

Влияние температуры облучения на эффективность введения мультивакансионных дефектов в кристаллах n -Si

© Т.А. Пагава[†]

Грузинский технический университет,
0175 Тбилиси, Грузия

(Получена 13 июля 2005 г. Принята к печати 18 декабря 2005 г.)

С целью изучения влияния температуры облучения T_{irr} на процесс дефектообразования исследовались монокристаллы n -Si. Исследуемые образцы облучались электронами с энергией 2 МэВ в интервале $T_{\text{irr}} = 20\text{--}400^\circ\text{C}$. Изохронный отжиг облученных кристаллов проводился в интервале $80\text{--}600^\circ\text{C}$. Измерения проводились методом Холла в интервале $77\text{--}300\text{ K}$. Показано, что эффективность введения радиационных дефектов с высокой термостабильностью ($T_{\text{ann}} \geq 350^\circ\text{C}$) достигает максимума при $T_{\text{irr}} = 150^\circ\text{C}$. Наблюдаемый эффект объясняется образованием мультивакансионных дефектов PV_2 на базе ионизированных E -центров и неравновесных вакансий.

PACS: 71.55.Cn, 72.15.Gd, 61.80.-x, 61.72.Cc

1. Введение

В процессе облучения в кристаллах Si образуются первичные радиационные дефекты (ПРД), которые являются носителями электрического заряда [1,2]. В n -Si, легированном фосфором, неравновесные вакансии, вступая в квазихимическую реакцию с легирующими (фосфор) или с фоновыми (кислород, углерод) примесями, а также между собой, образуют вторичные радиационные дефекты (ВРД). Эффективность введения ВРД (η_{RD}) зависит от концентрации и зарядового состояния вступающих в квазихимическую реакцию ПРД и примесных атомов. В свою очередь зарядовое состояние компонентов ВРД зависит от условий эксперимента (температура облучения T_{irr} и интенсивность облучения) [3,4].

В работе [5] показано, что при больших дозах облучения Φ или в процессе изохронного отжига (ИО) в кристаллах n -Si образуются комплексы PV_2 , которые отжигаются в температурном интервале $T_{\text{ann}} = 400\text{--}500^\circ\text{C}$. Они являются акцепторами с энергией ионизации $\Delta E = E_v + 0.34\text{ эВ}$. По-видимому, образование этих дефектов связано с изменением зарядового состояния E -центров и неравновесных вакансий.

Изменение зарядового состояния радиационных дефектов (РД) происходит не только в процессе изохронного отжига, но и при изменении T_{irr} , что приводит к изменению эффективности введения различных РД [2,6].

В данной работе исследуется влияние T_{irr} на кинетику образования мультивакансионных, фосфорсодержащих дефектов в кристаллах n -Si.

2. Эксперимент

Для исследования использовались монокристаллы n -Si, полученные методом зонной плавки, с концентрацией электронов $N = 6 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$. Концентрация кис-

лорода в них ($N_0 = 2 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$) была установлена по измерению ИК-поглощения. Плотность ростовых дислокаций, измеренная по ямкам травления, не превышала 10^4 см^{-2} . Образцы, вырезанные в форме брусков размером $1 \times 3 \times 10\text{ мм}$ с наибольшей гранью в плоскости (111), облучались электронами с энергией $E_{\text{irr}} = 2\text{ МэВ}$ в интервале температур $20\text{--}400^\circ\text{C}$. Доза Φ набиралась при интенсивности облучения $\varphi = 5 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}\text{ с}^{-1}$. Изохронный отжиг облученных образцов проводили в интервале $T_{\text{ann}} = 80\text{--}600^\circ\text{C}$. Температуры T_{ann} и T_{irr} контролировались хромель-алюмелевой термопарой. Исследования проводились методом Холла. Эдс Холла измерялась на постоянном токе в магнитном поле 10 кЭ , в интервале $77\text{--}300\text{ K}$. Температура измерялась медь-константановой термопарой. Концентрации A -, E -центров и дивакансий V_2 (N_A , N_E и N_{V_2}) измерялись по кривым зависимостей $N(10^3/T)$ и $N(T_{\text{ann}})$ [3,6]. Ошибка измерений этих величин не превышала 10%.

В качестве примера на рис. 1 показаны изменения концентрации электронов N от температуры после облучения ($\Phi = 2 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$) при $T_{\text{irr}} = 150^\circ\text{C}$ (кривая 2) и ИО при 350°C (кривая 3) и 600°C (кривая 4). После отжига при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ величина N полностью восстанавливается. Значения N_A определяли при помощи зависимости 2: $N_A = N_{300} - N_{77}$. $N_{V_2} = \Delta N$ при 300 K после ИО в интервале $200\text{--}350^\circ\text{C}$. По изменению N после ИО при $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$ можно судить о концентрации РД, которые отжигаются при $T_{\text{ann}} \geq 350^\circ\text{C}$ (например, $V_2 + O$). N_{300} — концентрация электронов при $T = 300\text{ K}$, N_{77} — при 77 K .

3. Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 приведены изменения эффективностей введения дефектов: A -центров (η_A , кривая 1), дивакансий V_2 (η_{V_2} , кривая 2), E -центров (η_E , кривая 3) и сложных

[†] E-mail: tpagava@gtu.edu.ge

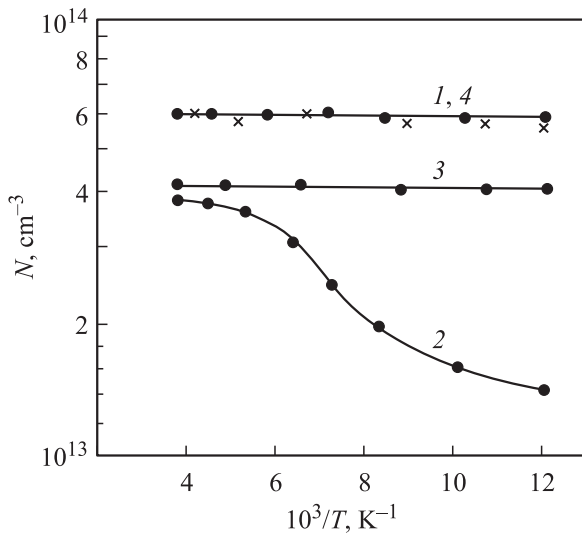


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации основных носителей тока в кристаллах *n*-Si, облученных электронами с энергией $E_{\text{irr}} = 2$ МэВ. 1 — до облучения, 2 — после облучения при 150°C ($\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$), 3 — после отжига при $T_{\text{ann}} = 350^\circ\text{C}$, 4 — $T_{\text{ann}} = 600^\circ\text{C}$.

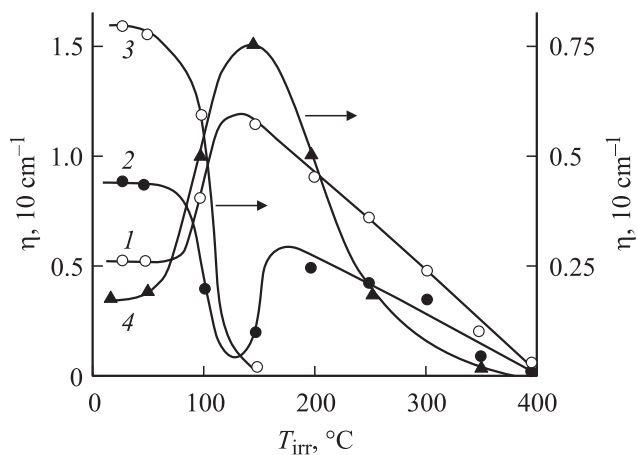


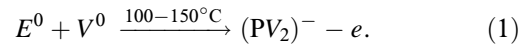
Рис. 2. Зависимости эффективности введения дефектов от температуры облучения в кристаллах *n*-Si, облученных электронами с энергией $E_{\text{irr}} = 2$ МэВ. 1 — А-центры (η_A), 2 — дивакансии (η_{V_2}), 3 — Е-центры (η_E), 4 — дефекты с высокой термостабильностью (η_{TSC}).

комплексов с высокой термостабильностью (η_{TSC} , кривая 4) в зависимости от T_{irr} . Как видно из рис. 2, при $T_{\text{irr}} = 150^\circ\text{C}$ $\eta_E = 0$, а кривые зависимостей $\eta_{\text{TSC}}(T_{\text{irr}})$ и $\eta_A(T_{\text{irr}})$ проходят через максимум (кривые 4 и 1). Кривая 2 в области $100\text{--}150^\circ\text{C}$ проходит через минимум, а в интервале $170\text{--}400^\circ\text{C}$ монотонно уменьшается.

Уменьшение η_E при увеличении T_{irr} , по-видимому, связано с двумя процессами:

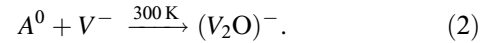
- 1) с диссоциацией комплекса (P + V) на фрагменты P^+ и V^0 ,
- 2) с превращением неотожженного нейтрального Е-центра в более сложный и термостойкий дефект PV_2

по реакции



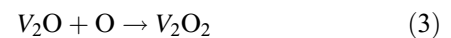
По-видимому, определенная часть неравновесных вакансий, которые не были захвачены нейтральными Е-центрами, расходуется на формирование А-центров [6].

На базе А-центров, по-видимому, образуются комплексы V_2O по реакции



Комплексу V_2O в запрещенной зоне соответствует уровень $E_c - 0.5 \pm 0.05$ эВ [7]. При $T = 300$ К комплексы V_2O и моновакансии заряжены отрицательно. В силу электростатического отталкивания продолжение реакции (2) с образованием комплекса V_3O маловероятно [8].

Немонотонность зависимости $\eta_{V_2}(T_{\text{irr}})$ можно объяснить изменением зарядового состояния моновакансий в зависимости от T_{irr} . При низких температурах облучения ($20\text{--}80^\circ\text{C}$) по мере накопления Е-центров и удаления электронов из зоны проводимости — вплоть до $T_{\text{irr}} = T_E$ (T_E — температура деионизации и диссоциации Е-центров) доля нейтральных вакансий растет и пересыщение объема кристалла по вакансиям снимается образованием V_2 . При диссоциации Е-центров доля отрицательных вакансий в объеме растет. В этой области T_{irr} эффективность образования дивакансий η_{V_2} проходит через минимум (рис. 2, кривая 2), видимо, благодаря электростатическому отталкиванию заряженных вакансий, которые все больше расходуются на образование А-центров. Дальнейшее повышение T_{irr} смещает уровень Ферми к середине запрещенной зоны, начинается перезарядка вакансий ($V^- \rightarrow V^0 + e$), доля нейтральных вакансий растет и вновь увеличивается η_{V_2} . Этими процессами можно объяснить существование максимумов на кривых 1 и 4 на рис. 2, в области $T_{\text{irr}} = 150^\circ\text{C}$. При более высоких температурах ($T_{\text{irr}} \gtrsim 150\text{--}300^\circ\text{C}$) преобладает диссоциация V_2 , V_2O и А-центров или их преобразование в более стабильные комплексы по реакциям



и



которые отжигаются при 410 и 470°C соответственно [7,9].

При $T_{\text{irr}} = 400^\circ\text{C}$ $\eta_E = \eta_A = 0$ (рис. 2, кривые 1, 2). При этой же температуре

$$\eta_{\text{TSC}} = \eta_{PV_2} + \eta_{V_2O} + \eta_{V_2O_2} + \eta_{V_3O} = 0,$$

несмотря на то что температура отжига этих комплексов $T_{\text{ann}} \gtrsim 400^\circ\text{C}$ [5,7]. Это свидетельствует о том, что они образуются только на базе Е- и А-центров соответственно по реакциям (1)–(4).

Таким образом, увеличение η_{TSC} в интервале $T_{\text{irr}} = 20\text{--}150^\circ\text{C}$ связано с образованием комплексов PV_2

на базе нейтральных E -центров, а уменьшение эффективности введения РД с высокой термостабильностью η_{TSC} в интервале $150\text{--}400^\circ\text{C}$ можно объяснить уменьшением η_E и η_A , на базе которых по реакциям (1)–(4) образуются термостойкие комплексы PV_2 , V_2O , V_2O_2 и V_3O , которые отжигаются при $T_{\text{ann}} \gtrsim 400^\circ\text{C}$.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что увеличение температуры облучения $\text{Si:P } T_{\text{irr}}$ приводит к росту эффективности введения мультивакансионных фосфорили кислородсодержащих РД, что в свою очередь может привести к увеличению радиационной стойкости кристаллов $n\text{-Si}$, так как при образовании дефектов типа PV_2 , V_2O , V_2O_2 и V_3O расходуется в 2 или 3 раза больше неравновесных вакансий, чем при образовании E - или A -центров. Следует отметить, что образование комплекса PV_2 происходит на базе нейтрального E -центра, а комплексы V_2O , V_2O_2 и V_3O образуются на базе A -центров.

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] П.Ф. Лугаков, В.В. Лукьяница. ФТП, **20**, 742 (1986).
- [4] Т.А. Пагава, З.В. Башелейшвили. ФТП, **36**, 1157 (2002).
- [5] П.Ф. Лугаков, Т.А. Лукашевич. ФТП, **22**, 2071 (1988).
- [6] Т.А. Пагава. ФТП, **36**, 1159 (2002).
- [7] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (М., Наука, 1990).
- [8] Т.А. Пагава. ФТП, **39**, 424 (2005).
- [9] Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин, Л.И. Хируненко, В.И. Яшник, Н.В. Абросимов, В. Шрёдер, М. Хёне. ФТП, **34** 1030 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

The Influence of the irradiation temperature on efficiency of introducing multi-vacancy defects in $n\text{-Si}$ crystals

T.A. Pagava

Georgian Technical University,
0175 Tbilisi, Georgia

Abstract To study the influence of irradiation temperature T_{irr} on the defect formation, the $n\text{-Si}$ single crystals has been investigated. Experimental specimens were irradiated by the electrons with energy of 2 MeV in an interval of $T_{\text{irr}} = 20\text{--}400^\circ\text{C}$. The irradiated crystals were isochronously annealed in an interval of $80\text{--}600^\circ\text{C}$. Hall measurements were carried out in an interval of $77\text{--}300\text{ K}$. The efficiency of introducing thermally high stable ($T_{\text{ann}} \geq 350^\circ\text{C}$) defects has been shown to have the maximum at $T_{\text{irr}} = 150^\circ\text{C}$. The observed effect is explained by the formation of multi-vacancy defects PV_2 from the ionized E -centers and non-equilibrium vacancies.