

ОСОБЕННОСТИ ПРЯМОЙ ВАХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ КРЕМНИЕВЫХ n^+ - p -СТРУКТУР С ТОНКОЙ БАЗОЙ, ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ

Ф. П. Коршунов, И. Г. Марченко, Н. Е. Жданович

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», E-mail: march@ifitp.bas-net.by

Эпитаксиальные кремниевые структуры являются основой большинства полупроводниковых приборов и интегральных схем. Технология получения эпитаксиальных p^+ - n - и n^+ - p -структур в настоящее время хорошо отработана. Имеются отдельные сведения о влиянии проникающих излучений на p^+ - n -структуры [1,2]. Однако вопрос о влиянии электронного облучения на эпитаксиальные n^+ - p -структуры, и в частности структуры с тонкой базой, исследован недостаточно [3]. В частности, практически отсутствуют данные об изменениях характеристик таких структур в области температур жидкого азота (77 К), хотя в настоящее время ведутся исследования по созданию криогенных компьютеров и разработке гибридных электронных устройств в которых будут использоваться как обычные полупроводниковые приборы, так и материалы и элементы из сверхпроводящих материалов [4]. Значительный интерес также представляет исследование радиационных изменений характеристик приборов такого типа при криогенных температурах в связи с их использованием в аппаратуре, работающей в условиях открытого космоса [5]. Поэтому, результаты таких исследований представляют интерес с точки зрения радиационной стойкости приборов на основе таких структур, изучения их характеристик при криогенных температурах, а также использования быстрых электронов в радиационной технологии их изготовления.

Цель настоящей работы — исследование влияния радиационных дефектов, образующихся в результате электронного облучения, а также электронного облучения с последующим отжигом на прямые вольтамперные характеристики (ВАХ), эпитаксиальных кремниевых n^+ - p -структур, измеренные при температуре 77 К. Исследуемые структуры изготовлены на кремнии p -типа, выращенном по эпитаксиальной технологии, легированном бором ($N_a = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Толщина эпитаксиальной пленки составляла около 33 мкм. Использовалась подложка КДБ-0,005 толщиной 300 мкм. n^+ - p -переход создавался имплантацией фосфора в p -базу с последующим отжигом при 1150°C . Глубина залегания перехода составляла 8-9 мкм, площадь n^+ - p -перехода — $S = 9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. В качестве омических контактов напылялся алюминий.

Облучение образцов проводилось электронами с энергией 6 МэВ при плотности потока электронов $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Температура при облучении не превышала 300 К. Измерение прямого падения напряжения на структурах U_F при различных значениях прямого тока проводилось по стандартной методике при постоянном токе. Параметры вводимых электронным облучением в структуры радиационных дефектов определялись методом нестационарной емкостной спектроскопии (DLTS) [6].

На рис. 1 представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) исследуемых n^+ - p -структур, измеренные при температуре 77 К. Как видно из рисунка, на ВАХ структур при 77 К в области токов 1 – 1000 мА наблюдается резкая зависимость тока от на-

пряжения (эффект стабилизации напряжения) как до облучения (кр.1) так и при последующем облучении вплоть до флюенса $\Phi=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (кр. 2,3,4). Для сравнения, для ВАХ, измеренных в том же диапазоне токов при комнатной температуре (на рис. 1 не приведены) аналогичные значения R_d при $\Phi=0$ и $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ составили 250 и 450 мОм соответственно, что в 10 и 20 раз превышает минимальное значение R_d при 77 К (кр.4). Кривая 5 соответствует образцу, который был облучен до посадки в корпус флюенсом $\Phi=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, а затем отожжен при температуре порядка 400°C в течение 20 мин в процессе посадки на термокомпенсатор в ходе изготовления прибора. Как видно из этой зависимости после отжига происходит дальнейшее смещение ВАХ в область более высоких значений напряжения при том же значении R_d , а на начальном участке ВАХ наблюдается S-образность. Максимально значение напряжения в области S-образности, равное в этом случае 1,5 В, достигается при токах в несколько десятков микроампер (на кр. 5 этот участок не показан). Заканчивается область S-образности при токах порядка 5 мА. Дополнительное облучение структуры, ВАХ которой представлена на кр.5, флюенсами $\Phi=1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (кр. 6) и $\Phi=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (кр.7) приводит к увеличению максимального значения напряжения в области S-образности, до 2 и 4 В соответственно, примерно в той же области токов как и для кр. 5 (десятки микроампер) (на кр. 6 и 7 этот участок также не показан). Заканчивается область S-образности на кр. 6 и 7 в области токов порядка 100 мА.

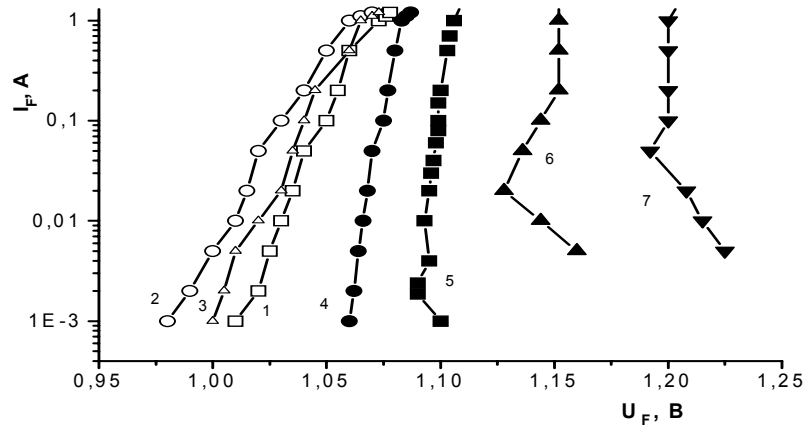


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики n^+ -р-структур, измеренные при температуре 77 К.
 1 - $\Phi=0$; 2- $\Phi=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 3- $\Phi=1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 4- $\Phi=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 5- $\Phi=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $T_{\text{отж}}=400^\circ\text{C}$,
 $t_{\text{отж}}=20$ мин; 6- $\Phi=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ $T_{\text{отж}}=400^\circ\text{C}$ $t_{\text{отж}}=20$ мин + $\Phi=1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; $T_{\text{отж}}=400^\circ\text{C}$, $t_{\text{отж}}=20$ мин;
 7- $\Phi=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ $T_{\text{отж}}=400^\circ\text{C}$ $t_{\text{отж}}=20$ мин + $\Phi=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

На рис. 2 представлены результаты измерений нестационарной емкостной спектроскопии (DLTS), с помощью которых были определены характеристики радиационных дефектов, образующихся в базовой эпитаксиальной области n^+ -р-перехода в результате электронного облучения, а также последующего отжига.

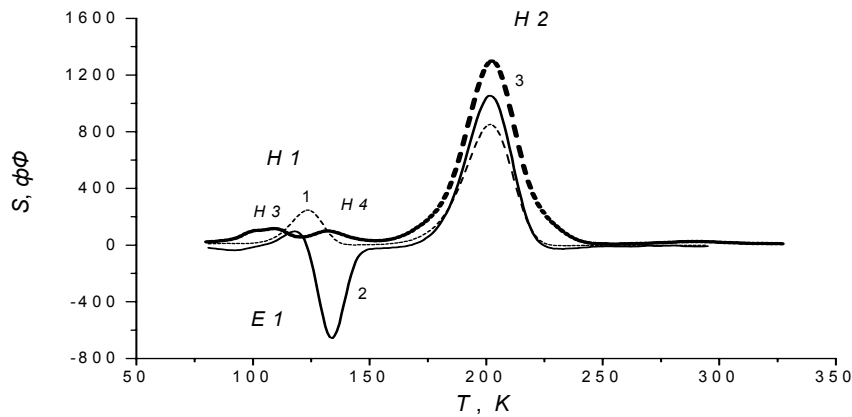


Рис. 2. DLTS-спектры n^+ -р-структуры, облученной флюенсом электронов $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, измеренные при перезарядке ловушек основными (1) и неосновными (2) носителями заряда. (3) - DLTS – спектр, n^+ -р-структуры, облученной флюенсом электронов $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и отожженной при температуре 400°C в течение 20 мин.. (Скорость эмиссии электронов 190 с^{-1})

По всей видимости, кинетика накопления и параметры этих дефектов (энергетическое положение в запрещенной зоне и сечения захвата основных и неосновных носителей заряда на уровни дефектов) в какой-то мере обуславливают ход представленных на рис 1. ВАХ структур после облучения и после облучения и высокотемпературного отжига.

На спектрах DLTS, измеренных после облучения структур флюенсом $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (кр.1 и 2) наблюдаются следующие уровни дефектов: ловушка $H1$, которой соответствует глубокий донорный энергетический уровень $E_v + 0,18 \text{ эВ}$ (сечение захвата дырок $\sigma = 5,8 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$), ловушка $H2$ — $E_v + 0,36 \text{ эВ}$ ($\sigma = 2,4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$) и ловушка $E1$ — $E_c - 0,24 \text{ эВ}$ (сечение захвата электронов $\sigma = 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$). Уровень $H1$ принадлежит дефекту дивакансия $V_2(+/0)$, уровень $H2$ - комплексу углерод внедрения - кислород внедрения $C_iO_i(+/0)$ и уровень $E1$ - комплексу бор внедрения - кислород внедрения $B_iO_i(+/0)$. Кривая 3 соответствует спектру DLTS n^+ -р-структуры, облученной электронами с энергией 6 МэВ флюенсом $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, и отожженной при температуре отжига 400°C . На спектре после отжига наблюдается резко выраженный максимум $H2$ с энергетическим уровнем $E_v + 0,36 \text{ эВ}$ и сечением захвата дырок $\sigma = 2,4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ и два слабо выраженных максимума $H3$ и $H4$. В соответствии с литературными данными [7], максимум $H2$ обусловлен комплексом C_iO_i (углерод-кислород), максимум $H4$ обусловлен комплексом V_2O (дивакансия-кислород), природа максимума $H3$ в настоящее время не установлена.

Анализ результатов, представленных на рис. 1 и 2 позволяет предположить, что наблюдаемый в эксперименте резкий ход ВАХ в области токов 1-1000 мА в случае необлученных структур обусловлен как геометрией прибора (наличие тонкой базы делает незначительным вклад связанной с сопротивлением базы составляющей в суммарное значение прямого падения напряжения) так и увеличением подвижности

носителей заряда при температуре 77 К [8]. Не исключается также влияние разогрева приборной структуры, приводящее к дополнительному смещению ВАХ в область более низких значений прямого напряжения при росте тока, компенсирующее смещение на участке миллиамперных токов, обусловленное ростом контактной разности потенциалов при понижении температуры.

Приведенные на рис. 1 изменения хода ВАХ при электронном облучении обусловлены, по-видимому, при флюенсах облучения до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, уменьшением падения напряжения на n-p-переходе [9]. Наблюдаемое смещение ВАХ в область больших значений U_F при дальнейшем увеличении флюенса облучения и уменьшение величины дифференциального сопротивления R_d может быть связано с появлением дополнительного механизма токопереноса с участием уровней радиационных дефектов. Смещение ВАХ в область более высоких значений U_F после отжига при температуре 400°C образцов, облученных флюенсом электронов $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (рис.1 кр.5) может быть обусловлено изменением состава уровней радиационных дефектов.

Таким образом, приведенные в данной работе результаты показывают, что исследуемые n⁺-р-структуры с узкой базой имеют низкие значения дифференциального сопротивления на участке прямой ВАХ в диапазоне токов 1 - 1000 мА. (на порядок ниже аналогичных значений при комнатной температуре). Облучение таких структур электронами с энергией 6 МэВ флюенсами порядка $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ приводит к дополнительному снижению дифференциального сопротивления прямой ВАХ, что делает возможным использование таких диодов в качестве стабилитронов, работающих при температуре жидкого азота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коршунов, Ф.П. Влияние электронного облучения на характеристики эпитаксиальных кремниевых р-п-структур / Ф.П.Коршунов [и др.] // Известия НАН Беларуси. Серия физ.-мат. наук. 2007. № 3. С. 92.
2. Коршунов, Ф.П. Влияние отжига радиационных дефектов на характеристики эпитаксиальных кремниевых р-п-структур / Ф.П.Коршунов [и др.] // Доклады НАН Беларуси. 2007. Т. 51. № 3. С. 48.
3. Коршунов, Ф.П. Радиационные дефекты в кремниевых n⁺-р-структурах, облученных быстрыми электронами при повышенных температурах / Ф.П.Коршунов [и др.] // Доклады НАН Беларуси. 2008. Т. 52, № 5. С. 40.
4. Edmundo, A. Low Temperature Electronics: Physics, Devices, Circuits and Applications / A. Edmundo [et al.] // Academic Press. 2001. № 2. P. 25.
5. Pease, R.L. Radiation testing of semiconductor devices for space electronics / R.L. Pease, A.H. Johnston, J.L. Azarewicz // Proceedings of the IEEE. 1988. Vol.76. № 11. P. 1510.
6. Lang, D.V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors / D.V. Lang // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. № 7. P. 645.
7. Коршунов, Ф.П. Радиационные дефекты с глубокими уровнями в кремниевых р-п-структурах, облученных быстрыми электронами при 340-770 К / Ф.П.Коршунов [и др.] // Сб. докладов международной научной конференции "Актуальные проблемы физики твердого тела". 23-26 октября 2007. Минск. 2007. С. 56.
8. Langelier, J. Semiconductor devices suitable for use in cryogenic environments / J. Langelier // Cryogenics. 1974. №.8. P. 439.
9. Коршунов, Ф.П. Некоторые закономерности изменений характеристик кремниевых диодов / Ф.П.Коршунов // Известия АН БССР. Серия физ.-мат. наук. 1970. № 6. С. 115 – 121.