

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СВЕРХРЕШЕТОК Si – SiO₂, СТИМУЛИРОВАННАЯ ОДНООСНЫМ ПЕРИОДИЧНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ

А.Ф.Плотников, Ф.А.Пудонин, В.Б.Стопачинский

Получен новый тип сверхрешеток на основе тонких слоев Si и SiO₂. Воздействие одноосного периодического потенциала и термического отжига приводит к кристаллизации сверхрешеток с новой гексагональной кристаллической структурой.

Полупроводниковые сверхрешетки (СР), полученные молекулярно-лучевой эпитаксией или технологией осаждения из металлоорганических соединений, обладают уникальными электронными и оптическими свойствами и по ряду параметров превосходят известные полупроводники¹. У имеющихся СР из-за незначительного различия в постоянных решетки полупроводников, составляющих СР, кристаллическая структура практически не отличается от структуры объемных полупроводников. Целью данной работы было выяснить возможность получения совершенно новой кристаллической структуры у СР с помощью искусственного одноосного периодического потенциала.

Для осуществления перестройки СР в новую кристаллическую структуру необходимо, чтобы потенциальные ямы, возникающие в результате чередования двух материалов с разной шириной запрещенной зоны E_g , были достаточно глубокими порядка энергии связи. Поэтому в качестве исходных материалов использовались кремний Si и двуокись кремния SiO_2 , у которых разница в $E_g \sim 7$ эВ. Необходимо, чтобы поверхностная энергия, связанная с границей раздела, и объемная энергия системы были одного порядка, поэтому толщина каждого слоя Si и SiO_2 выбиралась 1,0 нм. Благодаря туннельной прозрачности барьеров SiO_2 , можно ожидать появления у СР новой электронной структуры. Чтобы единственным периодичным потенциалом в такой СР был искусственный одноосный периодичный потенциал, слои Si и SiO_2 делались аморфными. При этих условиях именно искусственный потенциал будет, по-видимому, определяющим в формировании кристаллической и электронной систем СР.

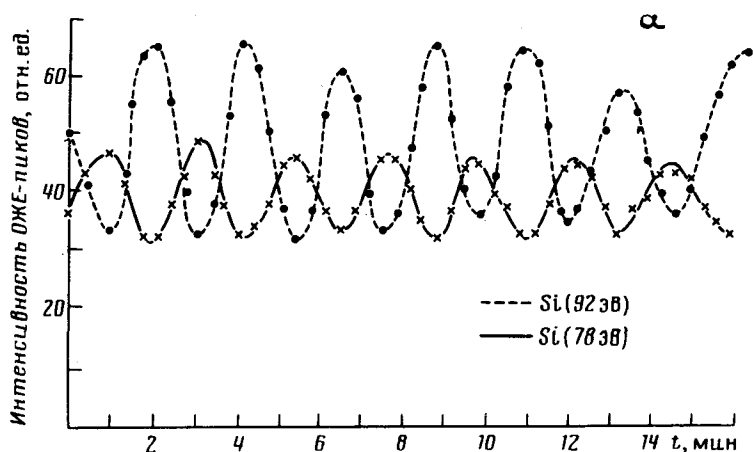


Рис. 1

Слоистая структура изготовлялась методом высокочастотного распыления мишеней поочередно Si и SiO_2 в спектрально чистом аргоне при давлении $P = 1,2 \cdot 10^{-3}$ торр². Предварительно камера откачивалась до $P = 10^{-7}$ торр. Скорость осаждения кремния составляла 0,09 нм/с, для SiO_2 — 0,04 нм/с. Температура подложек во время распыления не превышала 70°С. В качестве подложек использовался монокристаллический полированный кремний КЭФ-4,5 ориентации (100) или (111), шероховатость поверхности которого не превышала

ла 0,3 нм. Для того, чтобы избежать влияния на СР кристалличности подложки на последнюю предварительно наносился слой аморфного никеля толщиной 0,1 мкм. СР состояла из 81 слоя, причем первый и последний слои были из SiO_2 . С помощью дифракции быстрых электронов на отражение от структуры (RHEED) было показано, что период СР выдерживался с точностью не хуже 0,2 нм. Поэтому толщина слоев Si и SiO_2 составляла $1,0 \pm 0,1$ нм.

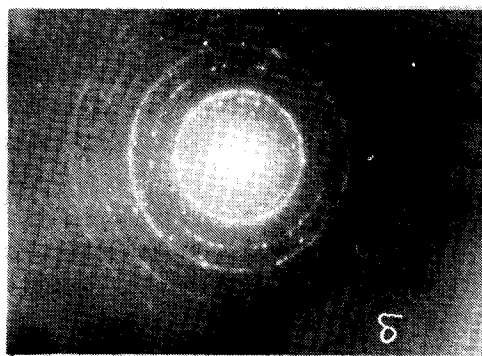
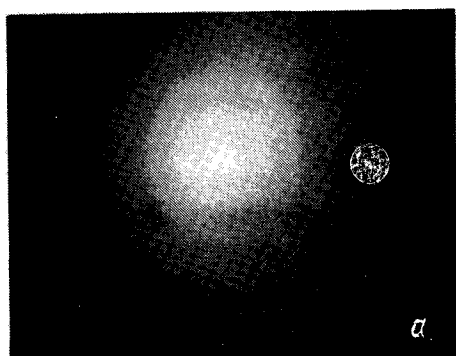


Рис. 2

С помощью профильной оже-спектроскопии было установлено, что полученные СР действительно являются слоистыми материалами и не содержат других примесных элементов концентрацией большей, чем 10^{19} см^{-3} . На рис. 1, а изображена зависимость интенсивности оже-сигналов Si (92 эВ) и SiO_2 (78 эВ) от времени травления структуры. На рис. 1, б показан кратер, возникший в результате травления СР ионами аргона под скользящим углом; овалы черного и белого цвета являются изображением во вторичных электронах слоев Si и SiO_2 . Из этих рисунков видно, что данная структура является слоистым материалом с периодичным чередованием Si и SiO_2 .

Исследование кристаллической структуры СР проводилось методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEM-6А. Ожидалось, что под действием одноосного периодичного потенциала СР перестроится в некую новую кристаллическую структуру.

ру с выделенной осью симметрии. Однако, электронографические измерения показали, что СР является аморфной, о чем свидетельствовало появление диффузного гало на электронограммах (рис. 2, а). По этой причине был проведен отжиг структур в атмосфере аргона при давлении $P = 10^{-3}$ торр. Отжиг СР при температуре $T = 300 - 400^\circ\text{C}$ в течение 0,5 часа привел к возникновению поликристаллической фазы — на электронограммах появились тонкие кольца и множество слабых рефлексов (рис. 2, б). Отжиг в течение двух минут при $T = 700^\circ\text{C}$ приводил к появлению на электронограммах точечных рефлексов, характерных для гексагональной кристаллической структуры (рис. 2, в). На этих электронограммах отсутствовали рефлексы от кристаллических Si и SiO₂, т. е. СР имела совершенно другую, по сравнению с Si и SiO₂, кристаллическую структуру с большими межплоскостными расстояниями $d = 0,479$ нм (для Si максимальное $d = 0,313$ нм, а для SiO₂ — 0,425 нм). Таким образом, при отжиге СР кристаллизовалась в новую гексагональную кристаллическую структуру, параметры решетки которой $a = 0,553$ нм, $c = 0,90$ нм. Известно 7 модификаций Si под давлением: из них 4 — гексагональные и 3 — гексагональные модификации SiO₂.³ Однако, параметры решетки данной СР не совпадают ни с одной из этих модификаций. При бомбардировке Si атомами металлов с энергией 1 — 10 эВ происходит перестройка поверхностного (0,1 мкм) слоя Si⁴. Одна из кристаллических модификаций перестроенного бомбардировкой Si очень близка к гексагональной структуре СР (имеет $d = 0,479$ нм). Можно предположить, что в результате действия одноосного периодичного потенциала и термического отжига произошел переход кубического Si в гексагональный, а решетка SiO₂ трансформировалась в новую структуру с параметрами гексагонального Si. Следует отметить, что отжиг не привел к размытию слоев СР; профильный эже-анализ подтвердил наличие периодичного чередования слоев. Более того, глубина модуляции интенсивности эже-сигналов от времени травления СР увеличилась на 10 %, что может быть связано с изменением плотности вещества в слоях.

Авторы благодарят В.И.Решетова за помощь в проведении электронографических исследований и Е.А.Виноградова и И.М.Суслова за обсуждение результатов.

Литература

1. Силин А.П. УФН, 1985, 147, 485.
2. Пудонин Ф.А., Селезнев В.Н., Токарчук Д.Н. Микроэлектроника, 1978, 7, 283.
3. Olijnyk H., Stikka S.K., Holzapfel W.B. Phys. Lett., 1984, 103A, 137.
4. Плотников А.Ф., Пудонин Ф.А., Стопачинский В.Б. Кн. Ионно-лучевая модификация материалов. Тезисы докладов Всесоюзной конференции, Черноголовка, 1987, 115.