

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МИКРОТЕХНОЛОГИИ

© 2008 г. А. В. Постников, И. Н. Косолапов, А. Н. Куприянов, И. И. Амиров, А. Н. Магунов*

*Институт микроэлектроники и информатики РАН Россия,
150007, Ярославль, ул. Университетская, 21*

**Производственно-технологический центр “УралАлмазИнвест” Россия,
121108, Москва, ул. Ивана Франко, 4*

Поступила в редакцию 09.06.2007 г.

Обсуждаются устройство и характеристики автоматизированного измерителя температуры диэлектрических и полупроводниковых подложек в установках осаждения пленок и травления микроструктур. Температура измеряется методом лазерной интерференционной термометрии на длинах волн He-Ne-лазера 0.633 и 1.15 мкм. Достигнутое в системе отношение сигнал/шум ~30 дБ обеспечивает чувствительность прибора к изменению температуры подложки на 0.01 К. Нагрев и остывание пластины автоматически распознаются и отображаются графическим интерфейсом в реальном времени. На монитор выводятся интерферограмма, регистрируемая при нагревании или остывании подложки, зависимость температуры от времени после зажигания разряда, температурная зависимость мощности, нагревающей подложку. Для кремниевых подложек толщиной 0.5 мм на длине волны 1.15 мкм диапазон измерений лежит в интервале от криогенных температур до 650 К.

PACS: 07.20.Dt, 42.62.-b, 52.77.Vn, 78.20.Ci

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная интерференционная термометрия (л.и.т.) полупроводников и диэлектриков является наиболее чувствительным и простым методом среди ряда новых методов активной оптической термометрии твердых тел [1]. За последние 15 лет с помощью л.и.т. проведены систематические исследования температурных режимов подложек (Si, GaAs, плавленый кварц, стекло) в плазменных процессах микротехнологии, изучены тепловые эффекты при взаимодействии неравновесной химически активной плазмы с поверхностью, обнаружены неустойчивости плазмохимического травления, найдены условия подавления неустойчивостей [2].

Многолетнее применение л.и.т. для решения исследовательских задач показало, что устройства для реализации метода обладают настолько высокой надежностью и простотой в обслуживании, что могут применяться при технологическом контроле, когда требуется без дополнительных юстировок схемы проводить измерения в течение недель или месяцев, при этом требуемое число измерений достигает нескольких десятков в час (это определяется производительностью установок плазменного травления).

Эволюция измерительного прибора от начального этапа, когда он является уникальным и позволяет получать новые результаты, до заверша-

ющего этапа, когда получение новых данных прекращается, а выполняемая операция становится рутинной и необходима лишь для наблюдения за ходом многократно повторяющегося процесса, в значительной степени связана с повышением уровня автоматизации измерений и обработки данных в реальном времени. При этом возможно включение получаемых данных в цепи обратной связи, осуществляющие управление процессом.

В данной статье обсуждается устройство и характеристики автоматизированного лазерного термометра, предназначенного для измерений температуры в исследовательских установках осаждения пленок и травления микроструктур.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерение температуры кремниевых подложек проведено в реакторе плотной плазмы, в котором проводятся исследования травления материалов [3]. Схема реактора с системой лазерного измерения температуры подложки приведена на рис. 1. Измерение температуры проводилось с помощью лазерного пучка $\varnothing 0.5\text{--}5$ мм, падающего на поверхность подложки по нормали через кварцевое окно. При зажигании разряда происходит нагрев подложки, изменяется ее оптическая толщина nh (h – геометрическая толщина, n – показатель преломления на длине волны зондирующего излучения), при этом наблюдаются интерферо-

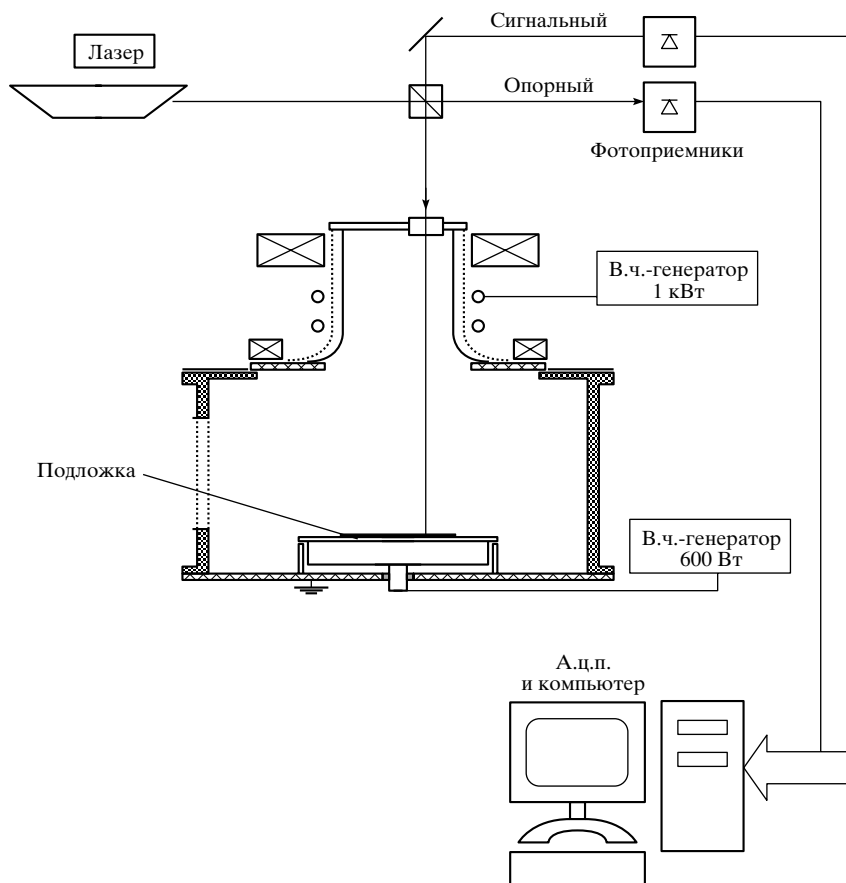


Рис. 1. Схема реактора с системой лазерного измерения температуры подложки.

граммы, т.е. осцилляции интенсивности света, отраженного от подложки. Отраженное излучение через то же окно попадает на фотоприемник (кремниевый или германиевый фотодиод в режиме короткого замыкания). Подавление шумов, обусловленных излучением плазмы, достигается с помощью оптического фильтра на входе фотоприемника.

Сигнал с фотоприемника усиливается, оцифровывается и записывается в память компьютера. Компьютерная программа выполняет следующие функции:

- 1) сбор данных и нормирование сигнала на значение опорного канала;
- 2) определение момента начала нагрева подложки и момента окончания нагрева, т.е. момента начала остывания;
- 3) расчет и отображение на экране в режиме реального масштаба времени следующих величин:
 - интенсивности света, отраженного подложкой,
 - температуры подложки $T(t)$,
 - температурной зависимости мощности $D(T)$, передаваемой подложке при нагревании или принимаемой при остывании;

- 4) запись данных эксперимента в файлы и вывод их на печать.

По окончании процесса можно провести математическую обработку записанных интерферограмм: фильтрацию, фурье-анализ, поиск экстремумов интерферограммы. Затем на основе этой обработки можно провести уточненный расчет динамики процесса нагрева–остывания.

Для получения зависимостей $T(t)$ и $D(T)$ необходимо задать материал и толщину подложки, ее начальную температуру (до зажигания разряда), длину волны зондирования. На рис.2 показана картина, наблюдаемая на мониторе, при нагревании подложки в плазме в.ч.-разряда.

Источником зондирующего излучения интерференционного термометра служит He–Ne-лазер ЛГН-113 с генерацией на двух длинах волн: $\lambda_1 = 0.633$ (мощность 10 мВт) и $\lambda_2 = 1.15$ мкм (мощность 5 мВт). Юстировка оптической схемы проводится на длине волны 0.633 мкм, а измерения можно проводить на любой из двух длин волн, в зависимости от материала подложки. Термометрия подложек из материалов, прозрачных в видимой области спектра, проводится на длине волны 0.633 мкм. Для термометрии подложек из кремния и арсенида галлия

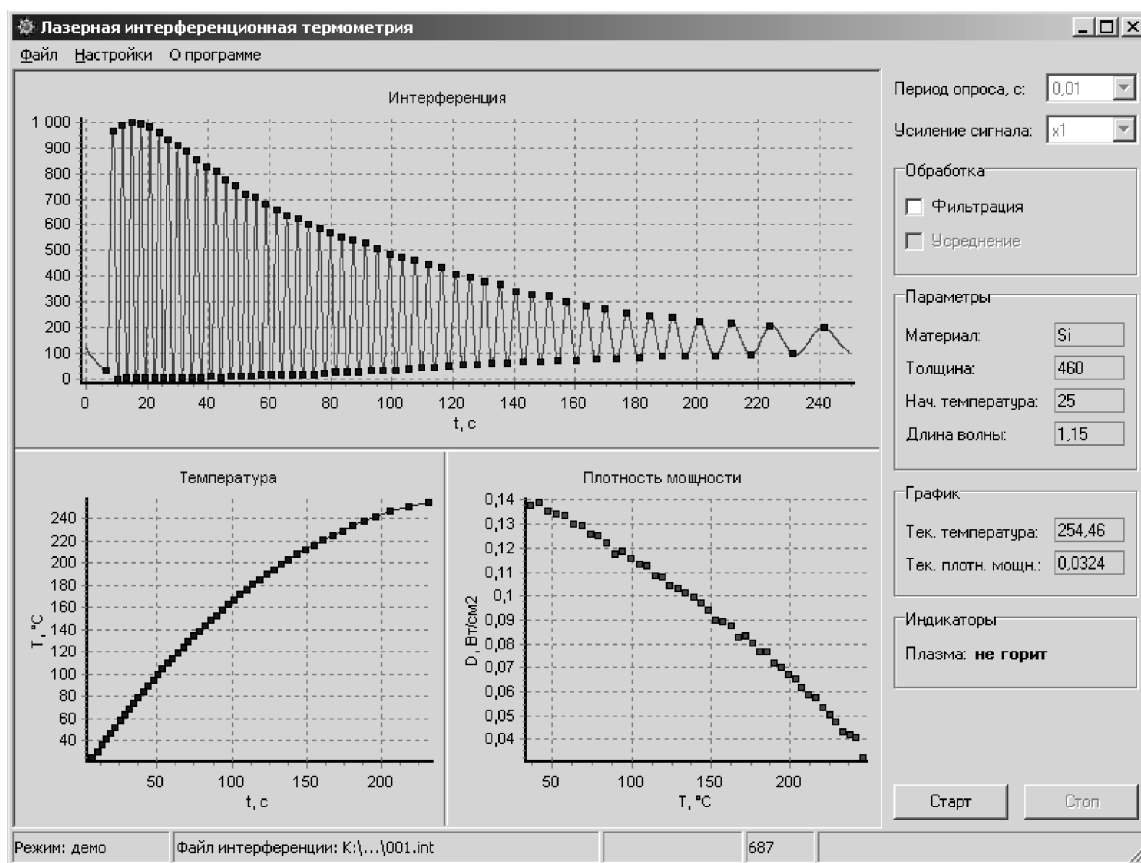


Рис. 2. Представление данных на мониторе: интерферограмма (вверху), зависимость температуры подложки от времени (внизу слева), температурная зависимость мощности, нагревающей подложку (внизу справа).

применяется линия 1.15 мкм, для которой пластины толщиной 0.5 мм являются прозрачными (в видимом диапазоне такая подложка непрозрачна).

ОСОБЕННОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Способ обработки интерферограмм, вопросы температурной чувствительности, диапазона измеряемых температур и быстродействия метода подробно рассмотрены ранее [1]. Зная толщину и начальную температуру пластины, а также температурную зависимость показателя преломления и толщины, легко найти по интерферограмме зависимость температуры от времени. Для определения температуры полупроводниковых монокристаллов (Si, GaAs, InP) применяются линейные и нелинейные зависимости $n(T)$ и $h(T)$. Температурный интервал между соседними минимумами или максимумами отражения определяется выражением

$$\Delta T = \lambda [2nh(n^{-1} \frac{dn}{dT} + h^{-1} \frac{dh}{dT})]^{-1}.$$

Для многих материалов (Si, Ge, GaAs, плавленый кварц и т.д.) основную роль играет первое

слагаемое $n^{-1} \frac{dn}{dT}$, тогда как вклад термического расширения пластинки в десятки раз меньше (например, для монокристаллического кремния вклад первого слагаемого составляет ~96%, а второго 4%). Пренебрегая вторым слагаемым, получаем приближенное выражение $\Delta T \approx \lambda / 2h (\frac{dn}{dT})$. Величина ΔT уменьшается при использовании более коротковолнового зондирующего излучения и при увеличении толщины пластины. Значение $\frac{dn}{dT}$ для полупроводников примерно на порядок выше, чем для диэлектриков. На интерферограмме, показанной на рис. 2, сдвиг на одну полосу соответствует увеличению температуры кремниевой подложки толщиной $h = 0.46$ мм на $\Delta T \approx 5.2^\circ\text{C}$ вблизи комнатной температуры. С увеличением температуры значение ΔT уменьшается.

Относительная температурная чувствительность $\bar{S} (\%K^{-1}) = (1/R)(dR/dT)$ показывает, на сколько изменяется величина регистрируемого сигнала (интенсивность отраженного света) при измерении температуры на 1 К. Чувствительность л.и.т. очень велика: при изменении температуры монокристалла Si толщиной 0.5 мм на 1 К интенсивность отраженного света с длиной волны 1.15 мкм изменяется в среднем по периоду на 80%, что при-

мерно на 2 порядка выше относительной чувствительности термопар и термосопротивлений.

Достоинством метода является простота оптической схемы. Поскольку требуется определить, в какие моменты времени достигаются максимумы и минимумы интенсивности в отраженном свете, требования к фотометрической точности измерений невысоки. В частности, не требуется стабилизация мощности, так как дрейф мощности газового лазера происходит за времена порядка часов, длительность изучаемого процесса и измерения температуры кристалла в реакторе составляет 3–5 мин, а сдвиг фазы на 2π между предметным и опорным лучом (т.е. сдвиг сигнала на одну интерференционную полосу) при нагревании подложки происходит за 0.1–10 с.

Верхний предел измеряемых температур для полупроводниковых монокристаллов обусловлен двумя причинами: а) сдвигом края собственного поглощения в длинноволновую область при нагревании кристалла (проявление этого эффекта видно на рис.2); влияние этого сдвига несущественно, если длина волны зондирующего света находится далеко от края поглощения, например, для Si можно с этой целью применять лазерную линию 1.52 мкм вместо 1.15 мкм; б) увеличением концентрации свободных носителей заряда до уровня, при котором кристалл становится совершенно непрозрачным во всем спектральном диапазоне. Для кремния толщиной 0.5 мм верхний предел находится при ~650 К для $\lambda = 1.15$ мкм и при ~1000 К для $\lambda = 1.8$ мкм. Для широкозонных кристаллических полупроводников и диэлектриков верхний предел измеряемых температур совпадает с температурой плавления. Для стекол верхний предел лежит вблизи температуры стеклования, выше которой начинается размягчение материала, его вязкое течение и деформация пластин.

Основные препятствия к применению метода л.и.т. связаны с отклонениями пластины от плоскопараллельности и шероховатостью ее поверхностей. Для получения интерферограммы необходимо, чтобы угол между поверхностями пластины не превосходил 10^{-5} – 10^{-4} рад, а шероховатость поверхностей мала по сравнению с длиной волны зондирующего излучения. Эти требования удовлетворяются стандартами, существующими в электронной промышленности. Шероховатость поверхности и клиновидность пластины приводят к снижению контраста $V = (R_{\max} - R_{\min}) / (R_{\max} + R_{\min})$ интерферограммы вплоть до полной неразличимости полос (при $V \rightarrow 0$). Однако большинство серийно выпускаемых полупроводниковых подложек, включая и подложки с шероховатой тыльной поверхностью и микроструктурами на лицевой поверхности, пригодны для получения интерферограммы и определения температуры [4–6].

Существует ошибочное мнение [7], что для измерений температуры твердых тел с использованием интерференции света всегда требуется двухлучевая схема (интерферометр Маха–Цендера). На самом деле двухлучевая схема безусловно необходима, если исследуемый объект не имеет отражающих поверхностей. К таким объектам относятся, например, пламя или плазма. При облучении полупроводниковой пластинки на каждой из поверхностей происходит деление волнового фронта, и возникают по крайней мере два световых пучка, которые интерферируют между собой: опорным можно считать пучок, отраженный от передней поверхности кристалла, предметным пучком – тот, который прошел сквозь образец и отразился от задней поверхности пластины. Такая схема, применяемая при исследовании объектов с плоскопараллельными отражающими границами, не требует специального создания второго (опорного) пучка. Исследуемая подложка выполняет роль интерферометра Фабри–Перо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетний опыт использования л.и.т. показывает, что сфера применения метода может быть существенно расширена. В частности, метод можно эффективно применять для термометрии широкозонных полупроводников, которых в настоящее время обрабатывают в плазме при практически неизвестных и неконтролируемых температурах. Адаптация метода для термометрии подложек из алмаза, SiC, AlN, GaN, ZnO и других материалов не представляет принципиальных трудностей. Однако в настоящее время в литературе отсутствуют данные по температурным зависимостям показателей преломления $n(T)$ этих материалов, что необходимо для проведения измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магунов А.Н. Лазерная термометрия твердых тел. М.: Физматлит, 2001.
2. Магунов А.Н. Теплообмен неравновесной плазмы с поверхностью. М.: Физматлит, 2005.
3. Амиров И.И., Изюмов М.О., Морозов О.В. // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37. № 5. С.328.
4. Donnelly V.M. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. № 10. P.1396.
5. Магунов А.Н., Гасилов А.Ю. // Микроэлектроника. 1997. Т. 26. № 4. С. 336.
6. Гасилов А.Ю., Магунов А.Н. // Завод. лабор. 1997. Т. 63. № 8. С. 32.
7. Битюков В.К., Петров В.А. // Микроэлектроника. 2005. Т. 34. № 1. С. 3.
8. Орликовский А.А., Руденко К.В. // Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 5. С. 323.