

Нагрузка		Метод							
		магнетронный				термический	вакуумно-дуговой		
		Ti - Si	Ti - TiO ₂ - Si	Ti - ситалл	Ti - TiO ₂ - ситалл	Ti - ситалл	Ti - AlN, BN	Mo - Al ₂ O ₃	Ni - Al ₂ O ₃
F, H	без отжига	1,0	0,8	2,1	>11	0,8	5,0	7,5	10,5
	с отжигом	2,2	3,3	5,8	>11	3,8	—	—	—

УДК 537.311.322

Ю.М. ПОКОТИЛО, А.Н. ПЕТУХ, В.Т. ЦВЫРКО

СВОЙСТВА БИСТАБИЛЬНЫХ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ДОНОРОВ В ЭПИТАКСИАЛЬНОМ КРЕМНИИ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ПРОТОНАМИ*

Hydrogen donors formation processes are studied in epitaxial silicon implanted with 300 keV protons. Different types of hydrogen donors are formed in dependence on annealing conditions and fluences. Hydrogen double donors (HDD) are formed on early annealing stage. HDD possess bistability property.

Облучение пучками протонов - перспективный физико-технологический метод модификации свойств кремния [1]. Интересно, что при взаимодействии внедренного водорода с радиационными и другими дефектами формируются

* Авторы статьи - сотрудники кафедры атомной физики и физической информатики.

доноры с высокой (до 10^{17} см⁻³) концентрацией [2-4]. Постимплантационный отжиг (300÷400 °С, 20 мин) образцов высокочистого FZ-Si вначале приводит к образованию двойных водородных доноров (HDD) [5, 6]. Последующий отжиг (350÷450 °С) сопровождается исчезновением ЭПР-спектра Si-AA1, обусловленного центром HDD⁺, и формированием новых мелких водородных доноров (SHD), часть из которых обладает свойством бистабильности. Так, их концентрация обратимо изменяется как функция температуры закалки ниже ≈ 220 °С [7] с постоянной времени релаксации $\tau=2 \cdot 10^{14}(1,23/kT)$ с [8], т. е. при комнатной температуре неравновесное состояние (с высокой концентрацией SHD) существует достаточно долго (около 1 года). Авторы [9, 10], исходя из линейности температурной зависимости концентрации свободных носителей в интервале 50÷340 °С и анализа спектров ИК-поглощения в образцах с Н-донорами, предложили модель бистабильности, связанную с формированием в гидрогенизированном кремнии нанокластеров собственных атомов, включающих атомы водорода, со свойствами квантовых проволок.

Похожими свойствами обладают и Н-доноры в эпитаксиальном кремнии [11, 12]. Однако в диапазоне 20÷300 °С стимулированный инъекцией неосновных носителей заряд переход при комнатной температуре из состояния с низкой концентрацией электронов в неравновесное состояние с высокой их концентрацией позволил по аналогии с термодонорами предложить механизм бистабильности наблюдаемых Н-доноров, основанный на модели двойного донора с отрицательной эффективной корреляционной энергией и уровнем двух-электронного заполнения $E_c-0,30$ эВ.

В настоящей работе приводятся результаты исследования процесса формирования Н-доноров.

Материал и методика

Исследования проводились на промышленных диодах Шоттки (Mo-Si), в которых активным базовым слоем являлся эпитаксиальный кремний, легированный фосфором, с удельным сопротивлением 1,05 и 1,8 Ом·см и толщиной 5 мкм. Облучение ионами атомарного водорода H⁺ с энергией 300 кэВ и интенсивностью потока $3 \cdot 10^{11}$ ион/см²·с осуществлялось при комнатной температуре с планарной стороны через многослойный (Ag-Ni-Mo) контакт. Профили распределения концентрации электронов проводимости измерялись стандартным C-V-методом с частотой измерительного моста 1,2 МГц, параметры радиационных дефектов - методом DLTS при отношении времени выборок $t_2/t_1=5$ и частоте 1 МГц. Напряжение смещения переключалось в диапазоне 0÷5 В, что соответствовало глубине сканирования базового слоя $X=0,2\div 2,1$ мкм. Термообработка проводилась в кварцевой трубе на воздухе.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены профили распределения концентрации электронов проводимости в эпитаксиальном кремнии, облученном ионами Н дозой $\Phi=1 \cdot 10^{15}$ см⁻² на различных стадиях изохронного (20 мин) отжига. Поскольку как в FZ-Si [4], так и в эпитаксиальном кремнии [11] отжиг Н-доноров происходит в две стадии, то измерения профилей были выполнены при температуре 350 °С (рис. 1 а), соответствующей их максимальной концентрации, и при 450 °С после первой стадии отжига (рис. 1 б). Измерения профилей распределения концентрации электронов проводимости проводились в следующей последовательности. Постимплантационный отжиг (кривые 1, 1', 1'') и отжиг после выдержки при 100 °С в течение 15 ч (кривые 2, 2') обеспечивают полную перестройку Н-доноров в электрически неактивное состояние [12]. Наконец, для восстановления электрической активности доноров была применена закалка после выдержки 20 мин при 200 °С в воду. Ранее [11] нами по результатам сравнения распределений внедренных ионов водорода и концентрации электронов проводимости

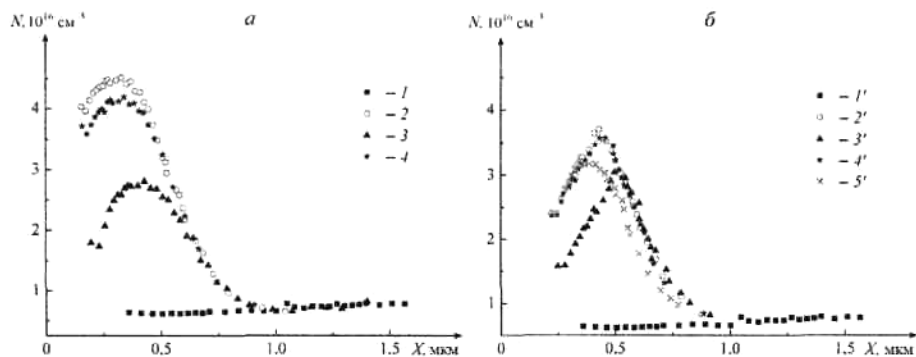


Рис. 1. Профили распределения концентрации электронов проводимости в базе диодов Шоттки, имплантированных ионами водорода дозой $\Phi=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, при температурах постимплантационного отжига 350 °C (а), 450 и 475 °C (б).
 Температуры отжига и закалки: 2 – 350 °C, 2' – 450 °C; 3, 3' – 100 °C; 4, 4' – 200 °C, 5 – 475 °C.
 Время термообработки, мин: 2, 2', 4, 4', 5 – 20; 3, 3' – 900.
 Кривые 1, 1' – исходный профиль

было показано, что профили, приведенные на рис. 1, определяются распределением концентрации мелких (с энергией ионизации $< 0,1 \text{ эВ}$) Н-доноров. Из анализа полученных результатов следует, что наличие двух стадий отжига связано с существованием двух типов Н-доноров - перестраиваемых и неперестраиваемых. Действительно, при увеличении температуры постимплантационного отжига концентрация перестраиваемых Н-доноров уменьшается (ср. кривые 2, 3 и 2', 3' на рис. 1) вплоть до нуля, так как закалка отожженного при 475 °C образца не приводит к изменению концентрации (кривые 1'). В то же время неперестраиваемая часть доноров (кривые 2, 2') сохраняет свое значение в исследуемом диапазоне температур отжига. Следовательно, при температуре отжига 350 °C одновременно существуют два типа Н-доноров, что подтверждается и холловскими измерениями [4]. Так как ЭПР-спектр Si-AA1, возникающий от двойного донора в положительном зарядовом состоянии HDD^+ , появляется на ранних стадиях отжига и исчезает при повышении температуры [5, 6], то с учетом данных рис. 1 логично предположить, что перестраиваемым в нашем случае является HDD -центр. Это подтверждает механизм бистабильности, предложенный в [12], обусловленный отрицательной эффективной корреляционной энергией двойного Н-донора.

На рис. 2 представлена зависимость концентрации Н-доноров в максимуме их распределения ($X \approx 0,3 \text{ мкм}$) от дозы имплантации протонами после термообработки при 350 °C. Видно, что при $\Phi < 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ скорость введения

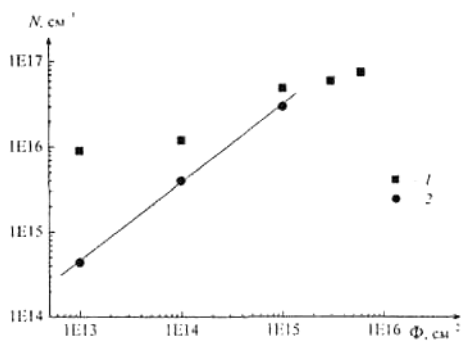


Рис. 2. Зависимость концентрации 1 – Н-доноров, 2 – HDD -доноров в максимуме их распределения в базе диодов Шоттки от дозы имплантации ионами водорода

Н-доноров невелика, в диапазоне $\Phi = 10^{14} \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ она резко увеличивается, а затем стремится к насыщению вблизи своего предельного значения $n \approx 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [5]. Совершенно аналогичная зависимость максимальной концентрации Н-доноров от дозы облучения нейтронами CZ-Si:H₂ описана в работе [13]. Низкая начальная скорость введения Н-доноров объяснялась отжигом при термообработке недостаточно высокой концентрации точечных радиационных дефектов, необходимых для формирования водород-дефект-доноров [13], а насы-

шение связывалось с ограниченностью концентрации водорода и увеличением доли крупномасштабных радиационных нарушений с возрастанием дозы облучения нейтронами. В нашем же случае рост концентрации доноров с дозой имплантации связан и с повышением концентрации внедренного водорода. Поэтому более логичным объяснением участка насыщения нам представляется следующее. При температуре формирования перестраиваемых центров HDD и концентрации электронов $n \approx 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ уровень Ферми близок к уровню двухэлектронного заполнения HDD ($E_F \geq E(0^{++}) = E_c - 0,30 \text{ эВ}$ [12]). Поэтому дальнейшее возрастание дозы имплантации приводит к увеличению концентрации доноров в нейтральной конфигурации D_A^0 , а не D_B^{++} , наблюдаемой по измерению концентрации электронов проводимости C-V-методом. Некоторый рост концентрации электронов при $\Phi > 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ может быть связан с увеличением концентрации неперестраиваемых, по-видимому, SHD.

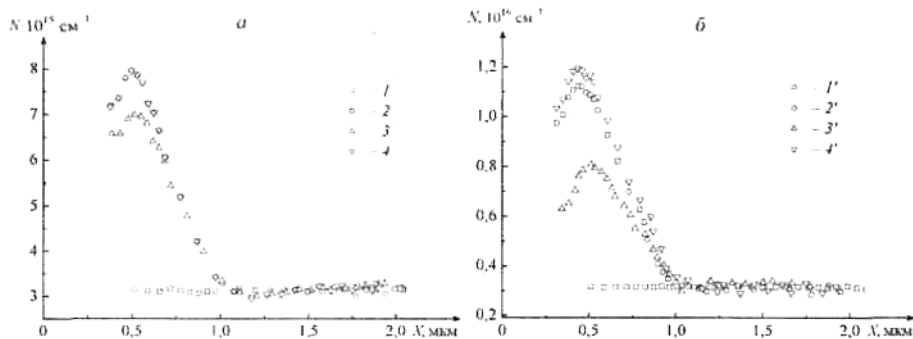


Рис. 3. Профили распределения концентрации электронов проводимости в базе диодов Шоттки, имплантированных ионами водорода дозой $1 \cdot 10^{13}$ (а) и $1 \cdot 10^{14}$ (б).
Температура отжига и закалки, °С: 1, 1' – 350; 2, 2' – 100; 3, 3' – 200.
Время термообработки, мин: 1, 1' – 20; 2, 2' – 900; 3, 3' – 20.
Кривые 4, 4' – исходный профиль

На рис. 3 представлены профили распределения электронов проводимости для различных доз облучения при температуре постимплантационного отжига 350 °С, закалке от 200 °С в воду и длительном низкотемпературном отжиге. Этот эксперимент позволяет оценить долю перестраиваемых HDD-центров в общей концентрации Н-доноров. Из анализа данных рис. 3 и 1 а следует, что при малых дозах облучения доля перестраиваемых доноров незначительна ($\leq 0,1$), а при $\Phi = 1 \cdot 10^{14}$ и $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ возрастает до $\approx 0,5$. С учетом этого получается, что дозовая зависимость концентрации HDD в диапазоне $\Phi = 1 \cdot 10^{13} \div 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ строго линейна (см. рис. 2): $NH = k \cdot \Phi$, где $k = (38 \pm 6) \text{ см}^{-1}$. В то же время концентрация неперестраиваемых центров в диапазоне $\Phi = 1 \cdot 10^{13} \div 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ практически постоянна и составляет $\approx 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а при $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ резко возрастает (см. рис. 1 а). Можно предположить, что такой пороговый характер накопления связан с существованием различных типов неперестраиваемых Н-доноров [14].

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (грант 03-50-4529) и БРФФИ (грант F04MC-028).

1. Козлов В. А., Козловский В. В. // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 7. С. 769.
2. Ohmura Y., Zohta Y., Kanazawa M. // Phys. Stat. Sol. (a). 1973. Vol. 15. P. 93.
3. Gorelkinskii Yu. V., Sigle V. O., Takibaev Zh. S. // Ibid. 1974. Vol. 22. P. 55.
4. Mukashev B. N., Tamendarov M. F., Tokmoldin S. Zh. // Ibid. 1985. Vol. 91. P. 509.
5. Мукашев Б. Н., Абдуллин Х. А., Горелкинский Ю. В. // УФН. 2000. Т. 170. Вып. 2. С. 143.
6. Абдуллин Х. А., Горелкинский Ю. В., Мукашев Б. Н., Токмолдин С. Ж. // ФТП. Т. 36. Вып. 3. С. 257.

7. Gorelkinskii Yu.V., Nevinnyi N.N. // Nucl. Instrum. and Meth. 1983. Vol. 209-210. P. 677.

8. Gorelkinskii Yu.V., Abdullin Kh.A., Mukashev B.N. // Mat. Sci. Eng. C. 2002. Vol. 19. P. 397.

9. Abdullin Kh.A., Gorelkinskii Yu.V., Mukashev B.N., Serrikkanov A.S. // Phys. B: Cond. Mat. 2003. Vol. 340-342. P. 692.

10. Abdullin Kh.A., Gorelkinskii Yu.V., Kikarin S. M. et al. // Mat. Sci. in Semicond. Proc. 2004. Vol. 7. P. 447.

11. Покотило Ю.М., Петух А.Н., Литвинов В.В. // ПЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 22. С. 70.

12. Покотило Ю.М., Петух А.Н., Литвинов В.В., Цвырко В.Г. // ФТП. 2005. Т. 39. Вып. 7. С. 802.

13. Xiang-Ti Meng, Ai-Guo Kang, Shou-Ren Bai // Jpn. J. Appl. Phys. 2001. Vol. 40. P. 2123.

14. Hartung J., Weber J. // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 48. P. 14161.

Поступила в редакцию 17.04.06.

Юрий Мефодиевич Покотило - кандидат физико-математических наук, доцент. **Алла**

Николаевна Петух - кандидат физико-математических наук, доцент. **Виктор**

Геннадьевич Цвырко - аспирант. Научный руководитель - Ю.М. Покотило.