

УДК 62.408.62; 62.41; 666.1

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

П. В. Волков, А. В. Горюнов, В. М. Данильцев, А. Ю. Лукьянов,
Д. А. Пряхин, А. Д. Тертышник, О. И. Хрыкин, В. И. Шашкин

В работе приведены результаты по разработке и внедрению оптических систем мониторинга технологических процессов. Разработанная аппаратура базируется на принципах тандемной низкокогерентной интерферометрии. Оборудование позволяет осуществлять бесконтактный дистанционный контроль оптической толщины прозрачных слоистых объектов с нанометровым разрешением непосредственно в ходе технологических процессов. Один из вариантов аппаратуры, предназначенный для контроля толщины листового стекла, успешно внедрен в промышленность. Второй вариант, предназначенный для мониторинга процессов формирования полупроводниковых наноструктур, успешно применен для контроля ростовых процессов в условиях металлоорганической газофазной эпитаксии и процессов плазмохимического травления.

Ключевые слова: световоды, мониторинг толщины, производство стекла и прозрачных материалов.

Современные тенденции развития производства приводят к непрерывному ужесточению требований к качеству выпускаемой продукции. При этом в условиях сложного, многоступенчатого, длительного производственного цикла только выходной контроль качества (разбраковка готовых изделий) становится неэффективным, поскольку при появлении брака требуется много времени для поиска причин его возникновения и исправления ошибок, в течение которого впустую тратятся ресурсы, и загрязняется окружающая среда.

Учреждение Российской академии наук Институт физики микроструктур РАН, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105; e-mail: volkov@ipm.sci-nnov.ru.

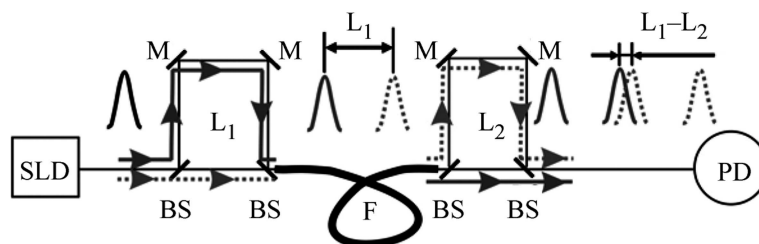


Рис. 1: Тандемная низкокогерентная интерферометрия. SLD – суперлюминесцентный диод, BS – светоделители, F – оптическое волокно, M – зеркала, PD – фотоприемник, $L_{1,2}$ – разности длин плеч интерферометров.

Оптимальным выходом в этой ситуации является непрерывный контроль ключевых параметров технологического процесса, напрямую влияющими на качество готовой продукции. Кроме того, в идеале контроль должен быть бесконтактным, а системы контроля – многофункциональными, т.е. способными контролировать различные параметры, и помехозащищенными, поскольку в условиях производства присутствуют различные факторы, мешающие проведению измерений, такие как вибрации, турбулентные потоки газов, сильные электромагнитные поля, большие градиенты температур и др.

В ИФМ РАН, используя принципы низкокогерентной тандемной интерферометрии, разработана аппаратура для высокоточного бесконтактного измерения оптической толщины прозрачных объектов.

Принципиальной особенностью метода является использование широкополосного источника света с малой длиной когерентности (около 20 мкм), излучение которого последовательно проходит через пару интерферометров, которую часто называют тандемом интерферометров, отсюда и название – тандемная низкокогерентная интерферометрия. При такой конфигурации на выходе всей системы интерференция может наблюдаться только в том случае, когда разности длин плеч обоих интерферометров отличаются друг от друга менее чем на длину когерентности источника, то есть выполняется условие

$$|L_2 - L_1| < L_{\text{coh}}, \quad (1)$$

где L_1 , L_2 – разности длин плеч первого и второго интерферометров. Интерферировать будут две волны: первая – прошедшая короткое плечо в первом интерферометре и длинное плечо во втором, и вторая – прошедшая длинное плечо в первом интерферометре и короткое плечо во втором. В нашем случае одним из интерферометров является измеряемая лента стекла, которую можно рассматривать как интерферометр Фабри–Перо, а

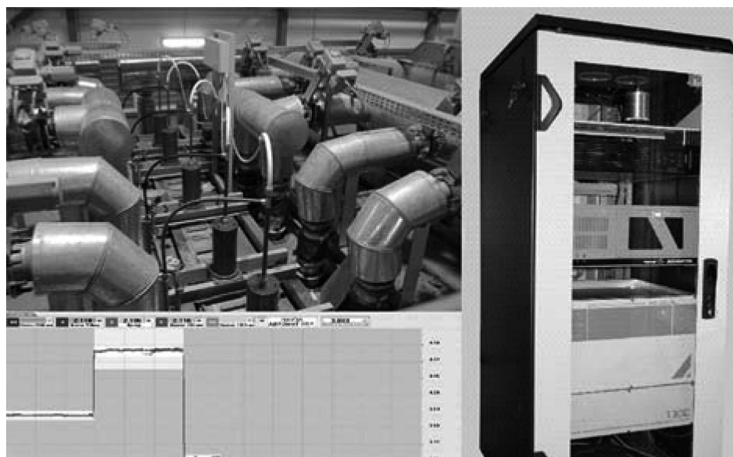


Рис. 2: Основной блок системы, оптические головки, установленные на производстве, график изменения толщины стекла, записанный системой.

второй – измерительный интерферометр – размещён в оптоэлектронном измерительном блоке и снабжён возможностью контролируемого изменения разности длин плеч. Перестраивая эту разность и определяя момент появления интерференционного сигнала, можно определить оптическую толщину измеряемого объекта. Оптическая связь между интерферометрами осуществляется по достаточно длинному оптическому волокну, что позволяет установить прецизионный измерительный интерферометр в благоприятных условиях вдали от места измерения.

Первый вариант аппаратуры предназначен для мониторинга толщины ленты флоат стекла в горячей зоне его формирования (выпускается ООО НПП “ТЭОС”) [1]. Толщину необходимо измерять в жестких условиях: температура в зоне измерений составляет 550 °С, присутствуют вибрация и турбулентные потоки агрессивных газов. Тем не менее, благодаря использованию описанных инновационных принципов, защищённых патентами РФ, аппаратура обеспечивает надежное непрерывное измерение толщины с расстояния 1.5 м с точностью 1 мкм. Фотографии системы и результаты ее работы приведены на рис. 2. К настоящему времени установлено 13 комплектов на стекольных заводах России, Киргизии и Белоруссии.

На базе описанной выше системы авторами была создана оригинальная система оптического мониторинга для технологических процессов формирования полупроводниковых микро- и наноструктур. Аппаратура позволяет одновременно измерять абсолютную температуру (точность 1 градус) и изгиб подложки, а также отслеживать

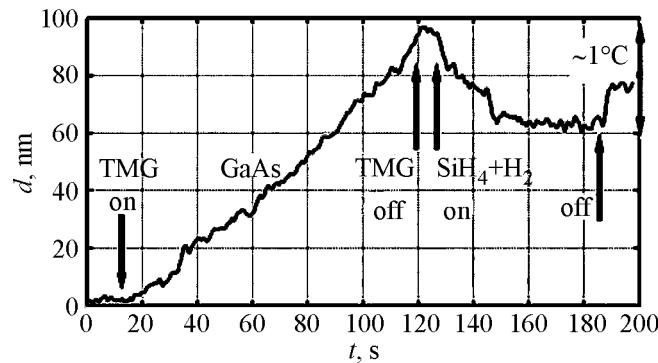


Рис. 3: Процесс роста структуры в условиях МОГФЭ.

изменение толщины слоёв в процессе их нанесения (травления) с высокой точностью (2 нм) [2].

Разработанное оборудование было успешно применено авторами для мониторинга ростовых процессов в условиях металлоорганической газофазной эпитаксии и процессов плазмохимического травления [3].

В качестве иллюстрации на рис. 3 показано изменение оптической толщины на первых этапах формирования структуры для низкобарьерного диода Шоттки (nGaAs- δ (Si)-nGaAs-Al). Уменьшение оптической толщины структуры после прерывания роста связано с уменьшением температуры подложки из-за добавления потока силана в смеси с водородом (0.5 л/мин) для формирования дельта-легированного слоя. Точность измерения аппаратурой (среднеквадратичное отклонение от среднего) изменения толщины растущей плёнки в данном процессе составила 2 нм, скорость роста – 54 нм/мин.

Очень перспективным выглядит применение разработанной аппаратуры для построения многоканальных волоконно-оптических датчиков таких параметров как температура, давление и др., которые легко можно конвертировать в изменение оптического пути. Высокая помехозащищенность метода позволяет использовать аппаратуру в жестких условиях, там, где традиционные электронные датчики использовать невозможно (например, атомная энергетика, нефтегазодобывающая промышленность и т.д.).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] П. В. Волков и др., Стекло и керамика, вып. 5, 8 (2008).
- [2] П. В. Волков и др., Поверхность: Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, вып. 8, 5 (2008).

[3] P. V. Volkov et al., J. of Crystal Growth. **310**, 4724 (2008).

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 20 января 2011 г.