

СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА
ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЕЛЕНОМ

Л.П. Авакянц, В.С. Горелик, Е.Д. Образцова, Р.Н. Хашимов

На основе методики разностной спектроскопии комбинационного рассеяния света вблизи поверхности обнаружены сдвиги частоты и уширение фоновой линии при ионной имплантации кремния селеном.

Комбинационное рассеяние (КР) света от приповерхностной области кристаллов кремния, подвергнутых имплантации ионами В, Р (BF_2), As, Sb при различных режимах, изучалось в работах /1 – 5/. Как выяснилось в результате этих исследований, интенсивность КР на фундаментальном оптическом колебании ($\nu = 520,5 \text{ см}^{-1}$) падает с увеличением дозы имплантируемых ионов; кроме того, интенсивность соответствующей линии сильно зависит от энергии и массы имплантируемых ионов. Такой факт связывался с разупорядочением приповерхностного слоя исследуемого кристалла. В предельном случае аморфного приповерхностного слоя максимум в спектре КР, соответствующий фундаментальному оптическому колебанию, полностью исчезал; при этом в области более низких частот возникала широкая полоса, форма которой коррелировала с функцией плотности фоновых состояний исходного кристалла.

В цитированных работах не удалось обнаружить сдвигов частоты фундаментального максимума КР в результате ионной имплантации. Кроме того, в них не учитывались ошибки, возникающие при последовательной записи спектров кристаллов, подвергнутых ионной имплантации, за счет возможного изменения режимов работы источника возбуждающего излучения и регистрирующей аппаратуры.

В данной работе была поставлена задача повышения точности измерений параметров спектров КР образцов объектов путем использования одного из вариантов методики разностной спектроскопии комбинационного рассеяния света (РСКР). Аналогичная методика применялась ранее для анализа малых изменений частот в спектрах КР некоторых жидкостей и биологических объектов /6, 7/. Высокая чувствительность этого метода к малым изменениям в спектрах КР достигается за счет того, что анализируются разности сигналов КР эталонного и исследуемого образцов, записанных в близкие моменты времени при одинаковых условиях.

В настоящей работе этот метод используется для исследования КР кристаллов кремния, имплантированного ионами селена с энергией 100 кэВ и дозами $1 \cdot 10^{13}$, $3 \cdot 10^{13}$, $3 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. В качестве эталонного служил образец неимплантированного кремния из той же серии. Блок-схема используемой экспериментальной установки приведена на рис. 1. Для возбуждения спектров КР в геометрии "на отражение" использовался аргоновый лазер ИА-120 с $\lambda = 488,0 \text{ нм}$ мощностью 400 мВт. Спектры регистрировались с использованием метода счета фотонов на спектрометре ДФС-12, в котором был установлен шаговый двигатель. Управление спектрометром и накопление сигнала осуществлялось микро-ЭВМ "Электроника-60", входящей в состав комплекса ДВК-2 и сопряженной с экспериментальной установкой в стандарте КАМАК.

Работа установки в режиме РСКР происходила следующим образом. Для каждого положения решетки монохроматора сфокусированный лазерный луч сначала поступал на эталонный образец S_1 . Рассеянный свет, собранный объективом L_1 , фокусировался на входную щель спектрометра объективом L_2 и, пройдя через монохроматор, поступал на фотоэлектронный умножитель ФЭУ-136, работающий в одноэлектронном режиме. Импульсы с ФЭУ, зарегистрированные счетчиком импульсов за время, определяемое таймером, заносились в массив памяти ЭВМ, соответствующий первому каналу. Затем, по команде с ЭВМ, соленоид 1 перемещал подвижное зеркало M_1 так, что лазерный луч переключался на образец S_2 , и система регистрировала сигнал КР от второго образца. Результат измерений заносился в массив данных второго канала, после чего модуль управления шаговым двигателем (МУШД) перемещал решетку монохроматора

в новое положение, и процесс повторялся. При используемой нами программной синхронизации установки обеспечивалась идентичность обоих каналов. При обработке спектров предполагалось, что линия имеет лоренцеву форму на экспоненциальном фоне; при этом подгоночными параметрами являлись пиковая интенсивность, положение и ширина линии, а также амплитуда и показатель степени фона. Проводилось вычитание величины сигнала КР исследуемого образца от соответствующего значения сигнала КР эталонного образца при каждом фиксированном положении дифракционных решеток с учетом нормировки на максимум интенсивности КР фундаментального колебания. Аппаратная ошибка при определении относительного сдвига частот двух одинаковых образцов методом РСКР не превосходила $0,08 \pm 0,05 \text{ см}^{-1}$; дополнительный контроль этой ошибки проводился по разрядной линии лазера, соответствующей частоте $529,7 \text{ см}^{-1}$. Смещение этой линии во всех экспериментах не превышало $0,05 \text{ см}^{-1}$. Спектральная ширина щели составляла $\sim 1 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 2 приведены примеры полученных спектров КР эталонного и имплантированного кремния в области фундаментального оптического колебания ($\nu = 520,5 \text{ см}^{-1}$). Справа приведены соответствующие разностные спектры КР, полученные при нормировке интенсивности максимума КР для обоих спектров на одну и ту же величину.

Как видно из рис. 2, интенсивность линии КР имплантированных образцов падает с увеличением дозы имплантации (см. кривые 2 и 3). Наблюдаемая форма разностных спектров, соответствующих нормированной интенсивности, свидетельствует о существовании как сдвига частоты, так и уширения линии КР фундаментального колебания [7].

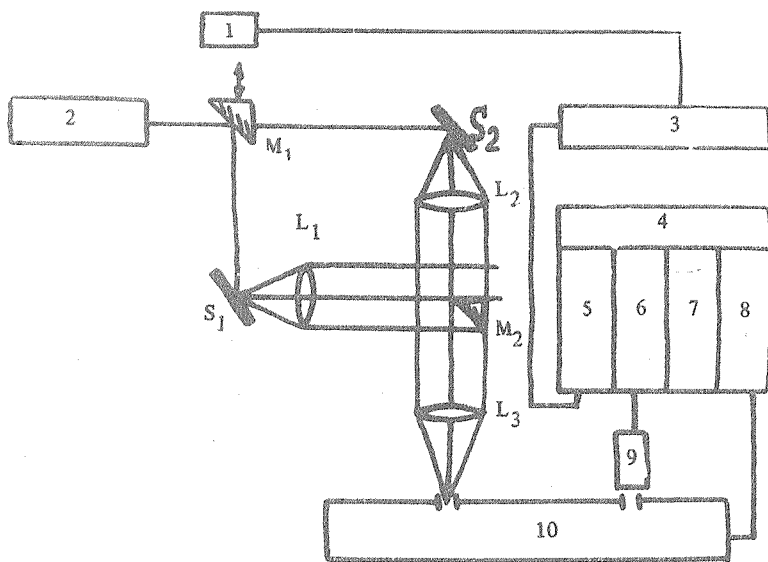


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной экспериментальной установки для РСКР приповерхностных слоев полупроводников: 1 — управляющий соленоид; 2 — лазер; 3 — ДВК-2; 4 — шина КАМАК; 5 — контроллер КАМАК; 6 — счетчик; 7 — таймер; 8 — МУШД; 9 — ФЭУ; 10 — спектрометр ДФС-12.

При дозах $1 \cdot 10^{13}$ и $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ используемая методика позволила зарегистрировать изменения частоты, равные соответственно $\Delta\nu_1 = (0,13 \pm 0,05) \text{ см}^{-1}$, $\Delta\nu_2 = (0,33 \pm 0,07) \text{ см}^{-1}$ и изменения ширины линий КР $\Delta\gamma_1 = (0,2 \pm 0,1) \text{ см}^{-1}$ и $\Delta\gamma_2 = (0,44 \pm 0,2) \text{ см}^{-1}$. При дозах $3 \cdot 10^{14}$ и $1 \cdot 10^{15}$ наблюдается падение интенсивности до уровня, близкого к уровню шумов. В этих условиях измерение сдвигов и уширений линий провести не удастся.

Рис. 3 иллюстрирует уменьшение интенсивности максимума КР на фундаментальном оптическом колебании кремния ($\nu = 520,5 \text{ см}^{-1}$) для различных доз ионной имплантации ($10^{13} \div 10^{15} \text{ см}^{-2}$). Наблюдаемый на рис. 3 характер спада интенсивности КР в зависимости от дозы имплантируемых ионов оказывается нелинейным при дозах $D > 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Наблюдаемый эффект сдвига частоты линии КР фундаментального колебания можно объяснить следующим образом. При достаточно больших энергиях ионов имплантированный слой находится не на самой поверхности кремния, а располагается на некоторой глубине, зависящей от массы и энергии имплантируемых ионов. Известно, например, что в случае имплантации ионами фосфора с энергией 100 кэВ глуби-

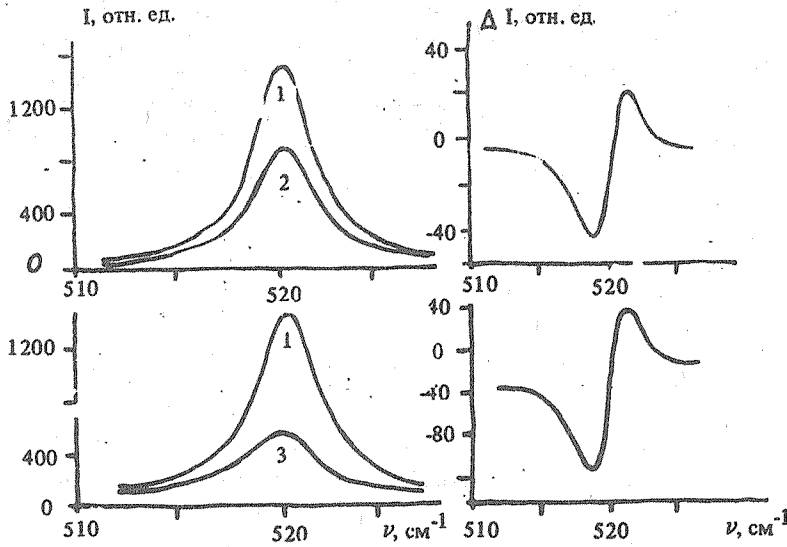
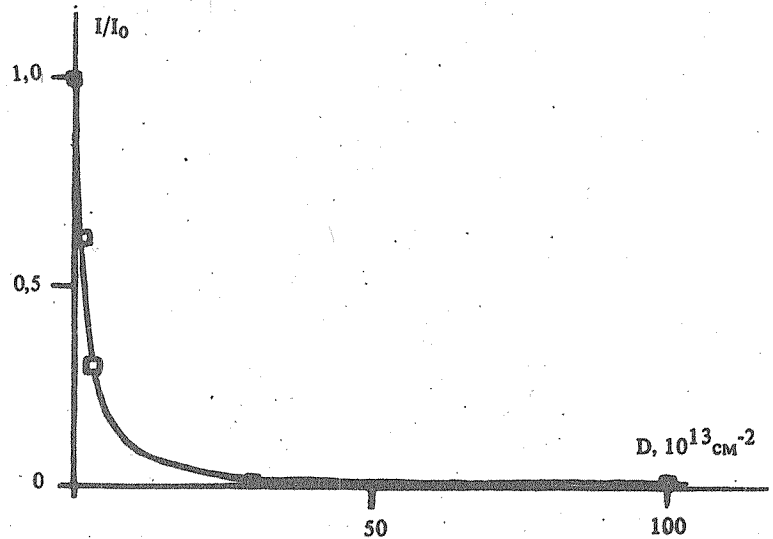


Рис. 2. Вид спектров КР и РСКР в кремнии, имплантированном селеном, при различных дозах: 1 – эталонный спектр; 2 – $D = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 3 – $D = 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Справа приведены соответствующие спектры РСКР $\Delta I = I_1 - I_2 I_{01} / I_{0i}$ где I_{01} , I_{0i} – пиковая интенсивность КР, $i = 2, 3$.

Рис. 3. Зависимость интенсивности КР в кремнии от дозы селена при ионной имплантации.



на залегания основного имплантированного слоя составляет 300 нм [3]. Для селена этот слой располагается ближе к поверхности кристалла вследствие большей массы ионов. Однако и в этом случае приповерхностная область кристалла должна быть существенно неоднородной, с резким повышением плотности вблизи некоторой глубины. В соответствии с [5, 8] это должно приводить к сдвигу частоты линии КР, обусловленному возникновением деформации растяжения.

Зарегистрированный сдвиг линий КР дает возможность рассчитать величину механического напряжения по методике, изложенной в [5, 8]. Напряжение, возникающее в кремнии при имплантации селеном, оказалось равным $\sim 10^8 \text{ Н/м}^2$, что на порядок меньше напряжений в эпитаксиальных пленках кремния, выращенных на сапфировых подложках [9].

Наблюдаемый эффект уширения линии КР фундаментального колебания при ионной имплантации может быть связан с возрастанием дефектности кристаллической решетки при внедрении примесных ионов. Это должно приводить также и к уменьшению интенсивности КР на фундаментальном колебании из-за нарушения периодичности кристаллической решетки.

Таким образом, на основе предлагаемой в данной работе методики РСКР для анализа спектров имплантированных приповерхностных слоев полупроводников обнаружены эффекты сдвига частоты и уширения линий КР при достаточно большой энергии имплантируемых ионов, и построены количественные характеристики изменения интенсивности КР в зависимости от дозы селена, имплантируемого в кремний. Полученные результаты позволяют оценить механические напряжения в приповерхностных слоях полупроводников, подвергнутых ионной имплантации, с точностью $\sim 10^8 \text{ Н/м}^2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baserman R., Bernstein T. Journ. Appl. Phys., 48, 1548 (1977).
2. Engstrom H., Bates J.B. Journ. Appl. Phys., 50, 2921 (1979).
3. Jain K.P. et al. Phys. Rev. B 32, 6688 (1985).
4. Горелик В.С., Сущинский М.М., Хашимов Р.Н. Труды ФИАН, 180, 127 (1987).
5. Хашимов Р.Н. и др. Препринт ФИАН № 174, М., 1984.
6. Koefen W. In "Advances in Infrared and Raman Spectroscopy", ed. Clark R.H.J., Hester R.E. (Heiden, Bellmark, New York), 1977, v.3, p. 1.
7. Rousseau D.L. J. Raman Spectroscopy, 10, 94 (1981).
8. Ganesan B., Maradudin A.A., Oitman J. Annal. of Phys., 56, 556 (1970).
9. Горелик В.С., Хашимов Р.Н., Сущинский М.М. Поверхность, физ., хим., мех., № 6, 77 (1985).

Поступила в редакцию 23 марта 1988 г.