

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛУЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ И СТАБИЛЬНОСТЬ ВАКАНСИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В *p*-Si

Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П.

Исследовано влияние сильного электрического поля ($E > 10^3$ В/см) и температуры на эффективность образования и стабильность дефектов в *p*-Si при облучении α -частицами. Показано, что процессы радиационного дефектообразования в сильном электрическом поле и вне его существенно различны. Облучение в поле приводит к уменьшению эффективности введения дефектов с уровнями $E_v + 0.18$, $E_v + 0.21$ эВ, а дефекты с уровнем $E_v + 0.13$ эВ, которые относятся к вакансиям, практически не наблюдаются. Предполагается, что в сильном электрическом поле при облучении отжиг вакансий обусловлен изменением зарядовых состояний $V^0 \rightarrow V^{2-}$ за счет захвата электронов, генерированных в ионизационных процессах.

На сегодняшний день окончательно не установлено влияние температуры облучения на эффективность образования, механизм миграции, стабильность вакансий и комплексов с их участием в *p*-Si. Так, в работе [1] на основании исследований температурной зависимости концентрации носителей, а также с учетом данных [2] сделано заключение, что повышение температуры облучения от $T \leq 20$ до 80 К подавляет процесс образования изолированных вакансий в *p*-Si. При этом предполагается, что указанная закономерность характерна также для облучения кремния электронами и γ -квантами с энергией ≤ 1.5 МэВ [1]. В равновесных условиях определен уровень заполнения вакансий $E(0/++) = E_v + (0.078 \pm 0.002)$ эВ [1, 3, 4]. В то же время авторы работы [5] на основании аналогичных исследований делают заключение, что облучение *p*-Si при 78 К приводит к образованию стабильных (до 150 К) вакансий с равновесным уровнем заполнения $E(0/++) = E_v + (0.084 \pm 0.004)$ эВ. Однако дифференциальный анализ экспериментальных зависимостей $p(T)$ работы [5], проведенный в работе [6], привел ее автора к заключению, что дефекты, наблюдаемые в [5], не являются центрами с отрицательной энергией корреляции, т. е. вакансиями.

В то же время данные емкостной спектроскопии убедительно свидетельствуют об эффективном образовании изолированных вакансий в *p*-Si, облученном при 78 К [7-10], а именно облучение при 78 К (как и облучение при $T \leq 20$ К) приводит к образованию центров с энергией термоэмиссии дырок, равной $-E_v + 0.13$ эВ, которая идентифицирована как энергия переходов $V^{2+} \rightarrow V^+$ [11]; в облученном при 78 К *p*-Si центры с уровнем $E_v + 0.13$ эВ являются основными радиационными дефектами, а эффективность их введения при облучении электронами с энергией 1.5 МэВ составляет $\sim 10^{-2}$ см $^{-1}$ [8, 10], что сравнимо с эффективностью их образования при облучении ниже 20 К, равной $\sim 3 \times 10^{-2}$ см $^{-1}$ [12]; кинетика термического отжига вакансий, введенных облучением при $T \leq 20$ К и идентифицированных методом ЭПР, совпадает с кинетикой отжига дефектов с уровнем $E_v + 0.13$ эВ, введенных облучением при 78 К [7]; как будет показано далее инжекция электронов приводит к отжигу дефектов с уровнем $E_v + 0.13$ эВ, что наблюдается и для вакансий, введенных облучением при $T \leq 20$ К [7].

Таким образом, несмотря на наличие противоречивых данных [1-6], результаты емкостной спектроскопии свидетельствуют, что облучение *p*-Si электро-

нами при 78 К приводит к введению стабильных изолированных вакансий. Роль сильного электрического поля в образовании и стабильности свободных вакансий и комплексов с их участием (в дальнейшем будем называть их дефектами вакансионного типа) в p -Si практически не изучена.

В данной работе исследованы влияние температуры и сильного электрического поля ($E > 10^3$ В/см) на энергетический спектр, эффективность образования и стабильность изолированных вакансий и дефектов вакансионного типа в p -Si при облучении α -частицами.

Измерения проводились на n^+ - p -структурах, изготовленных на основе тянутого p -Si, легированного бором ($\rho = 10$ Ом·см). Толщина эмиттера составляла 2—3 мкм. Образцы облучались со стороны n^+ -области неколлимированным пучком α -частиц изотопного источника ^{210}Po в интервале температур 78—300 К в двух режимах: без смещения (без поля) и при напряжении обратного смещения n^+ - p -перехода 15 В (в поле).

Положение энергетических уровней радиационных дефектов (РД), их концентрация и сечение захвата основных носителей заряда определялись методом термоэмиссионной емкостной спектроскопии при напряжении обратного смещения 7 В. Такое напряжение обеспечивало зондирование базовой области n^+ - p -перехода, в которой при облучении скорость удаления носителей постоянна и напряженность электрического поля была больше 10^3 В/см [13].

Отжиг образцов осуществлялся следующим образом. После облучения при 78 К образец при записи спектра нагревался на 30 К и при этой температуре выдерживался 15 мин. Затем он охлаждался до 78 К и производилась запись спектра до температуры, превышающей температуру отжига на 30 К, при которой он снова выдерживался 15 мин. После этого образец снова охлаждался до 78 К и весь цикл повторялся. Такая процедура продолжалась до 410 К.

После облучения структур при 78 К без поля в области зондирования p -базы наблюдаются дефекты с энергиями активации термоэмиссии дырок $E_a + 0.13$ (Н1), $E_a + 0.18$ (Н2), $E_a + 0.21$ (Н3) и $E_a + 0.26$ эВ (Н4). При облучении в поле эффективность введения дефектов Н4 не изменяется, дефектов Н2 и Н3 падает, а дефекты Н1 практически не наблюдаются (рис. 1). Нагрев образцов, облученных при 78 К как в поле, так и без поля, приводит к отжигу дефектов Н1, Н2 и Н4, увеличению концентрации дефектов Н3 и появлению дефектов, характерных для облучения при 300 К [14]. Облучение при 78 К в поле и без него с последующим нагревом до 300 К приводит к тому, что в первом случае концентрация дефектов Н3 в 1.5 раза меньше. Аналогичное влияние поля на эффективность образования дефектов Н3 наблюдается и при облучении при 300 К. Следует отметить, что концентрация дефектов Н3, образующихся при облучении при 300 К в p -Si, в 1.5 раза больше, чем после облучения при 78 К и последующем нагреве до 300 К.

Облучение при 78 К как в поле, так и без него и последующая инжекция электронов при той же температуре приводят к появлению спектра дефектов, характерного для облучения при 300 К. При этом концентрация дефектов Н3 в 3 раза меньше, чем в случае облучения при 300 К.

Для уточнения параметров и природы дефектов был проведен изохронный отжиг образцов, облученных при 78 К без поля (рис. 2). Видно, что дефекты Н1, Н2 и Н4 отжигаются до 230 К. В интервале температур 140—230 К происходит увеличение концентрации дефектов Н3, которые обычно связываются с дивакансиями [9].

Из рис. 2 видно, что отжиг пика Н3 происходит в две стадии: около 380 и 550 К [14]. Можно предположить, что уровень $E_a + 0.21$ эВ вносится дефектами двух типов — дивакансией (Н3'), стабильной до 580 К, и центром Н3'' неизвестной природы, стабильным при $T < 350$ К. Дефект Н2 также отжигается в две стадии: 120—140 и 140—230 К, и можно предположить, что энергетическому уровню $E_a + 0.18$ эВ соответствуют два дефекта: Н2' и Н2''. Отметим, что температурный диапазон 140—230 К, где происходит дообразование дефектов Н3, практически совпадает с областью температур отжига дефектов Н2'' и Н4. В дополнение амплитуда дообразованного Н3 практически равна сумме отжигающихся Н2'' и Н4. Это позволяет предположить, что дообразование де-

фектов $H3$ происходит за счет $H2''$ и $H4$. Действительно, в работе [8] в образцах, облученных электронами ($E=1.5$ МэВ), наблюдали отжиг дефектов с энергетическим уровнем $E_v+0.19$ эВ, которые полностью перестраивались в дефекты

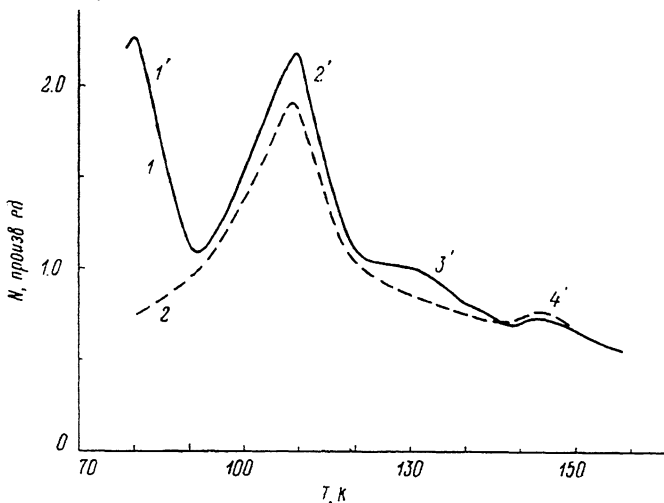


Рис. 1. Энергетический спектр дефектов (временное окно 2 мс) в облученном p -Si при 78 К. 1 — облучение без поля ($E=0$), 2 — облучение в поле ($E > 10^3$ В/см), 1'—4' — максимумы, соответствующие $H1$, $H2$, $H3$, $H4$.

$H3$. Предполагалось, что данные дефекты представляют собой дивакансии с захваченными атомами кремния. При их отжиге происходит отщепление атомов кремния. Можно ожидать, что наблюдаемые нами дефекты $H2''$ и дефекты с энергетическим уровнем $E_v+0.19$ эВ одни и те же. В работе [8] отмечалось,

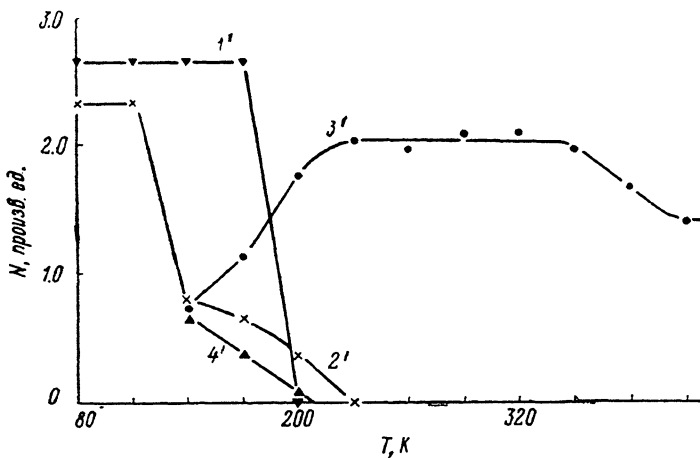


Рис. 2. Изохронный отжиг дефектов ($\Delta t=15$ мин) в облученном без поля при 78 К p -Si 1'—4' — то же, что и на рис. 1.

что данные дефекты могут вводиться прямым путем. Действительно, в нашем случае при облучении α -частицами, когда энергия атомов отдачи почти на порядок выше, чем при облучении электронами с $E=1.5$ МэВ, эффективность введения дефектов $H2''$ составляет 20—25 % от скорости введения дефектов $H1$, в то время как при облучении электронами она не превышает 10 %. Дефекты $H3$, как отмечалось выше, отжигаются в две стадии, причем концентрация дефектов, отжигающихся на первой стадии, составляет 30 % от общей концентрации дефектов $H3$. Она близка к концентрации дефектов $H2''$. С учетом вышесказанного можно предположить, что дефекты $H2''$ представляют собой либо комплекс дивакансия—междоузельный атом, либо дивакансию в зарядовом со-

стоянии и конфигурации, отличной от дефектов $H3''$. В интервале температур 140—230 К они перестраиваются и дают такой же энергетический уровень, что и дефекты $H3''$, а в интервале температур 340—400 К отжигаются.

Следует отметить, что дефекты $H4$ образуются только при облучении протонами [9] и α -частицами и не наблюдаются при облучении электронами [8]. Кроме того, эффективность их введения не зависит от поля. Все это позволяет предположить, что образование дефектов $H4$ идет каскадным путем.

Из приведенных результатов видно, что в случае облучения в электрическом поле в p -Si падает эффективность введения изолированных вакансий ($H1$), дивакансий ($H3''$) и дефекта $H2''$, который может быть отнесен к дефектам вакансионного типа.

Рассмотрим влияние электрического поля на эффективность введения вакансий. При облучении при 78 К в поле они практически не наблюдаются (рис. 4). Существенно отметить, что наложение электрического поля в процессе записи спектров, т. е. изменение зарядового состояния $V^{2+} \rightarrow V^0$, не приводит к изменению концентрации вакансий. Отсутствие полосы $E_p + 0.13$ эВ, принадлежащей вакансиям, при облучении в поле может свидетельствовать о том, что при 78 К они подвижны в области с $E > 10^8$ В/см и за время облучения $t \approx 10^3$ с эффективно удаляются электрическим полем из области пространственного заряда $n^+ - p$ -перехода либо уходят на стоки. В области поля в отсутствие облучения устанавливается зарядовое состояние вакансий V^0 . Известно, что в этом зарядовом состоянии энергия их миграции оценивается не ниже 0.32 эВ [7] и они стабильны до 160 К. В то же время в зарядовом состоянии V^{2-} (V^-) энергия миграции вакансий составляет 0.18 эВ и они подвижны при 78 К. Изменение зарядового состояния вакансий $V^0 \rightarrow V^{2-}$ (V^-) в области поля при облучении может быть обусловлено захватом электронов, генерируемых в ионизационных процессах. Оценки показывают, что уровень ионизации в области образования дефектов составляет $\sim 10^{18} - 10^{20}$ см $^{-3}$. При такой концентрации неравновесных электронов и при условии $\sigma_n/\sigma_p \gg 1$ ($\sigma_p \approx 10^{-15}$ см 2), по-видимому, определяющим будет состояние вакансий V^{2-} . Соответственно будут эффективны процессы их ухода из области поля и отжига по типу, наблюдаемому при инжекции электронов или генерации носителей при подсветке лазером [7, 15].

Исходя из экспериментальных результатов, можно оценить предельное значение для энергии миграции вакансий в нашем случае. Предположим, что скорость отжига τ^{-1} вакансий в области поля при облучении описывается соотношением

$$\tau^{-1} = \nu \exp(-E_m/kT). \quad (1)$$

Исходя из литературных данных, для величины ν можно принять диапазон значений $10^6 - 10^9$ с $^{-1}$, так как за время облучения в поле практически не наблюдается полосы, ответственной за введение вакансий. Можно предположить, что $t_{обл} \approx (4-5)\tau$. В этом случае из соотношения (1) следует, что энергия миграции дефектов составляет 0.14—0.18 эВ. Эта величина совпадает со значением E_m для вакансий в n -Si [12]. Последнее может свидетельствовать в пользу того, что в области поля в p -Si при облучении вакансии образуются в зарядовом состоянии V^{-2} (или V^-).

Инжекция электронов после облучения без поля при 78 К приводит к исчезновению дефектов $H1$ и $H2''$, как и в случае термического отжига, и увеличению концентрации дефектов $H3$. Отжиг вакансий в p -Si при захвате неосновных носителей заряда отмечался как при 78, так и при 20 К [7, 15]. Он связывается с уменьшением энергии миграции вакансий при захвате электронов и может служить для идентификации дефектов. В [7] отмечается, что при температуре 20 К процесс отжига слишком быстрый в сравнении с чисто термоактивационным механизмом миграции за счет изменения зарядового состояния при захвате электронов. Предполагается, что этот механизм помимо изменения энергии миграции при перезарядке вакансий должен включать в себя стимулированное движение за счет передачи энергии при захвате носителей или по механизму Бургуэна. Как указывалось, инжекция электронов приводит к исчезновению дефектов $H2''$. Можно предположить, что захват электронов указанными центрами приводит к их перестройке и появлению дефектов с энергетическим

уровнем, близким к энергетическому положению дивакансии, и, следовательно к увеличению амплитуды пика $H3$.

Таким образом, при облучении p -Si при 78 К без поля вводятся изолированные вакансии в зарядовом состоянии V^{2+} , дающие для переходов $V^{2+} \rightarrow V^+$ энергетический уровень $E_v + 0.13$ эВ. Инжекция электронов приводит к их перезарядке в состояние V^2 , в котором они являются подвижными при 78 К и частично идут на образование дивакансий. В случае облучения в сильном электрическом поле ($E > 10^3$ В/см) при 78 К в спектре дефектов отсутствует энергетический уровень вакансий. Это может быть связано с тем, что в электрическом поле при облучении изменение зарядового состояния вакансий $V^0 \rightarrow V^{2-}$ обусловлено захватом электронов, генерируемых в ионизационных процессах.

Исследование образования и отжига дефектов с энергетическим уровнем $E_v + 0.21$ эВ показывает, что ему соответствуют два центра, один из которых дивакансия. При облучении при 78 К в электрическом поле эффективность его введения падает, как и в случае облучения при 300 К.

Исследование отжига дефектов $H2$ показывает, что энергетическому уровню $E_v + 0.18$ эВ соответствуют два центра, один из которых ($H2''$) при отжиге в интервале температур 140—230 К практически полностью перестраивается в дефект $H2'''$. Эффективность введения дефекта $H2'''$ в электрическом поле падает.

Показано, что дефект с энергетическим уровнем $E_v + 0.26$ эВ образуется в p -Si каскадным путем и эффективность его введения не зависит от электрического поля. Центры $H2'''$ и $H4'''$ испытывают полный рекомбинационно-ускоренный отжиг при инжекции электронов при 78 К.

Список литературы

- [1] Емцев В. В., Маргарян М. А., Машовец Т. В. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 2. С. 296—299.
- [2] Watkins G. D. // Rad. Eff. Semicond. N. Y., 1968. P. 67—81.
- [3] Емцев В. В., Маргарян М. А., Машовец Т. В. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 8. С. 1516—1519.
- [4] Емцев В. В., Машовец Т. В., Дабаян А. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 10. С. 1888—1892.
- [5] Mukasev B. N., Frolov V. V., Koldin L. G. // Phys. Lett. 1982. V. 91A. N 7. P. 358—360.
- [6] Hoffmann H. J. // Phys. Lett. 1983. V. 98A. N 8. P. 444—446.
- [7] Watkins G. D., Troxell J. R., Chatterjee A. P. // Def. Rad. Eff. Semicond. 1978. Conf. Ser. N 46. Bristol—London, 1979. P. 16—30.
- [8] Londos C. A. // Phys. Rev. B. 1987. V. 35. N 14. P. 7511—7514.
- [9] Kimerling L. C., Blood P., Gibson W. M. // Def. Rad. Eff. Semicond. 1978. Conf. Ser. N 46. Bristol—London, 1979. P. 273—280.
- [10] Bains S. K., Banbury P. C. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1985. V. 18. P. L109—L116.
- [11] Watkins G. D., Troxell J. R. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 44. N 9. P. 593—596.
- [12] Watkins G. D. // Lat. Def. Semicond. 1975. P. 1—22.
- [13] Кучинский П. В., Ломако В. М., Пегрунин А. П. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 10. С. 2066—2068.
- [14] Губская В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 6. С. 1055—1059.
- [15] Gregory V. L. // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. N 12. P. 3765—3769.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем им. А. Н. Савченко
при БГУ им. В. И. Ленина
Минск

Получена 17.02.1989
Принята к печати 5.11.1990