



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**(21)(22) Заявка: **2011145612/28**, **10.11.2011**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**10.11.2011**

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **10.11.2011**(45) Опубликовано: **20.03.2013** Бюл. № 8(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2318192 C1, 27.02.2008. RU 2263923 C1, 10.11.2005. RU 2173837 C2, 20.09.2001. RU 2091733 C1, 27.09.1997. US 6330062 B1, 11.12.2001. US 7817278 B2, 19.10.2010. US 7407817 B2, 05.08.2008.**

Адрес для переписки:

Документ находится в Патентном отделе

**ОКБ АСТРОН**140081, Московская область, г.Лыткарино,  
ул.Парковая, д.1**(54) ПЛАЗМОННЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА**

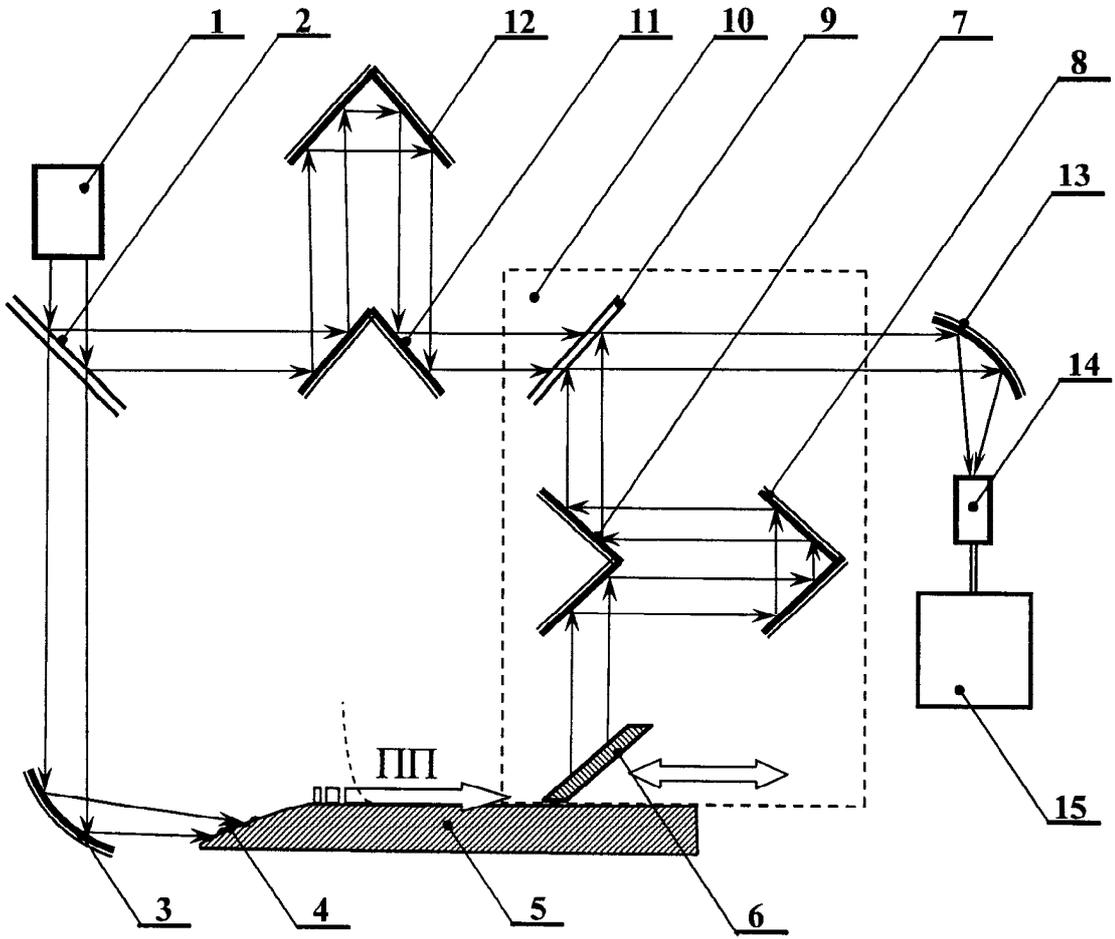
(57) Реферат:

Изобретение относится к оптическим методам исследования поверхности металлов и полупроводников. Спектрометр содержит источник объемного излучения, светоделитель, расщепляющий излучение на измерительный и реперный пучки, зеркало, твердотельный проводящий образец с двумя сопряженными скругленным ребром плоскими гранями, размещенный на одной из этих граней элемент преобразования излучения измерительного пучка в поверхностный плазмон (ПП), размещенный на второй грани образца элемент преобразования ПП в объемное излучение, выполненный в виде примыкающего к грани и перемещаемого вдоль трека ПП плоского зеркала, ориентированного перпендикулярно треку и наклонно к грани, второй

светоделитель, совмещающий пучки и сопряженный с наклонным зеркалом, перемещаемым вместе со вторым светоделителем вдоль поверхности образца, фокусирующий объектив, фотоприемное устройство, второй объектив, размещенный на пути совмещенных пучков, устройство обработки информации, линию задержки, состоящую из четырех уголковых зеркал, попарно расположенных на пути пучков. Уголковые зеркала, отражающие измерительный пучок, сопряжены с наклонным зеркалом и вторым светоделителем, а источник излучения имеет сплошной спектр. Изобретение направлено на сокращение времени измерений спектра комплексного показателя преломления поверхностных плазмонов. 4 ил.

RU 2 4 7 7 8 4 2 C 1

RU 2 4 7 7 8 4 2 C 1



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2011145612/28, 10.11.2011**

(24) Effective date for property rights:  
**10.11.2011**

Priority:

(22) Date of filing: **10.11.2011**

(45) Date of publication: **20.03.2013 Bull. 8**

Mail address:

Документ находится в Патентном отделе

**ОКБ АСТРОН**

140081, Московская область, г.Лыткарино,  
ул.Парковая, д.1

(54) **TERAHERTZ PLASMON FOURIER SPECTROMETER**

(57) Abstract:

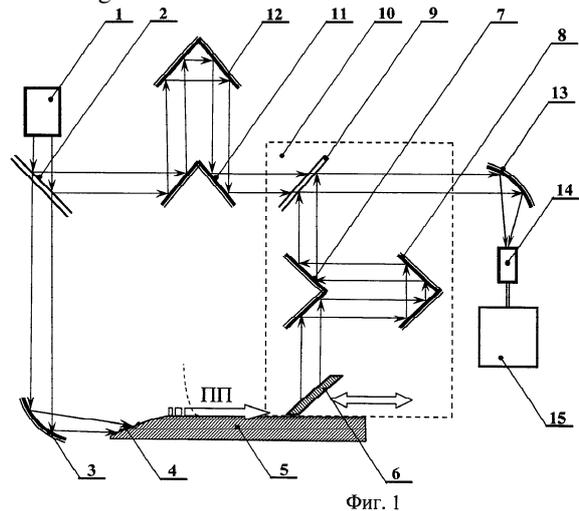
FIELD: physics.

SUBSTANCE: spectrometer has a volume radiation source, a beam splitter which splits radiation into a measuring beam and reference beam, a mirror, a solid-state conducting sample with two flat faces interfaced by a rounded edge, an element, on one of said faces, for converting radiation of the measuring beam to a surface plasmon (SP), an element, on the other face of the sample, for converting the SP to volume radiation which is in form of a flat mirror adjoining the face and movable along the SP path, said mirror being oriented perpendicular to the path and inclined to the face, a second beam splitter which superimposes the beams and is interfaced with the inclined mirror which is movable together with the second beam splitter along the surface of the sample, a focusing lens, a photodetector, a second lens placed on the path of the superimposed beams, an information processing device, a delay line consisting of four corner mirrors, placed in pairs on the beam path. The corner

mirrors, which reflect the measuring beam, are interfaced with the inclined mirror and the second beam splitter. The radiation source has a continuous spectrum.

EFFECT: cutting time for measuring the spectrum of the complex refractive index of surface plasmons.

4 dwg



RU 2 4 7 7 8 4 2 C 1

RU 2 4 7 7 8 4 2 C 1

Изобретение относится к оптическим методам исследования поверхности металлов и полупроводников, а именно к определению спектров комплексной диэлектрической проницаемости или оптических постоянных (показателя преломления  $n$  и показателя поглощения  $k$ ) как самой поверхности, так и ее переходного слоя путем измерения комплексного показателя преломления  $k = k' + i \cdot k''$  (где  $i$  - мнимая единица) поверхностных плазмонов (ПП) терагерцового (ТГц) диапазона, и может найти применение в оптике поверхности твердого тела, в инфракрасной (ИК) спектроскопии окисных и адсорбированных слоев, в контрольно-измерительной аппаратуре источников ТГц-излучения.

Оптическая спектроскопия поверхности твердого тела - одна из основных областей применения ПП (Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред. / Под ред. В.М.Аграновича и Д.Л.Миллса. - М.: Наука, 1985. - 525 с.). В первых ПП-спектрометрах ИК-диапазона использовали разнесенные вдоль трека ПП-элементы прямого и обратного преобразования объемной волны в поверхностную. С помощью таких устройств непосредственно измеряли длину распространения ПП  $L$  в определенном диапазоне длин волн дискретно перестраиваемого лазерного источника излучения (Zhizhin G.N., Yakovlev V.A. Broad-band spectroscopy of surface electromagnetic waves // Physics Reports. - 1990. - v.194. - No. 5/6. - p.281-289). Основной недостаток таких ПП-спектрометров - большая продолжительность измерений и недостаточность объема информации, получаемой в результате измерений  $L$ , что позволяет определять только мнимую часть  $k''$  показателя преломления ПП.

Использование в ПП-спектроскопии плавно перестраиваемых по частоте лазеров на свободных электронах позволило повысить соотношение сигнал/шум (Zhizhin G.N., Alieva E.V., Kuzik L.A., Yakovlev V.A., Shkrabo D.M. Van der Meer A.F.G., Van der Wiel M.J. Free-electron laser for infrared SEW characterization surfaces of conducting and dielectric solids and nm films on them // Applied Physics (A), 1998, v.67, p.667-673). Применение интерференционной методики определения  $k'$  наряду с определением  $k''$  по измеренной величине  $L$  повысило информативность метода ПП-спектроскопии, поскольку появилась возможность путем решения дисперсионного уравнения ПП рассчитать два параметра переходного слоя (например, его толщину и показатель преломления) или комплексную диэлектрическую проницаемость материала образца.

Известен плазменный спектрометр ТГц-диапазона для определения диэлектрической проницаемости проводящих материалов, содержащий перестраиваемый по частоте источник монохроматического излучения, светоделитель, расщепляющий падающее излучение на измерительный и реперный пучки, зеркало, элемент преобразования излучения измерительного пучка в ПП, твердотельный образец с плоской поверхностью, элемент преобразования ПП в объемное излучение, непрозрачную заслонку, перекрывающую реперный пучок при регистрации интенсивности излучения измерительного пучка, светоделитель, совмещающий измерительный и реперный пучки, регулируемый компенсатор, фокусирующий объектив и фотоприемное устройство (Жижин Г.Н., Никитин А.К., Рыжова Т.Н. Способ определения диэлектрической проницаемости металлов в инфракрасном диапазоне спектра. // Патент РФ на изобретение №2263923, Бюл. №31 от 10.XI.2005 г.). Основным недостатком известного устройства является низкая точность определения комплексного показателя преломления ПП (из-за неоднозначности фазы объемной волны, излучаемой с различных участков элемента преобразования ПП в объемное излучение) и большая продолжительность измерений.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому устройству является плазменный спектрометр ТГц-диапазона, предназначенный для исследования проводящей поверхности и содержащий перестраиваемый по частоте источник монохроматического излучения, светоделитель, расщепляющий падающее излучение на измерительный и реперный пучки, регулируемый поглотитель излучения реперного пучка, зеркало, элемент преобразования излучения измерительного пучка в ПП, твердотельный проводящий образец с двухгранной поверхностью, элемент преобразования ПП в объемное излучение, непрозрачную заслонку, снабженную осью вращения, светоделитель, совмещающий измерительный и реперный пучки, фокусирующий объектив и фотоприемное устройство (ФПУ), причем элементы преобразования излучения в ПП и обратно размещены на разных гранях образца, сопряженных скругленным ребром, а элементом преобразования ПП в объемное излучение служит плоское зеркало, примыкающее к поверхности образца, ориентированное наклонно к ней, сопряженное со вторым светоделителем и перемещаемое вместе с последним вдоль поверхности образца (Жижин Г.Н., Никитин А.К., Балашов А.А., Рыжова Т.А. Плазменный спектрометр ТГц-диапазона для исследования проводящей поверхности. // Патент РФ на изобретение №2318192, Бюл. №6 от 27.02.2008 г.). Основным недостатком известного устройства является большая продолжительность измерений, обусловленная раздельностью процедур определения  $k'$  и  $k''$  на дискретных частотах излучения источника.

Технический результат изобретения направлен на сокращение времени измерений спектра комплексного показателя преломления поверхностных плазмонов ( $k = k' + i \cdot k''$ ), направляемых исследуемой поверхностью образца.

Технический результат достигается тем, что плазменный Фурье-спектрометр терагерцового диапазона, содержащий источник объемного излучения, светоделитель, расщепляющий излучение на измерительный и реперный пучки, зеркало, твердотельный проводящий образец с двумя сопряженными скругленным ребром плоскими гранями, размещенный на одной из этих граней элемент преобразования излучения измерительного пучка в поверхностный плазмон (ПП), размещенный на второй грани образца элемент преобразования ПП в объемное излучение, выполненный в виде примыкающего к грани и перемещаемого вдоль трека ПП плоского зеркала, ориентированного перпендикулярно треку и наклонно к грани, второй светоделитель, совмещающий пучки и сопряженный с наклонным зеркалом, перемещаемым вместе со вторым светоделителем вдоль поверхности образца, фокусирующий объектив и фотоприемное устройство (ФПУ), дополнительно содержит второй объектив, размещенный на пути совмещенных пучков, устройство обработки информации, линию задержки, состоящую из четырех уголковых зеркал, попарно расположенных на пути пучков, причем уголковые зеркала, отражающие измерительный пучок, сопряжены с наклонным зеркалом и вторым светоделителем, а источник излучения имеет сплошной спектр.

Сокращение времени измерений достигается в результате совмещения процедур определения  $k'$  и  $k''$  при их одновременном выполнении для всех частот рабочего диапазона за счет использования широкополосного источника излучения и введения в состав спектрометра линии задержки и устройства обработки информации, способного выполнять полное Фурье-преобразование регистрируемой интерферограммы.

Изобретение поясняется чертежами: на фиг.1 приведена схема заявляемого устройства, на фиг.2 представлена центральная часть интерферограммы.

регистрируемой в рассматриваемом примере применения заявляемого устройства, на фиг.3 изображен спектр  $k'(\sigma)$  и на фиг.4 - спектр  $k''(\sigma)$ , рассчитанные с использованием интерферограмм, зарегистрированных в рассматриваемом примере применения заявляемого устройства при расстояниях пробега ПП, равных  $a_1=1,0$  см и  $a_2=1,5$  см; здесь  $\sigma=1/\lambda$  - волновое число ( $\text{см}^{-1}$ ).

Спектрометр содержит: 1 - источник р-поляризованного широкополосного излучения; 2 - светоделитель, расщепляющий пучок падающего излучения на измерительный и реперный пучки; 3 - фокусирующий объектив; 4 - элемент преобразования объемного излучения измерительного пучка в ПП; 5 - твердотельный проводящий образец, имеющий две плоские смежные грани, сопряженные скругленным ребром, на одной из которых размещен элемент 4, а на другой - элемент для преобразования ПП в объемное излучение, выполненный в виде примыкающего к грани подвижного плоского зеркала 6, ориентированного перпендикулярно измерительному пучку и наклонно к грани; 7, 8 - уголкового отражатели, расположенные на пути измерительного пучка и обеспечивающие когерентность монохроматических компонент в пучках; 9 - светоделитель, совмещающий измерительный и реперный пучки, 10 - платформа, перемещаемая вдоль трека ПП и содержащая элементы 6, 7, 8 и 9; 11, 12 - уголкового отражатели, расположенные на пути реперного пучка и обеспечивающие возможность регулировки разности оптических путей пучков; 13 - объектив, фокусирующий излучение совмещенных пучков на ФПУ 14, электрические сигналы с которого поступают на устройство обработки информации 15, способное выполнять полное Фурье-преобразование интерферограммы, регистрируемой ФПУ 14 при перемещении уголкового отражателя 8 (или 12).

Спектрометр работает следующим образом. Широкополосное излучение источника 1 направляют на светоделитель 2, расщепляющий падающее излучение на измерительный и реперный пучки. Излучение измерительного пучка фокусируется объективом 3 на элемент 4, преобразующий излучение в набор ПП с различными частотами. ПП пробегают до скругленного ребра (радиус закругления  $R > 10\lambda$ ), образованного двумя смежными плоскими гранями образца 5, преодолевают это ребро (с некоторыми радиационными потерями) и продолжают распространяться по второй грани до элемента 6, осуществляющего обратное преобразование набора ПП в объемные волны и направляющего их на пару зеркал 7 и 8. Пройдя эти зеркала, излучение измерительного пучка поступает на светоделитель 9, размещенный вместе с зеркалами 6, 7 и 8 на платформе 10. На другую сторону светоделителя 9 поступает излучение реперного пучка, прошедшего через вторую пару зеркал 11 и 12 линии задержки. Светоделитель 9 совмещает пучки и направляет их через объектив 13 на ФПУ 14, которое регистрирует интерференционный сигнал, являющийся функцией расстояния между парой зеркал 7 и 8 или 11 и 12, изменяемого по определенному закону во времени. Совокупность этих сигналов, называемых интерферограммой, подвергается устройством 15 полному Фурье-преобразованию. При этом расстояние между парой зеркал следует изменять таким образом, чтобы экстремальные значения оптической разности хода  $\pm \Delta \ell_{\text{max}}$  интерферирующих пучков удовлетворяло критерию требуемого спектрального разрешения:  $\delta\sigma \approx 1/(2 \cdot |\Delta \ell_{\text{max}}|)$ . Тогда число разрешаемых спектральных точек  $N = \sigma_{\text{max}} / \delta\sigma$ , где  $\sigma_{\text{max}}$  - максимальное волновое число излучения источника.

Функция автокорреляции  $I_{\text{инт}}(\Delta \ell)$  (интерферограмма) пучков, зависящая от расстояния  $a$ , описывается выражением:

$$I_{\text{инт}}(\Delta\ell) = I_{\text{const}} + \Delta I_{\text{инт}}(\Delta\ell), \quad (1)$$

где  $I_{\text{const}}$  - постоянное слагаемое интерферограммы, независящее от  $\Delta\ell$ ;

$\Delta I_{\text{инт}}(\Delta\ell)$  - интерференционный член, подвергается полному Фурье-преобразованию и вычисляемый по формуле:

$$\Delta I_{\text{инт}}(\Delta\ell) = 2 \int_0^{\infty} A_{0\nu}^2 \alpha_{1\nu} \alpha_{2\nu} \cdot \exp(-k_{0\nu} \kappa_{\nu}'' a) \cdot \cos \left\{ k_{0\nu} \cdot \left[ a \cdot (\kappa_{\nu}' - n_{\nu}) + \Delta\ell \right] - \varphi_{0A\nu} \right\} d\nu;$$

$\alpha_{1\nu}, \alpha_{2\nu}$  - модули коэффициентов преобразования объемной волны в ПП и обратно;

$A_{0\nu}^2$  - спектральная плотность излучения на входе интерферометра;

$k_{0\nu}$  - волновое число компоненты излучения с частотой  $\nu$  в вакууме;

$\kappa_{\nu} = \kappa_{\nu}' + i \cdot \kappa_{\nu}''$  - показатель преломления ПП на частоте  $\nu$ ;

$a$  - длина пробега ПП;

$\varphi_{0A\nu}$  - начальная разность фаз пучков спектральной компоненты с частотой  $\nu$  при минимальной разности оптических путей пучков, включающая в себя фазы коэффициентов преобразования.

В силу ограниченности реального спектра излучения максимальной частотой  $\nu_{\text{max}}$  интеграл в формуле для расчета  $\Delta I_{\text{инт}}$  заменяется согласно теореме отсчетов Котельникова (Лебедев Е.Г. Математические основы передачи информации. / С.-Петербург: ГУИТМО, 2010. - с.63) суммой интенсивностей дискретных монохроматических компонент с частотами  $\nu_j$  по точкам отсчетов  $j=0, 1, 2, \dots, N$  на оси частот:

$$\Delta I_{\text{инт}}(\Delta\ell_m) = 2 \sum_{j=0}^N \left\{ \left( A_{0\nu_j}^2 \alpha_{1\nu_j} \alpha_{2\nu_j} \right)_j \cdot \exp(-k_{0\nu_j} \kappa_{\nu_j}'' a) \cdot \cos \left[ k_{0\nu_j} \cdot \left[ a \cdot (\kappa_{\nu_j}' - n_{\nu_j}) + \Delta\ell_m \right] - \varphi_{0A\nu_j} \right] \cdot \frac{\nu_{\text{max}}}{N} \right\}, \quad (2)$$

где  $\Delta\ell_m$  -  $m$ -ное значение  $\Delta\ell$  ( $m=0, 1, 2, \dots, N$ );  $N$  - оптимальное число точек отсчетов, равное разрешающей способности Фурье-спектрометра:

$$N = 2 \cdot (\Delta\ell_{\text{max}} \nu_{\text{max}}) / c, \quad (3)$$

где  $|\Delta\ell_{\text{max}}|$  - максимальное смещение отражателя 8 (или 12);  $c$  - скорость света в вакууме.

Применение обратного полного Фурье-преобразования  $\left( \frac{*}{F} \right)^{-1}$  к интерферограмме

$\Delta I_{\text{инт}}(\Delta\ell_m)$  позволяет найти комплексный спектр излучения на ФПУ 14, описываемый суммой косинусного  $C_{\nu_j}$ , и синусного  $S_{\nu_j}$ , Фурье-преобразований интерферограммы (2):

$$\left( \frac{*}{F} \right)^{-1} [\Delta I_{\text{инт}}(\Delta\ell_m)] = C_{\nu_j} + i \cdot S_{\nu_j}. \quad (4)$$

Из комплексного спектра (4) можно выделить составляющие его амплитудный  $A_{\nu_j}$  и фазовый  $\varphi_{\nu_j}$  спектры:

$$A_{\nu_j} = \sqrt{C_{\nu_j}^2 + S_{\nu_j}^2} = \left| 2 \cdot \left( I_{0\nu_j} \alpha_{1\nu_j} \alpha_{2\nu_j} \right) \cdot \exp(-k_{0\nu_j} \kappa_{\nu_j}'' a) \right|, \quad (5)$$

$$\varphi_{\nu_j} = \text{Arctg}(S_{\nu_j} / C_{\nu_j}) = k_{0\nu_j} \cdot (\kappa_{\nu_j}' - n_{\nu_j}) \cdot a + \varphi_{0A\nu_j}, \quad (6)$$

где  $I_{0\nu_j} \equiv A_{0\nu_j}^2$ ;  $\text{Arctg}(x)$  - главное значение арктангенса в диапазоне  $-\pi/2 \leq x \leq \pi/2$ ;

$\varphi_{0A\nu_j}$  - значение фазы комплексной аппаратной функции устройства на частоте  $\nu_j$ .

Спектры  $A_{\nu_j}$  и  $\varphi_{\nu_j}$  содержат наряду с информацией о характеристиках ПП также и информацию о комплексной аппаратной функции прибора, модуль ~~натерный~~ отдел

определяется амплитудными множителями  $I_{0vj}$ ,  $\alpha_{1vj}$ ,  $\alpha_{2vj}$ , а аргумент - фазовыми слагаемыми  $\varphi_{0Avj}$ . Вклад всех этих аппаратных параметров можно исключить, выполнив измерения при двух различных расстояниях ( $a_1$  и  $a_2$ ) пробега ПП.

Располагая двумя наборами спектров  $A_{vj}$  и  $\varphi_{vj}$ , можно определить спектры  $K'_{vj}$  и  $K''_{vj}$ , используя следующие соотношения:

$$K'_{vj} = \frac{1}{k_{0vj}\Delta a} \cdot \left[ \operatorname{Arctg} \left( \frac{S_{vj}}{C_{vj}} \right)_{a_2} - \operatorname{Arctg} \left( \frac{S_{vj}}{C_{vj}} \right)_{a_1} \right] + n_{vj}, \quad (7)$$

$$K''_{vj} = \frac{1}{k_{0vj}\Delta a} \cdot \ln \sqrt{\frac{(S_{vj}^2 + C_{vj}^2)_{a_1}}{(S_{vj}^2 + C_{vj}^2)_{a_2}}}, \quad (8)$$

где  $\Delta a = a_2 - a_1$ , а индексы  $a_1$  и  $a_2$  означают значения индексируемых величин при соответствующих длинах пробега ПП.

В качестве примера применения заявляемого устройства рассмотрим возможность определения с его помощью спектра комплексного показателя преломления ПП, возбуждаемых в планарной структуре "золото - слой ZnS (1,0 мкм) - воздух" излучением в диапазоне 100-200 см<sup>-1</sup>.

На фиг.2 представлена наблюдаемая в этом случае интерферограмма, полученная с абсолютным разрешением  $\sigma_{\max}/N=0,05$  см<sup>-1</sup> для  $a=1,0$  см; где  $I_{\max}$  соответствует динамическому диапазону устройства. Для иных значений  $a$  вид интерферограммы качественно не отличается от приведенной на фиг.2.

На фиг.3 изображен спектр  $K'(\sigma)$  и на фиг.4 - спектр  $K''(\sigma)$ , рассчитанные по формулам (7) и (8) с использованием интерферограмм, зарегистрированных при  $a_1=1,0$  см и  $a_2=1,5$  см. Выбор значений  $a_1$  и  $a_2$  сделан с учетом условия  $a_1, a_2 \leq L_{\min}$  ( $L_{\min}=1,8$  см - длина распространения ПП на максимальной частоте излучения, равной 200 см<sup>-1</sup>), обеспечивающего возможность регистрации сигнала.

Размытие спектров у границ рабочего диапазона обусловлено эффектом Гиббса при математической обработке интерферограмм.

Таким образом, применение в заявляемом устройстве широкополосного источника, линии задержки, дополнительного фокусирующего объектива и устройства обработки информации, способного выполнять полное Фурье-преобразование, позволяет сократить время измерений при прочих равных условиях в  $N$  раз (где  $N$  - число точек отсчетов на измеренных спектрах).

#### Формула изобретения

Плазмонный фурье-спектрометр терагерцового диапазона, содержащий источник объемного излучения, светоделитель, расщепляющий излучение на измерительный и реперный пучки, зеркало, твердотельный проводящий образец с двумя сопряженными скругленным ребром плоскими гранями, размещенный на одной из этих граней элемент преобразования излучения измерительного пучка в поверхностный плазмон (ПП), размещенный на второй грани образца элемент преобразования ПП в объемное излучение, выполненный в виде примыкающего к грани и перемещаемого вдоль трека ПП плоского зеркала, ориентированного перпендикулярно треку и наклонно к грани, второй светоделитель, совмещающий пучки и сопряженный с наклонным зеркалом, перемещаемым вместе со вторым светоделителем вдоль поверхности образца.

фокусирующий объектив и фотоприемное устройство (ФПУ), отличающийся тем, что спектрометр дополнительно содержит второй объектив, размещенный на пути совмещенных пучков, устройство обработки информации, линию задержки, состоящую из четырех уголковых зеркал, попарно расположенных на пути пучков, причем уголковые зеркала, отражающие измерительный пучок, сопряжены с наклонным зеркалом и вторым светоделителем, а источник излучения имеет сплошной спектр.

10

15

20

25

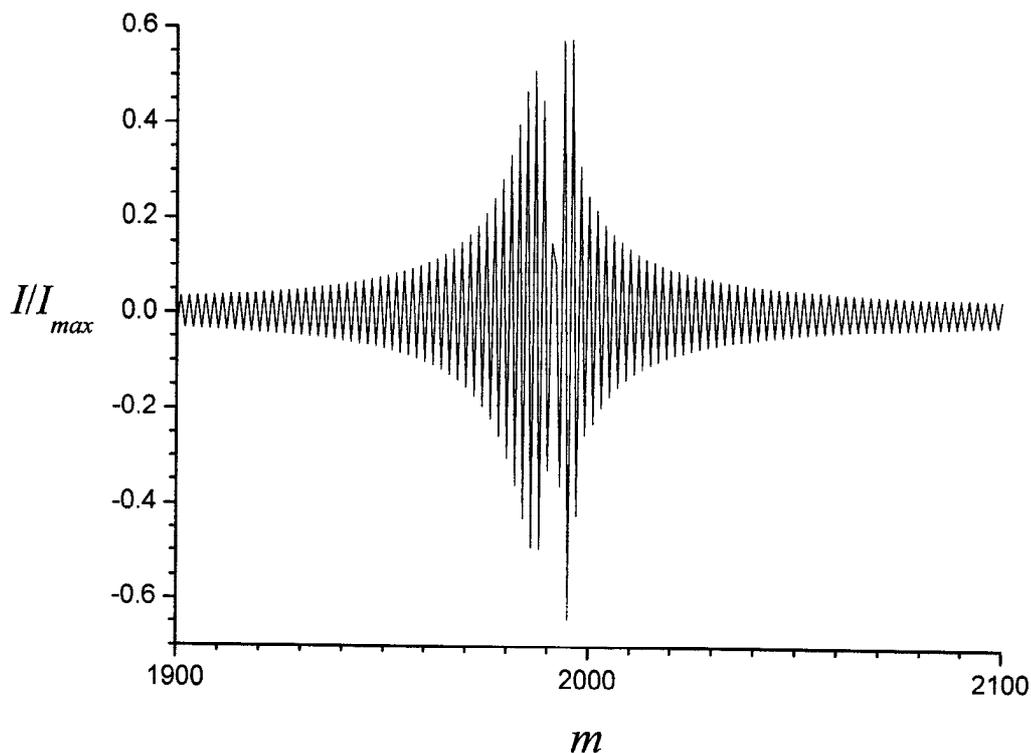
30

35

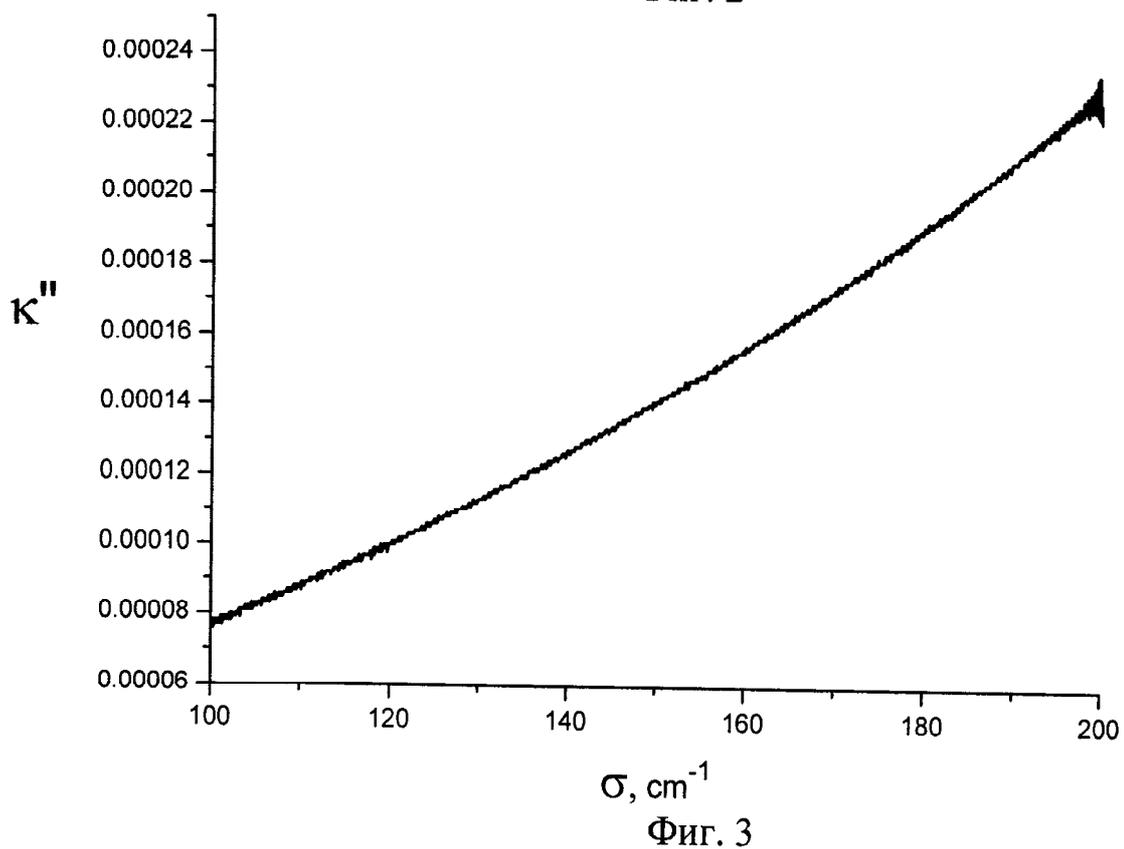
40

45

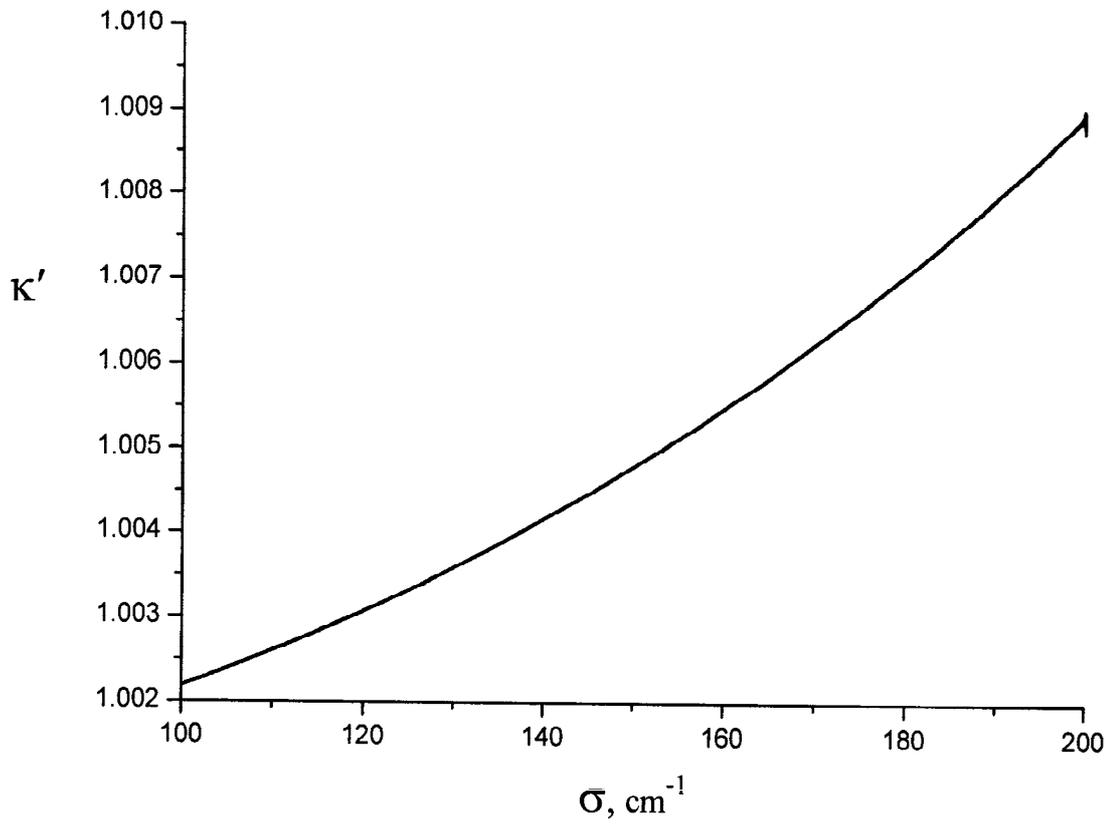
50



*m*  
Фиг. 2



$\sigma, \text{cm}^{-1}$   
Фиг. 3



Фиг. 4