

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МОЩНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ

Ф.П. Коршунов¹⁾, Ю.В. Богатырев¹⁾, С.Б. Ластовский¹⁾, В.И. Кульгачев¹⁾, Л.П. Ануфриев²⁾,
И.И. Рубцевич²⁾, В.В. Глухманчук²⁾, Н.Ф. Голубев²⁾

¹⁾Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, Республика Беларусь, 220072, Минск, ул. П.Бровки, 17, тел. 284-12-89. E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by;

²⁾НПО «Интеграл», Республика Беларусь, 220108, Минск, пл. Казинца, 1

Перспективным способом повышения быстродействия полупроводниковых приборов является облучение быстрыми частицами или гамма-квантами [1]. При этом в объем структур вводятся радиационные дефекты (РД), являющиеся центрами рекомбинации неосновных носителей заряда (ННЗ).

Радиационные методы обработки применимы как для готовых приборов, так и для приборных структур. Монтаж р-п-структур в корпуса сопровождается рядом технологических операций, в том числе и пайкой выводов. Для многих типов мощных полупроводниковых приборов этот процесс проводится при температурах 650÷670 К. При столь высоких температурах многие типы радиационных дефектов отжигаются [2]. Поэтому характеристики готовых приборов и структур могут существенно различаться. В связи с этим возникает необходимость изучения термической стабильности как параметров облученных приборных структур, так и введенных радиационных дефектов.

В данной работе исследовано влияние изохронного отжига радиационных дефектов при 573÷773 К на параметры облученных электронами с $E = 4$ МэВ мощных кремниевых диодных р-п-структур, изготовленных на НПО «Интеграл».

Исследуемые образцы изготавливались по эпитаксиальной технологии на основе п-кремния КЭФ-28. Р-п-переход создавался имплантацией бора в п-базу с последующим отжигом при 1473 К. В качестве омических контактов напылялся алюминий. Площадь р-п-перехода готовых диодных структур равнялась $9,4 \cdot 10^{-2}$ см².

Облучение р-п-структур осуществлялось электронами с энергией $E = 4$ МэВ при плотности потока электронов 10^{11} см⁻²с⁻¹. Температура облучения не превышала 300 К.

Изохронный отжиг облученных образцов проводился в диапазоне температур $T_{отж.} = 573 \div 773$ К в печи на воздухе.

Измерялись время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) τ в п-базе и прямое падение напряжения U_F в импульсном режиме (длительность импульса — 400 мкс).

Определение характеристик радиационных дефектов (концентрация, энергия активации, сечение захвата) в базовой области диодных структур осуществлялось методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS). Релаксация емкости измерялась при значении обратного смещения $U = -5$ В.

Исходные значения параметров мощных кремниевых диодов были следующие: $\tau = 3,2 \div 3,5$ мкс; $U_F = 0,96 \div 1,04$ В при $I_F = 15$ А.

На рис. 1 представлены результаты изохронного (20 мин.) отжига нескольких групп диодных р-п-структур, облученных разными флюенсами электронов. Видно, что значения измеряемых параметров после каждой температуры отжига существенно зависят от флюенса облучения образцов. Чем выше значение Φ , тем меньше время жизни и больше прямое падение напряжения.

Поведение U_F в зависимости от температуры изохронного отжига коррелирует с изменением времени жизни ННЗ, то есть чем больше восстанавливается значение τ , тем меньше становится U_F . Отметим, что прямое падение напряжения диодных р-п-структур,

прошедших термообработку при $T_{отж} > 673$ К, снижается до значений меньше, чем у необлученных образцов. Однако, значение времени жизни ННЗ не восстанавливается до исходного. С ростом флюенса электронного облучения эта разница возрастает.

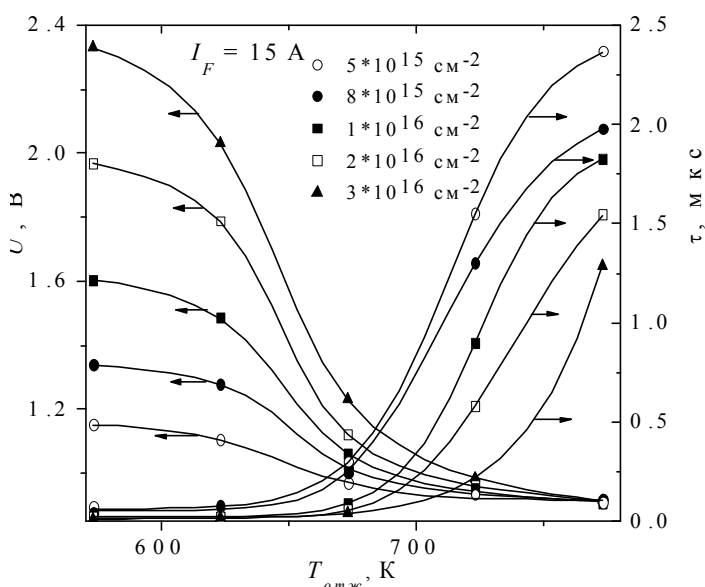


Рис. 1. Зависимости усредненных значений прямого падения напряжения U_F ($I_F = 15$ А) и времени жизни ННЗ облученных разными флюенсами электронов диодных р-п-структур от температуры изохронного отжига.

Как правило, величина прямого падения напряжения промышленных диодов при определенном значении прямого тока регламентируется нормами технических условий. Результаты, представленные на рис. 1, позволяют выяснить, какое минимальное значение времени жизни ННЗ можно достичь с помощью электронного облучения и последующего отжига. Например, пусть для исследуемых диодных р-п-структур по нормам технических условий $U_F \leq 1,4$ В при $I_F = 15$ А. Тогда, при $\Phi \leq 8 \cdot 10^{15}$ см⁻² минимальное значение $\tau = 70$ нс при $T_{отж.} = 573 \div 630$ К. При $\Phi = 10^{16}$ см⁻² $\tau = 50 \div 60$ нс при $T_{отж.} = 640 \div 660$ К и при $\Phi = (2 \div 3) \cdot 10^{16}$ см⁻² $\tau = 40 \div 50$ нс при $T_{отж.} = 650 \div 670$ К.

На рис. 2 представлены DLTS-спектры облученного образца после изохронного отжига при $573 \div 673$ К. Видно, что основными радиационными

дефектами в базовой n-области облученных диодных р-п-структур после отжига при 573 К являются комплексы: вакансия-кислород V-O (А-центр) с $E_c - 0,19$ эВ и сечением захвата $\sigma = 5,48 \cdot 10^{-14}$ см² (пик E1 на спектре) и углерод внедрения-кислород внедрения C_iO_i с $E_v + 0,36$ эВ и $\sigma = 2,27 \cdot 10^{-15}$ см² (минимум H1). В несколько меньших концентрациях содержатся комплексы дивакансия-кислород V_2O с двумя акцепторными уровнями $E_c - 0,24$ эВ и $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-15}$ см² и $E_c - 0,46$ эВ и $\sigma = 6,3 \cdot 10^{-15}$ см² (пики E2 и E3). Этот дефект образуется при $T_{отж.} \geq 523$ К в результате перестройки комплекса V_2 в V_2O [3].

Комплекс V_2O начинает отжигаться при $T_{отж.} = 623$ К, что проявляется на DLTS-спектрах в уменьшении амплитуд пиков E2 и E3. При $T_{отж.} = 673$ К полностью отжигается А-центр, V_2O и начинает отжигаться комплекс C_iO_i , что вполне согласуется с литературными данными [2].

Отжиг VO и C_iO_i объясняет восстановление параметров облученных диодных р-п-структур на рис. 1. В то же время, факт неполного восстановления при $T_{отж.} = 773$ К времени жизни ННЗ до значений необлученных образцов позволяет заключить, что при $T_{отж.} > 673$ К присутствуют более термостабильные ловушки в базовой области диодных р-п-структур.

Рассмотрим DLTS-спектры образцов, облученных разными флюенсами электронов и отожженных при $T_{отж.} = 723$ К в течение 15 минут (рис. 3). На полученных спектрах имеются три пика E4-E6 и минимумы H2 и H3. Все они обусловлены перезарядкой глубоких уровней соответствующих ловушек в n-базе диодных структур. Концентрация этих ловушек растет с увеличением флюенса электронов. Определить параметры пиков E4 и E6 весьма затруднительно из-за перекрытия с E5. Пика E5 соответствует акцепторный уровень с $E_c -$

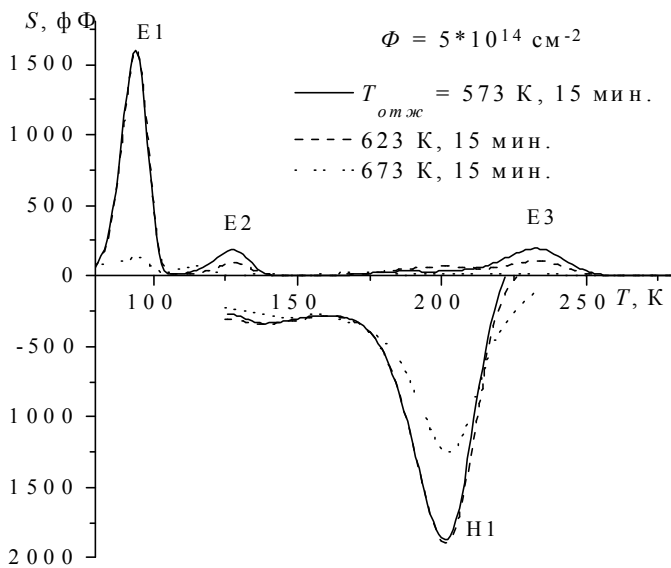


Рис. 2. DLTS-спектры облученного образца после изохронного отжига. Зависимости выше оси температур измерены при перезарядке ловушек основными носителями заряда, ниже – неосновными.

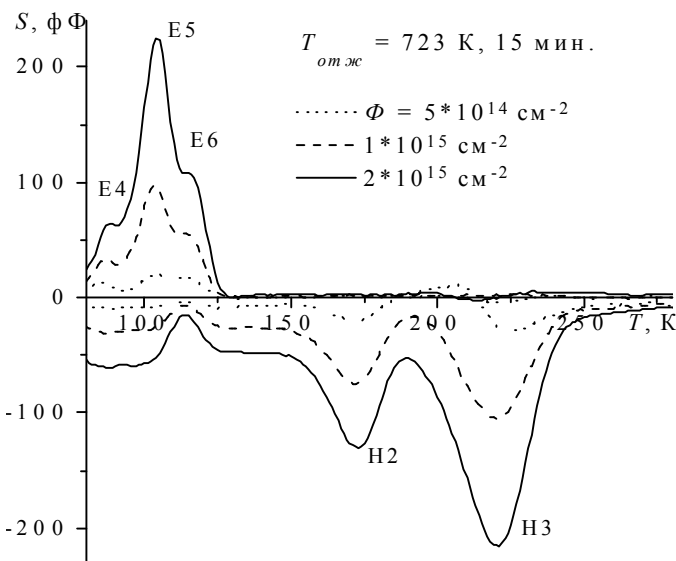


Рис. 3. DLTS-спектры облученных разными флюенсами электронов образцов после отжига при 723 К. Зависимости выше оси температур измерены при перезарядке ловушек основными носителями заряда, ниже — неосновными.

напряжения. Для проверки этого предположения проводилась DLTS-спектроскопия необлученных образцов, прошедших изотермический отжиг при 673 К. Результаты представлены на рис. 4.

0,19 эВ и сечением захвата $\sigma = 6,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$. Минимуму Н2 соответствует донорный уровень $E_v + 0,35 \text{ эВ}$ и $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$, а Н3 — $E_v + 0,37 \text{ эВ}$ и $\sigma = 6,9 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$.

По значению своих параметров ловушка Е5 близка к Е1, что позволяет отнести ее к А-центрам, оставшимся после отжига. Что касается ловушек Е4, Е6, Н2 и Н3, то для их идентификации необходимо привлечь дополнительные методики исследований.

Уменьшение прямого падения напряжения при $T_{отж} > 673 \text{ К}$ до значений меньше, чем у исходных образцов может быть обусловлено термической обработкой диодных р-п-структур. С этой целью проводилось исследование прямого падения напряжения необлученных образцов в зависимости от времени изотермического отжига при $T_{отж} = 623 \text{ К}$. Результаты представлены в таблице 1. Видно, что при всех значениях прямого тока величина U_F монотонно уменьшается с увеличением времени изотермического отжига. Следовательно, причиной уменьшения U_F ниже исходного значения в результате радиационно-термических обработок являются процессы, обусловленные только термообработкой диодных р-п-структур.

Согласно [4] в кислородосодержащем кремнии при температурах отжига 623÷823 К происходит генерация дефектных комплексов. Эти комплексы получили название термодоноров, так как в запрещенной зоне Si дают донорные уровни с $E_c - 0,14 \div 0,15 \text{ эВ}$. Увеличение степени легирования базовой n-области отжигаемых диодных р-п-структур кислородными термодонорами может привести к снижению прямого падения

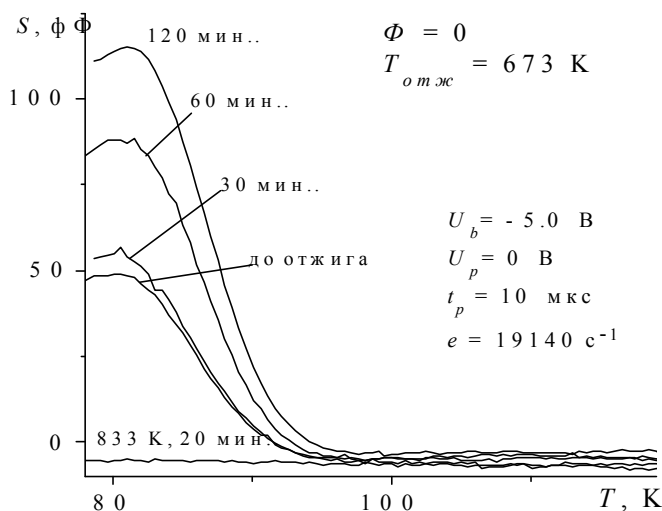


Рис. 4. Изменение DLTS-спектров необлученного образца в результате изотермического отжига при температуре 673 К. Условия измерения приведены на рисунке.

легирующей примеси составила порядка 0,23%.

Согласно [4] термодоноры в кислородосодержащем кремнии отжигаются при $T_{отж} \geq 823$ К. Аналогичный результат наблюдается и в нашем случае (рис. 4). Отжиг образца при 833 К в течение 20 минут ведет к полному исчезновению пика термодоноров на DLTS-спектре.

Таблица 1.

Изменение U_F необлученных диодных р-п-структур при разных значениях прямого тока в зависимости от времени отжига при 673 К.

$t_{отж}$, мин.	U_F , В ($I_F = 15$ А)	U_F , В ($I_F = 30$ А)	U_F , В ($I_F = 45$ А)
0	0,956	1,098	1,215
30	0,954	1,09	1,211
60	0,941	1,067	1,176
90	0,938	1,056	1,155

Таким образом, в результате облучения диодных р-п-структур электронами с $E = 4$ МэВ флюенсом $\Phi = (2 \div 3) \cdot 10^{16}$ см⁻² и последующего отжига при $T_{отж} = 650 \div 670$ К в течение 15-20 мин. время жизни неосновных носителей заряда достигает значений $\tau = 40 \div 50$ нс при сохранении статических параметров в пределах технических условий. Определены параметры термостабильных до 723 К ловушек: $E_c - 0,19$ эВ, $\sigma = 6,5 \cdot 10^{-15}$ см²; $E_v + 0,35$ эВ, $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-14}$ см² и $E_v + 0,37$ эВ, $\sigma = 6,9 \cdot 10^{-16}$ см².

Список литературы

- [1] Ф.П. Коршунов. Вестник АН СССР. 11, 80 (1982)
- [2] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. Дефекты в кремнии и на его поверхности. Наука, М. (1990). 216 с.
- [3] V.P. Markevich, A.R. Peaker, S.B. Lastovskii, L.I. Murin, J.L. Lindstrom. J. Phys.: Condensed Matter. **15**, S2779 (2003)
- [4] В.М. Бабич, Н.И. Блецкан, Е.Ф. Венгер. Кислород в монокристаллах кремния. Интерпрес ЛТД, К. (1997). 240 с.

В области азотных температур (81 К) на DLTS-спектрах исходных образцов наблюдается высокотемпературное крыло пика, который вероятнее всего соответствует перезарядке уровней предполагаемых термодоноров. Следовательно, все диодные р-п-структуры уже изначально содержат кислородные термодоноры. Их концентрация по сравнению с основной легирующей примесью составляет порядка 0,1%.

Амплитуда пика термодоноров возрастает с увеличением времени изотермического отжига (рис. 4). Так, в результате термообработки образцов при 673 К в течение 120 минут она увеличилась более чем в 2 раза. При этом концентрация термодоноров по отношению к концентрации основной