



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2007143852/28, 28.11.2007

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
28.11.2007

(43) Дата публикации заявки: 10.06.2009

(45) Опубликовано: 27.07.2010 Бюл. № 21

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2005134709 A1, 20.05.2007. RU 2207501  
C2, 27.06.2003. US 4909631 A, 20.03.1990. JP  
2000055627 A, 25.02.2000.

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5,  
МГТУ им.Н.Э.Баумана, Центр защиты  
интеллектуальной собственности (ЦЗИС),  
директору

(72) Автор(ы):

Белов Михаил Леонидович (RU),  
Городничев Виктор Александрович (RU),  
Козинцев Валентин Иванович (RU),  
Федотов Юрий Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования "Московский государственный  
технический университет имени  
Н.Э.Баумана" (RU)

## (54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА ПОДЛОЖКЕ

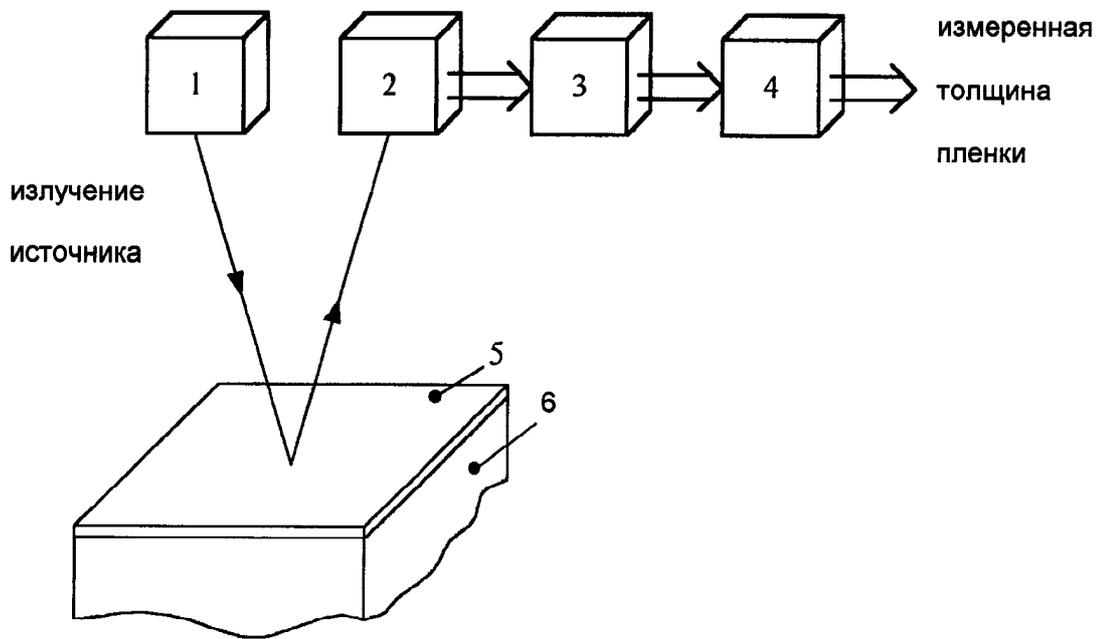
(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано, в частности, для оперативного контроля толщины тонких пленок нефтепродуктов в очистных сооружениях, на внутренних водоемах, акваториях портов и т.п. Технический результат направлен на повышение точности измерений. Неконтактный способ измерения толщины пленки на поверхности материала подложки заключается в облучении поверхности оптическим излучением на разных длинах волн зондирования, регистрации отраженного от поверхности сигнала и определения толщины пленки по результатам анализа зависимости интенсивности отраженного сигнала на длинах волн зондирования, при этом используют плавно или дискретно (от шести длин волн

зондирования) перестраиваемый по длине волн  $\lambda$  в узком диапазоне лазерный источник излучения, по данным измерений отраженного сигнала дополнительно определяют первую  $R'_{\text{ref}}(\lambda, d)$  и вторую  $R''_{\text{ref}}(\lambda, d)$  производные коэффициента  $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$  отражения трехслойной системы «воздух-пленка-подложка» и вычисляют толщину пленки  $d$  по формуле:

$$\left| \frac{R''_{\text{ref}}(\lambda, d) + \frac{2}{\lambda} R'_{\text{ref}}(\lambda, d)}{R_{\text{ref}}(\lambda, d) - \Gamma_{12}^2 - \Gamma_{23}^2} \right|^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda^2}{4\pi n_2} = d$$

где  $n_2$  - показатель преломления материала пленки;  $\Gamma_{12}$ ,  $\Gamma_{23}$  - коэффициенты отражения на границе сред «воздух-пленка» и «пленка-подложка» соответственно. 2 ил.



Фиг. 1

RU 2395788 C2

RU 2395788 C2



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.  
**G01B 11/06** (2006.01)

**(12) ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: **2007143852/28, 28.11.2007**

(24) Effective date for property rights:  
**28.11.2007**

(43) Application published: **10.06.2009**

(45) Date of publication: **27.07.2010 Bull. 21**

Mail address:  
**105005, Moskva, ul. 2-ja Baumanskaja, d.5,  
MGTU im.N.Eh.Baumana, Tsentr zashchity  
intelektual'noj sobstvennosti (TsZIS), direktoru**

(72) Inventor(s):

**Belov Mikhail Leonidovich (RU),  
Gorodnichev Viktor Aleksandrovich (RU),  
Kozintsev Valentin Ivanovich (RU),  
Fedotov Jurij Viktorovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie  
vysshego professional'nogo obrazovanija  
"Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij  
universitet imeni N.Eh.Baumana" (RU)**

**(54) METHOD TO MEASURE THICKNESS OF THIN FILMS ON SUBSTRATE**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

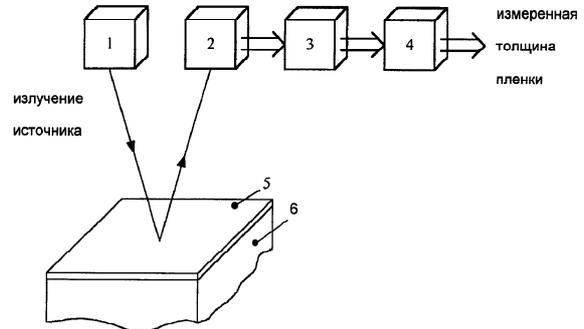
SUBSTANCE: proposed contactless method consists in irradiating the surface by optical radiation on various sounding wavelengths, registering signal reflected from said surface and determining film thickness by analyzing dependence of reflected signal intensity upon sounding wavelengths. Note that here is used laser source, smoothly or discretely (over six sounding wavelengths) readjustable in narrow range of wave length  $\lambda$ . Reflected signal measurement results are used to additionally determine first  $R'_{ref}(\lambda, d)$  and second  $R''_{ref}(\lambda, d)$  derivatives of coefficient  $R_{ref}(\lambda, d)$  of reflection of three-layer system "air-film-substrate" to calculate film thickness  $d$  by the formula:

$$\left| \frac{R''_{ref}(\lambda, d) + \frac{2}{\lambda} R'_{ref}(\lambda, d)}{R_{ref}(\lambda, d) - \frac{r_{12}^2 - r_{23}^2}{12 - r_{23}^2}} \right|^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda^2}{4\pi n_2} = d$$

where  $n_2$  is refractivity index of film material;  $r_{12}$ ,  $r_{23}$  are coefficients of reflection on the boundary of spheres "air-film" and "film-substrate"

EFFECT: higher accuracy of measurement.

2 dwg



Фиг. 1

RU 2 395 788 C2

RU 2 395 788 C2

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано, в частности, для оперативного экспресс-контроля толщины пленок нефтепродуктов в очистных сооружениях, на внутренних водоемах, акваториях портов и т.п.

Известны способы измерения толщины пленки на поверхности материала (см., например, [1-5]), заключающиеся в том, что на поверхность пленки направляют оптическое излучение, перестраивают длину волны излучения, падающего на поверхность пленки, регистрируют отраженный от поверхности сигнал и определяют толщину пленки  $d$  по результатам анализа зависимости интенсивности отраженного сигнала от длины волны.

Наиболее близким к предлагаемому является дистанционный трехволновой способ измерения толщины тонких пленок [5], заключающийся в том, что поверхность облучают оптическим излучением на трех длинах волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , регистрируют отраженный от поверхности сигнал и определяют толщину пленки  $d$  по результатам анализа зависимости интенсивности отраженного сигнала на длинах волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , выбранных так, чтобы  $\lambda_1 = \lambda_2 - \Delta\lambda$ ,  $\lambda_3 = \lambda_2 + \Delta\lambda$ , причем  $\Delta\lambda$  выбирается таким образом, чтобы обеспечить выполнение неравенства 
$$\frac{4\pi d n_2 (\lambda_2) \Delta\lambda}{\lambda_2} \leq \frac{\pi}{2},$$
 где  $n_2$  - показатель преломления пленки.

Недостатком этого способа является его неустойчивая работа (очень большие ошибки в определении толщины пленки) при наличии случайных ошибок величин измеряемых сигналов (которые всегда имеют место из-за погрешности измерений, шумов приемного тракта и т.п.). Это приводит к необходимости использования очень длительного усреднения - для подавления случайных ошибок величин измеряемых сигналов используется усреднение по сотням тысяч одиночных измерений. Однако длительное усреднение может быть использовано только в случае очень медленного изменения толщины измеряемой пленки (иначе оно вызывает искажение определяемой толщины).

Избежать этого недостатка можно тем, что согласно способу измерения толщины пленки на поверхности материала, включающему облучение поверхности оптическим излучением на разных длинах волн зондирования, регистрацию отраженного от поверхности сигнала и определение толщины пленки по результатам анализа зависимости интенсивности отраженного сигнала на длинах волн зондирования, для измерения толщины пленки вычисляют первую и вторую производную коэффициента отражения трехслойной системы «воздух-пленка-подложка» и определяют толщину пленки по значению первой и второй производной коэффициента отражения.

Наличие отличительного признака указывает на соответствие критерию "новизна".

Указанный отличительный признак неизвестен в научно-технической и патентной литературе и поэтому предложенное техническое решение соответствует критерию "изобретательский уровень".

На фиг.1 схематично изображено устройство, реализующее предлагаемый способ.

Устройство содержит перестраиваемый по длине волны источник излучения 1, фотоприемник 2, блок 3 вычисления первой и второй производной коэффициента отражения трехслойной системы «воздух-пленка-подложка», блок 4 вычисления толщины пленки 5 на поверхности материала 6.

Устройство работает следующим образом.

Оптическое излучение источника 1 отражается поверхностью пленки 5 (толщиной  $d$ ) и подложки 6, интенсивность отраженного излучения регистрируется фотоприемником 2, сигнал с фотоприемника поступает в блок 3 вычисления первой и

второй производной коэффициента отражения трехслойной системы «воздух-пленка-подложка», значения первой и второй производной коэффициента отражения поступают в блок 4 для определения толщины пленки.

Длина волны излучения  $\lambda$  источника 1 перестраивается (дискретно или плавно) для вычисления по данным измерений первой и второй производной коэффициента отражения трехслойной системы «воздух-пленка-подложка».

Источник излучения 1 облучает поверхность узким пучком под углом, близким к вертикали. Фотоприемник 2 на длине волны излучения  $\lambda$  регистрирует мощность излучения  $P(\lambda)$ , отраженного исследуемой поверхностью. Считается, что исследуемая поверхность достаточно гладкая и характер отражения близок к зеркальному (со своим коэффициентом отражения  $R_{\text{ref}}(\lambda)$ ). Источник излучения расположен на небольшом расстоянии от поверхности, а размеры приемной оптики достаточно велики, так что приемник перехватывает все излучение, отраженное от поверхности. Тогда принимаемая мощность  $P(\lambda)$  может быть представлена в виде (см., например, [6]):

$$P(\lambda) = P_0 R_{\text{ref}}(\lambda) \quad (1)$$

где:

$P_0$  - мощность, излучаемая источником;

$R_{\text{ref}}(\lambda)$  - коэффициент отражения поверхности.

При вертикальном падении излучения на поверхность для коэффициента отражения трехслойной системы «воздух-пленка-подложка»  $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$  в случае тонких пленок (когда пропускание пленки мало отличается от единицы) имеем (см., например, [7]):

$$R_{\text{ref}}(\lambda, d) \cong \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda, d)]}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda, d)]} \quad (2)$$

где:

$$r_{12} = \sqrt{\frac{(1 - n_2(\lambda))^2 + k_2^2(\lambda)}{(1 + n_2(\lambda))^2 + k_2^2(\lambda)}}$$

$$r_{23} = \sqrt{\frac{(n_2(\lambda) - n_3(\lambda))^2 + (k_2(\lambda) - k_3(\lambda))^2}{(n_2(\lambda) + n_3(\lambda))^2 + (k_2(\lambda) + k_3(\lambda))^2}}, \quad \beta(\lambda, d) = \frac{2\pi d}{\lambda} n_2(\lambda);$$

$n_{2,3}(\lambda)$ ,  $k_{2,3}(\lambda)$  - показатели преломления и поглощения материала пленки и подложки соответственно;  $r_{12}$ ,  $r_{23}$  - коэффициенты отражения на границе сред «воздух-пленка» и «пленка-подложка» соответственно.

Часто для коэффициента отражения  $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$  вместо формулы (2) используют более простое приближенное выражение (учитывая, что во многих случаях величины  $r_{12}^2 r_{23}^2$  и  $2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda, d)]$  в знаменателе выражения (2) малы по сравнению с 1):

$$R_{\text{ref}}(\lambda, d) \cong r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos[2\beta(\lambda, d)] \quad (3)$$

Формулы (1)-(3) показывают, что если приемник перехватывает все излучение зеркально отраженное от поверхности, то по результатам измерения  $P(\lambda)$  можно определить коэффициент отражения  $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$  и по величине  $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$  найти толщину пленки  $d$ . Однако величина  $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$  на одной длине волны зондирования  $\lambda$  из-за интерференции излучения, отраженного от границ раздела «воздух-пленка» и «пленка-подложка», не однозначно определяет толщину пленки  $d$ .

Эта неоднозначность для тонких пленок может быть устранена методом, основанным на определении первой и второй производной (по длине волны) коэффициента отражения системы «воздух-пленка-подложка».

Найдем первую и вторую производные  $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$  по  $\lambda$ , учтя что изменения по  $\lambda$  величин  $r_{12}, r_{23}$  и  $n_2$  во много раз более медленные, чем изменения по  $\lambda$  величины  $\cos[2\beta(\lambda, d)]$ :

$$5 \quad R'_{\text{ref}}(\lambda, d) \cong 2r_{12}r_{23} \sin\left[\frac{4\pi d}{\lambda} n_2\right] \frac{4\pi d}{\lambda^2} n_2^2 \quad (4)$$

$$10 \quad R''_{\text{ref}}(\lambda, d) \cong -2r_{12}r_{23} \cos\left[\frac{4\pi d}{\lambda} n_2\right] \left[\frac{4\pi d}{\lambda^2} n_2^2\right]^2 - \\ -4r_{12}r_{23} \sin\left[\frac{4\pi d}{\lambda} n_2\right] \frac{4\pi d}{\lambda^3} n_2^2 \quad (5)$$

Из (3)-(5) после простых преобразований имеем:

$$15 \quad \left| \frac{R''_{\text{ref}}(\lambda, d) + \frac{2}{\lambda} R'_{\text{ref}}(\lambda, d)}{R_{\text{ref}}(\lambda, d) - r_{12}^2 - r_{23}^2} \right|^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda^2}{4\pi n^2} = d \quad (6)$$

20 Таким образом, измерение коэффициента отражения системы «воздух-пленка-подложка», его первой и второй производной (величин  $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$ ,  $R'_{\text{ref}}(\lambda, d)$ ,  $R''_{\text{ref}}(\lambda, d)$  в правой части (6)) позволяют найти толщину пленки  $d$  на подложке.

Более точное выражение (основанное не на приближенной формуле (3), а на формуле (2)) для определения толщины пленки  $d$  имеет вид:

$$25 \quad \left| \frac{B''_{\text{ref}}(\lambda, d) + \frac{2}{\lambda} B'_{\text{ref}}(\lambda, d)}{B_{\text{ref}}(\lambda, d)} \right|^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda^2}{4\pi n^2} = d \quad (7)$$

где:

$$30 \quad B_{\text{ref}}(\lambda, d) = \frac{R_{\text{ref}}(\lambda, d) (1 + r_{12}^2 r_{23}^2) - r_{12}^2 - r_{23}^2}{2r_{12}r_{23}(1 - R_{\text{ref}}(\lambda, d))} \quad (8)$$

35 Таким образом, для определения толщины пленки необходимо провести измерение коэффициента отражения системы «воздух-пленка-подложка» и определить его первую и вторую производную, что может быть реализовано, например, для водной поверхности с пленкой нефти, используя один перестраиваемый по длине волны в узком диапазоне лазер ближнего или среднего ИК-диапазонов спектра.

40 На фиг.2 приведены результаты математического моделирования работы описанного способа для измерения толщины тонких нефтяных пленок. Здесь показана зависимость найденного (определенного алгоритмом (7)) значения толщины пленки  $d_H$  от заданного при моделировании значения толщины  $d$  пленки в случае шума измерения с относительным среднеквадратическим значением 1%. Для вычисления первой и второй производной использовались дискретные значения коэффициента отражения на шести близко расположенных (отстоящих друг от друга на  $\Delta\lambda=7,5$  нм) 45 длинах волн вблизи  $\lambda=0,8$  мкм при усреднении результатов по серии всего из 300 одиночных измерений.

50 На чертеже пунктирная линия, пересекающая чертеж по диагонали, - это зависимость, для которой найденное значение толщины пленки совпадает с действительным. Две другие штриховые линии - 20%-ное отличие найденного значения толщины пленки  $d_H$  от действительного значения толщины  $d$ .

Таким образом, описанный способ позволяет в реальных условиях шумов

измерений обеспечить устойчивое измерение толщины тонких пленок с точностью по крайней мере порядка 20% в диапазоне толщин пленок от долей мкм до ~5 мкм.

Заявляемое изобретение направлено, в частности, на решение задачи оперативного экспресс-контроля толщины пленок нефтепродуктов, что особенно важно в очистных сооружениях при контроле степени очистки воды.

Измерительное устройство может быть собрано на предприятиях РФ из компонент и узлов, изготавливаемых в РФ, и соответствует критерию "промышленная применимость".

#### Источники информации

1. Устройство для автоматического измерения толщины пленки. Патент 3-57407. Япония. 1993 г. Кл. G01B 11/06 (РЖ Изобретения стран мира, 1993, выпуск 82, N3, с.45).

2. Method of measuring film thickness. United States Patent. Patent Number: 4,645,349. Date of Patent: Feb. 24, 1987. Int. Cl. G01B 11/06.

3. Дистанционный способ измерения толщины пленок. Патент РФ на изобретение №2168151 от 27.05.01. МКИ G01B 11/06.

4. Способ измерения толщины пленок на подложке. Патент РФ на изобретение №2207501 от 27.06.03. МКИ G01B 11/06.

5. Дистанционный трехволновой способ измерения толщины тонких пленок. Патент РФ на изобретение №2304759. кл. G01B 11/06, G01N 21/17.

6. Григорьев П.В., Ломоносов А.М., Солнцев М.В. Исследование статистических свойств отраженного сигнала при лазерном зондировании морской поверхности // Известия АН СССР. Серия Физическая. 1987. Т.51, №2, С.210-214.

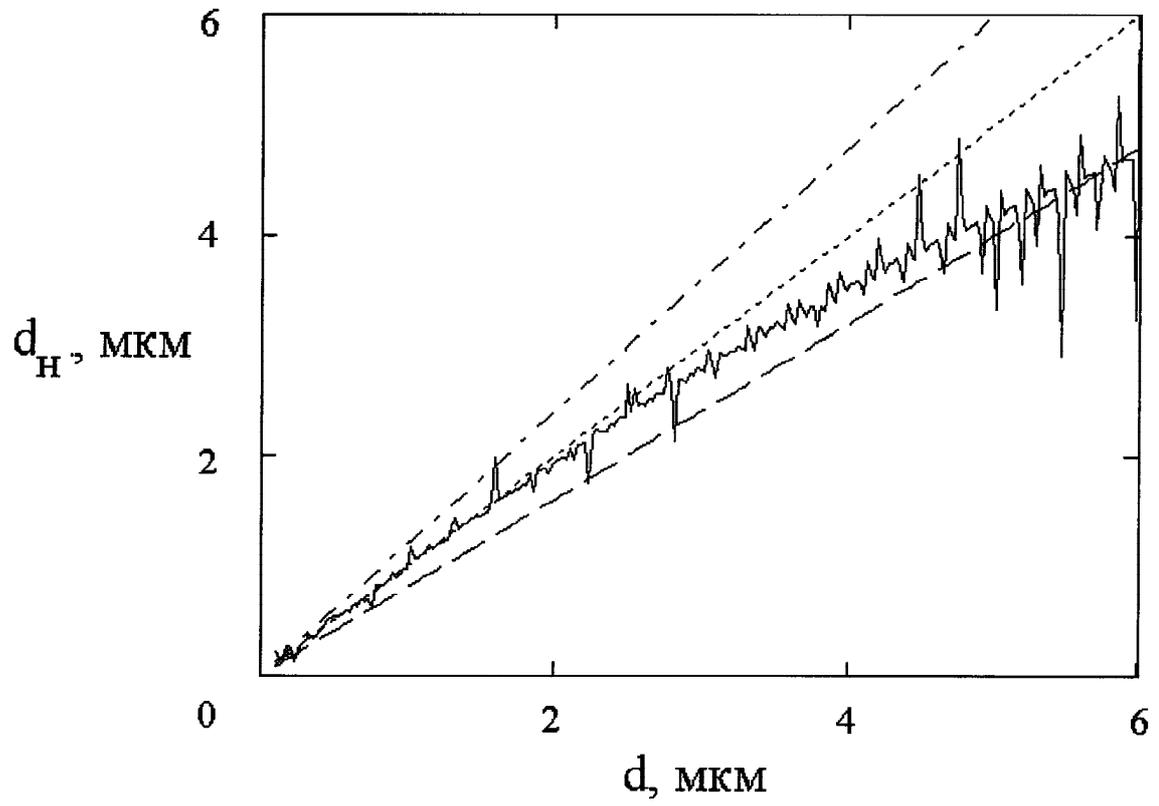
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики, М.: Наука, 1970, 855 с.

#### Формула изобретения

Неконтактный способ измерения толщины пленки на поверхности материала подложки путем облучения поверхности оптическим излучением на разных длинах волн зондирования, регистрации отраженного от поверхности сигнала и определения толщины пленки по результатам анализа зависимости интенсивности отраженного сигнала на длинах волн зондирования, отличающийся тем, что используют плавно или дискретно (от шести длин волн зондирования) перестраиваемый по длине волн  $\lambda$  в узком диапазоне лазерный источник излучения, по данным измерений отраженного сигнала дополнительно определяют первую  $R'_{\text{ref}}(\lambda, d)$  и вторую  $R''_{\text{ref}}(\lambda, d)$  производные коэффициента  $R_{\text{ref}}(\lambda, d)$  отражения трехслойной системы «воздух-пленка-подложка» и вычисляют толщину пленки  $d$  по формуле:

$$\left| \frac{R''_{\text{ref}}(\lambda, d) + \frac{2}{\lambda} R'_{\text{ref}}(\lambda, d)}{R_{\text{ref}}(\lambda, d) - r_{12}^2 - r_{23}^2} \right|^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda^2}{4\pi n_2} = d$$

где  $n_2$  - показатель преломления материала пленки;  $r_{12}$ ,  $r_{23}$  - коэффициенты отражения на границе сред «воздух-пленка» и «пленка-подложка» соответственно.



Фиг.2