

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ДОНОРОВ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ГЕРМАНИЙ-КРЕМНИЙ

Ю.М. Покотило<sup>1)</sup>, А.Н. Петух<sup>1)</sup>, В.В. Литвинов<sup>1)</sup>, В.П. Маркевич<sup>2, 4)</sup>, А.Р. Peaker<sup>4)</sup>,  
Н.В. Абросимов<sup>5)</sup>, А.С. Камышан<sup>3)</sup>, А.В. Гиро<sup>1)</sup>, К.А. Соляникова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет,

пр. Независимости, 4, Минск, 220050, Беларусь, pokotilo@bsu.by

<sup>2)</sup>ГПНО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», ул. П. Бровки 19, Минск, 220072, Беларусь

<sup>3)</sup>НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

<sup>4)</sup>University of Manchester, Manchester M60 1QD, UK

<sup>5)</sup>Institute of Crystal Growth, Berlin, Germany

При имплантации ионов водорода с энергией 330 и 200 кэВ в процессе последующей термообработки в кристаллах  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  формируются водородосодержащие доноры различного типа. Исследованы свойства этих типов доноров. Установлено, что наблюдаемые различия связаны с влиянием поверхности на процесс формирования доноров за счет существенного ее влияния на миграцию сопутствующих имплантации радиационных дефектов.

### Введение

Облучение пучками протонов является перспективным физико-технологическим методом модификации электрофизических параметров кристаллов полупроводников [1]. Одним из наиболее интересных свойств внедренного d кремний водорода является то, что при взаимодействии его с радиационными дефектами в процессе термообработки в тонком слое, локализованном в области проецированной длины пробега ионов, формируются мелкие водородосодержащий доноры (Н-доноры) [2]. Недавно нами [3, 4]. были обнаружены аналогичные Н-доноры в твердых растворах  $\text{GeSi}$ , формирующиеся при таких же условиях. В настоящей работе более подробно исследуются их свойства.

### Методика эксперимента

Исследования были проведены на образцах твердых растворов  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $0 \leq x \leq 0.06$ ), выращенных модифицированным методом Чохральского с низким ( $< 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) содержанием кислорода. Кристаллы были легированы фосфором ( $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Для измерений были изготовлены диоды Шоттки путем напыления золота через маску на полированную поверхность кристаллов. Образцы были имплантированы ионами водорода ( $\text{H}^+$ ) энергией 200 и 330 кэВ через слой золота при комнатной температуре потоком  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Профили концентрации Н-доноров измерялись методом вольт-фарадных (С-V) характеристик. Параметры дефектов с глубокими уровнями определялись из измерений спектров DLTS. Образцы отжигались в кварцевой трубке на воздухе.

### Экспериментальные данные и их обсуждение

Из анализа, представленных на рис. 1, профилей распределения Н-доноров следует, что непосредственно после имплантации за счет образования радиационных дефектов акцепторного типа исходная концентрации электронов значи-

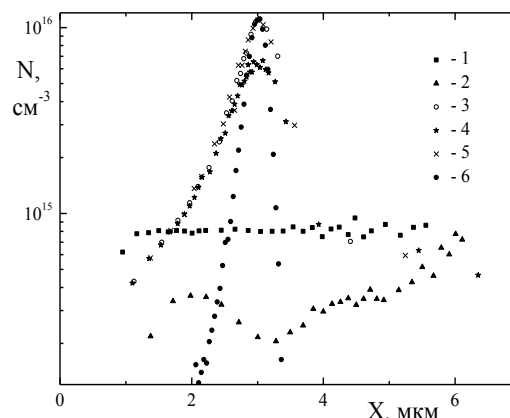


Рис. 1. Профили распределения водородосодержащих доноров в кристаллах  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $x=0.012$ ), имплантированным ионами  $\text{H}^+$  с энергией 330 кэВ дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  на различных этапах последующей термообработки: 1 - исх, 2 -  $1 \cdot 10^{15}$ , 3 -  $275^\circ\text{C}$ , 40 мин, 4 -  $100^\circ\text{C}$ , 10 ч, 5 -  $200^\circ\text{C}$ , 20 мин, 6 - TRIM.

тельно уменьшается. Однако при последующей термообработке ( $275^\circ\text{C}$ , 40 мин.) возникает узкий концентрационный пик совпадающий с пиком распределения внедренного водорода, построенного по программе TRIM-90. Поэтому естественно связать наблюдаемый пик с формированием Н-доноров [3]. Выдержка образцов при  $100^\circ\text{C}$  в течение 10 часов приводит к частичному уменьшению концентрации Н-доноров, а последующая закалка от  $200^\circ\text{C}$  в воду восстанавливает их исходное значение. Этот процесс может быть многократно повторен и обусловлен свойством бистабильности части Н-доноров [3].

Из анализа данных рис. 2, полученных при меньшей (200 кэВ) энергии ионов, видно, что ожидаемо пик смещен ближе к поверхности, а максимальное значение концентрации Н-доноров совпадает с предыдущим случаем. Однако в отличие от более высокоэнергетической имплантации отсутствуют бистабильные Н-доноры и время постимплантационной термообработки для достижения предельной концентрации выше более

чем на порядок (рис. 3).

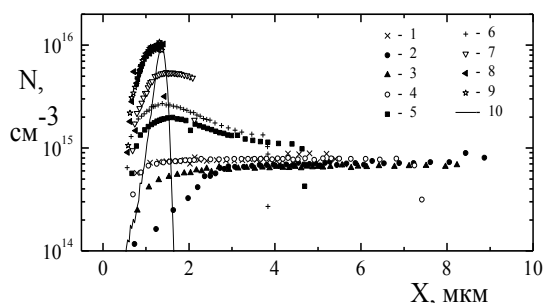


Рис. 2. Профили распределения водородосодержащих доноров в кристаллах  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $x=0,012$ ), имплантированным ионами  $\text{H}^+$  с энергией 200 кэВ дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  на различных этапах последующей термообработки: 1 – исх, 2 -  $1 \cdot 10^{15}$ , 3 - 275°C, 20 мин, 4 - 275°C, 80 мин, 5 - 275°C, 120 мин, 6 - 275°C, 160 мин, 7 - 275°C, 240 мин, 8 - 275°C, 360 мин, 9 - 100°C, 10 ч, 10 – TRIM.

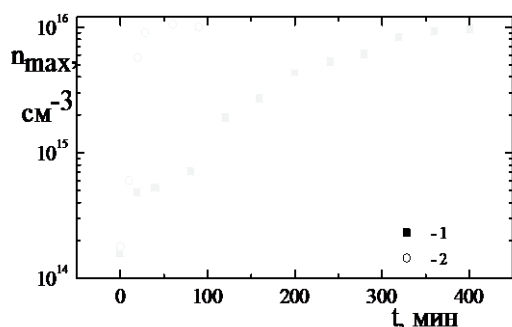


Рис. 3. Изотермический (275°C) отжиг кристаллов  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  ( $x=0,012$ ), имплантированных ионами  $\text{H}^+$  с энергией 200 (1) и 330 (2) кэВ дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

На рис. 4 представлена зависимость предельной концентрации Н-доноров в твердых растворах  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  при различных энергиях ионов водорода от содержания кремния. Из анализа этих данных следует, что предельная концентрация Н-доноров не зависит от энергии ионов  $\text{H}^+$ , но существенно уменьшается с ростом концентрации примеси кремния. Последнее обстоятельство было объяснено нами ранее [3] с учетом захвата внедренного водорода атомами кремния.

Таким образом, несмотря на некоторую схожесть свойств Н-доноров, формирующихся при различных энергиях имплантирующихся ионов, они обладают существенными различиями. Этот факт позволяет предположить, что в отличие от ранее

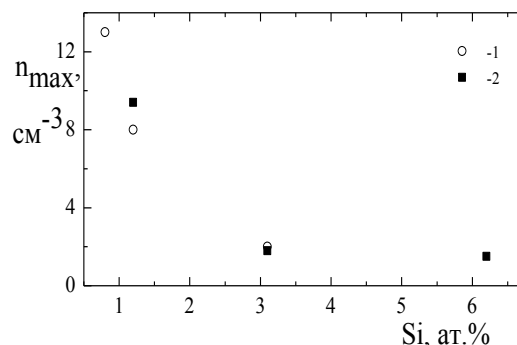


Рис. 4. Зависимость предельной концентрации Н-доноров в кристаллах  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ , имплантированных ионами  $\text{H}^+$  с энергией 330 (1) и 200 (2) кэВ дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , от содержания кремния.

обнаруженных нами [3, 4] в твердых растворах  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  Н-доноров при меньшей ионов водорода мы наблюдаем новый тип водородосодержащих доноров. Следует отметить, что подобный эффект наблюдался в кремнии [2], когда свойства Н-доноров вблизи поверхности существенно отличаются от таковых образующихся в более глубоких слоях. На наш взгляд, по аналогии с кремнием, это связано с влиянием сопутствующих имплантации радиационных дефектов на формирование Н-доноров [1, 2]. Действительно, исследования изменения периода решетки при имплантации [5] и радиационно-стимулированного перераспределения примесей [1, 6] вблизи поверхности показали, что поверхность является стоком для первичных компонентов и комплексов радиационных дефектов. Поэтому радиационные дефекты не оказывают существенного влияния на формирование Н-доноров вблизи поверхности.

### Список литературы

1. Козловский В.В., Козлов В.А., Ломасов В.Н. // ФТП. – 2000. Т. 34. № 2. С. 129.
2. Tokuda Y., Ito A., Ohshima M. // Semicond. Sci. Technol. 1998. V. 13. P. 194.
3. Markevich V.P., Dobaczewski J., Nielsen L., Bonde K., Litvinov V.V., Petukh A.N., Pokotilo Yu.M., Abrosimov N.V., Peaker A.R. // Shin Solid Films. 2008. V.517. P.419.
4. Pokotilo Ю.М., Петух А.Н., Литвинов В.В., Маркевич В.П., Пекар А.Р., Абросимов Н.В. // Письма ЖТФ. 2008. Т. 34. № 1. С.1.
5. Челябинский А.Р., Вариченко В.С., Явид В.Ю., Буренков В.А. // Поверхность. 2004. № 2.- С. 110.
6. Александров О.В., Козловский В.В. // ФТП. 2008. Т. 42. № 3. С. 262.

### THE INFLUENCE OF THE SURFACE ON THE FORMATION OF HYDROGEN-RELATED DONORS IN SOLID SOLUTIONS OF GERMANIUM-SILICON

Yu.M. Pokotilo<sup>1)</sup>, A.N. Petukh<sup>1)</sup>, V.V. Litvinov<sup>1)</sup>, V.P. Markevich<sup>2, 4)</sup>, A.R. Peaker<sup>4)</sup>, N.V. Abrosimov<sup>5)</sup>, A.S. Kamyshan<sup>3)</sup>, A.V. Giro<sup>1)</sup>, K.A. Solyanikova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>BSU, physical department, Nezavisimosty av., 4, 220050 Minsk, Belarus, pokotilo@bsu.by

<sup>2)</sup>SSPA "Scientific and Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus", Minsk, Belarus

<sup>3)</sup>The institute of the Applied Physics Problems, Minsk, Belarus

<sup>4)</sup>University of Manchester, Manchester M60 1QD, UK

<sup>5)</sup>Institute of Crystal Growth, Berlin, Germany

Hydrogen related donors of different types were formed in the  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  crystals after hydrogen ion implantation with energy of 330 and 200 keV and following treatment (3500 C, 20 min). The properties of these types of donors were investigated. It was found that the observed differences have been related to the influence of surface on the formation of donors due to significant influence of the surface on the migration of radiation-induced defects, that accompany implantation.