

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов И. И.* Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. VI. Одноэлектронные структуры // Пано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 10–24.
2. *Аверин Д. В., Коротков А. Н.* Влияние дискретности энергетического спектра на коррелированное одноэлектронное туннелирование через мезоскопически малую металлическую гранулу // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. Вып. 5. С. 1661–1673.
3. *Абрамов И. И., Новик Е. Г.* Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. Минск: Бестпринт, 2000. С. 164.
4. *Абрамов И. И., Новик Е. Г.* Характеристики металлических одноэлектронных транзисторов на различных материалах // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 8. С. 1014–1019.
5. *Абрамов И. И., Новик Е. Г.* Учет фонового заряда на «островке» при моделировании одноэлектронных транзисторов // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 4. С. 489–491.
6. *Абрамов И. И., Игнатенко С. А., Новик Е. Г.* Модель многоостровковых одноэлектронных цепочек на основе метода Монте-Карло // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 5. С. 583–587.
7. *Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А.* и др. Система моделирования нанoeлектронных приборов – NANODEV // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. Вып. 2. С. 124–133.
8. *Kimura Y., Itoh K., Yamaguchi R.-i.* et al. Room-temperature observation of a Coulomb blockade phenomenon in aluminum nanodots fabricated by an electrochemical process // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. № 9. P. 093119–1–3.
9. *Miller T. G., Reifinberger R.* Three-tunnel-capacitor model for single-electron tunneling in layered thin films // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. № 5. P. 3342–3349.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ МЕДИ С РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ В КРЕМНИИ

**И. Ф. Медведева¹, Л. И. Мурин¹, В. П. Маркевич¹,
А. Г. Литвинко², Б. А. Комаров²**

¹ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси
по материаловедению», medvedeva@iftp.bas-net.by

²Белорусский национальный технический университет

1. ВВЕДЕНИЕ

Примесные атомы переходных металлов Cu, Ni и Fe являются быстродиффундирующими в кристаллах кремния и могут легко проникать в структуры на основе Si из внешней среды [1, 2]. Эти примеси считаются опасными в технологии производства приборов на основе Si, так как обладают достаточно высокой растворимостью и ответственны за образование ряда электрически активных дефектов в кристаллах Si. В работах [3–5] предполагалось, что примеси переходных металлов могут быть ответственными за ускоренный отжиг радиационных дефектов (РД) и формирование новых электрически активных комплексов в облученных кристаллах Si.

Ранее взаимодействие примесных атомов Cu с РД в Si исследовалось методом DLTS [6, 7]. Использовались барьеры Шоттки, созданные путем осаждения Cu на кристаллы Si *n*- и *p*-типа, облученные либо электронами с энергией 2 МэВ [6, 7], либо протонами и α -частицами [7]. Во всех случаях была обнаружена аномально высокая скорость отжига дивакансий (V_2) при температурах ниже 150 °С. Предполагалось, что это связано с пассивацией V_2 атомами Cu. Авторами [6, 7] отмечалась и

более низкая термическая стабильность комплексов вакансия–кислород (VO) в структурах Si <Cu>. В облученных электронами кристаллах Si *p*-типа при осаждении Cu наблюдалось формирование комплекса с уровнем $E_c - 0.52$ эВ. Образование комплекса связывалось со взаимодействием атомов Cu с комплексом C_iO_i .

Литературные данные о взаимодействии атомов меди с РД в кристаллах, специально легированных данной примесью, до последнего времени отсутствовали. В настоящей работе исследуются особенности образования и отжига РД в кристаллах *p*-Si, легированных медью путем высокотемпературной *in-diffusion*.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались кристаллы Si *n*-типа ($N_D = 6.5-7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), полученные методом Чохральского (*n*-Cz-Si). Содержание углерода и кислорода 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 Si посредством диффузии с осажденной на поверхности пленки Cu при температурах 600 и 550 °С в течение 1 ч и 50 мин, соответственно. Согласно [1, 2] такие термообработки (ТО) могут приводить к введению междоузельных атомов меди в Si до $1.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при 600 °С и $4.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при 650 °С. Образцы облучались быстрыми электронами ($E = 4$ МэВ, $T = 300$ К). Изохронные отжиги образцов проводились в интервале температур 75–400 °С с шагом 25 °С в течение 30 мин. Для исследования электрически активных дефектов использовались методы эффекта Холла и релаксационной емкостной спектроскопии (DLTS). Спектры DLTS (на диодах Шоттки) и температурные зависимости концентрации носителей заряда (ТЗКН) измерялись в интервале температур 30–360 К и 77–400 К, соответственно.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения ТЗКН и спектров DLTS в исходных и легированных медью образцах (Si <Cu>) показали, что проведенные ТО не приводили к введению в кристаллы электрически активных центров с концентрациями выше $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. При последующем изохронном отжиге необлученных кристаллов в диапазоне температур 50–400 °С также не наблюдалось заметного изменения их электрических свойств. Анализ спектров DLTS для кристаллов, облученных электронами, показал, что облучение привело к введению в образцы (исходные и легированные Cu) четырех доминирующих глубоких ловушек E_1-E_4 . Из анализа графиков Аррениуса для скоростей эмиссии электронов с этих ловушек было найдено, что уровни энергии соответствующих ловушек расположены при $E_c - 0.125$, $E_c - 0.165$, $E_c - 0.24$ и $E_c - 0.42$ эВ. Сопоставление определенных характеристик ловушек с данными, имеющимися в литературе [8–10], позволило нам приписать ловушки E_1 и E_2 акцепторным уровням комплексов собственный междоузельный атом–два атома кислорода (IO_2) и VO соответственно. Ловушки E_3 и E_4 были приписаны акцепторным уровням V_2 .

О том, что легирование Cu не повлияло существенно на процессы дефектообразования при облучении, свидетельствуют и данные эффекта Холла. Проведенный анализ ТЗКН показал, что основными РД после облучения являются комплексы IO_2 , VO и V_2 , причем эффективности их введения в исходных образцах и в образцах Si <Cu> практически не отличались. Однако последующие эксперименты по изохронному отжигу облученных кристаллов показали, что реакции РД при отжиге существенно отличаются.

3.1. Данные DLTS

На рисунках 1, а, б показана эволюция спектров DLTS в процессе изохронных отжига облученных исходного и легированного образцов. Легирование образцов Si медью не оказывает существенного влияния на отжиг комплекса VO_2 — он отжигался полностью в исследованных образцах при 125 °С. В то же время присутствие атомов Cu существенно влияет на отжиг вакансионных комплексов VO и V_2 . Основная стадия отжига комплекса VO в образце Si<Cu> имеет место в интервале температур 175–225 °С, т. е. сдвинута примерно на 150 °С по сравнению со стадией отжига в исходном образце. Анализ спектров DLTS для Si<Cu> показал, что одновременно с отжигом комплекса VO наблюдается введение дефекта $E_{\text{Cu-5}}$ (рис. 2).

Из анализа графика Аррениуса для скоростей эмиссии электронов с этой ловушки было найдено [11], что уровень этого центра расположен при $E_C - 0.60$ эВ. Данный уровень характеризуется сравнимыми сечениями захвата электронов и дырок, т. е. центр является эффективным центром рекомбинации носителей заряда. Определение концентрации таких центров методом релаксаций емкости является достаточно сложным. Тем не менее в спектрах DLTS проявляется явная антикорреляция в изменениях концентраций VO и $E_{\text{Cu-5}}$ при изохронном отжиге. Это позволяет заключить, что ловушка $E_{\text{Cu-5}}$, вероятнее всего, включает в свой состав как VO, так и Cu, т. е. представляет собой комплекс VO-Cu. В кристаллах Si<Cu> отжиг дивакансий также происходит ускоренно по сравнению с отжигом V_2 в облученных исходных кристаллах. Стадия отжига V_2 в Si<Cu> сдвинута примерно на 50 °С в область более низких температур. Анализ спектров DLTS показал, что одновременно с отжигом V_2 в кристаллах Si<Cu> вводятся центры с уровнем $E_C - 0.17$ эВ [11], $E_{\text{Cu-6}}$ (рис. 2). Наиболее вероятно, что центр $E_{\text{Cu-6}}$ образуется в результате взаимодействия атомов Cu с V_2 и представляет собой комплекс V_2 -Cu.

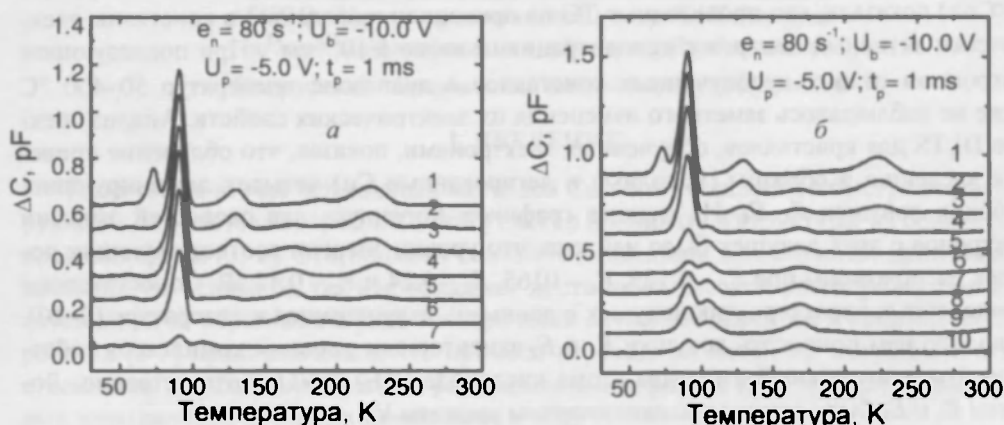


Рис. 1. Спектры DLTS в кристаллах Cz-Si-5, облученных электронами с энергией 4 МэВ ($\Phi_e = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$): исходном (а) и подвергнутом ТО при 600 °С в течение 60 мин с осажденной пленкой Cu на поверхности (б). Спектры соответствуют образцам Si: 1 — после облучения; 2–10 — на различных стадиях 30-минутного изохронного отжига. На рис. (а): 2 — 125, 3 — 200, 4 — 275, 5 — 325, 6 — 350, 7 — 375 °С. На рис. (б): 2 — 125, 3 — 175, 4 — 200, 5 — 225, 6 — 250, 7 — 275, 8 — 300, 9 — 325, 10 — 350 °С

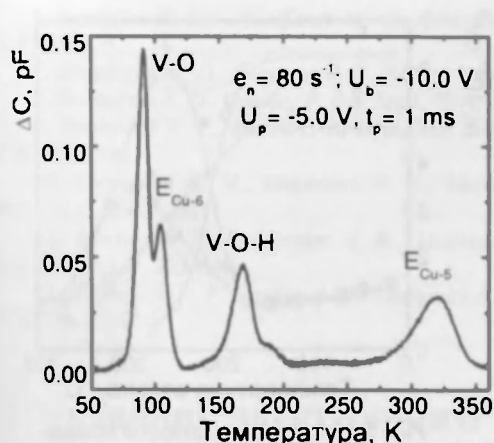


Рис. 2. Спектр DLTS в кристалле $\text{Cz-Si}\langle\text{Cu}\rangle$, подвергнутом термообработке при температуре 600°C в течение 60 мин с осажденной пленкой Cu на поверхности с последующим облучением электронами с энергией 4 MeV и 30-минутной термообработкой при 300°C

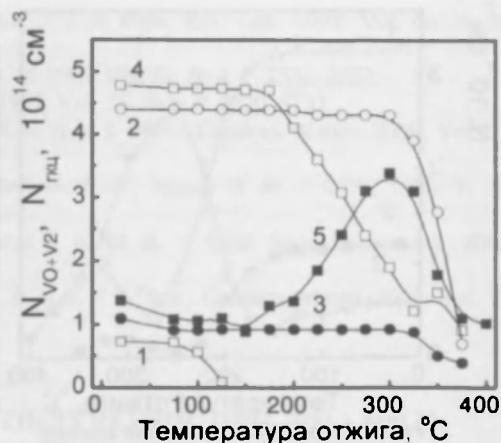


Рис. 3. Изменение концентрации комплекса IO_2 (1), суммарной концентрации ($\text{V}_2 + \text{VO} + \text{V}_2\text{O}$) (2, 4) и концентрации ГКЦ (3, 5) при изохронных отжигах (30 мин) в кристаллах Si (1, 2, 5) и кристаллах $\text{Si}\langle\text{Cu}\rangle$ ($T = 600^\circ\text{C}$, 60 мин) (4, 5), облученных электронами ($\Phi_e = 2 \cdot 10^{15}$)

3.2. Данные эффекта Холла

Анализ ТЗКН показал, что характер отжига основных РД в исходных кристаллах Si типичен для отжига РД в кристаллах $n\text{-Cz-Si}$ с низким содержанием углерода [5, 11]: центры с уровнем $E_C - 0.125\text{ эВ}$ (IO_2) отжигаются при $100\text{--}125^\circ\text{C}$, дивакансия при $\sim 250^\circ\text{C}$, а комплексы дивакансия–кислород [12] и A -центры – при $325\text{--}375^\circ\text{C}$. В то же время наблюдается ряд особенностей в поведении РД в кристаллах $\text{Si}\langle\text{Cu}\rangle$. Температура отжига A -центров понижается до $150\text{--}200^\circ\text{C}$ и исчезновение их сопровождается образованием в сравнимых концентрациях глубоких компенсирующих центров (ГКЦ). Полученные результаты проиллюстрированы на рис. 3, где представлены зависимости изменения концентрации основных РД и ГКЦ при изохронных отжигах (30 мин) в исследуемых кристаллах, облученных электронами.

Акцепторный уровень ГКЦ расположен или у середины (глубже, чем $E_C - 0.50\text{ эВ}$), или в нижней половине запрещенной зоны [5]. Весьма вероятно, что ловушка $E_{\text{Cu-5}}$, наблюдающаяся в спектрах DLTS и ГКЦ, проявляющаяся на ТЗКН, имеют одну и ту же природу. Эффективное образование этих центров наблюдается в кристаллах $\text{Si}\langle\text{Cu}\rangle$, что свидетельствует о наличии атомов Cu в их составе. Кроме того, оба дефекта формируются на основе A -центров в одном и том же температурном интервале и обладают одинаковой термической стабильностью. Вероятнее всего, этими дефектами являются комплексы Cu-VO .

На рисунках 4 и 5 представлены зависимости суммарной концентрации комплексов ($N_{\text{VO}} + N_{\text{V}_2}$) и концентрации ГКЦ при изохронном отжиге в кристаллах $\text{Si}\langle\text{Cu}\rangle$, облученных различными дозами (рис. 4) и с различным содержанием меди (рис. 5). Видно, что характер трансформации вакансионных РД в ГКЦ в кристаллах $\text{Si}\langle\text{Cu}\rangle$

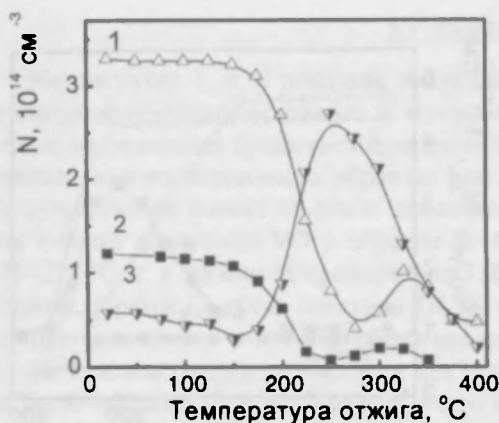


Рис. 4. Изменение суммарной концентрации комплексов ($N_{10} + N_{12}$) (1, 2) и концентрации ГКЦ (3) при изохронном отжиге в кристаллах Si-Cu ($N_{Cu} = 1.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), облученных дозами электронов: $1.4 \cdot 10^{15}$ (1, 3) и $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (2). Данные кривой 2 из измерений DLTS

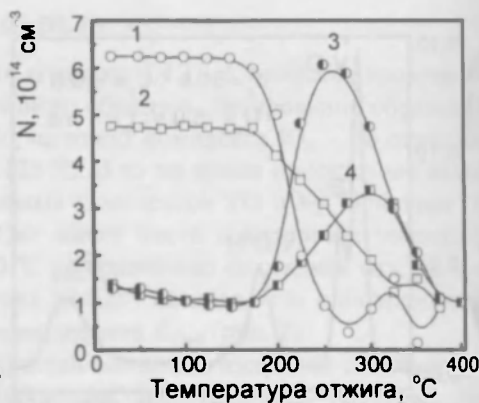


Рис. 5. Изменение суммарной концентрации комплексов ($N_{10} + N_{12}$) (1, 2) и концентрации ГКЦ (3, 4) при изохронном отжиге в кристаллах Si-Cu ($N_{Cu} = 1.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (2, 4), $N_{Cu} = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (1, 3)), облученных электронами ($\Phi_e = 2 \cdot 10^{15}$) (2, 4) и $2.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (1, 3)

сложным образом зависит как от содержания Cu (температуры *m*-диффузии), так и от концентрации РД. С увеличением дозы облучения электронами наблюдается смещение стадии отжига основных РД в область более высоких температур. Увеличение концентрации примесных атомов меди приводит к повышению эффективности образования ГКЦ, при этом стадия отжига основных РД смещается в область более низких температур.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования облученных кристаллов Si<Cu> позволяют предположить, что РД вакансионного типа являются эффективными ловушками для подвижных атомов меди. Ускоренный отжиг комплексов VO и V₂ в Si<Cu> связан с захватом этими комплексами междоузельных атомов Cu, которые при температурах выше 150 °C высвобождаются из электрически нейтральных Cu-содержащих ассоциатов. В результате взаимодействия атомов Cu с РД происходит формирование новых комплексов, электрические свойства которых существенно отличаются от таковых для РД. Центры с уровнями у $E_c - 0.60$ эВ и $E_c - 0.17$ эВ предположительно идентифицированы как комплексы Cu-VO и Cu-V₂, соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Istratov A. A., Weber E. R. // Appl. Phys. A. 1998. Vol. 66. № 1. P. 123–136.
2. Myers S. M., Seibt M., Schroter W. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. № 7. P. 3795–3819.
3. Медведева И. Ф., Макаренко Л. Ф., Маркевич В. П., Мурин Л. И. // Известия АН БССР. 1991. № 3. С. 19–24.
4. Комаров Б. А. // ФТП. 2004. Т. 38. № 10. С. 1079–1083.
5. Коршунов Ф. П., Медведева И. Ф., Мурин Л. И., Маркевич В. П. // Неорган. матер. 2007. Т. 43. № 11. С. 1287–1292.

6. Svensson B. G., Aboelfotoh M. O., Lindstrom J. L. // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 66. № 23. P. 3028–3031.
7. Aboelfotoh M. O., Svensson B. G. // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 52. № 4. P. 2522–2527.
8. Brotherton S. D., Bradley P. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. № 8. P. 5720–5732.
9. Markevich V. P., Murin L. I., Lastovskii S. B. et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2005. Vol. 17. P. S2333–2340.
10. Коршунов Ф. П., Маркевич В. П., Медведева И. Ф., Мурин Л. И. // ФТП. 1992. Т. 26. Вып. 11. С. 2007–2011.
11. Markevich V. P., Peaker A. R., Medvedeva I. F. et al. // Solid State Phenomena. 2008. Vol. 131–133. P. 363–368.
12. Markevich V. P., Peaker A. R., Lastovskii S. B. et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. Vol. 15. P. S2779–2789.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ 300 ÷ 800 К НА ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ *p-n*-СТРУКТУР

Ф. П. Коршунов¹, Ю. В. Богатырев¹, С. Б. Ластовский¹,
В. П. Маркевич¹, Л. И. Мурин¹, С. В. Шнаковский²

¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», lastov@ifitp.bas-net.by

²УП «Завод Транзистор» НПО «Интеграл»

В облученных кристаллах кремния, подвергнутых высокотемпературным обработкам либо воздействию проникающих излучений при повышенных температурах, имеет место формирование сложных примесно-дефектных комплексов (наноразмерных кластеров), обладающих высокой термостабильностью [1-3]. Такие дефекты могут оказывать существенное влияние на электрические и оптические свойства материала, в том числе служить эффективными центрами рекомбинации неосновных носителей заряда (ННЗ) в кремниевых быстродействующих приборах.

Цель данной работы – изучить влияние радиационных дефектов, вводимых электронным облучением при 300 ÷ 800 К, на параметры кремниевых диодных *p-n*-структур.

В качестве экспериментальных образцов использовались диодные *p-n*-структуры, изготовленные на пластинах с эпитаксиальным слоем кремния КЭФ-28 толщиной 48 мкм на УП «Завод Транзистор» НПО «Интеграл». *P-n*-переход создавался имплантацией бора в *n*-базу с последующим отжигом при 1470 К. Глубина залегания *p-n*-перехода составляла 11 ÷ 12 мкм, площадь – $9.4 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. В качестве омических контактов напылялся алюминий.

Готовые диодные *p-n*-структуры имели в области комнатных температур обратные токи не более 30 мкА при $U_{\text{обр}} = 400 \text{ В}$, прямое падение напряжения $U_{\text{прп}} = 0.96 \div 1.04 \text{ В}$ при прямом токе $I_{\text{пр}} = 15 \text{ А}$ и время жизни ННЗ (дырок) в базовой *n*-области $\tau_0 = 3.2 \div 3.5 \text{ мкс}$.

Облучение *p-n*-структур осуществлялось электронами с энергией $E = 6 \text{ МэВ}$ в течение 80 с при плотности потока электронов $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Необходимая температура в процессе облучения поддерживалась в специальной термостатирующей ячейке. Для контроля температуры использовалась хромель-алюмелевая термопара. После набора необходимого флюенса электронного облучения ($\Phi = 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) образцы сразу же извлекались из термостата на воздух ($T = 290 \text{ К}$).