

ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ n^+ - СЛОЕВ В Si и SiGe, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ

Ю.М. Покотило¹⁾, А.Н. Петух¹⁾, А.В. Гиро¹⁾, А.С. Камышан²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь, pokotilo@bsu.by

²⁾НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220108, Минск, Беларусь

При имплантации протонов с энергией 300 кэВ и последующей термообработке 350 °С в течение 20 мин в кристаллах Si и SiGe формируются низкоомные n^+ -слои. Форма профилей описывается гауссовым распределением с полушириной $\Delta R_p=0.49$ и 1.38 мкм и концентрацией Н-доноров в максимуме $N_{\max}=7 \cdot 10^{15}$ и $4 \cdot 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³ соответственно для образцов Si и SiGe. Обсуждаются причины снижения эффективности образования Н-доноров и уширения слоя в кристаллах SiGe.

Введение

Облучение пучками протонов является перспективным физико-технологическим методом модификации электрофизических параметров кристаллов кремния [1]. Одним из наиболее интересных свойств внедренного водорода является то, что при взаимодействии его с радиационными дефектами в процессе термообработки в тонком слое, локализованном в области проекции длины пробега ионов, формируются мелкие водородосодержащий доноры (Н-доноры) с высокой (до 10^{17} см⁻³) концентрацией [2]. В настоящей работе исследуются условия формирования и свойства таких слоев в кристаллах Si и твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=5,5\%$).

Методика эксперимента

Исследования проводились на диодных кремниевых (Mo-Si) и твердых растворов кремний-германий (Au-SiGe) структурах Шоттки (удельное сопротивление базы, легированной фосфором, в обоих типах кристаллов ~ 1 Ом·см), облученных через металлический контакт низкоэнергетическими протонами (доза $D = 10^{15}$ см⁻², энергия – 300 кэВ). Для сравнения использовалось также облучение гамма-квантами ⁶⁰Со и электронами с энергией 6 МэВ. Измерения электронных профилей осуществлялось стандартным методом C-V характеристик (рабочая частота – 1 МГц) при комнатной температуре. Параметры дефектов с глубокими уровнями определялись из измерений спектров DLTS. Образцы отжигались в кварцевой трубке на воздухе.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Из анализа профилей распределения Н-доноров, представленных на рис.1, следует, что при одинаковой дозе и энергии протонов в образцах различных типов максимумы распределений смещены, и для образца SiGe профиль более размытый.

Смещение максимумов распределения Н-доноров связаны, очевидно, с неодинаковыми величинами длин проецированного пробега протонов, имплантированных в базу диодов через различного типа и толщины металлические кон-

такты. Сплошными линиями на рис. 1 представлена аппроксимация полученных данных нормальным (гауссовым) распределением при значениях полуширины (разброса пробегов) $\Delta R_p=0.49$ и 1.38 мкм и концентрации Н-доноров в максимуме $N_{\max}=7 \cdot 10^{15}$ и $4 \cdot 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³ соответственно для образцов Si и SiGe. С учетом соотношения $N_{\max}=\Phi/[(2\pi)^{1/2}\Delta R_p]$, где Φ доза облучения, видно, что эффективность образования Н-доноров в образцах SiGe в три раза ниже чем в чистом кремнии. Причиной уширения профиля распределения Н-доноров в SiGe может быть дополнительное рассеяние на атомах германия так как относительная ширина профиля зависит от отношения массы иона к массе атома мишени. Легкие ионы дают более широкий профиль при-меси.

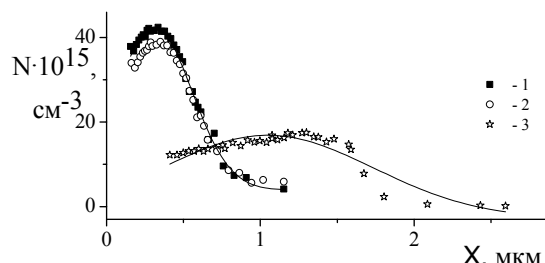


Рис. 1. Профили распределения водородосодержащих доноров в кристаллах SiGe (1) и Si (2, 3). Тип облучения: 1, 2-протоны. 3-протоны + электроны. Термообработка: 1-3 - 350 °С 20 мин. Доза облучения протоны – $1 \cdot 10^{15}$ см⁻², электроны – $1 \cdot 10^{15}$ см⁻².

Для выяснения причин снижения эффективности образования Н-доноров в SiGe нужно исследовать образование сопутствующих имплантации радиационных дефектов (РД), которые, согласно [1], могут влиять на процесс формирования доноров.

На рис. 2 представлены спектры DLTS для образцов Si и SiGe, облученных протонами, а также дополнительно облученных электронами и гамма-квантами. Параметры центров, найденные из зависимостей Аррениуса при записи спектров с различными длительностями окон регистрации, приведены в таблице. Из анализа этих данных и рис. 2 следует, что наблюдаются в основном три

типа радиационных дефектов – А-, V-O-H- и Е-центры. Обращает на себя внимание очень низ-

кая концентрация дефектов в Si, облученном протонами (на рис. значения увеличены в 4 раза).

Таблица. Параметры основных уровней радиационных дефектов в кремнии, облученном ионами H^+ , γ -квантами и электронами

Номер пика	Энергия уровня, эВ	Сечение захвата, 10^{-15} см ²	Температура отжига, °С	Идентификация
1	$E_c-(0,165\pm 0,05)$	5 ± 2	350	$(V-O)^{0/-}$, А-центр
2	$E_c-0,31$	1,6	250	V-O-H- центр
3	$E_c-0,5$	4,4	250	$(P-V)^{-0}$, Е-центр
4	$E_c-(0,42\pm 0,01)$	$1\pm 0,3$	150	$(P-V)^{-0}$, Е-центр

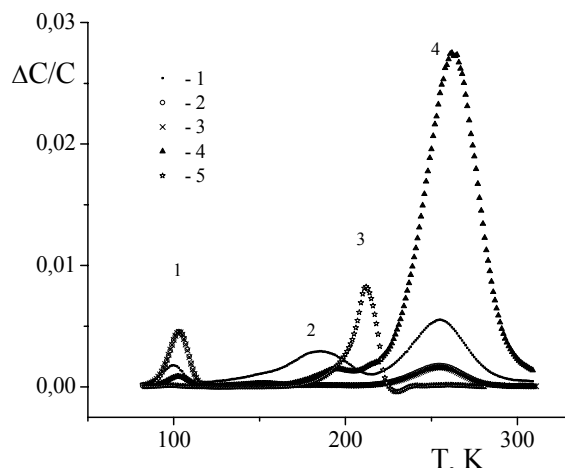


Рис. 2. Спектры DLTS для Si.(1-4) и SiGe (5). Вид облучения: 1 – H^+ , 2 – γ , 3 – $H^+\gamma$, 4 – H^+e , 5 – H^+ ,

Это связано, на наш взгляд, с пассивацией РД атомами водорода, что подтверждается наличием V-O-H-центра (А-центр + водород) в этом случае. В образцах SiGe концентрация дефектов выше и отсутствует V-O-H-центр. С целью установления корреляции между концентрациями РД и Н-доноров было проведено дополнительное облучение образцов, имплантированных протонами, гамма-квантами и электронами. В результате этого облучения образовались РД в концентрации значительно более высокой, чем при протонной имплантации (см. рис. 2). Однако последующая термообработка таких образцов показала, что РД не влияют на концентрацию и температуру образования Н-доноров (см. рис. 1).

Обращает на себя внимание смещение в область более низких температур (см. рис. 2) пика 3 по сравнению с 4. Это связано с влиянием полей

упругих напряжений, возникающих в решетке кремния за счет присутствия атомов германия, на энергию ионизации Е-центра [3, 4]. Следовательно, примесь германия существенно влияет на свойства радиационных дефектов и, в том числе, может служить ловушкой для внедренных атомов водорода. Действительно, отсутствие V-O-H-центров в SiGe подтверждает высокую эффективность захвата атомов водорода атомами германия по сравнению с А-центрами. Таким образом, снижение эффективности формирования Н-доноров в SiGe обусловлено конкурирующим процессом захвата водорода атомами германия с образованием электрически неактивных комплексов.

Выводы

Показано, что в кристаллах Si и SiGe, имплантированных протонами, при последующей термообработке за счет образования водородосодержащих доноров формируются низкоомные p^+ -слои. Наблюдаемое снижение эффективности образования Н-доноров, уширение толщины слоя и отсутствие V-O-H-центра в кристаллах SiGe, обусловлено присутствием атомов германия, приводящем к возникновению полей упругих напряжений в решетке кремния.

Список литературы

1. Абдулин Х.А., Горелкинский Ю.В., Мукашев Б.Н., Токмолдин С.Ж. // ФТП. – 2002. – Т. 36. – № 3. – С. 257.
2. Покотило Ю.М. и др. // Неорганические материалы – 2009. – Т. 45 – №11 – С.1285.
3. Monakhov E.V., Kuznetsov A Yu., Svensson B.G. // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol. 87. – P. 4629.
4. Monakhov E.V., Kuznetsov A Yu., Svensson B.G. // Phys. Rev. B. – 2001. – Vol. 63. – P. 245322.

FORMATION OF SUBMICRON n^+ -LAYERS IN ION IMPLANTED Si AND SiGe

Yu.M. Pokotilo¹⁾, A.N. Petukh¹⁾, A.V. Giro¹⁾, A.S.Kamyshan²⁾

¹⁾BSU, Nezavisimosty ave., 4, 220030 Minsk, Belarus pokotilo@bsu.by

²⁾The institute of the Applied Physics Problems, Minsk, Belarus

Low-resistance n^+ -layers are formed in Si and SiGe crystals after 300 keV proton implantation and subsequent heat treatment (350° C, 20 min). The form of profiles are described by Gaussian with half-width $\Delta R_p=0.49$ and $1.38 \mu m$ and maximum H-donors concentration $N_{max}=7\cdot 10^{15}$ and $4.2\cdot 10^{16} cm^{-3}$ for Si and SiGe samples respectively. The reasons of decrease in efficiency of H-donors formation and layer broadening in SiGe crystals are discussed.