

03;07;12

Применение голографического интерферометра в режиме реального времени для моделирования процессов, происходящих в реакторе газовой эпитаксии

© В.Б. Константинов, В.А. Бабенко, Ю.В. Жиляев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: V. Konstantinov@mail.ioffe.ru, babenko@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 января 2003 г.

Методы голографической интерферометрии позволяют визуализировать газовые потоки и получать количественные данные о распределении плотности в объеме. Рассматривается возможность использования этих методов для контроля процессов в полости реактора газовой эпитаксии. Установка состоит из реактора с двумя прозрачными окнами, голографического интерферометра реального времени, системы подачи газа в реактор и аппаратуры для визуального наблюдения газовых потоков. Полученные результаты демонстрируют перспективы использования метода как для оптимизации геометрии реактора, так и для корректировки физических условий процесса газовой эпитаксии.

Голографическая интерферометрия позволяет визуализировать прозрачные неоднородности в реальном времени на действующем оборудовании или на моделях, воспроизводящих действующий реактор. Голографическая диагностика дает сведения о параметрах среды по изменению показателя преломления газовой фазы [1–4]. Последующие расчеты позволяют получать информацию о распределении плотности газовой фазы и скоростях потоков.

Проводилось наблюдение потока газа, подаваемого в горизонтальный реактор в направлении, перпендикулярном направлению движения. Эксперименты осуществлялись с использованием компактного голографического устройства, внутрь которого помещалась модель реактора.

Формирование эпитаксиальных пленок осуществляется при ламинарном течении газа по трубе, т.е. когда число Рейнольдса

$Re = D \cdot v \cdot \rho / \eta$ меньше критического значения $Re_c = 2000$, где D — диаметр трубы реактора, v — скорость течения газа, ρ — плотность газа, η — коэффициент вязкости газа.

Поток реагентов от поверхности подложки и обратно, характеризующий количество молекул, проходящее через единицу площади за единицу времени, определяется по формуле $J = (n_g - n_s) / \gamma$. Здесь n_g и n_s — концентрация реагентов в газовом потоке и вблизи поверхности соответственно. При конструировании реактора в первую очередь должно быть учтено влияние величины γ на процессы массопереноса. Поскольку величина γ , определяющая поток реагентов к поверхности, обратно пропорциональна скорости потока газа, то для достижения однородности скорости роста эпитаксиальной пленки по длине реактора при заданной температуре необходимо подбирать оптимальное значение толщины пограничного слоя, согласованное с изменением температуры и концентрации реагентов. Изменяя число Рейнольдса, можно варьировать скорости потока газов и скорость роста пленки одновременно.

Система выступает в качестве анализатора, который регистрирует изменения оптической плотности газовой фазы. Изображение интерференционной картины с помощью телевизионной ПЗС-камеры выводится на монитор или поступает в компьютер. Устройство позволяет проводить визуальное наблюдение и исследование физических и химических процессов в жидкостях и газах. Камера состоит из He-Ne лазера с выходной мощностью около 2 mW, оптических элементов, блока питания и регистратора голограммы [5]. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки, состоящей из непосредственно реактора 7 и голографической камеры. Газ подается в реактор через ниппель 6. Свет от лазера 12 отражается зеркалом 11 и попадает на светоделитель 9. Часть света проходит через линзу 2, формирующую опорный пучок. Другая часть света, отразившись от зеркала 10, проходит через коллиматор 8. Использование рассеивателя 4 облегчает локализацию интерференционных полос. Голограмма регистрируется в плоскости 3 на фототермопластическую пластину. Объектом 5 является внутренняя область реактора. Окна, через которые осуществляется просвечивание, имеют параллельные стенки. Размер объекта составляет $30 \times 40 \times 20$ mm, геометрические параметры голографической камеры 1 $530 \times 220 \times 130$ mm при весе 6 kg. Интерферометр является автономным виброзащищенным прибором, конструкция которого позволяет установить его на действующий реактор.

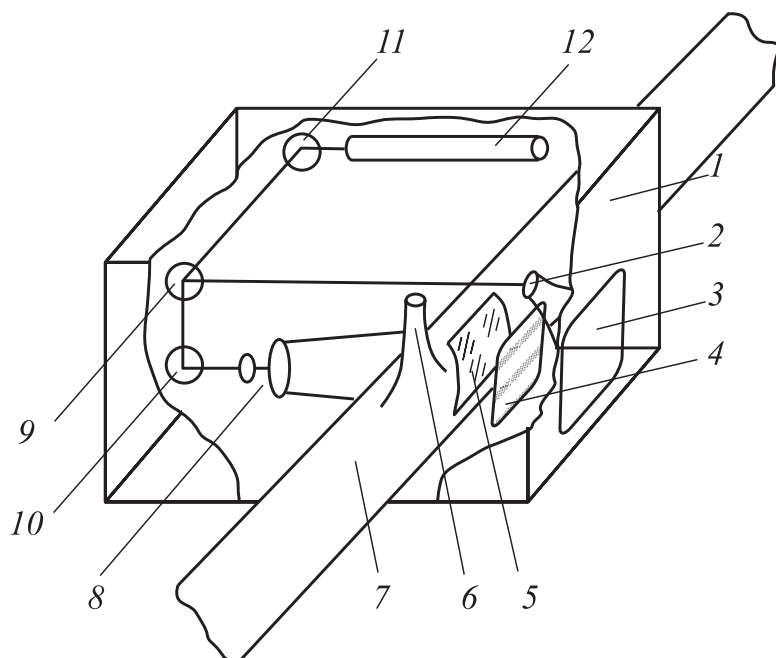


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — корпус голографической камеры, 2 — микролинза, 3 — регистратор голограмм, 4 — матовое стекло (диффузор), 5 — объект (внутренний объем трубы с параллельными окнами), 6 — ниппель подачи газа, 7 — труба реактора, 8 — коллиматор, 9 — полупрозрачное зеркало, 10, 11 — зеркала, 12 — лазер.

При комнатной температуре проведены эксперименты с гелием и пропаном. На рис. 2 представлены интерферограммы потока гелия. Благодаря высокой чувствительности голографической интерферометрии возможно изучать потоки таких легких газов, как гелий и водород (соответственно с плотностями при нормальных условиях 0.1785 и 0.08988 kg/m^3). Использование голографической интерферометрии реального времени позволяет контролировать скорости потоков, возникновение турбулентности вблизи подложки и т.д. Регулярное расположение интерференционных полос в основной части свободного

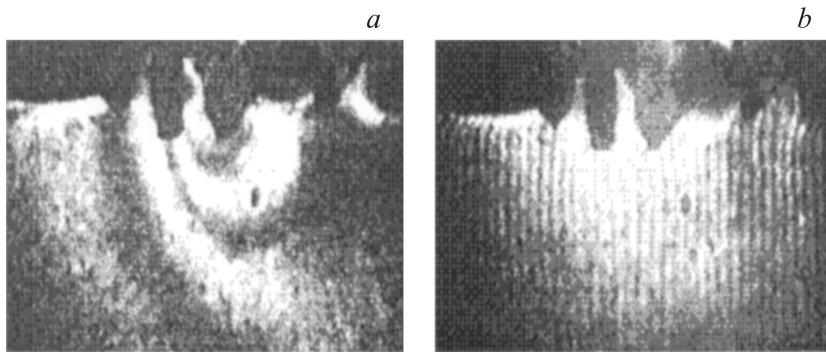


Рис. 2. Интерферограмма потока гелия в полосах бесконечной (*a*) и конечной ширины (*b*).

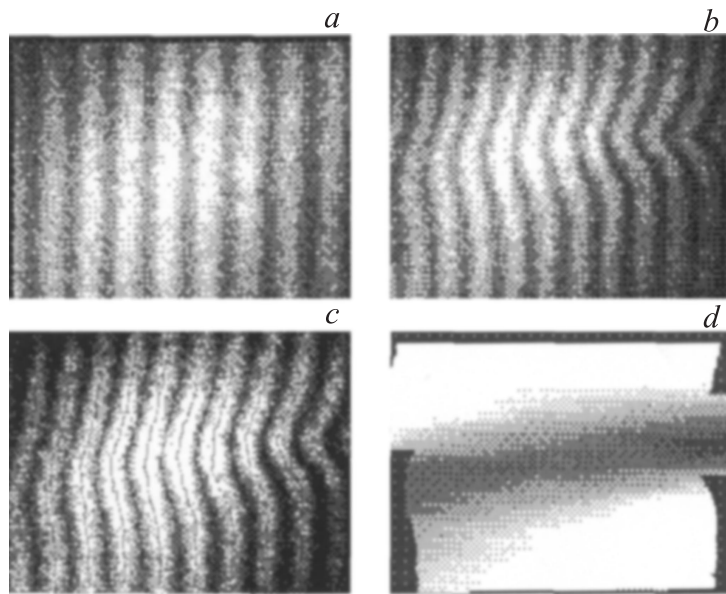


Рис. 3. Визуализация потока пропана: *a* — интерферограмма начального состояния, *b* — интерферограмма с введением потока, *c* — обсчет интерферограммы, *d* — изображение потока газа.

пространства реактора соответствует стабильному однородному ламинарному потоку. Голографическая интерферометрия дает информацию о пространственно усредненном градиенте плотности газовой фазы в зоне реакции, коррелирующем со скоростью подачи реагентов.

Контроль за происходящими в реакторе газовой эпитаксии процессами можно осуществлять с использованием голографического интерферометра — коррелятора [6]. На фоне зарегистрированной картины газового потока фиксируется нарушение процесса осаждения реагентов.

Разработанное программное обеспечение позволяет обрабатывать интерферограммы прозрачных объектов [7]. Метод позволяет не только наблюдать процесс в реальном времени, но и получать количественные характеристики. На рис. 3 показан пример визуального наблюдения потока пропана и его компьютерной обработки. Исходными данными являются интерференционная картина начального состояния потока и интерференционная картина через заданный интервал времени. Оба изображения фильтруются, выбираются скелетные линии и нумеруются. Далее вычисляется изменение показателя преломления. Распределение изменения показателя преломления по наблюдаемой зоне реактора получают интерполяцией.

Показано, что голографическая интерферометрия может успешно использоваться для наблюдения эпитаксиального роста из газовой фазы.

Список литературы

- [1] *Giling L.* // J. Electrochem. Soc. 1982. V. 129. P. 634–644.
- [2] *Турилин С.М., Сорокин И.Н., Антоненко К.И.* // Неорг. материалы. 1995. Т. 31. № 2. С. 151–159.
- [3] *Антоненко К.И., Арндаренко А.А., Сорокин И.Н., Турилин С.М.* // Изв. АН СССР. Мех. жидкости и газа. 1996. № 6. С. 118–124.
- [4] *Pezol'dt J., Antonenko K., Eüchorn G.* // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. San Francisco, U.S.A. 1996. V. 429. P. 65–70.
- [5] *Gurevich S., Konstantinov V.* // Opt. Journal. 1996. V. 10. P. 3–13.
- [6] *Gurevich S., Babenko V., Konstantinov V.* Fringe 2001 / Ed. W. Osten, W. Juptner. Elsevier. P. 641–645.
- [7] *Bat'kovich V., Budenkova O., Konstantinov V. et al.* // JTPH. 1999. V. 69. N 6. P. 106–111.