

06

Новые водородные доноры в германии

© Ю.М. Покотило, А.Н. Петух, В.В. Литвинов

Белорусский государственный университет
E-mail: pokotilo@bsu.by

Поступило в Редакцию 11 апреля 2003 г.

Методом вольт-фарадных характеристик исследовались электрофизические свойства облученного протонами германия n -типа проводимости. Показано, что термообработка имплантированного германия при температурах 200–300°C приводит к формированию быстродиффундирующих мелких доноров. Установлено, что коэффициент диффузии обнаруженных доноров совпадает с таковым для коэффициента диффузии атомарного водорода с учетом захвата на ловушки. Сделан вывод о том, что атомарный водород является мелким донорным центром в германии.

Водород является наиболее изучаемой в последние годы примесью в решетке полупроводников [1]. Преципитация примеси водорода и ее взаимодействие с собственными дефектами приводят к формированию различных семейств как бескислородных [2], так и кислородсодержащих [3] доноров в кремнии. В германии водородсодержащие доноры связывались до сих пор лишь с комплексами Н–О [4]. Поведение водорода в промышленных кристаллах германия изучено недостаточно, хотя это представляет значительный интерес для технологии изготовления и радиационной стойкости германиевых детекторов. Целью данной работы явилось изучение электрофизических свойств $p^+ - n$ -структур германия, облученных протонами.

Исследования проводились на $p^+ - n$ -структурах с резким сплавным (индий) переходом и толщиной базы $d_0 = 100 - 120 \mu\text{m}$. Базовым материалом (n -область) служил промышленный монокристаллический германий, легированный сурьмой до концентрации $N_d = (1 - 2) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Облучение $p^+ - n$ -структур со стороны базы и контрольных пластин p - и n -Ge ($\rho = 25 - 45 \Omega \cdot \text{cm}$) проводилось протонами (H^+) с энергией 300 keV, что соответствует глубине пробега $\text{H}^+ 3 \mu\text{m}$. Поток облучения составлял $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

Концентрация мелких доноров в базовой области $p^+ - n$ -структур находилась из измерений вольт-фарадных характеристик при комнатной температуре. Для диагностики глубоких уровней измерялись спектры DLTS в диапазоне температур (20–300) К. Контроль типа проводимости осуществлялся термозондом.

Облучение обратной стороны (n -области) $p^+ - n$ -структур и контрольных пластин приводило к формированию в пределах пробега H^+ слоев p -типа проводимости из-за образования радиационных дефектов преимущественно акцепторного типа. Однако при кратковременном (~ 30 min) нагреве образцов при температуре 200–250°C происходила $p \rightarrow n$ -конверсия типа проводимости облученных областей как n -, так и p -Ge. При дальнейшем изотермическом отжиге область с избыточной концентрацией электронов распространяется за пределы облученного слоя и избыточные электроны обнаруживаются вблизи границы $p^+ - n$ -перехода, т. е. на глубине $\sim 100 \mu\text{m}$. Распределение концентрации электронов (n) в пределах $30 \mu\text{m}$ от границы $p^+ - n$ -перехода на различных стадиях изотермического отжига при 200°C представлено на рис. 1. Видно, что избыточная концентрация электронов в исходном состоянии и после облучения структуры растет со временем термообработки, свидетельствуя о формировании избыточных донорных центров. Из измерений спектров DLTS установлено, что энергия ионизации регистрируемых дефектов $\Delta E < E_c - 0.0135 \text{ eV}$.

Так как концентрация водорода в имплантированном слое толщиной $3 \mu\text{m}$ при потоке облучения $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ на 4–5 порядков превышает концентрацию регистрируемых в базе электронов, то для количественной оценки диффузионных характеристик мы использовали решение уравнения Фика в приближении диффузии из неограниченного источника [1]

$$N_H = n - N_d = N_0 [1 - \text{erf}(x/(2\sqrt{Dt}))], \quad (1)$$

где N_0 — поверхностная концентрация атомарного водорода; $x = d_0 - d$ — координата, отсчитываемая от тылового контакта; t — время диффузии; D — коэффициент диффузии. Анализ экспериментальных зависимостей рис. 1 и 2, отражающих динамику формирования доноров в фиксированной точке базы $d = 20 \mu\text{m}$, с помощью уравнения (1) показывает, что удовлетворительное согласие между экспериментальными значениями $N_H(x, t)$ и рассчитанными (сплошные

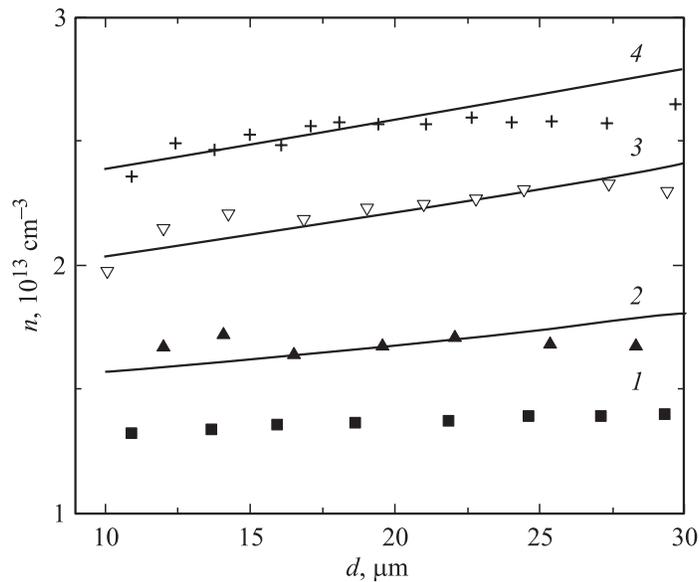


Рис. 1. Профили распределения концентрации электронов в базе германиевого диода после имплантации протонами изотермического (200°C) отжига в течение различного времени t , min: 1 — 0, 2 — 1720, 3 — 3400, 4 — 4960. Сплошные кривые — расчет в соответствии с выражением (1).

линии) достигается при значениях коэффициентов диффузии $1.5 \cdot 10^{-10}$ и $8 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ и поверхностных концентраций (N_0) $4.2 \cdot 10^{13}$ и $6.6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ для температур отжига 200 и 250°C соответственно. Полученные значения коэффициентов диффузии примерно на 3 порядка величины ниже коэффициентов диффузии атомарного водорода ($2.6 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ при 200°C и $6.2 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ при 250°C) на основе выражения для температурной зависимости коэффициента диффузии, установленного вблизи точки плавления масс-спектрометрическим методом [5].

С другой стороны, определенные нами значения коэффициентов диффузии согласуются по порядку величины с коэффициентом диффузии атомарного водорода при температурах $300\text{--}350^\circ\text{C}$, найденных из экспериментов по пассивации дефектов в процессе обработки германия

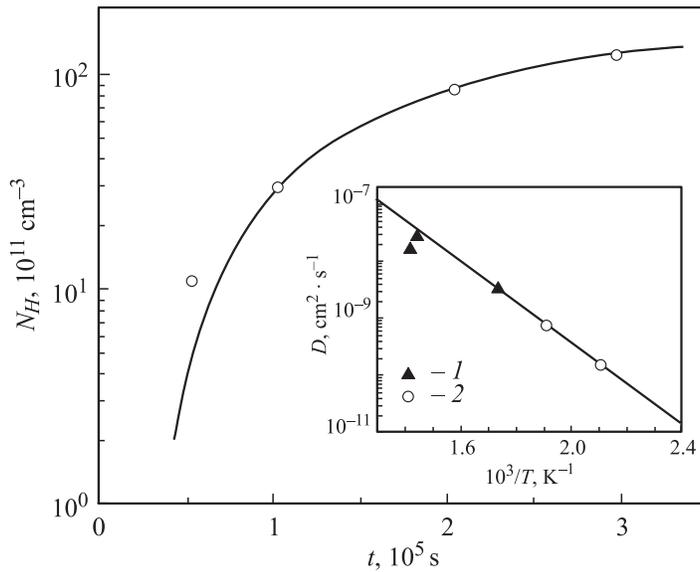


Рис. 2. Зависимость концентрации формирующихся на глубине $20\ \mu\text{m}$ от p - n -перехода доноров (N_H) от времени изотермического отжига при температуре 200°C . Сплошные кривые — расчет в соответствии с выражением (1). На вставке приведены значения коэффициентов диффузии водорода (1) (данные [6]) и донорных центров (2).

в водородной плазме [6]. Совокупность наших данных и результатов работы [6] представлена на вставке к рис. 2 и может быть описана следующей активационной зависимостью:

$$D = 6.43 \cdot 10^{-3} \exp(-0.72 \text{ eV}/kT) \text{ [cm}^2/\text{s]}. \quad (2)$$

Можно предположить, что диффузия атомарного водорода в нашем случае также ограничена захватом на ловушки и поэтому определяется эффективным коэффициентом диффузии, уменьшенным в $[H]/[H_r]$ раз, где $[H]$ — концентрация свободного водорода, а $[H_r]$ полная концентрация водорода [1]. Такими ловушками, согласно [7], могут выступать узловой кислород и димер кислорода, которые при захвате атома водорода образуют донорные состояния. Однако комплекс H-O

устойчив только до 150°C [4], а концентрация димеров кислорода в промышленном германии составляет $\sim 10^{11}\text{ см}^{-3}$ при температуре 250°C [8]. Определенное нами значение концентрации наблюдаемых доноров при 250°C достигает у облученной поверхности величины $N_0 = 6.6 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$. Таким образом, обнаруженные водородсодержащие доноры не включают в свой состав атомов кислорода.

В соответствии с моделью [6] ловушками могут выступать и сами атомы водорода с образованием электрически неактивного малоподвижного молекулярного водорода. В этом случае коэффициент диффузии водорода также поинжается примерно на три порядка величины в исследуемой области температур, а найденные значения поверхностной концентрации атомарного водорода (N_0) практически соответствуют данным [6]. С учетом изложенного можно сделать вывод о том, что непосредственно атомарный водород является донором в решетке германия.

Список литературы

- [1] *Pearton S.J., Corbett J.W., Stavola M.* Hydrogen in Crystalline Semiconductors. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. 1992. 363 с.
- [2] *Мукашев Б.Н., Абдулин Ч.А., Горелкинский Ю.В.* // УФН. 2000. Т. 170. № 2. С. 143–155.
- [3] *Markevich V.P., Suezawa M., Sumino K.* et al. // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. N 11. P. 7347–7350.
- [4] *Haller E., Hansen W.L.* // Advances in Physics. 1981. V. 30. N 9. P. 93–138.
- [5] *Frank R.C., Thomas J.E.* // J. Phys. Chem. Sol. 1960. V. 16. P. 144–150.
- [6] *Hall R.N.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1974. NS-21. P. 260–265.
- [7] *Deak P., Schroder B., Annen A.* et al. // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. N 3. P. 1924–1927.
- [8] *Литвинов В.В., Мурин Л.И., Линдстром Л.* и др. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 8. С. 900–904.