

Влияние зарядового состояния неравновесных вакансий на природу радиационных дефектов в кристаллах *n*-Si

© Т.А. Пагава[¶]Грузинский технический университет, РЦСИ,
0175 Тбилиси, Грузия

(Получена 21 июня 2004 г. Принята к печати 9 августа 2004 г.)

Цель работы заключается в изучении влияния зарядового состояния неравновесных вакансий на процессы, происходящие во время облучения и термообработки в кристаллах кремния. Образцы *n*-Si, полученные методом зонной плавки, с концентрацией электронов $N = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ облучались протонами с энергией 25 МэВ при 300 К. Облученные кристаллы исследовались методом Холла в интервале 77–300 К. Показано, что природа и энергетический спектр радиационных дефектов в кристаллах *n*-Si в основном определяются зарядовым состоянием неравновесных вакансий.

1. Введение

Используя метод локального облучения с последующим измерением объемной фотодс вдоль облученной части образца, авторы работ [1–3] показали, что первичные радиационные дефекты (РД) в кристаллах *p*-Si при 300 К заряжены положительно. В кристаллах *n*-Si межзельные атомы являются носителями положительного заряда, а вакансии — отрицательного.

В процессе облучения неравновесные вакансии вступают в квазихимические реакции с легирующими (фосфор, бор) или фоновыми (кислород, углерод) примесями, а также между собой. В результате образуются вторичные РД с высокой термостабильностью, которые до 600°C определяют физические свойства облученного кристалла (при этой температуре вторичные РД окончательно отжигаются) [4].

Цель данной работы заключается в изучении влияния зарядового состояния первичных РД, в частности вакансий, на природу и энергетический спектр вторичных РД.

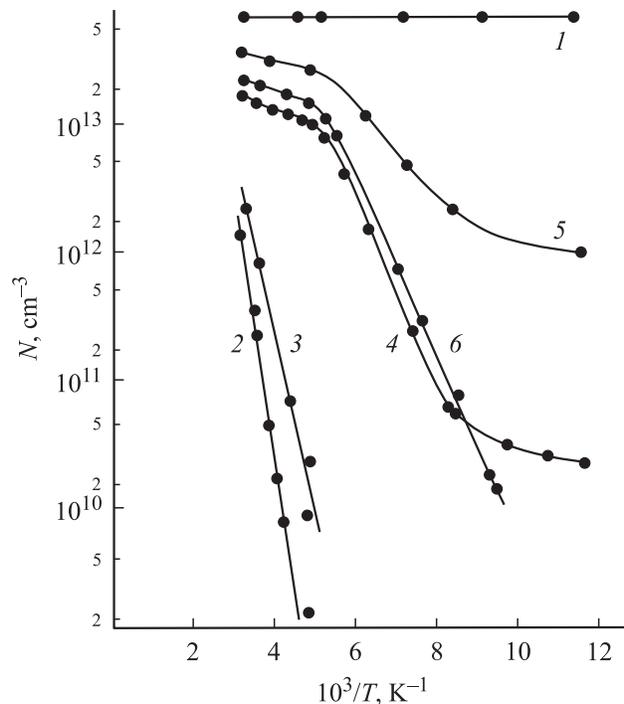
2. Техника эксперимента

Исследовались кристаллы *n*-Si, полученные методом зонной плавки, с концентрацией электронов $N = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Концентрации фоновых примесей (кислорода, N_O , и углерода, N_C), определенные по спектрам инфракрасного поглощения, равны $N_O \approx N_C \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Плотность дислокаций роста определялась по ямкам травления и не превышала $10^3\text{--}10^4 \text{ см}^{-2}$. Исследуемые образцы размерами $1 \times 3 \times 10 \text{ мм}^3$ облучались протонами с энергией 25 МэВ. Плотность потока протонов составляла $\varphi = 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Концентрация электронов N измерялась в интервале температур $T = 77\text{--}300 \text{ К}$. Измерения проводились компенсационным методом в магнитном поле 10 кЭ. В сильно компенсированных образцах энергии уровней дефектов ΔE определялись по наклону кривых зависимостей $N = f(10^3/T)$. Ошибка определения этих величин не превышала 10%.

[¶] E-mail: tpagava@gtu.edu.ge

3. Результаты

В исходных образцах зависимость $N = f(1/T)$ в области $T = 77\text{--}300 \text{ К}$ соответствует полной ионизации мелких доноров (атомов фосфора P): $N \approx \text{const} = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (см. рисунок, кривая 1). После облучения протонами дозой $\Phi = 2.7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ температурная зависимость концентрации электронов соответствует истощению акцепторных центров $E_c - (0.17 \pm 0.01) \text{ эВ}$ (см. рисунок, кривая 6). В результате облучения кристаллов дозой $\Phi = 8.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ на кривых зависимости $N = f(1/T)$ наблюдается прямолинейный участок, соответствующий истощению акцепторных центров



Зависимость концентрации электронов от температуры в кристаллах *n*-Si до облучения (1) и после облучения протонами с энергией 25 МэВ (2–6). $\Phi = 8.1 \cdot 10^{12}$ (2–5) и $\Phi = 2.7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (6). $T_{\text{ann}} = 150$ (4) и 300°C (5).

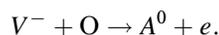
$E_c - (0.41 \pm 0.02)$ эВ (см. рисунок, кривая 3) или связанный с существованием акцепторных центров с уровнем $E_c - (0.54 \pm 0.02)$ эВ (см. рисунок, кривая 2). Как известно [5,6], акцепторный уровень $E_c - 0.17$ эВ принадлежит А-центрам, уровень $E_c - 0.41$ эВ Е-центрам или дивакансиям V_2 , а уровень $E_c - 0.54$ эВ неизвестно центру. Следует отметить, что принадлежность последнего уровня V_2 поставлена под сомнение в [7]. На рисунке кривые 4 и 5 соответствуют истощению А-центров и получены для образцов, облученных дозой $\Phi = 8.1 \cdot 10^{12}$ см⁻² с последующим отжигом при температурах $T_{\text{ann}} = 150$ и 300°C .

4. Обсуждение результатов

В кристаллах *n*-Si, облученных электронами с энергией 2 МэВ, эффективность образования Е-центров η_E в 1.3 раза больше, чем аналогичная величина для А-центров η_A , несмотря на то что N_O примерно на 3 порядка больше по сравнению с концентрацией фосфора N_P . По мнению авторов работы [8] высокая эффективность введения Е-центров при 300 К обусловлена влиянием зарядового состояния вакансий на скорость их миграции, а также кулоновским взаимодействием электрона, захваченного вакансией, с положительно заряженным донором P^+ .

Исходя из изложенного можно заключить, что зарядовое состояние первичных РД определяет происходящие в кристаллах *n*-Si процессы при облучении или изохронном отжиге (ИО).

Как известно, в процессе облучения при 300 К А-центры образуются по реакции



А-центрам соответствует уровень с энергией $E_A = E_c - 0.17$ эВ. При 300 К они находятся в электронейтральном состоянии и могут вступать в квазихимическую реакцию с V^- : $A^0 + V^- \rightarrow (V_2 + O)^-$. Этому центру соответствует уровень $E_{V_2+O} = E_c - 0.5$ эВ. При 300 К они заряжены отрицательно, и в силу электростатического взаимодействия вступление этих центров в реакцию с V^- маловероятно.

Поскольку Е-центры при комнатной температуре заряжены отрицательно (энергия уровня $E_E = E_c - 0.41$ эВ), образование дивакансионного центра с присоединением V^- практически невозможно.

Также затруднено присоединение V^- к V_2 , так как $E_{V_2} = E_c - 0.39$ эВ. При 300 К и они заряжены отрицательно. Следует отметить, что образование V_2 диффузионным механизмом в процессе облучения при 300 К из отрицательных моновакансий маловероятно. По-видимому, они образуются как первичные дефекты.

Действительно, как видно из рисунка, в *n*-Si, полученном зонной плавкой, при 300 К в процессе облучения протонами образуются А- и Е-центры, дивакансии и комплексы $V_2 + O$. Уровень $E_c - 0.5$ эВ, соответствующий комплексу $(V_2 + O)$, нам не удалось обнаружить,

хотя о существовании этого дефекта можно судить по увеличению концентрации электронов при 250 К в процессе ИО в области температур $T_{\text{ann}} \geq 500^\circ\text{C}$ [8].

5. Заключение

Таким образом, природа и энергетический спектр вторичных РД в кристаллах *n*-Si определяются зарядовым состоянием неравновесных вакансий, которое меняется в зависимости от дозы и температуры облучения исследуемых образцов.

Автор выражает благодарность проф. З.К. Саралидзе за обсуждение результатов и полезные советы.

Список литературы

- [1] Л.С. Милевский, В.С. Гарнык. ФТП, **13**, 1369 (1979).
- [2] Т.А. Пагава, З.В. Башелейшвили, В.С. Гарнык, Э.Р. Кутелия, Н.И. Майсурадзе. УФЖ, **48**, 576 (2003).
- [3] З.В. Башелейшвили, Т.А. Пагава. ФТП, **33**, 924 (1999).
- [4] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., Радио и связь, 1981) ч. 1, гл. 2, с. 82.
- [5] И.Д. Конозенко, А.К. Семенюк, В.И. Хиврич. *Радиационные дефекты в кремнии* (Киев, Наук. думка, 1974) ч. 1, гл. 2, с. 35.
- [6] P.F. Lugakov, V.V. Lukyanitsa. Phys. Status Solidi A, **84**, 457 (1984).
- [7] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (М. Наука, 1990) гл. 3, с. 76.
- [8] Л.С. Милевский, Т.А. Пагава. ФТП, **10**, 1287 (1976).

Редактор Л.В. Шаронова

Effect of charge state of nonequilibrium vacancies on the nature of radiation defects in *n*-Si crystals

T.A. Pagava

Georgian Technical University,
0175 Tbilisi, Georgia

Abstract Silicon crystals grown by the zone melting method and having the electron concentration of 6×10^{13} cm⁻³ were investigated. The samples were irradiated with 25 MeV protons at 300 K. The irradiated crystals were studied by the Hall method in the temperature range 77–300 K. It has been shown that the nature and the energy spectrum of radiation defects in *n*-Si crystals were mainly determined by the charge state of nonequilibrium vacancies.