

a *b*
 Рис. 3. РЭМ изображения скола пористого кремния после воздействия лазерного импульса с плотностью энергии 1.15 Дж/см^2 :
a – увеличение 1000 крат; *b* – увеличение 5000 крат

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что качественное изменение характера взаимодействия мощных импульсов лазерного излучения с пористым кремнием происходит в узком диапазоне плотности энергии вблизи 0.86 Дж/см^2 , что свидетельствует о пороговом характере такого взаимодействия. При плотности энергии меньше пороговой заметной модификации пористого слоя не наблюдается. При энергиях больше пороговой происходит полное разрушение слоя ПК и его удаление вследствие абляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bondarenko V., Kazuchits N, Volchek S. et al. // Phys. stat. sol. (a). 2003. Vol.197. № 2. P. 441–445.
2. Ивлев Г. Д., Гацкевич Е. И. // Физика и техника полупроводников. 1996. Т. 30. № 11. С. 2097–2107.
3. Баталов Р. И., Баязитов Р. М., Торуков Е. И. и др. // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 11.
4. Ивлев Г. Д., Гацкевич Е. И. // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 5. С. 622–628.

ПОВЕДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ СУРЬМЫ И ФОСФОРА В ИМПЛАНТИРОВАННОМ КРЕМНИИ

А. И. Белоус, Ю. Б. Васильев, В. А. Емельянов, В. Б. Оджаев,
 В. И. Плебанович, П. К. Садовский, А. Р. Челядинский

НПО «Интеграл», Минск, Беларусь
 Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

1. ВВЕДЕНИЕ

В создании сильно легированных слоев Si *n*-типа в качестве эмиттеров транзисторов используется ионная имплантация P. В силу несовпадения ковалентных радиусов R атомов Si (1.175 \AA) и P (1.1 \AA) при высоком уровне легирования на границе слоя и подложки возникают упругие напряжения, ведущие к генерации дислокаций несоответствия [1], что ухудшает электрические параметры полупроводниковых

приборов [2]. Двойная имплантация примесей может существенно улучшать параметры ионно-легированных слоев кремния. Например, дополнительное внедрение ионов Ge или C в слои кремния, имплантированные В или Р, позволяет существенно снизить коэффициенты диффузии электрически активных примесей, подавить образование из точечных радиационных дефектов остаточных протяженных нарушений. Можно ожидать, что двойная имплантация Р и Sb позволит компенсировать упругие напряжения несоответствия в сильно легированных слоях кремния *n*-типа. Однако при высоком уровне легирования возникает проблема растворимости примеси и ее воздействия на решетку кристалла во всех формах существования. Особенно это важно для сурьмы с более низкой, чем фосфор, растворимостью в кремнии.

Целью работы являются структурные и электрофизические исследования поведения Sb и Р в кремнии при термообработке при больших дозах имплантации.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Возникающие в имплантированном кремнии при термообработке нарушения изучались методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на электронном микроскопе ЭМ-200. Изменение периода решетки (ПР) в кремнии в результате легирования примесями замещения исследовалось рентгенодифракционным методом на двухкристальном спектрометре при параллельном расположении кристалла-монохроматора и исследуемого образца. Изучалась дифракция $\text{CuK}\alpha_1$ излучения от плоскостей (111) в четвертом порядке отражения. Точность в определении изменения ПР составляла $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ нм. Исследования выполнены на кристаллах кремния *p*-типа с удельным сопротивлением $\rho_0 = 10 \text{ }\Omega\cdot\text{см}$. Энергия ионов сурьмы – 60 и 600 кэВ. Термообработка имплантированных структур проводилась в атмосфере Ar. Электрическая активации внедренных примесей исследовалась путем измерения эффекта Холла и проводимости по методике Ван-дер-Пау.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований слоевой концентрации носителей заряда в кремнии, имплантированном сурьмой, в зависимости от дозы представлены в табл. 1. Энергия ионов составляла 60 кэВ. Как видно из таблицы, степень электрической активации (отношение слоевой концентрации носителей заряда к дозе ионов) изменялась от 61 % для дозы $1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ до 11 % при дозе $7.15 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. В табл. 2 представлены аналогичные результаты, но при энергии ионов Sb 600 кэВ. В этом случае степень электрической активации несколько выше. Возможно, при энергии ионов Sb 60 кэВ, когда слой находится непосредственно у поверхности кремния, часть атомов Sb при термообработке выходит на поверхность.

Таблица 1

Электрическая активация имплантированной Sb в кремнии. $E_{\text{Sb}} = 60 \text{ КэВ}$

Доза, см^{-2}	$N_s, \text{см}^{-2}$
$1.2 \cdot 10^{15}$	$7.3 \cdot 10^{14}$
	61 %
$2.4 \cdot 10^{15}$	$7.5 \cdot 10^{14}$
	31 %
$7.15 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{14}$
	11 %

Таблица 2

Электрическая активация имплантированной сурьмы в кремнии. $E_{Sb} = 600$ кэВ

Доза, $см^{-2}$	N_s , $см^{-2}$
$5 \cdot 10^{14}$	$3.2 \cdot 10^{14}$
	64 %
$1 \cdot 10^{15}$	$6.6 \cdot 10^{14}$
	66 %
$2 \cdot 10^{15}$	$1.7 \cdot 10^{15}$
	85 %
$4.8 \cdot 10^{15}$	$2.2 \cdot 10^{15}$
	46 %

Выполненные исследования методом ПЭМ показали, что в кремнии, имплантированном сурьмой, при термообработке образуются преципитаты (рис. 1). По данным дифракции электронов, этими преципитатами являются выделения сурьмы. Концентрация преципитатов растет с ростом дозы ионов Sb. Размеры включений составляют от 10 до 20 нм (рис. 1, а), встречаются включения с размером 25–30 нм (рис. 1, б).

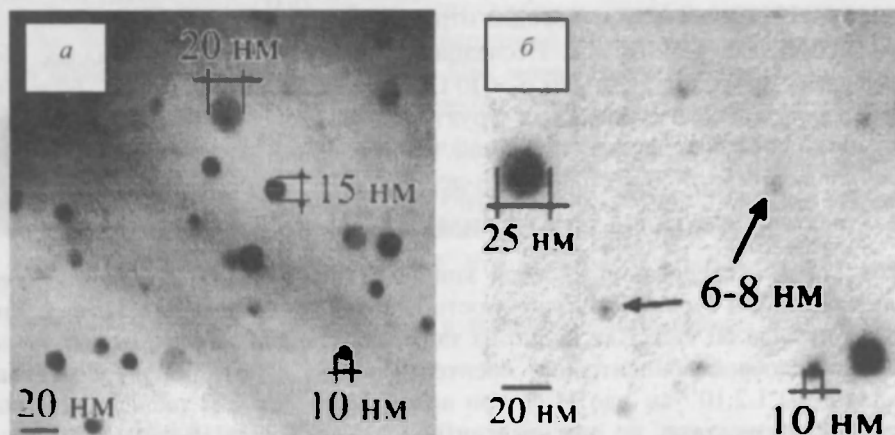


Рис. 1. Микрофотографии ПЭМ кремния, имплантированного ионами Sb и отожженного при 1150 °С

На рисунке 2 показан профиль распределения внедренной сурьмы по глубине слоя кремния. Энергия ионов составляла 600 кэВ. Для разгонки примеси проводилась термообработка пластин в атмосфере аргона при температуре 1150 °С в течение 60 мин. Для этих образцов были сняты рентгенограммы на двухкристальном спектрометре. Они не содержали отдельного пика отражения от ионно-легированного слоя. Наблюдалось лишь плечо на кривой дифракции. Сделанная оценка периода решетки в слое показала, что его величина на порядок меньше рассчитанного значения. Даже если исходить из концентрации электрически активной примеси, изменение периода решетки в слое должно быть существенно выше экспериментально наблюдаемого значения.

Наблюдаемое несоответствие расчетных и экспериментальных значений может быть связано с влиянием на период решетки преципитатов сурьмы. Коэффициент теплового расширения сурьмы выше, чем кремния. Поэтому при охлаждении возможна релаксация атомов кристалла в направлении преципитатов, что ведет к сжатию решетки кремния. Поэтому даже при дозах ионов сурьмы порядка $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, когда объемная концентрация примеси выше 10^{20} см^{-3} , дислокации несоответствия не наблюдаются.

Были исследованы также слои кремния, легированные одновременно (последовательно) сурьмой и фосфором. Энергии ионов P и Sb подбирались исходя из равенства проецированных пробегов R_p ; дозы – исходя из соотношений ковалентных радиусов Si, Sb, P, обеспечивающих компенсацию упругих напряжений. Результаты исследований слоевой концентрации носителей заряда в слоях, созданных имплантацией ионов Sb, P, а также совместно Sb и P, представлены в табл. 3.

В слоях кремния, созданных двойной имплантацией P и Sb, слоевая концентрация носителей оказалась ниже концентрации носителей в слоях Si, имплантированных только P. Выполненные электронно-микроскопические (ПЭМ) исследования (рис. 3) показали, что если в кремнии, имплантированном Sb, при термообработке образуются преципитаты Sb с размерами преимущественно 10–20 нм, то в слоях кремния, созданных двойной имплантацией P и Sb, помимо таких преципитатов в гораздо большей концентрации возникают малые преципитаты – с размерами около 3–5 нм (рис. 3, б).

Из полученных результатов следует, что изменение периода решетки кремния при высоком уровне легирования сурьмой методом имплантации определяется как атомами сурьмы, локализованными в узлах решетки, так и образующимися включе-

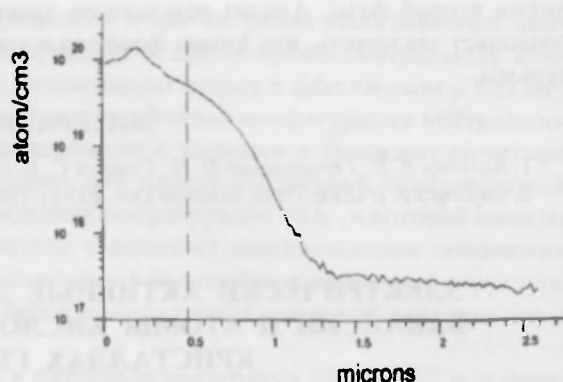


Рис. 2. Профиль внедренной сурьмы в кремнии после отжига при 1150°C в течение 60 мин. снятый методом SIMS. Энергия ионов 600 кэВ. доза $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

Таблица 3

Слоевые концентрации носителей заряда в кремнии, имплантированном P, Sb и совместно P и Sb

Ион	Доза, см^{-2}	N_s , см^{-2}
P, 30 кэВ	$3.1 \cdot 10^{15}$	$2.8 \cdot 10^{15}$
Sb, 60 кэВ	$1.3 \cdot 10^{15}$	$8.2 \cdot 10^{14}$
P + Sb	$4.4 \cdot 10^{15}$	$2.1 \cdot 10^{15}$

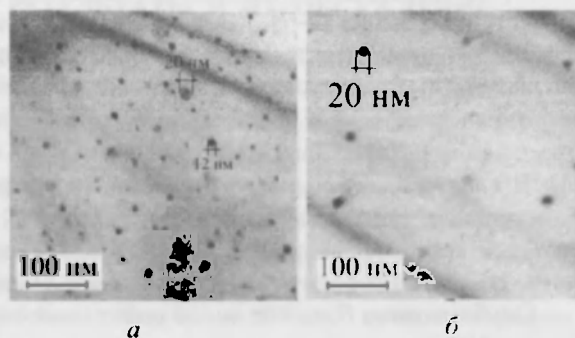


Рис. 3. Микрофотографии ПЭМ кремния, имплантированного Sb (а) и совместно P и Sb (б)

ниями второй фазы. Анализ результатов электрических измерений и данных ПЭМ позволяет заключить, что атомы фосфора в кремнии являются центрами сегрегации сурьмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин В. В., Герасименко Н. Н., Стенин С. И. // ФТТ. 1976. Т. 18. С. 2803.
2. Liefing J.R. // IEEE Trans. Electron Dev. ED-41 1994. С. 50.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ДЕФЕКТЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ВАКАНСИИ И АТОМЫ КИСЛОРОДА В ОБЛУЧЕННЫХ КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ

В. П. Маркевич¹, Л. И. Мурин¹, В. В. Литвинов²

¹ГНПО «Научно-практический центр НАНБ
по материаловедению» murin@iftip.bas-net.by

²Белорусский государственный университет, litvvv@bsu.by

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к использованию германия в производстве полупроводниковых приборов, в частности, таких как солнечные элементы с несколькими *p-n*-переходами и наноразмерные полевые транзисторы с германиевой базой и изолирующими пленками на основе материалов с высокой диэлектрической проницаемостью [1]. В отличие от кремния кристаллы германия, выращенные по методу Чохральского по стандартной технологии, содержат относительно небольшие концентрации атомов кислорода, $[O] < 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Так как примесь кислорода широко используется в технологии производства приборов на основе кремния для улучшения механических свойств пластин и внутреннего гетерирования примесей некоторых металлов, то встает вопрос, будет ли легирование кислородом столь же полезным для производства приборов на базе германия.

Имеющиеся сведения о кислородсодержащих дефектах в кристаллах Ge ограничены. Надежно идентифицированы в Ge лишь междоузельные атомы кислорода (O_i) и комплексы вакансия – атом кислорода [1]. Установлено, что междоузельные атомы кислорода являются эффективными ловушками для вакансий в кристаллах как кремния, так и германия [2–7]. Комплекс вакансия–кислород (VO или A-центр) является доминирующим дефектом в кристаллах германия с высоким содержанием кислорода, облученных электронами с энергией $< 10 \text{ МэВ}$ или гамма-квантами ^{60}Co при температурах ниже 330 К. Было показано, что A-центр в германии является двойным акцептором с энергетическими уровнями $E(-/0) \approx E_v + 0.27 \text{ эВ}$ и $E(2-/1) \approx E_c - 0.21 \text{ эВ}$ [6]. В спектрах инфракрасного (ИК) поглощения облученных кристаллов Ge:O наблюдались интенсивные полосы у 621, 669 и 716 см^{-1} , которые были приписаны локальным колебательным модам атомов кислорода в составе нейтральных, однократно- и двукратно-отрицательно-заряженных A-центров, соответственно [5, 6].

Опубликовано большое число работ по исследованию термического отжига комплекса VO в кремнии и установлены реакции, приводящие к исчезновению этого дефекта. Считается, что при прогреве облученных кристаллов Si:O при температурах