

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕРМОДОНОРЫ В ТРАНСМУТАЦИОННО-ЛЕГИРОВАННОМ γ -ОБЛУЧЕННОМ КРЕМНИИ

Л.И. Панасюк¹⁾, В.В. Колomoец¹⁾, В.Н. Ермаков¹⁾, С.А. Федосов²⁾, П.П. Трохимчук²⁾, Б.Б. Сусь¹⁾

¹⁾Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарева НАН Украины
пр. Науки, 41, Киев 03028, Украина, e-mail: ekol@isp.kiev.ua

²⁾Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки МОН Украины
пр. Воли 13, Луцк 43025, Украина, e-mail: physical@univer.lutsk.ua

С целью определения энергии активации высокотемпературных термодоноров (ТД-II) технологического происхождения и исследования влияния сильных направленных давлений на положение энергетических состояний дефектов в нейтронно-легированном γ -облученном n-Si(P) исследовано эффект Холла, тензо-холл-эффект, тензорезистивный эффект. На основе полученных данных проведено сопоставление главных характеристик и параметров нейтронно-легированного n-Si(P) и кремния легированного фосфором во время выращивания.

Введение

Технология нейтронного легирования требует, как известно, проведения высокотемпературного отжига при температуре $T=800-850^\circ\text{C}$, который проводится в течение 2-х часов с целью устранения радиационных повреждений кристаллической решетки, которые возникают в результате облучения частицами высоких энергий в ядерном реакторе.

Однако при отжиге имеет место не только уменьшение количества дефектов, обусловленных непосредственно облучением нейтронами, но также происходит образование новых дефектов. Поскольку кристаллы кремния, которые выращиваются как методом бестигельной зонной плавки (БЗП) так и методом Чохральского имеют значительное содержание кислорода, соответственно от $\approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ к $1,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [1], выше упомянутый технологический отжиг приводит к формированию так называемых высокотемпературных термодоноров-II (ТД-II) [1-3], связанных с наличием кислорода в кристаллах кремния.

Результаты исследования особенностей тензорезистивных эффектов, в нейтронно-легированных (НЛ) кристаллах кремния с разной концентрацией примеси фосфора ($10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-3}$) [4, 5] позволили определить наличие в запрещенной зоне энергетических состояний, которые обусловлены наличием в объеме кристаллов ТД-II, что возникают во время высокотемпературного технологического отжига слитков после облучения медленными нейтронами. Данные анализа температурных зависимостей сопротивления, тензосопротивления и тензо-холл-эффекта подтвердили то, что в кристаллах кремния со значительным содержанием кислорода высокотемпературный технологический отжиг приводит к появлению термодоноров с энергиями активации $\varepsilon_a \approx 60-100 \text{ меВ}$.

Незначительные изменения концентрации свободных электронов с повышением температуры в исследуемых кристаллах [4, 5] не позволяли определить с нужной точностью энергию активации термодоноров технологического происхождения в кристаллах.

Поскольку влияние термодоноров на свойства нейтронно-легированного кремния должно увеличиваться с уменьшением концентрации легирую-

щей примеси фосфора были проведенные исследования электрофизических свойств высокоомных кристаллов НЛ n-Si(P) с концентрацией фосфора $N_P < 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Определена энергия активации ТД-II технологического происхождения, а также установлены механизмы тензорезистивных эффектов в сильно деформированных кристаллах НЛ γ -облученного кремния, которые определяют характерные особенности соответствующих зависимостей электрофизических свойств от направленного давления.

Оригинальная методика идентификации механизмов тензоэффектов [4] позволила определить вклад дополнительного механизма деформационно-индуцируемой ионизации дефектных состояний к междолинному перераспределению электронов в НЛ кремнии, а также область давлений, где такой механизм доминирует.

Основная часть

С целью установления механизмов тензоэффектов, которые определяют характерные особенности соответствующих зависимостей электрофизических свойств от направленного давления и их связи с типом дефектов кристаллической решетки были исследованы продольный тензорезистивный и тензо-холл-эффект в сильно деформированных нейтронно-легированных γ -облученных кристаллах кремния в температурном диапазоне 78-300 К при одноосных давлениях до 1,5-1,8 ГПа и дозах облучения до $2,1 \cdot 10^{17} \text{ квант} \cdot \text{см}^{-2}$.

На рис. 1 представлены зависимости удельного сопротивления от давления для измерений продольного ТР эффекта в кристаллах кремния легированных фосфором из расплава и нейтронно-легированном кремнии. Тензорезистивный эффект для n-Si, легированного фосфором из расплава характеризуется выходом на насыщение при давлении $X \approx 0,6 \text{ ГПа}$ (кривая 1, рис. 1) и следующим незначительным ($\approx 1\%$) линейным уменьшением сопротивления связанным с изменением геометрических размеров образца в области упругой деформации.

Для нейтронно-легированного кремния характерным признаком продольного ТР эффекта, который измерялся при $T=78 \text{ К}$ есть наличие максимума при давлении $X \approx 0,55 \text{ ГПа}$ и постепенное

экспоненциальное уменьшение удельного сопротивления ($\approx 5\%$) с увеличением давления до 1,8 ГПа по завершению переселения электронов из долин, которые поднимаются по энергии, в долины, энергия которых уменьшается с давлением $X||[001]$ (кривая 2 рис. 1). Результаты проведенных расчетов свидетельствуют, что при таких значениях направленного давления происходит полное переселение электронов из "верхних" долин в "нижние", поскольку энергетическое расщепление долин $\delta\epsilon$ значительно превышает энергию kT ($\delta\epsilon > 10kT$) [6].

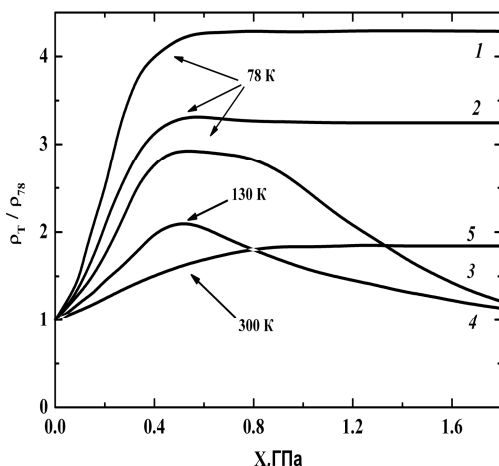


Рис. 1. Зависимости продольного тензорезистивного эффекта $\rho_X/\rho_0=f(X)$ для n-Si легированного фосфором во время выращивания (кривая 1) и нейтронно-легированного (кривые 2-5). $X||[001]||J$; 1-3 – $T=78\text{ K}$; 4 – $T=130\text{ K}$, 5 – $T=300\text{ K}$; доза γ -облучения Φ , $\text{квант}\cdot\text{см}^{-2}$: 1,2 – $\Phi=0$; 3-5 – $\Phi=2,1\cdot 10^{17}$

Результаты расчетов свидетельствуют, что наиболее существенное (нелинейное с давлением) уменьшение энергии ионизации водородоподобного примесного центра происходит при давлениях до 0,2-0,4 ГПа. Последующее изменение энергии ионизации с увеличением одноосного давления $X||[001]$ происходит более медленно и почти линейно с давлением. Поэтому, выше упомянутое, экспоненциальное уменьшение удельного сопротивления в НЛ кремнии в области давлений 0,5-1,8 ГПа мы связываем с деформационно-индуцируемой ионизацией энергетических уровней термодоноров, которые возникают в нейтронно-легированных кристаллах в результате технологического высокотемпературного отжига.

Характер температурной зависимости коэффициента Холла для недеформированных образцов трансмутационно-легированного кремния, которые не поддавались γ -облучению (кривая 1, рис. 2), свидетельствует о наличии двух уровней: энергетического уровня фосфора, полностью ионизирующегося при $T\approx 100\text{ K}$ (уровень I, рис. 2), энергетического уровня, ионизирующегося при $T\approx 120\text{ K}$ (уровень II, рис. 2) [4].

Наличие в нейтронно-легированных кристаллах уровней с энергиями активации, которые превышают энергию ионизации фосфора может быть связано с генерацией при высоко-

температурном технологическом отжиге термодоноров, которые возникают в Si с высоким содержанием кислорода (кремний выращен по методу Чохральского) [1-3].

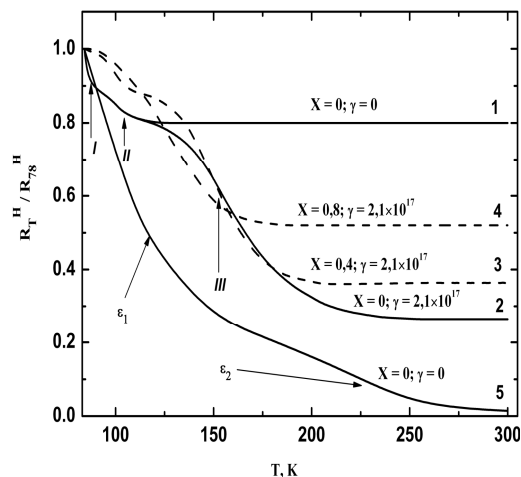


Рис. 2. Температурные зависимости приведенного коэффициента Холла для нейтронно-легированного кремния получены для образцов: кривые 1-4 – $N_P=3,2\cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$, кривая 5 – $N_P=2\cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$ при разных значениях одноосного давления X (ГПа) и дозах γ -облучения Φ , $\text{квант}\cdot\text{см}^{-2}$: 1,5 – $\Phi=0$; 2-4 – $\Phi=2,1\cdot 10^{17}$

Анализ температурных зависимостей тензохолл-эффекта (кривые 1-3, рис. 2) показывает, что полная ионизация примеси фосфора происходит при незначительных давлениях (0,2-0,4 ГПа), что также подтверждает, выше представленные, зависимости продольного тензорезистивного эффекта для НЛ кремния и теоретические расчеты влияния одноосного давления на энергетическое положение основного состояния мелких донорных уровней [7, 8].

Таким образом, существенное уменьшение энергии ионизации фосфора в области сравнительно небольших давлений (кривые 1-3, рис. 2), наличие уровней термодоноров и зависимость их положения от давления, определяют особенности тензорезистивных эффектов в нейтронно-легированном кремнии при давлениях в области (0-1,8) ГПа (см. рис. 1).

В γ -облученных кристаллах нейтронно-легированного кремния наблюдается более существенное уменьшение сопротивления кристаллов в области давлений (1,0-1,8) ГПа (кривая 3, рис. 1), что связано с приближением к зоне проводимости с ростом давления уровня А-центра ($E_c=0,17\text{ eV}$) (пара вакансия-атом кислорода) [10]) (уровень III, рис. 2) и дополнительной ионизацией свободных электронов. При росте температуры в результате частичной термической ионизации А-центра наблюдается уменьшение влияния деформационно-индуцируемой ионизации радиационного дефекта (кривая 4, рис. 1, $T=130\text{ K}$). При $T=300\text{ K}$ в результате полной термической ионизации А-центра характер изменения удельного сопротивления с давлением (кривая 5, рис. 1) определяется механизмом междолинного перераспределения электронов и зависимостью от давления вероятности f

переходов, которые дают основной вклад в междолинное рассеивание электронов в кремнии при температуре $T > 150$ К [9]. Поскольку термическая активация термодоноров (ТД-II) происходит при низшей температуре, чем термическая активация А-центра, наличие ТД-II в объеме кристалла также не влияет на характер зависимостей $\rho(T)$ при $T = 300$ К (кривая 5, рис. 1).

С целью получения приемлемой точности определения энергии активации высоко-температурных термодоноров был исследован эффект Холла на высокоомных кристаллах нейтронно-легированного кремния ($N_P = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\rho_{78} = 1050 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Поскольку в таких кристаллах примесь фосфора полностью ионизирована при $T = 78$ К, изменение концентрации свободных электронов, которая наблюдается с ростом температуры в области (78-300) К происходит за счет термической ионизации термодоноров.

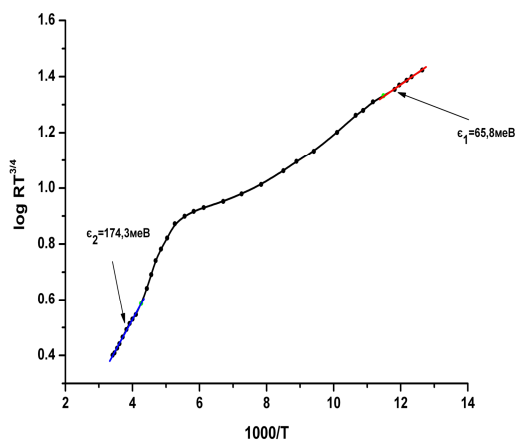


Рис. 3. Зависимость $\lg RT^{3/4} = f(10^3/T)$ для высокоомного нейтронно-легированного n-Si(P), $N_P = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

На температурной зависимости постоянной Холла (кривая 5, рис. 2) наблюдается наличие двух уровней ε_1 , ε_2 . Используя температурную зависимость постоянной Холла (кривая 5, рис. 2) и построив график $\lg RT^{3/4} = f(10^3/T)$ (рис. 3), было найдено энергию активации данных уровней $\varepsilon_1 = 65,8 \pm 1,5 \text{ меВ}$ и $\varepsilon_2 \approx 174 \text{ меВ}$, которые следует отнести к термодонорам, которые возникают в результате высокотемпературного техно-

логического отжига нейтронно-легированного кремния.

Закключение

На основе анализа результатов исследований тензорезистивного эффекта, определены механизмы тензоэффектов в сильно деформированных нейтронно-легированных кристаллах n-Si(P), которые поддавались облучению разными дозами γ -квантов. Установлено, что рядом с классическими механизмами перераспределения электронов доминирующими механизмами тензоэффектов является дополнительная деформационно-индуцируемая ионизация энергетических состояний радиационных дефектов (фосфор, А-центры) и термодоноров II технологического происхождения, которые возникают в результате отжига кристаллов после облучения медленными нейтронами. Существенная деформационно-индуцируемая ионизация энергетических состояний отмеченных дефектов происходит в разных областях направленного давления $X||[001]$: фосфора – (0-0,4) ГПа, термодоноров II – (0,5-1,2) ГПа, А-центра – (1,0-1,8) ГПа. Определены энергии активации термодоноров II в высокоомном кремнии: $\varepsilon_{i1} = 65,8 \pm 1,5 \text{ меВ}$ и $\varepsilon_{i2} \approx 174 \text{ меВ}$.

Список литературы

1. Бабич В. М. и др. Кислород в монокристаллах кремния. - К.: Интерпрес ЛТД, 1997. - 239 с.
2. Pesola M. et al. // Phys. Rev. Lett. - 2000. - 84. - P.5343.
3. Emtsev V.V. et al. // Cryst. Res. Technol. - 2003. - 38. - P. 394.
4. Будзуляк С.И. и др. // Доклады НАНУ. - 2000. - 9. - С. 79.
5. Budzulyak S.I. et al. // Physica B. - 2001. - 302-303. - P. 12.
6. Ermakov V.N. et al. // Proc. 20th Internat. Conf. Phys. Semicond. (ICPS-20). - Thessaloniki (Greece), 1990. Vol. 3. - P. 1803.
7. Wilson D., Fecher G. // Phys. Rev. - 1961. - 124. - P.1068.
8. Бир Г.Л., Лукус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. - М.: Наука, 1972. - 584 с.
9. Баранский П.И. и др. // ФТП. - 1976. - 10. - С.1387.
10. Watkins G.D., Corbet J.W. // Phys. Rev. - 1961. - 121. - P.1001.

TECHNOLOGICAL THERMODONORS ARE IN THE TRANSMUTATION-DOPED γ -IRRADIATION SILICON

Leonid Panasjuk¹⁾, Volodymyr Kolomoets¹⁾, Valery Ermakov¹⁾,
Sergii Fedosov²⁾, Petro Trokhimchuk²⁾, Bogdan Sus¹⁾

¹⁾V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,

41, pr. Nauki, Kyiv, 03028, Ukraine, e-mail: ekol@isp.kiev.ua;

²⁾Lesya Ukrainka Eastern National University,

13, pr. Voli, Lutsk, 43025, Ukraine, e-mail: physical@univer.lutsk.ua

Activation energy of high temperature technological thermodonors (TD) has been determined in transmutation-doped n-Si(P) using the data analysis of the Hall-effect temperature dependence. Physical mechanisms of tensoeffects in n-Si(P) crystals doped by neutron irradiation and doped at growth were studied by the tensoeffects measurements and by analysis of the pressure dependencies of the electron concentration ratio in "upper" and "lower" Δ_1 -valleys of uniaxially strained samples. Comparison of the some parameters for the crystals doped either by neutron transmutation method or in the melt is carried out.