

**АКТИВИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РОСТА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ  
УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СВЕТОМ ОБЛУЧЕНИЕМ**

Г. М. Гуро, Г. А. Калужная, Т. С. Мамеков, Л. А. Шелестин

УДК 548.315.52

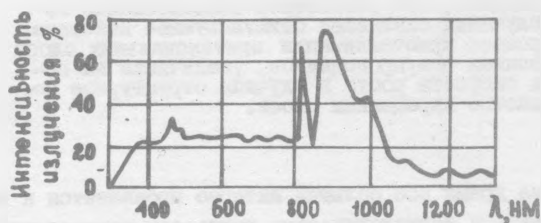
Найдено, что совместное использование УФ и ИК излучения оказывает стимулирующее действие на процесс кристаллизации эпитаксиальных слоев узкозонных полупроводников, увеличивая на порядок скорости роста и улучшая структурное совершенство выращенных слоев.

Последнее время все больший интерес проявляется к использованию излучения в технологических процессах микроэлектроники, в том числе газофазных процессах эпитаксии полупроводников /1/. Электромагнитное излучение в эпитаксии может использоваться как для обычного термического воздействия на реакционную систему, так и для нетермической активации процессов роста слоев.

Анализ литературных данных по применению излучения для стимуляции газофазных процессов эпитаксии германия, кремния и арсенида галлия показывает, что использование излучения широкого спектра (от ультрафиолетовых до инфракрасных длин волн) приводит к большим изменениям в скорости роста эпитаксиальных слоев /2/. Вместе с тем до сих пор существует неясность в механизме этих изменений. В литературе отсутствуют данные по изучению влияния электромагнитного излучения на рост эпитаксиальных слоев узкозонных полупроводников  $A_{IV}^{VI}$  и  $A_{IV}^{VVI}$ . Целью настоящей работы является исследование влияния светового облучения на процесс роста и свойства слоев  $PbTe$ ,  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ,  $HgTe$  и  $CdTe$ , полученных методом газовой эпитаксии, и анализ возможных его механизмов. Источником излучения является ксеноновая лампа сверхвысокого давления типа ДКСР-3000, излучающая свет в диапазоне 0,25 - 1,5 мкм, причем 10% мощности находится в УФ диапазоне, 35% в видимом и 55% в

ИК диапазоне. Спектр источника излучения приведен на рис. 1.

В разработанном нами методе световое излучение использовано как для нагрева реакционной системы (совместно с резистивным нагревом), так и для нетермического воздействия на рост эпитаксиальных слоев. Изучался рост слоев в условиях сублимационного переноса вещества через газовую фазу в квазизамкнутом объеме кварцевого реактора. Спектральный состав излучения изменяли путем применения световых фильтров. Подложками служили монокристаллические



Р и с. 1. Спектр ксеноновой лампы, использованный в качестве источника излучения

пластинки  $\text{BaF}_2$ , вырезанные в плоскости (111), обработанные во всех опытах одинаково. Температуры подложки и источника, измеряемые непосредственно во время опыта, для одного и того же высаживаемого вещества поддерживались одинаковыми независимо от применения фильтра. Фильтры помещались вне кварцевого реактора таким образом, что реакционная газовая среда и подложка во всех опытах находились в одинаковых условиях облучения с плотностью лучистого потока  $\sim 100 \text{ Вт/см}^2$ .

Результаты экспериментов приведены в табл. 1. Из приведенных данных видно, что облучение светом приводит к существенному увеличению (в среднем на порядок) скорости роста эпитаксиальных слоев изученных соединений. Максимальная скорость роста монокристаллических совершенных слоев составляет 2,2 мкм/мин, когда процесс проводится без фильтров, т.е. все излучение в диапазоне длин волн 0,25 – 1,5 мкм облучает и газовую фазу, и подложку. Изучение эпитаксиального роста в условиях выделенного УФ излучения

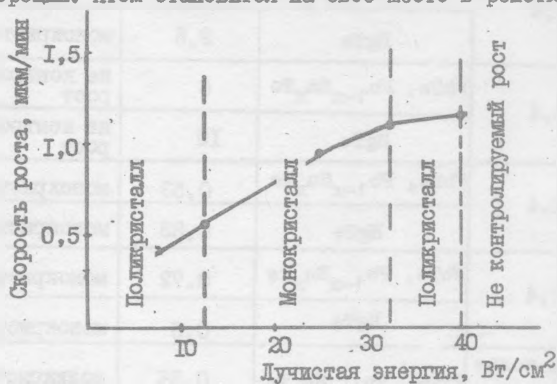
Таблица I

Диапазон излучения падающего на подложку, мкм	Вещество	Скорость роста, мкм/мин	Структура слоя
0,25-1,4	PbTe, $Pb_{1-x}Sn_xTe$	2,2	монокристалл
	HgTe	2,5	монокристалл
0,25-0,4	PbTe, $Pb_{1-x}Sn_xTe$	6	не контролируемый рост
	HgTe	15	не контролируемый рост
0,39-1,4	PbTe, $Pb_{1-x}Sn_xTe$	0,53	монокристалл
	HgTe	0,83	монокристалл
0,7 -1,4	PbTe, $Pb_{1-x}Sn_xTe$	0,72	монокристалл
	HgTe	0,5	монокристалл
облучение только газовой фазы	PbTe, $Pb_{1-x}Sn_xTe$	0,35	поликристалл
эпитаксия без облучения	PbTe, $Pb_{1-x}Sn_xTe$	0,2	мозаичный монокристалл
	HgTe	0,1	мозаичный монокристалл

(рис. 2) показало, что монокристаллический рост слоев происходит только в небольшом интервале энергий от 10 до 30 Вт/см<sup>2</sup>, за пределами которого рост становится неконтролируемым. Важным обстоятельством является улучшение совершенства кристаллической структуры слоев, выросших в условиях облучения. Другими словами, излучение снижает энергию активации эпитаксии [3], лимитирующей стадией которой являются гетерогенные химические реакции, протекающие на поверхности подложки. Из приведенных данных видно также, что одновременное воздействие на реакцию систему (газовую фазу и подложку) излучения УФ и ИК диапазонов оказывает наиболее эффективное влияние на скорость роста слоев (случай применения излучения без фильтров).

Можно сделать определенные выводы и по механизму ускорения роста кристаллов.

В обычных условиях без облучения происходящие процессы можно характеризовать следующей качественной картиной. Из газовой среды на растущую поверхность полупроводника (HgTe, PbTe, SnTe, CdTe, Si) попадают атомы и молекулы (соответственно Hg и Te<sub>2</sub>, PbTe, SnTe, Cd и Te<sub>2</sub>, SiCl<sub>4</sub>). Молекулы могут захватываться поверхностью за счет адсорбции. Атом становится на свое место в решетке после



Р и с. 2. Зависимость скорости роста от интенсивности УФ излучения

разрыва молекулярных связей подводимых молекул Te<sub>2</sub>, PbTe, SnTe, SiCl<sub>4</sub>. Вероятность такого процесса сравнительно мала (она увеличивается с ростом температуры подложки). Здесь имеется аналогия с газофазными реакциями, характеризующимися аррениусовским законом. Должно произойти большое число столкновений молекулы с поверхностью для того, чтобы соответствующий атом сел на место в решетке.

В отличие от реакций между молекулами, химические реакции в газовой фазе с участием свободных атомов и радикалов носят безбарьерный характер, сечения при этом имеют порядок газокинетических /4/. Ввиду безбарьерного характера присоединения свободных атомов к поверхности с увеличением их числа должны заметно улучшаться условия роста кристалла.

По-видимому, основная роль излучения в наших экспериментах и заключается в образовании свободных атомов. Свободные атомы могут создаваться в газе двухатомных молекул как в результате единого акта поглощения ультрафиолета (для Te<sub>2</sub>  $E_{\text{дисс}} = 2,8$  эВ, для PbTe  $E_{\text{дисс}} = 2,7$  эВ), так и в результате каскадного погло-

щения нескольких квантов. В последнем случае молекулы сначала забрасываются в метастабильные электронные состояния, а затем за счет квантов видимого или ИК диапазона — в более высокие состояния либо с непосредственным образованием свободных атомов, либо с диссоциацией возбужденных электронных состояний по отгальвативальным термам. Грубые оценки на основе общей картины кинетических процессов включая диссоциацию и ионизацию молекул [5] показывают, что эффективность образования свободных атомов (соответствующая скорости роста кристаллов) находится в соответствии с данными табл. I. Если же поглощение атомов намного больше их рекомбинации в объеме и скорость роста пропорциональна интенсивности  $J$ , то концентрация свободных атомов  $N_A$  может быть оценена из соотношения  $N_A \sim J / 2A_J I_0$ , где  $A_J$  — коэффициент поглощения свободных атомов эпитаксиальной поверхностью роста  $I_0$  — характерная длина, определяемая поглощением света в газовой фазе. Если же преобладает процесс рекомбинации в объеме, то  $N_A \sim \sqrt{J / B I_0}$ , причем  $B$  является коэффициентом рекомбинации свободных атомов, а скорость роста  $v_p$  пропорциональна корню из интенсивности.

Таким образом, по виду зависимости скорости роста от интенсивности можно судить о характере протекающего процесса.

При сильном возрастании интенсивности облучения (а значит, и числа свободных атомов) скорость роста также существенно увеличивается, но при этом начинает ухудшаться качество вырастающего кристалла. Когда характерное время образования решетки становится сравнимым со скоростью подачи свободных атомов, возникают новые центры образования твердой фазы (поликристаллическая структура).

Наряду с ускорением роста кристалла другой важный экспериментальный факт заключается в улучшении качества эпитаксиальных слоев, выращенных в условиях облучения электромагнитным излучением.

Из табл. I видно, что эпитаксиальный рост слоев без облучения при остальных одинаковых технологических условиях позволяет вырастить только мозаичные несовершенные слои.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Б. М. Вуду за интерес к работе и обсуждение полученных результатов.

Поступила в редакцию

4 августа 1978 г.

## Л и т е р а т у р а

1. В. Д. Чистяков и др., Обзоры по электронной технике. Серия 2 "Полупроводниковые приборы", выпуск 5 (369), ЦНИИ "Электроника", Москва, 1976 г.
2. Б. В. Дерягин и др., В сб. "Рост кристаллов", М., "Наука", 1972 г., т.9, с. 210-212.
3. Д. И. Биленко и др., В сб. "Физика полупроводников и полупроводниковая электроника", Саратов, 1973 г., вып. I(4) стр. 71-76.
4. В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин, Кинетика и механизм газофазных реакций. М., "Наука", 1974 г.
5. А. С. Бириков, С. А. Решетняк, Л. А. Шелешин, ЖПС, 27, № 5, 796 (1977).