

05.3; 07; 12

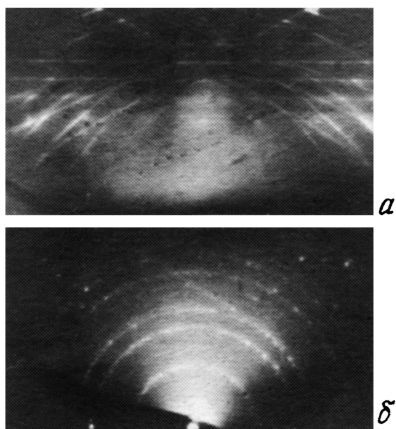
© 1991

О КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КРЕМНИЯ, РАСПЛАВЛЕННОГО  
ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕА.М. Чапланов, Г.Д. Ивлев,  
А.Е. Ивашкевич

Кристаллизация расплавленного слоя, образующегося при воздействии наносекундного лазерного импульса на монокристалл кремния, как известно [1], является эпитаксиальной. Однако, что обнаружено в данной работе, условия эпитаксиального роста выполняются не на всем временном интервале кристаллизации. При выходе фронта фазового перехода на поверхность вследствие его неоднородности образуется ультратонкий слой поликристалла.

Исследуемые образцы представляли собой пластины кремния КДБ-10 ориентации (111) и (100), прошедшие финишную полировку поверхности. Исследовались также имплантированные фосфором (70 кэВ,  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) пластины (111) Si КДБ-0.3 с ионно-аморфизированным слоем толщиной  $\sim 0.1$  мкм. Образцы облучались в экспериментальных условиях [2] при диаметре зоны облучения несколько миллиметров и длительности импульса рубинового лазера 70 нс. О кристаллическом состоянии поверхности кремния судили по картине дифракции быстрых электронов на отражение в электронном микроскопе JEM-120. Наибольшая величина плотности энергии лазерного облучения  $W$  составляла  $2.5 \text{ Дж/см}^2$ .

Электроннограмма на отражение от поверхности монокристаллического кремния состоит из отдельных рефлексов (см. рисунок), расположенных в соответствии с кристаллографической ориентацией пластины, и слабого диффузного гало вблизи центрального рефлекса, что связано с наличием на поверхности естественной пленки окисла кремния толщиной обычно до 2 нм. На электроннограммах, относящихся к облученным участкам пластины кремния, удалось зафиксировать наличие тонкого поликристаллического слоя. Типичная для поликристалла картина электронной дифракции наблюдалась как в эксперименте с монокристаллическим кремнием независимо от кристаллографической ориентации его поверхности, так и после облучения ионноаморфизированных образцов при плотностях энергии выше эпитаксиального порога, который составляет  $1.5\text{--}1.6 \text{ Дж/см}^2$ . Варьирование величины  $W$  от порога плавления монокристалла  $\sim 1 \text{ Дж/см}^2$  до наибольшего значения показало, что наиболее явно выраженная неориентированная кристаллизация поверхностного слоя жидкой фазы происходит при энергиях облучения  $2\text{--}2.5 \text{ Дж/см}^2$ , когда глубина проплавления по данным численного моделирования [3] превышает  $0.4\text{--}0.5$  мкм.



Картина электронной дифракции на отражение от поверхности кремния до (а) и после (б) лазерного облучения при плотности энергии  $2,5 \text{ Дж/см}^2$ .

Как следует из анализа [4] экспериментальных данных о рассеянии зондирующего излучения кремнием при фазовых переходах, вызываемых наносекундным лазерным нагревом, поверхность полупроводника на начальной стадии плавления и на заключительном этапе кристаллизации является гетерогенной с характерным размером жидкофазных включений  $\sim 10^{-4}$  см. Если, кроме этого, учесть, что время уменьшения отражательной способности поверхности  $\text{Si}$  при завершении кристаллизации расплава составляет около 50 нс [2], то можно оценить латеральную скорость движения межфазных границ, которая получается порядка 10 м/с. Она в несколько раз превышает скорость движения фронта кристаллизации к поверхности образца. Необходимо подчеркнуть, что в процессе кристаллизации островков расплава межфазная граница в области выхода ее на поверхность характеризуется значительной кривизной. Именно эти два фактора, т.е. высокая латеральная скорость кристаллизации и кривизна межфазных границ, ответственны, по нашему мнению, за образование тонкого приповерхностного слоя, кристаллическое состояние которого не адекватно структуре нижележащей области полупроводника, кристаллизованной эпитаксиально.

Необходимо отметить, что латеральный характер кристаллизации расплава при выходе межфазной границы на поверхность обуславливает относительно большое (десятки наносекунд) время уменьшения коэффициента отражения зондирующего излучения [2]. Оно составляло бы наносекунды, если межфазная граница, движущаяся к поверхности со скоростью 2–4 м/с [3], была бы плоской. В таком случае отражательная способность кремния уменьшалась бы за время

выхода межфазной границы на поверхность с глубины проникновения излучения в расплав, составляющей  $\sim 10^{-6}$  см.

Толщину слоя поликристалла оценим на основе данных электронографии, воспользовавшись результатами исследования [5]. В соответствии с указанной работой, наблюдая за изменением дифракционной картины при фиксации критических углов падения электронного пучка, можно получить информацию как о слоевом строении исследуемого образца, так и о толщине отдельного слоя. Она примерно равна глубине проникновения электронов в образец при оптимальных условиях наблюдения дифракционной картины, в данном случае от поликристалла на монокристаллической подложке, и определяется формулой:  $d = l\xi / L$ , где  $l$  - расстояние на фотоплёнке от центрального рефлекса до края тени поверхности образца,  $L$  - длина дифракционной камеры и  $\xi$  - экстинкционный параметр. Величина  $\xi$  для основных полупроводниковых материалов должна составлять максимум 1 мкм, если энергия электронов  $\sim 100$  кэВ [5]. Воспользовавшись нашими значениями  $l$  и  $L$  получаем, что толщина поликристаллического слоя кремния не превышает в среднем  $\sim 10$  нм, т.е. весьма мала. Кроме того, как можно допустить, рассматриваемый поликристаллический слой не является сплошным, а имеет островковый характер.

И то и другое весьма затрудняют наблюдение такого поликристалла в просвечивающем электронном микроскопе. Именно этот факт, а также не столь широкое использование метода электронной дифракции на отражение в подобных экспериментах, объясняют, по нашему мнению, то обстоятельство, что обнаруженная в данном исследовании особенность наносекундной лазерной модификации кремния ранее не была установлена.

В заключение отметим необходимость постановки дальнейших исследований в этом направлении с тем, чтобы получить информацию о строении поликристалла в латеральном измерении, а также экспериментально определить его толщину, воспользовавшись методикой послойного окисления и травливания в сочетании с методом электронной дифракции на отражение.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж.М. Пауга и др. Пер. с англ. под ред. А.А. Углова. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
- [2] И в л е в Г.Д. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 1. С. 195-197.
- [3] П и л и п о в и ч В.А., М а л е в и ч В.Л., И в л е в Г.Д., Ж и д к о в В.В. // ИФЖ. 1985. Т. 48. № 2. С. 306-312.

- [4] Малевич В.Л., Ивлев Г.Д. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1990. № 5. С. 157-159.
- [5] Нагдаев Е.Н., Балашова Н.А., Панасенко П.В. // Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства. 1990. В. 3 (81). С. 42-45.

Поступило в Редакцию  
25 октября 1991 г.