

07;11;12

## **Исследование образцов с тонкими пленками методом фототеплового отражения с гармоническим возбуждением с применением гетеродинирования возбуждающего и пробного излучений**

© К.В. Лапшин, А.Н. Петровский, В.В. Зуев,  
А.Д. Кирюхин, Д.В. Лабузов

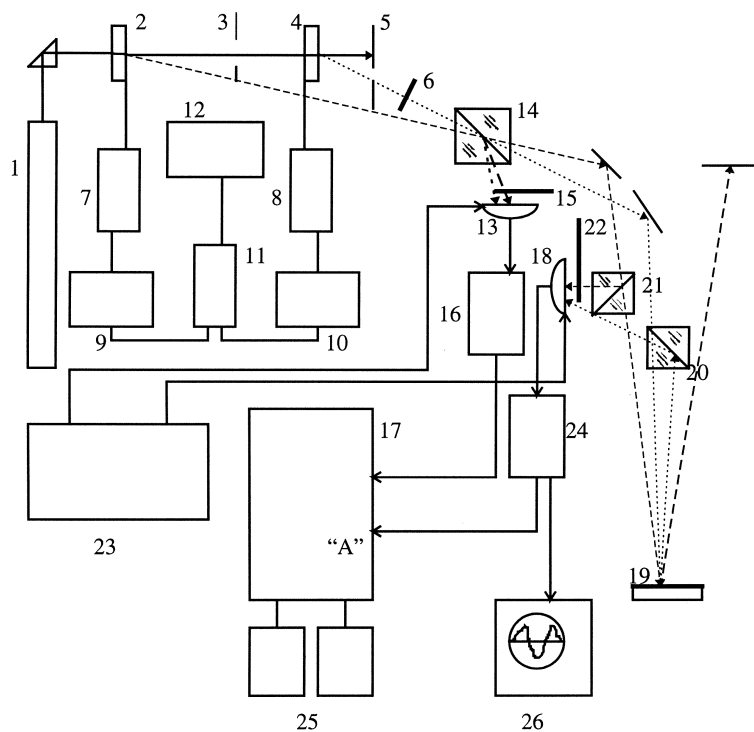
Московский инженерно-физический институт (технический университет)

Поступило в Редакцию 7 июня 1999 г.

Предложен и экспериментально проверен способ определения фазового сдвига и тепловых параметров тонких пленок.

В основе метода гармонического "мираж"-эффекта лежит явление гармонического изменения коэффициента преломления образца под действием тепловой и электронной (дырочной) волн, вызванных освещением образца мощным возбуждающим излучением. Данное изменение коэффициента преломления образца можно зарегистрировать, пропуская через образец лазерное излучение малой мощности, по величине отклонения которого на выходе из образца можно судить о тепловом (электронном) отклике образца и тепловом и электронном параметрах образца. Частота колебаний сканирующего луча будет равна частоте модуляции возбуждающего излучения со сдвигом фаз, обусловленным тепловым и электронным откликом образца, толщиной слоев образца, если образец многослойный, частотой модуляции возбуждающего излучения.

Гармонический "мираж"-эффект широко применяется в промышленности, особенно для нахождения скрытых дефектов и бесконтактного контроля за тепловыми и электронными параметрами тонких пленок (особенно с высокими тепло- и температуропроводностью, измерение которых контактными методами не может дать достоверный результат).



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки.

В данной работе предложен новый эффективный способ определения фазового сдвига и тепловых (электронных) параметров образца, использующий биения возбуждающего и пробного излучений. Использование биений позволяет перенести измерение фазы из диапазона сотен и тысяч килоггерц в диапазон килоггерц, где для определения сдвига фаз можно использовать хорошо отработанные методы с использованием стандартных низкочастотных синхронных детекторов, выпускаемых отечественной промышленностью (в работе проведены исследования тонких пленок с использованием усилителя-преобразователя импульсного УПИ-2).

1. Блок-схема установки, используемой в эксперименте по исследованию тонких пленок, представлена на рис. 1.

В качестве источника возбуждающего излучения в эксперименте использовался непрерывный Ar-лазер ОГМ-5М 1 с длиной волны излучения  $\lambda \cong 0.5 \mu\text{m}$ , мощность излучения которого во время эксперимента задавалась 1 W.

Возбуждающее излучение подавалось на акустооптический модулятор 2, сконструированный по специальному заказу для данного эксперимента. В эксперименте в качестве возбуждающего излучения использовалась одна из двух первых мод промодулированного излучения (с частотой модуляции интенсивности излучения, равной частоте, подаваемой на акустооптический модулятор), мощность излучения в которой выставлялась максимально возможной (мощность варьировалась путем изменения угла вхождения излучения в кристалл акустооптического модулятора). Используемые в эксперименте первая и нулевая моды вырезались диафрагмой 3, не пропускающей остальные моды (в том числе и вторую первую моду).

Незамодулированное излучение (нулевая мода) подавалось на второй акустооптический модулятор 4, после которого первая промодулированная мода (мощность излучения в ней выставлялась минимальной, с перекачкой энергии в третью моду), вырезанная диафрагмой 5 и ослабленная системой светофильтров 6, использовалась в качестве пробного излучения. Мощность пробного излучения была более чем на один порядок меньше мощности возбуждающего излучения, что позволяло пренебречь влиянием пробного излучения на формирование теплового отклика в образце.

Частоты модуляции акустооптических модуляторов задавались с высокочастотных генераторов Г4-143 7,8. Модуляции возбуждающего и пробного излучения  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  задавались путем модулирования высокочастотных сигналов с генераторов Г4-143 низкими частотами (отличающимися по величине на несколько процентов), подаваемыми с генераторов сигналов специальной формы Г6-28 9,10. Сигналы со входов синхронизации двух генераторов Г6-28 подавались на сумматор 11, с которого с помощью частотомера электронно-счетного ЧЗ-54 12 снималось их биение, равное разности частот модуляции пробного и возбуждающего излучений и поддерживаемое в течение всего эксперимента равным 5 kHz.

Опорный сигнал задавался путем снятия биений между пробным и возбуждающим излучением, подающимся на фотодиод ФД-24К 13 после отражения части пробного и возбуждающего излучений делительным

кубиком 14. Мощность части возбуждающего излучения, падающего на фотодиод, ослаблялась светофильтром 15 и была сравнима с мощностью части пробного излучения, падающего на фотодиод, так что суммарная мощность  $P_1$

$$P_1 \sim I_1(t) \sim 2 + \cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t \cong 2 + 2 \cos \omega_1 t \cos(\Delta\omega t/2) \quad (1)$$

при  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \ll \omega_1, \omega_2$ .

При времени быстрого действия фотодиода  $\tau$ , меньшем периода колебаний интенсивности  $T = 2\pi/\omega_1$ , электрический сигнал с фотодиода повторяет временное изменение интенсивности  $I$ . Этот сигнал с фотодиода 13 подавался на специально сконструированный операционный усилитель 16 с соответствующей полосой пропускания, с которого подавался на опорный вход усилителя-преобразователя импульсного УПИ-2 17. Здесь происходит демодуляция сигнала и выделение низкочастотной составляющей, пропорциональной  $\cos(\Delta\omega t/2)$ , частота которой составляла 2.5 kHz.

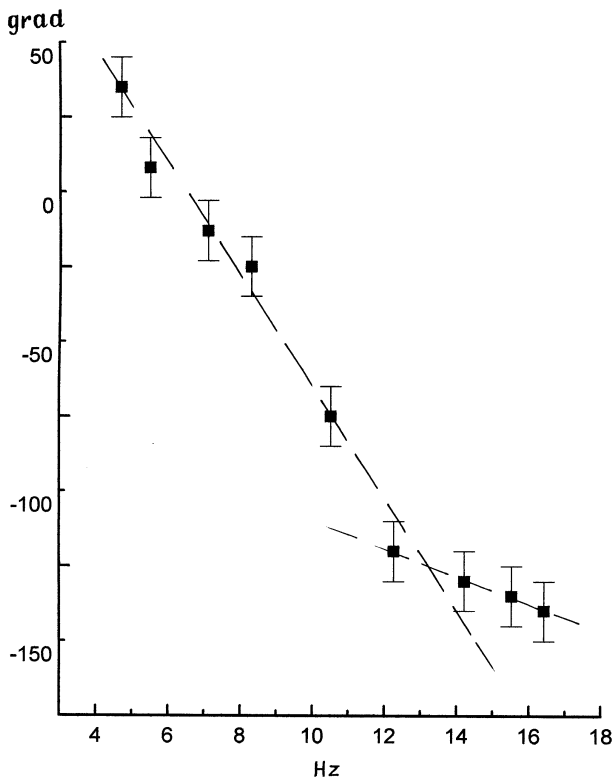
На второй фотодиод ФД-24К 18 подавалось отразившееся от образца 19 и разведенное с падающим на образец излучением делительным кубиком 20 пробное излучение, а также часть возбуждающего излучения, отведенного делительным кубиком 21 и ослабленного светофильтром 22 до мощности, сравнимой с мощностью падающего на фотодиод пробного излучения. Отраженный от образца пробный луч будет отличаться от падающего на образец пробного луча на некий зависящий от частоты модуляции сдвиг фаз  $\delta(\omega)$ , что обусловлено откликом образца. В этом случае для падающей на второй фотодиод ФД-24К 18 мощности  $P_2$  можно записать:

$$P_2 \sim I_2(t) \sim 2 + \cos \omega_1 t + \cos(\omega_2 t + \delta) \\ \cong 2 + 2 \cos(\omega_1 t + \delta/2) \cos(\Delta\omega t/2 + \delta/2). \quad (2)$$

Для простоты в (1), (2) мы предположили, что возможности излучений, падающих на фотодиоды, равны. В реальной экспериментальной ситуации изменятся значения коэффициентов, входящих в (1), (2), но не вид частотных зависимостей.

Питание фотодиодов 13, 18 осуществлялось от двухканального источника постоянного напряжения УНИП-7 23.

Формирование полезного сигнала обусловлено зависимостью коэффициента отражения поверхности образца от температуры поверхности,



**Рис. 2.** Зависимость фазы фототеплового сигнала от корня из частоты модуляции возбуждающего излучения.

которая зависела от теплового отклика образца на возбуждающее излучение. Возбуждающее и пробные излучения попадали в одну точку образца, закрепленного на столе с микронной подачей, обеспечивающей настройку с точностью до  $10 \mu\text{m}$ . Для снижения паразитных колебаний установка монтировалась на листе поролон толщиной 10 см.

Сигнал с фотодиода подавался на операционный усилитель 24, а с него на вход "А" усилителя-преобразователя импульсного УПИ-2 17. Показания с УПИ-2 снимались с двух квадратурных каналов усилителя на два цифровых вольтметра В7-16А 25. Визуальное наблюдение

биений сигнала производилось с помощью контрольного осциллографа С1-67 2б.

2. Используемый в эксперименте образец представлял собой вольфрамовую пленку толщиной  $3 \mu\text{m}$ , напыленную на кремниевую основу.

В ходе эксперимента был построен график зависимости фазы сигнала от корня из частоты модуляции сигнала, представленный на рис. 2.

Из графика видно, что при значении  $f_1 = 150 \text{ kHz}$  имеет место излом. Это физически можно объяснить тем, что за период изменения интенсивности  $T_1 = 1/f_1$  тепловая диффузия с коэффициентом  $D_T$  успевает эффективно происходить на всей толщине пленки  $\mu$  до второй среды — кремниевой подложки, где на границе сред меняется условие прохождения теплового возбуждения. Таким образом, для точки излома характерно, что длина тепловой диффузии за период равна по порядку величины толщине кремниевой пленки  $\mu$  [1]:

$$\mu \approx (D_T/f_1)^{1/2}. \quad (3)$$

Если взять табличное значение  $D_T$  для вольфрама ( $0.6 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) [2], то из выражения (3) получим значение толщины пленки —  $20 \mu\text{m}$ , что вполне разумно с точки зрения способа приготовления пленки. При известной же толщине пленки из (3) можно определять тепловую характеристику материала  $D_T$ , сравнивая величину которой с табличной характеристикой материала, можно оценивать качество нанесения покрытия.

Таким образом, в представленной работе проведены исследования тонких пленок на низкочастотных синхронных детекторах с использованием эффекта регистрации низкочастотных биений между замодулированными высокими частотами по интенсивности пробным и возбуждающим излучениями, показана сфера применения методики. По нашим данным, эта первая публикация на данную тему. В работе также приведены экспериментальные результаты по измерению коэффициента температуропроводности кремниевого образца.

## Список литературы

- [1] Зувев В.В., Петровский А.Н., Сальник А.О. Анализ свойств полупроводников методом объемной фотодефлекционной спектроскопии. Препринт МИФИ. № 046–87. М., 1987. 24 с.
- [2] Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. Т. 1. М.: Сов. энцикл., 1988.