

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Добровинский Ю. М., Махкамов Ш., Мирзаев А.,
Митин В. И., Турсунов Н. А.

Методом DLTS исследовано влияние температуры облучения на накопление и отжиг радиационных комплексов в диодах из *n*-Si при воздействии электронами с энергией 4 МэВ.

В области повышенных температур облучения обнаружены дополнительные радиационные дефектные центры с $E_c - 0.13$ и $E_c - 0.2$ эВ. Показано, что эффективность формирования указанных дефектных центров при высокотемпературном облучении в несколько раз выше по сравнению с диодами, облученными при комнатной температуре и отожженными при температурах облучения.

Установлена взаимосвязь сформировавшегося дефектного центра $E_c - 0.13$ эВ с распадом А-центра. Показано, что центр с уровнем $E_c - 0.2$ эВ является сложным комплексом и проявляет высокую термическую стабильность.

Обсуждаются квазихимические реакции, ответственные за формирование указанных дефектных центров при терморadiационной обработке.

Исследованию процесса радиационного дефектообразования в кремнии в зависимости от температуры облучения посвящен ряд работ [1-5]. Полученные авторами экспериментальные результаты неоднозначны и сильно зависят от условий терморadiационной обработки, особенно в области температур 300-500 °С, характерной для формирования термодefектов. Сравнительно новые данные о скорости введения радиационных, термических и собственных defектов от температуры терморadiационной обработки получены авторами [6-8].

Наблюдаемые немонотонности изменения скорости введения радиационных defектов (РД) от температуры облучения без образования дополнительных РД [6], многостадийность кинетики отжига А-центра при термообработке облученных образцов [7], генерация собственных defектов при горячем облучении и их участие в образовании комплексов [8] указывают на сложность протекания процесса формирования РД при терморadiационном воздействии. В связи с этим важное значение имеет изучение процесса формирования РД в кремниевых *p-n*-структурах при терморadiационной обработке, особенно РД, вносящих определяющий вклад в изменение рекомбинационных характеристик изготавливаемых кремниевых изделий.

В данной работе приведены результаты исследований методом DLTS параметров радиационных defектов с уровнем $E_c \leq 0.3$ эВ и эффективность их введения в диоды из кремния *n*-типа в зависимости от температуры и флюенса электронного облучения, а также влияние высокотемпературной обработки на отжиг А-центра и формирование дополнительных defектов.

Исследование радиационных defектов проводилось в диодах, изготовленных из кремния *n*-типа, выращенного по методу Чохральского, с содержанием фосфора $2 \cdot 10^{15} - 1.5 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Терморadiационная обработка проводилась ускоренными электронами с энергией 4 МэВ в интервале флюенсов $10^{15} - 5 \cdot 10^{16}$ см⁻² при температуре 300-400 °С.

Для определения вклада температуры облучения в образование радиационных defектов аналогичными дозами облучались контрольные образцы при комнатной температуре, которые затем подвергались термообработке при 300-

400 °C в течение времени, равного времени набора флюенса электронов. Средняя плотность тока пучка в обоих случаях была одинаковой и составляла 0.25 мкА/см².

Измерение спектра DLTS диодов, облученных электронами при комнатной температуре в интервале флюенсов $10^{15} \div 5 \cdot 10^{16}$ см⁻², показало образование

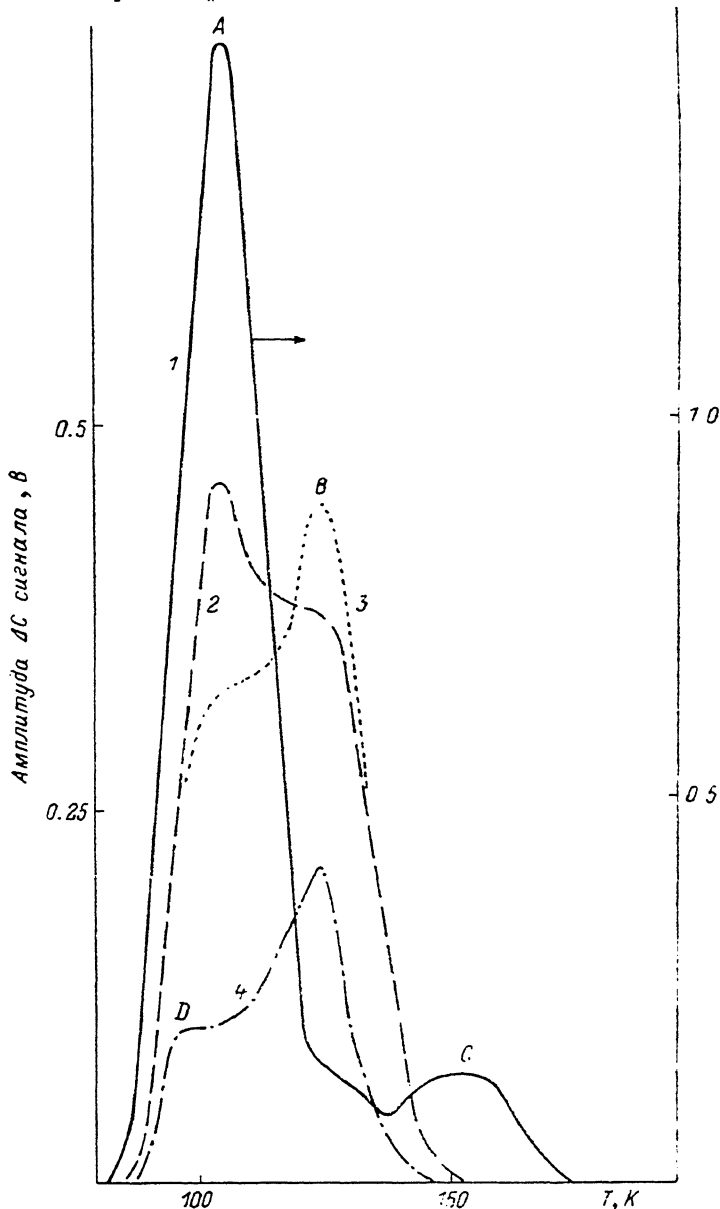


Рис. 1. Спектры DLTS диодов из *n*-Si, облученных флюенсом электронов 10^{16} см⁻² при различных температурах.

*T*_{обл.}, °C: 1 — 325; 2 — 350; 3 — 375; 4 — 400.

известных четырех типов дефектных комплексов, обнаруженных в [6]: $E_c - 0.17$, $E_c - 0.23$, $E_c - 0.39$ и $E_c - 0.44$ эВ.

Повышение температуры облучения приводит к появлению дополнительных радиационных дефектов. На рис. 1 приведены спектры DLTS образцов, облученных флюенсом электронов 10^{16} см⁻² в интервале температур 300 ÷ 400 °C.

В спектре DLTS образцов, облученных при температурах 300 ÷ 325 °C (рис. 1, кривая 1), в области $E_i < 0.3$ эВ наблюдаются три пика (A, B, C): A обусловлен ионизацией A-центра ($E_c - 0.17$ эВ); слабо разрешенный пик B.

($E_c - 0.2$ эВ) образуется в результате высокотемпературного облучения или отжига, а пик C ($E_c - 0.23$ эВ) связывается с ионизацией второго зарядового состояния дивакансии.

В образцах, облученных при $T \geq 350$ °С (рис. 1, кривая 2), пик C не наблюдается, сигнал от пика A уменьшается, а величина пика B увеличивается и достигает своего максимума при $T_{обл.} = 375$ °С. При этом концентрация уровня $E_c - 0.2$ эВ, соответствующего пику B (рис. 1, кривая 3), составила $2 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$ (рис. 2, кривая 2), а сечение термической эмиссии электронов $\sigma_n = 10^{14}$ см 2 .

Дальнейшее увеличение температуры облучения до 400 °С привело к уменьшению концентрации уровня $E_c - 0.2$ эВ, исчезновению сигнала A , обусловленного уровнем $E_c - 0.17$ эВ (рис. 2, кривые 1, 2), и появлению заметного дополнительного пика D (рис. 1, кривая 4), соответствующего уровню $E_c - 0.13$ эВ с концентрацией 10^{13} см $^{-3}$ (рис. 2, кривая 3).

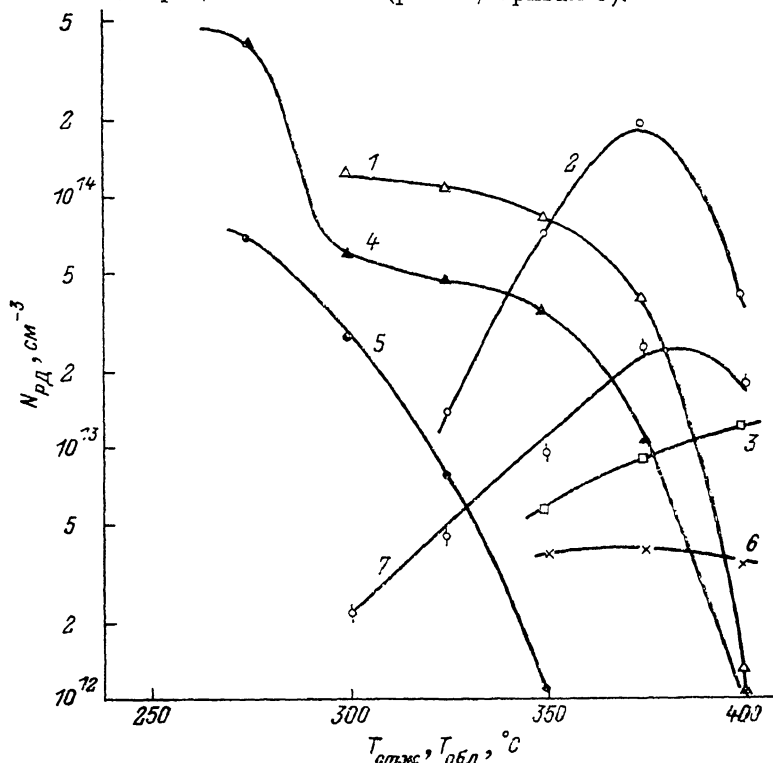


Рис. 2. Изменение концентрации радиационных дефектов в диодах из n -Si в зависимости от температуры облучения (1—3) и изохронный отжиг РД в диодах, облученных при комнатной температуре (4—7).

$\Phi_0 = 10^{16}$ см $^{-2}$; $E_c - E_i$, эВ: 1, 4 — 0.17 (А-центр); 2, 7 — 0.2; 3, 6 — 0.13; 5 — 0.23.

Для определения вклада температуры облучения в формирование дополнительных дефектных центров $E_c - 0.2$ и $E_c - 0.13$ эВ параллельно облучались контрольные образцы флюенсом до 10^{16} см $^{-2}$ при комнатной температуре, которые затем отжигались при температуре 300–400 °С в течение времени, равного времени набора флюенса электронов. Изменение концентрации РД облученных и отожженных контрольных образцов приведено на рис. 2 (кривые 4–7).

Анализ изохронного отжига контрольных образцов показывает, что центры с уровнями $E_c - 0.2$ и $E_c - 0.13$ эВ начинают проявляться только после термообработки при $T \geq 300$ и ≥ 350 °С соответственно с одновременным исчезновением уровня $E_c - 0.23$ эВ и отжигом А-центра. В этих образцах при одинаковом флюенсе облучения концентрация сформировавшихся центров $E_c - 0.2$ и $E_c - 0.13$ эВ всегда меньше по сравнению с образцами, облученными при высокой температуре. Для выяснения взаимосвязанности образования центров $E_c - 0.2$ и $E_c - 0.13$ эВ с распадом А-центра исследовалось изменение концентрации указанных центров при изотермическом отжиге А-центра.

С этой целью образцы облучались различными флюенсами электронов при комнатной температуре и 375 °С (область температур эффективного формирования уровня $E_c-0.2$ эВ), а затем отжигались при $T=450$ °С (область температур полного распада А-центра).

Исследование влияния отжига на формирование радиационных дефектов в образцах, облученных при указанных режимах, показало, что эффективность образования центров $E_c-0.13$ и $E_c-0.2$ эВ определяется не только температурой и флюенсом облучения, но и условиями отжига.

На рис. 3 приведены изменения концентрации дефектов в диодах, облученных различными флюенсами электронов при комнатной температуре и 375 °С, затем подвергнутых отжигу при 450 °С.

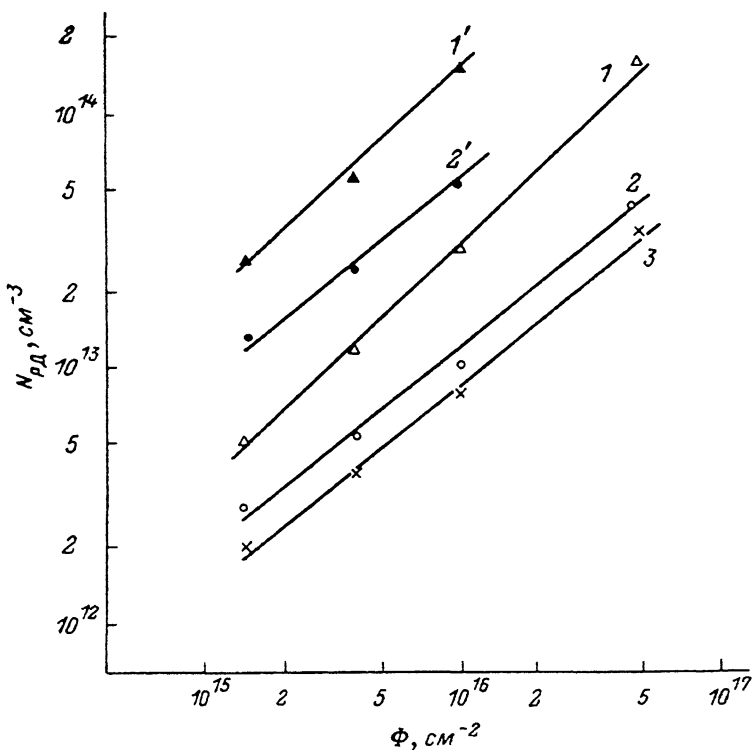


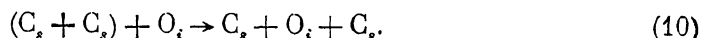
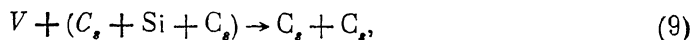
Рис. 3. Изменение концентрации радиационных дефектов в диодах из n-Si, облученных при комнатной температуре (1—3) и 375 °С (1', 2'), от флюенса электронов.

E_c-E_i , эВ: 1, 1' — 0.2; 2, 2' — 0.13; 3 — 0.25.

Измерение спектров образцов, облученных при комнатной температуре и отожженных при 450 °С, показало, что А-центр и дивакансия полностью отжигаются и в спектре DLTS появляются дополнительные пики, обусловленные уровнями $E_c-0.13$, $E_c-0.2$ и $E_c-0.25$ эВ. Концентрация сформировавшихся дефектных центров, соответствующих уровням $E_c-0.13$, $E_c-0.2$ и $E_c-0.25$ эВ, увеличивается с ростом флюенса электронов (рис. 3, кривые 1—3). В спектре DLTS образцов, облученных при 375 °С, наблюдаются уровни $E_c-0.13$ и $E_c-0.2$ эВ, концентрация которых также возрастает с ростом флюенса электронов, но практически мало изменяется при отжиге 450 °С, а уровень $E_c-0.25$ эВ отсутствует. Сопоставление концентрации центров $E_c-0.13$ и $E_c-0.2$ эВ в диодах, облученных при 375 °С, с диодами, облученными при комнатной температуре и отожженными при 450 °С, показало, что при идентичных флюенсах облучения эффективная концентрация сформировавшихся центров $E_c-0.13$ и $E_c-0.2$ эВ в диодах, облученных при 375 °С, в несколько раз выше по сравнению с диодами, облученными при комнатной температуре (рис. 3, кривые 1', 2' и 1, 2). В этих образцах преобладающими центрами являются дефекты, соответствующие уровню $E_c-0.2$ эВ. Анализ полученных результатов позволяет сде-

лать вывод о стимулированном образовании дефектных центров $E_c-0.13$ и $E_c-0.2$ эВ под воздействием высокотемпературного облучения.

При образовании центров с уровнями $E_c-0.13$ и $E_c-0.2$ эВ наиболее вероятным является протекание следующих квазихимических реакций из продуктов распада радиационных дефектных комплексов:



Квазихимическая реакция (1) приводит к образованию А-центра, который наблюдается в спектре DLTS исследуемых образцов до 400 °С. Реакция (2) приводит к образованию дивакансий, которые отжигаются при 375 °С и не наблюдаются в образцах, облученных и обработанных при температурах выше 350 °С.

Квазихимические реакции (3)–(5) являются ответственными за формирование дефекта типа V_2O . Этому дефекту принадлежит уровень $E_c-0.3$ эВ и отжигается он до температуры 300 °С [6]. Реакции (6) и (7) приводят к образованию VO_2 . Модель центра предложена в работе [9], а экспериментальные данные о его обнаружении приведены в более ранней работе [10]. Энергия ионизации дефекта VO_2 находится в нижней половине запрещенной зоны кремния, и поэтому мы считаем, что наблюдаемые уровни не связаны с этим типом дефекта. Однако в более поздних работах [7, 11] было показано, что комплексу VO_2 , образуемому по реакции (7) при конверсии А-центра, соответствует уровень $E_c-0.11$ эВ. Известно, что этот уровень проявляет термическую стабильность до 400 °С. Дальнейшее повышение температуры отжига, как показали авторы [11], приводит к перестройке центра VO_2 по реакции (8) на комплекс VO_3 с уровнем $E_c-0.12$ эВ.

Анализ спектра DLTS диодов, облученных при различных температурах, и изменения концентрации РД в зависимости от температуры отжига показывает, что формирующийся центр с уровнем $E_c-0.13$ эВ по характеру формирования близок уровню $E_c-0.12$ эВ. Уровень $E_c-0.13$ эВ проявляется только после распада А-центра, начиная с области температур терморadiационной обработки ≥ 350 °С, и зависит от концентрации А-центра. При малых концентрациях А-центра уровень $E_c-0.13$ эВ наблюдается в основном только после отжига при $T \geq 400$ °С, т. е. после распада значительной концентрации А-центра. С увеличением содержания А-центра или при понижении температуры облучения проявление $E_c-0.13$ эВ в спектре DLTS незначительно смещается в области меньших температур. В области температур облучения или отжига ниже чем 350 °С в терморadiационно обработанных диодах уровень $E_c-0.13$ эВ не проявляется. Такое свойство центра с уровнем $E_c-0.13$ эВ указывает на взаимосвязанность его с А-центром. Сопоставляя параметры уровня, характер и температуру его формирования с данными [7, 11], можно предположить, что дополнительный центр с уровнем $E_c-0.13$ эВ связан с образованием комплекса VO_3 .

Сложный характер имеет сформированный уровень $E_c-0.2$ эВ. Увеличение его концентрации с повышением температуры облучения и достижение максимального значения при облучении в области температур 375°C , проявление его в образцах, облученных при комнатной температуре только после отжига при $T \geq 300^\circ\text{C}$, высокая концентрация уровня $E_c-0.2$ эВ по сравнению с А-центром, дивакансией и комплексом VO_2 указывают на образование сложного комплекса, проявляющего высокую термическую стабильность. Более вероятно, к образованию такого комплекса могут привести реакции (9) и (10), при которых формируется центр типа $\text{C}_i + \text{O}_i + \text{C}_s$.

Обнаруженный уровень $E_c-0.25$ эВ проявляется только после отжига при $T=450^\circ\text{C}$ в образцах, облученных при комнатной температуре. Проявление его, возможно, связано с активацией неконтролируемых примесей, которые образуют комплексы с продуктами РД в процессе распада последнего. Подтверждением этого являются отсутствие указанного уровня в высокоомных образцах и увеличение концентрации уровня $E_c-0.25$ эВ с ростом флюенса облучения.

Отсутствие уровня $E_c-0.25$ эВ в диодах, облученных при $T=375^\circ\text{C}$, возможно, связано с недостаточностью температуры облучения для стимулирования участия неконтролируемых примесей в комплексообразовании. Отжиг образцов при $T=450^\circ\text{C}$, предварительно облученных при 375°C , показывает, что центр с уровнем $E_c-0.25$ эВ формируется, однако концентрация его всегда меньше по сравнению с образцами, облученными при комнатной температуре и отожженными при $T=450^\circ\text{C}$. Такое поведение уровня $E_c-0.25$ эВ указывает на прямую зависимость этого центра от концентрации образованных РД сразу после облучения.

Таким образом, комбинированное терморadiационное воздействие стимулирует формирование дополнительных каналов для протекания квазихимической реакции и повышает эффективность образования новых радиационных дефектов с $E_i < 0.3$ эВ, имеющих важное практическое значение для регулирования рекомбинационных характеристик кремниевых диодов при использовании радиационной технологии.

Список литературы

- [1] Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1977. 256 с.
- [2] Вавилов В. С., Глазман В. Б., Исаев Н. У., Мукашев Б. Н., Спицин А. В. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 3. С. 471—475.
- [3] Милевский Л. С., Пагава Т. А. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 7. С. 1287—1291.
- [4] Болотов В. В., Васильев А. В., Смирнов Л. С. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 7. С. 1670—1674.
- [5] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.
- [6] Васильев А. В., Панов В. И., Смагулова С. А., Шаймеев С. С. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 573—575.
- [7] Литвинов В. В., Пальчик Г. В., Уренов В. И. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 2. С. 376—378.
- [8] Емцев В. В., Далуда Ю. Н., Шаховцев В. И., Шиндич В. Л., Нейман В. Б., Антоненко Р. С., Шмальц К. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 2. С. 374—376.
- [9] Deleo G. G., Milsted C. S., Kralik J. C. // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. N 6. P. 3588—3592.
- [10] Corbett J. W., Watkins G. D., McDonald. // Phys. Rev. 1964. V. 135. N 3. P. 1381—1386.
- [11] Lindstrom J. L., Oehrlein G. S., Corbett J. W. // Phys. St. Sol. (a). 1986. V. 95. N 1. P. 179—184.