

07

## Формирование профилей распределения мелких доноров при протонном облучении кремния

© И.В. Грехов<sup>1</sup>, Л.С. Костина<sup>1</sup>, В.Н. Ломасов<sup>2</sup>,  
Ш.А. Юсупова<sup>1</sup>, Е.И. Белякова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

E-mail: konst@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 22 мая 2014 г.

Приведены результаты исследования процесса образования мелких водородсодержащих доноров (Hydrogen-related Shallow Thermal Donors, STD(H)) в кремнии под действием протонного облучения с последующим отжигом в интервале температур 300–500°С. Исследовано влияние режимов постимплантационного отжига на распределение концентрации мелких доноров при разных величинах энергии и дозы облучения протонами. Показано, что форма концентрационных профилей меняется существенным образом с изменением температуры и времени отжига при заданной концентрации вводимых радиационных дефектов (дозе облучения), равно как с изменением энергии и дозы при заданной температуре отжига. Показано также, что процесс образования водородсодержащих мелких доноров сопровождается образованием в кремнии *n*-типа индуцированных (H-induced) скрытых *n'*-слоев, формирование которых вблизи *pn*-перехода в высокоомной *n*-базе диодных структур позволяет контролируемо управлять напряжением пробоя высоковольтных *pn*-переходов. Это, в общем случае, создает возможность улучшать характеристики кремниевых силовых приборов различного назначения.

Облучение кремния быстрыми электронами, протонами, нейтронами и  $\gamma$ -квантами приводит к образованию в кристалле различных типов структурных (радиационных) дефектов, концентрация которых, в общем случае, зависит от ряда параметров: типа бомбардирующих частиц, их энергии и дозы, температуры облучения, характеристик исходного кремния и термообработок, которые проводятся после облучения [1,2]. Различные типы радиационных дефектов характеризуются различной энергией в запрещенной зоне, термической стабильностью и способ-

ностью влияния на электрические и оптические свойства полупроводникового материала.

Известно, что при облучении кремния протонами взаимодействие имплантируемых ионов водорода с радиационными дефектами во время постимплантационного отжига приводит к образованию новых электрически активных дефектов — водородсодержащих доноров [1–6], структура и параметры которых зависят от дозы облучения, температуры отжига и исходных свойств кристалла [1,2,7]. Разным температурам отжига соответствуют разные энергетические уровни водородсодержащих доноров. При достаточно низких температурах ( $\sim 300^\circ\text{C}$ ) и малых концентрациях ионов водорода обычно формируются более глубокие доноры с энергией  $E \geq E_c - 100 \text{ meV}$  ( $E_c$  — дно зоны проводимости), а при более высоких температурах и высоких концентрациях ионов водорода — мелкие водородсодержащие доноры [1,8,9]. Отжиг облученных протонами образцов в интервале температур  $350\text{--}500^\circ\text{C}$  может привести к образованию так называемых Thermal Double Donors (TDD) [2,4,10] с  $E_c$  — (61–135) meV и дефектных комплексов Hydrogen-related Shallow Thermal Donors STD(H) с  $E_c$  — (34–53) meV [2,10].

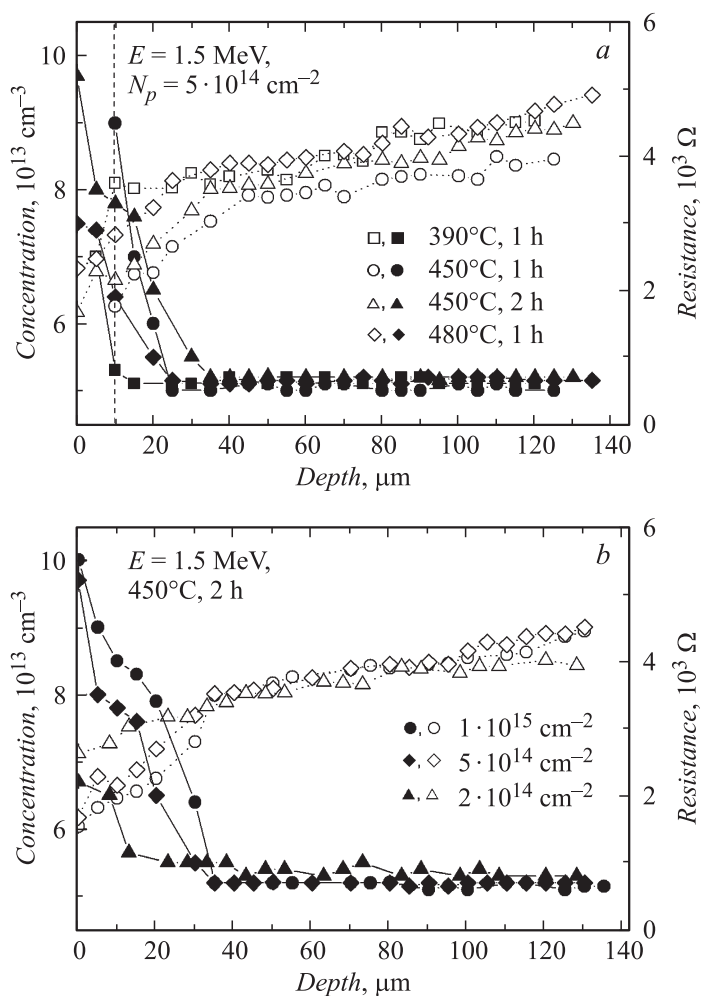
Водородсодержащие радиационные дефекты с глубокими уровнями обладают, как правило, невысокой термостабильностью и отжигаются в диапазоне температур  $100 \div 300^\circ\text{C}$  [1]. STD(H) являются стабильными донорами с энергетическими уровнями, близкими к зоне проводимости кремния [3,10]. Их природа, структура и свойства к настоящему времени изучены недостаточно [1,2,7]. Однако хорошо известно, что образование мелких водородсодержащих доноров в кремнии  $n$ -типа может привести к формированию внутренних скрытых H-induced (индуцированных)  $n'$ -слоев [5,11]. Этот эффект может быть использован при разработке высоковольтных силовых приборов различного назначения [12,13].

Целью данной работы является исследование особенностей процесса формирования и свойств индуцированных  $n'$ -слоев в зависимости от режимов облучения (энергии и дозы) и последующего отжига (температуры и времени), а также влияния условий формирования на величину напряжения пробоя кремниевых структур с  $pn$ -переходами.

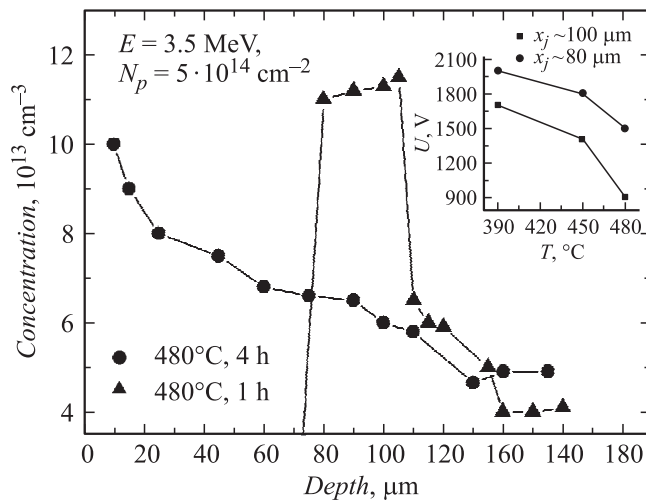
Облучению протонами подвергались пластины кремния, полученного безтигельной зонной плавкой,  $n$ -типа проводимости диаметром 10 mm с удельным объемным сопротивлением  $\rho_v \sim 100 \Omega \cdot \text{cm}$  и ориентацией  $\langle 111 \rangle$ . Облучение осуществлялось на циклотроне МГЦ-20

в ФГБОУ ВПО „СПбГПУ“ с одной из сторон каждого образца с последующим температурным форвакуумным отжигом ( $\sim 10^{-2}$  mmHg). Профили распределения концентрации водородсодержащих доноров после облучения и отжига рассчитывались на основании данных, полученных при послойном измерении распределенного сопротивления (spreading resistance, SR) вглубь от облучаемой поверхности образцов [14].

На рис. 1, *a* приведены распределения SR и концентрации электрически активных доноров по глубине образца при имплантации протонов с энергией 1.5 MeV и дозой  $N_p \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  для разных режимов постимплантационного отжига. При данных величинах энергии и дозы в прилегающей к облученной поверхности области непосредственно после облучения регистрировалось наличие компенсированной очень высокоомной ( $SR \rightarrow \infty$ ) области шириной  $d \sim 40 \mu\text{m}$ . Последующий отжиг в указанных на рис 1, *a* режимах приводил полностью или частично к формированию в этой области H-induced  $n'$ -слоя. Как уже упоминалось выше, появление водородсодержащих мелких доноров непосредственно связано с взаимодействием имплантированных ионов водорода с радиационными дефектами, при условии, что плотность радиационных дефектов в кремнии достаточно высока [2,3]. Нарушения решетки в процессе имплантации начинаются от поверхности, по мере продвижения протонов вглубь образца плотность дефектов увеличивается, так как ионы замедляются и вероятность их столкновений с решеткой растет. При достижении пика Брэгга плотность дефектов максимальна, а затем резко уменьшается, т.к. ионы останавливаются. Вследствие достаточно высокой подвижности легких ионов водорода при температурах отжига формирование доноров эффективно не только в наиболее нарушенной облучением области вблизи максимальной глубины проникновения ионов водорода, но и на хвосте дефектов — между их пиком и поверхностью образца. Распределение водородсодержащих доноров по глубине зависит как от времени, так и от температуры отжига. Для того чтобы получить H-induced  $n'$ -слой по всей облученной области, нужно при заданной дозе облучения подобрать такой режим отжига, чтобы обеспечить имплантированным протонам диффузию через всю эту область к поверхности. Из рис. 1, *a* следует, что подобная ситуация имеет место в режимах отжига  $T = 450^\circ\text{C}$ ,  $t = 2 \text{ h}$  и  $T = 480^\circ\text{C}$ ,  $t = 1 \text{ h}$ . В то же время при снижении температуры или времени отжига (при  $T = 390^\circ\text{C}$ ,  $t = 1 \text{ h}$  и  $T = 450^\circ\text{C}$ ,  $t = 1 \text{ h}$ ) внутри образца между его поверхностью и границей H-induced



**Рис. 1.** Профили распределения сопротивления (spreading resistance, SR) и концентрации мелких доноров в кремнии, облученном протонами с энергией  $E = 1.5 \text{ MeV}$ : *a* — при разных режимах постимплантационного отжига. Доза  $N_p = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ; *b* — при разных дозах облучения. Постимплантационный отжиг  $450^\circ\text{C}, 2 \text{ h}$ . — — концентрация, ··· — сопротивление.



**Рис. 2.** Профили распределения концентрации мелких доноров в кремнии, облученном протонами с энергией  $E = 3.5 \text{ MeV}$  и дозой  $N_p = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . Режимы постимплантационного отжига:  $480^{\circ}\text{C}$ , 1 h ( $\blacktriangle$ ) и  $480^{\circ}\text{C}$ , 4 h ( $\bullet$ ). На вставке: зависимость напряжения пробоя диодной структуры от температуры постимплантационного отжига. Время отжига 1 h. Режим облучения:  $E = 3.5 \text{ MeV}$ ,  $N_p = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .

$n'$ -слоя остается высокоомная область с компенсированным во время облучения исходным легированием. Граница между этой высокоомной областью и H-induced  $n'$ -слоем показана на рис 1, *a* пунктиром, ширина высокоомной области  $\sim 10 \mu\text{m}$ .

Снижение дозы при имплантации протонов сопровождается снижением плотности радиационных дефектов и, соответственно, концентрации мелких доноров  $N_d$  в H-induced  $n'$ -слое, что отчетливо видно из рис. 1, *b*. При снижении дозы облучения от  $N_p = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  до  $N_p = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и постимплантационном отжиге в одном и том же режиме ( $T = 450^{\circ}\text{C}$  в течение 2 h) концентрация  $N_d$  у облучаемой поверхности образцов снизилась в полтора раза.

Для исследования возможности формирования H-induced  $n'$ -слоев на глубине более  $100 \mu\text{m}$  от облучаемой поверхности часть образцов облучалась протонами с большей энергией. На рис. 2 представлен профиль

распределения концентрации мелких доноров при облучении кремниевых пластин с энергией 3.5 MeV и дозой  $N_p = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  в режимах отжига 480°C, 1 h и 480°C, 4 h. Хорошо видно, что при отжиге 480°C 1 h внутри образца в интервале глубин  $80 \div 110 \mu\text{m}$  формируется достаточно однородный  $n'$ -слой с концентрацией  $N_d \sim (1.2-1.75) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , практически на порядок превышающей концентрацию в исходном материале ( $N_d \sim 3.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ). Увеличение времени отжига до 4 h приводит к расширению  $n'$ -слоя в сторону облучаемой поверхности вследствие увеличения времени диффузии имплантированных протонов через всю область радиационных дефектов к этой поверхности.

На основе анализа и сравнения построенных зависимостей были выбраны режимы облучения диодных структур для исследования влияния встроенных  $n'$ -слоев на величину напряжения пробоя. Диоды из того же  $n$ -кремния ( $\rho_v \sim 100 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $\langle 111 \rangle$ ) и того же диаметра (10 mm), что и исследуемые пластины, изготавливались по стандартной диффузионной технологии с глубиной  $pn$ -перехода  $x_j \sim 80 \mu\text{m}$  и  $x_j \sim 100 \mu\text{m}$  и толщиной высокоомной  $n$ -базы  $\sim 450 \mu\text{m}$ . Контакты формировались химическим никелированием, по краевому контуру снималась обратная фаска. Известно, что именно область фаски и краевая область, граничащая с фаской, определяют, как правило, нестабильность прибора по напряжению пробоя и лавинному току вследствие неоднородности распределения поля по краевому контуру. Создание внутри силового прибора (диода, транзистора, динистора) зоны с пониженным в сравнении с напряжением пробоя по фаске пороговым напряжением позволяет избежать этого пробоя [12]. В наших экспериментах подобная зона формировалась протонным облучением диодных структур со стороны  $p$ -эмиттера по всей площади, за исключением кольца по периферии шириной  $\sim 500 \mu\text{m}$ , приходящегося на область фаски.

Как и ожидалось, увеличение температуры отжига приводит к заметному снижению напряжения пробоя (см. вставку к рис. 2), что, в свою очередь, косвенно подтверждает факт формирования H-induced  $n'$ -области в высокоомной  $n$ -базе диодной структуры.

Таким образом, использование протонного облучения для формирования в кремнии мелких водородсодержащих доноров позволяет создавать скрытые  $n'$ -слои, параметры которых определяются соответствующим выбором режимов облучения и последующего температурного отжига. Интегрирование таких слоев в структуру силовых полупроводниковых приборов может быть использовано для стабилизации

их порогового напряжения и, тем самым, существенного улучшения их выходных характеристик.

## Список литературы

- [1] *Козловский В.В.* Модифицирование полупроводников пучками протонов. СПб.: Наука, 2003. 268 с.
- [2] *Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R.* Semiconductor Power Devices. Physics, Characteristics, Reliability. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 536 p.
- [3] *Laven J.G., Schulze H.-J., Niedernostheide E.-J.* et al. // *Phys. Status Solidi. C.* 2011. V. 8. N 3. P. 697–700.
- [4] *Мукашев Б.Н., Абдулин Х.А., Горелкинский Ю.В.* // *УФН.* 2000. Т. 170. № 2. С. 143–155.
- [5] *Neustoev E.P., Antonova I.V., Popov V.P.* et al. // *Physica. B.* 1999. V. 270. N 1–2. P. 1–5.
- [6] *Tokmoldin S.Z., Issova A.T., Abdulin K.A., Mukashev B.N.* // *Physica. B.* 2006. V. 376–377. P. 185–188.
- [7] *Покотило Ю.М., Петух А.Н., Литвинов В.В.* // *Письма в ЖТФ.* 2004. Т. 30. В. 22. С. 70–74.
- [8] *Hartung J., Weber J.* // *Phys. Rev. B.* 1993. V. 48(19). P. 14161–14166.
- [9] *Markevich V.R., Mchlidze T., Suezava M., Murin L.I.* // *Phys Status Solidi. B.* 1998. V. 210(2). P. 545–549.
- [10] *Siemieniec R., Niedernostheide E.-J., Schulze H.-J.* et al. // *Journal of Electrochem. Soc.* 2006. V. 153(2). P. G108–G118.
- [11] *Kauppinen H., Corbel C., Skog K., Saarinen K.* et al. // *Phys. Rev. B.* 1997. V. 55. N 15. P. 9598–9608.
- [12] *Губарев В., Семенов А., Столбунов В., Сурма А.* // *Силовая электроника.* 2011. Т. 5. N 33. С. 108–111.
- [13] *Surma A.M.* et al. // *PCIM Europe 2012, 8–10 May 2012, Nuremberg, Germany, 2012.* P. 853–860.
- [14] *Реньян В.Р.* Технология полупроводникового кремния / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1969. 336 с.