

06.2; 07; 12

© 1992

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ КРЕМНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ИЗЛУЧЕНИЯ KrF ЛАЗЕРАВ.Л. К а н д ы р е в, П.Б. С е р г е е в,
М.А. Т ю н и н а

Расширяющееся применение в микротехнологии эксимерных лазеров определило интерес к явлениям кристаллизации кремния под воздействием излучения этих лазеров. Результаты экспериментальных исследований, обычно интерпретируемые в рамках модели плавления, не всегда совпадают с ней [1, 2] и требуют дополнительных исследований. Данная работа посвящена изучению особенностей изменения морфологии поверхности и структуры слоев кремния различных модификаций после воздействия излучения KrF лазера с целью определения механизмов их кристаллизации.

В экспериментах использовались подложки промышленного кремния ориентации (111) и (100) с чистой или окисленной (SiO_2 толщиной 0.2...0.6 мкм) поверхностью и нанесенными слоями поликристаллического кремния (ПКК) толщиной 0.2...0.4 мкм, а также со слоем SiO_2 0.2 мкм поверх ПКК. Исследовались также подложки после ионной имплантации аморфизирующими дозами примеси. Лазерная обработка проводилась в вакууме 10^{-5} Тор при комнатной температуре. Использовался лазер на KrF ($\lambda_{\text{лаз}} \approx 248$ нм) с

энергией в импульсе до 10 Дж, длительностью импульса 80 нс. Плотность энергии лазерного излучения (ЛИ) на подложке (E) варьировалась от 0.1 до 6.0 Дж/см² при площади обработки до 2 см². Образцы исследовались с помощью оптической и растровой электронной микроскопии, электронографии. Измерены были также спектры отражения в диапазоне 230...750 нм.

Изучение изменения морфологии поверхности образцов после воздействия ЛИ показали ее различный характер для слоев ПКК на кристаллической подложке (ПКК-К), слоев ПКК на окисле (ПКК-О), а также для монокристаллического кремния (МК). Поверхность МК оставалась без видимых нарушений вплоть до $E = 2.5...2.8$ Дж/см². Одновременно наблюдался рост коэффициента отражения после воздействия с $E \approx 0.6...0.8$ Дж/см². При превышении $E = 2.5$ Дж/см² на некоторых образцах наблюдалось локальное растрескивание поверхности. При $E = 3...4$ Дж/см² формировались кратеры и поверхностные структуры [4]. Диапазону $E = 1.0...2.5$ Дж/см² соответствовали электронограммы с рефлексами монокристалла и линиями Кикучи. При $E \geq 2.5$ Дж/см² появились линии поликристаллического кремния. То есть, в зависимости от E , формировался или бездефект-

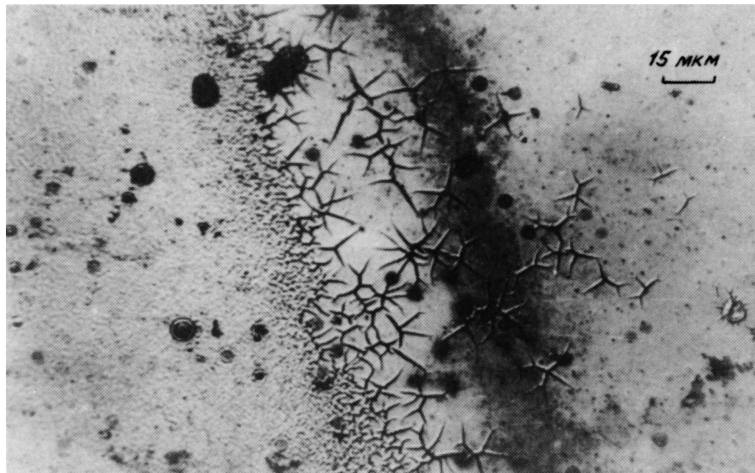


Рис. 1. Оптическая микрофотография поверхности слоя поликристаллического кремния на монокристаллической кремниевой подложке после воздействия однократного лазерного импульса ($\lambda_1 = 248$ нм) с $E = 1.5$ Дж/см². Толщина слоя поликристаллического кремния – 0,2 мкм.

ный кристалл с гладкой поверхностью, либо блочная структура (при припороговых режимах разрушения поверхности), а также кратеры с поликристаллической структурой вынесенного материала.

Для слоев ПКК-К (рис. 1) порог изменений составил 0,6 Дж/см². Менялся коэффициент отражения. После увеличения E до 1,5 Дж/см² (для ПКК-К толщиной 0,2 мкм) или 2,0 Дж/см² (для слоя в 0,4 мкм) на поверхности появились структуры, аналогичные описанным в [3] и напоминающие крупноячеистую сеть трещин, размер ячеек которой уменьшался с ростом E . Увеличение E до $E = 2.0 \dots 2.5$ Дж/см² и более приводило к формированию микрорельефа и кратеров. Необработанные слои ПКК имели выраженную текстуру. Воздействие ЛИ с $E \geq 1.5$ Дж/см² (2,0 Дж/см²)* приводило к исчезновению текстуры и формированию мелких поликристаллов. Значениям $E \leq 1.5$ Дж/см² (2,0 Дж/см²) соответствовали электроннограммы с линиями крупнокристаллического кремния и рефлексами кристалла. В интервале $E \geq 2.0 \dots 2.5$ Дж/см² наблюдались размытые рефлексы, на которые накладывались линии поликристалла при $E = 3.0 \dots 3.5$ Дж/см² (аналогично МК). Таким образом, воздействие ЛИ приводило к перекристаллизации слоев ПКК-К с формированием, в зависимости от E , поликристаллической структуры, монокристаллических включений в области дендритных структур, блоков монокристалла при припороговых режимах деградации поверхности.

* Далее в тексте значения E в скобках соответствуют слою ПКК-К толщиной 0,4 мкм.

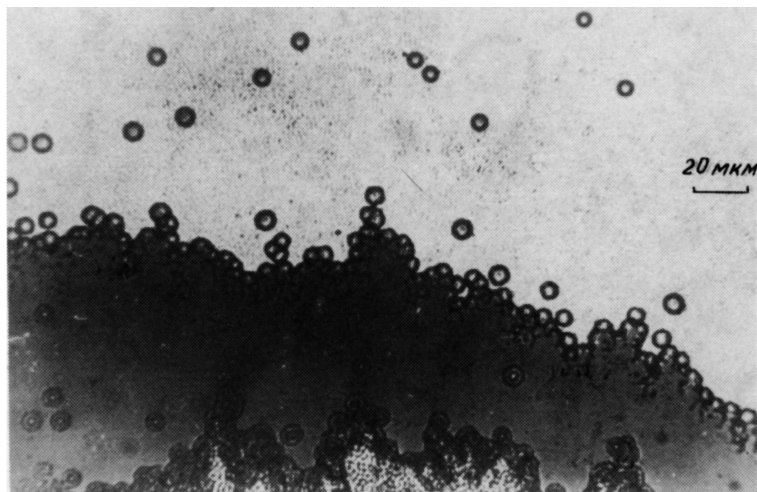


Рис. 2. Оптическая микрофотография поверхности слоя поликристаллического кремния на SiO_2 после однократного воздействия лазерного импульса ($\lambda_l = 248$ нм) с $E = 1.0$ Дж/см². Толщина слоя поликристаллического кремния - 0.2 мкм.

Совершенно иной характер носили изменения поверхности ПКК-О (рис. 2). В интервале $E = 0.3 \dots 0.6$ Дж/см² обнаружено формирование микрорельефа с характерным размером 1...2 мкм (или зернистой поверхности в случае ПКК-О с защитным слоем SiO_2). После воздействия ЛИ с $E = 0.5 \dots 1.0$ Дж/см² наблюдались отдельные округлые структуры размером около 10 мкм, с гладкой поверхностью и отличающиеся по цвету от подложки. По мере увеличения E до 1.0 Дж/см² плотность и размеры этих структур росли вплоть до полного их слияния. В результате многоимпульсного воздействия с $E \geq 1.0$ Дж/см² увеличивались размеры округлых структур, но не их плотность. Для образцов с защитным слоем SiO_2 при $E \geq 0.6 \dots 0.7$ Дж/см² отмечена абляция пленки окисла. Увеличение E до 2.0 Дж/см² приводило к полному испарению слоя ПКК. На поверхности нижележащего слоя окисла при $E = 2.2 \dots 2.5$ Дж/см² формировались характерные для системы SiO_2-Si поверхностные структуры [4]. Изучение структуры слоев показало, что независимо от состояния исходного слоя (слой с текстурой либо аморфизованный) под воздействием ЛИ с $E = 0.3 \dots 2.0$ Дж/см² на поверхности образцов формировались слои крупнокристаллического кремния.

Обнаруженные изменения можно объяснить исходя из модели плавления подложек. Для подложек МК рост бездефектного кристалла с гладкой поверхностью наблюдался после обработки МК в режимах, соответствующих плавлению кремния с последующей эпитаксиальной кристаллизацией. Но трудно объяснить обнаруженную блочную струк-

туру, растрескивание поверхности и кратерообразование.

Аналогично в модели плавления можно интерпретировать лишь часть изменений, обнаруженных после лазерного воздействия на слой ПКК-К; в частности, модель плавления не давала объяснения эффекта формирования дендритных структур.

При рассмотрении процессов кристаллизации ПКК-О с точки зрения модели плавления [5] затруднения в интерпретации вызвал эффект образования и роста отдельных округлых областей.

Причиной появления обнаруженных эффектов могла быть неоднородность лазерного воздействия. В случае $\lambda_l = 248$ нм коэффициент поглощения кремния достигал насыщения, и неоднородность поглощения не могла быть определяющей, а ключевым моментом являлась неоднородность плавления материала, связанная с локальными неоднородностями его свойств. Если принять во внимание вакансионную модель плавления [6] и возможность генерации вакансий под воздействием ЛИ [7], можно предположить, что неоднородность плавления могла быть связана с неоднородным распределением вакансий, которое, в свою очередь, возможно при наличии центров генерации вакансий типа структурных неоднородностей. При короткой длительности импульса ЛИ и малых временах протекания всех процессов неоднородности плотности вакансий не выравнивались, обеспечивая своего рода каналы для более быстрого опережающего плавления кремния и сопутствующих процессов. Так, в случае ПКК-К "ускоренное" плавление в областях микрон неоднородностей обусловило неоднородность фронта кристаллизации, что и стало причиной формирования дендритных структур.

Неоднородностью фронта плавления можно объяснить и формирование округлых структур в слоях ПКК-О: они образовывались в местах локального проникновения фронта плавления до поверхности окисла. Аналогично неоднородности фронта плавления (и фронта испарения), обусловленные наличием структурных нарушений, служили причиной локального допорогового разрушения поверхности МК.

Таким образом, экспериментально установлены режимы ультрафиолетовой лазерной эпитаксиальной рекристаллизации монокристаллического кремния и слоев ПКК-К, а также режим формирования поликристаллического кремния на слое окисла кремния. Эффекты допорогового разрушения поверхности МК, формирования дендритных структур и другие эффекты предложено объяснять как следствие локальности воздействия ЛИ, обусловленной наличием центров генерации вакансий в облучаемых слоях подложек.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Maillou J.G., M a t h e E.L., D e s o y e r J.C., D e U n a m u n o S., F o g a r a s s y E. // Appl. Surface Science. 1989. V. 43. N 1-4. P. 150-157.

- [2] W i n e r K., A n d e r s o n G.B., R e a d y S.E.
B a c h r a c h R.Z., J o h n s o n R.I., P o n-
s e F.A., B o y c e J.B. // Appl. Phys. Lett. 1990.
V. 57. N 21. P. 2222-2229.
- [3] Д е м ч у к А.В., Л а б у н о в В.А. // Поверхность. Физика,
химия, механика. 1991. № 7. С. 82-88.
- [4] К а н ц ы р е в В.Л., С е р г е е в П.Б., Т ю н и н а М.А. //
Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 6. С. 63-67.
- [5] W i l l e m s G.Y., M a e s H.E. // J. Appl. Phys.
1990. V. 67. N 3. P. 1219-1228.
- [6] Я к о в л е в Е.Б. // Известия АН СССР. Сер. физ. 1989.
Т. 53. № 3. С. 591-594.
- [7] Б о й к о В.И., Л у к ь я н ч у к Б.С., Ц а р е в Е.Р. //
Труды ИОФАН. 1991. Т. 30. С. 6-82.

Поступило в Редакцию
12 августа 1992 г.