

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ТЕРМООБРАБОТОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА ПРОЦЕССЫ РАДИАЦИОННОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В n-Cz-Si

И.Ф. Медведева<sup>1)</sup>, Л.И. Мурин<sup>1)</sup>, В.П. Маркевич<sup>1)</sup>, А.Г. Литвинко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 17, e-mail: murin@ifftp.bas-net.by

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет, 220013, г. Минск, пр. Ф.Скорины, 65

Методом эффекта Холла изучены особенности образования и отжига радиационных дефектов (РД) в кристаллах n-Si, прошедших кратковременные предварительные термообработки (ПТО) при 700 и 1000 °С. Установлено, что такие ПТО кристаллов n-Si, полученных методом Чохральского, не оказывают заметного влияния на энергетический спектр и эффективность образования основных РД. В то же время в кристаллах, прошедших ПТО, имеет место ускоренный отжиг РД и формирование новых электрически - активных центров. Эффект ПТО, вероятнее всего, связан с активацией быстродиффундирующих примесей водорода и переходных металлов и их взаимодействием с РД.

### Введение

Изготовление полупроводниковых приборов на основе кремния сопряжено с проведением ряда технологических операций при повышенных температурах. Это неизбежно сопровождается введением в базовые монокристаллы термодфектов (ТД) [1,2], которые могут оказывать существенное влияние на процессы радиационного дефектообразования. В связи с этим возникает необходимость исследования особенностей образования и отжига радиационных дефектов (РД) в монокристаллах Si, прошедших предварительные термообработки (ПТО) при различных температурах.

### Методика эксперимента

В данной работе исследовались кристаллы n-Si ( $N_p = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), полученные методом Чохральского (Cz-Si). Содержание углерода и кислорода по данным оптических измерений составляло:  $N_o = 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_c = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . ПТО при температуре 700 и 1000 °С проводились на воздухе в течении 30 минут. Охлаждение образцов, отожженных при  $T = 700^\circ\text{C}$ , осуществлялось путем их закалки в изопропиловый спирт. Образцы, обработанные при  $T = 1000^\circ\text{C}$ , охлаждались вместе с ампулой. Исследуемые образцы облучались  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  при  $T \sim 50^\circ\text{C}$ . Проводились измерения температурных (77-400 К) зависимостей концентрации носителей заряда (ТЗКН).

### Экспериментальные результаты и обсуждение

На рисунках 1 и 1а приведены ТЗКН исследуемых образцов. Вышеуказанные ПТО не приводили к введению в заметных концентрациях новых электрически активных центров с уровнями в верхней половине запрещенной зоны (кривые 1). Облучение  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  кристаллов Cz-Si приводило к введению РД с уровнями вблизи  $E_c - 0,17 \text{ эВ}$  (А-центры и комплексы  $C_1C_2$ ) [1,2] (кривые 2).

Предварительная ТО практически не влияет на эффективность введения этих РД, но основные закономерности их отжига в кристаллах, обработанных при температурах 700 и 1000 °С су-

щественно отличаются (рис. 2, 2а). В образцах кремния, прошедших ПТО при  $T = 700^\circ\text{C}$  (рис. 2) температура отжига А-центров понижается вплоть до 150 °С (кр. 1) и их исчезновение сопровождается образованием в сравнимых концентрациях глубоких компенсирующих центров – ГКЦ (кр. 2), что приводит к удалению свободных носителей при комнатной температуре. Акцепторный уровень ГКЦ расположен или у середины (глубже, чем  $E_c - 0,50 \text{ эВ}$ ), или в нижней половине запрещенной зоны, так как ионизация этих дефектов не наблюдалась на ТЗКН вплоть до начала собственной проводимости. Последующее восстановление свободных носителей, связанное с отжигом ГКЦ, происходит в широком интервале температур (260–400 °С). При этом наблюдается как образование (восстановление) в небольших концентрациях, так и последующий отжиг дефектов с уровнем  $E_c - 0,17 \text{ эВ}$  (кр. 1').

Отжиг РД в кристаллах кремния, прошедших ПТО при  $T = 1000^\circ\text{C}$  с менее быстрым охлаждением, (рис. 2а) имеет существенные отличия. Дефекты с уровнем  $E_c - 0,17 \text{ эВ}$  отжигаются в интервале температур 125 – 300 °С, при этом наряду с введением ГКЦ наблюдается образование дефектов с уровнями  $E_c - (0,30 - 0,35) \text{ эВ}$ . Концентрация данных центров, как и ГКЦ достигает максимального значения при температурах отжига 250 - 275 °С.

Центры с уровнями  $E_c - (0,30 - 0,35) \text{ эВ}$  отжигаются при 300 °С. ГКЦ отжигаются в интервале температур 275-350 °С, в этом же интервале температур наблюдается введение в незначительных концентрациях центров с уровнем  $E_c - 0,075 \text{ эВ}$ .

Снижение температуры отжига РД в объемных кристаллах Si, прошедших ПТО, может быть обусловлено появлением подвижных термодфектов (ПТД), способных взаимодействовать с РД [1]. Однако на основе имеющихся экспериментальных данных достаточно сложно сделать однозначное заключение о природе таких термодфектов. Очевидно, что они не могут быть собственными дефектами (СД) решетки, так как эффективность образования ПТД существенно зависит от способа получения материала [2]. ( $N$  и  $I_{Si}$ ) в Si не превышает  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  при  $T \sim 1000 \text{ K}$

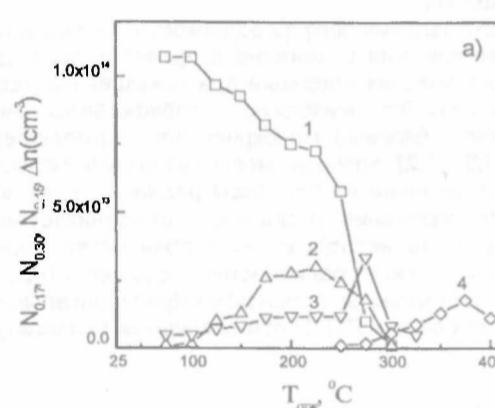
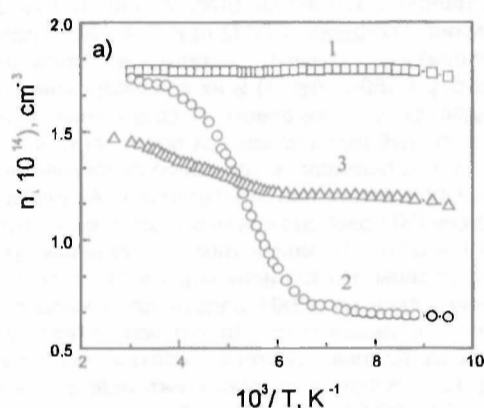
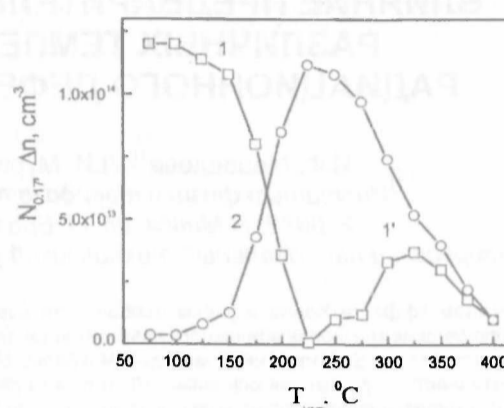
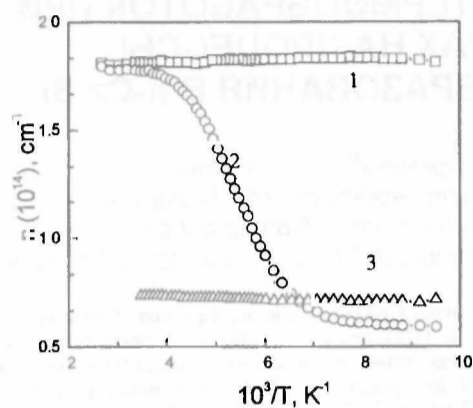


Рис.1, 1а. Температурные зависимости концентрации носителей заряда в кристаллах n-Cz-Si ( $N_p = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), прошедших ПТО при  $700^\circ\text{C}$  (рис.1) и  $1000^\circ\text{C}$  (рис.1а): кривые 1 (после ПТО), 2 – облученные гамма квантами  $^{60}\text{Co}$ ,  $\Phi = 3,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , 3 – после отжига при  $250^\circ\text{C}$  (ПТО  $700^\circ\text{C}$ ) и  $275^\circ\text{C}$  (ПТО  $1000^\circ\text{C}$ )

Известно также, что концентрация простейших СД [3], в то время как в некоторых кристаллах Cz-Si даже при  $T_{\text{пто}} \sim 600^\circ\text{C}$  концентрация ПТД, взаимодействующих с А-центрами, достигала значений  $(2-3) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

Можно предположить, что ПТД являются быстродиффундирующими примесями (H, Fe, Cu, Ni и др.), основная доля которых в исходных кристаллах находится обычно в связанном состоянии. Последующая термобработка с закалкой приводит к их активации, что позволяет им в дальнейшем более активно взаимодействовать с РД.

Поскольку в кристаллах, прошедших ПТО при  $T=700^\circ\text{C}$  при отжиге комплексов VO не наблюдалось образования как дефектов с уровнем  $E_c - 0,32 \text{ эВ}$  (VOH) [4,5], так и водородосодержащих центров с уровнем  $E(-/+)$  =  $E_c - 0,075 \text{ эВ}$  [6], то водород можно исключить из числа возможных примесей, участвующих в образовании ГКЦ. Маловероятно также, что в процессе образования ГКЦ участвуют атомы железа. Согласно [7], специальное легирование Cz-Si железом приводит к раннему отжигу А-центров при  $T = 100 - 150^\circ\text{C}$  и

Рис.2, 2а. Зависимости концентрации дефектов с уровнем  $E_c - 0,17 \text{ эВ}$  (кривые 1,1') удаленных носителей заряда, измеренных при  $E_c - 0,5 \text{ эВ}$  (кривые 2) в кристаллах, прошедших ПТО при  $700^\circ\text{C}$  (рис.2) и  $1000^\circ\text{C}$  (рис.2а), концентрации дефектов с уровнями  $E_c - (0,30 - 0,35) \text{ эВ}$  (кривая 3) и дефектов с уровнем  $E_c - 0,075 \text{ эВ}$  (кривая 4) в кристаллах, прошедших ПТО при  $1000^\circ\text{C}$  от температуры изохронного отжига

одновременному образованию дефектов с уровнем  $E_c - 0,36 \text{ эВ}$  (Fe - VO). Образование РД с уровнем  $E_c - 0,36 \text{ эВ}$  после ПТО при  $T=700^\circ\text{C}$  нами не наблюдалось. Примесные атомы Fe не могут быть ответственны за формирование ГКЦ и по причине низкой растворимости железа в Si в области температур  $\sim 700^\circ\text{C}$  [8]. Можно предположить, что ответственными за ускоренный отжиг А- центров и формирование ГКЦ могут быть примеси меди и никеля. Они обладают высокой подвижностью при температурах выше комнатной, высокой растворимостью при  $T > 700^\circ\text{C}$  ( $> 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) и, как правило, присутствуют в исходных кристаллах Si.

Образование дефектов с уровнями  $E_c - (0,30 - 0,35) \text{ эВ}$  в кристаллах кремния, прошедших ПТО при  $1000^\circ\text{C}$ , вероятнее всего, можно связать с введением электрически-активных комплексов V-O-H ( $E_c - 0,32 \text{ эВ}$ ) и Fe - VO ( $E_c - 0,36 \text{ эВ}$ ). На взаимодействие водорода с радиационными дефектами указывает и формирование водородосодержащих центров с уровнем  $E(-/+)$  =  $E_c - 0,075$

эВ [6]. Растворимость железа при температуре 1000°C достигает значения  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, и данная примесь может также участвовать в образовании дефектов с уровнями E<sub>c</sub>-(0,30 - 0,35) эВ.

#### Заключение

Кратковременные ПТО кристаллов n-Cz-Si при T = 700 – 1000°C не оказывают заметного влияния на энергетический спектр и эффективность образования основных РД. В то же время в кристаллах, прошедших ПТО, имеет место ускоренный отжиг РД и формирование новых электрически-активных центров.

Эффект ПТО, вероятнее всего связан с активацией быстродиффундирующих примесей водорода и переходных металлов (вплоть до уровня их растворимости при температуре ПТО) и их взаимодействием с РД.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф01-314).

#### Список литературы

1. Макаренко Л.Ф., Маркевич В.П., Мурин Л.И., Ткачев В.Д. // Докл. АН БССР.-1981.-Т.25. – No.11.- С.988-990.
2. Korshunov F.P., Makarenko L.F., Markevich V.P., Medvedeva I.F., and Murin L.I. // In: Defect Control in Semiconductors, ed. by K. Sumino, (Elsevier Science Publ., 1990). - P.541-545.
3. Voronkov V.V., Falster R. // J. Appl. Phys. –2002.- Vol.91. – No.9.–P.5802-5810.
4. Feklisova O.V., Yarykin N.A. // Semicond. Sci. Technol.-1997.-Vol.12, N6.–P.742-749.
5. Pellegrino P., Leveque P., Lalita J., Hallen A., Jagadish C., Svensson B.G. // Phys. Rev. B.- 2001.- Vol 64. - No.195211.-P.1-10.
6. Медведева И.Ф., Мурин Л.И., Маркевич В.П., Комаров Б.А. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение.-2001.-Т.79. – No.2. - С.48-52.
7. You Z., Gong M., Chen J., Corbett J.W. // J. Appl. Phys.- 1988. - Vol.63. – No.2. - P. 324-326.
8. Istratov A.A., Hieslmair H., Weber E.R. // Appl.Phys. A. -1999.- Vol.69. – No.1. - P.13-44.

### EFFECT OF PRELIMINARY HEAT-TREATMENTS AT DIFFERENT TEMPERATURES ON THE PROCESSES OF RADIATION-INDUCED DEFECTS FORMATION

I.F. Medvedeva<sup>1</sup>), L.I. Murin<sup>1</sup>), V.P. Markevich<sup>1</sup>), A.G. Litvinko<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>)institute of Solid State and Semiconductor Physics, P.Brovki str. 17, Minsk 220072, Belarus, ph. 284-11-95  
e-mail: murin@ifftp.bas-net.by

<sup>2</sup>)Belarusian National Technical University, F. Scoryna Av. 65, Minsk 220013, Belarus.

The formation and annealing features of radiation induced defects (RD<sub>s</sub>) in n- Cz- Si crystals pre-heat-treated at 700 and 1000 °C for 30 min and irradiated with <sup>60</sup>Co γ-rays at room temperature have been studied by Hall effect measurements. It is found that such pre-heat-treatments (PHT<sub>s</sub>) do not affect noticeably the type and introduction rate of the main RD<sub>s</sub>. The PHTs resulted in enhanced annealing of RDs with a simultaneous formation of new electrically active centers. It is suggested that the PHT effect is associated with an activation of fast-diffusing impurities like hydrogen and transition metals (up to solubility limit at the PHT temperature) and their interaction with radiation-induced defects.