

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКОМБИНАЦИОННО-УСКОРЕННОГО ОТЖИГА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

Абдуллин Х. А., Мукашев Б. Н., Тамендаров М. Ф.

Методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней исследованы образцы кремния p -типа проводимости, облученные α -частицами. Облучение проводилось в интервале температур 77—350 К. Обнаружены дефект $E2 = E_c - (0.39 \pm 0.02)$ эВ, а при оптическом возбуждении — дефект $E3 = E_c - (0.25 \pm 0.05)$ эВ. Дефекты $E2$ и $E3$ — междоузельного типа, подвержены интенсивному инжекционному отжигу, скорость отжига слабо менялась в интервале температур 77—300 К. Поведение дефектов $E2$ и $E3$ в зависимости от условий облучения и отжига позволяет предположить, что они являются соответственно двух- и однозарядными состояниями собственного междоузельного атома. Исследование процесса отжига междоузельных атомов углерода C_i и их перехода в K -центр показывает, что процесс идет с образованием метастабильного состояния, которое, так же как и центр C_i , подвержено инжекционному отжигу.

Рекомбинационно-ускоренная миграция собственных и примесных дефектов в полупроводниках является эффектом, важным в практических приложениях и интересным в научном плане. В кремнии обнаружен стимулированный инжекцией неосновных носителей отжиг ряда дефектов: междоузельных атомов B_i , Al_i , C_i , вакансии, центра Si-G25, а также неидентифицированных радиационных дефектов [1-4]. Существует несколько возможностей для объяснения многократного увеличения подвижности дефектов в присутствии неосновных носителей заряда. Во-первых, коэффициент диффузии может зависеть от зарядового состояния центров. Во-вторых, энергия, выделяющаяся при рекомбинации свободных носителей, может поглощаться локальными колебаниями дефектов и повышать таким образом вероятность перехода центра в другое эквивалентное положение равновесия. Таков, по-видимому, механизм миграции дефектов B_i и Al_i [2, 3]. Другую возможность объяснения ускоренной миграции дефектов предложили Бургуэн и Корбат [5]. Если разные зарядовые состояния центра имеют различные положения равновесия в решетке, то при перезарядке, вызываемой инжекцией неосновных носителей, будет возникать атермическая диффузия. Этот случай может осуществляться для собственных междоузельных атомов кремния, поскольку они подвижны даже при гелиевых температурах. Необходимо дальнейшее изучение природы дефектов, подверженных рекомбинационно-ускоренной диффузии, и механизмов миграции дефектов. В настоящей работе исследованы собственные и примесные дефекты междоузельного типа, подверженные инжекционному отжигу.

1. При исследовании образцов кремния p -типа проводимости со сформированным диффузионным n^+ - p -переходом, облученных α -частицами с энергией ~ 4 МэВ наблюдались спектры НЕСГУ, аналогичные приведенным в литературе [6, 7]. Пики в спектрах соответствовали уровням $H1 = E_v + 0.20$ эВ (дивакансия), $H2 = E_v + 0.29$ эВ (междоузельный углерод C_i), $E1 = E_c - 0.26$ эВ (предположительно комплекс бор—кислород). Иная картина наблюдалась в образцах с барьером Шоттки: сразу после облучения при $T_{обл} \sim 0^\circ \text{C}$ амплитуда пика $H2$ была незначительной либо он отсутствовал, а вместо него наблюдался пик, соответствующий глубокому уровню электронной ловушки $E2 = E_c - 0.39$ эВ (рис. 1). Пик $E2$ наблюдался при инжекции неосновных носителей во время заполняющего импульса; сечение захвата, определенное из кривой Аррениуса, составляло $\sim 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$. Обнаружено, что дефект $E2$

подвержен инжекционному отжигу: даже тот незначительный уровень инжекции, который необходим для наблюдения пика $E2$, вызывал постепенное уменьшение его амплитуды. Не обнаружено заметного изменения скорости инжекционного отжига от температуры в интервале 77—300 К, что свидетельствует о неактивационном характере отжига. Термическая стабильность дефекта $E2$ наблюдалась до $\sim 80^\circ\text{C}$.

Отжиг дефекта $E2$, как показано в [8], вызывал рост концентрации центра S_i ($H2$). Обнаружена зависимость введения дефекта $E2$ от температуры облучения и напряжения смещения на образце. Полученные зависимости хорошо совпадают с данными работы [4] для уровня $E_c - 0.14$ эВ. При нулевом сме-

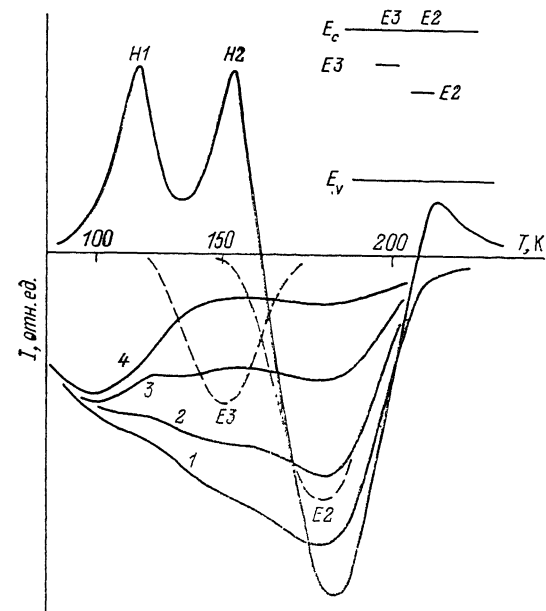


Рис. 1. Спектр НЕСГУ образца p -Si (штриховая линия), записанный при незначительной инжекции неосновных носителей.

1 — спектр, записанный при оптическом возбуждении, 2—4 — последовательные стадии инжекционного отжига при $T_{отж} = 190$ К. Штриховая линия — часть спектра, подверженная инжекционному отжигу и полученная вычитанием спектра 4 из исходного спектра 1. На вставке — предлагаемая модель расположения уровней $E2$ (0.39 эВ) и $E3$ (0.25 эВ). I — сигнал НЕСГУ.

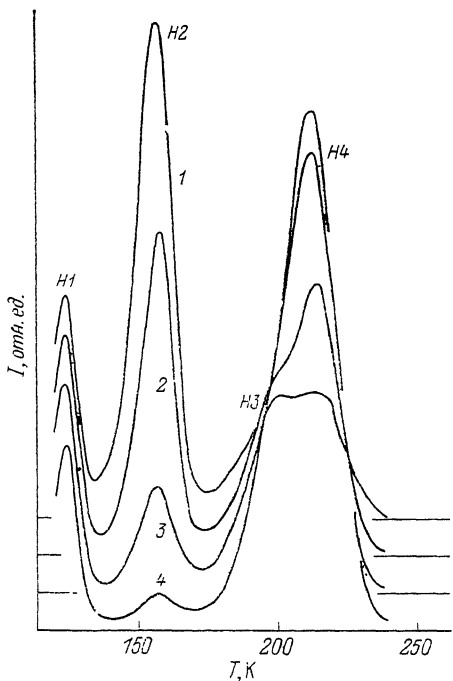


Рис. 2. Спектры НЕСГУ образца кремния p -типа после отжига центра $E2$.

1 — исходная, 2—4 — после инжекционного отжига при $T = 225$ К.

щении на образце во время облучения α -частицами центр $E2$ не вводится при температуре облучения $T_{обл} \geq 350$ К, а с наложенным обратным смещением — при $T_{обл} \geq 250$ К.

Были также сняты спектры НЕСГУ при оптическом возбуждении. С этой целью образцы освещались через окно в тыльном контакте импульсами света от светодиода из GaAs. Обнаружено, что наряду с пиком $E2$ с низкотемпературной стороны появляется уширенная полоса $E3$, которая подвержена инжекционному отжигу одновременно с дефектом $E2$. Это показано на рис. 1, где спектры 1—4 сняты с оптическим возбуждением при постепенном отжиге полосы $E2$. Инжекционный отжиг проводился при $T = 190$ К. Полученный после отжига спектр (4) вычитался из исходного (1). На рис. 1 штриховой линией показана та часть спектра, которая подвержена инжекционному отжигу: полосы $E2$ и $E3 = E_c - (0.25 \pm 0.05)$ эВ.

2. Центры $E2$ и $E3$ имеют в своем составе междоузельные атомы. Об этом свидетельствует то, что при отжиге этих центров растет концентрация дефектов S_i . При этом они не могут иметь примесную природу, например идентифици-

роваться с центром B_i ($E_c - 0.37$ эВ) [9], поскольку наблюдаются нами в образцах, легированных Al и Ga. Кроме того, центр $E2$ наблюдается в образцах, выращенных как методом Чохральского, так и методом зонной плавки и имеющих сильно отличающиеся концентрации примесей кислорода и углерода. Поэтому мы полагаем, что центры $E2$ и $E3$ соответствуют различным зарядовым состояниям собственного междоузельного центра. Простейшим центром такого типа является междоузельный атом кремния Si_i . В этом случае уровню $E3$ соответствует переход $Si_i(0/+)$, а уровню $E2 - Si_i(+/++)$ и легко объясняется способность к инжекционному отжигу. Действительно, зарядовые состояния Si_i^{\cdot} ($3s^2p$) и Si_i^{++} ($3s^2$) должны иметь различные положения в решетке вследствие разного числа p -электронов. Об этом свидетельствуют и теоретические работы [10, 11]. Вероятное расположение центра $Si_i(+)$ — в T_d -междоузлии, а $Si_i(+)$ — в расщепленном междоузлии. Очевидно, что при перезарядке центров может осуществляться их атермическая миграция по механизму Бургуэна. Кроме того, сечение захвата электронов на центр должно быть велико, поэтому эффективная перезарядка цент-

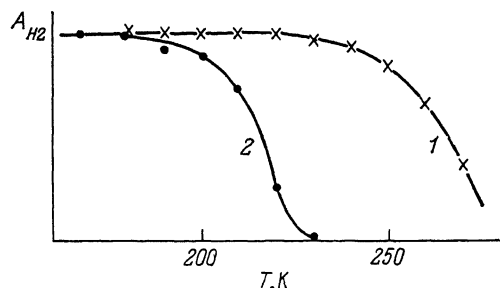


Рис. 3. Изохронный (5 мин) инжекционный отжиг при токе 19 A/cm^2 (1) и 8.5 A/cm^2 (2) полосы $H2$ (C_i) в образце кремния p -типа, облученного α -частицами.

A_{H2} — амплитуда полосы $H2$.

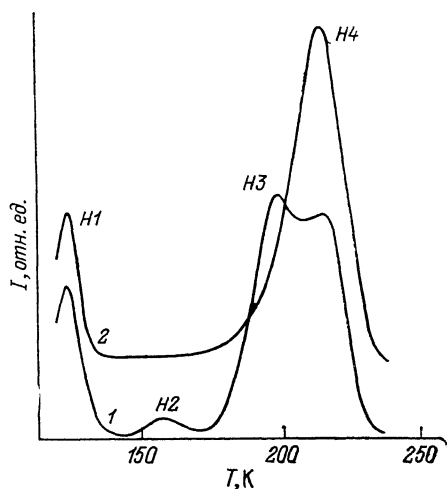


Рис. 4. Спектры НЕСГУ образца кремния p -типа, облученного α -частицами и отожженного при комнатной температуре до отжига полосы $H2$ (1); после инжекционного отжига при $T=250 \text{ K}$, токе 15 A/cm^2 в течение 10 мин (2).

ров и диффузия могут происходить при малой концентрации неравновесных носителей, т. е. при малом уровне инжекции, что подтверждается нашими результатами. Сравнительно небольшое сечение захвата, получающееся из кривой Аррениуса, может быть заниженным из-за некорректности методики либо вследствие влияния эффекта Пула—Френкеля.

Дополнительным аргументом в пользу того, что полоса $E2$ соответствует переходу $Si_i(+/+++)$, а $E3 - Si_i(0/+)$, является то, что полоса $E3$ не наблюдается в обычных спектрах НЕСГУ. Это происходит из-за более низкого сечения захвата электронов на этот центр по сравнению с центром $E2$. Аналогичная картина наблюдалась нами в образцах кремния, легированного серой. В n -Si (S) присутствуют два дефекта: S ($0/+$) ($E_c - 0.26$ эВ) и S ($+/+++$) ($E_c - 0.47$ эВ) с приблизительно равной концентрацией. Это совпадает с литературными данными [12]. В p -Si (S) в условиях инжекции неосновных носителей наблюдается лишь уровень S ($+/+++$), что объясняется гораздо большим сечением захвата электронов на этот уровень.

Предлагаемое расположение уровней показано на вставке к рис. 1. В такой модели инжекционный отжиг происходит по механизму Бургуэна при перезарядке центра $Si_i(+)$. Легко получает объяснение поведение дефекта $E2$ при термическом отжиге. При нулевом смещении на образце p -Si уровень Ферми находится вблизи валентной зоны, и для перезарядки центра $E2$ необходимо возбуждение электронов на пустой уровень из валентной зоны. Этому соответствуют энергия ~ 0.6 эВ и температура $\sim 350 \text{ K}$. Наложение напряжения смещения на образец поднимает уровень Ферми к середине запрещенной зоны, и уровень $E2$ частично заполняется электронами. В этом случае пере-

зарядка происходит при возбуждении электронов с уровня E_2 в зону проводимости, для чего необходима энергия 0.39 эВ, т. е. температура ~ 250 К. Это соответствует нашим данным и данным работы [1]. (Заметим, что наблюдаемый в [1] уровень $H5 = E_c - 0.14$ эВ может совпадать с E_3 , поскольку энергия уровня $H5$ получена опосредованным путем).

3. Выше отмечалось, что при отжиге дефекта E_2 растет концентрация дефектов H_2 ($E_v + 0.29$ эВ). В литературе эти дефекты идентифицированы как междоузельные атомы углерода C_i . Температура отжига дефектов ~ 40 °С, энергия активации отжига ~ 0.6 эВ. При отжиге H_2 образуется K -центр [6, 13]. Более подробное исследование спектров НЕСГУ при повышенном разрешении [8] показало, что отжиг C_i в K -центр идет с образованием метастабильного состояния H_3 ($E_v + 0.35$ эВ), что совпадает с данными [4].

Ранее были сообщения, что центр C_i подвержен инжекционному отжигу [14]. Наши данные подтверждают этот факт. На рис. 2 показаны спектры НЕСГУ образца в процессе инжекционного отжига центров C_i , а на рис. 3 — кривые изохронного отжига при разных токах. Видно, что в случае инжекционного отжига дефекты H_2 сразу переходят в H_4 (K -центр), минуя промежуточное состояние H_3 . Это объясняется тем, что дефекты H_3 подвержены инжекционному отжигу (рис. 4), более быстро, чем H_2 .

Обсудим природу центра H_3 . Он должен быть близок по природе к K -центру, который представляет собой комплекс $C_i - O_i$ [13], где атомы C_i и O_i разделены одним атомом кремния. Отжиг C_i в образцах, выращенных методом Чохральского, заключается в их захвате атомами кислорода. Можно предположить, что центр H_3 является неустойчивой конфигурацией, возникающей при сближении атомов C_i и O_i . Электронная структура центров H_2 и H_4 определяется главным образом p -электронами атома C_i , соответственно изолированного и находящегося вблизи O . Промежуточное состояние H_3 , по-видимому, образуется атомами C_i и O_i , находящимися на расстоянии одного прыжка для создания K -центра, поэтому энергия уровня H_3 должна лежать между уровнями H_2 и H_4 . Инжекционный отжиг $H_3 \rightarrow H_4$ должен быть эффективнее, чем переход $H_2 \rightarrow H_3$, поскольку требует меньшего числа прыжков, что наблюдается на опыте.

В заключение сделаем следующие выводы.

1. Обнаружены глубокие уровни собственных радиационных дефектов междоузельного типа с энергиями $E_2 = E_c - (0.39 \pm 0.02)$ эВ и $E_3 = E_c - (0.25 \pm 0.05)$ эВ, подверженных инжекционному отжигу. Предполагалось, что они являются соответственно двух- и однозарядными состояниями собственного междоузельного атома Si_i . Совокупность экспериментальных данных хорошо объясняется в предположении, что безактивационный инжекционный отжиг происходит при перезарядке этого уровня — переходе $E_2 (+/+ +) = E_c - 0.39$ эВ.

2. Процесс перестройки междоузельного атома углерода C_i в K -центр ($C_i - O_i$) при термическом отжиге происходит с участием промежуточного состояния H_3 , ускорение процесса при инжекции неосновных носителей заряда свидетельствует о рекомбинационно-зависимой миграции центров H_2 (C_i) и H_3 .

Список литературы

- [1] Watkins G. D., Troxell J. R., Chatterjee A. P., Harris R. D. // Int. Conf. Rad. Phys. Semicond. Rel. Mater. Tbilisi, 1979. P. 97—109.
- [2] Harris R. D., Watkins G. D., Kimerling L. C. // Def. Semicond. Mater. Sci. Forum. 1986. V. 10-12. P. 163—168.
- [3] Troxell J. R., Chatterjee A. P., Watkins G. D., Kimerling L. C. // Phys. Rev. B. 1978. V. 19. N 10. P. 5336—5348.
- [4] Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 9. С. 1625—1628.
- [5] Bourgojn J. C., Corbett W. // Phys. Lett. 1972. V. 38A. N 2. P. 135—137.
- [6] Kimerling L. C. // Rad. Eff. Semicond. Inst. Phys. Conf. Ser. N 31. Bristol—London, 1977. P. 221—230.
- [7] Губская В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 6. С. 1055—1059.
- [8] Abdullin Kh. A., Mukashev B. N., Tamendarov M. F., Tashenov T. B. // Phys. Lett. A. 1990. V. 144. P. 198.

- [9] Harris R. D., Newton J. L., Watkins G. D. // Phys. Rev. B. 1987. V. 36. N 2. P. 1094—1104.
- [10] Точечные дефекты в твердых телах. М., 1979. 380 с.
- [11] Pantelides S. T., Ivanov I., Scheffler M., Vigneron J. P. // Physica. 1983. V. 116 B. N 1. P. 18—27.
- [12] Pensl G., Roos G. // Def. Semicond. Mater. Sci. Forum. 1986. V. 10-12. P. 911—916.
- [13] Trombetta J. M., Watkins G. D. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 14. P. 1103—1105.
- [14] Kimerling L. C., Blood P., Gibson W. M. // Def. Rad. Eff. Semicond. Inst. Phys. Conf. Ser. N 46. Bristol—London, 1978. P. 273—280.

Институт физики высоких энергий АН КазССР
Алма-Ата

Получена 11.11.1990
Принята к печати 11.12.1990
