

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



(19) **ВУ** (11) **6176**
(13) **С1**
(51)⁷ **G 01B 11/16**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(54) **УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ**

(21) Номер заявки: а 20010234

(22) 2001.03.13

(46) 2004.06.30

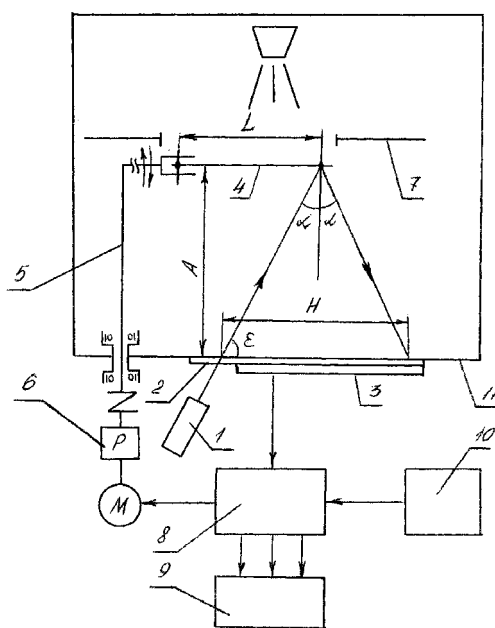
(71) Заявитель: Белорусский националь-
ный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Фролов Игорь Станиславович;
Иващенко Сергей Анатольевич; Пла-
хотнюк Василий Иванович; Макаре-
вич Евгений Владимирович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский нацио-
нальный технический университет (ВУ)

(57)

1. Устройство для измерения внутренних напряжений в тонких пленках, содержащее источник когерентного света, измерительный экран, отличающееся тем, что содержит выполненный с возможностью консольного закрепления подложки поворотный держатель с реверсивным приводом, защитный кожух с окном для установки подложки, электрически связанные между собой и с измерительным экраном записывающее устройство и электронную систему обработки сигнала и управления реверсивным приводом, при этом измерительный экран снабжен светочувствительной линейкой, источник когерентного света установлен под углом к измерительному экрану и горизонтальной плоскости, проходящей через точку закрепления подложки.



Фиг. 1

ВУ 6176 С1

ВУ 6176 С1

2. Устройство по п. 1, **отличающееся** тем, что угол между источником когерентного света и измерительным экраном определен исходя из требуемой чувствительности H в соответствии с выражением:

$$H = \left(A - \frac{L \operatorname{ctg} \left(\frac{\varepsilon + \alpha}{2} \right)}{\operatorname{ctg} \left(\frac{\varepsilon + \alpha}{2} \right) \operatorname{ctg} \varepsilon + 1} \right) (\operatorname{ctg} \varepsilon - \operatorname{ctg}(\varepsilon + 2\alpha)),$$

где A - расстояние между поверхностью подложки и измерительным экраном;

L - длина подложки;

ε - угол между источником когерентного света и измерительным экраном;

α - угол между источником когерентного света и нормалью к поверхности подложки.

3. Устройство по п. 2, **отличающееся** тем, что угол между источником когерентного света и измерительным экраном удовлетворяет соотношению $0^\circ < \varepsilon < 90^\circ$.

4. Устройство по любому из пп. 1-3, **отличающееся** тем, что оно снабжено дополнительными источником когерентного света и измерительным экраном, расположенным в вертикальной плоскости, проходящей через точку закрепления подложки.

(56)

SU 1226048 A, 1986.

RU 2097686 C1, 1997.

RU 2117241 C1, 1998.

EP 0641991 A2, 1995.

JP 03051729 A, 1989.

WO 01/11311 A1, 2001.

JP 2000009553 A, 2000.

US 5134303 A, 1992.

Изобретение относится к исследованию напряжений в тонких пленках оптическими методами и может быть использовано в микроэлектронике, а также различных областях машиностроения при изучении процессов получения тонких пленок.

Известно устройство для измерения внутренних напряжений в тонких пленках [1], содержащее источник когерентного света, измерительный экран и консольно закрепленную подложку.

Недостатками данного устройства являются относительно низкая чувствительность и невозможность управления ею в процессе работы вследствие установки источника когерентного света по нормали к поверхностям измерительного экрана и подложки, большая трудоемкость и низкая точность определения напряжений из-за необходимости повторного измерения после снятия пленки, а также отсутствие возможности измерения внутренних напряжений в двух плоскостях.

Прототипом заявляемого устройства является устройство для измерения внутренних напряжений в тонких пленках [2], содержащее источник когерентного света, полупрозрачное выпуклое зеркало, измерительный экран, плоское зеркало, консольно закрепленную подложку и фотоприемник для определения толщины пленки, причем измерительный экран и подложка выполнены из оптически прозрачного материала.

Недостатками данного устройства являются невозможность управления чувствительностью из-за необходимости направлять излучение источника когерентного света нормально к поверхностям полупрозрачного выпуклого зеркала и измерительного экрана, затруднительность использования устройства в условиях потоков высокоионизированной плазмы или нейтральных частиц с большими температурами из-за размещения в вакуум-

ВУ 6176 С1

ной камере отражательных и оптических элементов, применение подложек только из оптически прозрачного материала, а также невозможность измерения напряжений в двух плоскостях.

Задачей, решаемой изобретением, является расширение функциональных возможностей и управление чувствительностью устройства при измерении внутренних напряжений в тонких пленках.

Поставленная задача достигается тем, что заявляемое устройство, содержащее источник когерентного света и измерительный экран, содержит выполненный с возможностью консольного закрепления подложки поворотный держатель с реверсивным приводом, защитный кожух с окном для установки подложки, электрически связанные между собой и с измерительным экраном записывающее устройство и электронную систему обработки сигнала и управления реверсивным приводом. При этом измерительный экран снабжен светочувствительной линейкой, источник когерентного света установлен под углом к измерительному экрану и горизонтальной плоскости, проходящей через точку закрепления подложки.

Угол между источником когерентного света и измерительным экраном определяется исходя из требуемой чувствительности H в соответствии с выражением:

$$H = \left(A - \frac{L \operatorname{ctg} \left(\frac{\varepsilon + \alpha}{2} \right)}{\operatorname{ctg} \left(\frac{\varepsilon + \alpha}{2} \right) \operatorname{ctg} \varepsilon + 1} \right) (\operatorname{ctg} \varepsilon - \operatorname{ctg}(\varepsilon + 2\alpha)), \quad (1)$$

где A - расстояние между поверхностью подложки и измерительным экраном;

L - длина подложки;

ε - угол между источником когерентного света и измерительным экраном;

α - угол между источником когерентного света и нормалью к поверхности подложки.

Угол между источником когерентного света и измерительным экраном удовлетворяет соотношению $0 < \varepsilon < 90^\circ$. Устройство может быть снабжено дополнительными источником когерентного света и измерительным экраном, расположенными в вертикальной плоскости, проходящей через точку закрепления подложки.

Наличие поворотного держателя с реверсивным приводом, выполненного с возможностью консольного закрепления подложки, позволяет значительно расширить диапазон измерения растягивающих и сжимающих напряжений в тонких пленках, так как в случае выхода отраженного луча источника когерентного света за пределы измерительного экрана происходит поворот держателя в противоположную от направления изгиба подложки сторону до совмещения отраженного луча с начальной точкой измерительного экрана, после чего цикл измерения продолжается. Кроме того, наличие поворотного держателя с реверсивным приводом облегчает процесс настройки устройства на требуемую чувствительность.

Оснащение устройства защитным кожухом с окном для установки подложки позволяет производить измерение напряжений непосредственно в процессе осаждения тонкой пленки при воздействии на подложку потоков высокоионизированной плазмы или нейтральных частиц, вызывающих рассеивание излучения источника когерентного света и нарушение работы оптических и отражательных элементов. Кроме того, защитный кожух предохраняет от запыления обратную сторону подложки, что повышает точность измерения напряжений в тонких пленках, а также допускает возможность регулирования температурного режима подложки.

Расположение источника когерентного света под углом к измерительному экрану и горизонтальной плоскости, проходящей через точку закрепления подложки, позволяет упростить подготовку устройства к работе и устанавливать требуемую чувствительность измерительной системы.

Последнее возможно вследствие того, что изменение угла ε от значения, при котором источник когерентного света перпендикулярен к измерительному экрану и указанной выше гори-

ВУ 6176 С1

зонтальной плоскости ($\epsilon = 90^\circ$), вызывает увеличение угла падения луча источника когерентного света на подложку, а, следовательно, и увеличение чувствительности измерительной системы.

Оснащение измерительного экрана светочувствительной линейкой, а также наличие электрически связанных между собой и с измерительным экраном записывающего устройства и электронной системы обработки сигнала и управления реверсивным приводом, обеспечивает непрерывное получение временных диаграмм изгиба подложки с одновременной регистрацией параметров напыления тонкой пленки. При этом обеспечивается высокая точность показаний регистрирующей системы устройства и автоматизация процесса измерений.

Применение в заявляемом устройстве дополнительных источника когерентного света и измерительного экрана, расположенных в вертикальной плоскости, проходящей через точку закрепления подложки, позволяет измерять напряжения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Это дает возможность получать более полную картину распределения внутренних напряжений в тонких пленках, осаждаемых на подложку, определять их величину и знак, а также изменять геометрическую форму подложки.

Все это позволяет обеспечить управление чувствительностью и значительно расширить функциональные возможности предлагаемого устройства для измерения внутренних напряжений в тонких пленках по сравнению с известными техническими решениями.

При сравнении предложенного технического решения с объектами аналогичного назначения, обнаруженными в процессе поиска, установлено, что в известных устройствах отсутствуют признаки, сходные с признаками, отличающими заявляемое решение от прототипа. Следовательно, предложенное техническое решение обладает существенными отличиями.

Сущность изобретения поясняется следующими чертежами: на фиг. 1 изображена общая схема устройства для измерения внутренних напряжений в тонких пленках; на фиг. 2 - схема измерения посредством устройства внутренних напряжений в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; на фиг. 3 - схема для расчета угла изгиба β и радиуса кривизны R подложки; на фиг. 4 - распределение сжимающих напряжений в пленке TiN на подложке из стали 12X18H10T (1) и алюминиевого сплава Д16 (2).

Устройство для измерения внутренних напряжений в тонких пленках содержит источник когерентного света 1 (фиг. 1), измерительный экран 2 со светочувствительной линейкой 3, подложку 4, консольно закрепленную в поворотном держателе 5 с реверсивными приводом 6, и защитный кожух 7. Источник когерентного света 1 установлен под углом к измерительному экрану 2 и к горизонтальной плоскости, проходящей через точку закрепления подложки 4. Устройство может снабжаться (фиг. 2) дополнительными источником когерентного света 1 и измерительным экраном 2, расположенными в вертикальной плоскости, проходящей через точку закрепления подложки 4. Подложка 4, поворотный держатель 5 и защитный кожух 7 расположены в вакуумной камере 11. Измерительный экран 2 со светочувствительной линейкой 3, электронная система обработки сигнала и управления реверсивным приводом 8, и записывающее устройство 9 представляют собой регистрирующую систему устройства и электрически связаны между собой, а также с измерительным экраном 2 и блоком управления процессом осаждения 10 пленки на подложку 4.

Устройство работает следующим образом.

Луч источника когерентного света 1 направляют в вакуумную камеру 11 на подложку 4 под углом ϵ к измерительному экрану 2. Угол ϵ предварительно определяется исходя из требуемой чувствительности при проведении измерений с использованием выражения (1), а также с учетом граничных условий, например, размеров смотрового окна вакуумной камеры 11. Совмещение отраженного луча с начальной точкой измерительного экрана 2 обеспечивается реверсивным приводом 6 поворотного держателя 5. Отраженный от подложки 4 луч попадает на со светочувствительную линейку 3 измерительного экрана 2, преобразующую световое излучение в электрические сигналы, которые поступают в электронную систему обработки сигнала и управления реверсивным приводом 8, где соответ-

ВУ 6176 С1

ствующим образом преобразуются и усиливаются, и вместе с сигналами, поступившими от блока управления процессом осаждения 10 пленки, подаются на записывающее устройство 9. В случае выхода отраженного луча за пределы измерительного экрана 2 из-за значительного изгиба подложки 4 реверсивный привод 6 доворачивает поворотный держатель 5 с подложкой 4 до совмещения отраженного луча с начальной точкой измерительного экрана 2, что позволяет продолжить процесс измерения.

Изгиб подложки 4, обусловленный возникающими в ней внутренними напряжениями при осаждении тонкой пленки, вызывает смещение на светочувствительной линейке 3 отраженного от подложки 4 луча источника когерентного света 1. Это ведет к изменению фототока, которое регистрируется блоком электронной системы обработки сигнала и управления реверсивным приводом 8 и после соответствующего преобразования фиксируется на ленте записывающего устройства 9 в виде функции угла изгиба подложки 4. Одновременно ведется запись параметров осаждения пленки.

Получаемые временные диаграммы угла изгиба подложки 4 позволяют рассчитать радиус ее кривизны по формуле:

$$R = L \frac{\cos(\beta + \alpha)}{2 \cos[(\beta/2) + \alpha] \sin(\beta/2)},$$

где L - длина подложки;

α - угол между источником когерентного света и нормалью к поверхности подложки;

β - угол изгиба подложки.

Угол изгиба подложки определяется соотношением (фиг. 3) $\beta = 90^\circ - \varepsilon - \alpha$. Величина внутренних напряжений в тонких пленках определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{E_2 h_2}{6R h_1} \left(h_2 + \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{5/4} h_1 \right)$$

где E_2 и E_1 - модуль упругости соответственно подложки и пленки;

h_2 и h_1 - толщина соответственно подложки и пленки.

R - радиус кривизны подложки.

В качестве примера конкретной реализации устройства рассмотрим определение с его помощью внутренних напряжений в тонких пленках, наносимых ионно-плазменным методом в вакууме. Для этого заявляемое устройство было установлено в вакуумной камере установки УРМ3.279.048, оснащенной реверсивным шаговым электроприводом подложкодержателя. В качестве источника когерентного света использовался гелий-неоновый лазер ЛГН-105. Светочувствительная линейка была выполнена из фотодиодов ФД-27К, причем два крайних фотодиода служили для регистрации выхода отраженного луча за пределы измерительного экрана. Блок электронной системы обработки сигнала и управления реверсивным приводом был выполнен с использованием дифференциального усилителя мощности, а в качестве записывающего устройства применялся многоканальный самописец Н338-4П. Угол установки лазера относительно измерительного экрана был принят равным $\varepsilon = 80^\circ$ исходя из габаритов смотрового окна вакуумной камеры и размеров подложек. В качестве подложек использовались призматические образцы с размерами $100 \times 10 \times 0,8$ мм, выполненные из стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава Д16. Один из концов образца на длине 5...7 мм полировался для увеличения отражательной способности. С учетом конструкции поворотного держателя принято $L = 90$ мм, а расстояние между поверхностью подложки и измерительным экраном составляло $A = 240$ мм. Исследовался процесс формирования внутренних напряжений в образцах при нанесении пленки TiN. В результате были получены графики распределения сжимающих напряжений в пленке, представленные на фиг. 4.

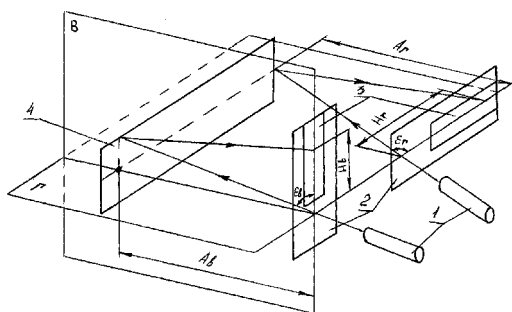
Таким образом заявляемое устройство по сравнению с прототипом обеспечивает расширение функциональных возможностей, так как оно позволяет проводить исследование внутрен-

BY 6176 C1

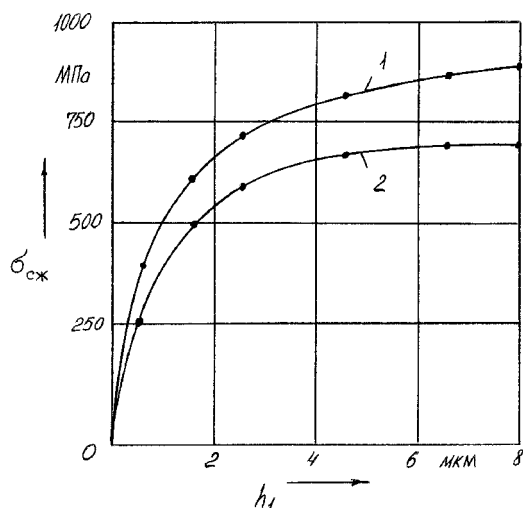
них напряжений в процессе осаждения пленки при воздействии потоков высокоионизированной плазмы или нейтральных частиц с большими температурами; обеспечивает использование как оптически прозрачных, так и непрозрачных подложек; значительно расширяет диапазон измеряемых напряжений; позволяет исследовать напряжения в двух плоскостях подложки и использовать подложки различной геометрической формы. Устройство обеспечивает возможность управления чувствительностью за счет установки источника когерентного света под углом к измерительному экрану и изменения этого угла в широких пределах. К дополнительным преимуществам устройства относятся повышение точности измерений; уменьшение габаритов и упрощение конструкции устройства за счет уменьшения количества звеньев в измерительной цепи; упрощение подготовки устройства к работе; автоматизация процесса исследования внутренних напряжений в течение всего технологического цикла формирования тонкой пленки.

Источники информации:

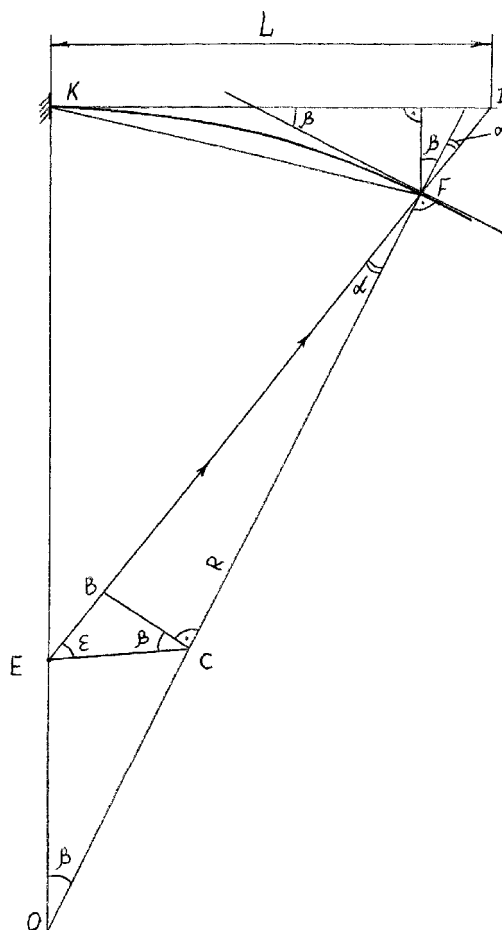
1. Четвериков Н.И., Сержанитов А.М., Черняев В.Н. Определение внутренних напряжений в пленках//Заводская лаборатория. - 1980. - Т. 46. - № 1. - С. 76-77.
2. А.с. СССР 1226048, МПК G 01B 11/16, 1986.



Фиг. 2



Фиг. 4



Фиг. 3