

06; 07; 11; 12

© 1993

## БЕСКОНТАКТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СКОРОСТИ РОСТА И ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ МЕТАЛЛОРГАНИЧЕСКОЙ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

А.Ю. Лукьянов, М.А. Новиков,  
О.В. Сколотов, В.И. Шашкин

Для большинства процессов тонкопленочной технологии наиболее важными параметрами являются температура подложки и скорость роста или травления. В частности, в процессе молекулярно-пучковой (МПЭ) и металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) контроль этих параметров обязателен. Чаще всего температуру контролируют термомпарами или пирометрами, которые обладают целым рядом недостатков. При использовании термомпар возникает проблема качества тепловых контактов, являющаяся достаточно сложной в высоковакуумных МПЭ установках, когда применение эвтектик для крепления подложки на печь недопустимо или нежелательно [1, 2]. Точность пирометров невысока и зависит от многих факторов: температуры, типа подложки, наличия загрязнений на окнах ростовой камеры и др. [2].

Для контроля скорости роста используют послеростовые измерения толщины слоев, поскольку организовать мониторинг толщины в ходе эпитаксиального процесса достаточно сложно [3]. Исключением является метод дифракции отраженных быстрых электронов, позволяющий производить в условиях МПЭ подсчет наращиваемых монослоев [4]. Развиваются также оптические методы мониторинга [5, 6], имеющие ту же точность и применимые в условиях МОГФЭ.

В настоящей работе демонстрируется возможность мониторинга скорости роста и температуры в процессе МОГФЭ с использованием простого оптического интерферометра, роль которого выполняет сама подложка.

При изменении температуры подложки ( $T$ ) изменяется ее толщина ( $d$ ) и показатель преломления ( $n$ ), что приводит к изменению разности оптического хода лучей, отраженных от противоположных граней, и к изменению коэффициента отражения

$$R = 2r^2 \frac{1 - \cos \Delta\varphi}{1 + r^4 - 2r^2 \cos \Delta\varphi},$$

где  $r = \frac{1-n}{1+n}$ ,

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} nd \left( 1 + \left( \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{d} \frac{\partial d}{\partial T} \right) \Delta T + \dots \right),$$

что и использовалось в работах [7, 8] для измерения температуры.

Коэффициент отражения будет изменяться и за счет изменения толщины подложки в процессе напыления или эпитаксиального наращивания. В этом случае разность фаз  $\Delta\varphi$  имеет вид

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} n(d + \Delta d).$$

В работе использовался резистивный реактор (1) с вертикальной подачей парогазовой смеси (ПГС) и горизонтально расположенной подложкой (2) (см. рис. 1). Рабочая температура в реакторе поддерживалась с помощью термопары, помещенной внутри графитового подложкодержателя (3). В верхней части реактора имелось кварцевое окно (5) для ввода и вывода излучения лазера (6) ( $\lambda = 1.15$  мкм). Использование разностной схемы регистрации интенсивности отраженного света позволяло избавиться от флуктуаций мощности лазера.

На рис. 2 представлена интерферограмма типичного процесса наращивания GaAs на подложке из GaAs толщиной 350 мкм.

Всю запись можно разбить на несколько характерных частей.

В первой части зафиксирован разогрев подложки до рабочей температуры 620 °С. Расстояние между соседними пиками, соответствующее изменению температуры на

$$\Delta T = \frac{\lambda}{2nd \left( \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{d} \frac{\partial d}{\partial T} \right)},$$

в данном случае равно  $\Delta T \approx 5.5$  °С. Учитывая величину отношения сигнал/шум  $s/n > 100$ , чувствительность схемы к изменениям температуры при температурах ниже 200 °С достигала 0.03 °С.

Модуляция контраста, интерференционной картины при изменении температуры связана, по-видимому, с наличием в спектре излучения использованного лазера целого ряда линий [9].

Общее уменьшение контраста интерференционной картины с 50% до 3% при  $T = 650$  °С связано с появлением оптического поглощения на высоких температурах [8]. При температурах около 700 °С

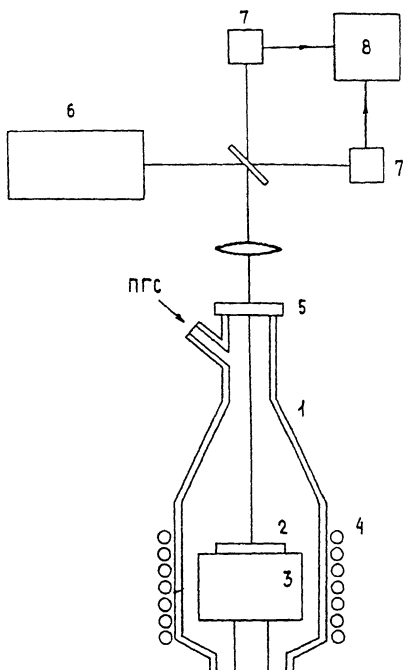


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Реактор (1), подложка (2), графитовый подложкодержатель (3), индуктор (4), кварцевое окно (5), лазер (6), фотоприемники (7), самописец (8).

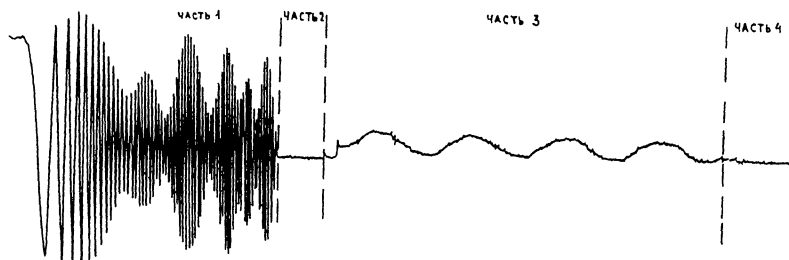


Рис. 2. Интерферограмма типичного процесса наращивания  $GaAs$  на подложке из  $GaAs$  толщиной 350 мкм.

контраст уменьшается до нуля, а фотоприемники начинают принимать тепловое излучение подложки.

Вторая и четвертая части содержат фактически шумы интерферометра на рабочей температуре. Амплитуда этих шумов в пересчете на флуктуации температуры подложки не превышает  $0,5^{\circ}C$ , что соответствует изменению фазы на  $0,52$  рад. Таким образом,

с точностью до  $140 \text{ \AA}$  можно контролировать изменение толщины наращиваемой пленки.

В третьей части записан процесс роста. Расстояние между соседними максимумами соответствует изменению толщины подложки на величину

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2n} = 1670 \text{ \AA}.$$

В процессе, изображенном на рис. 2, была выращена пленка толщиной  $L = 6680 \pm 100 \text{ \AA}$ . Независимые послеростовые измерения, проведенные  $CV$ -методом, дали аналогичный результат.

Таким образом, показана реальная возможность измерения температуры и скорости эпитаксиального наращивания непосредственно в ходе технологического процесса. Точность измерения температуры в диапазоне  $20^\circ - 700^\circ \text{C}$  составляет  $\pm 0.25^\circ \text{C}$ , точность определения толщины при скорости роста в диапазоне  $300 - 3000 \text{ \AA/мин}$  соответствует типичным для МОГФЭ значениям  $\pm 90 \text{ \AA}$ .

Прибор, созданный на описанном принципе, может быть использован в условиях МПЭ и МОТФЭ атмосферного и пониженного давления, а также в процессах химического и ионного травления. Кроме того, возможно применение таких приборов в криогенной технике и технике высоких температур.

Разрабатываемый вариант интерферометра с полупроводниковым лазером ( $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ ) позволит в несколько раз увеличить точность измерений толщины за счет увеличения контраста интерференционной картины, а также расширить диапазон рабочих температур,

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ch and N. J. Cryst. Growth. 1989. V. 97. N 2. P. 415-429.
- [2] The technology and physics of molecular beam epitaxy. Ed. by Parker E., Plenum Press, 1985. 686 p.
- [3] Б а т а в и н В.В. и др. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
- [4] T s a n g W.T. // J. Cryst. Growth. 1990. V. 105. N 1. P. 1-29.
- [5] C o l a s E. // J. Cryst. Growth. 1991. V. 107. N 1-4. P. 47-55.
- [6] C o l a y a c h i N. // J. Cryst. Growth. 1991. V. 107. N 1-4. P. 62-67.
- [7] S a n k u r H. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 26. P. 2651-2653.
- [8] D o n e l l y V.M. // J. Vac. Sci. Tech. 1990. A. V. 8. N 1. P. 84-92.

[9] Г у с а к П.М. и др. // ПТЭ. 1987. № 5. С. 162-164.

Институт прикладной физики РАН,  
Н. Новгород

Поступило в Редакцию  
16 сентября 1992 г.