

06

## Формирование доноров в кремнии, имплантированном ионами водорода

© Ю.М. Покотило, А.Н. Петух, В.В. Литвинов

Белорусский государственный университет, Минск  
E-mail: pokotilo@bsu.by

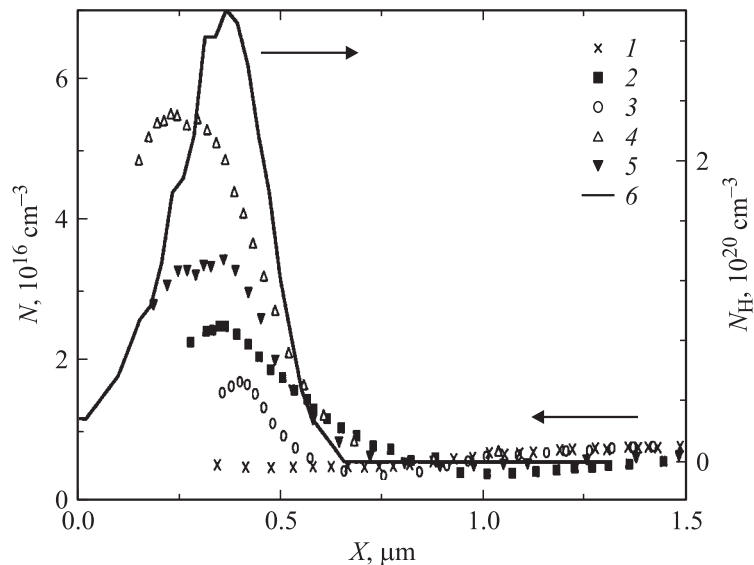
В окончательной редакции 4 июня 2004 г.

Исследуются электрофизические свойства изготовленных на эпитаксиальном *n*-кремнии диодов Шоттки, облученных низкоэнергетическими (300 keV) ионами водорода.

Показано, что имплантация протонов при комнатной температуре приводит к формированию мелких доноров, профиль распределения которых совпадает с распределением внедренного водорода. Эти доноры устойчивы до температуры 150°C и полностью отжигаются при температуре 250°C. При температурах выше 270°C идет формирование известных доноров, концентрация которых более чем в два раза превышает концентрацию первых доноров, а их отжиг происходит на стадиях 375–425 и 450–525°C. Природа как первых, так и вторых доноров связывается с формированием и трансформацией в поврежденной облучением области двумерных водородосодержащих дефектов.

Известно [1–3], что в кремнии после облучения протонами дозой ( $10^{16}–10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ) и последующего кратковременного (20 min) отжига при температуре 350–550°C формируются водородосодержащие доноры двух типов: глубокие двойные (HDD) и мелкие (SHD) доноры. Относительный вклад HDD и SHD зависит от температуры отжига и дозы облучения [4]. Образованию этих доноров сопутствует отжиг радиационных дефектов [5,6]. Проведенные к настоящему времени исследования не вскрывают природу наблюдаемых водородосодержащих мелких доноров. В настоящей работе мы сообщаем новые сведения о формировании водородосодержащих доноров в эпитаксиальном кремнии после облучения ионами водорода невысокой энергии.

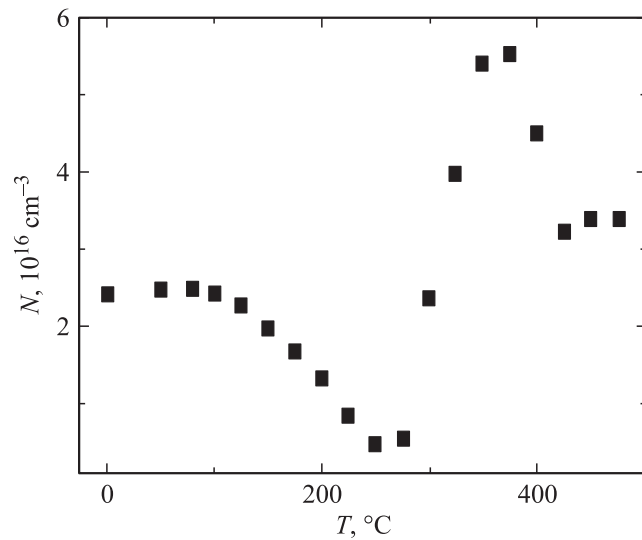
В эксперименте использовались диоды Шоттки на основе эпитаксиального кремния *n*-типа ( $\rho \approx 1.2 \Omega \cdot \text{cm}$ ). Толщина легированного фосфором эпитаксиального слоя была около 5  $\mu\text{m}$ . На лицевую поверхность кремния напылялся Mo и затем для омического контакта Ag. Облучение



**Рис. 1.** Распределение концентрации ( $N$ ) электронов в базе Mo-Si-диода Шоттки в исходном состоянии (1), после облучения (2) и на различных этапах изохронного (20 min) отжига.  $T$ , °C: 175 (3), 350 (4), 450 (5). Расчетному распределению концентрации ( $N_H$ ) внедренных ионов водорода [7] соответствует кривая (6).

образцов проводилось ионами  $H^+$  с энергией 300 keV (доза  $10^{15} \text{ cm}^2$ ) при комнатной температуре через металлический (Ag-Mo) контакт. Интенсивность потока составляла  $3 \cdot 10^{12} \text{ ion/cm}^2 \cdot \text{s}$ , что полностью исключало нагрев образцов во время облучения. Отжиг был проведен в кварцевой трубе на воздухе. Распределение концентрации электронов в базе диодов определялось стандартным C-V-методом на частоте 1.2 MHz.

На рис. 1 представлены типичные распределения концентрации электронов в базе Mo-Si-диода Шоттки в исходном состоянии, после облучения и на различных этапах изохронного (20 min) отжига. Сплошной линией показано расчетное распределение внедренных ионов водорода ( $N_H$ ), полученное с помощью программного пакета TRIM [7]. Видно, что непосредственно после облучения (кривая 2) наблюдается увеличение



**Рис. 2.** Зависимость концентрации электронов в базе облученных протонами диодов Шоттки от температуры изохронного (20 min) отжига.

концентрации электронов на величину порядка  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Этот эффект имеет место в тонком базовом слое, где локализован внедренный водород (кривая б), и связан с формированием водородосодержащих доноров нового типа.

Известно, что имплантация водорода в кремнии приводит к формированию большого числа компенсирующих радиационных дефектов [8]. Эти дефекты являются глубокими с энергией ионизации  $> 0.1 \text{ eV}$  и приводят к компенсации материала. В нашем случае речь идет о мелких донорах с энергией ионизации  $< 0.1 \text{ eV}$ , формирование которых происходит без термообработки и в базовой области, свободной от радиационных дефектов. Действительно, средний проецированный пробег ионов водорода от поверхности многослойной (Ag–Mo–Si) мишени, согласно нашим расчетам, составляет  $R_p = 1.65 \mu\text{m}$ , а величина  $R_p$  больше средней глубины проникновения радиационных дефектов на  $(0.3–0.4)R_p$  [9]. Этот эффект подтверждается также и экспериментально [10]. Поэтому в области максимума распределения ионов водорода

(рис. 1) радиационные повреждения должны быть невелики. Проведенные в работе DLTS измерения облученных образцов показали, что максимальная концентрация радиационных акцепторов  $\sim 7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  сравнима с таковой в образцах, отожженных в области температур (350–550°)С [4].

На рис. 2 представлены результаты изохронного отжига облученного образца, из которых следует, что обнаруженные доноры отжигаются при 250°С. При дальнейшем увеличении температуры отжига наблюдается формирование известных центров HDD и SHD [3]. Максимум их концентрации достигается при (350–550)°С. В интервале температур (375–475)°С HDD отжигаются, а при  $T > 475^\circ\text{C}$  наблюдается стадия отжига перестраивающихся SHD [4]. Нами также подтверждены обратимые изменения концентрации SHD при закалке образцов от 90–300°С в воду.

Таким образом, в слоях эпитаксиального кремния, имплантированного низкоэнергетическими ионами водорода, обнаружены мелкие водородные доноры, формирующиеся без предварительной термообработки. При  $T = 100\text{--}250^\circ\text{C}$  эти доноры отжигаются, а дальнейшее увеличение температуры отжига приводит к образованию известных центров HDD и SHD. Формирование и отжиг всех трех типов водородных доноров, а также перестройка SHD при циклическом изменении температуры наблюдается в одной и той же базовой области, где локализован пик распределения внедренных ионов. Причем длительные ( $\sim 10 \text{ h}$ ) термообработки образцов при температуре вплоть до 500°С не приводят к сколько-нибудь заметному диффузионному расплыванию профилей водородосодержащих доноров. Следовательно, механизм формирования и перестройки водородосодержащих доноров не может быть обусловлен диффузией водорода и, вероятнее всего, связан с трансформацией малоподвижных двумерных водородосодержащих структур [11,12].

## Список литературы

- [1] *Ohmura Y., Zohta Y., Kanazawa M.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1973. V. 15. P. 93–98.
- [2] *Pearton S.J., Corbett J.W., Stavola M.* Hydrogen in Crystalline Semiconductors. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 363 с.
- [3] *Мукашев Б.Н., Абдулин Х.А., Горелкинский Ю.В.* // УФН. 2000. Т. 170. № 2. С. 143–155.

- [4] *Mukashev B.N., Tamendarov M.F., Tokmoldin S.Zn.* et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. V. 91. P. 509–522.
- [5] *Gorelkinskii Yu.V., Sigle V.O., Takibaev Zh.S.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1974. V. 22. P. 55–57.
- [6] *Mukashev B.N., Nussupov K.N., Tamendarov M.F.* // Phys. Stat. Sol. (b). 1979. V. 96. P. 17–19.
- [7] *Biersack J.R., Haggmark L.G.* // Nucl. Instr. Meth. 1980. V. 174. P. 257–264.
- [8] *Козлов В.А., Козловский В.В.* // ФТП. 2001. Т. 35. В. 7. С. 769–795.
- [9] *Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф.* Физические процессы при ионной имплантации в твердые тела. Минск: УП. Технопринт, 2001. 393 с.
- [10] *Kauppinen H., Corbel C., Skog K.* et al. // Phys. Rev. B. 1997. V. 55. P. 9598–9608.
- [11] *Nickel N.H., Anderson G.B., Jonson N.M.* et al. // Physica B. 1999. V. 273–274. P. 212–215.
- [12] *Tokmoldin S.Zn., Mukashev B.N., Abdullin Kh.A.* et al. // Physica B. 1999. V. 273–274. P. 204–207.