

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛУЧЕНИЯ ( $T_{\text{обл}} = 320\text{--}580\text{ K}$ )  
БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ**

**И. Ф. Медведева<sup>1</sup>, Л. И. Мурин<sup>2</sup>, В. П. Маркевич<sup>3</sup>,  
Ф. П. Коршунов<sup>2</sup>, С. Б. Ластовский<sup>2</sup>, В. Е. Гусаков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», г. Минск, Беларусь

<sup>3</sup>The University of Manchester, Manchester M60 1QD, United Kingdom

E-mail: medvedeva@iftp.bas-net.by

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из способов регулирования динамических характеристик приборов является облучение их электронами или  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ . Сущность этого метода заключается в использовании радиационных дефектов (РД) в роли центров рекомбинации неосновных носителей заряда. Тип и скорость введения РД определяется рядом факторов, в том числе и температурой облучения. С точки зрения радиационной технологии, наибольший интерес представляют дефекты, обладающие высокой термической стабильностью. Такие РД могут создаваться как в процессе высокотемпературного отжига кристаллов Si, облученных при комнатной температуре, так и при так называемом горячем облучении, т.е. в процессе облучения при повышенных температурах. При этом облучение при более высоких температурах, как правило, не эквивалентно низкотемпературному облучению с последующим отжигом. При повышенных температурах облучения могут происходить существенные изменения как в спектре радиационных дефектов, так и в эффективности формирования дефектов конкретного типа [1-3]. Следует отметить, что имеющиеся в литературе данные по влиянию температуры облучения быстрыми электронами на эффективность образования РД в кремнии весьма противоречивы и относятся в основном к материалам  $n$ -типа проводимости [1-2]. В настоящей работе нами методами эффекта Холла и DLTS-спектроскопии исследовалось влияние температуры облучения быстрыми электронами на эффективность образования комплексов вакансия-кислород (VO) и комплексов междоузельный углерод- междоузельный кислород ( $\text{C}_i\text{O}_i$ ) в кристаллах  $n$ - и  $p$ -Si при  $T_{\text{обл}} = 320\div 580\text{ K}$  (в области термической стабильности данных РД).

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Исследовались кристаллы кремния  $n$ - и  $p$ -типа ( $N_p = 7,5 \cdot 10^{13}$ ,  $N_B = 5 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$ ), полученные методом Чохральского (Cz-Si), а также эпитаксиальные  $n^+p$ - и  $p^+n$ -структуры.

Исследуемые образцы и структуры облучались быстрыми электронами ( $E = 6$  МэВ) в интервале температур 320-580 К флюенсами  $(1-8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (интенсивность  $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ). Измерения температурных зависимостей концентрации носителей заряда (ТЗКН) в кристаллах Si проводились методом эффекта Холла в диапазоне температур 77÷400 К. Спектры DLTS облученных  $p$ - $n$ -структур измерялись также в диапазоне температур 77÷400 К.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Данные, полученные методом эффекта Холла.** На рисунке 1 показаны температурные зависимости концентрации носителей заряда для исходного образца  $n$ -Si (кривая 1), облученного при 320 К (кривая 2), отожженного при 420 К (кривая 2'), и облученного при 580 К (кривая 3). Проведенный анализ ТЗКН показал, что основными РД после облучения при 320 К являются комплексы собственный междоузельный атом Si - кислородный димер ( $\text{IO}_2$ ) [4], VO и дивакансии ( $\text{V}_2$ ). Комплексы  $\text{IO}_2$  (уровень  $E_c - 0,125$  эВ) отжигаются при  $T = 370-400$  К (кривая 2'). В кристаллах, облученных при  $T_{\text{обл}} = 580$  К, наблюдается введение комплексов VO и  $\text{V}_2\text{O}$ . Из сравнительного анализа ТЗКН, представленных кривыми 2' и 3, получены значения эффективности введения  $\eta$  комплексов VO для различных температур облучения:  $\eta = 0,22 \text{ см}^{-1}$  при  $T_{\text{обл}} = 320$  К и  $\eta = 0,32 \text{ см}^{-1}$  при  $T_{\text{обл}} = 580$  К.

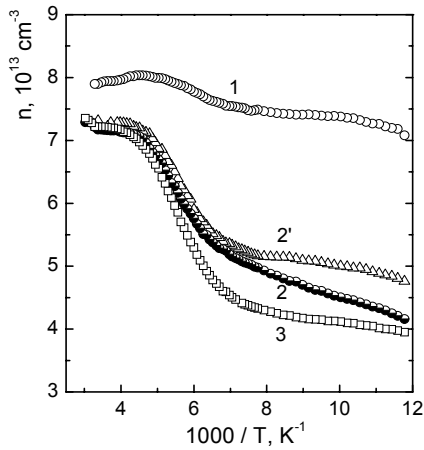


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации носителей в образцах Cz-Si, облученных электронами с энергией 6 МэВ дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

$E_v + 0,31$  эВ (комплекс  $\text{V}_i\text{C}_s$ ).

Анализ экспериментальных данных показывает, что изменение  $T_{\text{обл}}$  приводит к заметным изменениям амплитуды основных DLTS-пиков при облучении структур одинаковым флюенсом электронов  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Это свидетельствует о существ-

**Данные DLTS-спектроскопии.** На рисунке 2, представлены DLTS-спектры  $n^+$ - $p$ -структур после облучения электронами флюенсом  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  при температурах 340 К и 490 К. В результате облучения при 340 К в базовую  $p$ -область вводятся РД, для которых характерны максимумы  $H1$  и  $H2$ . Ловушкам  $H1$  и  $H2$  соответствуют глубокие уровни донорного типа у  $E_v + 0,18$  эВ и  $E_v + 0,36$  эВ. В целом вид DLTS спектра типичен для облученного электронами  $p$ -Cz-Si. Уровни  $H1$  и  $H2$  принадлежат дивакансии  $\text{V}_2(+/0)$  и комплексу углерод внедрения - кислород внедрения  $\text{C}_i\text{O}_i(+/0)$ .

С ростом температуры облучения наблюдаются изменения DLTS спектров. При  $T_{\text{обл}} > 470$  К на спектрах появляется пик ловушки с глубоким уровнем

венной зависимости скорости введения РД от температуры облучения: наблюдается увеличение скорости генерации РД с ростом  $T_{обл}$ . Аналогичное увеличение скорости генерации  $C_iO_i$  имеет место и в Si  $n$ -типа

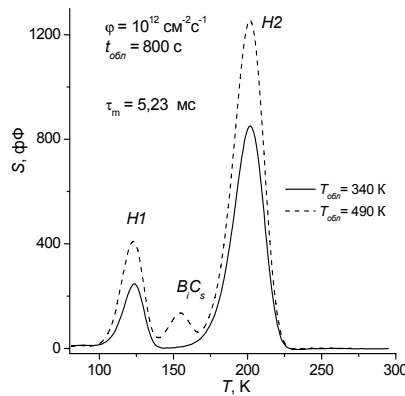


Рис. 2. DLTS-спектры облученного флюенсом электронов  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  образца при  $T$  облучения 340 и 490 К

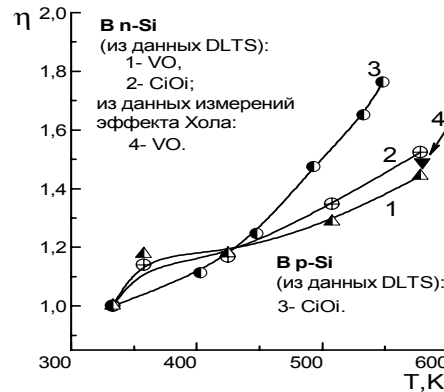


Рис. 3. Зависимости относительных эффективностей введения РД от температуры облучения

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зависимости эффективностей введения основных РД (А-центров и комплексов  $C_iO_i$ ) в кристаллах Si от температуры облучения приведены на рисунке 3: наблюдается увеличение эффективности введения РД как междуузельного, так и вакансионного типа. Зависимость скорости введения дефектов от температуры облучения может быть обусловлена влиянием температуры как на первичные, так и на вторичные процессы радиационного дефектообразования.

С ростом  $T_{обл}$  перестают вводиться РД с низкой термической стабильностью. В процессе электронного облучения происходит перераспределение стоков для первичных вакансий и междуузлий и, соответственно, увеличение скорости введения более термостабильных комплексов. Проведенный изохронный отжиг кристаллов и структур, облученных при комнатной температуре, показал, что в области температур отжига 550–600 К имеет место некоторый рост (10–20%) концентрации комплексов  $C_iO_i$ . Однако этот рост намного ниже такового, обусловленного изменением температуры облучения. Очевидно, что наблюдаемая зависимость эффективности образования А-центров и комплексов  $C_iO_i$  от  $T_{обл}$  связана, в первую очередь, с первичными процессами радиационного дефектообразования. Известно, что с ростом температуры несколько уменьшается пороговая энергия образования пар Френкеля, что может приводить к увеличению скорости генерации РД. Однако, по-видимому, большую роль играет влияние температуры на вероятность разделения близких (генетических) пар Френкеля. С ростом  $T_{обл}$  при фиксированном положении уровня Ферми эта вероятность увеличивается. Проведенные квантово-химические расчеты влияния температуры на вероятность разделения пар Френкеля подтверждают данное заключение.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф12МС-009).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Lindstrom, J.L.* Defect engineering in Czochralski silicon by electron irradiation at different temperatures / J.L. Lindstrom [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2002. Vol. 186. P. 121.
2. *Murin, L.I.* Carbon-oxygen-related complexes in irradiated and heat-treated silicon: IR absorption studies / L.I. Murin [et al.] // Solid State Phenomena. 2002. Vols. 82-84. P. 57.
3. *Медведева, И.Ф.* О влиянии условий облучения на эффективность образования радиационных дефектов в кремнии / И.Ф. Медведева И.Ф. [и др.] // Труды 20 Межд. совещ. «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2010), - Москва, 2010. С. 140.
4. *Маркевич, В.П.* Электронные свойства комплексов собственный междуузельный атом - кислородный димер в кремнии / В.П. Маркевич [и др.] // в Тр. 5 Межд. науч.-практ. конф. «Вузовская наука, пром-ть, международное сотрудничество», Мн.: БГУ, 2004. С. 121.