

ОБРАЗОВАНИЕ И ОТЖИГ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ЦЕНТРОВ В КРИСТАЛЛАХ Si<O,Cu>

И.Ф. Медведева¹, Л.И. Мури²

¹Белорусский государственный медицинский университет», пр. Дзержинского, 83, БГМУ, 220116, Минск, Беларусь; medvedeva@iftp.bas-net.by, 375 17 2841308

²ГНПО Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Беларусь, тел. +375 17 2841290

Abstract. The effect of copper impurity on radiation-induced defect (RID) reactions in n-type silicon crystals Si<O,Cu> upon isothermal annealing at 150 and 200 °C has been studied by means of the Hall effect technique. The activation energies of appropriate reactions are determined and possible mechanisms of copper interaction with RIDs are discussed.

Введение. Медь является одной из наиболее быстродиффундирующих примесей в кремнии и может легко проникать в структуры на основе Si из внешней среды [1, 2]. Данная примесь, как и примеси других переходных металлов, считается опасной в технологии производства приборов, так как она обладает достаточно высокой растворимостью и может быть ответственной за образование нежелательных электрически активных центров как в базовых кристаллах Si, так и в кремниевых приборных структурах. Присутствие меди может оказывать существенное влияние на процессы радиационного дефектообразования в кремнии. В работах [4, 5] показано, что примесные атомы меди ответственны за ускоренный отжиг радиационно-индуцированных центров (РИЦ), сопровождающийся формированием новых электрически-активных комплексов в облученных кристаллах Si, в том числе так называемых глубоких компенсирующих центров (ГКЦ) [5]. В то же время сам механизм взаимодействия примесных атомов меди с РИЦ окончательно не установлен. В связи с этим нами были проведены исследования особенностей изотермического отжига радиационно-индуцированных центров в кристаллах кремния n-типа, легированных медью, с целью определения энергий активации соответствующих процессов.

Методика эксперимента. Исследовались кристаллы кремния n-типа ($N_p = 6,5-7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), полученные методом Чохральского (n-Cz-Si). Содержание кислорода и углерода по данным оптических измерений составляло $N_O = 1,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_C = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Примесь Cu вводилась в образцы кремния посредством диффузии с осажденной на поверхности пленки Cu при температуре 600°C в течение 1 часа. Согласно литературным данным [1, 2], такие термообработки (ТО) могут приводить к введению до $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ междоузельных атомов меди в кремний. Образцы облучались быстрыми электронами ($E = 4 \text{ МэВ}$) при комнатной температуре дозой $1,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Изотермические отжиги облученных образцов проводились при температурах 150°C и 200°C. Концентрации электрически активных дефектов, образующихся в кристаллах Si в результате проведенных обработок, определялись из измерений температурных зависимостей концентрации носителей тока (ТЗКН).

Результаты и их обсуждение. На рисунках 1 и 2 показаны ТЗКН, измеренные после различных стадий изотермического отжига при 150 и 200°C облученных образцов Si, легированного медью. Из представленных данных следует, что характер изменения ТЗКН соответствует таковому, наблюдавшемуся ранее при изохронном отжиге аналогичных образцов в этой же области температур [5], т.е. наблюдается уменьшение концентрации А-центров и дивакансий (ионизация этих РД проявляется на ТЗКН в области температур 200-300 К) и формирование глубоких компенсирующих центров. Наиболее ярко ускоренный отжиг РД и формирование ГКЦ проявляется в процессе отжига облученных кристаллов n-Cz-Si<Cu> при $T = 200^\circ\text{C}$.

На рисунках 3 и 4 показаны изменения суммарной концентрации А-центров и дивакансий ($N_A + N_{V2}$) (кривые 1) и концентрации ГКЦ ($N_{\text{ГКЦ}}$) (кривые 2) в процессе изотермических отжигов при 150°C (рис. 3) и 200°C (рис. 4). Анализ приведенных данных

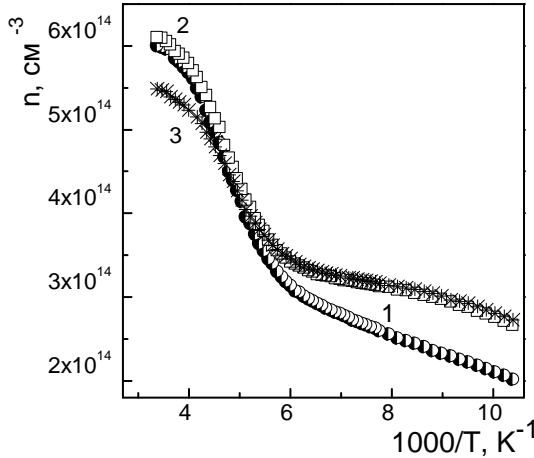


Рисунок 1 - ТЗКН в образце Cz-Si<Cu> после облучения быстрыми электронами (1) и на различных этапах изотермического отжига при T = 150°C: 2 – 15 минут, 3 – 97 часов.

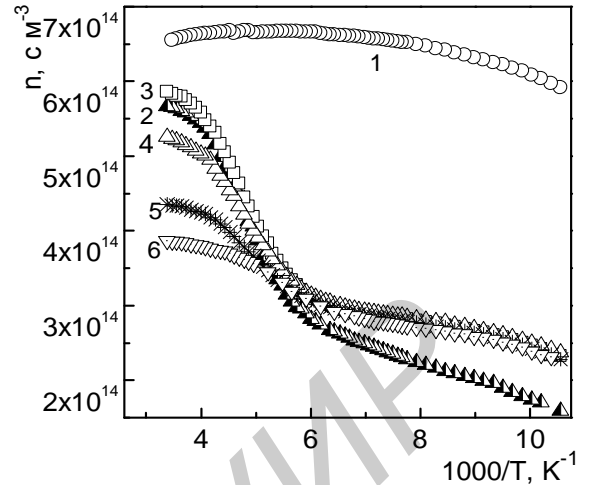


Рисунок 2 - ТЗКН в образце Cz-Si<Cu>: 1 - после ТО при 600 °С; 2 - после облучения; 3 - после отжига при 150 °С (15 мин.); 4-6 – на различных стадиях изотермического отжига при T = 200 °С: 4 – 45, 5 – 225, 6 - 465 минут.

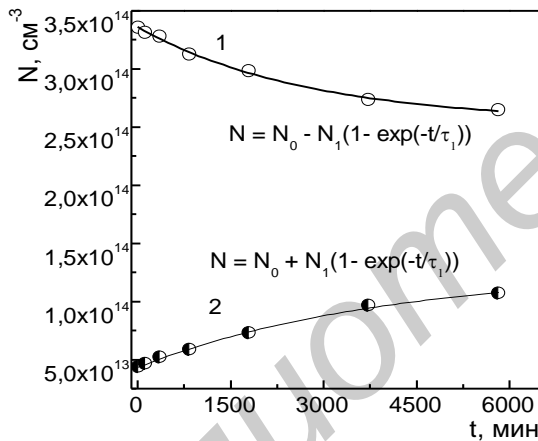


Рисунок 3 - Изменение суммарной концентрации А-центров и дивакансий ($N_A + N_{V2}$) (1) и $N_{ГКЦ}$ (2) в процессе изотермического отжига при 150 °С в кристалле Cz-Si<Cu>, ТЗКН для которого показаны на рис. 1. Сплошные линии являются подгоночными кривыми.

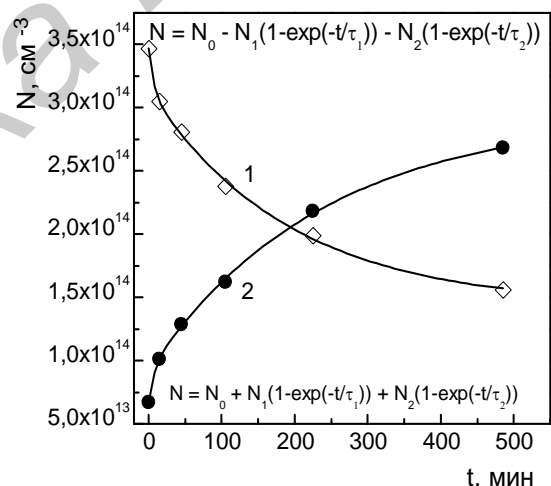


Рисунок 4 - Изменение суммарной концентрации А-центров и дивакансий ($N_A + N_{V2}$) (1) и $N_{ГКЦ}$ (2) в процессе изотермического отжига при 200 °С в кристалле Cz-Si<Cu>, ТЗКН для которого показаны на рис. 2. Сплошные линии являются подгоночными кривыми.

показал, что в случае относительно небольших изменений $N_A + N_{V2}$ и $N_{ГКЦ}$ при $T_{отж} = 150^\circ\text{C}$ (см. рис. 3) наблюдаемые зависимости могут быть описаны на основе уравнений для реакций первого порядка

$$N = N_0 + N_1(1 - \exp(-t/\tau_1)), \quad (1a)$$

$$N = N_0 - N_1(1 - \exp(-t/\tau_1)), \quad (1б)$$

где N_0 и N_1 – концентрации центров до отжига и при $t \rightarrow \infty$, соответственно, а τ_1 – характеристическое время процесса. Сплошные линии на рисунке 3 являются подгоноч-

ными кривыми, полученными методом наименьших квадратов на основе уравнений (1а) и (1б). Значения подгоночных параметров приведены ниже.

Кривая 1 (VO+V₂): $N_1 = 8,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\tau_1 = 2730 \text{ мин.}$

Кривая 2 (ГКЦ): $N_1 = 8,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\tau_1 = 3896 \text{ мин.}$

Анализ приведенных на рисунке 4 данных показал, что как кинетика отжига VO и V₂, так и кинетика генерации ГКЦ при T_{отж} = 200°C не описываются уравнениями реакций первого и второго порядков. Полученные зависимости хорошо описывались лишь в предположении, что одновременно имеют место два параллельных процесса, т.е. с использованием уравнений типа

$$N = N_0 + N_1(1 - \exp(-t/\tau_1)) + N_2(1 - \exp(-t/\tau_2)), \quad (2a)$$

$$N = N_0 - N_1(1 - \exp(-t/\tau_1)) - N_2(1 - \exp(-t/\tau_2)). \quad (2б)$$

где N₁ и N₂ – концентрации центров, участвующих в каждом из процессов, а τ₁ и τ₂ – характеристические времена этих процессов. Сплошные линии на рисунке 4 являются подгоночными кривыми, полученными методом наименьших квадратов на основе уравнений (2). Значения подгоночных параметров приведены ниже;

Кривая 1 (VO+V₂): $N_1 = 3,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\tau_1 = 7 \text{ мин.}$, $N_2 = 1,7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\tau_2 = 191 \text{ мин.}$

Кривая 2 (ГКЦ): $N_1 = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\tau_1 = 7 \text{ мин.}$, $N_2 = 2,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\tau_2 = 148 \text{ мин.}$

На основе полученных данных нами была предпринята попытка оценить энергию активации ускоренного отжига А-центров в Cz-Si<Cu>. Полагая, что при 150°C имеет место «быстрый» процесс, значение энергии активации, оцененное по отношению величин τ₁ при 150°C и 200°C, составляет около 2 эВ. Если же считать, что при 150°C реализуется «медленный» процесс, то рассчитанное значение энергии активации близко к 1 эВ.

Заключение. Основным фактором, лимитирующим процесс взаимодействия примесных атомов Cu с РД, по-видимому, является скорость диссоциации (распада) медных ассоциатов, т.е. скорость появления подвижных междоузельных атомов меди. Проведенные изотермические отжики показывают, что при этом одновременно могут идти несколько процессов с различными энергиями активации, т.е. междоузельные атомы Cu появляются из комплексов различной природы.

Литература

1. **Graff, K.** Metal impurities in silicon-device fabrication / K. Graff // Springer-Verlag –Berlin, 2000. - 268 p.
2. **Istratov, A.A.** Electrical properties and recombination activity of copper, nickel and cobalt in silicon / A.A. Istratov, E.R. Weber // Appl. Phys. A 66, 1998. - P. 123-136.
3. **Svensson, B.G.** Silicide formation and the generation of point defects in silicon / B.G. Svensson, M.O. Aboelfotoh, J.L. Lindstrom // Phys. Rev. Lett. **23**, 1991. - P. 3028-3031.
4. **Markevich, V.P.** Radiation-induced defect reactions in Cz-Si crystals contaminated with Cu / V.P. Markevich, A.R. Peaker, I.F. Medvedeva, V.E. Gusakov, L.I. Murin, B.G. Svensson // Solid State Phenomena, **131**, 2008. - P. 363 -368.
5. **Мурин, Л.И.** Взаимодействие примесных атомов меди с радиационными дефектами в кремнии / Л.И. Мурин, И.Ф. Медведева, В.П. Маркевич // Неорганические материалы, **4**, 2010. - С. 387-392.
6. **Yarykin, N.** Copper-related deep-level centers in irradiated p-type silicon / N. Yarykin, J. Weber. // Phys. Rev. B **83**, 2011. – P. 1252071-1252078.