

К эффекту больших доз при ионной имплантации кремния

© Д.И. Тетельбаум[¶], А.И. Герасимов

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 23 марта 2004 г. Принята к печати 14 апреля 2004 г.)

Для случая ионной имплантации фосфором кремния выполнен ряд экспериментов с целью выяснения механизма „эффекта больших доз“. На основании экспериментальных данных сделан вывод, что данный эффект обусловлен ослаблением межатомных связей в сильно легированном фосфором аморфном кремнии и носит терморadiационно-стимулированный характер. Перерыв в облучении по достижении дозы аморфизации приводит к стабилизации аморфного состояния.

1. Введение

В [1,2] сообщалось, что при ионной имплантации кремния бором, фосфором и мышьяком наблюдается необычная дозовая зависимость степени разупорядочения: при некоторых дозах поверхностный слой аморфизуется, а при дозах, много больших дозы аморфизации, он оказывается кристаллическим (мозаичный монокристалл с включениями поликристаллической фазы). Это явление было названо эффектом больших доз (ЭБД). Авторы объясняют ЭБД атермической кристаллизацией аморфного слоя, которая стимулирована распадом химических соединений, синтезированных при больших дозах, а также возбуждением электронной подсистемы кремния. Однако атермичность процесса не очевидна, так как при использованных плотностях ионного тока и отсутствии специальных мер для теплоотвода нагрев мог быть довольно значительным. Что касается влияния электронного возбуждения, этот механизм тоже проблематичен. Неясным оставался и вопрос о том, успевала ли происходить аморфизация до того момента времени, пока кристалл не нагреется пучком до температуры, при которой она становится невозможной [3].

В настоящей работе выполнен ряд экспериментов, имеющих целью пролить свет на механизм ЭБД и найти условия, при которых этот эффект имеет место или, наоборот, подавляется.

2. Методика

Кремний *p*-типа с ориентацией (111) и удельным сопротивлением 15 Ом·см, выращенный методом Чохральского, подвергался стандартной обработке, после чего облучался ионами фосфора в режиме сканирования (установка ИЛУ-200). Вакуум в области мишени составлял $\sim 10^{-3}$ Па. Образцы крепились путем прижима к медному фланцу, охлаждаемому проточной водой, температура которой регулировалась термостатом. Контрольные измерения с помощью термопары показали

достаточно хорошую воспроизводимость тепловых режимов при данных условиях. Структура поверхностного слоя изучалась путем электронографии на отражение при энергии электронов 100 кэВ. Для изучения структуры глубинных слоев и определения толщины слоя с измененной структурой применялось послойное химическое травление.

3. Эксперименты и их обсуждение

Результаты экспериментов приведены в таблице. Прежде всего мы проверили, действительно ли в тех режимах, при которых наблюдается ЭБД, на некоторой стадии облучения происходит аморфизация. Для этого одна партия образцов облучалась в обычных для данного эффекта режимах (энергия ионов $E = 40$ кэВ, средняя плотность ионного тока $j = 5-30$ мкА/см², доза $\Phi = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻²). Другая партия облучалась в тех же условиях дозой $\Phi = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻². Образцы первой партии после облучения имели структуру мозаичного монокристалла с включениями поликристаллической фа-

Структура слоев, облученных ионами P⁺ в различных режимах (по данным электронографии на отражение)

Энергия, кэВ; доза, см ⁻²	Плотность ионного тока, мкА/см ²	T_0 , °C	Структура
40; $6 \cdot 10^{16}$	5–30	≥ 20	Мозаичный монокристалл, поликристалл
40; $2 \cdot 10^{15}$	5–30	≥ 20	Аморфизация
40; $3 \cdot 10^{17}$	20	≤ 10	Аморфизация
40; $6 \cdot 10^{16}$	20	≥ 20	Мозаичный монокристалл, поликристалл
1) 50; $6 \cdot 10^{14}$ 2) 100; $6 \cdot 10^{16}$	16	20 200	Аморфизация
1) 50; $6 \cdot 10^{14}$ перерыв 10 мин 2) 50; $2 \cdot 10^{17}$	16	20 20	Аморфизация

[¶] E-mail: Tetelbaum@phys.unn.ru

зы, тогда как образцы второй партии оказались аморфизованными до обычной глубины $h \approx R_p + \Delta R_p$, где R_p — средний проецированный пробег ионов, а ΔR_p — страгглинг. Следовательно, в ЭБД на первой стадии облучения аморфизация имеет место, а кристаллическое состояние, наблюдающееся при увеличении дозы, обусловлено кристаллизацией первоначально аморфизованного слоя.

Для проверки роли теплового фактора в ЭБД часть образцов прижималась к фланцу через слой In–Ga-пасты, улучшающей тепловой контакт. Начальная температура фланца T_0 изменялась путем регулировки температуры воды, омывающей фланец. Как установлено путем измерения термопарой, прикрепленной к образцу, при облучении с $j = 20$ мкА/см² температура образца увеличивалась за первые 5 мин на 60°C, а затем выходила на насыщение. Оказалось, что при $T_0 \leq 10^\circ\text{C}$ кристаллизация не имеет места вплоть до самых больших использованных доз ($3 \cdot 10^{17}$ см⁻²), тогда как при $T_0 \geq 20^\circ\text{C}$ она наблюдается. Таким образом, ЭБД — не чисто атермический эффект — является результатом совместного действия ионной имплантации и некоторого нагрева образца ионным пучком.

Следующий эксперимент преследовал цель выяснить роль высокой концентрации фосфора, накопленной в аморфизованном слое. (В принципе можно было представить сценарий, не связанный с накоплением примеси). Для этого был поставлен опыт по двухстадийному облучению ионами P^+ . На первой стадии энергия ионов составляла $E = 50$ кэВ, а доза $\Phi = 6 \cdot 10^{14}$ см⁻²; начальная температура $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Затем энергия ионов повышалась до 100 кэВ, и проводилось второе облучение дозой $6 \cdot 10^{16}$ см⁻² при $j = 16$ мкА/см² и $T_0 = 200^\circ\text{C}$. После такого двухстадийного облучения слой оказывался аморфным, несмотря на повышенную температуру второго облучения. Это можно объяснить тем, что из-за различия в энергиях ионов второе облучение не внесло в слой, аморфизованный при первом облучении, достаточного количества фосфора. Таким образом, накопление высокой концентрации примеси (в данном случае фосфора) действительно необходимо для ЭБД.

Весьма важным фактором, выявленным в процессе наших экспериментов, явилось влияние перерывов в облучении на ЭБД („старение“). Сначала образец облучался дозой $\Phi = 6 \cdot 10^{14}$ см⁻² ($E = 50$ кэВ, $T_0 = 20^\circ\text{C}$), затем облучение прекращалось на 10 мин, после чего оно возобновлялось и проводилось в режиме, обычном для ЭБД: доза доводилась до $2 \cdot 10^{17}$ см⁻², $j = 16$ мкА/см². В этом случае слой оказался аморфным, т.е. ЭБД не проявляется.

Таким образом, механизм ЭБД можно представить следующим образом. Вначале, по мере накопления радиационных дефектов, имеет место аморфизация. При дальнейшем облучении в аморфном слое и на его границе накапливается высокая концентрация примеси (фосфора). Так как связь Si–P слабее связи Si–Si [4], энергетический барьер для обратного процесса —

радиационно-ускоренной рекристаллизации [5] — снижается, и последняя начинает доминировать над процессом спонтанной аморфизации. Процессу рекристаллизации способствует повышение температуры под действием ионного пучка, если не применять специальных мер к теплоотводу.

Опыт по „старению“ свидетельствует о том, что после наступления аморфизации прекращение облучения приводит к стабилизации аморфной фазы, в результате чего даже последующее введение высокой концентрации фосфора становится недостаточным для радиационно-стимулированной кристаллизации. Вероятно, стабилизация связана со структурной релаксацией [6] или с проникновением из адсорбированного слоя примесей (O, N, C), образующих с атомами Si более прочные связи по сравнению с Si–Si [7]. (В последнем случае важную роль играет степень и „чистота“ вакуума).

С прикладной точки зрения важно, что данная процедура позволяет избежать кристаллизации, т.е. „купировать“ ЭБД, если мы хотим получить сильно легированные слои Si в аморфном состоянии. Другим способом купирования ЭБД, как было сказано выше, является снижение температуры образца при облучении.

4. Заключение

Выполненная серия экспериментов показывает, что ЭБД является терморadiационно-стимулированным процессом и обусловлен ослаблением химических связей в *a*-Si вследствие накопления высокой концентрации имплантированной примеси. Исследования были проведены при облучении только фосфором, но данные выводы, по-видимому, справедливы и при использовании в ЭБД других примесей с меньшей энергией связи (Si-примесь) по сравнению со связью (Si–Si), например, бора и мышьяка. Предварительные результаты данной работы были опубликованы в [8]. Заметим, что ЭБД, по-видимому, наблюдался и при ионном легировании нанокристаллов в матрице SiO₂ [9], хотя в принципе поведение нанокристаллов может отличаться от поведения массивного образца.

Список литературы

- [1] Н.И. Герасименко, А.В. Двуреченский, С.И. Романов, Л.С. Смирнов. ФТП, **6** (10), 1978 (1972).
- [2] Н.И. Герасименко, А.В. Двуреченский, С.И. Романов, Л.С. Смирнов. ФТП, **7** (11), 2195 (1973).
- [3] F.F. Morehead, V.L. Crowder. Rad. Eff., **6** (1,2), 27 (1970).
- [4] В.И. Веденеев, Л.В. Гурвич, В.Н. Кондратьев, В.А. Медведев, Е.Л. Франкевич. *Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и средство к элеткрону.* (М., АН СССР, 1962).
- [5] A.I. Titov, V.S. Belyakov, P. Cardwell, G. Farrel. Rad. Eff. **139**, 189 (1996).
- [6] E.P. Donovan, F. Spaepen, J.M. Poate, D.C. Jacobson. Appl. Phys. Lett., **55**, 1516 (1989).

- [7] E.P. Kennedy, L. Csepregi, J.W. Mayer, T.W. Sigmon. *J. Appl. Phys.*, **48** (10), 4241 (1977).
- [8] А.И. Герасимов, Д.И. Тетельбаум, А.Ф. Хохлов. В кн: *Взаимодействие атомных частиц с твердым телом* (Минск, изд-во МРИ, 1978) ч. 2, с. 93.
- [9] Г.А. Качурин, С.Г. Яновская, Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов. *ФТП*, **37** (6), 738 (2003).

Редактор Л.В. Беляков

To the high-dose effect under the ion implantation of silicon

D.I. Tetelbaum, A.I. Gerasimov

Physical Technical Research Institute
of Nizhnii Novgorod State University,
603950 Nizhnii Novgorod, Russia

Abstract In the case of ion implantation of phosphorus in silicon, some experiments are carried out in order to clear up mechanisms of the „high dose effect“. On the ground of experimental data, a conclusion is drawn that the effect is caused by weakening interatomic bonds in a heavy doped with phosphorus amorphous silicon and that the effect has a thermo-radiative character. The interruption of the irradiation after achieving amorphization dose results in a stabilization of the amorphous state.