

На этом основании можно прийти к заключению, что: а) в фазах II—VI висмут является типичным металлом с низкой плотностью энергетических состояний носителей заряда на уровне химического потенциала; б) металлический характер межатомных связей в указанных фазах VI усиливается с ростом давления.

Представляется наиболее вероятным, что в образовании металлической связи, обуславливающей экспериментально наблюдаемую барическую зависимость термоэдс, участвуют валентные $6s$ - и $6p$ -электроны Bi.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Khvostantsev L. G., Vereshchagin L. F., Uliyanitskaya N. M. // High Temp.-High Press. 1973. V. 5. N 2. P. 261—264.
- [2] Vijayakumar V., Vaidya S. N., Sampathkumaran E. V., Gupta L. C. // High Temp.-High Press. 1980. V. 12. N 6. P. 649—654.
- [3] Тонков Е. Ю. Фазовые превращения соединений при высоком давлении / Под ред. Е. Г. Понятовского. М., 1988. Т. 1. 464 с.
- [4] Khvostantsev L. G., Vereshchagin L. F., Novikov A. P. // High Temp.-High Press. 1977. V. 9. N 6. P. 637—639.
- [5] Onodera A. // High Temp.-High Press. 1987. V. 19. N 6. P. 579—609.
- [6] Скоропанов А. С., Валецкий Б. Л., Скумс В. Ф., Вечер А. А. // Сверхтвердые материалы. 1988. № 3. С. 61—63.

ЛФИМАН АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
22 августа 1989 г.

УДК 535.361

© Физика твердого тела, том 32, № 5, 1990
Solid State Physics, vol. 32, № 5, 1990

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В РАЗЛИЧНЫХ ФАЗАХ ИМПЛАНТИРОВАННОГО КРЕМНИЯ, ПОДВЕРГНУТОГО ЛАЗЕРНОМУ ОТЖИГУ

Л. П. Авакянц, В. С. Горелик, Е. Д. Образцова

Комбинационное рассеяние (КР) света от приповерхностной области кристаллов кремния, подвергнутых ионной имплантации, исследовалось ранее в работах [1—4]. Было показано, что при малых дозах имплантации происходит уменьшение интенсивности КР на фундаментальных решеточных модах, проявляющихся в спектрах первого и второго порядков [4]. Это интерпретировалось как следствие возникновения точечных дефектов при ионной имплантации. При возрастании дозы имплантации в спектре КР возникали дополнительные пики, коррелирующие с максимумами плотности фононных состояний, что свидетельствовало о разупорядочении кристаллической решетки и переходе ее в аморфное состояние. Область доз имплантации, при которых осуществлялся этот переход, определялась массой ионов; например, для бора эта величина составляла 10^{16} см $^{-2}$, а для сурьмы 10^{13} см $^{-2}$. При лазерном воздействии на поверхность имплантированного кремния наблюдался [5] процесс восстановления спектра КР, характерного для кристаллического кремния. Это свидетельствовало о лазерном отжиге разупорядоченности кристаллической решетки, возникшей в результате ионной имплантации. В то же время практически не был исследован характер эволюции спектров КР при последовательном увеличении энергии лазерного воздействия, отражающий динамику перехода приповерхностного слоя имплантированного кремния из аморфного в кристаллическое состояние.

В настоящей работе была поставлена задача выявления изменений в спектрах КР, обусловленных последовательным возрастанием дозы

имплантируемых ионов и энергии лазерного воздействия с целью выяснения фазового состояния решетки кремния на каждом из этапов имплантации и лазерного отжига. Исследовались кристаллы кремния, имплантированные бором, фосфором, мышьяком, селеном, сурьмой при энергии 50 кэВ и дозах имплантации 10^{12} — 10^{16} см $^{-2}$. Отжиг проводился рубиновым лазером, работающим в режиме модуляции добротности, импульсами с длительностью $2 \cdot 10^{-8}$ с и плотностью энергии в импульсе 50—1500 мДж/см 2 . Однородное распределение интенсивности лазерного излучения по сечению светового пятна на образце обеспечивалось за счет кварцевого диффузора. Это исключало возможность появления неоднородных структур при отжиге.

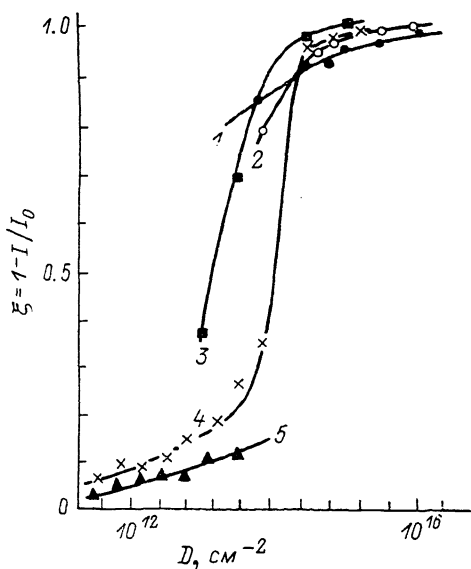


Рис. 1. Зависимость величины ξ от дозы имплантации для ионов Sb (1), As (2), Se (3), P (4), B (5).

1 — пиковая интенсивность линии КР первого порядка в имплантированном образце, I_0 — в эталонном кристаллическом кремнии. Энергия имплантации $E=50$ кэВ.

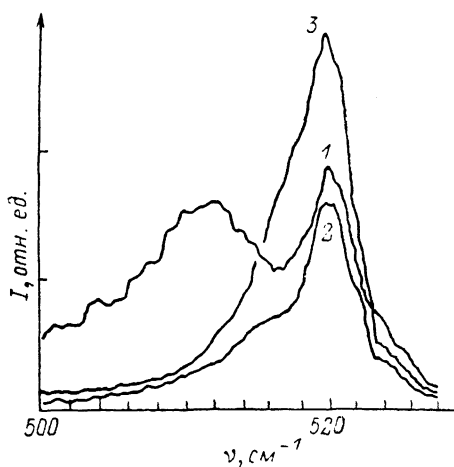


Рис. 2. Спектры КР первого порядка в области фундаментального колебания для кремния, имплантированного мышьяком и подвергнутого лазерному отжигу с плотностью энергии, равной 100 (1), 400 (2) и 1.5 Дж/см 2 (3).

Регистрация спектров КР проводилась по схеме «на отражение» с использованием автоматизированной установки [6] на основе спектрометра ДФС-12 и микро-ЭВМ «Электроника-60». Возбуждение спектров осуществлялось аргоновым лазером ($\lambda=488.0$ нм).

В спектре КР исходного кристаллического кремния присутствуют максимум фундаментального колебания 520.5 см $^{-1}$ и полосы второго порядка, ответственные за двухфононные процессы [7]. При увеличении дозы имплантации различными ионами происходит ослабление максимумов КР первого и второго порядков; начиная с некоторой, характерной для данного иона, дозы в спектре КР появляются полосы с максимумами 160 , 300 и 470 см $^{-1}$, соответствующие максимумам плотности однофононных состояний и свидетельствующие о переходе в аморфную фазу. График параметра $\xi=1-I/I_0$ (рис. 1) иллюстрирует характер изменения относительной интенсивности КР на фундаментальном колебании 520.5 см $^{-1}$ в зависимости от дозы имплантации для различных ионов. Можно считать, что в области линейного изменения параметра ξ при малых дозах имплантации происходит образование точечных дефектов при сохранении периодичности кристаллической решетки. Об этом свидетельствует и соответствующий спектр КР, в котором наблюдаются одно- и двухфононные полосы, относительная интенсивность которых изменяется при увеличении дозы имплантации. Нелинейное возрастание ξ на рис. 1 можно

объяснить резким увеличением поглощения возбуждающего излучения вследствие образования аморфной фазы с включенными в нее микрокристаллитами. Свидетельством наличия микрокристаллитов является возникновение в спектре дополнительного пика вблизи фундаментального максимума со стороны более низких частот на фоне широких аморфных полос. При больших дозах параметр ξ выходит на насыщение, что соответствует полной аморфизации приповерхностного слоя. При этом в спектре КР остаются лишь широкие полосы аморфного кремния. Таким образом, величина ξ может быть связана с параметром порядка для рассматриваемого фазового перехода из упорядоченного кристаллического в разупорядоченное аморфное состояние кремния.

На рис. 2 показана серия спектров КР имплантированного мышьяком кремния ($D=7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $E=100 \text{ кэВ}$), подвергнутого отжигу с последовательно увеличивающейся энергией лазерного воздействия 50—1500 мДж/см². Появление дополнительного максимума слева от линии фундаментального колебания подложки может быть обусловлено несколькими причинами: формированием кристаллических кластеров, электрон-фононным взаимодействием, изменением параметра решетки вследствие легирования и механическими напряжениями. Первая из этих причин дает вклад при небольших энергиях отжига, когда, согласно данным электронной микроскопии [8], в приповерхностной области сосуществуют аморфная и микрокристаллическая фазы. В работе [9] показано, что частота и полуширина линии КР в микрокристаллах определяются их размерами. Мы наблюдали сопоставимые с результатами этой работы уширения линий при значительно больших сдвигах частоты (см. таблицу). Это может быть следствием вклада упомянутых выше механизмов, а также влиянием граничных условий на поверхности микрокристаллитов [9].

Параметры (ν — частота, γ — полуширина) однофоновного пика КР и размер микрокристаллов L ,* возникающих в имплантированном кремнии при отжиге рубиновым лазером с различными энергиями воздействия

Режим имплантации			Энергия отжига								
			100 мДж/см ²			300 мДж/см ²			1 Дж/см ²		
ион	энергия, кэВ	доза, см ⁻²	ν , см ⁻¹	γ , см ⁻¹	L , Å	ν , см ⁻¹	γ , см ⁻¹	L , Å	ν , см ⁻¹	γ , см ⁻¹	L , Å
Sb	50	$4 \cdot 10^{16}$	508	14	50	515	10	65	514	10	65
	50	$6 \cdot 10^{15}$	511	13	55	516	9	70	518	6	90
	50	$3 \cdot 10^{15}$	513	11	60	517	9	70	520.5	асимметрия	
	50	$1 \cdot 10^{15}$	514	9	70	517	7	80	520.5	асимметрия	
	50	$6 \cdot 10^{13}$	520.5+асимметрия			520.5	4	—	520.5	4	—
As	75	$1 \cdot 10^{16}$	511	14	50	515	12	58	515	10	65
	100	$7 \cdot 10^{15}$	512	12	58	514	11	60	516	8	75
	50	$7 \cdot 10^{15}$	511	12	58	516	8	75	516	8	75
	50	$4 \cdot 10^{15}$	513	11	60	517	7	80	520.5	асимметрия	
	50	$6 \cdot 10^{14}$	520.5+асимметрия			520.5	4	—	520.5	4	—
	50	$3 \cdot 10^{14}$	Нет отжига			520.5	асимметрия		520.5	4	—
	50	$6 \cdot 10^{13}$	То же			520.5	4	—	520.5	4	—

* Оценка произведена по данным работы [9] в предположении сферической формы микрокристаллитов.

Отжиг при больших энергиях приводит к образованию в приповерхностном слое не гетерогенной, а монокристаллической фазы [8, 10]. Аналогичный характер изменения фазового состояния отожженной области подтверждают и полученные нами спектры КР. При энергии отжига до 400 мДж/см² двойные максимумы (рис. 2) наблюдаются на фоне широких аморфных полос. При больших значениях энергии пик, соответствующий микрокристаллитам, примыкает непосредственно к линии 520.5 см⁻¹ под-

ложки, превращаясь в ее низкочастотное крыло, полосы аморфной фазы исчезают, но появляются максимумы, соответствующие двухфононному рассеянию. Дальнейшее увеличение энергии отжига (более 600 мДж/см^2) не приводит к восстановлению частоты и ширины линии кремния, характерных для неимплантированного образца (см. таблицу), и полному восстановлению спектра второго порядка. Можно считать, что это является следствием вклада трех из упомянутых механизмов, действующих при большой (свыше 10^{19} см^{-3}) концентрации примеси в решетке кремния. При малых концентрациях примеси спектр отожженного образца соответствует спектру совершенного монокристалла.

Таким образом, в настоящей работе показано, что в процессах ионной имплантации и последующего лазерного отжига вблизи поверхности кремния формируются различные фазовые состояния: кристаллическая фаза с точечными дефектами; гетерогенная фаза, состоящая из аморфной матрицы и включенных в нее кристаллических кластеров; аморфная фаза и кристаллическая фаза с повышенной концентрацией примеси. Все эти состояния идентифицированы с помощью КР.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Jain K. P., Shukla A. K., Ashokan R., Abbi S. G. // Phys. Rev. B. 1985. V. 32. N 10. P. 6688—6691.
- [2] Mizoguchi K., Nakashima S., Fujii A., Mitsuishi A. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 6. P. 903—907.
- [3] Авакянц Л. П., Бегишев А. Р., Горелик В. С., Образцова Е. Д. // Препринт ФИАН. М., 1989. № 55. 25 с.
- [4] Shukla A. K., Jain K. P. // Phys. Rev. B. 1988. V. 35. N 17. P. 9240—9244.
- [5] Morhange J. F., Kanellis A., Balkanski M. // Sol. St. Comm. 1979. V. 31. N 11. P. 805—808.
- [6] Авакянц Л. П., Китов И. А., Червяков А. В. // ПТЭ. 1988. № 2. С. 145—149.
- [7] Temple P. A., Hathaway C. E. // Phys. Rev. B. 1973. V. 7. N 8. P. 3685—3697.
- [8] Narayan Y., White S. W. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 44. N 1. P. 35—37.
- [9] Campbell I. H., Fauchet P. M. // Sol. St. Comm. 1986. V. 58. N 10. P. 739—741.
- [10] Двуреченский А. В., Качурин Г. А., Нидаев Е. В., Смирнов Л. С. // Лазерный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Москва

Поступило в Редакцию
25 августа 1989 г.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КРИТИЧЕСКИЙ ТОК КЕРАМИКИ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

А. Д. Кижин, Ю. С. Каримов

Плотность критического тока керамических материалов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ J_c (77 К) $\leq 10^3 \text{ А/см}^2$ значительно уступает J_c (4.2 К) $\sim 10^5 \div 10^6 \text{ А/см}^2$ известных низкотемпературных сверхпроводников Nb_3Sn , PbMo_6S_8 и т. д. Это отличие связано с гранулярным строением керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: разупорядочением границ гранул и ослаблением сверхпроводимости в местах контактов гранул вследствие образования примесных фаз [1]. По виду зависимостей критического тока от температуры $I_c(T)$ и магнитного поля $I_c(H)$ можно судить о характере межгранульного взаимодействия в керамике. В настоящей работе изменение зависимостей $I_c(T)$ и $I_c(H)$ при малых $I_c \leq 0.4 \text{ МА}$ ($J_c \leq 40 \text{ МА/см}^2$) объясняется нарушением фазовой когерентности между гранулами вследствие тепловых шумов.