

06

## Бистабильность водородных доноров в сплаве GeSi, имплантированном протонами

© Ю.М. Покотило, А.Н. Петух, В.В. Литвинов,  
В.П. Маркевич, А.Р. Пеаker, Н.В. Абросимов

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
E-mail: pokotilo@bsu.by  
University of Manchester, School of Electrical and Electronic Engineering,  
Manchester M60 1QD, UK  
Институт физики твердого тела РАН, Черногоровка, Россия

*В окончательной редакции 21 ноября 2007 г.*

Методом вольт-фарадных характеристик исследовались электрофизические свойства мелких водородных доноров в сплавах  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $x = 0.012$ ), которые формировались облучением низкоэнергетическими протонами с последующей термообработкой при  $275^\circ\text{C}$ . Показано, что часть доноров проявляет свойство бистабильности, т.е. их концентрация обратимо изменяется при циклическом изменении температуры в диапазоне  $100\text{--}200^\circ\text{C}$ . Указывается на аналогию свойств перестраиваемых водородных доноров в германии с бистабильными водородными донорами в кремнии.

PACS: 61.72.Ji, 61.72.Ss, 61.80.Fe, 73.40.Sx

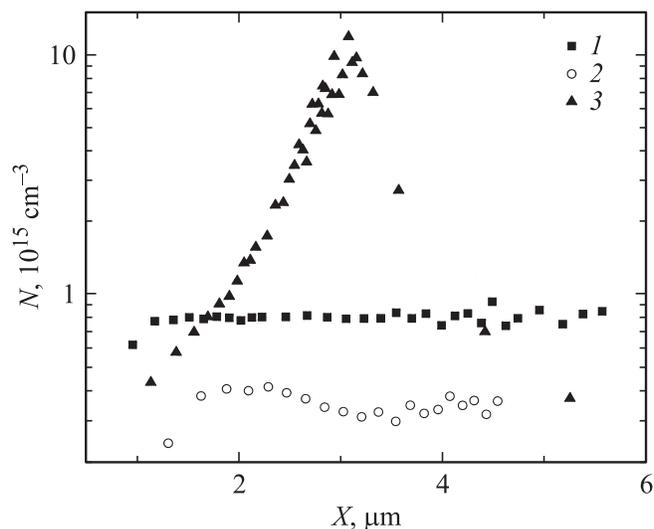
Примесные атомы водорода могут оказывать существенное влияние на характеристики полупроводниковых материалов, поэтому свойства водорода в различных полупроводниках интенсивно исследовались в течение последних десятилетий [1,2]. Свойства водорода в кристаллическом кремнии к настоящему времени изучены и поняты достаточ-

но глубоко. Поведение водорода в германии и кремний-германиевых сплавах менее изучено. Возрастающий интерес к технологическому применению германия и SiGe сплавов [3,4] требует дальнейших усилий по исследованию свойств водорода в этих материалах.

Одним из практически важных свойств водорода, имплантированного в решетку кремния, является формирование при последующей термообработке мелких водородсодержащих доноров с концентрацией до  $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [5,6]. Было обнаружено, что часть водородсодержащих доноров в Si обладает свойством бистабильности [6,7]. Эти бистабильные центры могут существовать в одной из двух конфигураций, только в одной из которых они являются мелкими донорами. Недавно нами было показано, что в германии [8], имплантированном низкоэнергетическими протонами, при последующей кратковременной ( $\sim 30 \text{ min}$ ) термообработке в диапазоне температур  $200\text{--}300^\circ\text{C}$  формируются мелкие водородсодержащие доноры (H-доноры). В настоящей работе сообщается об обнаружении свойства бистабильности H-доноров в сплаве GeSi.

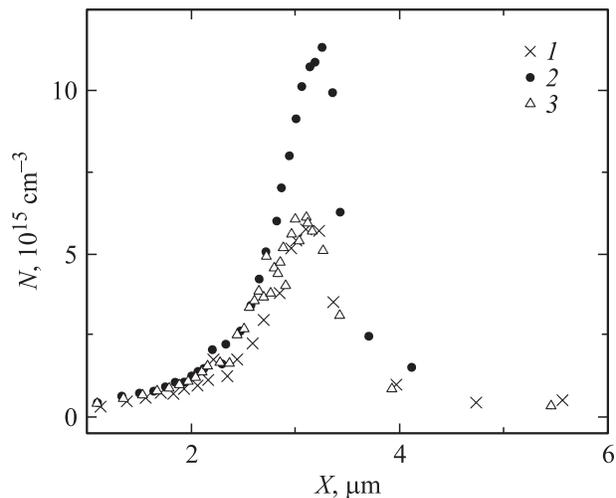
Из сплава изготавливались образцы для исследований  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ , которые были выращены методом Чохральского в Институте роста кристаллов (Берлин). Кристаллы во время роста были легированы фосфором до уровня  $\sim (0.8\text{--}3) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Измерения вольт-фарадных характеристик проводились на диодах Шоттки, изготовленных термическим испарением золота (Au) на полированную поверхность образцов. Толщина слоя Au составляла около  $100 \text{ nm}$ . Образцы имплантировались протонами с энергией  $300 \text{ keV}$  дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  через слой золота при комнатной температуре. Средний проецированный пробег протонов в германии составлял около  $3 \mu\text{m}$ . Отжиг образцов в диапазоне  $(100\text{--}300)^\circ\text{C}$  проводился на воздухе. Профили концентрации мелких доноров в имплантированных и отожженных образцах измерялись методом вольт-фарадных характеристик при комнатной температуре.

На рис. 1 представлены профили распределения концентрации электронов в исходном, облученном и термообработанном образце  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ . Видно, что исходная концентрация электронов ( $\sim 8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) после облучения протонами уменьшается до  $\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  из-за введения компенсирующих радиационных дефектов. Последующая термообработка при  $275^\circ\text{C}$  приводит к появлению узкого слоя с повышенной ( $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) концентрацией электронов, локализованного в области значения среднего проецированного пробега протонов  $3 \mu\text{m}$ . Этот эффект обусловлен формированием водородсо-



**Рис. 1.** Профили распределения концентрации центров с мелкими донорными уровнями в образце  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $x = 0.012$ ), облученном протонами с энергией 300 keV дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  и подвергнутого термообработке при  $275^\circ$ . Последовательность измерений: 1 — исходный; 2 — после облучения протонами; 3 — термообработка ( $275^\circ \text{ C}$ , 30 min).

держателем доноров [8]. На рис. 2 показаны профили распределения концентрации центров с мелкими донорными уровнями после выдержки диодов при комнатной температуре в течение одного года, закалки в воде от  $200^\circ \text{ C}$  и длительного низкотемпературного отжига. Как следует из рис. 2, выдержка диодов при комнатной температуре вызывает практически двухкратное снижение концентрации Н-доноров ( $6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) в области максимума их распределения. Последующий нагрев диодов до  $200^\circ \text{ C}$  и их закалка до комнатной температуры восстанавливают максимальное значение концентрации Н-доноров. Длительный отжиг при  $100^\circ \text{ C}$  опять снижает концентрацию Н-доноров до значения  $\sim 6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , которое не изменяется при увеличении времени отжига до 24 h. Это циклическое изменение концентрации электронов в области температур  $100\text{--}200^\circ \text{ C}$  может быть повторено многократно.



**Рис. 2.** Профили распределения концентрации центров с мелкими донорными уровнями в образце  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $x = 0.012$ ), облученном протонами с энергией 300 keV дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , в отожженном при  $275^\circ\text{C}$  в течение 30 min, после следующих обработок: выдержка в течение года при комнатной температуре (1), закалка от  $200^\circ$  (20 min) в воду (2), отжиг при  $100^\circ\text{C}$  в течение 6 h (3).

Обратимое изменение концентрации Н-доноров в GeSi свидетельствует о том, что, по крайней мере, часть Н-доноров (примерно половина) может находиться в двух конфигурациях. Таким образом, имеет место практически полная аналогия свойств и температурных режимов перестройки бистабильных Н-доноров в GeSi с таковыми в Si [6,7].

## Список литературы

- [1] Pearton S.J., Corbett J.W., Stavola M. Hydrogen in crystalline semiconductors. Berlin: Springer, 1992.
- [2] Van de Walle C.G., Neugebauer J. // Annual Review of Materials Research. 2006. V. 36. P. 179–198.
- [3] Akatsu T. et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. 2006. V. 9. P. 444–449.

- [4] *Grimmeiss H.G.* // ФТП. 1999. Т. 39. В. 9. С. 1032–1034.
- [5] *Козловский В.В.* // Модифицирование полупроводников пучками протонов. СПб.: Наука, 2003.
- [6] *Мукашев Б.Н., Абдулин Х.А., Горелкинский Ю.В.* // УФН. 2000. Т. 170. В. 2. С. 143–155.
- [7] *Покотило Ю.М., Петух А.Н., Литвинов В.В., Цвырко В.Г.* // ФТП. 2005. Т. 39. В. 7. С. 802–805.
- [8] *Pokotilo Ju.M., Petukh A.N., Litvinov V.V., Markevich V.P., Kazuchits N.M.* // Materials Science in Semiconductor Processing. 2006. V. 9. N 4–5. P. 629–633.