



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2007126492/28, 12.07.2007

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
12.07.2007

(45) Опубликовано: 20.04.2009 Бюл. № 11

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2148814 C1, 10.05.2000. Jeon T.-I., Grischkowsky D. THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation propagation on a metal sheet // Applied Physics Letters. - 2006. - v.88. - Article №.061113. US 2006/0170925 A1, 03.08.2006. US 2005/0117618 A1, 02.06.2005. JP 2007078621 A, 29.03.2007.

Адрес для переписки:

Документ находится в Патентном отделе

**ОКБ АСТРОН**140081, Московская область, г.Лыткарино,  
ул.Парковая, д.1

## (54) СПОСОБ РАЗДЕЛЕНИЯ СОВМЕЩЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНОЙ И ОБЪЕМНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

(57) Реферат:

Способ разделения совмещенных поверхностной и объемной электромагнитных волн терагерцового диапазона, включающий предварительное формирование на поверхности образца канавки со сглаженными краями и осью, перпендикулярной плоскости падения, пересекающей трек пучка лучей поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) и имеющей размер вдоль трека меньше длины распространения ПЭВ, и последующее направление совмещенных волн на канавку, отличающийся тем, что канавку формируют в

виде половины правильного конуса, ось которого лежит в плоскости поверхности образца, при этом угол отклонения ПЭВ от плоскости падения, содержащей объемную волну, равен:

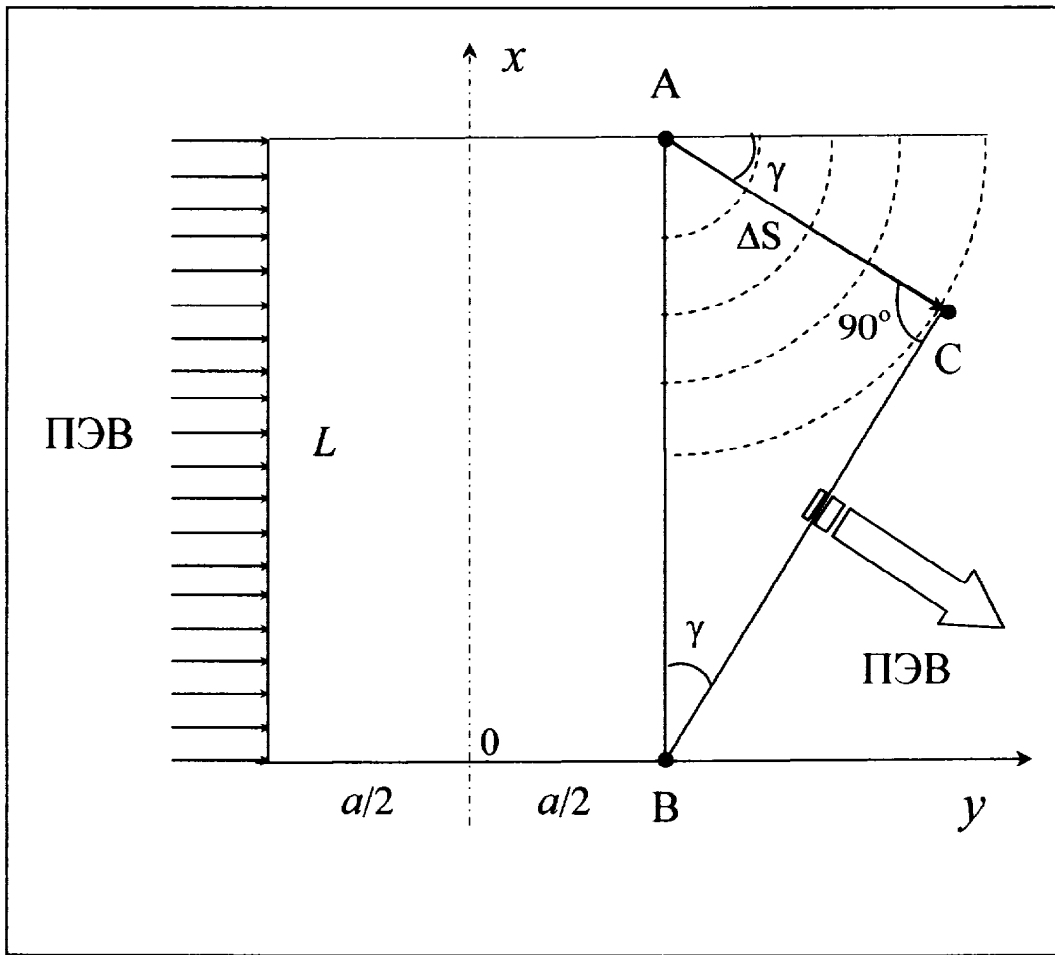
$$\gamma = \arcsin[\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (\pi - 2) \cdot k'],$$

где  $\alpha$  - угол между образующей и осью конуса,  $k'$  - действительная часть показателя преломления ПЭВ.

Технический результат - пространственное разделение ПЭВ и объемной волны путем изменения направления ПЭВ. 3 ил.

RU 2 3 5 2 9 6 9 C 1

RU 2 3 5 2 9 6 9 C 1



Фиг. 1

RU 2352969 C1

RU 2352969 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.  
*G02B 27/10* (2006.01)  
*G01N 21/43* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: **2007126492/28, 12.07.2007**

(24) Effective date for property rights:  
**12.07.2007**

(45) Date of publication: **20.04.2009 Bull. 11**

Документ находится в Патентном отделе  
**ОКБ АСТРОН**  
140081, Московская область, г.Лыткарино,  
ул.Парковая, д.1

(54) **METHOD FOR SEPARATION OF COMBINED SURFACE AND VOLUME ELECTROMAGNET WAVES OF TERAHERTZ RANGE**

(57) Abstract:

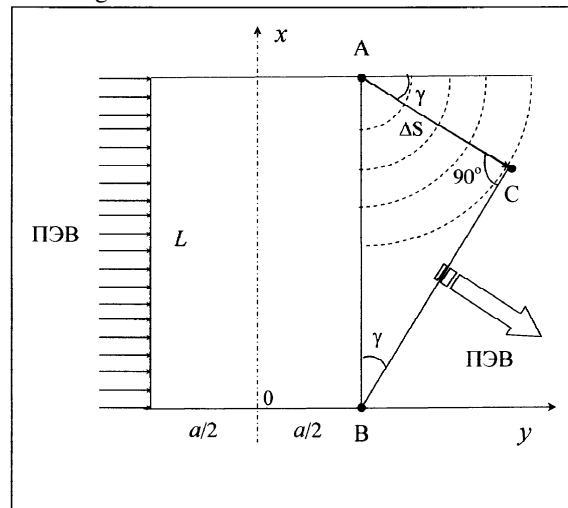
FIELD: physics.

SUBSTANCE: method for separation of combined surface and volume electromagnetic waves of terahertz range, which includes preliminary shaping of groove with smoothed edges on sample surface, at that groove axis is perpendicular to plane of incidence that crosses track of surface electromagnetic wave (SEW) rays bundle and having size along track that is less than SEW spread length, and further direction of combined waves to groove, differs by the fact that groove is shaped in the form of regular cone half, axis of which lies in the plane of sample surface, at that angle of SEW deviation from incidence plane that contains volume wave, is equal to the following:  $\gamma = \arcsin[\text{tg}(\alpha) - (\pi - 2) \cdot k']$ , where  $\alpha$  is angle between generatrix and cone axis,  $k'$  is actual part of SEW refraction index.

EFFECT: provision of spatial separation of SEW

and volume wave by means of SEW direction variation.

3 dwg



Фиг. 1

RU 2 3 5 2 9 6 9 C 1

RU 2 3 5 2 9 6 9 C 1

Изобретение относится к области передачи и получения информации посредством поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) терагерцового (ТГц) диапазона (частота от 0,1 до 10 ТГц) и может найти применение в спектроскопии поверхности твердого тела, в электронно-оптических устройствах передачи и обработки информации, в инфракрасной (ИК) технике.

С созданием перестраиваемых по частоте (в том числе и в ТГц диапазоне) лазеров на свободных электронах, а также импульсных лазеров, генерирующих фемтосекундные импульсы с шириной спектра до  $3000 \text{ см}^{-1}$ , началось интенсивное освоение ТГц области спектра [1]. Одной из важных областей использования ТГц излучения является спектроскопия поверхности твердого тела, а также - передача информации посредством ПЭВ, к классу которых относятся и поверхностные плазмоны на границе "металл-диэлектрик" [2].

В устройствах (спектрометрах, рефрактометрах, датчиках), в которых в качестве носителя информации используют ТГц ПЭВ, сложной проблемой, не нашедшей пока своего эффективного разрешения, является разделение ПЭВ и объемной волны (ОВ), порождаемой падающим излучением на элементе преобразования падающей ОВ в ПЭВ [3].

Известен способ разделения совмещенных поверхностной и объемной электромагнитных волн ТГц диапазона, состоящий в том, что элемент преобразования падающей ОВ в ПЭВ и исследуемую поверхность размещают на смежных гранях образца, разделенных скругленным (для уменьшения радиационных потерь ПЭВ) ребром [4]. Основным недостатком этого способа является наличие за ребром совмещенной с ПЭВ вторичной объемной волны, распространяющейся в плоскости падения и обусловленной дифракцией на ребре первичной объемной волны, порожденной на элементе преобразования.

Известен способ разделения совмещенных поверхностной и объемной электромагнитных волн ТГц диапазона, состоящий в том, что элемент преобразования падающей ОВ в ПЭВ и исследуемую поверхность размещают на одной грани образца, но разделяют их посредством непрозрачного экрана, расположенного перпендикулярно плоскости падения и отделенного от поверхности зазором величиной в  $(10 \div 20) \cdot \lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны падающего излучения [5]. Основным недостатком известного способа является порождение на краю экрана новой объемной волны, распространяющейся в плоскости падения и также пространственно совмещенной с ПЭВ.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому способу является способ разделения совмещенных поверхностной и объемной электромагнитных волн ТГц диапазона, состоящий в том, что на поверхности образца формируют ориентированную своей осью перпендикулярно направлению распространения пучка параллельных лучей ПЭВ и пересекающую его канавку (неоднородность) с цилиндрической поверхностью и сглаженными краями, а над канавкой, на расстоянии не меньше глубины проникновения поля ПЭВ в окружающую среду, размещают непрозрачный экран, ориентированный вдоль оси канавки [6]. Основным недостатком известного способа является порождение на краю экрана (в результате дифракции) новой объемной волны, распространяющейся, как и ПЭВ, в плоскости падения.

Техническим результатом изобретения является полное пространственное разделение ПЭВ и объемной волны (возникшей либо в результате дифракции на элементе преобразования падающего излучения в ПЭВ, либо в результате дифракции

ПЭВ на краю экрана, отделяющего элемент преобразования ОВ в ПЭВ и фотоприемник) путем изменения направления ПЭВ.

Технический результат достигается тем, что в способе разделения совмещенных поверхностной и объемной электромагнитных волн терагерцового диапазона, включающем предварительное формирование на поверхности образца канавки со сглаженными краями и осью, перпендикулярной плоскости падения, пересекающей трек пучка лучей поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) и имеющей размер вдоль трека меньше длины распространения ПЭВ, и последующее направление совмещенных волн на канавку, канавку формируют в виде половины правильного конуса, ось которого лежит в плоскости поверхности образца, при этом угол отклонения ПЭВ от плоскости падения, содержащей объемную волну, равен:

$$\gamma = \arcsin[\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (\pi - 2) \cdot \kappa'],$$

где  $\alpha$  - угол между образующей и осью конуса,  $\kappa'$  - действительная часть показателя преломления ПЭВ.

Способ поясняется с помощью трех чертежей. На фиг.1 изображена общая схема неоднородности поверхности образца, обеспечивающей поворот волнового фронта ПЭВ на угол  $\gamma$ , на фиг.2 - схема канавки конической формы в поверхности образца, обеспечивающей поворот ПЭВ на угол  $\gamma$ , на фиг.3 - расчетная зависимость угла  $\gamma$  от угла  $\alpha$  между образующей и осью конуса для ПЭВ с  $\lambda = 100$  мкм на поверхности алюминия, граничащей с воздухом.

Эффект разделения совмещенных ПЭВ и ОВ достигается за счет поворота волнового фронта ПЭВ на угол  $\gamma$  в результате преодоления различными лучами пучка ПЭВ созданной неоднородности в различных ее участках.

Приведем обоснование этого утверждения. Пусть ПЭВ, характеризуемая некоторым показателем преломления  $\kappa$ , распространяется по плоской поверхности образца в виде пучка параллельных лучей шириной  $L$ , а перпендикулярно направлению распространения ПЭВ на поверхности создана неоднородность в виде "черного" прямоугольника со сторонами  $L$  и  $a$ , обеспечивающая линейную зависимость оптического пути лучей ПЭВ от координаты луча на оси  $x$ , перпендикулярной направлению ПЭВ (фиг.1).

Пусть оптический путь лучей ПЭВ  $\Delta l$ , при прохождении ими неоднородности, определяется линейным выражением:  $\Delta l = [(L-x)/L] \cdot a \cdot \kappa'$ , где  $\kappa'$  - действительная часть комплексного показателя преломления ПЭВ  $\kappa$ .

Тогда разность оптических путей крайних лучей ПЭВ  $\Delta S = \Delta l(0) - \Delta l(L) = a \cdot \kappa'$ . Следовательно, верхний (по фиг.1) луч ПЭВ достигнет края неоднородности в точке А раньше, чем нижний луч - в точке В на интервал времени  $\Delta t = \Delta S / \vartheta = \Delta S / (C/\kappa') = a \cdot (\kappa')^2 / C$ , где  $\vartheta$  - фазовая скорость ПЭВ,  $C$  - скорость света в вакууме.

Тогда, согласно принципу Гюйгенса - основы волновой теории света, точка А, становится источником вторичных волн с круговым фронтом на время  $\Delta t$  раньше, чем точка В. Но за время  $\Delta t$  вторичные волны, излучаемые точкой А, пройдут расстояние  $AC = \vartheta \cdot \Delta t = (C/\kappa') \cdot [a \cdot (\kappa')^2 / C] = a \cdot \kappa'$ .

И, наконец, из прямоугольного треугольника АВС имеем:  $\sin(\gamma) = AC/L = a \cdot \kappa' / L$ . Откуда, угол отклонения ПЭВ от направления распространения ОВ равен:  $\gamma = \arcsin(a \cdot \kappa' / L)$ .

Отметим, что величина угла  $\gamma$  зависит от отношения  $a/L$  (размеров неоднородности вдоль и поперек направления распространения совмещенных волн). Поэтому, с точки зрения применимости, заявляемый способ ограничен тем условием, что длина распространения ПЭВ должна превышать продольный (относительно направления

распространения волн) размер  $a$  неоднородности, иначе ПЭВ просто не дойдет до второго (по ходу излучения) края неоднородности, и проблема разделения волн утратит свою актуальность ввиду исчезновения одного из разделяемых объектов. Это условие легко выполняется для поверхностных плазмонов в ТГц области спектра,

поскольку их длина распространения достигает десятков и сотен сантиметров [3-6]. Докажем, что канавка 3, выполненная в виде половины правильного конуса, ось которого лежит в плоскости поверхности образца, обеспечивает линейную зависимость оптического пути лучей ПЭВ от координаты луча на оси,

перпендикулярной направлению распространения совмещенных волн (т.е. что такая канавка является, фактически, геодезической призмой [7]), и поэтому может выполнять предписанную ей формулой изобретения функцию.

Пусть ПЭВ с показателем преломления  $k$  распространяется по плоской поверхности образца в виде пучка параллельных лучей шириной  $L$ , а перпендикулярно направлению распространения ПЭВ сформирована канавка конической формы, ось которой лежит в плоскости поверхности образца (фиг.2).

Рассчитаем разность геометрических путей  $\Delta S_0$  крайних лучей пучка ПЭВ, падающего на конусную канавку. Введем следующие обозначения:  $R_0$  - радиус "основания" конуса,  $R$  - текущий радиус поверхности канавки,  $L$  - высота конуса (равная ширине пучка ПЭВ),  $x$  - координатная ось, направленная вдоль оси правильного конуса. Выделим на поверхности образца прямоугольник со сторонами  $2R_0$  и  $L$ , охватывающий канавку.

Тогда зависимость величины геометрического пути произвольного луча ПЭВ от координаты  $x$  имеет вид:  $S_0(x) = 2 \cdot (R_0 - R) + \pi \cdot R$ . Но  $R(x) = R_0 - (R_0/L) \cdot (L - x)$ . Поэтому:  $S_0(x) = R_0 \cdot [(x/L) \cdot (2 - \pi) + \pi]$ . Из полученного выражения видно, что величина  $S$  зависит от координаты  $x$  линейным образом.

Далее, геометрическая разность хода крайних лучей ПЭВ (с координатами  $x=0$  и  $x=L$ ) равна:  $\Delta S_0 = S_0(0) - S_0(L) = R_0 \cdot (\pi - 2)$ , а оптическая разность хода этих лучей  $\Delta S = \Delta S_0 \cdot k' = R_0 \cdot (\pi - 2) \cdot k'$  соответственно. Причем время  $\Delta t$ , за которое нижний (на фиг.2) луч ПЭВ пройдет расстояние  $\Delta S$ , равно:  $\Delta t = \Delta S / \vartheta = [R_0 \cdot (\pi - 2) \cdot k'] / (C/k')$ , где  $\vartheta$  - фазовая скорость ПЭВ,  $C$  - скорость света в вакууме.

Тогда, согласно принципу Гюйгенса, точка А, до которой верхний луч ПЭВ дошел на время  $\Delta t$  раньше, чем нижний луч до точки В, становится источником вторичных волн с круговым фронтом. За время  $\Delta t$  эти вторичные волны пройдут расстояние  $AC = \vartheta \cdot \Delta t = (C/k') \cdot \{ [R_0 \cdot (\pi - 2) \cdot k'] / (C/k') \} = R_0 \cdot (\pi - 2) \cdot k'$ .

И, наконец, для прямоугольного треугольника АВС имеем:  $\sin(\gamma) = AC/L = [R_0 \cdot (\pi - 2) \cdot k'] / L = \text{tg}(\alpha) \cdot (\pi - 2) \cdot k'$ . Таким образом, формула для расчета угла отклонения ПЭВ конической канавкой от исходного направления распространения имеет вид:  $\gamma = \arcsin [\text{tg}(\alpha) \cdot (\pi - 2) \cdot k']$ .

Отметим, что если ось конуса не лежит в плоскости поверхности образца, то зависимость  $S(x)$  не является линейной, и это приводит к различию направлений лучей пучка ПЭВ, прошедшего канавку. В результате волновой фронт пучка ПЭВ искажается, что является неприемлемым в условиях поставленной задачи. Этим фактом объясняется необходимость условия принадлежности оси конуса плоскости поверхности образца.

Условие же нахождения "вершины" конуса на поверхности образца не является обязательным. Действительно, в случае нахождения "вершины" за пределами

поверхности (но на ее плоскости) формула для угла  $\gamma$  принимает вид:

$$\gamma = \arcsin \left[ \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\pi - 2)}{L} \cdot \kappa' \right],$$

где  $R_1$  и  $R_2$  - радиусы поперечного сечения конуса на боковых (относительно трека ПЭВ) гранях образца;  $L$  - ширина пучка лучей ПЭВ, равная ширине поверхности образца. Выразив  $R_1$  и  $R_2$  через угол  $\alpha$  при "вершине" конуса, мы вновь получим выражение:  $\gamma = \arcsin[\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (\pi - 2) \cdot \kappa']$ .

Способ осуществляется следующим образом. Пучок лучей монохроматического излучения с ненулевой р-составляющей падает на элемент преобразования и с некоторой эффективностью преобразуется в ТГц ПЭВ, при этом одновременно, в результате дифракции излучения на элементе преобразования, порождается приповерхностная объемная волна (ОВ). Совмещенные в пространстве и имеющие практически одинаковые фазовые скорости пучки лучей ПЭВ и ОВ достигают канавки и здесь их траектории в плоскости падения расходятся: лучи ОВ продолжают распространяться прямолинейно, в то время как лучи ПЭВ устремляются по поверхности канавки, проходя полукруговую траекторию, длина которой прямо пропорциональна расстоянию от "вершины" конуса. В результате, соответствующие лучи пучков ПЭВ и ОВ достигают второго скругленного ребра канавки неодновременно: ОВ - раньше, ПЭВ - позже. Причем, запаздывание для более близких к "основанию" конуса лучей ПЭВ будет большим, чем для лучей более близких к "вершине" конуса. Различие запаздывания лучей в пучке ПЭВ, в силу принципа Гюйгенса, и приводит к повороту волнового вектора ПЭВ на угол  $\gamma$ .

В качестве примера применения заявляемого способа рассчитаем величину угла  $\gamma$  для ПЭВ, возбужденных излучением с  $\lambda = 100$  мкм на поверхности алюминия, граничащей с воздухом, после прохождения ПЭВ конической канавки с углом  $\alpha$  при "вершине" конуса ее поверхности. В этом случае значение длины распространения ПЭВ, полученное с использованием модели Друде для диэлектрической проницаемости алюминия, равно 685 см (что с большим запасом удовлетворяет наложенное выше условие на соотношение длины распространения ПЭВ и радиуса "основания" конической поверхности, который не может быть больше толщины подложки и обычно меньше 10 см).

На фиг.3 приведена расчетная зависимость  $\gamma(\alpha)$ . Из графика видно, что для отклонения ПЭВ от плоскости падения, например, на  $30^\circ$  необходимо на поверхности образца изготовить конусную канавку с углом  $\alpha \approx 24^\circ 40'$ .

Таким образом, заявляемый способ позволяет осуществить полное пространственное разделение совмещенных поверхностной и объемной электромагнитных волн терагерцового диапазона за счет изменения направления распространения ПЭВ относительно объемной волны.

#### Источники информации

1. Siegel P.H. Terahertz technology // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. - 2002. - v.50. - No.3. - p.910-955.
2. Csurgay A.I., Porod W. Surface plasmon waves in nanoelectronic circuits // Intern. J. of Circuit Theory and Applications. - 2004. - v.32. - p.339-361.
3. Klopfleisch M., Schellenberger U. Experimental determination of the attenuation coefficient of surface electromagnetic waves // Journal of Applied Physics. - 1991. - V.70. - No.2. - p.930-934.
4. Koteles E.S., McNeill W.H. Far infrared surface plasmon propagation // International Journal on Infrared and Millimeter Waves. - 1981. - V.2. - No.2. - p.361-371.

5. Silin V.I., Voronov S.A., Yakovlev V.A., Zhizhin G.N. IR surface plasmon (polariton) phase spectroscopy // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. - 1989. - v.10. - No.1. - p.101-120.

6. Jeon T.-I., Grischkowsky D. THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation on a metal sheet // Applied Physics Letters. - 2006. - v.88. - Article No.061113 (прототип).

7. Ханспенджер Р. Интегральная оптика. Теория и технология // М.: Мир, 1985. - с.321.

#### Формула изобретения

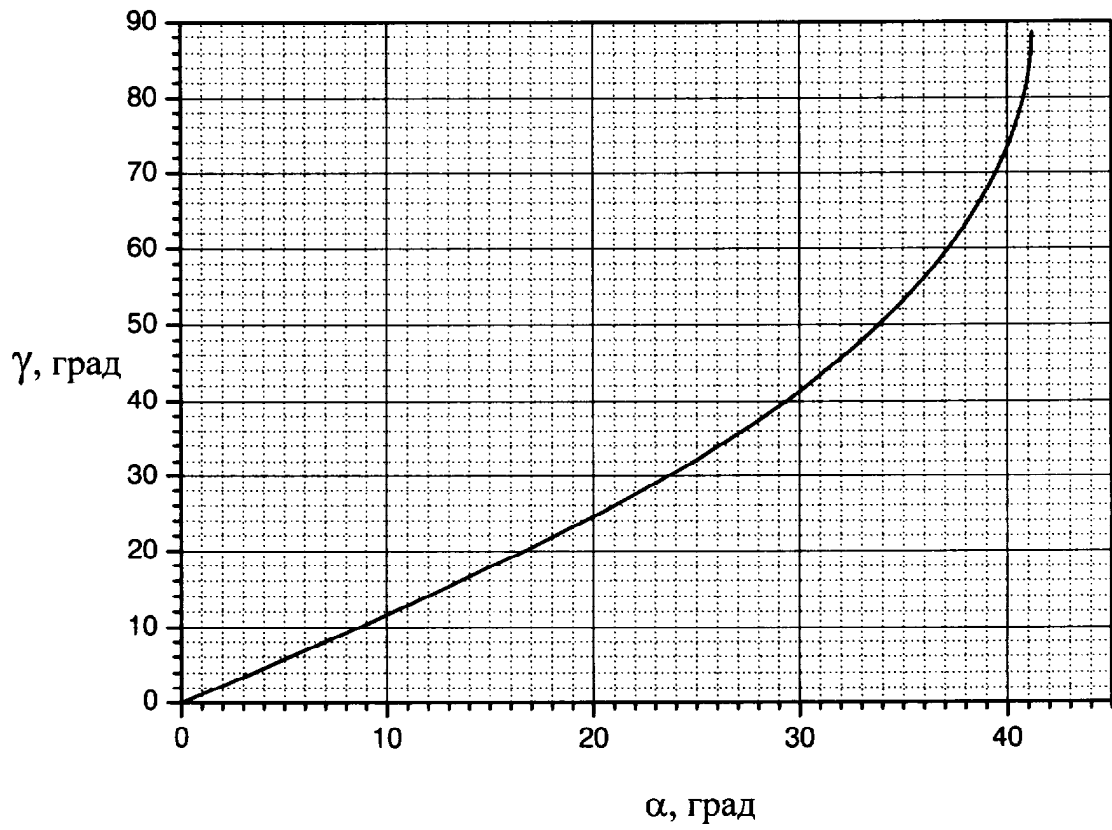
Способ разделения овмещенных поверхностной и объемной электромагнитных волн терагерцового диапазона, включающий предварительное формирование на поверхности образца канавки со сглаженными краями и осью, перпендикулярной плоскости падения, пересекающей трек пучка лучей поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) и имеющей размер вдоль трека меньше длины распространения ПЭВ, и последующее направление совмещенных волн на канавку, отличающийся тем, что канавку формируют в виде половины правильного конуса, ось которого лежит в плоскости поверхности образца, при этом угол отклонения ПЭВ от плоскости падения, содержащей объемную волну, равен

$$\gamma = \arcsin[\operatorname{tg}(\alpha) \cdot (\pi - 2) \cdot k'],$$

где  $\alpha$  - угол между образующей и осью конуса,  $k'$  - действительная часть показателя преломления ПЭВ.







Фиг. 3