

06.2; 11

© 1990

ДИФРАКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ В
ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ СЛОЯХ
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

А.В. Демчук, В.А. Лабунцов

Процессы модифицирования поверхности твердых тел под действием интенсивных лазерных пучков привлекают большое внимание исследователей. Полученные результаты в данной области за последнее десятилетие демонстрируют широкие возможности данного метода в технологии формирования полупроводниковых структур и интегральных микросхем [1]. В то же время многие стороны этого процесса недостаточно хорошо изучены, что ограничивает использование его в настоящее время в практических целях.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по модифицированию морфологии и структуры поверхности слоев поликристаллического кремния (ПКК) под действием лазерного излучения наносекундной длительности и сообщается об образовании поверхностных структур (ПС) нового типа, не наблюдаемых ранее, связанных с дифракцией лазерного излучения в перекристаллизуемом слое.

Исследования проводились на слоях ПКК толщиной 0.45 мкм, полученных методом химического осаждения из паровой фазы при пониженном давлении $P = 80$ Па и температуре $T = 625 \pm 25$ °С. В качестве подложек, на которые осаждали слой ПКК, использовали чистые и окисленные ($h SiO_2 = 0.1$ мкм) монокристаллические кремниевые пластины с ориентировкой поверхности (100) и (111). В слой ПКК имплантировали ионы фосфора ($E = 100$ кэВ, $D = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻²), что сопровождалось аморфизацией его поверхности. Обработку поверхности слоев ПКК осуществляли одним импульсом излучения основной и второй гармоник лазера на неодимовом стекле с длинами волн 1.06 и 0.53 мкм, работающем в режиме модулированной добротности с длительностью импульса $\tau_{и} = 50$ нс. Плотность энергии в импульсе варьировалась с помощью нейтральных калиброванных светофильтров в диапазоне 0.1–5 Дж/см² с точностью ± 10 %. Лазерную обработку осуществляли на воздухе при комнатной температуре.

Морфологию поверхности перекристаллизованных образцов исследовали методом оптической микроскопии в сочетании с обработкой в структурно-чувствительном травителе Сиртла, а также элект-

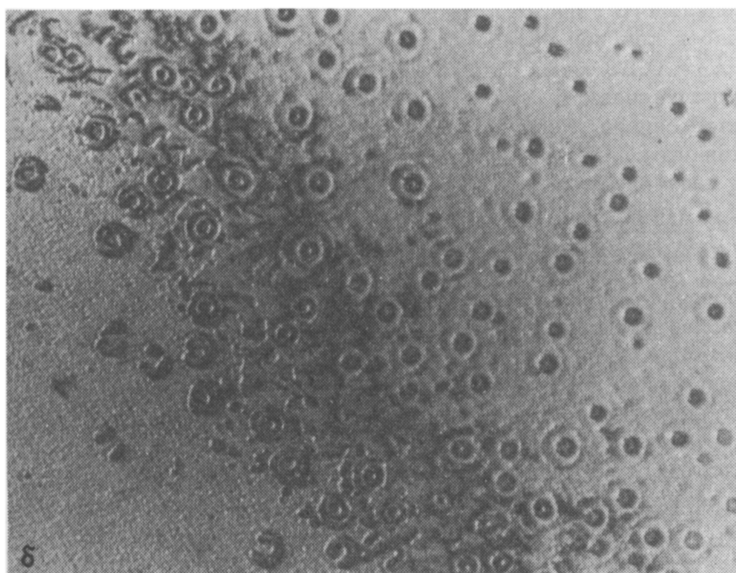
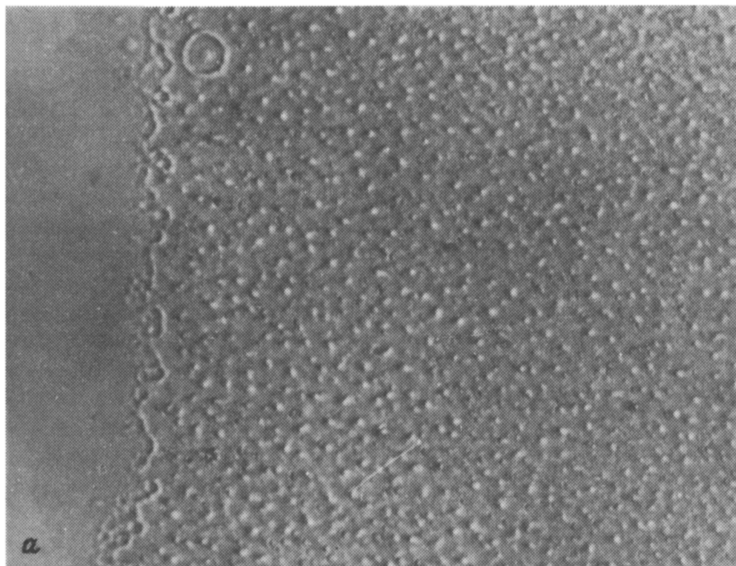


Рис. 1.

ронной микроскопии платино-углеродных реплик, кристаллическую структуру – методом электронографии на отражение. Пространственную локализацию фронта плавления выявляли на косых шлифах структур декорирования в хромовом травителе.

Как показывают проведенные исследования, при достижении полного плавления поверхности ($j \sim 0.9$ Дж/см² $\lambda_1 = 1.06$ мкм, $j \sim 0.5$ Дж/см² $\lambda_2 = 0.53$ мкм) формируется однородная мелкокристаллическая структура с $\langle 110 \rangle$ текстурой, аналогичной неповрежденному ионной имплантацией слою ПКК. С увеличением плотности энергии падающего излучения глубина проникновения фронта плавления возрастает и при достижении фронтом плавления подложки ($j \sim 1.2$ Дж/см² $\lambda_1 = 1.06$ мкм, $j \sim 0.9$ Дж/см² $\lambda_2 = 0.53$ мкм) наблюдается резкий переход от мелкокристаллической к крупнокристаллической структуре с размером зерна 0.2–0.4 мкм с развитым рельефом поверхности (см. рисунок, а). На образцах с монокристаллической подложкой с проникновением фронта плавления вглубь подложки реализуются условия эпитаксиальной кристаллизации.

При травлении перекристаллизованных образцов на границе перехода к крупнокристаллической структуре выявляются характерные ПС кольцевого типа (см. рисунок, б). Образование этих ПС наблюдалось как при обработке излучением с $\lambda_1 = 1.06$ мкм, так и с $\lambda_2 = 0.53$ мкм. Однако необходимо отметить, что при обработке излучением с $\lambda = 1.06$ мкм ПС этого типа проявляются наиболее сильно. Радиус (r_1) этих кольцевых ПС при обработке излучением с $\lambda_1 = 1.06$ мкм был равен 2.0 мкм, а при обработке излучением с $\lambda_2 = 0.53$ мкм их радиус (r_2) равен 1.4–1.5 мкм. При этом имеет место следующее соотношение:

$$r_1/r_2 = \sqrt{\lambda_1/\lambda_2} = \sqrt{2} \approx 1.4.$$

Образование этих ПС, проявляющихся в селективном изменении кристаллической структуры на пороге перехода от мелко- к крупнокристаллической структуре, очевидно, связано с локальным перераспределением энергии лазерного излучения. При травлении в структурно-чувствительном травителе области с мелкокристаллической структурой вследствие более высоких скоростей травления травятся быстрее, и на протравленной поверхности формируется соответствующий кристаллической структуре рельеф. Связь параметров ПС с длиной волны падающего излучения свидетельствует о том, что такое перераспределение энергии наиболее вероятно связано с дифракцией лазерного излучения на поглощающем слое облучаемого вещества.

Механизм образования этих ПС можно объяснить следующим образом. Как было показано ранее [2, 3], на начальных этапах воздействия лазерного излучения данного диапазона длительности на поверхности твердого тела с превышением пороговых значений плотности энергии реализуется локальное плавление поверхности с размером локальных областей расплава значительно меньшим λ .

С увеличением энергии плотность локальных областей расплава и их размеры возрастают, они сливаются с образованием обширных областей расплава. Рост областей расплава в основном осуществляется вширь. На определенном этапе их развития, очевидно, реализуется состояние, при котором в сплошном слое расплава существуют области твердой фазы правильной круглой формы достаточно малого размера. Такое состояние поверхности идеализированно можно представить в виде некоторой экранирующей плоскости (области расплава, где большая часть излучения отражается, а оставшаяся – поглощается в бесконечно тонком слое), в которой существуют круглые отверстия (области твердой фазы с достаточно большой глубиной поглощения). Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, когда радиус этих „отверстий“ равен радиусу m -й зоны Френеля r_m при условии $m < 10$, реализуются условия Френелевской дифракции на отверстиях круглой формы [4]. Радиус m -й зоны Френеля равен

$$r_m = \sqrt{m \frac{a \cdot b}{a + b} \lambda}, \quad (1)$$

где a – расстояние от точечного источника света до экранирующей поверхности, b – расстояние от экранирующей поверхности до плоскости наблюдения. Для плоской волны $a = \infty$ и, согласно (1),

$$r_m \approx \sqrt{m b \lambda}. \quad (2)$$

В качестве оценочного значения b можно взять значение толщины слоя ПКК (0.45 мкм). Тогда для реализации условий дифракции лазерного излучения с $\lambda_1 = 1.06$ мкм на круглом отверстии в данных условиях необходимо выполнение соотношения $r_m = 0.7 \sqrt{m b}$ мкм, верхнее значение которого при $m = 10$ $r_m \approx 2.2$ мкм. Радиус же образующихся ПС составляет ~ 2.0 мкм (см. рисунок, б), что хорошо согласуется с оценочным значением.

Необходимо также отметить еще одну характерную особенность этих ПС. В центре ПС при травлении заметно образование выступов, соответствующих максимуму распределения интенсивности излучения („отверстие“ открывает нечетное число зон), или ямок, соответствующих гашению излучения в этой области („отверстие“ открывает четное число зон), что также подтверждает дифракционный механизм их формирования.

При обработке излучением с $\lambda_2 = 0.53$ мкм размеры „отверстий“ в слое расплава, удовлетворяющие дифракционным условиям, соответственно уменьшаются в $\sqrt{2} \approx 1.4$ раза. Вероятно, что столь малые островки твердой фазы оказываются менее стабильными и проявление этого эффекта затруднено в данном диапазоне длительности обработки. В тех же областях, где наблюдалось обра-

зование этих структур, их радиус уменьшался до значения $\sim 1.4-1.5$ мкм, что хорошо согласуется с вышеизложенными представлениями. Необходимо отметить, что аналогичные структуры образуются и на образцах с окисленной подложкой.

Образование данных ПС в области границы перехода от мелко- крупнокристаллической структуре связано с пороговым эффектом резкого изменения структуры при малых изменениях плотности энергии лазерного излучения. Очевидно, в допороговых режимах обработки, несмотря на наличие таких локальных дифракционных изменений лазерного излучения, этих ПС не образуется.

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. Поу- та, Г. Фоти, Д.К. Джекобсона. М.: Машиностроение, 1987. 424 с.
- [2] Пристрем А.М., Демчук А.В., Данилович Н.И. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 6. С. 1220-1224.
- [3] Батище С.А., Данилович Н.И., Дем- чук А.В. и др. // Тез. докл. XIII Междунар. конф. по когерентной и нелинейной оптике (Минск, 6-9 сент. 1988 г.) Минск, 1988. Ч. 1. С. 36-37.
- [4] Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. С. 160.

Минский радиотехнический
институт

Поступило в Редакцию
5 марта 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 12
04; 05.2

26 июня 1990 г.

© 1990

ДИАМАГНИТИЗМ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАЗМЫ

В.Н. Подшивалов, В.В. Масалов,
В.И. Махов

Известно, что равновесная плазма твердого тела не обладает магнитными свойствами. Магнетизм неравновесной плазмы твердого