

АНОМАЛЬНО-УСКОРЕННАЯ ДИФФУЗИЯ ФОСФОРА ИЗ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Васин А. С., Окулич В. И., Пантелеев В. А.

Исследована диффузия фосфора в кремний из ионно-имплантированного слоя при 800—1000 °С в атмосфере аргона при давлении до 2 кбар. Доза внедренного фосфора составила $3 \cdot 10^{18}$ мкКл/см².

Обнаружено увеличение глубины проникновения атомов фосфора по сравнению с отжигами без давления. Показано, что эффект нелинейно зависит от длительности барической обработки и на начальных стадиях отжига практически отсутствует. Значительное увеличение времени отжига также приводит к уменьшению ускорения.

Обнаруженный эффект объясняется в рамках двухпоточной модели диффузии в предположении, что давление увеличивает концентрацию междоузельных атомов фосфора в диффузионной зоне из-за изменения дефектной структуры имплантированного слоя кремния.

Все более широкое применение ионной имплантации в микроэлектронике привело к необходимости углубления наших представлений о структуре имплантированных слоев и происходящих в них под влиянием различных внешних воздействий процессов атомной перестройки.

Особенно много работ посвящено отжигу этих слоев. Однако происходящие при этом явления кристаллизации и перераспределения примесей еще далеки от полного понимания [1-8]. В связи с этим предпринимаются попытки использования новых экспериментальных методов, позволяющих целенаправленно управлять созданной имплантацией системой дефектов и получать при этом дополнительные сведения об ее свойствах. Например, интересные результаты были получены недавно при проведении постимплантационных отжигов в условиях всестороннего сжатия. Так, в [1] было показано, что скорость эпитаксиальной рекристаллизации ионно-имплантированного аморфизованного слоя кремния уменьшается в отжиге при повышенном давлении. В [2, 3] сообщалось о том, что в несколько раз ускоряется самодиффузия в кремнии и диффузия мышьяка в кремнии, проводимые из ионно-имплантированного слоя при высоком давлении.

В настоящей работе изучалась диффузия фосфора из имплантированного слоя в кремнии при воздействии всестороннего давления. Фосфор был выбран как из-за его широкого применения в реальных технологических операциях, так и в связи с наличием достаточно полно разработанной модели миграции фосфорных атомов в кристаллической решетке кремния [9].

Пластины кремния КДБ-40 с ориентацией (111) облучались ионами P⁺ с энергией 40 кэВ в условиях, исключающих каналирование. Доза имплантации составила $2 \cdot 10^{16}$ ион/см². Постимплантационный отжиг проводился в атмосфере аргона при давлениях от атмосферного до 150—200 МПа.

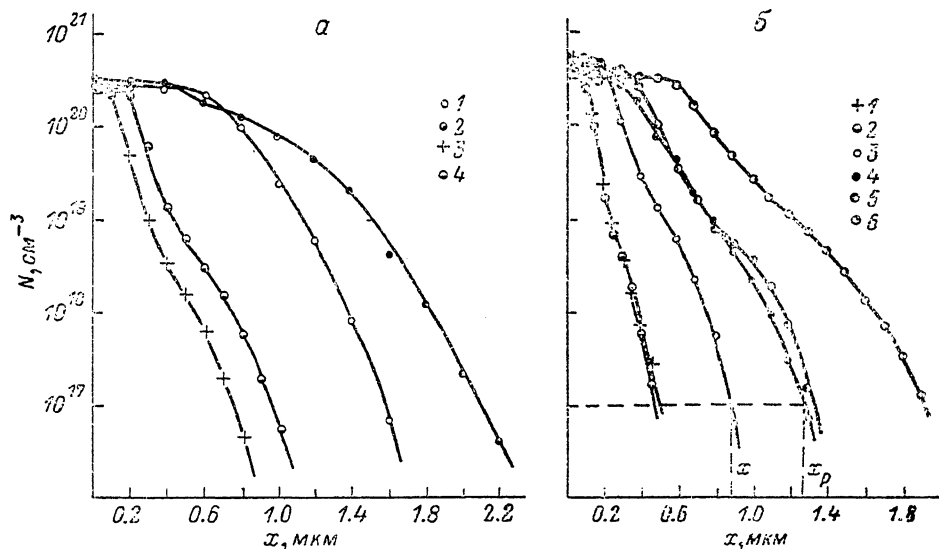
После отжигов снимались профили распределения электрически активных атомов фосфора по глубине образца с измерением поверхностного сопротивления и удалением тонких слоев кремния анодным окислением.

Было проведено три серии отжигов при температурах 800, 900 и 1000 °С. Усредненные по нескольким образцам профили распределения показаны на рисунке. Как видно, во всех опытах в условиях сжатия (кроме отжига при

900 °С, 10 мин) наблюдается существенное увеличение проникновения атомов фосфора. Этот эффект является аномальным с точки зрения теории диффузии точечных дефектов по чисто вакансионному или междоузельному механизму [10].

Ускорение диффузии ϵ можно охарактеризовать, например, по сравнительной глубине проникновения примеси на уровне концентрации 10^{17} см⁻³. С увеличением времени отжига $\epsilon = (x_p - x)/x$ (см. рисунок) возрастает, выходя на насыщение (при 900 °С, например, для 10-минутного отжига $\epsilon = 0$, а для 2- и 8-часового $\epsilon = 0.44$). Снижение температуры до 800 °С приводит к уменьшению ϵ до 0.3.

Из полученных данных было оценено отношение (α) количества электрически активного фосфора в образцах после отжига к полному количеству внедрен-



Профили распределения электрически активного фосфора по глубине, имплантированного Si, при различных режимах отжига.

Режимы отжига: а) 1, 2 — 1 ч при 1000 °С; 3, 4 — 8 ч при 800 °С; б) 1, 2 — 10 мин, 3, 4 — 2 ч, 5, 6 — 8 ч при 900 °С. 1, 3, 5 — без давления, 2, 4, 6 — с давлением.

ного при имплантации фосфора. Эти данные представлены в таблице. Как видно, при столь высокой дозе имплантации при малых временах и малой температуре отжигів электрически активной оказывается весьма незначительная часть фосфора. После отжигів под давлением эта часть значительно больше.

Параллельно с описанным выше экспериментом нами были выполнены опыты с образцами кремния, в которые диффузией из фосфоросиликатного стекла (ФСС) была проведена высокотемпературная загонка фосфора. После нее ФСС было стравлено и осуществлена разгонка с давлением и без давления при 900 °С в течение 2 ч (поверхностные концентрации для двух партий образцов после разгонки составили $1.5 \cdot 10^{20}$ и $4 \cdot 10^{19}$ см⁻³). При этом различия в профилях распределения электрически активного фосфора обнаружено не было. Полученные результаты однозначно указывают на то, что эффект аномального ускорения связан с использованием в качестве источника диффузии ионно-легированного с высокой дозой слоя кремния.

Согласно современным представлениям [4-8], отжиг сильно легированного имплантированного слоя кремния проходит через три основные стадии. В начальный период (несколько минут при 1000 °С и 30-40 мин при 600-800 °С) идет интенсивная рекристаллизация аморфного слоя с генерацией большого количества вакансий и собственных междоузельных атомов. Если концентрация внедренных атомов фосфора в приповерхностном слое превышает равновесную, то избыточная часть его может захватывать вакансии, что должно привести к сильному пересыщению междоузельными атомами. Как следствие,

в слое толщиной 0.1—0.4 мкм образуются многочисленные дислокационные дефекты междоузельного типа — диполи, петли Франка и т. д. Возможно образование в этой зоне и выделений кластеров типа SiP.

Второй этап отжига (≥ 30 мин при $T \leq 1000$ °C) характеризуется активной перестройкой образовавшихся вторичных дефектов. Происходит вытягивание диполей в дислокационные петли, крупные из которых растут за счет меньших, распадаются петли Франка и, возможно, *P*-преципитаты. При этом распад одних и рост других дефектов идет в основном за счет эмиссии и поглощения собственных междоузельных атомов.

Наконец, на третьем этапе происходит формирование развитой сетки дислокаций. Все указанные процессы происходят на фоне диффузии фосфора в глубину кристалла. При этом образующаяся дислокационная сетка также перемещается от поверхности вместе с максимумом градиента концентрации примеси [8].

Доля электрически активного фосфора (α) и относительное увеличение глубины его диффузии (ε) в Si при различных режимах постимплантационного отжига

Режим отжига	Давление, МПа	α , %	ε , %
800 °C, 8 ч	0.11	25	30
	150	50	
900 °C, 10 мин	0.1	30	2
	200	30	
900 °C, 2 ч	0.1	80	44
	180	90	
900 °C, 8 ч	0.1	90	44
	170	100	
1000 °C, 1 ч	0.1	95	33
	160	100	
800 °C, 40 мин + +900 °C, 2 ч	0.1	45	45
	150	90	
1000 °C, 3 ч	0.1	100	16
	170	100	

Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что гидростатическое сжатие до 200 МПа влияет на процессы, характерные лишь для условно выделенных нами второго и третьего этапов отжига.

Для проверки этого предположения мы провели дополнительную серию опытов, заключающуюся в том, что две партии образцов с имплантированным фосфором слоем перед барическими исследованиями подвергались обычному отжигу при атмосферном давлении (при 800 °C, $t=40$ мин). Затем обе партии отжигались при 900 °C, $t=2$ ч: одна — при атмосферном давлении аргона, другая — при $P=160$ МПа. Опыт дал результаты, аналогичные показанным на рисунке, б (3, 4).

Кроме этого, для исследования роли третьего этапа были проведены отжиги при 1000 °C, $t=3$ ч при атмосферном давлении и при $P=160$ МПа. Как видно из таблицы, в этом случае достигнута 100%-я электрическая активация примеси, однако ускорение диффузии под давлением существенно меньше. Из этих дополнительных опытов можно сделать вывод, что наиболее существенное влияние на диффузию фосфора давление оказывает на втором этапе отжига.

Для выяснения физической картины наблюдаемого барического эффекта необходимо подробнее остановиться на основных закономерностях диффузии фосфора в кремнии, которая, как известно [9], описывается сложным двухпоточным механизмом. Основной диффузионный поток, формирующий высококонцентрационную часть профиля, состоит из узловых атомов фосфора, мигрирующих в составе *E*-центров. Он взаимодействует со вторым потоком — междоузельными атомами фосфора, которые, захватываясь вакансиями, пополняют

его. Оставшаяся часть междоузельных атомов проникает в глубь кристалла и, переходя в положение замещения, образует на профиле так называемый «хвост».

Из рисунка видно, что влияние давления проявляется в почти параллельном смещении профилей распределения. Как мы показали выше, первая стадия отжига имплантированного слоя не причастна к этому явлению. Действительно, такое смещение нельзя объяснить простым пересыщением собственными точечными дефектами в имплантированной зоне. Пересыщение вакансиями должно было бы повысить общий уровень концентрации фосфора замещения и, самое главное, поднять и укоротить хвост на профиле; избыток собственных междоузельных атомов уменьшил бы концентрацию E -центров и тем самым замедлил бы диффузионное перераспределение.

Рассмотрим другие возможные механизмы барического эффекта, связывая их со вторым этапом постимплантационного отжига. Как известно [11], гидростатическое сжатие может привести к изменению дислокационной структуры кристалла. Однако это не должно давать основного вклада в ускорение диффузии. Действительно, и при диффузии примеси из ФСС были достигнуты концентрации, при которых возможно образование как отдельных дислокаций несоответствия, так и сеток, однако заметного искажения профиля распределения выявлено не было. Заметим, что и в [8] отмечалось слабое влияние дислокаций на диффузию фосфора в объем из имплантированного слоя.

Основную роль в обсуждаемом явлении, на наш взгляд, следует отвести влиянию давления на концентрацию междоузельных атомов фосфора. Как было показано в [12], после имплантации часть типично замещающих примесных атомов находится в положениях внедрения. Поскольку гидростатическое сжатие замедляет кристаллизацию аморфного имплантированного слоя на кремнии [1], т. е. уменьшает скорость упорядочения структуры, то оно затрудняет и переход внедренного фосфора в узлы. С другой стороны, в последнее время появились работы [13-15], в которых показано, что гидростатическое давление может вызвать распад образовавшихся в имплантированном слое примесных кластеров. Если такая ситуация имеет место и для фосфора, то появление дополнительных источников пополнения диффузионного потока E -центров, во-первых, создает дополнительный источник пополнения диффузионного потока E -центров, во-вторых, делает более протяженной область хвоста.

Заметим, что распад примесных скоплений может и непосредственно привести к увеличению концентрации E -центров.

Как показывает анализ математической модели диффузии фосфора [16], предложенный механизм барического эффекта должен дать картину изменения диффузионного профиля, подобную показанной на рисунке.

В заключение выражаем благодарность Д. И. Тетельбауму за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

- [1] Васин А. С., Окулич В. И., Пантелеев В. А., Тетельбаум Д. И. // ФТТ. 1985. Т. 27. В. 1. С. 274—277.
- [2] Aziz M. J., Nygren E., Christie W. H., White C. W., Turnbull D. // Imp. Dif. a. Gettering Silicon Symp. Pittsburg, 1985. P. 101—104.
- [3] Nygren E., Aziz M. J., Turnbull D., Hays J. E., Poate J. M., Jacobson D. C., Hull R. // Imp. Dif. a. Gettering Silicon Symp. Pittsburg, 1985. P. 77—82.
- [4] Александров О. В., Гавриков Г. А., Матханов И. П., Прохоров В. И. // Вопросы атом. науки и техн. Сер. Физика радиац. поврежд. и рад. материаловедение. 1981. В. 2 (16). С. 78—81.
- [5] Александров О. В., Матханов И. П., Прохоров В. И. // Электрон. техн. Материалы. 1980. № 5. С. 54—58.
- [6] Максимов С. К., Лукьянчук Т. И., Пискунов Д. И. // ДАН СССР. 1975. Т. 223. В. 6. С. 1351—1354.
- [7] Логинов Ю. Ю. // Автореф. канд. дис. Красноярск, 1983.
- [8] Герасименко Н. Н., Романов С. И., Стась В. Ф., Цейтлин Г. М. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 11. С. 2117—2120.
- [9] Пантелеев В. А. // ФТТ. 1979. Т. 21. В. 11. С. 3388—3392.
- [10] Ху С. // Атомная диффузия в полупроводниках. М., 1975. С. 248—405.
- [11] Jung J. // Phyl. Mag. 1984. V. A50. N 2. P. 233—255.
- [12] Hofäss H., Lindner G., Winter S., Besold B., Recknagel E., Weyer G., Petersen J. W. // Mat. Sci. Forum. 1986. V. 10-12. N 2. P. 1183—1188.
- [13] Зайнабидинов С. З., Фистуль В. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 4. С. 766—767.

- [14] Аюпов К. С., Зайнабидинов С. З., Карпов Ю. А., Фистуль В. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 4. С. 764—765.
- [15] Бахадырханов М. К., Абдураимов А., Илев Х. М. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 123—129.
- [16] Големшток Г. М., Павтелеев В. А., Угодчиков Н. А. // Автометрия. 1988. № 3. С. 35—40.

Горьковский исследовательский
физико-технический институт ГГУ
им. Н. И. Лобачевского

Получена 16.06.1988
Принята к печати 27.10.1988
