

04;06;10;11;12

Модификация приповерхностных слоев n -кремния ионами водорода в высоковольтном импульсном разряде пучкового типа

© В.П. Демкин, С.В. Мельничук, Б.С. Семухин

Томский государственный университет
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 4 октября 2004 г.

Проведено микролегирование приповерхностных слоев n -кремния ионами водорода в плазме пучкового типа. Изучены зависимости удельного сопротивления и тока проводимости от времени легирования водородом. Обнаружено наличие фотоэда у модифицированного кремния. Дан качественный анализ полученных результатов.

Введение. В работе авторов [1] впервые был применен метод микролегирования полупроводниковых материалов в высоковольтном импульсном разряде пучкового типа. Характерной особенностью разряда данного типа является наличие в плазме пучка электронов, который формируется в межэлектродном зазоре с сетчатым анодом. Давление в газоразрядном объеме и импульс напряжения на электродах подбираются так, что большая часть электронной компоненты плазмы в межэлектродном зазоре переводится в режим „убегания“ [2,3]. Методы поляризационной диагностики [4] и численное моделирование газокинетических процессов в плазме [5] показывают, что, покидая ускоряющий промежуток через сетчатый анод, электроны имеют энергию порядка приложенного напряжения и, как следствие, обладают высокой проникающей и ионизирующей способностью. Гибкая схема управления параметрами пучка электронов позволяет создавать плазму с требуемыми свойствами на значительных расстояниях от межэлектродного зазора, что является важным при решении таких задач, как микролегирование полупроводниковых материалов ионами водорода.

Исследования, проведенные в работе [1], свидетельствуют о возможности управления процессами модифицирования полупроводникового материала — монокристаллического GaAs при обработке ионами водорода. Показано, что происходит изменение структуры поверхности материала, которая становится более однородной. В настоящей работе приводятся результаты исследования структуры и свойств полупроводникового материала — Si, подвергнутого модифицированию ионами водорода в высоковольтном импульсном разряде.

Результаты эксперимента. В качестве исходного материала был выбран кремний *n*-типа, используемый для создания солнечных батарей. Образцы размерами 10×10 mm были вырезаны из одной пластины.

Обработку исходных образцов кремния проводили на установке и при условиях, описанных в работе [1]. Образцы помещали на столик, удаленный от сетчатого анода на 15 mm. После дегазации рабочий объем трубки заполняли гелием и водородом с давлениями 7 и 1 Торг соответственно. На катод и сетчатый анод (прозрачность 80%), удаленные друг от друга на 0.9 mm, подавали высоковольтные импульсы напряжения с амплитудой $U = 2$ kV, длительностью $2 \mu\text{s}$ и частотой 2.5 kHz. Температура плазменного состава — 310–320 K. Обработку проводили при различных временах экспозиции 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24 min соответственно, по три образца на каждой временной точке.

Измерение концентрации носителей тока проводили на промышленной установке определения концентрации основных носителей *n/p* материалов, измерение удельного сопротивления на установке ИУС-2, определение типа электропроводности на установке ТП-201.

На рис. 1 представлены зависимости удельного сопротивления и тока проводимости от времени воздействия ионами водорода на Si. Как видно из рис. 1, до $t = 6$ min происходит уменьшение удельного сопротивления ρ . Ток проводимости I в указанном интервале не увеличивается в пределах погрешности.

Изменения удельного электрического сопротивления при временах обработки до 6 min можно объяснить перестройкой блочной структуры кремния. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что средняя величина блоков уменьшается от 71 nm в исходном состоянии до 43 nm после обработки в течение 3 min. Кроме того, функция распределения блоков становится более приближенной к распределению Гаусса, что свидетельствует об упорядочении материала в процессе протонирования и соответственно уменьшении ρ .

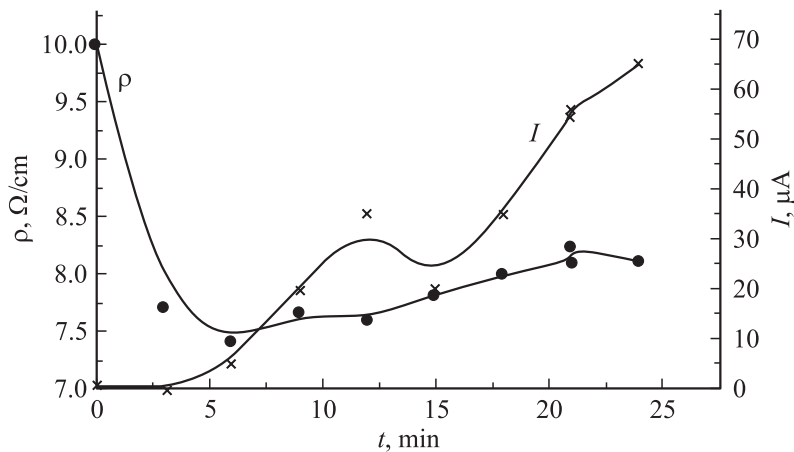


Рис. 1. Изменение удельного сопротивления и тока проводимости в монокристаллическом n -кремнии в зависимости от времени обработки.

На рис. 2 представлены картины поверхности одного и того же образца до (*a*) и после (*b*) модификации при $t = 0$ и $t = 3$ min соответственно, снятые на атомно-силовом микроскопе с разрешением 6 nm. Из приведенных картин хорошо видно, что ионная имплантация приводит к существенному изменению рельефа обрабатываемой поверхности, которая становится более однородной. Это подтверждает результаты работы [1].

Уменьшение величины удельного сопротивления до $t = 6$ min по сравнению с необработанной поверхностью можно связать с насыщением тонкого приповерхностного слоя Si- n -ионами водорода и созданием иного типа проводимости. Об этом свидетельствует и уменьшение тока проводимости до нуля, что лежит ниже предела чувствительности прибора по измерению тока проводимости ТП-201. В работе [6] показано, что при имплантации водорода в кремний до 0.5 h наблюдалась смена типа проводимости с p на n , а при увеличении времени до 3 h такой смены нет.

При экспозициях от $t = 6$ min и более удельное сопротивление ρ и ток I возрастают до $8.3 \Omega/\text{cm}$ и $65 \mu\text{A}$ соответственно. Увеличение

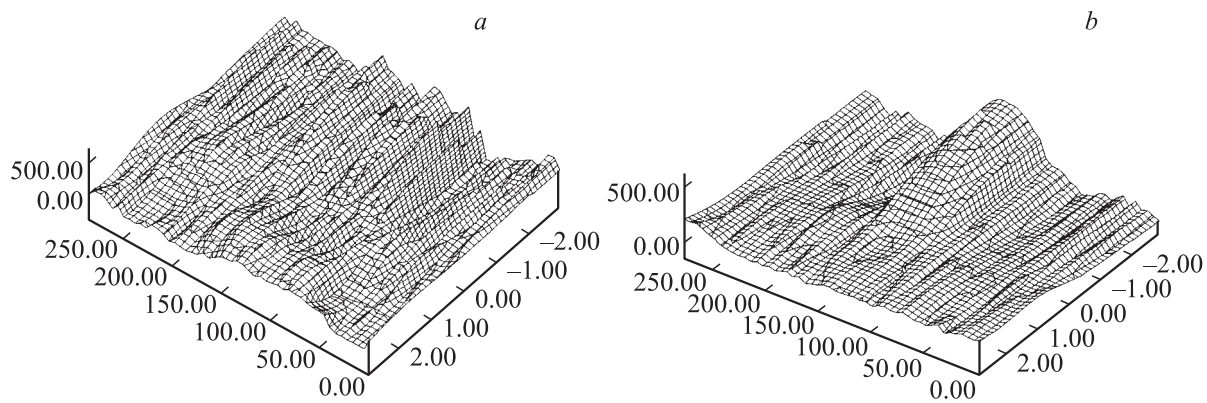


Рис. 2. Поверхность *n*-кремния до (а) и после (б) 3-минутной обработки (увеличение $\times 6$ nm).



Рис. 3. Оптическое изображение торца кремния, обработанного 15 min (увеличение $\times 500$).

удельного сопротивления можно связать с образованием комплексов $\text{Si}^- - \text{H}^+$ и уменьшением доли комплексов $\text{Si}^- - \text{P}^+$.

В работе [7] показано, что в реальных кристаллах кремния могут образовываться линейные структуры типа $\text{Si}-\text{H}$ или $\text{Si}-\text{H}_2$. Здесь же приведены доказательства того, что при концентрации донорно-акцепторных центров водород-кремний порядка 10^{17} cm^{-3} могут образовываться кластеры $\text{Si}-\text{H}$ из большого числа атомов. Таким образом, в результате обработки приповерхностный слой кремния состоит из большого числа „чистых“ атомов кремния Si , небольшой доли $\text{Si}^- - \text{P}^+$ и совсем малой доли свободного H^+ . Градиент концентрации этих составляющих, особенно в приповерхностном слое, приводит к возникновению внутреннего поля. Отметим, что согласно [6], при дозах 10^{16} cm^{-2} пробег протонов достигает $0.5 \mu\text{m}$. По нашим измерениям после 15 min обработки толщина слоя примерно $3-4 \mu\text{m}$. На рис. 3 приведено оптическое изображение кремния (масштаб $10 \mu\text{m}$), где темная полоска на верхней поверхности образца соответствует образовавшемуся приповерхностному слою, обогащенному H^+ .

Фотоэдс в зависимости от освещаемой стороны модифицированного *n*-кремния

№	Освещение	U необработан., mV	U обработан., mV
1	Нет	2	1
2	Есть	7	3

Внутреннее поле за счет поляризации вещества (главным образом $\text{Si}^- - \text{P}^+$) приводит к появлению двойного слоя. Концентрация $\text{Si}^- - \text{P}^+$ в приповерхностном слое намного меньше, чем внутри. В результате возникает фотоэдс, так как заряды разделены и внутреннее сопротивление велико. Как следует из литературы [8], величина удельной фотоэдс прямо пропорциональна градиенту удельного сопротивления, возрастание же фотоэдс, в свою очередь, связано с уменьшением концентрации свободных носителей заряда в облученной части полупроводника. Для проверки наличия фотоэдс в обработанных образцах были проведены соответствующие измерения. Поверхность обработанного 20 min кремния освещали лампой накаливания, результаты измерения фотоэдс приведены в таблице.

Видно, что изменение фотоэдс как на обработанной поверхности, так и на не обработанной составляет величину в несколько mV, а соотношение при освещении и без отличается в три раза. Это еще раз подтверждает предположение об уменьшении концентрации $\text{Si}^- - \text{P}^+$ в приповерхностном слое.

Заключение.

1. Экспериментально обнаружено существенное изменение структуры и свойств приповерхностных слоев *n*-кремния в результате обработки ионами водорода в высоковольтном импульсном разряде пучкового типа.

2. Предложено качественное объяснение поведения удельного сопротивления и формирования фотоэдс, базирующееся на представлении об образовании водородных комплексов $\text{Si}^- - \text{H}^+$.

3. Предлагается использование методики для создания различных структур в микроэлектронике, оптоэлектронике.

Список литературы

- [1] *Анисимов, В.В., Демкин В.П., Квинт И.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 7. С. 35–42.
- [2] *Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е.* Основы физики плазмы. 1977. 384 с.
- [3] *Бохан П.А.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. С. 2032–2037.
- [4] *Демкин В.П., Королев Б.В., Мельничук С.В.* // Физика плазмы. 1995. Т. 38. № 1. С. 26–33.
- [5] *Демкин В.П., Королев Б.В., Мельничук С.В.* // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 1. С. 81–84.
- [6] *Антонова И.В., Стась В.Ф., Попов В.П., Ободников В.И., Гутаковский А.К.* // Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 34. В. 9. С. 1095–1098.
- [7] *Машин А.И., Хохлов А.Ф., Разуваев А.Г., Игнатов С.К., Щепалов А.А.* // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. В. 10. С. 1253–1259.
- [8] *Башелейшвили З.В., Пагава Т.А.* // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. В. 8. С. 924–926.