

06;12

## Свойства термообработанного кремния, легированного эрбием при выращивании

© С.И. Власов, Д.Э. Назыров, А.А. Иминов, С.С. Худайбердиев

Ташкентский государственный университет им. М. Улугбека, Узбекистан

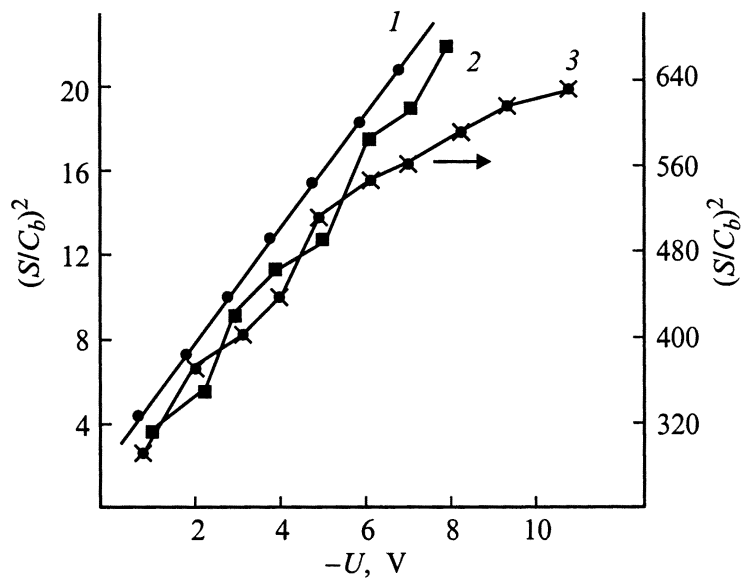
Поступило в Редакцию 30 октября 1999 г.

Впервые исследовано влияние термических обработок на электрические свойства кремния *n*-типа, легированного эрбием при выращивании. Показано, что при термических обработках в интервале температур  $900 \div 1200^\circ\text{C}$  в течение 1–2 h в воздухе с последующей закалкой или медленным охлаждением наличие эрбия в кремнии приводит к подавлению высокотемпературных дефектов.

Одной из актуальных проблем физики полупроводникового материала является повышение термической и радиационной стабильности кремния, что обусловило интерес к легированию кремния резкоземельными элементами, приводящему к повышению устойчивости кремния к внешним воздействиям [1–4]. В связи с этим заслуживает внимания исследование кремния, легированного резкоземельным элементом эрбием, и влияние на его свойства высокотемпературных термических обработок (ВТО).

В данной работе приводятся некоторые результаты исследований взаимодействия эрбия с дефектами термообработки в кремнии *n*-типа.

Для исследований использовались образцы *n*-Si с удельными сопротивлениями  $\sim 20$  и  $50 \Omega \cdot \text{cm}$ , легированные эрбием при выращивании из расплава методом Чохральского. Концентрация эрбия по данным нейтронно-активационного анализа составляла  $10^{15} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . В качестве контрольных использовались образцы *n*-Si с соответствующими удельными сопротивлениями без дополнительного легирования эрбием. Все образцы (размерами  $5 \times 10 \times 15 \text{ mm}$ ) шлифовались микропорошками, последовательно кипятились в толуоле, ацетоне, и растворе  $3\text{HCl}:\text{HNO}_3$ , протравливались в травителе CP-4 и промывались деионизованной водой. Далее на них создавался барьер Шоттки путем напыления золота в вакууме при температурах подложки  $< 373 \text{ K}$ .



Типичная высокочастотная зависимость  $(S/C_b)^2 \sim f(u)$  для образцов кремния  $n$ -типа, контрольных (1), легированных эрбием при выращивании (2), термообработанных с эрбием (3).

В качестве основных методов исследования использовались изотермическая релаксация емкости [5] и распределение фото-э.д.с. [6]. Для исследования глубоких уровней, расположенных в нижней половине запрещенной зоны  $n$ -Si, была применена оптическая перезарядка. Степень однородности образцов по удельному сопротивлению контролировалась по распределению фото-э.д.с. на поверхности образцов при засветке сфокусированным лазерным лучом ( $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ,  $P = 10 \text{ mW}$ , частота модуляции света  $f = 350 \text{ Hz}$ ).

Полученные высокочастотные зависимости  $(S/C_b)^2 \sim f(u)$  в контрольных (см. рисунок, кривая 1) и легированных при выращивании эрбием образцах (кривая 2) показали, что в легированных эрбием образцах имеет место значительный разброс концентрации ионизированной примеси. Методом изотермической релаксации емкости во всех исследуемых образцах в интервале температур 77–300 К перезарядки каких-либо цен-

тров не обнаружено ( $N_d < 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ). Термообработка в интервале температур  $1273 \div 1473 \text{ K}$  в течение 1–2 h с последующей закалкой в масле или медленным охлаждением привела к компенсации образцов Si(Er), таким образом, измеряемая емкость для образцов, изготовленных на основе Si(Er) с концентрацией эрбия в кремнии  $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , не зависит от величины приложенного напряжения до температур  $\sim 80 \text{ K}$  и для образцов с концентрацией эрбия в кремнии  $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  до  $100 \text{ K}$ , т. е.  $C_b \approx C_h$  [5,7], причем степень компенсации в быстроохлажденных образцах была высокой. Термообработка при  $1173 \text{ K}$  приводит к уменьшению концентрации ионизированных центров в образцах от  $3 \cdot 10^{14}$  до  $2.6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Однако образования глубоких центров в запрещенной зоне кремния не обнаружено ( $N_d < 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ). Следовательно, можно предположить, что эрбий, как и другие редкоземельные элементы [3,8,9], образует мелкий акцепторный уровень в нижней половине запрещенной зоны, что подтверждает его акцепторную природу [3,10,11].

В случае контрольных (без эрбия) образцов после термических обработок ( $1173\text{--}1473 \text{ K}$ ) вышеупомянутым методом обнаружены следующие глубокие уровни:  $(E_c - 0.17 \div 0.22) \text{ eV}$ ,  $(E_c - 0.4) \text{ eV}$ ,  $(E_c - 0.54) \text{ eV}$ ,  $(E_v + 0.2) \text{ eV}$ ,  $(E_v + 0.4) \text{ eV}$ , параметры которых совпадают с данными работы [12,13]. Концентрация всех этих центров не превышала  $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .

В компенсированных эрбием образцах невозможно было определить перезарядки глубоких центров, несмотря на то, что путем низкотемпературного отжига (НТО) (при  $373 \text{ K}$  в течение 15 min) снималась компенсация в образцах, подвергнутых ВТО при  $1273 \div 1473 \text{ K}$  в течение одного часа. НТО привел к появлению ионизированных центров  $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  в образцах, медленно охлажденных после ВТО, а в закалочных образцах  $\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

Дальнейшая низкотемпературная обработка при  $473 \text{ K}$  или даже при  $373 \text{ K}$  приводит к интенсивному восстановлению исходного значения концентрации ионизированных центров.

Исследование распределения фото-э.д.с. в образцах с эрбием выявило существенную неоднородность поверхностного удельного сопротивления, что, по-видимому, является результатом неравномерного распределения атомов и преципитатов самого эрбия. Также неравномерным является распределение концентрации ионизированных центров по глубине термообработанных образцов с эрбием (см. рисунок, кривая 3).

Таким образом, наличие эрбия в кремнии приводит к подавлению высокотемпературных дефектов. Чем больше концентрация эрбия в кремнии, тем больше степень компенсации образцов и степень подавления термодфектов. Подавление термодфектов может быть обусловлено очищением объема кремния от примесей геттерированием резкоземельного элемента эрбия [14] и образованием комплексов "эрбий-дефект" акцепторной природы.

## Список литературы

- [1] Mandelkorn J., Schwartz L., Broder J., Kautz H., Ulman R. // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. N 7. P. 2258–2260.
- [2] Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Волле В.М., Воронков В.Б., Грехов И.В., Добровенский В.В., Шагун А.И. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 5. С. 917–928.
- [3] Назыров Д.Э., Регель А.Р., Куликов Г.С. // Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1987. № 1122. С. 1–56.
- [4] Малкович Р.Ш., Назыров Д.Э. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 15. В. 4. С. 38–40.
- [5] Берман Л.С., Лебедев А.А. // Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., Наука, 1981. 176 с.
- [6] Павлов Л.П. // Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высш. школа, 1987. 239 с.
- [7] Берман Л.С., Власов С.И. // ФТП. 1978. Т. 10. В. 3, С. 559–561.
- [8] Бахадырханов М.К., Талипов Ф.М. // УФЖ. 1992. № 6. С. 5–18.
- [9] Петров В.В., Просолович В.С., Карпов Ю.А., Харченко В.Л. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 7. С. 1339–1342.
- [10] Назыров Д.Э., Куликов Г.С., Малкович Р.Ш. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 9. С. 1653–1654.
- [11] Зайнабидинов С.З., Назыров Д.Э., Акбаров А.Ж., Иминов А.А., Тоштемиров Т.М. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 2. С. 68–71.
- [12] Абдурахманов К.П., Шеримбетов Т., Котов Б.А., Амиров Ю.Я., Назыров Д.Э. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 11. С. 1339. Деп. ВИНТИ. № Р4155.
- [13] Абдурахманов К.П., Ходжаев М.Д., Умаров Т.А., Тешабаев А.Т. // Изв. АН УзССР. 1986. В. 3. С. 64–66.
- [14] Малкович Р.Ш., Назыров Д.Э. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 4. С. 38–40.