06;08

Акустостимулированное изменение плотности и энергетического спектра поверхностных состояний в монокристаллах p-кремния

© Н.Н. Заверюхина, Е.Б. Заверюхина, С.И. Власов, Б.Н. Заверюхин

Физико-технический институт, Ташкент, Узбекистан
E-mail: Catherine.Zav@rambler.ru
Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

В окончательной редакции 7 июня 2007 г.

Рассмотрено влияние ультразвуковых волн различной мощности на плотность N_{SS} и энергетический спектр поверхностных состояний в p-Si-монокристаллах. Обнаружено, что в зависимости от режима облучения ультразвуковыми волнами в p-Si-монокристаллах происходят уменьшение или увеличение величины N_{SS} по сравнению с необлученными монокристаллами. При этом происходит перераспределение интегрального заряда поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны кремния. Наблюдаемый эффект связан с тем, что ультразвуковая волна, являясь, носителем энергии, модифицирует дефектную подсистему приповерхностных слоев кристалла путем перераспределения атомов примеси и генерации новых дефектов в нем.

PACS: 72.50.+b, 73.20.At, 73.40.Sx

В работах [1–3] было показано, что ультразвуковыми волнами (УЗВ) мегагерцового диапазона можно изменять транспортные свойства носителей заряда и структуру полупроводниковых материалов. Некоторые исследования по влиянию ультразвука на объем и поверхность классических (Si) и пьезополупроводников приведены в работах [4–7]. Дальнейшие изыскания различных исследователей в данном направлении подтвердили предложенную в работах [1–3] концепцию акустостимулированных явлений в полупроводниках, заключающуюся в том, что структурные изменения полупроводника связаны с процессами диффузии атомов примеси, распада и образования комплексов, дефектов в ультразвуковых полях. Для более детального выяснения механизмов

взаимодействия упругих колебаний с дефектами необходимо продолжать исследования акустостимулированных эффектов в полупроводниках по различным направлениям. Одним из таких направлений является исследование влияния ультразвука на приповерхностные свойства трехслойных структур „металл–диэлектрик–полупроводник". Этот вопрос весьма актуален, так как приповерхностные слои и поверхность полупроводника, на которую нанесен металлический контакт, определяют функциональные характеристики полупроводниковых приемников излучения, солнечных элементов и других устройств.

Известно, что в приповерхностных слоях полупроводника и на границе раздела „полупроводник–диэлектрик" могут существовать дефекты раличной природы. Эти дефекты могут возникать: а) в процессе роста диэлектрической пленки из-за различия коэффициентов термического расширения полупроводника и пленки, что приводит к появлению упругой деформации поверхностного слоя полупроводника и к изменению его энергетического спектра [8]; б) из-за диффузии атомов примеси из объема кристалла к его поверхности; в) в результате образования кластеров SiO_2 [9] и т.д.

В работах [10,11] было показано влияние ультразвукового воздействия на свойства структур металл–диэлектрик–полупроводник (MDS), изготовленных на основе кремния n-типа проводимости. В настоящей работе продемонстрировано влияние ультразвука на электрофизические характеристики структур металл–диэлектрик–полупроводник на основе Si-монокристаллов p-типа проводимости. Исследования проводились на MD–Si-структурах, тщательно изготовленных по стандартной технологии.

Для изготовления MD–Si-структур использовались p-Si-монокристаллы с удельным сопротивлением $\rho \sim 1 \div 700\,\Omega \cdot \mathrm{cm}$, концентрацией кислорода $N_{\mathrm{O}} \leqslant 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$ и плотностью дислокаций $N_D < 10^3\,\mathrm{cm}^{-2}$. Эти p-Si-монокристаллы имели кристаллографическую ориентацию $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$. Окисление монокристаллов проводилось в атмосфере сухого кислорода. Управляющий электрод и омический контакт формировались путем вакуумного напыления алюминия. MD–Si-структуры облучались продольными ультразвуковыми волнами в диапазоне частот $f = 0.8 \div 25\,\mathrm{MHz}$ и мощностью (интенсивностью) $P = 0.1 \div 5\,\mathrm{W/cm}^2$ со стороны окисного слоя в течение времени $t = 15 \div 90\,\mathrm{min}$ при температуре $T = 293\,\mathrm{K}$. Температура структур в процессе их облучения ультразвуком контролировалась. Звукопроводом между пьезопреобразователем, электрически соединенным с ультразвуковым генератором,

и MD–Si-структурой являлась жидкость (этиловый спирт). Мощность УЗВ определялась радиометрическим и капиллярным методами с точностью до нескольких mW/cm^2 [12], а частота волн контролировалась электронным частотомером, соединенным с ульразвуковым генератором. Для определения величины заряда поверхностных состояний в MD–Si-структурах применялся метод высокочастотных вольт-емкостных (C–V)-характеристик [13]. Измерения характеристик проводились компенсационным методом при помощи установки, аналогичной той, что представлена в литературе [14].

Характеристики измерялись каждые 5 min после облучения структур ультразвуком. Было обнаружено, что наиболее заметное изменение электрофизических характеристик наблюдается для MD–Si-структур, которые были облучены ультразвуковыми волнами в диапазонах частот $f \geqslant 15\,\mathrm{MHz}$ и при величине $t > 45\,\mathrm{min}$.

На рис. 1 приведены экспериментальные (C–V)-характеристики для MD–Si-структуры № 21 ($\rho = 51\Omega \cdot \mathrm{cm}$, толщина окисного слоя $d = 0.5\,\mu\mathrm{m}$ и его емкость $C_O = 212\,\mathrm{pF}$). Из приведенных зависимостей видно, что ультразвуковое воздействие приводит к сдвигу (C–V)-характеристик по оси напряжений. (C–V)-характеристики сдвигались в сторону увеличения напряжения смещения U, если $P = 0.1 \div 1\,\mathrm{W/cm^2}$. Характеристики сдвигались в сторону уменьшения величины U, если $P \geqslant 1.5 \div 2\,\mathrm{W/cm^2}$. Кроме того, изменяется форма этих (C–V)-характеристик. Такое поведение (C–V)-характеристик свидетельствует об изменении как величины заряда, встроенного в окисный слой, так и величины заряда поверхностных состояний [13,15]. Следует отметить, что закономерности обнаруженного акустостимулированного изменения (C–V)-характеристик были одинаковы для всех исследованных MD–Si-структур независимо от удельного сопротивления ρ исходных p-Si-монокристаллов.

На рис. 2 показано изменение энергетического спектра и плотности поверхностных зарядовых состояний N_{SS} в MD–Si-структуре № 21 до (кривая *1*) и после облучения (кривые *2* и *3*) ультразвуковыми волнами одинаковой частоты ($f = 15\,\mathrm{MHz}$), но различной мощности ($P = 1\,\mathrm{W/cm^2}$ и $P = 5\,\mathrm{W/cm^2}$). Из приведенных зависимостей видно, что после прохождения ультразвуковых волн мощностью $P \leqslant 1\,\mathrm{W/cm^2}$ имеет место уменьшение плотности зарядовых состояний, достигающее величин $N_{SS} = (11 \div 25) \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm^{-2}}$ при значениях $E_C - E = 0.2 \div 0.4\,\mathrm{eV}$ (рис. 2, кривая *2*). После прохождения через MD–Si-структуру ультразвуковых волн мощностью $P \geqslant 5\,\mathrm{W/cm^2}$ наблюдалось увеличение N_{SS}

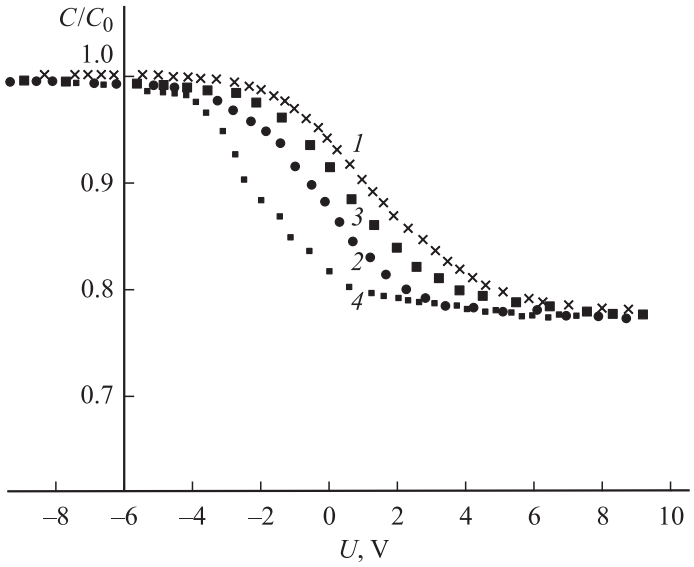

Рис. 1. Экспериментальные (C–V)-характеристики МД–Si-структуры № 21, $T = 293$ K, $N_{SS} = 3.12 \cdot 10^9$ cm^{-2}. *1* — теоретическая кривая; *2* — экспериментальная кривая, мощность $P = 0$ W/cm^2; *3* — $P = 1$ W/cm^2; *4* — $P_L = 5$ W/cm^2.

(рис. 2, кривая *3*). Такие УЗВ мы называем ультразвуковыми волнами пороговой мощности (средней мощности) $P = P_L$. При пороговых мощностях 1.0 W/cm^2 $\leqslant P_L \leqslant$ 5 W/cm^2 наблюдается генерация дефектов различного типа в объеме, приповерхностных слоях полупроводника, акустостимулированная диффузия примеси [3,4] и выход некоторых видов дефектов на поверхность полупроводника [16].

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. В переходном слое, вблизи границы раздела *p*-Si-монокристалл–окисный слой и в приповерхностных слоях *p*-Si-монокристалла, существует упругая деформация, приводящая к возникновению нестабильных дефектов [8]. Прохождение ультразвуковой волны мощностью $P \leqslant 1.0$ W/cm^2 через такие структуры стимулирует процесс диффузии нестабильных дефектов и атомов примеси от поверхности в глубь кристалла с их последующей локализацией в положениях с абсолютным минимумом свободной энергии. Акустостимулированная диффузия

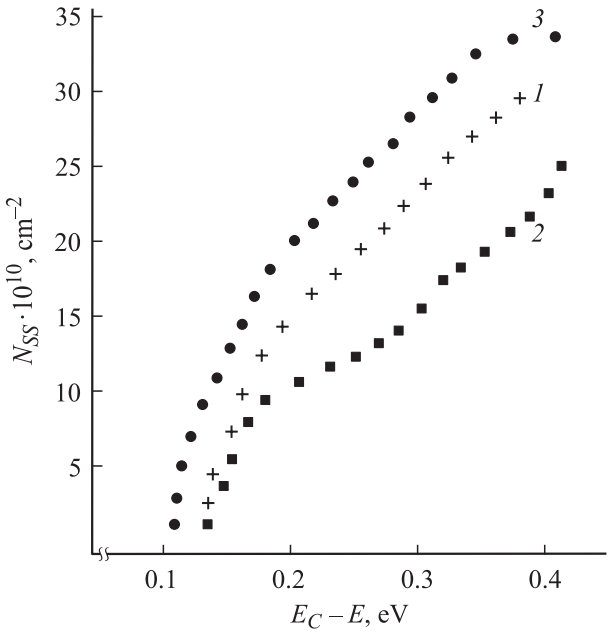

Рис. 2. Энергетический спектр плотности поверхностных состояний в МД–Si-структуре № 21 до и после облучения ультразвуком различной мощности, $T = 293$ K: *1* — до облучения ультразвуком мощностью $P = 0$ W/cm^2; *2* — $P = 1$ W/cm^2; *3* — $P_L = 5$ W/cm^2. E_C — энергия дна зоны проводимости.

заряженных дефектов от границы раздела приводит к уменьшению величины плотности поверхностных состояний N_{SS}.

Ультразвуковая обработка при пороговой мощности ультразвука (P_L) в интервале $1.0\,\mathrm{W/cm^2} \leqslant P_L \leqslant 5\,\mathrm{W/cm^2}$ приводит к возникновению различных видов дефектов в объеме и в приповерхностных слоях, а также и к акустостимулированной диффузии атомов. При этом величина N_{SS}, естественно, также меняется. Однако ультразвуковая обработка полупроводника ультразвуком пороговой мощности имеет некоторые особенности. Эти особенности, вероятно, относятся к возникновению дефектов в приповерхностной области, описанных в работах [16,17]. Диффундирующие в ультразвуковом поле атомы примеси могут оседать на таких дефектах и образовывать „примесные“ облака (типа „атмо-

сферы Коттрела“ [18]), изменяющие плотность заряда поверхностных состояний и их энергетический спектр (рис. 1, кривая *3*; рис. 2, кривая *3*). То есть ультразвуковая обработка при пороговых мощностях ультразвука приводит к появлению новых дефектов в приповерхностной области полупроводника и в результате величина N_{SS} увеличивается.

Таким образом, величина плотности заряда поверхностных состояний кремния и их энергетический спектр могут регулироваться выбором мощности P ультразвуковой волны. Наблюдаемые акустостимулированные эффекты уменьшения или увеличения величины N_{SS} возникают из-за изменения ультразвуком дефектной подсистемы приповерхностных слоев Si-монокристаллов. Эти эффекты проявляются в той или иной степени в *p*-Si-монокристаллах независимо от величины их удельного сопротивления. Наиболее важным является то, что эти эффекты могут успешно использоваться на практике для улучшения функциональных характеристик MDS-устройств (MDS-фотоприемники, солнечные элементы на основе кремния и т. д.).

Работа финансировалась Государственной научно-технической программой Узбекистана (грант № 13-035) и Академией наук Узбекистана (грант ФПФИ № 29-06).

Авторы выражают благодарность В.В. Володарскому (Россия, г. Обнинск) за помощь в работе.

Список литературы

[1] *Заверюхин Б.Н., Кревчик В.Д., Муминов Р.А.* // Тез. докл. XXXIII Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. М.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1983. 19–21 апреля С. 530.
[2] *Гаибов А.Г., Заверюхин Б.Н., Кревчик В.Д.* // Там же. С. 531.
[3] *Гаибов А.Г., Заверюхин Б.Н., Кревчик В.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 10. С. 616–620.
[4] *Заверюхина Е.Б., Заверюхина Н.Н., Лезилова Л.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 1. С. 54–66.
[5] *Заверюхин Б.Н., Кревчик В.Д., Муминов Р.А.* и др. // Физика и техника полупроводников. 1986. Т. 20. В. 3. С. 525–528.
[6] *Олих О.Я., Островский И.В.* // Физика твердого тела. 2002. Т. 44. В. 7. С. 1198–2001.
[7] *Ермолович И.Б., Миленин В.В., Конакова Р.В.* и др. // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. В. 4. С. 503–507.

[8] *Валиев К.А., Козлов Б.И., Кокин А.А.* // Микроэлектроника. 1972. Т. 1. В. 5. С. 26–34.
[9] *Литовченко В.Г., Ковбасюк В.П., Садовничий А.А.* // Полупроводниковая техника и микроэлектроника: Сборник. Киев: Наук. думка, 1970. В. 4. С. 39.
[10] *Парчинский П.Б., Власов С.И., Лигай Л.Г.* // ФТП. 2006. Т. 40. В. 7. С. 829–832.
[11] *Парчинский П.Б.* // Микроэлектроника. 2005. Т. 34. № 6. С. 420–432.
[12] *Майер В.В.* Простые опыты с ультразвуком. М.: Наука, 1978. С. 109–132.
[13] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. Ч. 3. Гл. 5. С. 257–324. (*Sze S.M.* Physics of Semiconductor Devices. Second edition. A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons. New York. Brisbane. Toronto. Singapore. 1981).
[14] *Берман Л.С., Власов С.И., Брискин В.С., Ременюк А.Д.* // Заводская лаборатория. 1980. Т. 46. № 3. С. 242–252.
[15] *Terman L.M.* // Sol. Stat. Elect. 1962. № 5. P. 803–831.
[16] *Островский И.В., Стеленко Л.П., Надточий А.Б.* // Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 24. В. 3. С. 257–260.
[17] *Заверюхин Б.Н., Заверюхина Н.Н., Турсункулов О.М.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 18. С. 1–2.
[18] *Матаре Г.* Электроника дефектов в полупроводниках. М.: Мир, 1974. *Herbert F. Matare*. Defect Electronics in Semiconductors. Wiley-Interscience a Division of John Wiley and Sons, Inc. New York–London–Sydney–Toronto. 1971. Гл. 11. С. 331–343.