstrom J.L., Svenson B.G. // Defects in Semicond. Mater. Sci. Forum. - 1989. -V.38, №41. - p.45.
16. Brotherton S.D., Bradley P. and Gill A. // J. Appl. Phys. - 1985. -V54. - p.1941.

DLTS SPECTROSCOPY OF THE COMPLEXES RADIATION DEFECT-RESIDUAL IMPURITY IN SILICON

B.A.Komarov¹⁾, I.F.Medvedeva¹⁾, L.I.Murin¹⁾, V.E.Gusakov¹⁾, P.V.Kuchinski²⁾, J.L.Lindstrom³⁾

¹⁾*Institute of Solid State & Semiconductor Physics, 220072, Minsk, P. Brovki str. 17, ph. 284-12-90,
e-mail: murin@iftp.bas_net.by*

²⁾*Sevchenko's Research Institute of Applied Physical Problems of Byelorussian State University, 220064, Minsk,
Kurchatov str.7, ph. 2775945, e-mail: paliichuk@pfp.bsu.unibel.by*

³⁾*Solid State Physics, University of Lund, Box 118, SE-22100, Sweden*

Formation of radiation defect-residual impurity complexes has been studied by DLTS method. It was established that heat treatments of irradiated by high-velocity electrons Si p⁺-n junctions lead to the activation of residual Fe atoms and formation of Fe+(O-V), Fe+W complexes, responsible for an early stage of annealing of the basic radiation defects. The detected defect-residual impurity complexes show electrical activity and add new electronic E5 (0.368eV, $\sigma_n = 6.76 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$) and hole H2 (0.184eV, $\sigma_p = 2.97 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$) traps into a forbidden gap and display a high thermal stability.