

Рис. 2. Влияние скорости деформации на степень деформации, при которой уравниваются внешние и внутренние напряжения (кривая 1), и на предел текучести (кривая 2).

формации до релаксации. По-видимому, на эффект должны оказывать влияние также тип кристалла, его чистота и совершенство строения, а также температура испытания.

Л и т е р а т у р а

- [1] Бернер Р., Кронмюллер Г. Пластическая деформация монокристаллов. М.: Мир, 1969.

Институт кристаллографии
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
15 декабря 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 13

12 июля 1988 г.

СТИМУЛИРОВАННЫЙ ОТЖИГ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕАКЦИИ СИЛИЦИДООБРАЗОВАНИЯ

А.Г. Итальянцев, Л.Я. Краснобаев,
А.Ю. Кузнецов, В.Н. Мордкович

Известны работы, в которых предлагается модель отжига радиационных дефектов и электрической активации примесных атомов в ионно-имплантированном кремнии [1-2]. В них учитываются различные квазихимические реакции собственных точечных дефектов радиационного происхождения между собой, с более сложными дефектами и примесными атомами, протекающие на различных стадиях образования радиационных дефектов в области собственно ионно-имплантированного слоя. Между тем, результаты уже первых исследо-

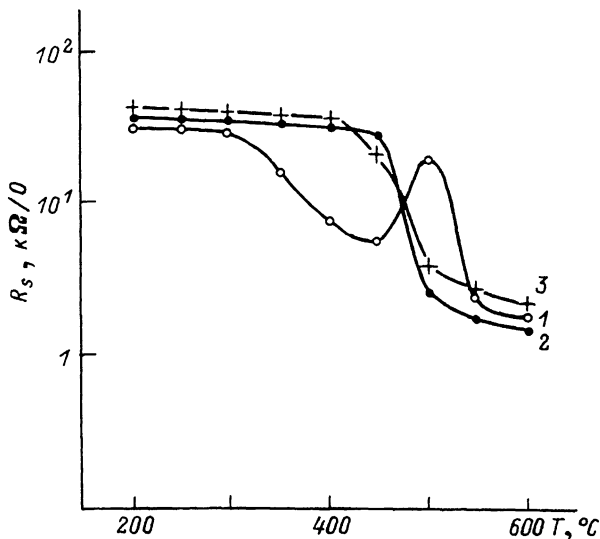


Рис. 1. График зависимости поверхностного электросопротивления (R_s) ионно-имплантированного слоя Si , легированного p^+ ($E = 160$ кэВ, $\Phi = 10^{13}$ см $^{-2}$) от температуры отжига. 1 - экспериментальный образец, 2 - контрольный образец, 3 - образец, моделирующий упругие напряжения в экспериментальном образце.

ваний эффекта дальнего действия радиационных дефектов, возникающих при ионной имплантации [3-4], позволяют предположить, что существенная часть собственных точечных дефектов (вероятно, главным образом, междоузельных атомов как наиболее подвижной компоненты пар Френкеля), способна выходить далеко за пределы области упругих потерь энергии ионов.

В связи с этим разумно предположить, что модельные представления об отжиге ионно-имплантированных полупроводников должны учитывать взаимодействие междоузельных атомов (J) не только с дефектами в области облучаемого ионами слоя, но и со структурными нарушениями в объеме кристалла вне имплантированного слоя. В частности, если речь идет о кристаллах Si толщиной в несколько сот микрометров, динамика отжига имплантированных слоев должна определяться как центрами перехвата J в объеме кристалла, так и условиями их стока на противоположную сторону кристалла. Сделаем оценку числа междоузельных атомов кремния (Q), безвозвратно покидающих за время отжига ионно-имплантированный слой в ситуациях, когда на противоположной поверхности кристаллической пластины выполняется или условие абсолютного поглощения J , или условие их полного отражения, иначе говоря, при $x=l$ соответственно имеем либо $C_j = 0$, либо $\partial C_j / \partial x = 0$, где C_j - концентра-

ция междоузельных атомов, l - толщина образца. Кроме того, предположим, что за время отжига концентрация несвязанных J на границе раздела имплантированный слой - кристалл изменяется несильно, т.е. $C_J(x=0) \cong C_J^0 = \text{const}$. Тогда из решений диф-

фузионных уравнений вида $\frac{\partial C_J}{\partial t} = D_J \frac{\partial^2 C_J}{\partial x^2} - \alpha C_J$ с такими граничными условиями следует;

$$Q_{\text{полн}} = C_J^0 \left[\frac{D_J \cdot t \cdot q}{th(ql)} + \frac{e^{q^2 l} - 1}{q} - \frac{e^{q^2 l}}{q sh(ql)} \cdot (ch(ql) - 1) \right],$$

$$Q_{\text{отр}} = C_J^0 \left[D_J \cdot t \cdot q + \frac{1}{q} \right] th(ql).$$

С физической точки зрения величина Q представляет собой оценку интегралов по времени от потока J через поверхность $x=0$ на стадии выхода диффузионного процесса на стационарный режим и в процессе стационарной диффузии. Отношение $\alpha = Q_{\text{полн}} / Q_{\text{отр}}$ не зависит от C_J^0 и определяется величиной коэффициента диффузии междоузельных атомов кремния - D_J , временем отжига t и значением $q = \sqrt{A/D_J}$, где A - коэффициент пропорциональности в слагаемом правой части диффузионного уравнения, учитывающим сток J на ненасыщающиеся ловушки в объеме кристалла. При $D_J \sim 10^{-5}$ см² с⁻¹ [5], $l = 4 \cdot 10^{-2}$ см, $t = 10^3$ с, в ситуации, когда сток J на обратную сторону образца существен на фоне стока J на ловушки в объеме кристалла, т.е. при $0 < A \leq 10^{-2}$, величина α лежит в диапазоне (10-1, 3). Такая разница в значениях $Q_{\text{полн}}$ и $Q_{\text{отр}}$ должна неминуемо сказаться на динамике отжига радиационных дефектов в имплантированных слоях.

Экспериментально этот вывод был проверен в опытах, где в качестве поглощающей поверхности на тыльной стороне кристалла была использована граница раздела кремний-растущий силицид хрома. В [6] показано, что твердофазная реакция образования силицида хрома сопровождается генерацией вакансий (V) в кремнии.

Поскольку для кремния $D_J \gg D_V$, то существует достаточно широкий интервал времени отжига, когда диффузионный фронт V не достигает имплантированного слоя, но является эффективной зоной взаимной аннигиляции V , рождаемых в реакции $Cr - Si$ и J , испускаемых имплантированным слоем. В контрольных образцах обратная сторона образца была покрыта пленкой естественного SiO_2 , граница раздела которого с Si поглощает J заведомо хуже. На рис. 1 представлена зависимость поверхностного сопротивления (R_S) имплантированного слоя от температуры изохронного отжига (15 минут). Как видно из рисунка, зависимость $R_S(T)$ для экспериментального (кривая 1) и контрольного (кривая 2) образцов существенно отличаются. Это отличие не может быть обусловлено изменением механических напряжений в исследуемых образцах, т.к. при замене растущего в процессе отжига силицида на выращен-

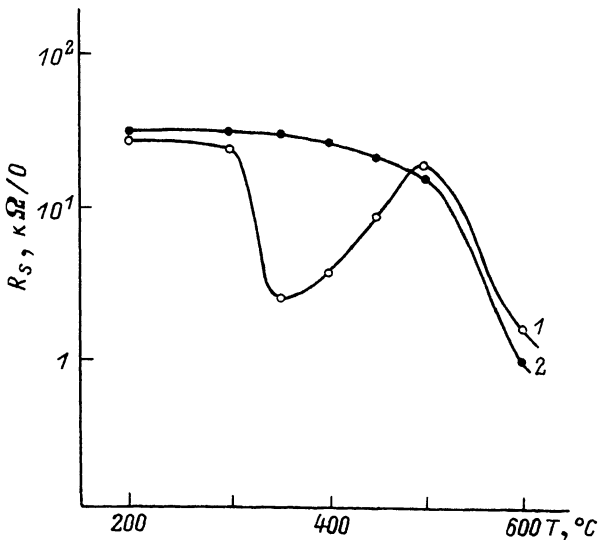


Рис. 2. График зависимости поверхностного электросопротивления (R_s) ионно-имплантированного слоя Si , легированного In^+ ($E = 240$ кэВ, $\Phi = 10^{13}$ см $^{-2}$) от температуры отжига. 1 - экспериментальный образец, 2 - контрольный.

ный заранее до имплантации механические напряжения практически не изменяются, а эффект исчезает (см. кривую 3).

Таким образом, наблюдаемые изменения динамики отжига радиационных нарушений подтверждают существование эффекта дальнего действия радиационных дефектов и свидетельствует в пользу диффузионного механизма этого эффекта. Кроме того, они подтверждают справедливость сделанного в данной работе предположения о заметном (с точки зрения отжига имплантированного слоя) вкладе взаимодействия созданных облучением J с дефектами вне имплантированной области. Это указывает на возможность управления динамикой отжига ионно-имплантированных полупроводников за счет химически стимулированного твердофазными реакциями введения собственных точечных дефектов определенной природы (J или V) в кристалл из областей, удаленных от имплантированного участка на расстояние вплоть до нескольких сот микрометров.

Наблюдаемый (см. рис. 1, 2) ускоренный отжиг радиационных дефектов в области 300–350 °C для Si , облученного ионами In^+ , и в области 300–450 °C при облучении ионами P^+ , стимулированный принудительным уходом J из облученного слоя, указывает, что за изменение поверхностного сопротивления на ранних стадиях отжига ответствен не только отжиг вакансионных центров, как это ранее предполагалось [1], но и исчезновение J . Стимулированная

перестройка радиационных нарушений на начальных этапах термообработки приводит к тому, что состояние системы дефектов, соответствующее обратному отжигу [7], в экспериментальных кристаллах достигается значительно раньше и рост поверхностного сопротивления для I_n^+ и p^+ начинается уже соответственно от температуры 350 и 450 °С. Следует отметить также, что температура начала отклонения $R_S(T)$ в экспериментальных образцах от контрольных не зависит от типа иона и определяется началом процесса образования силицида хрома. В приведенных экспериментах эта температура ниже, чем температура начала образования силицида хрома в стандартных условиях [6] и составляет 300 °С, что, по всей вероятности, обусловлено влиянием потока J , запасенных в ионно-имплантированном слое, на скорость и температуру начала образования силицидов металлов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Физические процессы в облученных полупроводниках. Под ред. Л.С. Смирнова, Новосибирск: Наука, 1977. 253 с.
- [2] Баранов А.И., Смирнов Л.С. Отжиг сложных дефектов в облученных полупроводниках. Препринт ИФП СО АН СССР № 14-78, Новосибирск, 1978.
- [3] Павлов П.В., Пашков В.И., Генкин В.Н., Камаев Г.В., Никишин В.И., Огарков Ю.Н., Успенский Г.И. - ФТТ, 1973, т. 15, в. 9, с. 2857-2859.
- [4] Пантелеев В.А., Чернявский В.В., Ершов С.Н. - ФТТ, 1974, т. 16, в. 7, с. 2151-2153.
- [5] Ни S.M. - J. Appl. Phys., 1974, v. 45, N 4, p. 1567-1573.
- [6] Ту К., Мейер Дж. Образование силицидов. В кн.: "Тонкие пленки - взаимная диффузия и реакции", М.: Мир, 1982. 576 с.
- [7] Visknell R.W. - Phil. Mag., 1972, v. 26, p. 273-286.

Институт проблем технологии
микроэлектроники и особочистых
материалов АН СССР

Поступило в Редакцию
19 января 1988 г.
В окончательной редакции
22 марта 1988 г.