

©1994 г.

ДЕФЕКТЫ В p -Si, ОБЛУЧЕННОМ ПРИ 77 К: ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И КИНЕТИКА ОТЖИГА

Х.А.Абдуллин, В.Н.Мукашев

Физико-технический институт Академии наук Казахстана,
480082, Алматы, Казахстан
(Получена 1 апреля 1994 г. Принята к печати 12 апреля 1994 г.)

Методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) исследованы спектры радиационных дефектов в кремнии p -типа проводимости, облученного электронами (~ 4 МэВ), протонами (~ 30 МэВ), либо α -частицами (~ 4 МэВ) при температуре 77 К. Обнаружено существенное влияние вида и условий облучения на спектры DLTS. При электронном облучении основными дефектами являются вакансии ($H1$: $E_v + 0.13$ эВ) и межузельные атомы углерода ($H3$: $E_v + 0.29$ эВ), при протонном и α -облучении — дефекты с уровнями $H4$: $E_v + 0.20$ эВ и $E_c - 0.39$ эВ. Полоса $H4$ имеет значительную полуширину и сложную кинетику отжига. Четко выделена стадия отжига, подчиняющаяся кинетике 2 порядка, а при отжиге примерно (60–80)% дефектов кинетика полосы $H4$ становится близкой к 3 порядку. Инжекция неосновных носителей при 77 К вызывает быстрый отжиг дефектов $H4$. Наблюдалось появление дополнительных линий в спектрах DLTS при облучении образцов под обратным напряжением смещения. Получены дополнительные данные о собственном межузельном центре $E1$. Обнаружено, что инжекционный отжиг $E1$ при 77 К в образцах Чохральского вызывает появление, помимо центров $H3$ (C_i), дефектов $H7$: $E_v + 0.13$ эВ, которые идентифицированы как кислородсодержащие межузельные центры. Эти центры метастабильны и обратимо отжигаются, превращаясь в дефекты $E1$ при повышении температуры до ~ 200 К.

1. Введение

Существует большое число работ, посвященных изучению структуры, природы и свойств собственных и примесных точечных дефектов в кремнии. Однако почти все эти исследования относятся к примесным центрам и вторичным радиационным дефектам, которые являются продуктами взаимодействия первичных дефектов (вакансий, собственных межузельных атомов и пар Френкеля) между собой и с примесными атомами. Среди первичных радиационных дефектов только вакансии V_{Si} изучены достаточно подробно [1–3]. Сведения о таких дефектах, как собственные междоузлия и пары Френкеля, в литературе почти отсутствуют. Для центров Si_i (межузельный кремний) твердо установлена лишь их необычная способность к миграции в условиях

облучения даже при очень низких температурах [1]. Попытки обнаружить Si_i пока не увенчались успехом. Это может быть следствием отрицательной корреляционной энергии электронов в нейтральном состоянии центра [4], что должно приводить к неустойчивости парамагнитного состояния Si_i^+ . Пары Френкеля также не наблюдались в кремнии, в отличие от германия, что объяснялось их нестабильностью [5,6]. Как представляется, высокая подвижность Si_i и вследствие этого нестабильность пар Френкеля реализуются лишь во время облучения в неравновесных условиях. Высокий темп перезарядки центров приводит к атермической миграции по механизму Бургуэна-Корбетта [7,8] или к рекомбинационно-ускоренной диффузии [9]. Поэтому при облучении электронами и γ -частицами центры Si_i и пары Френкеля отжигаются. Однако в литературе существуют указания о более высокой стабильности центров Si_i при облучении электронами с энергией 46 МэВ, либо протонами и α -частицами. Удобным способом контроля за центрами Si_i является наблюдение примесных межузельных центров, например C_i . В работе [10] при исследовании n -Si было обнаружено появление центров C_i не сразу после облучения, а только после отжига при 160 К в зонном материале и после отжига при 260 К в образцах, выращенных методом Чохральского. Еще более затрудненное появление центров C_i в p -Si [11-15] говорит о стабильности Si_i до комнатной температуры. Таким образом, при облучении протонами и α -частицами, когда на каждый создаваемый дефект приходится намного меньше электронно-дырочных пар [8], чем при облучении электронами, полного отжига центров Si_i не происходит. По-видимому, в этом случае можно ожидать, что пары Френкеля также будут более стабильными. Поэтому только часть пар будет отжигаться во время облучения путем атермической миграции междоузлий. Оставшиеся пары должны отжигаться уже путем миграции вакансий, т.е. при ~ 80 К в n -Si и при ~ 160 К в p -Si. Применение протонного и α -облучения и сравнение спектров глубоких уровней со случаем облучения электронами может выявить особенности, относящиеся к Si_i и парам Френкеля. Поэтому мы провели работы по изучению спектров нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) радиационных дефектов при низкотемпературном (77 К) облучении кремния электронами, протонами и α -частицами.

2. Методика эксперимента

Исследовались образцы p -Si(B), выращенные методом Чохральского (Si-CG) и вырезанные из одной шайбы. Для контроля результатов использовались образцы, выращенные зонной плавкой (Si-FZ) и легированные как бором, так и алюминием. Удельное сопротивление образцов лежало в пределах (10-20) Ом·см. Тыльный контакт изготовлялся напылением в вакууме Al и кратковременным отжигом при $\sim 550^\circ\text{C}$. Барьер Шоттки также создавался напылением Al. Облучение образцов проводилось электронами с энергией ~ 4 МэВ, протонами с энергией 30 МэВ, либо α -частицами с энергией ~ 4 МэВ. Температура образцов во время облучения и после него вплоть до записи спектров DLTS поддерживалась при 77 К. Для повышения разрешающей способности метода DLTS применялся фильтр 3 порядка [16].

3. Результаты эксперимента

Типичные спектры DLTS, полученные на образцах p -Si-CG при температуре облучения 77 К, показаны на рис. 1. После облучения быстрыми электронами в спектрах DLTS всегда присутствуют полосы $H1(E_v + 0.13$ эВ), $H2(E_v + 0.20$ эВ) и $H3(E_v + 0.29$ эВ), которые в литературе идентифицированы как электронные переходы, принадлежащие вакансии $V(+ + / 0)$, дивакансии $VV(+ / 0)$ и межузельному атому углерода $C_i(+ / 0)$ соответственно [3,10,17,18]. Амплитуда полосы $H3$ близка к амплитуде $H1$ и при последующем отжиге увеличивается очень незначительно, что свидетельствует о почти полном отжиге во время электронного облучения дефектов, содержащих собственные межузельные атомы. Однако заметим, что полоса $E1(E_c - 0.39$ эВ) [12-15], принадлежащая собственному межузельному центру и не показанная на рис. 1, все же присутствует с незначительной амплитудой.

Относительные амплитуды полос $H1-H3$ сильно уменьшаются при переходе от облучения электронами к облучению протонами и α -частицами. При этом растет амплитуда полос $H4-H6$ (рис. 1, b, c) и $E1$. Основная полоса $H4$ наблюдалась в образцах, выращенных методом Чохральского, зонной плавкой и по силановой технологии, легированных бором и алюминием. Полоса $H4$ имеет полуширину ≈ 20 К, что значительно превышает полуширину одиночной линии в спектрах DLTS (~ 10 К), записанных с применением фильтра 3 порядка. Низкотемпературный спад полосы $H4$ перекрывается с полосой $H1$, а высокотемпературный — с полосой с $H2$, что говорит о размытии энергии

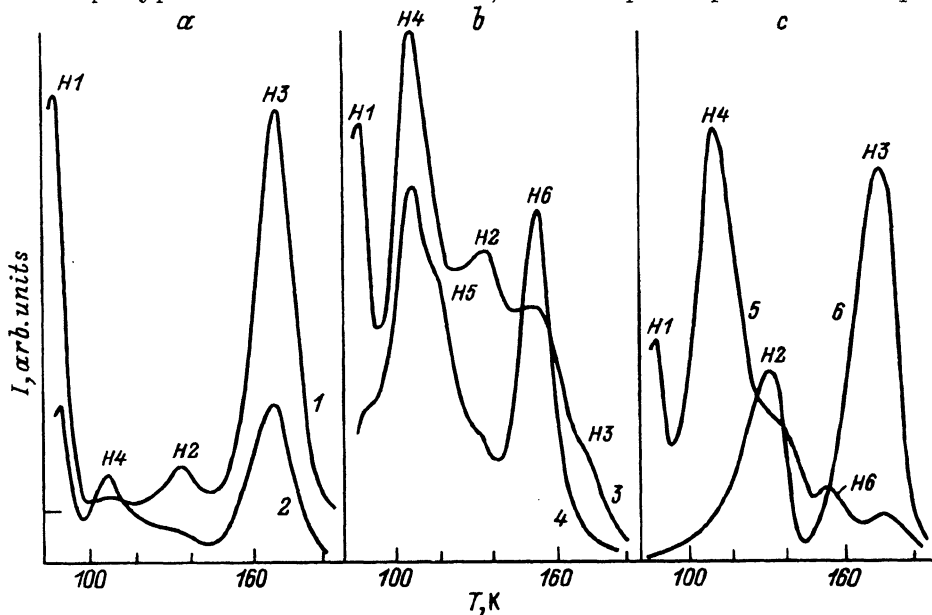


Рис. 1. Спектры DLTS образцов p -Si-CG, выращенных методом Чохральского, после облучения при 77 К (1-5): a — электронами с энергией 4 МэВ, b — протонами, 30 МэВ, c — α -частицами, 4 МэВ. Кривая 1 сдвинута по оси ординат. 2 — спектр получен при облучении через слой алюминия толщиной 1 мм, 4 — облучение под смещением 15 В, 6 — типичный спектр после нагрева до 300 К.

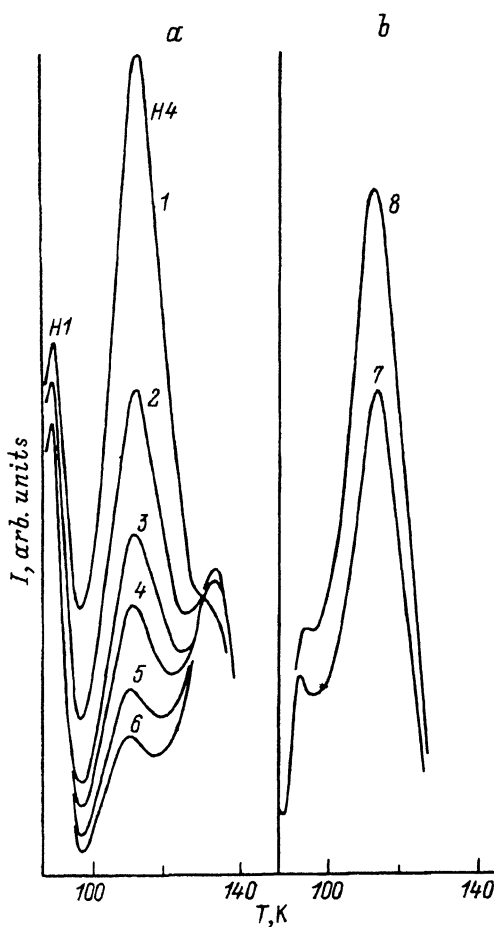


Рис. 2. Изотермический (136.3 К) отжиг при нулевом смещении образца *p*-Si, облученного α -частицами при 77 К. Время отжига, мин: 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 6, 6 — 16. 7 — разность спектров 1 и 3, 8 — разность спектров 1 и 6.

тического спектра уровней, формирующих *H4*. Энергия, соответствующая максимуму полосы *H4*, равна $E_v + 0.20$ эВ, а сечение захвата $\sigma_4 = 1.6 \cdot 10^{-13}$ см². Полоса *H4* имеет сложную кинетику отжига. Результаты по изотермическому отжигу представлены на рис. 2, *a*. Видно, что на начальном этапе отжига происходит непропорционально быстрое уменьшение амплитуды сигнала DLTS по обе стороны от максимума полосы *H4* (рис. 2, *b*), так что полуширина уменьшается до величины, соответствующей моноэнергетической линии. При этом амплитуды полос *H1* и *H2* растут, но не в той степени, насколько уменьшается амплитуда в максимуме полосы *H4*. На рис. 3 показаны зависимости величины $(A_0/A) - 1$ от времени, где A_0 — начальная амплитуда полосы *H4*, $A = A(t)$ — текущее значение. Линейность кривых на равных стадиях означает, что процесс отжига — 2 порядка: $A(t) = A_0/(1+t/\tau)$. Зависимость τ от температуры (рис. 3, вставка) можно, несмотря на некоторый разброс экспериментальных точек, аппроксимировать кривой $\tau^{-1} = \tau_0^{-1} \exp(-E_{a1}/kT)$, где $\tau_0^{-1} \sim 10^{15}$ с⁻¹ и $E_{a1} = (0.47 \pm 0.05)$ эВ. Процесс 2 порядка наблюдается до тех пор, пока доля отожженных дефектов не составит 60–80%, а затем отжиг замедляется. Этот этап отжига

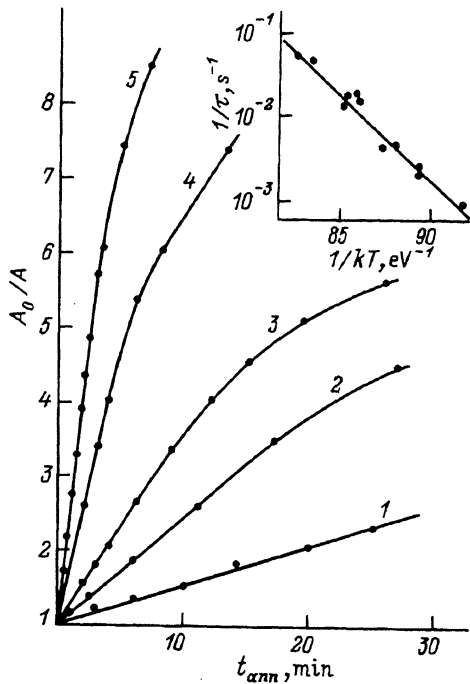


Рис. 3. Изотермический отжиг при нулевом смещении полосы $H4$ в образце p -Si-CG, облученном при 77 К α -частицами. A и A_0 — текущее и начальное значения амплитуды полосы $H4$. Температура отжига, К: 1 — 126.5, 2 — 130, 3 — 133, 4 — 136.3, 5 — 137.9. На вставке — зависимость постоянной τ от обратной температуры.

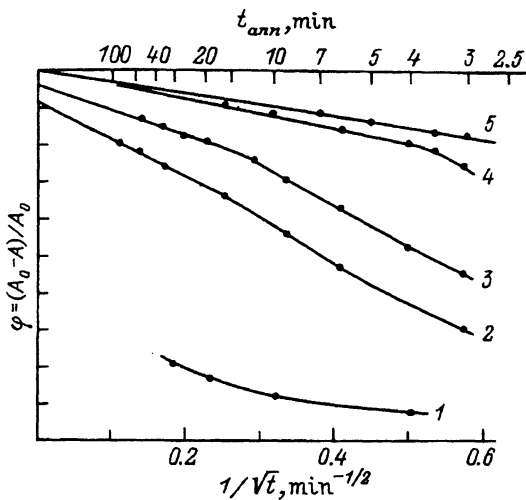


Рис. 4. Зависимость доли отожженных дефектов φ (полоса $H4$) в образце p -Si-CG от величины $t^{-1/2}$, t — время отжига. Температура отжига, К: 1 — 120.2, 2 — 130, 3 — 133, 4 — 136.2, 5 — 137.9.

в координатах $\varphi = (A_0 - A)/A_0$ от $t^{-1/2}$ показан на рис. 4. Спрявление зависимостей в этих координатах означает, что процесс отжига близок к 3 порядку. Определяя, как в работе [8], энергию активации, получим $E_{a2} = (0.48 \pm 0.05)$ эВ. Увеличение дозы облучения выше $\sim 10^{10}$ см $^{-2}$ для α -частиц либо $\sim 10^{13}$ см $^{-2}$ для протонов вызывает появление на начальном этапе отжига полосы $H4$ участка экспоненциального спада (процесс 1 порядка), а уменьшение дозы — более ранний переход от процесса 2 порядка к 3. Изохронный отжиг образцов показан на рис. 5. Видно, что отжиг полосы $H4$ сопровождается ростом амплитуд полос $H1(V)$ и $H2(V-V)$. Заметим, что при дальнейшем нагреве амплитуда

полосы $H2(V-V)$ продолжает расти, что может быть связано с отжигом других, не различимых методом DLTS дефектов. Рост амплитуды $H3(C_2)$ при нагреве до комнатной температуры и выше связан с отжигом полосы с энергией $E_c - 0.39$ эВ [13,15].

Полоса $H4$ подвержена интенсивному инжекционному отжигу. Пропускание прямого тока 90 мА (~ 3 А/см²) через образец при 77 К в течение одной минуты приводит к почти полному отжигу полосы $H4$, и в этом смысле инжекция неосновных носителей при 77 К эквивалентна термическому отжигу при $T \sim 150$ К. Одновременно наблюдается значительный рост амплитуды $H3$, причем этот рост не связан с отжигом $H4$. Заметим, что пропускание прямого тока не сопровождается существенным нагревом образца, находящегося в жидком азоте, поскольку выделяющаяся при этом на барьере Шоттки мощность (≤ 150 мВт) мала, а площадь лицевого контакта меньше площади образца, более чем в 10 раз, что обеспечивает эффективное охлаждение.

Облучение протонами в условиях приложенного к образцу обратного напряжения видоизменяет спектр DLTS — относительные амплитуды полос $H1-H3$ уменьшаются, появляется дополнительная полоса $H5$, а полоса $H6(E_v + 0.28$ эВ) значительно увеличивается по амплитуде (рис. 1, б). Сечения захвата на уровни $H5$ и $H6$ близки и равны 10^{-14} см². Процесс отжига полосы $H6$ — 1 порядка с частотным фактором $\nu_0 = 7 \cdot 10^{11}$ с⁻¹ и энергией активации (0.47 ± 0.05) эВ. Полоса $H5$ отжигается почти одновременно с $H4$.

Радиационные дефекты $E1$, наблюдавшиеся нами при температуре облучения 265 К [12-15], присутствуют и при низкотемпературном

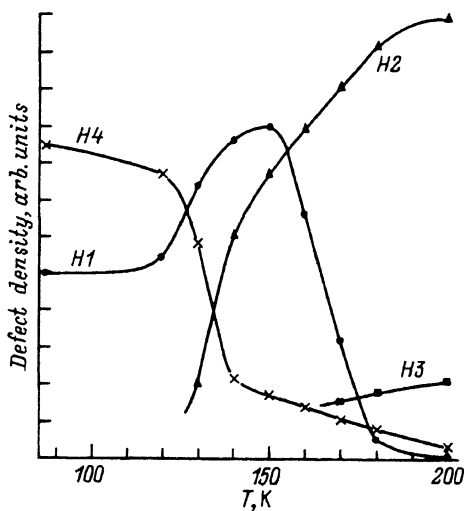


Рис. 5. Изохронный (10 мин) отжиг образца p -Si-CG, облученного α -частицами при 77 К.

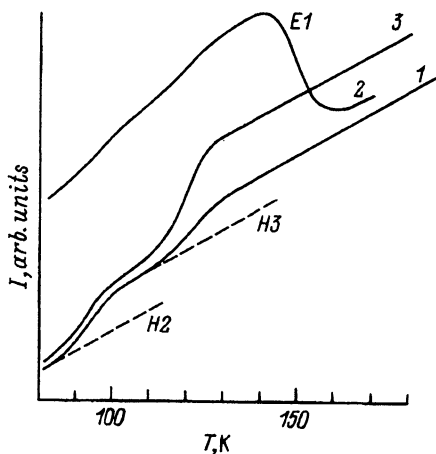


Рис. 6. Спектры термостимулированной емкости (TSCAP) образца p -Si-CG, облученного α -частицами при 265 К: 1 — исходный спектр, 2 — записанный после подачи при 77 К импульса прямого тока длительностью 0.1 мкс, 3 — то же, что и 2, но после инжекционного отжига (77 К) уровня $E1$.

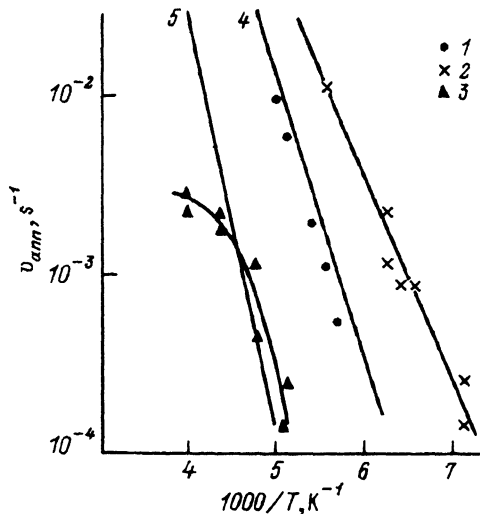


Рис. 7. Зависимости скорости отжига $v_{\text{анн}}$ дефектов $H1$ (1 — отжиг без напряжения смещения на образце) и $H7$ (2 — отжиг без смещения, 3 — под смещением) от температуры. 4 и 5 взяты из работы [3] и относятся к отжигу вакансий в p -Si без напряжения смещения и под смещением соответственно.

облучении. Амплитуда полосы $E1$ увеличивается более чем на порядок при переходе от электронного облучения к протонному и к α -облучению, так что концентрация этого дефекта становится сравнимой с концентрацией дефектов $H4$. Полоса $E1$ хорошо регистрируется по спектрам термостимулированной емкости (TSCAP) (рис. 6). Спектры TSCAP, полученные после облучения при 77 и 265 К, существенно не отличались. Для регистрации уровня $E1$ методом TSCAP перед записью спектра при 77 К на образец подавался инжектирующий импульс. Одного импульса инжекции амплитудой $\sim 1 \text{ А/см}^2$ и длительностью 0.1 мкс было достаточно для насыщения сигнала TSCAP от уровня $E1$. Это означает, что сечение захвата электронов на дефект во много раз больше сечения захвата дырок, т.е. центр положительно заряжен. Глубина залегающая $E1$, полученная из спектров TSCAP ($E_c - 0.36 \text{ эВ}$), хорошо совпадает с данными DLTS. Более длительное пропускание прямого тока через диод приводит к отжигу $E1$ [типичные режимы отжига: плотность тока (0.5–5) А/см^2 , длительность (1–10) мин]. Инжекционный отжиг уровня $E1$, как установлено нами ранее [15], приводит к появлению двух уровней: $H3(C_i)$ и $H7(E_v + 0.13) \text{ эВ}$, которые мы первоначально связали с вакансией $H1$. Однако более подробное исследование кинетики отжига уровней $H1$ и $H7$ (рис. 7) и сравнение с литературными данными [3] для вакансии в p -Si показало, что свойства $H1$ совпадают с V_{Si} , а полоса $H7$ принадлежит новому дефекту межузельного типа.

Как установлено нами, дефекты $E1$ могут обратимо переходить в $H7$ (рис. 8). Сразу после облучения наблюдается высокая концентрация дефектов $E1$ (кривая 1). После инжекции неосновных носителей при $T = 77 \text{ К}$ уровень $E1$ полностью отжигается и растет концентрация $H3$ и $H7$ (кривая 2). При последующем нагреве уровень $H7$ отжигается (кинетика отжига соответствует реакции 1 порядка и показана на рис. 7), вновь появляется полоса $E1$, а полоса $H3(C_i)$ не меняет своей амплитуды (кривая 3). Если повторить инжекцию неосновных носи-

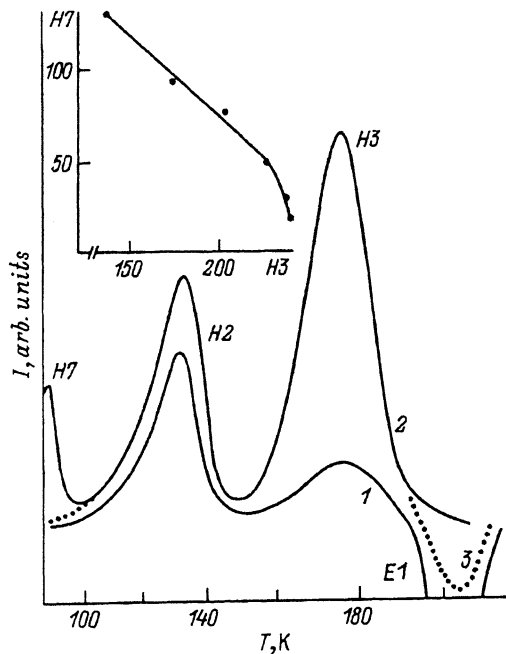


Рис. 8. Спектры DLTS образца p -Si-CG, облученного α -частицами при 265 K: 1 — сразу после облучения, 2 — после инъекционного отжига при 77 K, 3 — после отжига (5 мин) при 180 K без напряжения смещения. Спектры записаны при уровне инъекции, не вызывающем быстрого отжига дефектов E1.

телей при 77 K, то полоса E1 отжигается, H7 снова появляется, но с меньшей амплитудой, и одновременно с этим растет амплитуда H3. Эту процедуру можно повторять до тех пор, пока все центры E1 и H7 не перейдут в H3. При этом величина уменьшения концентрации H7 почти равна приращению концентрации H3 после каждого цикла термического отжига и инъекции при 77 K (рис. 8, вставка), т.е. все центры H7 при отжиге переходят в H3. Поскольку H7 появляется только в образцах Si-CG и отсутствует в Si-FZ и в силановых образцах с низкой концентрацией кислорода, можно предположить, что H7 принадлежит кислородсодержащему межузельному центру.

4. Обсуждение результатов

Основными дефектами после облучения образцов p -Si электронами при 77 K являются вакансии (H1) и межузельный углерод C_i (H3) (рис. 1,а). Следовательно, собственные междоузлия и пары Френкеля нестабильны и отжигаются за время электронного облучения, что согласуется с [5,6]. Протонное и α -облучение отличаются от электронного тем, что создают на каждый дефект гораздо меньшие концентрации электронно-дырочных пар и, кроме того, растет средняя энергия, передаваемая при столкновении с атомом мишени [8]. Это приводит к тому, что центров V-V(H2) и C_i (H3) сразу после облучения протонами и α -частицами мало (рис. 1,б,с), а вакансии не являются преобладающими дефектами. Поэтому можно заключить, что часть вакансий и собственных междоузлий связана и находится в составе более сложных центров. Такими дефектами могут быть, во-первых, пары Френкеля, поскольку они должны быть более стабильны при низкой концентрации электронно-дырочных пар, вызываю-

щих рекомбинационно-ускоренный отжиг. Во-вторых, при протонном и α -облучении энергия, передаваемая атому кремния при первичном столкновении, может достигать величины 0.1–0.4 от энергии падающей частицы при среднем значении (100–200) эВ, поэтому большинство первично выбитых атомов вызывает вторичные смещения. При этом образуется сложная дефектная структура с вакансионным ядром и междоузлиями на периферии. Простейшим случаем такого центра является непереориентируемая дивакансия [10].

Эти отличия протонного и α -облучения от электронного обуславливают характерные особенности спектров DLTS. Основная полоса $H4$ проявляет ряд нетривиальных свойств. Во-первых, большая ширина полосы свидетельствует о том, что она формируется набором дефектов, близких по свойствам, но размытых по энергиям. Во-вторых, подверженность инжекционному отжигу может говорить о том, что в состав дефектов входят собственные межузельные атомы, а рост амплитуды полосы $H1$ (рис. 6) — о том, что при отжиге $H4$ высвобождаются вакансии. Наконец, кинетика отжига дефектов, соответствующих центру полосы $H4$, подобна той, которая ожидается для пар Френкеля. Действительно, согласно [8,19–21], на ранней стадии отжига пар кинетика будет определяться рекомбинацией близких пар и процесс отжига должен соответствовать процессу 1 порядка. После аннигиляции близких пар на втором этапе происходит аннигиляция случайно расположенных вакансий и собственных междоузлий, чему соответствует процесс 2 порядка. Уменьшение концентрации дефектов приводит к отжигу, ограниченному диффузией, для которого показано [8,19–21], что доля остающихся дефектов пропорциональна $\tau^{-1/2}$. Эти рассуждения хорошо совпадают с результатами для кинетики отжига дефектов, соответствующих максимуму полосы $H4$.

Таким образом, дефекты $H4$ проявляют ряд свойств, ожидаемых для пар Френкеля, и, по-видимому, являются сложными дефектами, в состав которых входят междоузлия и вакансии. При этом полосу $H4$ в спектрах DLTS могут создавать вакансии, входящие в эти дефекты. Сильная размытость по энергии согласуется со сделанным в [5,6] выводом о значительном (до десятой доли эВ) сдвиге энергетического уровня вакансии за счет давления, создаваемого межузельным атомом. Дефекты $H4$ образуются при любом виде облучения, однако электронное облучение создает малую их концентрацию, быстро насыщающуюся с увеличением дозы (рис. 5,а). Концентрация $H4$ является квазиравновесной в условиях облучения электронами, т.е. разность между создаваемыми и отжигающимися за счет инжекционного отжига, происходящего путем атермической миграции междоузлий. При протонном и α -облучении $H4$ являются доминирующими дефектами. В этом случае они отжигаются, по-видимому, за счет диффузии вакансий, а не междоузлий. Последние, как было отмечено выше, в отсутствие ионизирующего излучения являются стабильными до 160 К в n -Si [10] и до комнатной температуры в p -Si [15].

Интересно также изменение формы спектра полосы $H4$ в зависимости от напряжения на образце во время облучения. Это дает дополнительные доказательства зависимости кинетики дефектообразования и вида образующихся дефектов от уровня возбуждения электронной подсистемы. При наложении обратного смещения происходит

вытягивание свободных носителей из области пространственного заряда и понижение неравновесной концентрации носителей в области $p-n$ -перехода. Это снижает влияние инжекционного отжига во время облучения и повышает концентрацию тех конфигураций, которые наиболее подвержены этому виду отжига. Обращает на себя внимание близость активационных энергий процессов отжига полосы $H4$ 2 и 3 порядка и полосы $H6$, что может говорить о едином активационном барьере во всех этих случаях.

Отжиг полосы $H4$ сопровождается ростом концентрации вакансий ($H1$) и, с некоторой задержкой по времени, ростом концентрации дивакансий (рис. 6). С учетом большой ширины полосы $H4$ общая концентрация дефектов $H4$ близка к концентрации образующихся при их отжиге дивакансий. Поэтому можно предположить, что дефекты $H4$ представляют собой замороженные и нерелаксированные конфигурации, образованные вторично смещенными атомами. В центре должно располагаться вакансионное ядро, а на периферии — междоузлия, часть которых удалена от ядра за счет атермической миграции на достаточное расстояние и не взаимодействует с дефектом. При термическом отжиге происходит аннигиляция междоузлий и вакансий, часть вакансий высвобождается, а на месте ядра дефекта формируются дивакансии и более сложные вакансионные комплексы. Из-за этого полоса дивакансии ($H2$) в спектрах DLTS в случае облучения протонами и α -частицами заметно уширена по сравнению со случаем облучения электронами. Эти предположения относительно структуры дефекта $H4$ нуждаются в дальнейших доказательствах.

Обсудим теперь свойства междоузельного центра $H7$. Наблюдение в образцах p -Si- CG дефекта $H7$ свидетельствует о существовании дополнительного канала отжига собственных междоузельных атомов, помимо их захвата атомами углерода, бора или алюминия. Это согласуется с результатами работы [7], где наблюдалось появление центров C_i в зонных образцах при 160 К, а в образцах, полученных методом Чохральского, — при 260 К. Был сделан вывод о захвате собственных междоузлий атомами кислорода. В работе [21] для дефектов, отнесенных к центрам $(Si-O)_i$, было получено близкое значение температуры отжига. Заметим, что в условиях приложенного к образцу смещения (аналог условий в n -Si) уровень $H7$ также отжигается при 260 К.

При объяснении обратимого перехода одного центра в другой [в нашем случае собственных междоузельных центров $E1(E_c - 0.39)$ эВ в центры $H7$] возможны два варианта [22]: либо переход является локальной перестройкой дефектной структуры под действием внешнего воздействия: температуры, инжекции неосновных носителей, давления и т.п.; либо один из дефектов является подвижным и при взаимодействии с атомами примеси или другими нарушениями решетки формирует новый центр. Поскольку в наших исследованиях центр $E1$ наблюдался во всех образцах, а $H7$ — только в Si- CG , вариант с локальной перестройкой не объясняет экспериментальные данные. Более вероятно объяснение, предполагающее, что дефект $E1$ становится подвижным при инжекции электронов, вызывающей его перезарядку, и захватывается либо на атомы углерода с образованием $C_i(H3)$, либо на атомы кислорода с образованием $H7$. Термический отжиг без напряжения смещения при 180 К либо под смещением при 260 К приводит к распаду

$H7$ и повторному появлению дефектов $E1$. Заметим, что центры $E1$ становятся подвижными и отжигаются, как только создаются условия для их перезарядки. Это может быть инжекция неосновных носителей или межзонная генерация электронно-дырочных пар ионизирующим излучением и светом при низких температурах, либо отжиг при $T > 300$ K, когда темп заброса электронов из валентной зоны на уровень $E1(E_c - 0.39$ эВ) становится существенным. Способность дефекта $E1$ к миграции говорит в пользу того, что он является простым дефектом, например одиночным межузельным атомом. Дальнейшие исследования должны быть направлены на выяснение структуры этого дефекта.

Список литературы

- [1] G.D. Watkins, In: *Radiation Damage in Semiconductors*, ed. by P. Baruch (Dunod, Paris, 1964) p. 97.
- [2] G.D. Watkins. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, N 23, 1 (1975).
- [3] G.D. Watkins, J.R. Troxell, A.P. Chatterjee. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, N 46, 16 (1978).
- [4] Y. Bar-Yam, J.D. Joannopoulos. *Phys. Rev. B*, **30**, 2216 (1984).
- [5] V.V. Emtsev, T.V. Mashovets, V.V. Mikhnovich, N.A. Vitovskii. *Rad. Eff. Def. Sol.*, **111-112**, 99 (1989).
- [6] В.В. Емцев, Т.В. Машовец, В.В. Михнович. *ФТП*, **26**, 22 (1992).
- [7] J.C. Bourgoin, W. Corbett. *Phys. Lett. A*, **38**, 135 (1972).
- [8] Ж. Бургуэн, М. Ланно. *Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты* (М., Мир, 1985).
- [9] G.D. Watkins, J.R. Troxell, A.P. Chatterjee, R.D. Harrist, *Int. Conf. on Radiation Physics of Semiconductors and Related Materials* (Tbilisi, 1979) p. 97.
- [10] R.D. Harris, G.D. Watkins. *Proc. 13th Int. Conf. Defects in Semiconductors* (Warrendale, PA, 1989) p. 799.
- [11] В.И. Губская, П.В. Кучинский, В.М. Ломако. *ФТП*, **20**, 1055 (1986).
- [12] Kh.A. Abdullin, B.N. Mukashev, M.F. Tamendarov, T.B. Tashenov. *Phys. Lett. A*, **144**, 198 (1990).
- [13] Х.А. Абдуллин, Б.Н. Мукашев, М.Ф. Тамендаров, Т.Б. Ташенов. *Письма ЖТФ*, **18**, 71 (1991).
- [14] Х.А. Абдуллин, Б.Н. Мукашев, М.Ф. Тамендаров. *ФТП*, **25**, 684 (1991).
- [15] Kh.A. Abdullin, B.N. Mukashev, M.F. Tamendarov, T.B. Tashenov. *Phys. Lett. A*, **166**, 40 (1992).
- [16] Е.В. Чихрай, Х.А. Абдуллин. *ФТП*, **25**, 751 (1991).
- [17] L.C. Kimerling, P. Blood, W.M. Gibson. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, N 46, 273 (1978).
- [18] L.C. Kimerling, M.J. Asom, J.L. Benton, P.J. Drevinsky, C.E. Cafer. *Mater. Sci. Forum*, **38-41**, 141 (1989).
- [19] Дж. Линс, Дж. Винйард. *Радиационные эффекты в твердых телах* (М., 1960).
- [20] T.R. Waire. *Phys. Rev. B*, **107**, 463 (1957).
- [21] D. Peak, J.W. Corbett. *Phys. Rev. B*, **5**, 1226 (1972).
- [22] A. BreLOT, J. Charlemagne. *Rad. Eff.*, **8**, 161 (1971).

Редактор Т.А. Полянская

Defects in *p*-Si irradiated at 77 K: energy spectrum and annealing kinetics

Kh.A.Abdullin and B.N.Mukashev

Physico-Technical Institute, Kazakhstan Academy of Sciences, 480082, Alma-Ata, Kazakhstan.

DLTS measurements were used to detect the defects in *p*-Si irradiated with electrons (4 MeV), protons (30 MeV) and α -particles (~ 4 MeV) at temperature 77 K. Irradiation conditions influence on defect creation are found. Electron bombardment causes appearance of vacancy ($H1 : E_v + 0.13$ eV) and interstitial carbon atom ($H3 : E_v + 0.29$ eV) centers. Defects $H4 : E_v + 0.20$ eV and $E1 : E_c - 0.39$ eV were detected in proton and α -particle bombardment samples. $H4$ -band has broad line and complicated annealing kinetics. For the first 60–80% of defect concentration the process of disappearance was found to be a decay of second-order kinetics. The last 20–40% of $H4$ concentration decay has a longer tail and annealing kinetics becomes similar with the third-order one. Essential annealing of $H4$ at 77 K take place under minority carrier injection conditions. Additional bands in DLTS spectra were observed in samples reverse-biased during bombardment. Further properties of self-interstitial centre $E1 : E_c - 0.39$ eV was studied. It is found that injection-enhanced annealing of $E1$ at 77 K causes appearance of interstitial carbon atom and centre $H7 : E_v + 0.13$ eV. The latter was identified as oxygen-related interstitial defect. This defect is unstable and turn into $E1$ at ~ 200 K.
