РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 694 167** (13) **C1**

(51) МПК
G01B 11/06 (2006.01)
G01N 21/552 (2014.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01B 11/0633 (2019.02); G01N 21/553 (2019.02)

(21)(22) Заявка: **2018122500, 20.06.2018**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.06.2018

Дата регистрации:
09.07.2019

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **20.06.2018**

(45) Опубликовано: **09.07.2019** Бюл. № **19**

Адрес для переписки:
119334, Москва, Ленинский пр-кт, 49, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

(72) Автор(ы):
Валянский Сергей Иванович (RU), Виноградов Сергей Владимирович (RU), Кононов Михаил Анатольевич (RU), Бурханов Геннадий Сергеевич (RU), Лаченков Сергей Анатольевич (RU), Дементьев Владимир Аркадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2148814 C1, 10.05.2000. RU 121590 U1, 27.10.2012. JP H07208937 A, 11.08.1995. US 5257093 A1, 26.10.1993.**

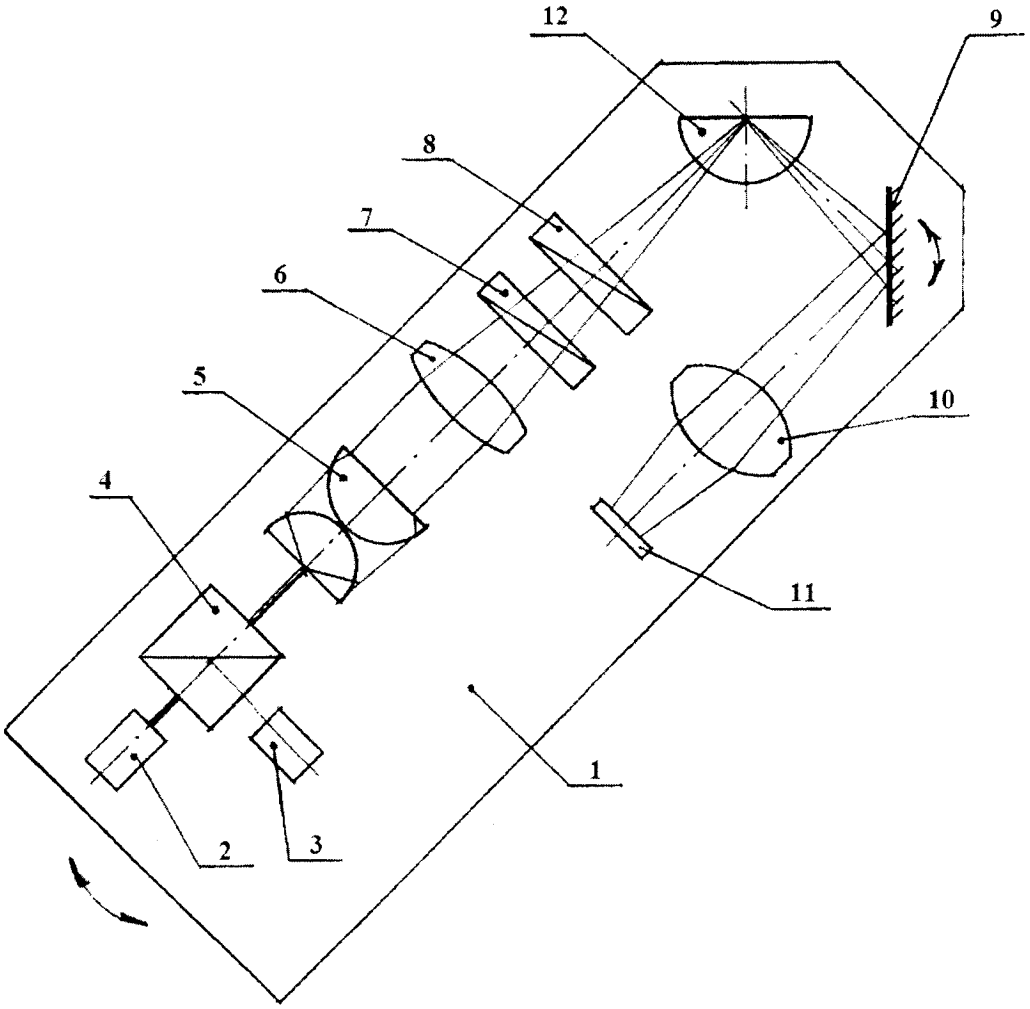
(54) Устройство для измерения толщины и диэлектрической проницаемости тонких пленок

(57) Реферат:

Изобретение относится к области оптического приборостроения и касается устройства для исследования толщины и диэлектрических свойств тонких пленок. Устройство включает в себя два лазера с различной длиной волны, делительный кубик, расширитель светового потока, линзу, два поляризатора, устройство нарушения полного внутреннего отражения, зеркало, фокусирующий объектив и светочувствительную матрицу. Устройство нарушения полного внутреннего отражения выполнено в виде полуцилиндрической линзы с отражающим элементом на ее плоскости в виде тонкой металлической пленки. Оптические оси поляризаторов составляют угол 45° с плоской поверхностью полуцилиндрической линзы, причем второй по ходу луча поляризатор может осуществлять как p-поляризацию, так и s-поляризацию. Элементы устройства размещены на платформе, перпендикулярной плоской поверхности полуцилиндрической линзы, причем платформа имеет возможность поворота вокруг вертикальной оси полуцилиндрической линзы, а зеркало имеет возможность поворота вокруг оси, перпендикулярной платформе. Технический результат заключается в обеспечении возможности одновременного измерения толщины и диэлектрической проницаемости тонких пленок в процессе их изготовления. 1 ил.

RU 2694167 C1

RU 2694167 C1



Фиг.1

RU 2694167 C1

RU 2694167 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 694 167** (13) **C1**

(51) Int. Cl.
G01B 11/06 (2006.01)
G01N 21/552 (2014.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
G01B 11/0633 (2019.02); G01N 21/553 (2019.02)

(21)(22) Application: **2018122500, 20.06.2018**

(24) Effective date for property rights:
20.06.2018

Registration date:
09.07.2019

Priority:
(22) Date of filing: **20.06.2018**

(45) Date of publication: **09.07.2019** Bull. № **19**

Mail address:
119334, Moskva, Leninskij pr-kt, 49, Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut metallurgii i materialovedeniya im. A.A. Bajkova Rossijskoj akademii nauk (IMET RAN)

(72) Inventor(s):
Valyanskij Sergej Ivanovich (RU),
Vinogradov Sergej Vladimirovich (RU),
Kononov Mikhail Anatolevich (RU),
Burkhanov Gennadij Sergeevich (RU),
Lachenkov Sergej Anatolevich (RU),
Dementev Vladimir Arkadevich (RU)

(73) Proprietor(s):
Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut metallurgii i materialovedeniya im. A.A. Bajkova Rossijskoj akademii nauk (IMET RAN) (RU)

RU 2694167 C1

(54) DEVICE FOR MEASURING THICKNESS AND DIELECTRIC PERMEABILITY OF THIN FILMS

(57) Abstract:

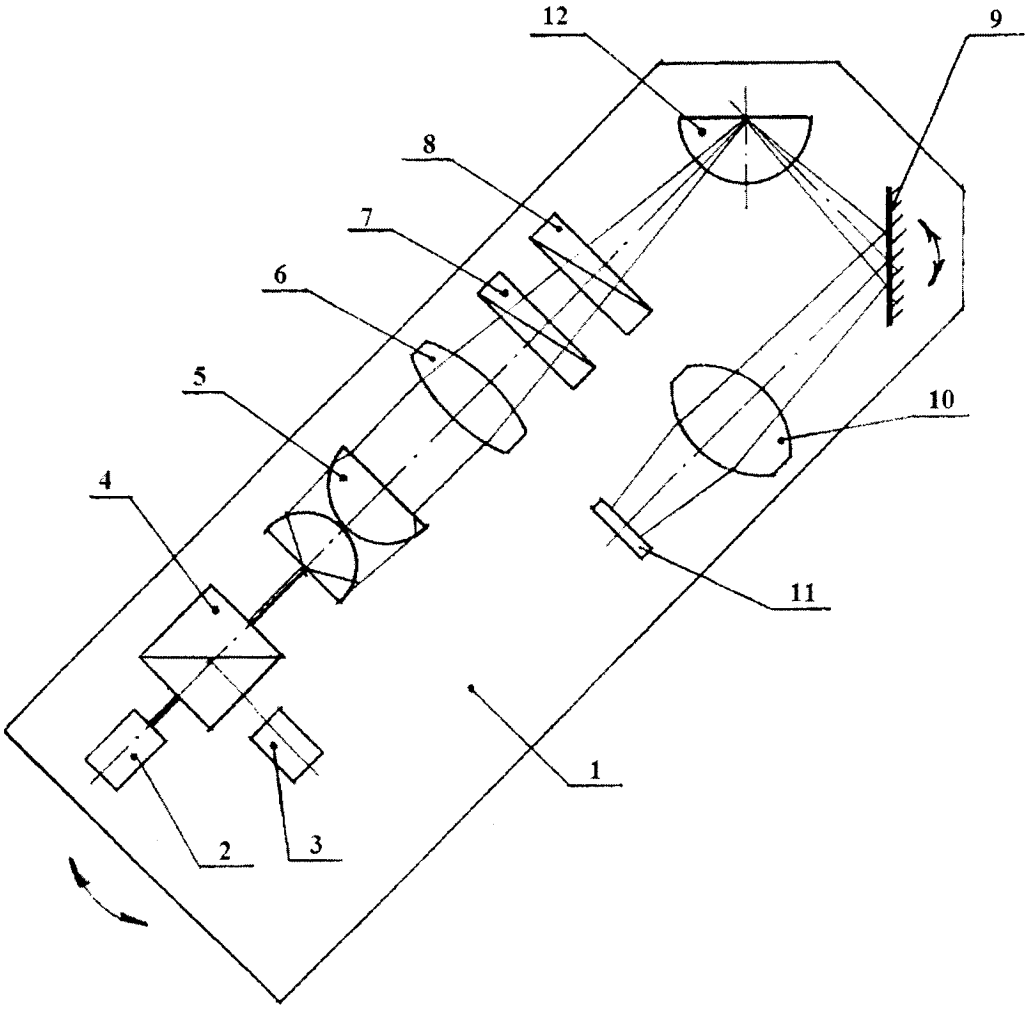
FIELD: instrument engineering.

SUBSTANCE: invention relates to the field of optical instrument engineering and concerns a device for investigation of thickness and dielectric properties of thin films. Device includes two lasers with different wavelength, dividing cube, light flux expander, lens, two polarizers, device for violation of total internal reflection, mirror, focusing lens and photosensitive matrix. Device for violation of total internal reflection is made in the form of a semicylindrical lens with a reflecting element on its plane in the form of a thin metal film. Optical axes of polarizers make angle of 45° with flat surface of semicylindrical lens, at that polarizer second in direction of beam can perform both p-polarization and s-polarization. Elements of device are arranged on platform, perpendicular to flat surface of semicylindrical lens, wherein the platform has the possibility of rotating about the vertical axis of the semicylindrical lens, and the mirror has the possibility of rotating about an axis perpendicular to the platform.

EFFECT: possibility of simultaneous measurement of thickness and dielectric permeability of thin films during their manufacture.

1 cl, 1 dwg

RU 2694167 C1



Фиг.1

RU 2694167 C1

RU 2694167 C1

Изобретение относится к области оптического приборостроения и может быть использовано для создания устройств по контролю толщины и диэлектрических свойств тонких пленок в процессе их нанесения на тонкие подложки.

Известны устройства-эллипсометры для измерения толщины тонких пленок основанные на изучении изменения состояния поляризации света после взаимодействия его с поверхностью пленок: отраженного и преломленного на ней. [Аззам Р., Башара Н., Эллипсометрия и поляризованный свет, пер. с англ., М., 1981].

Недостатком эллипсометров является сложность их применения для измерения толщины пленки в процессе ее нанесения на подложку, т.к. измерения осуществляются со стороны нанесения пленки, а также невозможность измерения диэлектрической проницаемости пленок.

Известны устройства - спектрометры на основе поверхностного плазмонного резонанса, позволяющие исследовать состав тонких пленок на поверхности сенсора спектрометра. [Патент Германии № DE 102007021563 A1, кл. G01J 3/42, 2008, Патент Великобритании № GB 2197065 A, кл. G01N 33/543, 1988.] Такие исследования могут проводиться и в процессе получения этих пленок.

Недостатком таких спектрометров является низкая чувствительность при измерении толщины пленки и ее диэлектрической проницаемости.

Наиболее близким устройством является устройство спектрометра на основе поверхностного плазмонного резонанса, содержащий источник света, поляризатор, линзу, устройство нарушения полного внутреннего отражения с отражающим элементом в виде металлической пленки, фокусирующий объектив и светочувствительную фотоматрицу. [Патент РФ №2500993, кл. G01J 3/42, 2012.]

Недостатком данного устройства также низкая чувствительность при измерении толщины пленки и ее диэлектрической проницаемости.

Задача, на решение которой направлено настоящее изобретение, заключается в создании устройства для измерения толщины и диэлектрической проницаемости тонких пленок.

Техническим результатом является создание устройства позволяющее проводить измерение толщины тонких металлических пленок в процессе их нанесения на тонкие подложки, и в случае нанесения диэлектрических пленок на эти металлические пленки одновременно измерять их диэлектрическую проницаемость. В частности проводить такие измерения при создании системы тонких пленок оптимальной толщины для биохимических сенсоров, работающих на основе плазмонного резонанса по схеме Кречмана.

Технический результат достигается тем, что устройство для измерения толщины и диэлектрических свойств тонких пленок в качестве источника света содержит два лазера с различной длинной волны, при этом лазеры расположены так, чтобы их лучи были направлены на делительный кубик таким образом, чтобы при выходе из него траектории их совпадали и направлялись через расширитель светового потока на линзу, затем через два поляризатора на устройство нарушения полного внутреннего отражения, выполненного в виде полуцилиндрической линзы с отражающим элементом на ее плоскости в виде тонкой металлической пленки, причем фокус линзы совпадает с плоской поверхностью полуцилиндрической линзы, а от нею лучи шли на зеркало, отразившись от которого, проходили через фокусирующий объектив, фокус которого, также совпадает с плоской поверхностью полуцилиндрической линзы, и попадали на светочувствительную фотоматрицу, при этом оптические оси поляризаторов составляют угол 45° с плоской поверхностью полуцилиндрической линзы, причем второй по ходу

луча поляризатор может осуществлять как p-поляризацию, так и s-поляризацию, при этом перечисленные элементы устройства размещены на платформе, перпендикулярной плоской поверхности полуцилиндрической линзы, причем платформа имеет возможность поворота вокруг вертикальной оси полуцилиндрической линзы, а зеркало имеет возможность поворота вокруг оси перпендикулярной платформе.

На фиг. 1 представлена схема предложенного устройства.

Устройство содержит платформу 1, на которой закреплены: лазеры 2, 3, делительный кубик 4, расширитель светового потока 5, линза 6, поляризаторы 7,8, зеркало 9, фокусирующий объектив 10, светочувствительная фотоматрица 11, полуцилиндрическая линза 12.

Устройство работает следующим образом. На плоскую поверхность полуцилиндрической линзы 12 наносится, например напылением, металлическая пленка, толщину которой необходимо измерить для отработки технологии нанесения покрытия. На нее же может быть с той же целью нанесена пленка диэлектрика.

Из лазеров 2 и 3, имеющие разные длины волн X, например, один с A~630 нм (красный) и с A~530 нм (зеленый) второй, попеременно подается излучение на делительный кубик 4. По выходу из делительного кубика излучение проходит через расширитель света 5, состоящего, например из двух линз. Размер пучка излучения при этом увеличивается, например, в 10 раз.

Затем излучение проходит через линзу 6, расположенную так, что излучение, прошедшее через нее фокусируется на плоскую поверхность полуцилиндрической линзы 12. После линзы 6 излучение попадает на поляризатор 7, ось которого составляет угол 45° с плоскостью падения излучения на полуцилиндрическую линзу 12. Угол в 45° является оптимальным углом падения. Он обеспечивает одинаковые амплитуды, как в плоскости падения луча, так и в плоскости перпендикулярной к плоскости падения. После поляризатора 7 излучение попадает на поляризатор 8, ось которого поворачивается так, чтобы составлять угол либо 0° (p-поляризация), либо 90° (s-поляризация) с плоскостью падения.

Отражаясь от плоской поверхности полуцилиндрической линзы 12, отражаясь от зеркала 9, допускающее вращение для точной ориентировки отраженного луча, попадает на фокусирующий объектив 10, фокус которого совпадает с точкой отражения излучения от поверхности полуцилиндрической линзы 12.

После фокусирующего объектива 10 излучение попадает на светочувствительную фотоматрицу 11, информация, с которой передается на компьютер (на фиг. 1 не показан).

Для изменения угла падения на плоскую поверхность полуцилиндрической линзы 12 вся платформа 1 может поворачиваться вокруг вертикальной оси полуцилиндрической линзы 12, проходящей через точку падения луча на эту поверхность.

Для расчета толщины и диэлектрических свойств тонких пленок необходимо знать коэффициент отражения R излучения от тонких пленок, угол θ падения излучения на пленку и W(θ) - полуширина функции R(θ). Для того чтобы получить полное решение необходимо составить уравнение при двух разных длинах волн излучения.

Для получения необходимого значения вида функции R(θ) нужно использовать излучения p- и s-поляризации. Плазмонные волны создает только p-поляризованное излучение, а s-поляризованное излучение нет. Поэтому для расчетов берется отношение интенсивности этих двух поляризаций. При этом требуется нормировка амплитуд линий поглощения, что обеспечивает поляризатор 7.

I_p нормируется к I_s, при этом отношение I_p/I_s показывает долю энергии луча идущую на возбуждение плазмонов.

Методика одновременного определения ε_1 (ω) и d_1 проводящего слоя с помощью ПЭВ описана в работе: W. P. Chen and J.M. Chea Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic films. J. Opt. Soc. Am. 1981., V. 71, №2. P.p.189-191.

В области углов падающей волны, близких к резонансному углу θ_{ATR} (это такой угол при котором тангенцальная составляющая волнового вектора излучения совпадает с волновым вектором поверхностных электромагнитных волн (SPW)) возбуждения SPW, коэффициент отражения R(θ) можно вычислить по приближенной формуле

$$R(\theta) = 1 - \frac{4Im(K^0)Im(K^R)}{[K_x - Re(K)]^2 + Im(K)^2}, \quad (1)$$

где проекция волнового вектора K вдоль границы раздела призмы и металлической пленки

$$K_x = \sqrt{\varepsilon_3}\frac{\omega}{c}sin\theta_{ATR}$$

$K=K^0+K^R$,

$$K^0 = \left(\frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}\right)^{1/2}\frac{\omega}{c} = \left(\frac{\varepsilon'_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}\right)^{1/2}\frac{\omega}{c} + i\left(\frac{\varepsilon'_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}\right)^{1/2}\frac{\varepsilon''_1\varepsilon_2}{2\varepsilon'_1(\varepsilon'_1+\varepsilon_2)}\frac{\omega}{c} \quad (2)$$

$$K^R = \frac{\omega}{c}(-\gamma_{31})K = K^0\left(\frac{2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}\right)\left(\frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2}\right)^{3/2} exp\left[i\frac{4\pi d}{\lambda}\frac{\varepsilon_1}{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)^{1/2}}\right], \quad (3)$$

где $\gamma_{31} = \left[\frac{\varepsilon_3 K_{z1} - \varepsilon_1 K_{z3}}{\varepsilon_3 K_{z1} + \varepsilon_1 K_{z3}}\right]$, Здесь:

K - комплексный волновой вектор SPW;

K^0 - комплексный волновой вектор SPW на границе раздела металл-вакуум в отсутствие призмы; K^R - возмущение K^0 при наличии призмы. Мнимые части K^0 и K^R являются собственными и радиационными затуханиями соответственно. Первая представляет Джоулевые потери в металле, а вторая представляет потерю утечки SPW обратно в призму.

ε_1, ε_2, и ε_3 - диэлектрические проницаемости металлической пленки, воздуха и призмы соответственно;

ε'_1 и ε''_1 - действительная и мнимая часть ε_1;

Kz - проекция волновых векторов в направлении перпендикулярном границы раздела призмы и металла.

Отражательная способность R(θ) имеет форму лорентцовской кривой при θ_{ATR} с полушириной W_θ=(Rmax+Rmin)/2 [когда |Im(K)|<|Re(K)|] и минимальный коэффициент отражения Rmin, определяемый как

$$W_0 = 2Im(K)\cos(\theta_{ATR})\frac{c}{n\omega} \quad (4)$$

$$R_{min} = 1 - \frac{4\cdot\eta}{(1+\eta)^2} \quad (5),$$

где

$$\eta = Im(K^0)/Im(K^R) \qquad (6)$$

С помощью формул (1)-(6) можно, используя экспериментальные значения θ_{ATR}, W_θ и зависимость R_{min} от θ определить ε_1 (ω) и d проводящего слоя. Для этого:

1) подставим измеренное θ_{ATR} в уравнение $Re(K) = \frac{\omega n}{c}\sin\theta_{ATR}$ рассчитаем Re(K);

2) установите $Re(K^0)=Re(K)$, потому что $Re(K^R)<<Re(K^0)$;

3) определить ε'_1, используя действительную часть уравнения (2);

4) определить $[Im(K^0)+Im(K^R)]=Im(K)$, подставив измеренные θ_{ATR} и W_0 в уравнение. (4);

5) определим $\eta=Im(K^0)/Im(K^R)$, подставив измеренное R_{min} в уравнение (5);

6) из результатов, полученных на этапах 4) и 5), решая систему двух уравнений, вычислим значения $Im(K^0)$ и $Im(K^R)$;

7) определяем ε'_1, подставив ε'_1 и $Im(K^0)$ в мнимую часть уравнения (2);

8) определим d, подставив θ_{ATR}, ε'_1, ε''_1 и $Im(K^R)$ в мнимую часть уравнения (3).

Таким образом, получают два набора решений для ε_1 и d. Проведя аналогичные измерения и вычисления для другой частоты и сравнивая полученные результаты с предыдущими, находят истинное значение d не зависящее от длины волны излучения. Используя найденное значение d, определяют ε_1 на обеих частотах.

Толщину диэлектрической пленки d_2 можно определить из следующих соотношений.

$$\delta k_X = k_X - k_X^0 \quad \delta k_X \approx k_X^2 \cdot \frac{(-\varepsilon_1{}' \cdot \varepsilon_3)^{\frac{1}{2}}}{\varepsilon_3 - \varepsilon'_1} \cdot \frac{(\varepsilon_2{}' - \varepsilon_1{}') \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_1{}')}{\varepsilon_2{}' \cdot (\varepsilon_3 + \varepsilon_1'')} \cdot d_2 \qquad (7)$$

$\varepsilon_3 \approx 1$, ε_1 - диэлектрическая проницаемость металлической пленки, ε_2 - диэлектрическая проницаемость диэлектрической пленки

$$k_X^0 = \frac{\omega}{c} \cdot \left(\frac{\varepsilon' \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon' + \varepsilon_3}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (8)$$

$$Im(k_X) = \frac{\omega}{2 \cdot c} \cdot \frac{W_\theta \cdot (\varepsilon_0)^{\frac{1}{2}}}{\cos\theta_0^\circ} \qquad (9)$$

$$Re(k_X) = \frac{\omega}{c} \cdot (\varepsilon_0)^{\frac{1}{2}} \cdot \sin\theta_0^\circ \qquad (10)$$

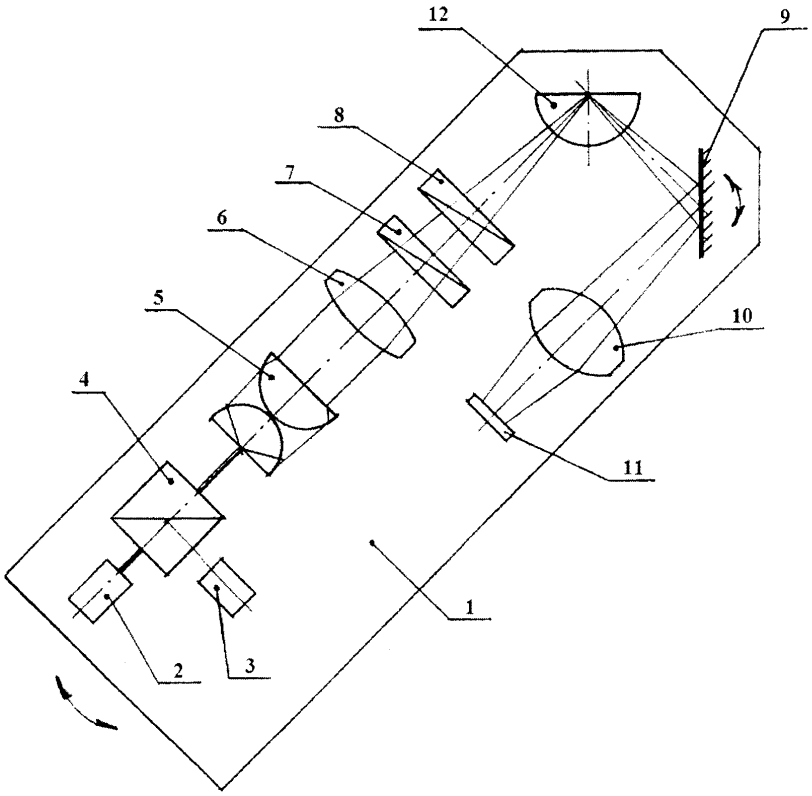
Устройство может быть использовано, например, для определения оптимальной толщины пленок для биохимических сенсоров, работающих на основе плазменного резонанса по схеме Кречмана. Для нанесения металлической пленки критерий оптимальности есть достижение функции R(θ) близкое к нулю. Близким к нулю должно быть значение самой функции R(θ). График функции R(θ) является резонансной кривой. При резонансе R(θ) близка к нулю.

(57) Формула изобретения

Устройство для исследования толщины и диэлектрических свойств тонких пленок, содержащее последовательно расположенные на одной оптической оси источник света, поляризатор, линзу, устройство нарушения полного внутреннего отражения,

фокусирующий объектив, светочувствительную матрицу, отличающееся тем, что в качестве источника света содержит два лазера с различной длиной волны, при этом лазеры расположены так, чтобы их лучи были направлены на делительный кубик таким образом, чтобы при выходе из него траектории их совпадали и направлялись через расширитель светового потока на линзу, затем через два поляризатора на устройство нарушения полного внутреннего отражения, выполненного в виде полуцилиндрической линзы с отражающим элементом на ее плоскости в виде тонкой металлической пленки, причем фокус линзы совпадает с плоской поверхностью полуцилиндрической линзы, а от нее лучи шли на зеркало, отразившись от которого, проходили через фокусирующий объектив, фокус которого также совпадает с плоской поверхностью полуцилиндрической линзы, и попадали на светочувствительную фотоматрицу, при этом оптические оси поляризаторов составляют угол 45° с плоской поверхностью полуцилиндрической линзы, причем второй по ходу луча поляризатор может осуществлять как p-поляризацию, так и s-поляризацию, при этом перечисленные элементы устройства размещены на платформе, перпендикулярной плоской поверхности полуцилиндрической линзы, причем платформа имеет возможность поворота вокруг вертикальной оси полуцилиндрической линзы, а зеркало имеет возможность поворота вокруг оси, перпендикулярной платформе.

1



Фиг.1