

## КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ДОНОРОВ В КРЕМНИИ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ПРОТОНАМИ

Ю.М. Покотило<sup>1)</sup>, А.Н. Петух<sup>1)</sup>, О.А. Дзичковский<sup>1)</sup>, А.С. Камышан<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белгосуниверситет, физический факультет, пр. Независимости 4; 220050 Минск, Беларусь

<sup>2)</sup> НИИ ПФП, им. А.Н. Севченко, лаб. Элионики, Минск, Беларусь

В работе рассматриваются два типа водородсодержащих доноров в кремнии, возникающих после имплантации его низкоэнергетическими протонами (300 кэВ) с последующим отжигом ( $T=400$  °С). Часть доноров, проявляющая бистабильный характер поведения, по результатам вычисления параметров накопления и сопоставления с данными других работ ассоциируется с HDD (hydrogen double donors). Измерения проводились на диодных структурах Шоттки (сопротивление базы – 1 Ом·см), облученных через металлический контакт. Электронные профили получены стандартным методом C-V характеристик (рабочая частота 1 МГц), измерения проведены при комнатной температуре. Отжиг образцов производился в кварцевой трубке на воздухе.

### Введение

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

### Методика эксперимента

Исследования проводились на кремниевых диодных структурах Шоттки (удельное сопротивление базы ~1 Ом·см), облученных через металлический контакт низкоэнергетическими протонами (доза  $D = 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, энергия – 300 кэВ). Измерения электронных профилей осуществлялось стандартным методом C-V характеристик (рабочая частота – 1 МГц) при комнатной температуре после первичного отжига с  $T = 300$  °С. Для определения параметров кинетики накопления образцы отжигались в интервале температур (250 – 350) °С, а также при 100 °С в кварцевой трубке на воздухе.

### Экспериментальные данные и обсуждение

На рис.1 представлены профили распределения электронов проводимости в образце, облученном протонами дозой  $1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> после изотермического отжига ( $T=275$  °С) в течение (8–22) часов. На каждой стадии отжига проводилась низкотемпературная обработка при 100 °С длительностью 7 часов.

Видно, что в области (0,2–0,7) мкм от границы раздела металл-полупроводник формируется область избыточной концентрации электронов. Ра-

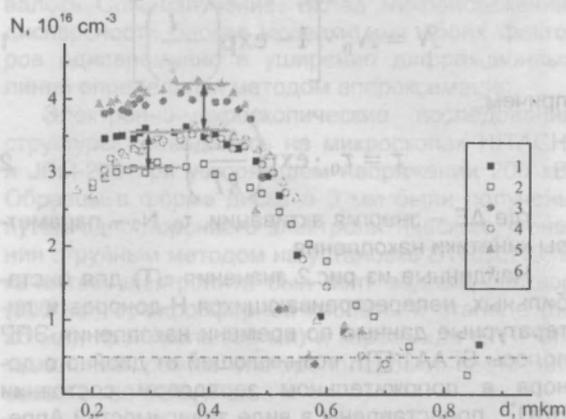


Рис.1 Профили распределения электронов проводимости в образце, облученном протонами дозой  $1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>: отжиг  $T=275$  °С, 1 - 8 часов, 3 – 22 часа, 5 – 29,5 часов; 2, 4, 6 - отжиг  $T=100$  °С, 7 часов каждый.

нее [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 проективного пробега протонов с энергией 300 кэВ и определяется мелких Н-доноров. Термообработка при 100 °С вызывает частичное обратимое уменьшение концентрации электронов,

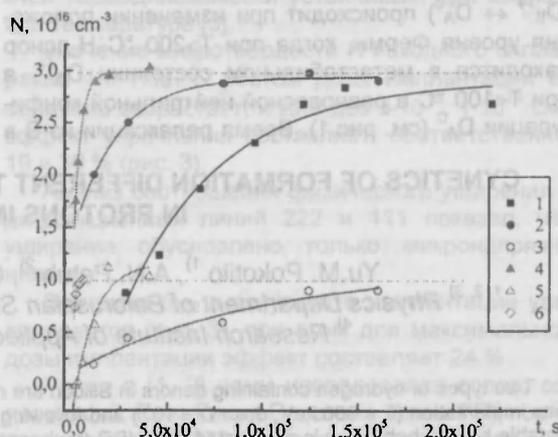


Рис. 2 Кинетика накопления неперестраивающихся (1 -  $T=250$  °С, 2 -  $T=275$  °С, 4 -  $T=300$  °С) и бистабильных (3 -  $T=275$  °С, 5 -  $T=300$  °С, 6 -  $T=350$  °С) Н-доноров.

так как последующая кратковременная закалка от 200 °С в воду или инжекция неосновных носителей заряда приводит к восстановлению избыточной концентрации электронов [4]. Таким образом, приведенная на рис.1 процедура измерения профилей распределения концентрации электронов позволяет выделить долю бистабильных доноров и тем самым исследовать кинетику накопления обоих типов доноров.

На рис.2 представлена кинетика накопления бистабильных и неперестраивающихся Н-доноров в диапазоне температур (250-350) °С.

Видно, что для каждого типа Н-доноров существует предельная концентрация и кинетика накопления описывается реакцией первого порядка (сплошные линии) в соответствии с выражением:

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

причем:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad 2$$

где  $\Delta E$  – энергия активации,  $\tau_0$ ,  $N_0$  – параметры кинетики накопления.

Найденные из рис.2 значения  $\tau(T)$  для бистабильных, неперестраивающихся Н-доноров и литературные данные по времени накопления ЭПР полосы Si AA1 [7]т, возникающей от двойного донора в положительном зарядовом состоянии  $HDD^+$ , представлены в виде зависимостей Аррениуса на рис.3.

Результаты линейной аппроксимации зависимостей Аррениуса соответственно для бистабильных и неперестраивающихся Н-доноров приведены на рис.3 сплошной линией при следующих значениях найденных параметров:  $\Delta E_1 = 2,3$  eV,  $\tau_{01} = 9,1 \cdot 10^{-17}$  s;  $\Delta E_2 = 1,4$  eV,  $\tau_{02} = 4,2 \cdot 10^9$  s. Видно, что кинетика накопления бистабильных доноров совпадает с таковой для HDD. 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  $T > 200$  °С Н-донор находится в метастабильном состоянии  $D_B^{++}$ , а при  $T < 100$  °С в равновесной нейтральной конфигурации  $D_A^0$  (см. рис.1). Время релаксации из В в

А конфигурации при комнатной температуре составляет порядка 1 года.

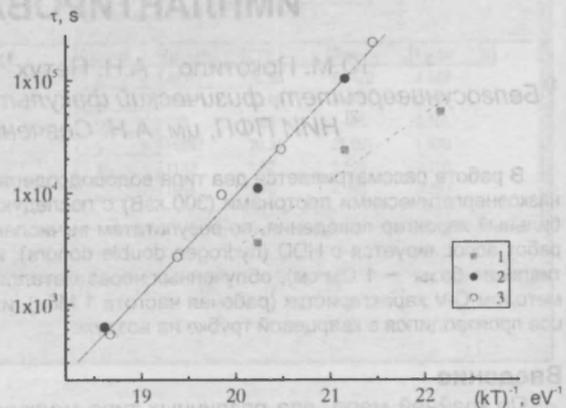


Рис. 3 Найденные из рис.2 значения  $\tau(T)$  для неперестраивающихся (1) и бистабильных (2) Н-доноров и данные по времени накопления ЭПР полосы Si AA1 [7]т (3), представленные в виде зависимостей Аррениуса

### Заключение

Показано, что кинетика накопления Н-доноров в кремнии описывается реакциями первого порядка. Определены энергии активации и предэкспоненциальные факторы для бистабильных и неперестраивающихся доноров. Из сравнения с литературными данными по кинетике накопления ЭПР полосы Si AA1 установлено, что бистабильный характер поведения проявляет двухзарядный Н-донор (HDD).

### Список литературы

- 1 Б.Н. Мукашев, Х.А. Абдуллин, Ю.В. Горелкинский, УФН - 2000 - т.170 - №2 - с.с. 143-145
- 2 Х.А. Абдуллин, Ю.В. Горелкинский, Б.Н. Мукашев, С.Ж. Токмолдин, ФТП 2002 - т.36 - вып.3 - с.с. 257-268
- 3 Ю.М. Покотило, А.Н. Петух, В.В. Литвинов, ПЖТФ - 2004 - №22 - с.с. 70-74
- 4 Ю.М. Покотило, А.Н. Петух, В.В. Литвинов, В.Г. Цвирко, ФТП - 2005 - т.39 - №7 - с.с. 802-805
- 5 Kh.A. Abdullin, Yu.V. Gorelinskii, B.N. Mukashev, A.S. Serikanov, Physics B: Condensed Matter, 2003 - 340-342, 692-696
- 6 Kh.A. Abdullin, Yu.V. Gorelinskii, S.M. Kikkarin, B.N. Mukashev, A.S. Serikanov, S.Zh. Tokmoldin, Material Science in Semiconductors - Proc. 7 - 2004 - 447-451
- 7 S.Zh. Tokmoldin, B.N. Mukashev, Kh.A. Abdullin, Yu.V. Gorelinskii, B. Pajot, Material Science and Engineering - B71 - 2000 - 263-267

## CYNETICS OF FORMATION DIFFERENT TYPES OF HYDROGEN CONTAINING DONORS IN PROTONS IMPLANTED SILICON

Yu.M. Pokotilo<sup>1,2,3)</sup>, A.N. Petuh<sup>4)</sup>, O.A. Dzichkovskii<sup>3)</sup>, A.S. Kamyshan<sup>4)</sup>

<sup>1,2,3)</sup> Physics Department of Belorussian State University, Minsk, Belarus; pokotilo@bsu.by

<sup>4)</sup> Research Institute of Applied Physics Problems, Minsk, Belarus

Two types of hydrogen containing donors in Silicon are regarded in this paper. These donors appear due to low energy protons implantation ( $E = 300$  keV, dose  $D = 10^{15}$ ) and following thermal annealing ( $T \sim 400$  °C). Part of these donors which reveals bistable type of behaviour is associated with HDD (hydrogen double donors) as a result of comparison of calculated accumulation kinetics parameters and others papers data. Shottki diode structures were used as experimental samples (1 ohm·cm phosphorus alloyed epitaxial silicon). Samples were implanted with protons through metallic contact. Electronic profiles were measured using C-V characteristic method (1 MHz frequency). All measurements carried out at room temperature, samples annealing took place in quartz tube on air.