

- [1] Лазурик В. Т., Калининко А. И. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 11. С. 2449—2450.
- [2] Голубничий П. И., Корчинов С. Д., Пономарев В. Н., Яковлев В. И. // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 5. С. 700—701.
- [3] Давыдов А. А., Корчинов С. Д., Лазурик В. Т. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 9. С. 1850—1851.
- [4] Голубничий П. И., Калужный Г. С., Корчинов С. Д. // ПМТФ. 1984. № 1. С. 9—11.
- [5] Голубничий П. И., Давыдов А. А., Корчинов С. Д., Прогнижак А. Б. // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 5. С. 698—700.
- [6] Ляшнев Л. М., Наугольняк К. А. // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 2. С. 641—668.
- [7] Вукалович М. П., Новиков И. И. Уравнение состояния реальных газов.

Харьковский государственный университет им. А. М. Горького

Поступило в Редакцию
30 ноября 1988 г.
В окончательной редакции
30 января 1989 г.

07; 11

Журнал технической физики, т. 59, в. 11, 1989

ОБРАЗОВАНИЕ ДЕНДРИТНЫХ СТРУКТУР ПРИ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ СЛОЕВ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

А. В. Демчук, В. А. Лабунюв

Использование методов лазерной перекристаллизации в полупроводниковой электронике предполагает глубокое исследование процессов, сопровождающих фазовый переход в многослойных кремниевых структурах, включающих как слои аморфного, так и поликристаллического и монокристаллического кремния, под действием лазерного излучения. К настоящему времени выполнен большой объем исследований по лазерной перекристаллизации ионно-имплантированного кремния в разных временных диапазонах воздействия [1]. Систематических исследований перекристаллизации слоев поликристаллического кремния (ПКК) не проводилось, хотя отличие в структуре облучаемого объекта может существенно влиять на процесс перекристаллизации.

В данной работе приводятся результаты исследований модификации морфологии и структуры поверхности слоев ПКК на монокристаллических кремниевых подложках, перекристаллизованных импульсным лазерным излучением наносекундной длительности.

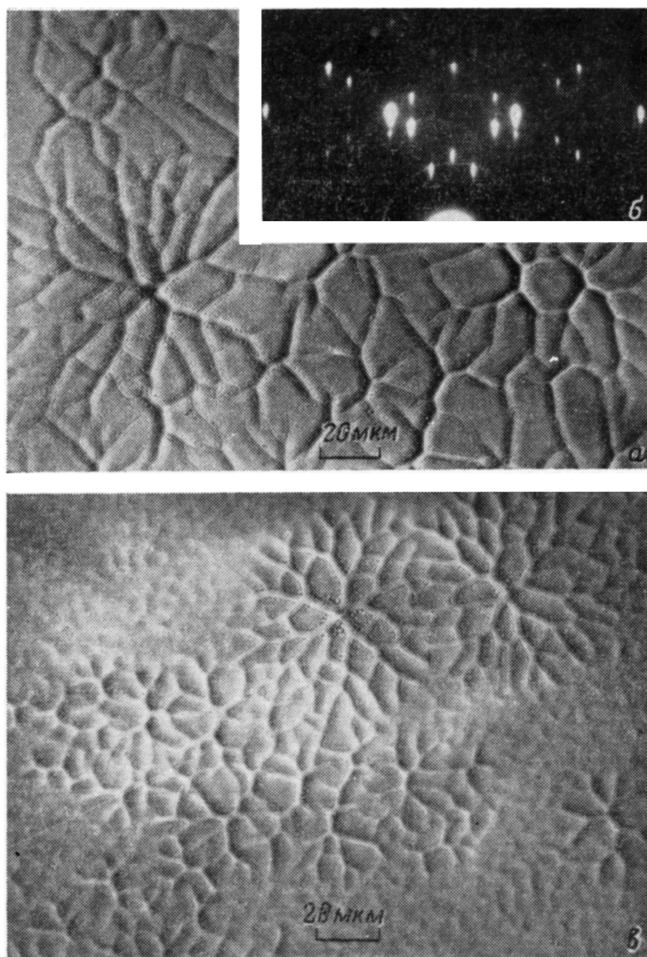
В качестве подложек экспериментальных образцов использовали полированные монокристаллические кремниевые пластины различного типа с ориентацией поверхности (100) и (111). Перед наращиванием слоя ПКК пластины подвергали стандартной химической обработке. Наращивание слоя ПКК толщиной 0.45 мкм осуществляли методом химического осаждения из паровой фазы как при нормальном давлении и температуре $T=780 \pm 10$ °C (метод CVD), так и при пониженных давлении ($P=80$ Па) и температуре ($T=625 \pm 25$ °C) (метод LPCVD). CVD-слои ПКК легировали в процессе осаждения фосфором до концентрации $\sim 10^{20}$ см⁻³. На части образцов, полученных методом LPCVD, осуществляли ионную имплантацию фосфора дозой $D=2.10^{15}$ см⁻² с энергией $E=100$ кэВ с аморфизацией поверхности слоя ПКК.

Перекристаллизацию слоев ПКК осуществляли импульсным излучением основной частоты и второй гармоники лазера на неодимовом стекле с длинами волн 1.06 и 0.53 мкм, работающем в режиме модулированной добротности с длительностью импульса $\tau_p=50$ нс. Плотность энергии варьировалась с помощью нейтральных калиброванных светофильтров в диапазоне 0.1—5 Дж/см² с точностью ± 10 %. Лазерную обработку осуществляли на воздухе при комнатной температуре подложки.

Морфологию поверхности перекристаллизованных образцов исследовали методом оптической микроскопии на микроскопе НЕОРНОТ-21, кристаллическую структуру — методом электронографии на отражение на электронографе ЭМР-100. Также проводили исследование дефектной структуры на поверхности и косых шлифах перекристаллизованных

образцов методом оптической микроскопии в сочетании с обработкой в структурно-чувствительном травителе Сиртла. Пространственную локализацию фронта плавления выявляли на косых шлифах структур со слоем ПКК, противоположным подложке типом проводимости путем декорирования в хромовом травителе.

Характерной особенностью морфологии поверхности перекристаллизованных слоев являлось образование в режимах эпитаксиальной кристаллизации дендритных структур на образцах с неаморфизованной поверхностью. При обработке излучением с $\lambda=1.06$ мкм уе-



Морфология (а, с) и электронограмма (б) поверхности слоев ПКК на монокристаллических кремниевых подложках, перекристаллизованных импульсным ($\tau_n=50$ нс) излучением с $\lambda=1.06$ мкм при плотности энергии 2.8 (а, б) и 3 Дж/см² (с).

ловия эпитаксиальной кристаллизации на образцах с неаморфизованным слоем ПКК реализуются в интервале энергий 2.7—5 Дж/см². Образование характерных дендритных структур на поверхности перекристаллизованных слоев наблюдается в припороговых режимах эпитаксиальной кристаллизации в интервале энергий 2.7—3.2 Дж/см² (см. рисунок) независимо от ориентации монокристаллической подложки. Первоначально наблюдается образование крупноячейковой дендритной структуры (см. рисунок, а), которая с повышением энергии трансформируется в мелкоячейковую (см. рисунок, с). При этом в электронограммах эпитаксиально-перекристаллизованной поверхности в диапазоне энергий 2.7—3.2 Дж/см² наблюдается интенсивное двойникование (см. рисунок, б). Максимальная интенсивность рефлексов двойникования соответствует максимальным размерам ячеек дендритного роста. С увеличением плотности энергии в диапазоне 3.2—5 Дж/см² формируется гладкая зеркальная поверхность, в электронограммах которой присутствуют размытые рефлексы, обусловленные большой

плотностью дефектов кристаллической структуры. С превышением значения ~ 5 Дж/см² наблюдается деградация поверхности.

При обработке излучением с $\lambda=0.53$ мкм происходят аналогичные изменения морфологии и кристаллической структуры поверхности. Условия эпитаксиальной кристаллизации в этом случае реализуются в диапазоне энергий 1.9—3 Дж/см², в припороговых режимах эпитаксиальной кристаллизации независимо от ориентации подложки образуются дендритные структуры.

При травлении перекристаллизованных образцов дендритные структуры становятся более ярко выраженными. Значительное количество дефектов выявляется и в эпитаксиально перекристаллизованной области с однородной морфологией поверхности. Исследования декорированных и протравленных шлифов свидетельствуют о том, что дендритный рост кристалла инициируется на границе фронта плавления при достижении фронтом плавления подложки. С проникновением фронта плавления в глубь подложки при увеличении плотности энергии дендритные структуры исчезают.

Обсуждая полученные результаты, прежде всего необходимо отметить, что в миллисекундном диапазоне длительности независимо от кристаллической структуры поверхности перекристаллизуемых слоев таких дендритных структур не образуется [2]. Образование дендритных структур в наносекундном диапазоне длительности воздействия связано с особенностями фазового перехода в такой неоднородной с микроскопической точки зрения системе, как ПКК. Одной из главных особенностей данного режима обработки являются весьма высокие значения температурных градиентов на границе раздела фаз расплава—кристалл и соответственно большие скорости движения фронта кристаллизации, достигающие нескольких метров в секунду [1]. Образование дендритных структур в этих условиях, когда фронт плавления достигает монокристаллической подложки, свидетельствует о нарушении плоскостности фронта кристаллизации, что, как известно, при больших скоростях кристаллизации приводит к росту двойников [3]. Пространственная неоднородность фронта кристаллизации, очевидно, обусловлена неоднородностью фронта плавления слоя ПКК, связанной с неоднородностью его оптических свойств (усилением поглощения излучения в области границ зерен). С проникновением фронта плавления в глубь монокристаллической подложки постепенно исключается влияние первоначально неоднородного теплового поля в слое ПКК и дендритных структур не образуется.

При обработке образцов с аморфизованной поверхностью большая часть излучения поглощается в слое аморфного кремния (коэффициент поглощения в аморфном кремнии выше), где и инициируется процесс плавления. Нагрев нижележащего слоя ПКК и его плавление будут в основном определяться диффузионными процессами, менее чувствительными к неоднородностям его структуры, вследствие чего дендритных структур не образуется.

С возрастанием длительности лазерного воздействия в миллисекундном диапазоне в результате теплоотвода температура по слою ПКК выравнивается, что исключает образование таких дендритных структур.

Таким образом, в припороговых режимах эпитаксиальной кристаллизации слоев ПКК под действием лазерного излучения наносекундной длительности независимо от наличия примеси в слое, ориентации монокристаллической подложки и длины волны излучения формируются дендритные структуры. Образование дендритных структур в наносекундном диапазоне длительности воздействия при больших скоростях роста кристалла объясняется пространственной неоднородностью фронта плавления, обусловленной оптической неоднородностью перекристаллизуемой структуры.

Список литературы

- [1] Хайбуллин И. Б., Смирнов Л. С. // ФТП. 1985. Т. 19. Вып. 4. С. 569—591.
- [2] Батище С. А., Данилович Н. И., Демчук А. В. и др. // Поверхность. 1988. № 1. С. 115—123.
- [3] Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. М.: Мир, 1974. С. 130—131.

Минский радиотехнический институт

Поступило в Редакцию
2 ноября 1988 г.