

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

**И.Ф. Медведева¹, Л.И. Мурин², В.П. Маркевич³,
Ф.П. Коршунов², С.Б. Ластовский², В.Е. Гусаков²**

¹⁾ *Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск, Беларусь*

²⁾ *ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», г. Минск, Беларусь*

³⁾ *The University of Manchester, Manchester M60 1QD, United Kingdom*

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов регулирования динамических характеристик приборов является облучение их электронами или γ -квантами ^{60}Co [1, 2]. 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 [1, 2]. 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 [3-12]. 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 [3-12]. 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 (C_iO_i) в кристаллах n - и p -Si при $T_{\text{обл}} = 320\div 580\text{ К}$ (в области термической стабильности данных РД).

2. 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 [9, 10]. Исследуемые образцы и структуры облучались быстрыми электронами ($E = 6\text{ МэВ}$) в интервале температур 320-580 К флюенсами $1\text{-}8 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$ (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.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Данные, полученные методом эффекта Холла

На рисунке 1 (в качестве примера) 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 междуузельный атом Si-кислородный димер (IO_2) [13, 14], VO и дивакансии (V_2). Комплексы IO_2 (уровень $E_c-0,125$ эВ) отжигаются при $T = 370-400$ К (кривая 2'). В кристаллах, облученных при $T_{обл} = 580$ К наблюдается введение комплексов VO и V_2O . Из сравнительного анализа ТЗКН, представленных кривыми 2' и 3, получены значения эффективности введения η комплексов VO для различных температур облучения: $\eta = 0,22 \text{ см}^{-1}$ при $T_{обл} = 320$ К и $\eta = 0,32 \text{ см}^{-1}$ при $T_{обл} = 580$ К.

3.2 Данные DLTS-спектроскопии

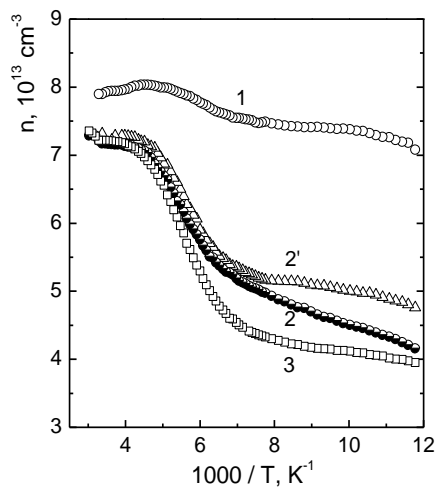


Рис.1. Температурные зависимости концентрации носителей в образцах Cz-Si, облученных электронами с энергией 6 МэВ дозой $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. 1 – исходный, 2 – облученный при $T = 320$ К, 2' – отожженный при 420 К, 3 – облученный при $T = 580$ К.

На рисунке 2 (в качестве примера), 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 радиационные дефекты, 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 с сечениями захвата дырок $\sigma_{H1} = 5,8 \cdot 10^{-16}$ и $\sigma_{H2} = 2,4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$. В целом вид DLTS спектра типичен для облученного электронами p -Si, полученного методом Чохральского. Уровень $H1$ принадлежит дивакансии $V_2(+/0)$, уровень $H2$ – комплексу углерод внедрения – кислород внедрения $C_iO_i(+/0)$ [14].

С ростом температуры облучения наблюдаются некоторые изменения вида DLTS спектров. При $T_{обл} > 470$ К на спектрах появляется пик ловушки с глубоким уровнем $E_v+0,31$ эВ и сечением захвата дырок $\sigma = 4,9 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$. Этой ловушкой является комплекс бор внедрения – углерод замещения B_iC_s .

Анализ экспериментальных данных показывает, что изменение $T_{обл}$ 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 существенной зависимости скорости введения РД в от температуры облучения.

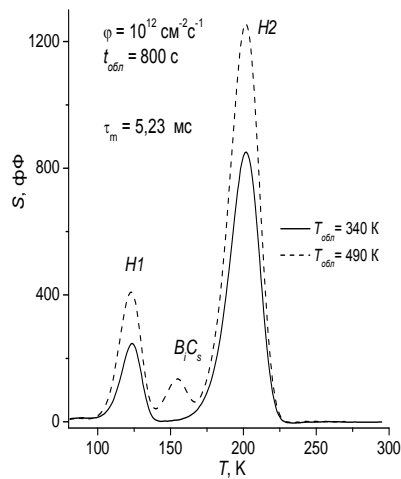


Рис. 2. DLTS-спектры облученного флюенсом электронов $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ образца при температурах облучения 340 и 490 К.

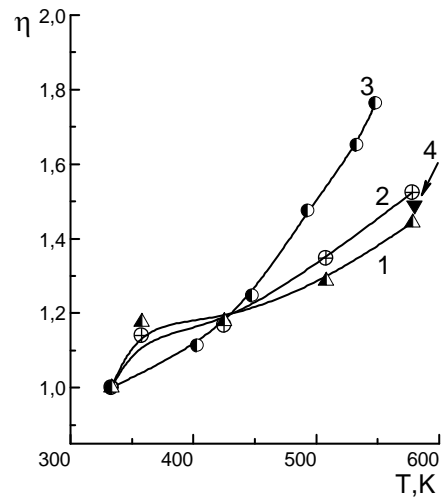


Рис. 3. Зависимости относительных эффективностей введения РД от температуры облучения. Зависимости 1-3 получены из данных DLTS и соответствуют дефектам: 1- VO , 2- C_iO_i в n -Si, 3- C_iO_i в p -Si; 4- VO в n -Si (по данным измерений эффекта Холла).

Необходимо подчеркнуть, что наблюдается увеличение скорости генерации РД с ростом $T_{обл}$. Аналогичное увеличение скорости генерации C_iO_i имеет место и в кремнии n -типа [10].

3.3 Обсуждение результатов

Зависимости эффективностей введения основных РД (А-центров и комплексов C_iO_i) в кристаллах кремния n -и p -типа от температуры облучения приведены на рисунке 3. Из приведенных данных следует, что с ростом $T_{обл}$ имеет место 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, что подтверждается полученными экспериментальными данными. 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 действительно 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 [15], что может приводить к увеличению скорости генерации РД. Однако, по-видимому, большую роль играет влияние температуры на вероятность разделения близких (генетических) пар Френкеля. Согласно данным [12], с ростом T_{obl} 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. *Кориунов, Ф.П.* Радиационные эффекты в технологии полупроводниковых материалов и приборов / Ф.П. Кориунов [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела: Мн.: Бел. Наука., 2003. С. 245.
2. *Кориунов, Ф.П.* Радиационная технология изготовления мощных полупроводниковых приборов / Ю.В. Богатырев // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-тех. наук. 2008. № 4. С. 106.
3. *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.
4. *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.
5. *Neimash V.* DLTS studies of high-temperature electron irradiated Cz n-Si / V. Neimash [et al.] // Phys. Stat. Sol.(a). 2004. Vol. 201. No. 3. P. 509.
6. *Kolosyuk, A.G.* Temperature dependence of the efficiency of vacancy generation in n-Si at the 1-MeV electron irradiation / A.G. Kolosyuk [et al.] // Ukr. J. Phys. 2007. V. 52. N 9. P.868.
7. *Kolosyuk, A.G.* Temperature influence on the formation of defects in n-Si irradiated with electrons / A.G. Kolosyuk [et al.] // Ukr. J. Phys. 2007. V. 52. N 7. P.688.
8. *Krasko, M.M.* Effect of the intensity of electron irradiation on the generation and annealing of VO-centers in silicon at high temperatures / M.M. Krasko [et al.] // Ukr. J. Phys. 2010. Vol. 55. N.7. P.792.
9. *Кориунов, Ф.П.* Радиационные дефекты в кремнии р-типа, облученном быстрыми электронами при повышенных температурах / Ф.П. Кориунов [и др.] // Доклады НАН Беларуси. 2008. Т. 52. № 5. С. 40.
10. *Markevich, V.P.* Formation of radiation-induced defects in Si crystals irradiated with electrons at elevated temperatures / V.P. Markevich [et al.] // Solid State Phenomena. 2010. Vols 156-158. P. 299.
11. *Медведева, И.Ф.* О влиянии условий облучения на эффективность образования радиационных дефектов в кремнии / И.Ф. Медведева И.Ф. [и др.] // Труды 20 Междунар. совещания «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2010), под ред. Бондаренко Г.Г. - Москва, 2010. С. 140.
12. *Кориунов, Ф.П.* Влияние примесного состава и температуры облучения на эффективность образования радиационных дефектов в кремнии / Ф.П. Кориунов [и др.] // Доклады НАН Беларуси. 2011. Т. 55. № 3. С. 110.
13. *Маркевич, В.П.* Электронные свойства комплексов собственный междуузельный атом - кислородный димер в кремнии / В.П. Маркевич [и др.] // в тр. 5 Междунар. науч.-практ. конф. "Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество", Мн.:БГУ, 2004. С. 121.
14. *Markevich, V.P.* Electrically active radiation-induced defects in Czochralski-grown Si with low carbon content / V.P. Markevich [et al.] // J. Phys.: Condensed Matter. 2005. Vol. 17. N 22.- P. S2331.
15. Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Смирнова Л.С. / Новосибирск, Наука, 1977. 256 с.