

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ НА ЯЛК

Ю. В. Богатырев, Н. Е. Жданович, И. Г. Марченко, В. И. Карась, В. Т. Трощинский
Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси,
220072, Минск, ул. П. Бровки, 17, тел. (017) 284-15-27

Рассматриваются результаты по исследованию изменений времени жизни неравновесных носителей заряда, кинетики накопления и распада основных рекомбинационных и компенсирующих дефектов в $p^+ - p - p^+$ -структурах на высокоомном ядерно-легированном кремнии (ЯЛК) при электронном облучении и последующем отжиге. Проведено сравнение с результатами аналогичных исследований для структур на основе кремния, легированного фосфором в процессе выращивания по методу Чохральского. Обсуждается возможность регулирования быстродействия приборов на основе ЯЛК - структур путем использования рекомбинационных свойств радиационно-термических дефектов с повышенной термостабильностью.

Введение

В настоящее время во всем мире происходит переориентация промышленности и транспорта на использование импульсных преобразователей электроэнергии, позволяющих в значительной степени снизить их материалоемкость и увеличить КПД. Ключевым элементом данных устройств являются мощные высоковольтные быстродействующие приборы, изготавливаемые на базе многослойных полупроводниковых структур: диодов, транзисторов и тиристоров. Основным материалом для их изготовления по-прежнему остается кремний. При этом приборы, рассчитанные на высокие напряжения (> 2 кВ) и преобразование больших мощностей, как правило, изготавливаются на основе кремния, легированного фосфором при облучении тепловыми нейтронами в ядерном реакторе. Одним из методов повышения быстродействия кремниевых приборов является использование радиационной технологии (контролируемого введения дефектных комплексов, являющихся центрами рекомбинации для носителей заряда в активных областях приборов). В области радиационной физики кремния накоплен обширный экспериментальный и теоретический материал [1-8]. Однако, в литературе имеется лишь ограниченное число работ по облучению структур на ЯЛК, а радиационные эффекты в приборных структурах практически не рассматривались.

Основная часть

В данной работе приведены результаты исследования изменений скорости объемной рекомбинации (времени жизни) неосновных носителей заряда (ННЗ) в высокоомной области $p^+ - p - p^+$ -структур, изготовленных (по стандартной диффузионной технологии) на ЯЛК с удельным сопротивлением $\rho = 300$ Ом.см. и для сравнения, на тянутом кремнии с $\rho = 32$ Ом.см. Эти структуры были подвергнуты облучению электронами с энергией 6 МэВ и последующему изохронному 15-ти минутному отжигу в печи на воздухе в интервале температур 20-600°C. Структуры облучались электронами на линейном импульсном ускорителе «Электроника У-003», флюенсами $\Phi = 10^{11} - 1 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ при интенсивности пучка $5 \cdot 10^{11}$ и $2 \cdot 10^{12}$ см $^{-2} \cdot c^{-1}$ и температуре в зоне облучения 20°C. Величина времени жизни ННЗ τ_p

контролировалась при высоком уровне инжекции. На рис.1 приведены зависимости коэффициента радиационно-термических изменений $K_{\tau T}$, определяемого аналогично коэффициенту ра-

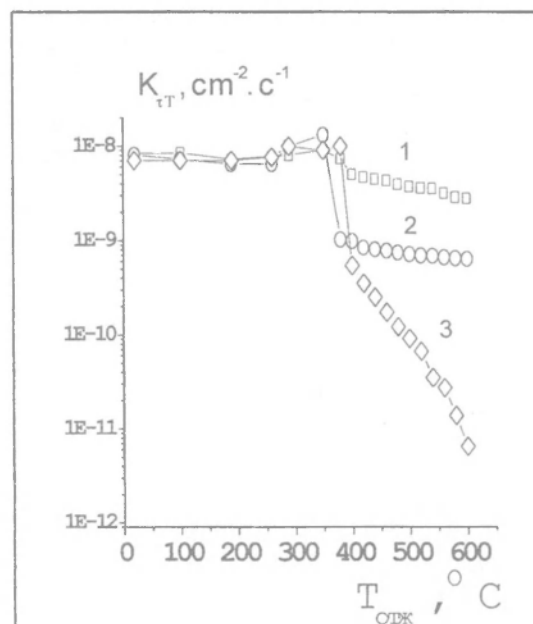


Рис.1 Зависимости коэффициента радиационно-термических повреждений $K_{\tau T}$ от температуры отжига $T_{отж}$

1 – структура на ЯЛК, $\Phi = 2 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$
2 – структура на ЯЛК, $\Phi = 3 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$
3 – структура на тянутом Si, $\Phi = 1 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$

диационных повреждений τ_p

$$K_{\tau T} = (1/\tau_{pT} - 1/\tau_{p0}) / \Phi,$$

где τ_{pT} - значение времени жизни ННЗ после облучения и последующего отжига образцов при температуре T ; τ_{p0} - время жизни до облучения). Как видно из рисунка, ход зависимостей $K_{\tau T}$ от температуры отжига ($T_{отж}$) для структур на ЯЛК и тянутом кремнии практически совпадает в интервале температур 20-300°C и существенно различается при $T_{отж} = 400-600$ °C. На рис.2,3 представлены типичные DLTS спектры структур на ЯЛК и тянутом кремнии соответственно. Как

видно из рис. 2, в спектрах DLTS структур на ЯЛК после облучения (спектр 1), после отжига при $T_{отж}=400^{\circ}\text{C}$ (спектр 2) и после отжига при $T_{отж}=550^{\circ}\text{C}$ (спектр 3) наблюдаются следующие максимумы. В спектре 1 - $E1=E_c-0.17$ эВ (А-центр, величина максимума на рисунке уменьшена в 10 раз), $E3=E_c-0.24$ эВ (дивакансия) $E4=E_c-0.35$ эВ (неидентифицирован), $E5=E_c-0.44$ эВ (дивакансия), $E7=E_c-0.48$ эВ, $E8=E_c-0.52$ эВ (неидентифицированы). На спектре 2 наблюдаются максимумы $E1=E_c-0.17$ эВ (А-центр, величина максимума на рисунке уменьшена в 2 раза), $E2=E_c-0.20$ эВ, $E6=E_c-0.32$ эВ (неидентифицированы), $E7=E_c-0.48$ эВ $E7=E_c-0.52$ эВ (неидентифицированы). На спектре 3 наблюдаются максимумы $E2$, $E6$ и $E7$, $E8$ (неидентифицированы). Из рис.3 видно, что после облучения (спектр 1) и после отжига при $T_{отж}=500^{\circ}\text{C}$ (спектры 2,3) наблюдаются следующие максимумы. В спектре 1 - $E1=E_c-0.17$ эВ (А-центр), $E3=E_c-0.24$ эВ (дивакансия) $E4=E_c-0.35$ эВ (неидентифицирован) $E5=E_c-0.44$ эВ (дивакансия), $E7=E_c-0.52$ эВ и $E9$ (не прописан полностью). На спектре 2 наблюдаются максимумы $E2=E_c-0.20$ эВ, $E4=E_c-0.35$ эВ (неидентифицированы), На спектре 3 наблюдаются максимумы $E2$, $E6$. Спектр 3 получен для образ-

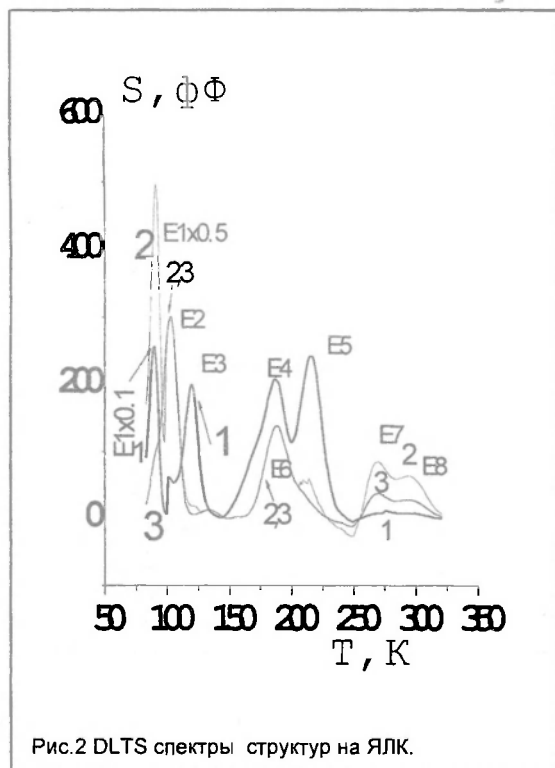


Рис.2 DLTS спектры структур на ЯЛК.

ца, которому соответствует спектр 2 с тем различием, что в данном случае постоянная времени заполнения DLTS спектрометра равнялась 0.1 мкс, а не 1 мс, как для всех остальных приведенных здесь спектров. При таком режиме измерения прописываются только те уровни которые могут давать существенный вклад в процессы рекомбинации. Этот метод позволяет напрямую оценить сечение захвата носителей заряда на глубокие уровни. В частности, этот метод ис-

пользовался нами для структур на тянутом кремнии, где доминирующий уровень рекомбинации $E6$ (рис.3, спектр 3) не наблюдается на фоне максимума от уровня $E4$ (рис.2, спектр 2)

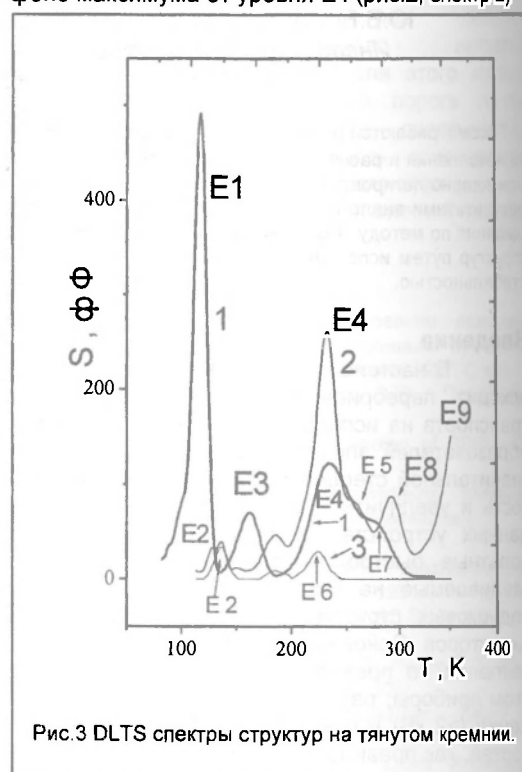


Рис.3 DLTS спектры структур на тянутом кремнии.

Сопоставление параметров уровней радиационных и радиационно-термических дефектов, которым соответствуют максимумы, показанные на рис. 2,3, и кинетики их накопления и отжига с радиационными изменениями времени жизни неосновных носителей заряда в p^+n-p^+ -структурах на ЯЛК и тянутом кремнии (зависимости $K_{тТ}$, ($T_{отж}$)) в широком интервале флюенсов облучения и температур отжига позволяет отметить следующие особенности.

1. После облучения рекомбинация в структурах обоих типов определяется дефектом с уровнем $E1=E_c-0.17$ эВ (А-центр), о чем свидетельствует совпадение зависимостей $K_{тТ}(T_{отж})$ для температур $20-300^{\circ}\text{C}$.
2. При $T_{отж}>450^{\circ}\text{C}$ ход зависимостей $K_{тТ}(T_{отж})$ определяется кинетикой отжига дефекта с уровнем $E4=E_c-0.32$ эВ, При этом уменьшение значения $K_{тТ}$ при увеличении флюенса облучения как в случае структур на ЯЛК, так и с случае структур на тянутом кремнии позволяет предположить, что в состав данного дефекта входит быстро истощающийся компонент, причем его концентрация напрямую или косвенно связана с уровнем легирования исходного материала.
3. В промежуточной области температур отжига рекомбинация в случае структур на тянутом кремнии определяется неидентифицированным дефектом с уровнем $E5=E_c-0.35$ эВ. Эффективность введения данного дефекта пропорциональна уровню легирования исходного материала. В случае структур на ЯЛК рекомбинация оп-

ределяется А-центром (затянутая стадия отжига последнего) и дефектом с уровнем $E_4 = E_c - 0.32$ эВ. Для наблюдаемого в спектрах на рис.2,3 уровня $E_2 = E_c - 0.20$ эВ, который также имеет высокое значение сечения захвата основных носителей (наблюдается на спектре 3 на рис.3) не было обнаружено корреляции с зависимостями $K_{IT}(T_{отж})$, что связано, по-видимому, с асимметрией сечений захвата основных и неосновных носителей на данный уровень.

4. Высокие значения коэффициента радиационно-термических изменений времени жизни при температурах отжига 600°C в структурах на ЯЛК предоставляют возможность разработки радиационной технологии изготовления мощных быстродействующих высоковольтных приборов в таблеточных корпусах до их посадки на термокомпенсатор, так как последняя осуществляется при температурах $> 600^\circ\text{C}$.

Для определения стабильности радиационно-термических дефектов в структурах на ЯЛК при температурах превышающих 600°C , необходимо провести дополнительные исследования.

Заключение

Получены зависимости коэффициента радиационно-термических изменений времени жизни неосновных носителей заряда в активных областях p^+-n-p^+ -структур, изготовленных на основе высокоомного ЯЛК, для интервала температур отжига – $20-600^\circ\text{C}$. Данные зависимости могут быть использованы для выбора параметров режима посадки на термокомпенсатор быстродействующих высоковольтных (рассчитанных на обратные напряжения 4-6 кВ) диодов и тиристоров, изготавливаемых с использованием радиационной технологии. На основании анализа спектров DLTS облученных и отожженных струк-

тур и сравнения их со спектрами структур, изготовленных на базе тянутого кремния, установлено, что доминирующим РД, определяющим изменения времени жизни при облучении, в обоих случаях является дефект с уровнем в запрещенной зоне $E_c - 0.17$ эВ (А-центр). В случае радиационно-термических дефектов, стабильных в области температур 600°C , рекомбинацию в исследуемых структурах определяет дефект с энергией ионизации $E_c - 0.32$ эВ. Термостабильность данного дефекта в значительной степени зависит от концентрации легирующей примеси в высокоомной базе структур и от предыстории исходного кремния.

Работа выполнялась при поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.

Список литературы

1. Коршунов Ф.П., Жданович Н.Е., Марченко И.Г. // Материалы IX Межнационального совещания «Радиационная Физика твердого тела» г.Севастополь 28 июня-3 июля 1999, т.2, с. 984-992.
2. Svensson B.G., Lindstrom J.L. // Phys. Rev. B, 1986. Vol. 34, N 12. P.8709-8717.
3. Lindstrom J.L., Oehrlein G.S., Corbett J.W. // Phys.Stat.Sol.(a), 1986. Vol. 95. P. 179-184.
4. Ewwaraye A.O., Baliga B.J. // J. Electrochem. Soc., 1977. Vol.124. N 6. P. 913-916.
5. Brotherton S.D., Bradley P. // J. Appl. Phys., 1982. Vol. 53. N.8. P.5720-5732.
6. Jian-Guo Xu, Fang Lu, Heng-Hui Sun. // Phys. Rev. B, 1988. Vol. 38, N 5. P. 3395-3399
7. Awadelkarim O.O., Weman H. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60(6). P. 1974-1979.
8. Коршунов Ф.П., Жданович Н.Е., Марченко И.Г., Трошинский В.Т. // Доклады Академии наук Беларуси, 1996, т.40, N5, с.49-53.

INVESTIGATION OF RADIATION DEFECTS FORMATION IN MULTILAYER STRUCTURES ON NTD SILICON

Yu.V.Bogatyrev, N.E.Zhdanovich, I.G.Marchenko, V.I.Karas', V.T.Troschinskii
*Institute of Solid State and Semiconductor Physics NAS of Belarus,
 P.Brovka, 17, Minsk, 220072, tel. (017) 284-15-27*

The results of investigations of the lifetime radiation-induced changes and accumulation and annealing kinetics of radiation and radiation-thermal defects in p^+-n-p^+ -structures, manufactured on high resistivity, floating zone growth, neutron transmutation doped (NTD) silicon at electron irradiation with energy 6 MeV and subsequent annealing in temperature range 20- 600°C have been shown. Comparison with the same parameters of p^+-n-p^+ -structures manufactured on Cz-growth silicon have been done. The possibility of the devices operation speed regulation with utilization of the recombination properties of the thermostable radiation-thermal defects have been shown.