

03

Тензостимулированный эффект в легированном и термообработанном кремнии при ориентированной деформации

© О.О. Маматкаримов¹, О. Химматкулов², И.Г. Турсунов^{3,4}

¹ Наманганский инженерно-технологический институт, Наманган, Узбекистан

² Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

³ Чирчикский государственный педагогический институт, Чирчик, Узбекистан

⁴ Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

E-mail: ikromjon0804@gmail.com

Поступила в Редакцию 17 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 17 декабря 2020 г.

Принята к публикации 14 января 2021 г.

Исследован тензостимулированный эффект в термообработанном и легированном кремнии. Показано, что одноосное сжатие по направлению [111] приводит к распаду термодоноров и проявлению гистерезиса в зависимостях удельного сопротивления от величины сжатия. Установлено, что тензостимулированный эффект в компенсированных марганцем образцах кремния обусловлен одновременными изменениями концентрации и подвижности носителей тока.

Ключевые слова: деформация, тензосопротивления, кремний, легирование, одноосное.

DOI: 10.21883/FTT.2021.05.50807.262

1. Введение

Как известно, в сильно компенсированном кремнии легированном примесями, создающими в запрещенной зоне глубокие энергетические уровни, наблюдается ряд уникальных по свойству магнитных, оптических и других явлений [1,2]. Сильно компенсированные атомами марганца монокристаллы кремния и структуры на их основе являются чувствительными к внешней упругой деформации и могут быть использованы в качестве чувствительных элементов датчиков внешнего давления [3,4].

Исследованию влияния одноосной упругой деформации на электрофизические свойства в полупроводниках посвящен ряд работ [5–7]. Но в литературе имеется мало сведений об особенностях тензостимулированного эффекта изменения удельного сопротивления при наличии глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне и термодфектов в объеме полупроводника. Как известно [8,9] после термического отжига при высоких температурах и резкого охлаждения в объеме полупроводникового кристалла образуются электроактивные и нейтральные термические дефекты. Исследованиями ряда авторов [10–12] установлено, что термоотжиг различной длительности (1–200 h) в широком интервале температур (300–1200°C) кислородосодержащих монокристаллов кремния, выращенных методом Чохральского, приводит к образованию различных термодоноров (TD) кислородной природы в объеме кристалла Cz-Si. Образование термодоноров в большинстве случаев при-

писывается возникновению комплексов кислорода с атомами кремния, структурными дефектами и примесными атомами. В этом случае TD обнаруживаются по влиянию на концентрацию, время жизни и подвижности носителей тока — по изменению оптических спектров поглощения и микротвердости, а также структурными анализами.

Проведенные спектроскопические исследования методами эффекта Холла, ЭПР, ИК-поглощения, DLTS и др. показали, что TD в отожженных монокристаллах Si представляют квазинепрерывный набор донорных состояний в запрещенной зоне кремния с уровнями залегания в интервале (10–300 meV) [13]. Высокотемпературные TD связывают с преципитатами кислорода внедрения, углерод в положении замещения C_s выступает в роли центра зарождения крупных преципитатов кислорода. Преципитатам больших размеров соответствуют более глубокие уровни вблизи зоны проводимости. Вопросы определения коэффициента диффузии кислорода в кремнии и переориентации кислородосодержащих двойных термодоноров в условиях одноосного сжатия приведены и в работах [14,15].

В настоящей работе исследовано влияние термообработки и примесных состояний марганца на эффект тензосопротивления в кремнии.

2. Методика эксперимента

В качестве исходных образцов были использованы бездислокационные монокристаллы кремния марки

Электрофизические параметры компенсированного кремния

| № | Марка исходного кремния | $T, ^\circ\text{C}$ | t, h | Образец | $\rho, \Omega \cdot \text{cm}$ | $\mu, \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ | p, cm^{-3} |
|---|-------------------------|---------------------|---------------|---|--------------------------------|--|----------------------|
| 1 | КДБ-4 | — | — | $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ | 4 | 300 | $5.34 \cdot 10^{15}$ |
| 2 | КДБ-4 | 1150 | 2 | $p\text{-Si}\langle\text{B, TD}\rangle$ | 40 | 200 | $7.77 \cdot 10^{14}$ |
| 3 | КДБ-4 | 1090 | 2 | $p\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$ | $7.7 \cdot 10^2$ | 250 | $3.25 \cdot 10^{13}$ |
| 4 | КДБ-4 | 1135 | 2 | $p\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$ | $3.62 \cdot 10^5$ | 150 | $1.15 \cdot 10^{11}$ |

КДБ-4, выращенные методом Чохральского, с концентрацией кислорода $(5-6) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Компенсированные образцы $\text{Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$ были получены методом высокотемпературной диффузии марганца из газовой фазы. Термообработанные образцы $\text{Si}\langle\text{B, TD}\rangle$ изготавливались путем отжига исходных монокристаллов в условиях вакуума с последующим резким охлаждением со скоростью $100-200^\circ\text{C/s}$. Технологические параметры процессов диффузии и термоотжига, а также электрофизические параметры определенные из холловских измерений приготовленных образцов приведены в таблице. Изотермическое одноосное сжатие осуществляли в направлении $[111]$ при температуре $T = 300 \text{ K}$.

Проведенные эксперименты показали, что термообработка (ТО) в интервале температур $1000-1200^\circ\text{C}$ и последующее охлаждение со скоростью $100-200^\circ\text{C/s}$ приводит к существенному изменению электрических параметров кремния (таблица). После ТО и охлаждения удельное сопротивление исходных образцов $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ с $\rho = 4 \Omega \cdot \text{cm}$ изменяется на один порядок. Исходные $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$, термообработанные $p\text{-Si}\langle\text{B, TD}\rangle$ и компенсированные $p\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$ образцы были подвергнуты направленному сжатию вдоль кристаллографической оси $[111]$ в интервале давлений $X = (0-6) \cdot 10^8 \text{ Pa}$.

В таблице приведены электрофизические параметры компенсированного кремния.

3. Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования показали, что с ростом ориентированного давления удельное сопротивление термообработанных образцов $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ с удельным сопротивлением $\rho = 40 \Omega \cdot \text{cm}$ уменьшается, а при снятии сжатия в зависимостях $\rho(X)$ наблюдается гистерезис, т.е. после снятия одноосного давления конечное значение ρ уменьшается по сравнению с его начальным значением (рис. 1, кривые 1, 1').

Полученные экспериментальные результаты показывают, что наблюдаемый гистерезис в зависимостях $\rho(X)$ обусловлен аналогичным поведением подвижности дырок от одноосного сжатия, связанной с распадом крупномасштабных примесных скоплений в виде преципитатов (кластеров) кислорода, образованных при термообработке в объеме кристалла кремния.

В исходных $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ образцах с $\rho = 4 \Omega \cdot \text{cm}$ удельное сопротивление монотонно уменьшается с ростом сжатия X (рис. 1, кривая 2). Удельное сопротивление

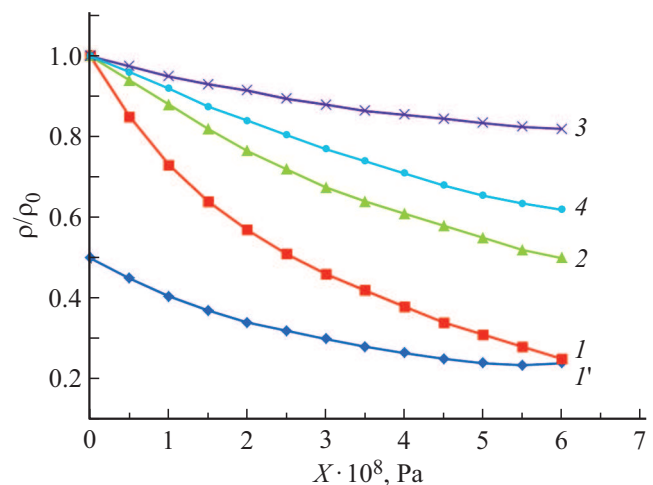


Рис. 1. Тензосопротивление образцов $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ при одноосном сжатии при $T = 300 \text{ K}$: 1 — ТО $p\text{-Si}\langle\text{B, TD}\rangle$, $\rho = 40 \Omega \cdot \text{cm}$, 1' — ТО $p\text{-Si}\langle\text{B, TD}\rangle$, $\rho = 40 \Omega \cdot \text{cm}$ при снятии одноосного давления, 2 — исходный $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$, $\rho = 4 \Omega \cdot \text{cm}$, 3 — $p\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$, $\rho = 7.7 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$, 4 — $p\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$, $\rho = 3.62 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$.

компенсированных и сильнокомпенсированных (СК) образцов так же уменьшается с ростом сжатия X (рис. 1, кривые 3 и 4).

Исследования тензо-Холл-эффекта, проведенные с целью выявления механизма тензосопротивления в данных образцах, показали, что концентрация в исходных и термообработанных образцах во всем диапазоне сжатия остается постоянной (рис. 2, кривые 1 и 2), так как мелкие примесные уровни при комнатной температуре являются полностью опустошенными.

Подвижность носителей тока в исходных $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ образцах с удельными сопротивлениями $\rho = 4 \Omega \cdot \text{cm}$ с ростом X монотонно увеличивается (рис. 3, кривая 2), что хорошо согласуется с существующими представлениями теории тензоэффекта [5]. Согласно этим представлениям одноосное сжатие в направлении $[111]$ приводит к расщеплению валентной зоны кремния и перераспределению носителей заряда из зоны тяжелых в зону легких дырок. Как известно, в условиях постоянной температуры подвижность дырок при рассеивании на колебаниях решетки (оптических фонах) и ионах примеси зависит в основном от их эффективной массы как $\sim m^{-5/2}$ и $\sim m^{-1/2}$ соответственно [16]. Отсюда следует, что при изотермическом одноосном сжатии в изменении подвижности дырок основной вклад дает

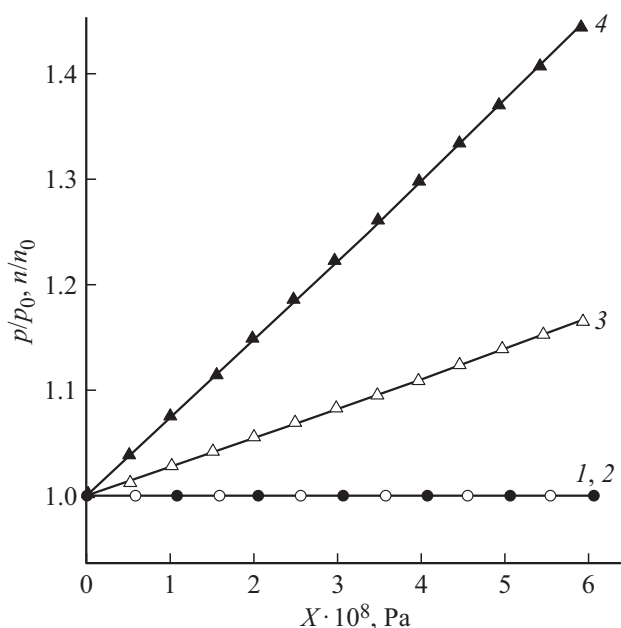


Рис. 2. Зависимости концентрации дырок в образцах $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ от одноосного сжатия при условиях $I \parallel X \parallel [111]$ 1 — ТО $p\text{-Si}\langle\text{B}, \text{TD}\rangle$, $\rho = 40 \Omega \cdot \text{cm}$, 2 — исходный $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$, $\rho = 4 \Omega \cdot \text{cm}$, 3 — $p\text{-Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$, $\rho = 7.7 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$, 4 — $p\text{-Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$, $\rho = 3.62 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$.

их рассеивание на оптических фононах. Следовательно, можно предположить, что уменьшение эффективной массы дырок приводит к росту их подвижности с ростом сжатия.

При снятии сжатия в зависимостях $\mu(X)$ дырок в термообработанных образцах $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ с удельным сопротивлением $\rho = 4 \Omega \cdot \text{cm}$ также наблюдается гистерезис, и конечное значение подвижности дырок возрастает (рис. 3, кривые 1, 1'). Такое изменение подвижности в ТО-образцах при одноосном упругом сжатии, хотя по характеру и совпадает с данными теории тензоэффекта, по которому рост подвижности дырок объясняется расщеплением валентной зоны, но столь значительный ее рост и появление гистерезиса в зависимости $\mu(X)$ позволяет предположить, что помимо указанного механизма изменения подвижности при деформации существует дополнительный эффект, сильно влияющий на подвижность.

Как было сказано выше, термообработка при высоких температурах и резкое охлаждение приводит к образованию в объеме монокристаллического кремния неоднородностей, связанных с медленно диффундирующими примесями, т.е. примесных скоплений и микродефектов, которые уменьшают подвижности носителей тока. Уменьшение подвижности дырок наблюдается и в наших образцах, подвергшихся ТО. В связи с этим, изменение подвижности дырок в ТО-образцах при их одноосном сжатии можно связать с проявлением эффекта барического распада нейтральных примесных скоплений и микродефектов, который приводит к увеличению по-

движности дырок и гистерезису в зависимостях $\rho(X)$ и $\mu(X)$.

В компенсированных (рис. 2, кривая 3) и СК-образцах (рис. 2, кривая 4) $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$, концентрация дырок увеличивается с ростом X , причем сравнительно заметный рост наблюдается в СК-образцах $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$. Увеличение концентрации в образцах $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ возможно связано с изменением степени заполнения глубоких уровней Mn в Si за счет изменения их энергии ионизации при одноосном сжатии [17–19].

Из рис. 3 видно, что значение подвижности дырок в компенсированных образцах $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ (кривая 3) увеличивается, а в СК-образцах $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ уменьшается с ростом X (кривая 4). Уменьшение подвижности дырок в СК-образцах $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ при сжатии вдоль кристаллографической оси [111] не согласуется с теорией тензоэффекта, поэтому предполагается, что наблюдаемое уменьшение подвижности носителей тока является результатом проявления „встречного“ существующему механизму деформации другого механизма, приводящего к уменьшению подвижности [20]. По-видимому, это связано с усилением рассеяния носителей тока за счет увеличения радиуса экранирования электрического потенциала неоднородностей в объеме кристалла Si при деформации в направлении кристаллографической оси [111], так как деформация является анизотропной. В условиях сильной компенсации межузельные примесные атомы марганца полностью ионизованы и в основном находятся в зарядовых состояниях Mn^+ и Mn^{++} , которые являются мощными отталкивающими центрами для дырок [19]. В сильно компенсированных полупроводниках случайное распределение примесей по кристаллу приводит к

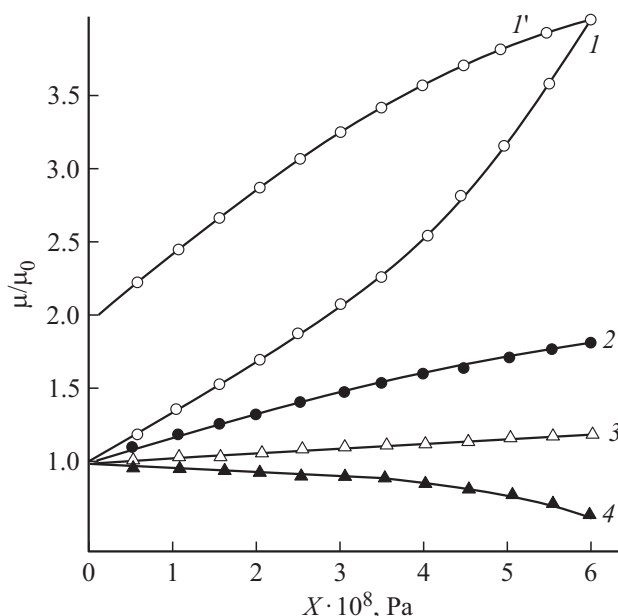


Рис. 3. Зависимости подвижности дырок в образцах $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$ от одноосного сжатия при условиях $I \parallel X \parallel [111]$ 1 — ТО $p\text{-Si}\langle\text{B}, \text{TD}\rangle$, $\rho = 40 \Omega \cdot \text{cm}$, 2 — исходный $p\text{-Si}\langle\text{B}\rangle$, $\rho = 4 \Omega \cdot \text{cm}$, 3 — $p\text{-Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$, $\rho = 7.7 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$, 4 — $p\text{-Si}\langle\text{B}, \text{Mn}\rangle$, $\rho = 3.62 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$.

нарушению локальной электронейтральности и, соответственно, появлению неоднородного крупномасштабного флуктационного потенциала. В узких, глубоких ямах и вершинах горбов потенциального рельефа искривленных зон полупроводника в зависимости от типа проводимости могут находиться соответственно изолированные электроны и дырки, которые не участвуют в проводимости, а изменяют степень экранирования флуктационного потенциала [22,23]. В нашем случае с возрастанием одноосного сжатия, ямы и горбы потенциального рельефа смещаются соответственным образом, и концентрация дырок участвующих в проводимости увеличивается (рис. 2, кривая 4). В результате такого смещения изолированные электроны и дырки переходят в соответствующие уровни протекания, и взаимно компенсируются через центры рекомбинации. Уменьшение концентрации электронов в изолированных ямах приводит к ослаблению степени экранирования и, следовательно, к росту амплитуды флуктационного потенциала. Увеличение амплитуды флуктационного потенциала в свою очередь приводит к уменьшению подвижности дырок с ростом одноосного сжатия (рис. 3, кривая 4).

4. Выводы

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Проведенные исследования показали, что с помощью внешнего одноосного давления можно управлять концентрацией неоднородно распределенных примесных скоплений в термообработанных полупроводниках.

2. Тензочувствительность в компенсированных и СК-образцах Si(Mn) уменьшается в условиях сжатия $I \parallel X \parallel [111]$.

3. Эффект тензосопротивления в исходных образцах p -Si(B) обусловлен только изменением подвижности основных носителей тока, а в компенсированных и СК-образцах p -Si(Mn) изменением концентрации и подвижности основных носителей тока.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.K. Bakhadirkanov, G.Kh. Mavlonov, S.B. Isamov, K.S. Ayupov, Kh.V. Iiev, O.E. Sattorov, S.A. Tachilin. Surf. Eng. Appl. Electrochem. **46**, 3, 276 (2010).
- [2] M.K. Bakhadirkanov, K.S. Ayupov, G.Kh. Mavlonov, S.B. Isamov. Semicond. **44**, 9, 1145 (2010).
- [3] O.O. Mamatkarimov, O. Khimmatkulov, I.G. Tursunov. Semicond. **54**, 5, 466 (2020).
- [4] S. Zainabidinov, I.G. Tursunov, O. Khimmatkulov. Semicond. **52**, 8, 1027 (2018).
- [5] A.V. Fedosov, S.V. Luniov, S.A. Fedosov. Ukr. J. Phys. **55**, 3, 322 (2010).
- [6] Ф.В. Федосов, С.В. Лунев, С.А. Федосов. Влияние одноосной упругой деформации на подвижность носителей тока в монокристаллах n -Si при наличии глубоких энергетических уровней. VIII Междунар. конф. „Взаимодействие излучений с твердыми телами“ (23–25 сентября 2009 г.) Минск, Беларусь.
- [7] Г.П. Гайдар. ФТП **49**, 9, 1164 (2015).
- [8] В.В. Воронков, Г.И. Воронкова, А.В. Батунина, В.Н. Головина, Л.В. Арапкина, Н.Б. Тюрина, А.С. Гуляева, М.Г. Мильвидский. ФТТ **44**, 4, 700 (2002).
- [9] И.И. Новак, Г.А. Оганесян. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **5**, 82 (2007).
- [10] Г.А. Оганесян, И.И. Новак. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **12**, 79 (2009).
- [11] В.В. Емцев, Т.Б. Машовец, Г.А. Оганесян, К. Шмальцев. ФТП **27**, 9, 1545 (1993).
- [12] З.Н. Сальник. Неорган. материалы **31**, 11, 1393 (1995).
- [13] В.М. Бабич, Н.И. Блецкан, Е.Ф. Венгер. Кислород в монокристаллах кремния. Интерпрес ЛТД, Киев (1997). 240 с.
- [14] M. Stavola, J.R. Patel, L.C. Kimerling, P.E. Freeland. Appl. Phys. Lett. **42**, 73 (1983).
- [15] P. Wagner, J. Hage, J.M. Trombetta, G.D. Watkins. Mater. Sci. Forum **83**, 401 (1992).
- [16] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников. Наука, М. (1990). 473 с.
- [17] С.З. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, И.Г. Турсунов, У. Гуйчиев. ФТП **34**, 6, 641 (2000).
- [18] I.G. Tursunov. Ukr. J. Phys. **62**, 12, 1041 (2017).
- [19] М.К. Бахадирханов, С.Б. Исамов. Электрон. обработка материалов **46**, 6, 8 (2011).
- [20] S. Zainabidinov, O.O. Mamatkarimov, I.G. Tursunov, O. Khimmatkulov. Ukr. J. Phys. **62**, 11, 957 (2017).
- [21] I.G. Tursunov, O.O. Mamatkarimov, A.A. Okhunov. IIUM Eng. J. **19**, 2, 164 (2018).
- [22] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. Электронные свойства полупроводников. Наука, М. (1979). 367 с.
- [23] А.Б. Давыдов, Б.А. Аронзон. ФТП **38**, 6, 693 (2004).

Редактор К.В. Емцев