

ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ *p-n*-СТРУКТУР,
ОБЛУЧЕННЫХ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ
ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 670÷720 К

Ф. П. Коршунов¹, Ю. В. Богатырев¹, В. И. Карась¹,
С. Б. Ластовский¹, Л. И. Мурин¹, В. П. Маркевич²

¹Научно-практический центр НАН Беларуси
по материаловедению, lastov@iftp.bas-net.by.

²The University of Manchester,
Manchester M60 1QD, United Kingdom

Исследование влияния температуры электронного облучения на параметры кремниевых диодных *p-n*-структур показало, что изменение времени жизни τ неосновных носителей заряда (ННЗ) при $T_{\text{обл}} = 570 \div 670$ К в 1,5 раза выше, чем при $T_{\text{обл}} = 300$ К [1]. Данный эффект обусловлен соответствующим увеличением эффективности введения комплексов вакансия – кислород и углерод внедрения – кислород внедрения с ростом температуры облучения в области 300–670 К. При температурах облучения выше 670 К скорость введения указанных комплексов снижается из-за термической нестабильности. С целью возможного использования радиационных методов в технологии изготовления быстродействующих кремниевых приборов представляет интерес более детальное изучение влияния электронного облучения при высоких температурах на приборные характеристики.

В настоящей работе приведены результаты исследования изменений параметров кремниевых *p-n*-структур, облученных при 670÷720 К разными флюенсами электронов с энергией 6 МэВ.

Экспериментальными образцами служили диодные *p-n*-структуры, изготовленные на пластинах с эпитаксиальным слоем кремния КЭФ-28 толщиной 48 мкм на подложке ЭКЭС-0,01. *P-n*-переход создавался имплантацией бора в *n*-базу с последующим отжигом при 1470 К. Глубина залегания *p-n*-перехода составляла $W = 11 \div 12$ мкм, площадь – $9,4 \cdot 10^{-2}$ см². В качестве омических контактов напылялся алюминий.

Готовые диодные *p-n*-структуры имели в области комнатных температур обратные токи не более 30 мкА при $U_{\text{обр}} = 400$ В, прямое падение напряжения $U_{\text{пр0}} = 0,96 \div 1,04$ В при прямом токе $I_{\text{пр}} = 15$ А и время жизни ННЗ (дырок) в базовой *n*-области $\tau_0 = 3,2 \div 3,5$ мкс.

Облучение образцов осуществлялось электронами с энергией $E = 6$ МэВ разными флюенсами Φ при плотности потока электронов $\varphi = 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Необходимая температура образцов в процессе облучения поддерживалась в специальной термостатирующей ячейке. Для контроля температуры использовалась хромель-алюмелевая термопара. После набора необходимого флюенса электронного облучения ($\Phi = 1 \cdot 10^{13} \div 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) образцы сразу же извлекались из термостата на воздух ($T = 290$ К).

Время жизни ННЗ и прямое падение напряжения *p-n*-структур измерялись по стандартным методикам [2] при комнатной температуре.

На рисунке 1 представлено изменение времени жизни неосновных носителей заряда и падения прямого напряжения при разных значениях прямого тока диодных

p-n-структур в зависимости от флюенса электронного облучения при $T_{\text{обл}} = 670 \text{ K}$. Как видно из зависимости $\tau(\Phi)$, во всем исследуемом диапазоне флюенсов электронов наблюдается уменьшение значения τ . Наиболее существенно этот процесс происходит при $\Phi > 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Так, на начальном этапе облучения, примерно до $\Phi = 10^{13} \text{ см}^{-2}$, значение времени жизни ННЗ уменьшается незначительно, а при $\Phi = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ – в десять раз.

Величина прямого падения напряжения в результате «горячего» облучения незначительно ($0,05 \div 0,09 \text{ В}$) уменьшается по сравнению с исходным значением (рис. 1). Так, до облучения при $I_{\text{пр}} = 10 \text{ A}$ значение $U_{\text{пр}} = 1,045 \text{ В}$, а после облучения электронами флюенсом $\Phi = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ – $U_{\text{пр}} = 0,96 \text{ В}$.

На рисунке 2 представлено изменение τ и $U_{\text{пр}}$ при разных значениях прямого тока диодных *p-n*-структур после облучения разными флюенсами электронов при $T_{\text{обл}} = 720 \text{ K}$. Поведение исследуемых величин здесь во многом такое же, как и при $T_{\text{обл}} = 670 \text{ K}$. С ростом флюенса электронов значение τ монотонно уменьшается. Величина прямого падения напряжения с ростом флюенса электронов до $\Phi = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ незначительно ($0,08 \div 0,1 \text{ В}$) уменьшается по сравнению с исходным значением, а потом начинает увеличиваться. Однако, как уже отмечалось, с повышением температуры облучения, после превышения порога при $\sim 700 \text{ K}$, эффективность влияния электронного облучения на изменение времени жизни неосновных носителей заряда снижается. Так, если для $T_{\text{обл}} = 670 \text{ K}$ при $\Phi = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ достигается значение $\tau < 0,4 \text{ мкс}$, то для $T_{\text{обл}} = 720 \text{ K}$ при том же значении флюенса электронов $\tau = 1 \text{ мкс}$.

При облучении исследуемых диодных *p-n*-структур электронами в их объеме генерируются первичные радиационные дефекты: ваканции (V) и междуузельные атомы кремния (I_{Si}). Как V, так и I_{Si} обладают высокой подвижностью в исследуемом

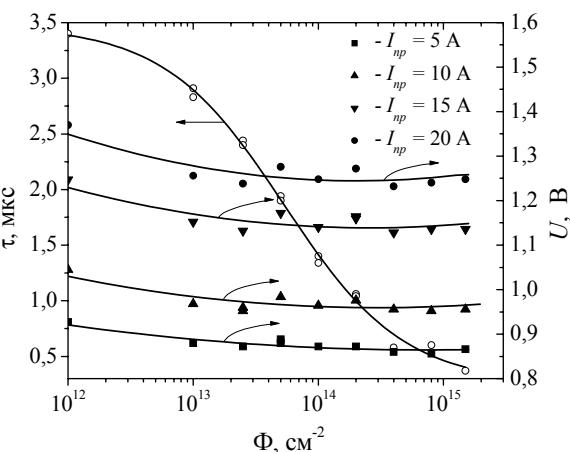


Рис. 1. Зависимости значений времени жизни ННЗ и прямого падения напряжения при разных значениях $I_{\text{пр}}$ диодных *p-n*-структур от флюенса электронного облучения при $T_{\text{обл}} = 670 \text{ K}$

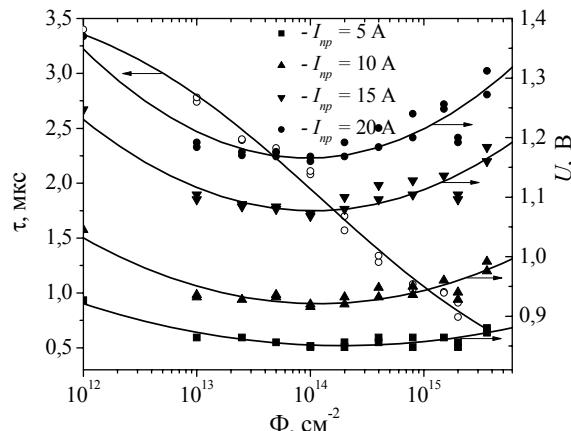


Рис. 2. Зависимости значений времени жизни ННЗ и прямого падения напряжения при разных значениях $I_{\text{пр}}$ диодных *p-n*-структур от флюенса электронного облучения при $T_{\text{обл}} = 720 \text{ K}$

интервале температур облучения, что приводит к их миграции по кристаллу, взаимодействиям с различного рода структурными нарушениями решетки и примесями, и образованию вторичных радиационных дефектов. Именно вторичные радиационные дефекты и определяют основные изменения характеристик *p-n*-структур. Поскольку концентрация радиационных дефектов пропорциональна флюенсу электронного облучения, то эти изменения возрастают с увеличением Φ , что и наблюдается в эксперименте. При этом определяющую роль играют процессы радиационного дефектообразования в менее легированной *n*-базе *p-n*-структур.

Радиационные дефекты с глубокими уровнями, которые вводятся в *n-Si* в результате электронного облучения при повышенных температурах, изучались методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) в работах [1, 3, 4]. Как отмечалось выше, основными типами радиационных дефектов, вводимых электронным облучением в *n*-базу диодных *p⁺-n*-структур при $T_{обл} = 670$ К, являются комплексы вакансия – кислород VO и углерод внедрения – кислород внедрения C_iO_i. Наряду с уровнями этих комплексов, в верхней половине запрещенной зоны кремния наблюдались и другие ловушки, определить природу которых однозначно не удалось. Было предположено, что они принадлежат вакансационно-кислородным комплексам типа V_nO_m ($n, m > 1$). Концентрации этих ловушек были, однако, существенно меньше, чем концентрации комплексов VO и C_iO_i.

Комpleксы VO и C_iO_i термически стабильны до температур ~620 и ~670 К, соответственно [5]. Следовательно, при $T_{обл} = 720$ К уменьшается скорость введения основных радиационных центров в *n-Si*, что и объясняет наблюдаемое в эксперименте снижение эффективности влияния электронного облучения на изменение величины времени жизни неосновных носителей заряда кремниевых *p-n*-структур (см. рис. 1 и 2).

Заметного увеличения прямого падения напряжения *p-n*-структур при высоком уровне инжекции ($I_{np} \geq 5$ А) после облучения электронами при 670–720 К не наблюдалось. В то же время, согласно данным, полученным в [4], существенный рост U_{np} в результате электронного облучения при комнатной температуре аналогичных *p-n*-структур начинался с $\Phi \geq (1\div 2) \cdot 10^{15}$ см⁻². В этом случае проводимость базовой области уже не полностью модулируется дырками. Диффузионная длина дырок L_p становится при этом меньше, чем 0,37 W .

Наблюдаемое при «горячем» облучении диодных *p-n*-структур незначительное уменьшение прямого падения напряжения может быть вызвано радиационно-стимулированной диффузией в базу атомов легирующих примесей из сильнолегированных подложки и *p*-области. С другой стороны, нельзя исключать и генерацию термодоноров, так как подобного эффекта не наблюдалось в результате электронного облучения этих же *p-n*-структур при комнатной температуре [4].

Таким образом, исследовано влияние радиационных дефектов, вводимых электронным облучением при 670–720 К, на параметры кремниевых диодных *p-n*-структур.

Установлено, что в результате облучения электронами с $E = 6$ МэВ флюенсами $\Phi = (1\div 1,5) \cdot 10^{15}$ см⁻² при $T_{обл} = 670$ К диодных *p-n*-структур, изготовленных на пластинах с эпитаксиальным слоем кремния КЭФ-28, значение времени жизни неосновных носителей заряда в *n*-базе уменьшается в 8÷10 раз без изменения величины прямого падения напряжения при токе $I_{np} = 5\div 20$ А.

Показано, что при $T_{\text{обл}} = 720$ К влияние электронного облучения на динамические параметры диодных $p-n$ -структур в два раза меньше, чем при $T_{\text{обл}} = 670$ К, что обусловлено соответствующим уменьшением эффективности введения радиационно-индукционных примесно-дефектных центров в исследуемые образцы при более высоких температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коршунов, Ф. П. Влияние электронного облучения при 300÷800 К на параметры кремниевых $p-n$ -структур / Ф. П. Коршунов [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: сб. трудов III междунар. конф., Минск, 25–26 сентября 2008. – Минск: Изд. центр БГУ, 2008. С. 171.
2. Lax, B. Transient response of a $p-n$ junction / B. Lax, S. T. Neustadter // J. Appl. Phys. 1954. V. 25. № 9. P. 1148.
3. Коршунов, Ф. П. Радиационные дефекты в кремнии n -типа, облученном быстрыми электронами при повышенных температурах / Ф. П. Коршунов [и др.] // Радиационная физика твердого тела: труды 18 Междунар. совещания, Севастополь, 17–12 июля 2008. – М.: ГНУ «НИИ ПМТ», 2008. С. 136.
4. Коршунов, Ф. П. Влияние электронного облучения на характеристики эпитаксиальных кремниевых $p-n$ -структур / Ф. П. Коршунов [и др.] // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 2007. № 3. С. 113.
5. Claeys, C. Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices / C. Claeys, E. Simoen. Berlin: Springer. 2002. 401 p.