

Особенности отжига радиационных дефектов в облученных кристаллах p -Si

© Т.А. Пагава¹Грузинский технический университет, РЦСИ,
0175 Тбилиси, Грузия

(Получена 26 июня 2006 г. Принята к печати 30 августа 2006 г.)

Исследовались монокристаллы p -кремния полученные методом Чохральского, с концентрацией дырок $p = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Образцы облучались электронами с энергией 8 МэВ при 300 К. Изохронный отжиг облученных кристаллов производился в интервале температур $T_{\text{ann}} = 100\text{--}500^\circ\text{C}$. Исследования проводились методом Холла в интервале 77–300 К. Показано, что отжиг дивакансий происходит путем их преобразования в комплексы V_3V_2 . Комплексу V_3V_2 соответствует уровень энергии $E_v + 0.22 \text{ эВ}$, и он отжигается в интервале температур 360–440 $^\circ\text{C}$. Высказано предположение, что дефекты с уровнем $E_v + 0.2 \text{ эВ}$, которые отжигаются в интервале температур $T_{\text{ann}} = 340\text{--}450^\circ\text{C}$, являются мультикомпонентными комплексами и содержат атомы легирующей и фоновых примесей.

PACS: 61.72.Ce, 61.80.Fe, 72.80.Cw

1. Введение

В работе [1] показано, что в образцах n -Si, облученных протонами с энергией 25 МэВ, дефекты с уровнем $E_c - 0.17 \text{ эВ}$ отжигаются в два этапа, при температурах $T_{\text{ann}} = 200$ и 300°C . Авторами работы было высказано предположение, что при $T_{\text{ann}} = 200^\circ\text{C}$ отжигается не A -центр, а другой дефект, с энергией ионизации, настолько близкой к энергии ионизации A -центра, что электрическими измерениями их трудно различить.

Авторы работы [2] показали, что таким дефектом является комплекс C_iC_s , так называемый G -центр (межузельный углерод–углерод в узле), который отжигается при $T_{\text{ann}} = 200^\circ\text{C}$ и которому соответствует уровень $E_c - 0.16 \text{ эВ}$. Энергия активации отжига G -центра — $E_a = 2 \text{ эВ}$, а энергия диссоциации — 1.08 эВ [3].

Долгое время считалось, что в кристаллах n -Si уровень $E_c - 0.54 \text{ эВ}$ принадлежит дивакансиям. Оказалось, что дивакансиям принадлежат уровни $E_c - 0.23 \text{ эВ}$, $E_c - 0.41 \text{ эВ}$ и $E_v + 0.28 \text{ эВ}$, а уровень $E_c - 0.54 \text{ эВ}$ принадлежит другим дефектам, совпадающим с дивакансиями только по температуре отжига [4].

Кристаллы p -Si отличаются обилием различных радиационных дефектов (РД) [5,6]. Соответственно больше вероятность образования РД с одинаковой энергией ионизации (E_i) или температурой отжига (T_{ann}).

Цель данной работы — идентификация различных РД с помощью E_i и T_{ann} из измерений температурных зависимостей концентрации основных носителей тока (p) в кристаллах p -Si сразу после облучения и в процессе изохронного отжига (ИО).

2. Техника эксперимента

Исследовались образцы монокристаллического кремния, полученные методом Чохральского, с концентрацией дырок $p = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; плотность ростовых дислока-

ций составляла $10^3\text{--}10^4 \text{ см}^{-2}$. Исследуемые образцы облучались электронами с энергией 8 МэВ при комнатной температуре, доза облучения $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, плотность потока электронов $\varphi = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Изохронный отжиг облученных кристаллов проводился в температурном интервале $T_{\text{ann}} = 100\text{--}500^\circ\text{C}$ с шагом 10°C ; время выдержки при фиксированной температуре равнялось 10 мин. После каждого цикла ИО измерялась концентрация p методом Холла в интервале температур $T = 77\text{--}300 \text{ К}$. Омические контакты для измерения создавались путем втирания алюминия в поверхность исследуемого образца.

Изменение концентрации дырок в процессе ИО определялось по кривым $p = f(10^3/T)$ при 260 К. Энергии ионизации уровней дефектов E_i определялись в предположении $\varepsilon_F = E_i$, где ε_F — энергия уровня Ферми, по формуле

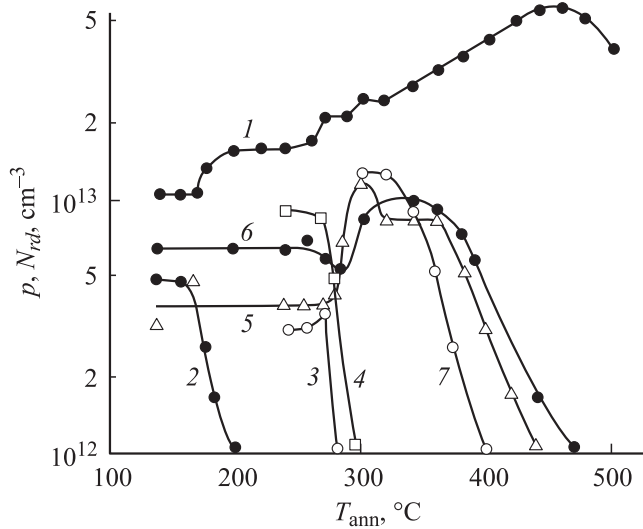
$$p = N_v F_{1/2} \left(\frac{\varepsilon_F}{kT} \right),$$

где N_v — эффективная плотность состояний в валентной зоне, $F_{1/2}$ — интеграл Ферми–Дирака, k — постоянная Больцмана. Соответствующие участки на зависимостях $p = f(10^3/T)$ выбирались с учетом степени истощения определенного уровня и кратности вырождения валентной зоны кремния. В сильно компенсированных образцах энергии E_i определялись по наклону зависимостей $p = f(10^3/T)$. Концентрации различных РД после каждого цикла ИО вычислялись с помощью ступенчатых зависимостей $p = f(10^3/T)$ и $p = f(T_{\text{ann}})$ в интервалах 77–300 К и 100–500 $^\circ\text{C}$ соответственно. Ошибка измерения этих величин не превышала 10%.

3. Результаты исследований и их обсуждение

На рисунке показаны изменения концентрации основных носителей тока p и концентрации различных РД $N_{r,d}$

¹ E-mail: tpagava@gtu.ge



Зависимость концентрации дырок p (1) и некоторых радиационных дефектов N_{rd} (2–7) от температуры изохронного отжига в облученных электронами кристаллах p -Si. 5 — H_1 , H_2 ; 6 — D_1 , D_2 .

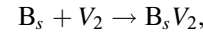
в зависимости от температуры ИО T_{ann} (кривые 1 и 2–7 соответственно).

В интервале $T_{ann} = 170–200^\circ\text{C}$ резкое увеличение p связано с отжигом дефектов с уровнем энергии $E_v + 0.45$ эВ и с концентрацией $N_{rd} \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (см. рисунок, кривые 1, 2). Этот уровень принадлежит комплексу $V + B$ [7].

В интервале $T_{ann} = 270–280^\circ\text{C}$ отжигаются дефекты с уровнем энергии $E_v + 0.26$ эВ. Природа этих дефектов неизвестна (рисунок, кривая 3).

В области $T_{ann} = 270–300^\circ\text{C}$ отжигаются дефекты с уровнем энергии $E_v + 0.28$ эВ и концентрацией $\sim 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (рисунок, кривая 4). Судя по величинам T_{ann} и E_i этими центрами являются дивакансии [4]. В процессе отжига дивакансий наблюдается резкое увеличение концентрации дефектов с уровнем $E_v + 0.22$ эВ (рисунок, кривая 5). Концентрации исчезнувших дивакансий и образующихся при этом центров с уровнем $E_v + 0.22$ эВ (H -центры) равны. Это означает, что H -центры содержат дивакансии. H -центры, которые образуются при отжиге дивакансий, являются глубокими донорами ($E_v + 0.22$ эВ) и не могут изменить концентрацию p при комнатной температуре. Требуется предложить такой механизм отжига дивакансий, при котором p должна расти, хотя в интервале $T_{ann} = 270–290^\circ\text{C}$ $p = \text{const}$. По-видимому, комплексы, которые образуются при отжиге дивакансий, содержат атомы бора. Концентрация заблокированных атомов бора N_B в процессе образования H -центров и основных носителей тока p , которые образуются при отжиге дивакансий, равны. Поэтому в интервале $T_{ann} = 270–290^\circ\text{C}$ изменения концентрации $\Delta p = 0$. Полученные результаты подтверждают высказанное авторами [8] мнение о существовании в облученных кристаллах p -Si комплексов BV_2 , которые отжигаются в интервале температур $350–400^\circ\text{C}$.

Энергия активации процесса миграции дивакансий составляет ~ 1.3 эВ, а энергия связи дефекта равна 1.47 эВ [4,9], поэтому дивакансия по кристаллу может мигрировать без распада. Также известно, что комплексы BV отжигаются в области 180°C (рисунок, кривая 2) и поэтому не могут участвовать в процессе формирования комплексов B_sV_2 в температурном интервале $270–300^\circ\text{C}$. Исходя из вышеизложенного можно предположить, что комплексы BV_2 образуются (или дивакансии отжигаются) по реакции



а не при последовательном захвате узловым бором генерируемых облучением вакансий, как это предполагается в работе [8].

Как видно из рисунка, H -центры отжигаются в два этапа: в интервалах $T_{ann} = 300–320^\circ\text{C}$ и $360–440^\circ\text{C}$. Начальная концентрация H -центров равняется $3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Такое же количество центров отжигается на первом этапе отжига H -центров. На втором этапе отжига концентрация распавшихся центров совпадает с концентрацией образующихся при отжиге дивакансий комплексов BV_2 ($8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Полученные результаты позволяют предположить, что комплексы BV_2 образуются в интервале $270–300^\circ\text{C}$ при отжиге дивакансий и диссоциируют в области 400°C (центры H_1), а центры, которые отжигаются на первом этапе, по энергии ионизации совпадают с комплексом BV_2 и отжигаются в интервале температур $T_{ann} = 300–320^\circ\text{C}$ (центры H_2).

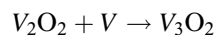
Как видно из рисунка (кривая 6), в два этапа отжигаются также дефекты с уровнем $E_v + 0.2$ эВ (D -центры): $T_{ann} = 270–290$ и $340–450^\circ\text{C}$. Начальная концентрация D -центров равняется $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Отрицательный отжиг D -центров совпадает с отжигом центров H_2 , и изменение их концентраций составляет $\Delta N_D \approx \Delta N_{H_2} \approx 3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. На первом этапе концентрация отожженных дефектов $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

По-видимому, в процессе облучения в исследуемых образцах образуются центры D_1 (концентрация $N_{D_1} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$) и D_2 (концентрация $N_{D_2} = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) с одинаковой энергией уровня $E_v + 0.20$ эВ. Центры D_1 отжигаются в интервале $T_{ann} = 270–290^\circ\text{C}$. В области распада H_2 наблюдается отрицательный отжиг D_2 , и в интервале $T_{ann} = 340–450^\circ\text{C}$ они окончательно отжигаются. В области отрицательного отжига центров D_2 $p = \text{const}$ (рисунок, кривая 1). Это позволяет предположить, что увеличение концентрации центров D_2 в процессе ИО происходит в результате взаимодействия между фрагментами распада центров H_2 и атомами легирующей примеси (B). В процессе формирования центров D_2 не исключено также участие фоновых примесей — C и O [10,11]. В интервале $T_{ann} = 320–400^\circ\text{C}$ отжигаются дефекты с уровнем $E_v + 0.4$ эВ (рисунок, кривая 7), которые принадлежат комплексу V_2O_2 [6]. При отжиге этих дефектов не

Параметры ряда дефектов

Тип дефекта	E_i , эВ	T_{ann} , °C	Возможная идентификация
H_1	0.22 ± 0.01	360–440	BV_2
H_2	0.22 ± 0.01	300–320	–
D_1	0.20 ± 0.01	270–290	–
D_2	0.20 ± 0.01	340–450	$V + O + V?$

наблюдается отрицательного отжига других существующих дефектов. По-видимому, они перестраиваются в другие глубокие дефекты по реакциям



или



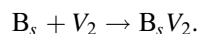
которые образуются в процессе термообработки и отжигаются при более высоких температурах [4,6].

Изменение концентраций дырок после отжига комплексов V_2O_2 связано с распадом или образованием глубоких центров с высокой термостабильностью [6].

Основные параметры наблюдаемых РД с одинаковой E_i и их возможная идентификация приведены в таблице.

4. Заключение

Для идентификации различных радиационных дефектов в кристаллах *p*-Si изучены пределы термической стабильности и энергетический спектр этих дефектов. Проведенные исследования показали, что дефекты с уровнем энергий $E_v + (0.22 \pm 0.01)$ эВ отжигаются в два этапа: $T_{\text{ann}} = 300\text{--}320^\circ\text{C}$ (H_2) и $360\text{--}440^\circ\text{C}$ (H_1). На первом этапе отжигается неизвестный центр, который образуется в процессе облучения, а на втором — комплекс BV_2 , который образуется в процессе отжига дивакансий, в области 290°C по реакции



Два неизвестных дефекта (D_1 и D_2) имеют также одинаковую энергию ионизации (0.2 ± 0.01) эВ, они отжигаются при $T_{\text{ann}} = 270\text{--}290^\circ\text{C}$ (D_1) и $340\text{--}450^\circ\text{C}$ (D_2). При распаде центров H_2 в интервале $T_{\text{ann}} = 290\text{--}320^\circ\text{C}$ наблюдается отрицательный отжиг центров D_2 . Предположительно, D_2 -центры являются многокомпонентными комплексами и состоят из вакансий, фоновых и легирующих примесей.

Список литературы

- [1] З.В. Башелейшвили, Т.А. Пагава, В.В. Санадзе. *Тр. ГПИ. Сер. Физика твердого тела* (Тбилиси, 1979) с. 73.
- [2] И.Ф. Медведева, Л.Ф. Макаренко, В.П. Маркевич, Л.И. Мушин. *Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук*, № 3, 19 (1991).

- [3] Н.И. Бояркина, С.А. Смагулова. *ФТП*, **38**, 513 (2004).
- [4] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (М., Наука, 1990).
- [5] В.И. Губская, П.В. Кучинский, В.М. Ломако. *ФТП*, **20**, 1055 (1986).
- [6] Т.А. Пагава. *ФТП*, **38**, 665 (2004).
- [7] И.Д. Конозенко, А.К. Семенюк, В.И. Хиврич. *Радиационные эффекты в кремнии* (Киев, Наук. думка, 1974).
- [8] P.F. Lugakov, T.A. Lukashevich. *Phys. Status Solidi A*, **85**, 441 (1984).
- [9] A.O. Evwaraye, E. Sun, *J. Appl. Phys.*, **47**, 3376 (1976).
- [10] М.Ю. Барабаненков, А.В. Леонов, В.Н. Мордкович, Н.М. Омеляновская. *ФТП*, **33**, 897 (1999).
- [11] F.P. Anre, P.M. Mooney. *J. Appl. Phys.*, **55**, 984 (1984).

Редактор Л.В. Шаронова

Annealing peculiarities for radiation-induced defects in *p*-Si crystals

T.A. Pagava

Georgian Technical University, RCSR,
0175 Tbilisi, Georgia

Abstract The *p*-Si single crystals with the hole concentration of $p = 6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ prepared by the Czochralski method have been studied. The specimens were irradiated with 8 MeV electrons at a temperature of 300 K. Then they were isochronically annealed within the $T_{\text{ann}} = 100\text{--}500^\circ\text{C}$ interval. The Hall measurements were carried out within the interval 77–300 K. The annealing of divacancies has been shown to take place in form of their conversion into B_sV_2 complexes through the $B_s + V_2 \rightarrow B_sV_2$ reaction. The level of $E_v + 0.22 \text{ eV}$ attributes to the B_sV_2 complex which is annealed within the interval 360–440°C. The defects with the level of $E_v + 0.2 \text{ eV}$ annealed within the interval $T_{\text{ann}} = 340\text{--}450^\circ\text{C}$ are proposed to be multicomponent complexes containing both doping and background impurities.