

Кинетика формирования различных типов водородсодержащих доноров в кремнии, имплантированном протонами

© Ю.М. Покотило[¶], А.Н. Петух, О.А. Дзичковский

Белорусский государственный университет,
220050 Минск, Белоруссия

(Получена 13 ноября 2007 г. Принята к печати 4 декабря 2007 г.)

Методом $C-V$ -характеристик исследована кинетика накопления двойного и мелкого водородсодержащих доноров в эпитаксиальном кремнии, имплантированном протонами. Показано, что кинетика описывается реакциями 1-го порядка. Определены энергии активации $\Delta E_1 = 2.3$ эВ, $\Delta E_2 = 1.4$ эВ и предэкспоненциальные факторы $\tau_{01} = 9.1 \cdot 10^{-17}$ с, $\tau_{02} = 4.2 \cdot 10^{-9}$ с для обоих типов доноров соответственно. Показано, что бистабильность электрических свойств кремния обусловлена двойным водородсодержащим донором.

PACS: 81.05.Cy, 81.40.Wx, 61.72.Ss, 61.80.Fe

1. Введение

По крайней мере два различных типа водородсодержащих доноров (hydrogen shallow donors — HSD и hydrogen double donors — HDD) формируются в кремнии, имплантированном протонами, при последующей термообработке 300–500°C. Эти доноры наблюдаются как в зонном [1,2], так и эпитаксиальном кремнии [3], а их свойства близки к свойствам кислородных термодоноров. Так, часть водородсодержащих доноров проявляет ярко выраженный бистабильный характер поведения. Согласно [4], этот эффект обусловлен HDD и связан с отрицательной эффективной корреляционной энергией ($U < 0$) двойного донора. По мнению авторов [5,6], бистабильность связана с конфигурационной перестройкой однозарядных мелких доноров (HSD), формирующихся в виде нанокластеров со свойствами квантовых проволок. В настоящей работе из исследований кинетики формирования HDD и HSD получены дополнительные данные, подтверждающие модель бистабильности [4].

2. Методика эксперимента

Исследования проводились на диодах Шоттки (Mo–Si), где базовым слоем являлся эпитаксиальный кремний, легированный фосфором до удельного сопротивления $1.2 \Omega \cdot \text{см}$ и толщиной 5 мкм. Имплантация протонами с энергией 300 кэВ и дозой 10^{15} см^{-2} проводилась с планарной стороны через многослойный (Al–Ni–Mo) металлический контакт. Измерение профилей распределения концентрации электронов проводимости осуществлялось стандартным $C-V$ -методом на частоте 1 МГц при комнатной температуре. Образцы отжигались в кварцевой трубе на воздухе.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены профили распределения электронов проводимости в образце, имплантированном про-

тонами дозой 10^{15} см^{-2} при различных временах изотермической ($T = 275^\circ\text{C}$) обработки. На каждой стадии проводилась низкотемпературная обработка образцов при 100°C длительностью 7 ч. Видно, что в области 0.2–0.7 мкм от границы раздела металл–полупроводник формируется область избыточной концентрации электронов. Ранее [3] нами было показано, что максимум избыточной концентрации, локализованный при 0.3–0.4 мкм совпадает (с учетом потерь энергии в многослойном металлическом контакте) с величиной проецированного пробега протонов с энергией 300 кэВ и обусловлен формированием мелких водородсодержащих доноров (Н-доноров). Термообработка при 100°C вызывает обратимое уменьшение концентрации электронов, так как последующая кратковременная закалка от 200°C в воду или инжекция неосновных носителей заряда

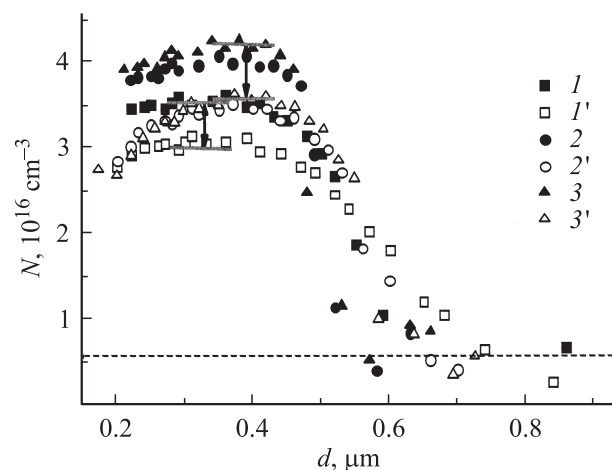


Рис. 1. Профили распределения электронов проводимости в имплантированном протонами образце при различных временах последующей изотермической ($T = 275^\circ\text{C}$) обработки в течение $t_{\text{анн}}$, ч: 1 — 8, 2 — 22, 3 — 29.5. Профили 1', 2' и 3' измерены на указанных этапах термообработки после выдержки при 100°C в течение 7 ч. Вертикальные стрелки соответствуют концентрации бистабильных доноров, а штриховой прямой указан уровень легирования фосфором.

[¶] E-mail: pokotilo@bsu.by

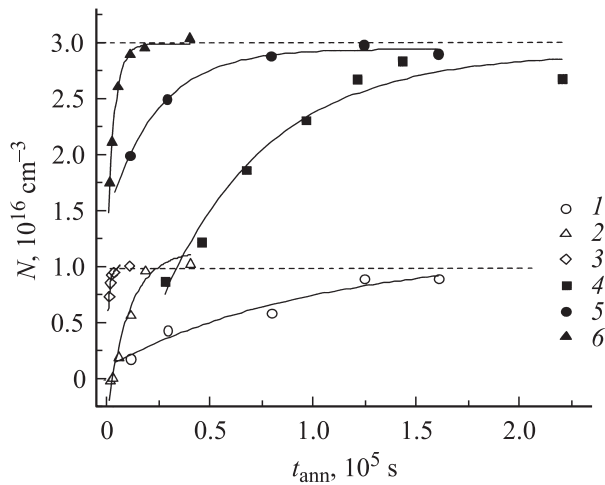


Рис. 2. Зависимости концентрации бистабильных (1–3) и неперестраивающихся (4–6) водородсодержащих доноров от времени термообработки t_{ann} при различных температурах, T , °C: 1 — 250, 2 — 300, 3 — 350, 4 — 250, 5 — 275, 6 — 300.

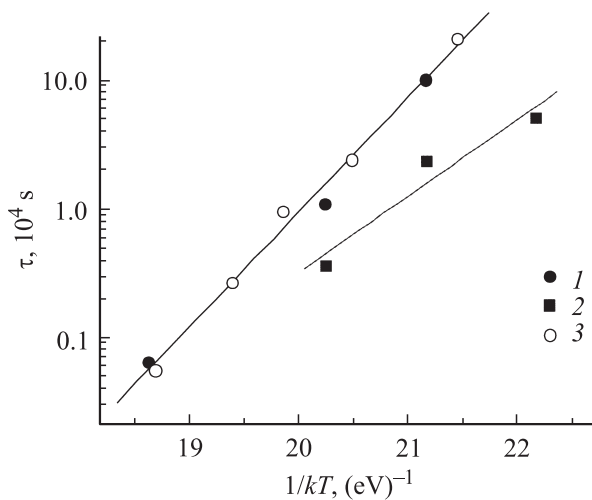


Рис. 3. Температурные зависимости постоянной времени накопления τ для бистабильных (1) и неперестраивающихся (2) водородсодержащих доноров. Символы 3 — данные [7] для полосы спектра электронного парамагнитного резонанса Si-AA1, обусловленной двухзарядным Н-донором HDD в кремнии.

приводит к восстановлению избыточной концентрации электронов [4]. Таким образом, приведенные на рис. 1 результаты измерения профилей распределения концентрации электронов позволяют выделить долю бистабильных Н-доноров из их общей концентрации и тем самым исследовать кинетику накопления обоих типов Н-доноров.

На рис. 2 представлена кинетика накопления бистабильных (1–3) и неперестраивающихся (4–6) Н-доноров в диапазоне температур 250–350°С. Видно, что для каждого типа Н-доноров существует предельная концентрация, а кинетика накопления описывается ре-

акций 1-го порядка (сплошные линии) в соответствии с выражением

$$N = N_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right],$$

где

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right),$$

τ — постоянная времени накопления, N_0 — предельная концентрация Н-доноров, ΔE — энергия активации, τ_0 — предэкспоненциальный фактор.

Найденные из данных рис. 2 значения $\tau(T)$ для бистабильных (1), неперестраивающихся (2) Н-доноров представлены в виде зависимостей Аррениуса на рис. 3. Там же приведены (символами 3) результаты из работы [7], полученные при изучении поведения полосы Si-AA1 в спектрах электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), обусловленной двойным Н-донором в положительном зарядовом состоянии HDD^+ . Результаты линейной аппроксимации зависимостей Аррениуса соответственно для бистабильных и неперестраивающихся Н-доноров приведены на рис. 3 сплошными линиями при значениях параметров:

$$\Delta E_1 = 2.3 \text{ эВ}, \quad \tau_{01} = 9 \cdot 10^{-17} \text{ с},$$

$$N_{01} = (1 \pm 0.1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

— для данных 1;

$$\Delta E_2 = 1.4 \text{ эВ}, \quad \tau_{02} = 4.2 \cdot 10^{-9} \text{ с},$$

$$N_{02} = (3 \pm 0.1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

— для данных 2. Значения параметров ΔE_1 и τ_{01} для наблюдаемых нами бистабильных Н-доноров практически совпадают с таковыми для HDD^+ из работы [7]. Это подтверждает модель бистабильности [4], основанную на предположении об отрицательной эффективной корреляционной энергии ($U < 0$) двухзарядного донора. В этом случае трансформация между двумя конфигурациями двойного Н-донора ($D_B^{++} \leftrightarrow D_A^0$) происходит при изменении положения уровня Ферми, когда при $T > 200^\circ\text{C}$ Н-донор находится в метастабильном состоянии D_B^{++} , а при $T < 100^\circ\text{C}$ в равновесной нейтральной конфигурации D_A^0 . Время релаксации из В- в А-конфигурацию при комнатной температуре составляет порядка 1 года [4].

Показано, что кинетика накопления Н-доноров в кремнии описывается реакциями 1-го порядка. Определены энергия активации и предэкспоненциальный фактор в зависимости $\tau(T)$ для бистабильных и неперестраивающихся Н-доноров в Si. Из сравнения с литературными данными [7], полученными из спектров ЭПР, показано, что бистабильное поведение проявляет двухзарядный Н-донор (HDD).

Список литературы

- [1] Б.Н. Мукашев, Х.А. Абдуллин, Ю.В. Горелкинский. УФН, **170** (2), 143 (2000).
- [2] В.В. Козловский. *Модифицирование полупроводников пучками протонов* (СПб., Наука, 2003).
- [3] Ю.М. Покотило, А.Н. Петух, В.В. Литвинов. Письма ЖТФ, **30** (22), 70 (2004).
- [4] Ю.М. Покотило, А.Н. Петух, В.В. Литвинов, В.Г. Цвырко. ФТП, **39** (7), 802 (2005).
- [5] Kh.A. Abdullin, Yu.V. Gorelkinskii, B.N. Mukashev, A.S. Serikanov. Phys. B: Condens. Matter, **340-342**, 692 (2003).
- [6] Kh.A. Abdullin, Yu.V. Gorelkinskii, S.M. Kikkarin, B.N. Mukashev, A.S. Serikanov, S.Zh. Tokmoldin. Matter. Sci. Semicond., **7**, 447 (2004).
- [7] S.Zh. Tokmoldin, B.N. Mukashev, Kh.A. Abdullin, Yu.V. Gorelkinskii, B. Pajot. Mater. Sci. Engin., **B71**, 263 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

Formation of the hydrogen-related donors of the difference type in silicon crystals implanted with protons

Yu.M. Pokotilo, A.N. Petukh, O.A. Dzichkovski

Belorussian State University,
220050 Minsk, Belarus

Abstract Kinetic of the double and shallow hydrogen-related donor accumulation in epitaxial silicon, implanted with protons, has been investigated by $C-V$ -method. It was shown, that kinetic is described by the first order reactions. Activation energies $\Delta E_1 = 2.3$ eV, $\Delta E_2 = 1.4$ eV and pre-exponential factors $\tau_{01} = 9.1 \cdot 10^{-17}$ s, $\tau_{02} = 4.2 \cdot 10^{-9}$ s for both donor types were defined consequently. It was shown, that the bistability of electrical properties of the silicon was caused by the double hydrogen-related donor.