

переходом порядок—беспорядок для данного магнитного материала. Температурная зависимость вида T^n ($2 < n < 3$) обсуждается с точки зрения рассеяния носителей на магнитных моментах неупорядоченных областей. Получено удовлетворительное совпадение теоретической оценки $\mu(T)$ с экспериментом. При этом допускалось, что модель температурной зависимости дрейфовой подвижности носителей в темноте остается справедливой при освещении образца.

Выражаю благодарность А. М. Свердловой за обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] M. Gazgnier. Phys. St. Sol. A, 114, 11 (1989).
- [2] В. Г. Бамбуров, А. С. Борухович, А. А. Самохвалов. Введение в физико-химию ферромагнитных полупроводников, 206. М. (1988).
- [3] Н. Мотт, Э. Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах, т. 1, 368. М. (1982).
- [4] Э. Л. Нагаев. Физика магнитных полупроводников, 432. М. (1979).
- [5] В. Ф. Кабанов, А. М. Свердлова. ФТП, 25, 1388 (1991).
- [6] Е. П. Свирина, Л. П. Шляхина. В сб.: Тез. докл. XVIII Всес. конф. по физике магнитных явлений, ч. 2, 265. Калинин (1988).
- [7] Р. Уайт. Квантовая теория магнетизма, 304. М. (1985).

Редактор: Л. В. Шаронова

ФТП, том 26, вып. 10, 1992

О МЕХАНИЗМЕ ИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В КРЕМНИИ

А. П. Новиков, Г. А. Гусаков, Ф. Ф. Комаров, В. П. Толстых

Белорусский государственный университет им. В. И. Ленина, 220080, Минск, Беларусь
(Получено 10.12.1991. Принято к печати 7.05.1992)

Явление низкотемпературной ионно-индуцированной кристаллизации (ИИК) аморфных полупроводников известно достаточно давно [¹⁻³]. Облучение ускоренными ионами кристаллов кремния и арсенида галлия с аморфным слоем на поверхности понижает температуру кристаллизации на 200—300 °С и почти на порядок энергию активации процесса. В литературе обсуждаются два механизма ИИК. Первый связывает процесс кристаллизации аморфного слоя с диффузией на границу раздела фаз точечных дефектов, создаваемых ионными пучками [^{2, 3}]. Зависимость скорости кристаллизации от энергии и массы ионов, а также тот факт, что при облучении скрытых аморфных слоев в режиме каналирования скорость кристаллизации почти в 2 раза меньше, чем для случайного пучка, позволили сделать вывод, что эпитаксиальный рост кристаллического кремния каналируется ядерной (упругой) составляющей потерь энергии ионов. Энергии активации кристаллизации в кремнии 0.18 и 0.33 эВ приписывают миграции дважды отрицательной и нейтральной вакансии. Во втором подходе эпитаксиальный рост объясняют перестройкой атомов на границе раздела фаз в объеме, прилегающей к траектории частицы [¹]. Движущей силой, по мнению авторов, служат электронные или ядерные возбуждения на границе. В последнее время предпочтение отдается первой модели. Аргументами в пользу диффузионно-контролируемого механизма ИИК служат данные работы [³], где выявлены зависимость скорости кристаллизации от плотности потока частиц и инерционность процесса с характерным временем 0.26 с.

Полуживение графитовых пленок раздела фаз, х	Сорт налетающих ионов	Энергия налетающих ионов E, МэВ	Плотность тока отжигающего пучка j ₂ , мкА/см ²	Доза, см ⁻²	Критическая температура T _c , °C	Энергия активации E, эВ	Плотность потерь энергии на границе раздела фаз		Литературный источник
							(dE/dx) _{упр.} , эВ/нм	(dE/dx) _{неупр.} , эВ/нм	
1150	⁷⁵ As	2.5	0.02 ÷ 0.75	7 · 10 ¹⁵	120	0.18	85	1180	[4]
	⁸⁴ Kr						95	1260	
1150	⁷⁵ As	0.53	0.02 ÷ 0.75	10 ¹⁵ — 10 ¹⁶	120	0.18	450	693	[5]
							250	840	
							130	920	
1200	⁸⁴ Kr	0.6	1	(0.7 ÷ 2.8) × 10 ¹⁵	—	0.22	452	742	[6]
850	²⁰ Ne	0.6	1	1.5 · 10 ¹⁷	130	0.24	14	680	[1]
		1.5	8				1460		
		3.0	3.8				1940		
850	¹³² Xe	1.5	1	5.8 · 10 ¹⁵	220	0.24	320	2130	[7]
		1.5	320				2130		
		0.3	38				507		
2500	¹⁴ N	0.3	2.4 ÷ 4.8	(0.6 — 1) · 10 ¹⁷	200	0.32	95	498	[8]
							25	384	
							71	400	
1730	²⁰ Ne	0.3	—	1 · 10 ¹⁶	200	0.36	44	19	[2]
							157	175	
							157	175	
2000	BF ₂ ⁺	—	2	1 · 10 ¹⁵	220	1.0	157	175	[9]
							157	175	
							157	175	

В — 240 кэВ
В — 48 кэВ
F — 96 кэВ

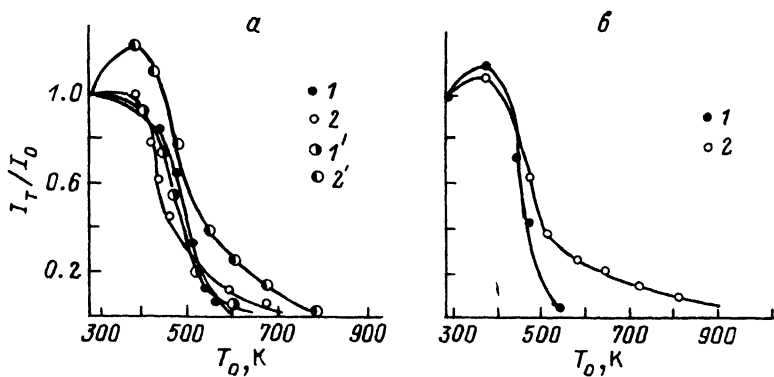


Рис. 1. Зависимость интенсивности сигналов ЭПР VV -центров от температуры изохронного отжига кремния, имплантированного ионами $^{31}\text{P}^+$ (а) и $^{40}\text{Ar}^+$ (б). а) T , К: 1, 1' — 80; 2, 2' — 300. D , см^{-2} : 1 — $1 \cdot 10^{14}$; 2 — $3 \cdot 10^{14}$; 1', 2' — $1 \cdot 10^{15}$. б) T , К: 1 — 80; 2 — 300. D , см^{-2} : 1 — $5 \cdot 10^{13}$; 2 — $3 \cdot 10^{15}$.

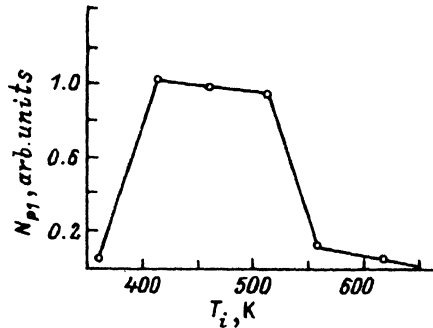
Приведенная выше модель предполагает, что вакансии, инициирующие перестройку на границе раздела фаз, образуются непосредственно в каскаде столкновений налетающего иона. Пороговая температура, при которой наблюдается переход от кристаллизации к аморфизации под действием ионного пучка, определяется как температура, при которой скорость исчезновения вакансий на границе раздела фаз сравнивается со скоростью подхода вакансий к границе [3]. Отсюда следует, что пороговая температура определяется параметрами «отжигающего» пучка (энергией и массой налетающих ионов и плотностью тока пучка).

Вместе с тем известно, что при имплантации в кристаллы кремния ионов средних и тяжелых масс преимущественно создаются разупорядоченные области (РО), содержащие сложные комплексы дефектов. В работе сделана попытка уточнить модель ИИК, увязав экспериментально наблюдаемые пороговые температуры начала кристаллизации 120—130 и 200—220 °С (см. таблицу) с характерными температурами отжига VV -центров и дивакансий, возникающих при ионном облучении.

Образцы кремния облучались под углом 8° к поверхностям (111) и (100) кристаллов ионами P^+ и Ag^+ с энергией $E = 200$ кэВ, плотностью тока $j = 0.1 \div 10$ мкА/см² и дозами $D = 1 \cdot 10^{13} \div 5 \cdot 10^{16}$ см⁻². Для анализа зависимости характера нарушений от температуры имплантации осуществлялся дополнительный нагрев образцов до 600 К. Температура образцов поддерживалась с точностью до ± 5 К. Для изучения термической стабильности дефектов проводился изохронный 20-минутный отжиг облученных образцов в вакууме $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Характер дефектов и их концентрация определялись методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Спектры ЭПР регистрировались на гомодинном радиоспектрометре, имеющем чувствительность 10^{11} спин/Гс и работающем в 32-сантиметровом диапазоне с СВЧ модуляцией $f = 100$ кГц.

В спектрах ЭПР облученных кристаллов независимо от вида ионов и температуры имплантации наблюдалась изотропная линия с $g = 2.0055$, появление которой подтверждается данными работы [10] и связано с образованием VV -центров [11]. На рис. 1 приведены зависимости концентрации VV -центров от температуры отжига. Из кривых видно, что для образцов, облученных $D < D_0$, наблюдается интенсивный отжиг VV -центров в интервале температур 100—300 °С.

На рис. 2 приведена зависимость концентрации центров Si—P1 (соответствует пентавакансии) от температуры мишени при имплантации ионов Ag^+ с $E = 200$ кэВ и $D = 10^{15}$ см⁻². В интервале 100—150 °С отмечается резкий рост концентрации пентавакансий. С увеличением температуры в интервале 150—250 °С



происходит незначительное уменьшение концентрации центров Si—P1, а при температуре выше 250 °С начинается их интенсивный отжиг.

Полученные результаты согласуются с результатами проведенного нами анализ большого числа экспериментальных данных по ИИК (см. таблицу). Из табличных данных следует наличие двух пороговых температур: 120—130 и 200—220 °С. Первая из них может быть связана с распадом VV-центров. Вторая критическая температура находится в интервале, в котором распадается целый ряд многовакансионных комплексов типа ди-, тетра- и пентавакансий. На наш взгляд, в случае высокой концентрации VV-центров вдоль трека (тяжелые ионы, низкие энергии, большие плотности тока) образовавшиеся в большом количестве при их распаде вакансии могут снова взаимодействовать друг с другом, образуя устойчивые при данной температуры комплексы, преимущественно дивакансии. В этих случаях пороговая температура ИИК образцов кремния должна быть увеличена до 200—220 °С. Предположение о связи процесса ионно-индуцированной кристаллизации с распадом дивакансий подтверждает, что характерное время инерционного процесса ИИК $\tau \sim 0.26$ с, зафиксированное в эксперименте с пороговой температурой $T = 220$ °С, совпадает с временем жизни дивакансий [12]. Эти заключения подтверждаются также полученной нами зависимостью концентрации центров Si—P1 от температуры имплантации (рис. 2).

Таким образом, можно сделать вывод, что процесс ИИК аморфного кремния начинается при достижении пороговых температур, которые определяются типами и плотностью нарушений, создаваемых ионным пучком в области, прилегающей к границе раздела фаз. Этот подход позволяет качественно объяснить широкий круг экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] R. G. Elliman, J. S. Williams, W. L. Brown, A. Leiberich, D. M. Maher, R. V. Knoell. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 19-20, 435 (1987).
- [2] J. Linnros, B. Svensson, G. Holmen. Phys. Rev. B, 30, 3629 (1984).
- [3] J. Linnros. PhD Thesis. Chalmers University, 65. Göteborg (1985).
- [4] J. Nakata, K. Kajiyama. Appl. Phys. Lett., 40, 686 (1982).
- [5] J. Nakata, H. Takahashi, K. Kajiyama. Japan. J. Appl. Phys., 20, 2211 (1981).
- [6] A. La Ferla, S. Cannavo, G. Farla, S. U. Campisano, E. Rimini, M. Servidori. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 19-20, 470 (1987).
- [7] A. Leiberich, D. M. Maher, R. V. Knoell, W. L. Brown. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 19-20, 457 (1987).
- [8] J. Linnros, G. Holmen. J. Appl. Phys., 59, 1513 (1986).
- [9] R. Galloni, R. Rizzoni, A. Nylandsted Larsen, S. Yu. Shiryaev. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 19-20, 466 (1987).
- [10] T. Gregorkiewicz. Rad. Eff., 77, 195 (1983).
- [11] Н. Н. Герасименко, А. В. Двуреченский, Л. С. Смирнов. ФТП, 5, 1700 (1971).
- [12] J. Linnros, G. Holmen. J. Appl. Phys., 62, 4737 (1987).

Редактор: В. В. Чалдышев