



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015110507/28, 24.03.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.03.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.03.2015

(45) Опубликовано: 10.05.2016 Бюл. № 13

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2302623 C2, 10.07.2007. KR 20030049473 A, 25.06.2003. JP 63103927 A, 09.05.1988. US 2007/0229826 A1, 04.10.2007. US 5956147 A, 21.09.1999. US 2007/0146706 A1, 28.06.2007. US 5757494 A, 26.05.1998. WO 2009/146476 A1, 10.12.2009. US 2005/0105088 A1, 19.05.2005.

Адрес для переписки:

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр.
38, ИФ СО РАН, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Косырев Николай Николаевич (RU),
Заблуда Владимир Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения Российской академии
наук (RU)

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАТРИЦЫ МЮЛЛЕРА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области оптических измерений и может быть использовано для полного определения состояния поляризации света, отраженного от поверхности исследуемого образца. Для определения матрицы Мюллера, исследуемый образец освещают поляризованным световым пучком и измеряют изменение поляризации при отражении, используя разделение отраженного луча на р- и s-компоненты с разложением по амплитуде и фазе, получая на выходе четыре световых пучка с интенсивностями $I_{\psi 1}$, $I_{\psi 2}$, $I_{\Delta 1}$, $I_{\Delta 2}$, при этом азимутальные углы оптических элементов принимают фиксированные значения в определенных комбинациях, поляризатор фиксируют в положениях $P=0^\circ$, -45° , $+45^\circ$, анализатор в амплитудном канале $A_{\psi}=0^\circ$, 45° , фазовом канале $A_{\Delta}=45^\circ$, ромб Френеля $R=0$ и

проводят измерения, соответствующие следующим конфигурациям: А: $P45SR0W_{\psi}45W_{\Delta}45$; В: $P45SR0W_{\psi}0W_{\Delta}45$; F: $P0SR0W_{\psi}45W_{\Delta}45$; E: $P0SR0W_{\psi}0W_{\Delta}45$. Изменяют состояние поляризации падающего на образец света с линейной на круговую, устанавливая в оптический тракт перед образцом фазовую пластинку в положении $D=0^\circ$ и проводят измерения, соответствующие конфигурациям: С: $P-45D0SR0W_{\psi}0W_{\Delta}45$; D: $P-45D0SR0W_{\psi}45W_{\Delta}45$, а компоненты матрицы Мюллера S_{ij} определяют, решая систему линейных уравнений. Изобретение обеспечивает возможность полного определения состояния поляризации света, отраженного от поверхности исследуемого образца, для нахождения всех компонент матрицы Мюллера. 1 ил.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
G01N 21/21 (2006.01)
G01J 4/04 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2015110507/28, 24.03.2015**(24) Effective date for property rights:
24.03.2015

Priority:

(22) Date of filing: **24.03.2015**(45) Date of publication: **10.05.2016** Bull. № 13

Mail address:

**660036, g. Krasnojarsk, Akademgorodok, 50, str. 38,
IF SO RAN, patentnyj otdel**

(72) Inventor(s):

**Kosyrev Nikolaj Nikolaevich (RU),
Zabluda Vladimir Nikolaevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**FEDERALNOE GOSUDARSTVENNOE
BJUDZHETNOE UCHREZHDENIE NAUKI
INSTITUT FIZIKI im. L.V. Kirenskogo
Sibirskogo otdelenija Rossijskoj akademii nauk
(RU)**(54) **METHOD OF DETERMINING MULLER MATRIX**

(57) Abstract:

FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: invention relates to optical measurements and can be used for complete polarisation state determination of light reflected from surface of analysed sample. To determine Muller matrix, analysed sample is illuminated with polarised light beam and measuring change in polarization using separation of reflected beam on p- and s-component with decomposition of amplitude and phase to obtain at outlet of four light beams with intensities $I_{\psi 1}$, $I_{\psi 2}$, $I_{\Delta 1}$, $I_{\Delta 2}$, wherein azimuth angles of optical elements receiving fixed values in certain combinations, polariser is fixed in positions $P = 0^\circ, -45^\circ, +45^\circ$, analyzer in amplitude channel $A_{\psi} = 0^\circ, 45^\circ$, phase channel $A_{\Delta} = 45^\circ$, Fresnel rhombus $R = 0$ and measurements corresponding to

following configurations: A: $P45SR0W_{\psi}45W_{\Delta}45$; B: $P45SR0W_{\psi}0W_{\Delta}45$; F: $P0SR0W_{\psi}45W_{\Delta}45$; E: $P0SR0W_{\psi}0W_{\Delta}45$. Change state of polarisation of incident light on specimen with linear on circular, each optical channel before sample retarder in position $D = 0^\circ$ and measurements corresponding configurations C: $P-45D0SR0W_{\psi}0W_{\Delta}45$; D: $P-45D0SR0W_{\psi}45W_{\Delta}45$, while components of Muller matrix S_{ij} is determined by solving system of linear equations.

EFFECT: invention enables complete determining polarisation state of light reflected from surface of analysed sample, for location of all components of Muller matrix.

1 cl, 1 dwg

Изобретение относится к области оптических измерений и может быть использовано для полного определения состояния поляризации света, отраженного от поверхности исследуемого образца. Способ допускает использование стандартных приборов, измеряющих состояние поляризации, серийно выпускаемых эллипсометров, построенных на базе четырехканальной фотометрической схемы. Для реализации изобретения необходимо внести незначительные изменения в оптический тракт прибора. Более того, возможность приведения оптической схемы к первоначальному виду является неотъемлемой частью заявляемого способа, что позволяет использовать эллипсометр в штатном режиме для измерения эллипсометрических углов Ψ и Δ в любой момент физического эксперимента.

Известен Стокс-эллипсометр [KR 20030049473 (A), МПК G01J 4/00, опубл. 25.06.2003], состоящий из монохроматического источника света, коллиматоров, поляризационного генератора, анализирующего блока на основе ПЗС-матриц и позволяющий измерять компоненты матрицы Мюллера исследуемого образца.

Недостатками данного прибора являются невысокая разрешающая способность по спектру, а также сложность юстировки в случае использования в режиме *in situ*, например в качестве диагностического инструмента на высоковакуумной камере.

В изобретении [US 5757494 A, МПК G01 21/21, опубл. 26.05.1998] также существует возможность измерять матрицу Мюллера, однако присутствие вращающихся элементов существенно увеличивает время измерения, что является серьезным недостатком при исследовании динамических процессов.

Известен способ измерения состояния поляризации эллипсометром [п.м. РФ №16314, МПК G01N 21/21, опубл. 20.12.2000], сконструированным по фотометрической схеме, заключающийся в расщеплении отраженного от поверхности исследуемого образца светового пучка на две составляющие, которые измеряют соответственно амплитудные и фазовые изменения света при отражении для р- и s-поляризаций.

Недостатки этого способа заключаются в невысокой точности измерений и узком спектральном диапазоне проведения измерений, а также в невозможности измерить полное состояние поляризации (вектор Стокса) света, отраженного от исследуемого образца.

Наиболее близким техническим решением к заявляемому является способ измерения состояния поляризации эллипсометром [патент РФ №2302623, МПК: 6 G01N 21/21, опубл. 10.07.2007 (прототип)], заключающийся в том, что в конструкции также используется фотометрическая четырехканальная схема, позволяющая минимизировать количество оптических конфигураций для измерения матрицы Мюллера, что ускорит время одного эксперимента.

Технический результат заключается в возможности полного определения состояния поляризации света, отраженного от поверхности исследуемого образца (вектора Стокса) для нахождения всех компонент матрицы Мюллера.

Технический результат достигается тем, что в способе определения матрицы Мюллера, заключающемся в том, что исследуемый образец освещают поляризованным световым пучком и измеряют изменение поляризации при отражении, используя разделение отраженного луча на р- и s-компоненты с разложением по амплитуде и фазе, получая на выходе четыре световых пучка с интенсивностями $I_{\Psi 1}$, $I_{\Psi 2}$, $I_{\Delta 1}$, $I_{\Delta 2}$, при этом азимутальные углы оптических элементов принимают фиксированные значения в определенных комбинациях, поляризатор фиксируют в положениях $P=0^\circ$, -45° , $+45^\circ$, анализатор в амплитудном канале $A_{\Psi}=0^\circ$, 45° , фазовом канале $A_{\Delta}=45^\circ$, ромб Френеля $R=0$ и проводят измерения, соответствующие следующим конфигурациям:

A: P45SR0W Ψ 45W Δ 45

B: P45SR0W Ψ 0W Δ 45

F: P0SR0W Ψ 45W Δ 45

5 E: P0SR0W Ψ 0W Δ 45,

новым является то, что изменяют состояние поляризации падающего на образец света с линейной на круговую, устанавливая в оптический тракт перед образцом фазовую пластинку в положении $D=0^\circ$, и проводят измерения, соответствующие конфигурациям:

C: P-45D0SR0W Ψ 0W Δ 45

10 D: P-45D0SR0W Ψ 45W Δ 45,

а компоненты матрицы Мюллера S_{ij} определяют, решая следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned}
 15 \quad I_{\Psi 1}^A &= S_{11} + S_{13} + S_{31} + S_{33} & I_{\Delta 1}^B &= S_{11} + S_{13} + S_{41} + S_{43} \\
 I_{\Psi 2}^A &= S_{11} + S_{13} - S_{31} - S_{33} & I_{\Delta 2}^B &= S_{11} + S_{13} - S_{41} - S_{43} \\
 I_{\Psi 1}^B &= S_{11} + S_{13} + S_{21} + S_{23} & I_{\Psi 1}^E &= S_{11} + S_{12} + S_{21} + S_{22} \\
 20 \quad I_{\Psi 2}^B &= S_{11} + S_{13} - S_{21} - S_{23} & I_{\Psi 2}^E &= S_{11} + S_{12} - S_{21} - S_{22} \\
 I_{\Psi 1}^C &= S_{11} + S_{14} + S_{21} + S_{24} & I_{\Delta 1}^E &= S_{11} + S_{12} + S_{41} + S_{42} \\
 I_{\Psi 2}^C &= S_{11} + S_{14} - S_{21} - S_{24} & I_{\Delta 2}^E &= S_{11} + S_{12} - S_{41} - S_{42} \\
 25 \quad I_{\Delta 2}^C &= S_{11} + S_{14} - S_{41} - S_{44} & I_{\Psi 1}^F &= S_{11} + S_{12} + S_{31} + S_{32} \\
 I_{\Psi 2}^D &= S_{11} + S_{14} - S_{31} - S_{34} & I_{\Psi 2}^F &= S_{11} + S_{12} - S_{31} - S_{32}
 \end{aligned}$$

где $I_{\Psi 1,2}^{A,B,C,D,E,F}$ - интенсивности p- и s-компонент в амплитудном измерительном канале

30 Ψ плеча анализатора, $I_{\Delta 1,2}^{A,B,C,D,E,F}$ - в фазовом измерительном канале Δ для различных конфигураций оптических элементов.

Отличия заявляемого способа от наиболее близкого аналога заключаются в том, что во время проведения измерений в оптический тракт устанавливают фазовую
35 пластинку, а также в используемом математическом аппарате при вычислении значений компонент матрицы Мюллера. Эти отличия позволяют сделать вывод о соответствии заявляемого технического решения критерию «новизна». Признаки, отличающие заявляемое техническое решение от прототипа, не выявлены в других технических решениях при изучении данной и смежной областей техники и, следовательно,
40 обеспечивают заявляемому решению соответствие критерию «изобретательский уровень».

На фиг. 1 представлена схема стокс-эллипсометра.

Устройство для измерения матрицы Мюллера (см. фиг. 1) состоит из источника света 1 (HeNe лазер), поляризатора 2, составляющих плечо поляризатора, модуля изменения
45 фазы 3, представляющего собой фазовую пластинку в четверть волны с возможностью выведения из оптического тракта, исследуемого образца 4. Плечо анализатора Стокс-эллипсометра состоит из ромба Френеля 5, призмы Волластона 6, 7, двухплощадных фотоприемников 8, 9.

Измерение матрицы Мюллера происходит следующим образом.

Световой поток 10, испускаемый осветителем 1, линейно поляризуется поляризатором 2, проходит через модуль изменения фазы 3, и для конфигураций С, D меняет состояние поляризации с линейной на круговую, для конфигураций А, В, Е, F состояние поляризации остается без изменений, затем падает на поверхность исследуемого образца 4.

5 Падающий, линейно поляризованный (или поляризованный по кругу) световой пучок отражается от поверхности образца с изменением состояния поляризации и становится, в общем случае, эллиптически поляризованным и в таком состоянии поступает в плечо анализатора, а именно на ромб Френеля 5, который одновременно играет роль пространственного расщепителя светового пучка и фазовой пластинки, расщепляющий
10 отраженный исследуемым образцом световой пучок на две световые компоненты, одна из которых попадает в амплитудный измерительный канал, где призма Волластона 6 разделяет входной световой пучок на р- и s-компоненты, интенсивности которых затем регистрируются двухплощадным фотоприемником 9. Другая часть светового пучка, претерпев фазовый сдвиг, попадает в фазовый измерительный канал Δ, где, проходя
15 также через призму Волластона 7, также регистрируется фотоприемниками 8.

В итоге имеем четыре значения интенсивности $I_{\Psi 1}, I_{\Psi 2}, I_{\Delta 1}, I_{\Delta 2}$, из которых вычисляют значения компонент матрицы Мюллера. При проведении таких измерений оптические поляризационные элементы принимают следующие фиксированные азимутальные положения:

- 20 А: P45SR0W Ψ 45W Δ 45
 В: P45SR0W Ψ 0W Δ 45
 С: P-45D0SR0W Ψ 0W Δ 45
 D: P-45D0SR0W Ψ 45W Δ 45
 25 Е: P0SR0W Ψ 0W Δ 45
 F: P0SR0W Ψ 45W Δ 45,

где введены следующие обозначения: P - поляризатор, D - перестраиваемая фазовая пластинка, S - исследуемый образец, R - ромб Френеля, W Ψ и W Δ - призмы Волластона
30 в амплитудном и фазовом измерительных каналах соответственно.

Для того чтобы получить значение компонент матрицы Мюллера исследуемого образца, необходимо провести имитационное моделирование заявляемого Стокс-эллипсометра. Для этого записывают матрицы Мюллера оптических элементов прибора для всех приведенных конфигураций (А-F). Такие матрицы подробно описаны в монографии [У. Шерклифф. Поляризованный свет // Пер. с англ. М.: Мир, 1965].
35 Рассмотрим, например, конфигурацию С и составим последовательность матриц Мюллера для фазового измерительного канала и s-компоненты:

$$40 \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

VI V IV III II I

Здесь:

- 45 I. Вектор Стокса падающего неполяризованного света единичной интенсивности;
 II. Матрица Мюллера для линейного поляризатора с азимутом -45°;
 III. Матрица Мюллера для фазовой пластинки с азимутом 0°;
 IV. Матрица Мюллера исследуемого образца (неизвестна);
 V. Матрица Мюллера для ромба Френеля с азимутом 0°;

VI. Матрица для s-компоненты призмы Волластона с азимутом 45° ;

Произведя последовательное (справа налево) умножение матриц, получим значение интенсивности для конфигурации С на данном канале

$$5 \quad I_{\Delta 2}^C = S_{11} + S_{14} - S_{41} - S_{44}$$

Аналогично получаем оставшиеся пятнадцать уравнений, составляющих систему:

$$\begin{aligned} I_{\psi 1}^A &= S_{11} + S_{13} + S_{31} + S_{33} & I_{\Delta 1}^B &= S_{11} + S_{13} + S_{41} + S_{43} \\ I_{\psi 2}^A &= S_{11} + S_{13} - S_{31} - S_{33} & I_{\Delta 2}^B &= S_{11} + S_{13} - S_{41} - S_{43} \\ I_{\psi 1}^B &= S_{11} + S_{13} + S_{21} + S_{23} & I_{\psi 1}^E &= S_{11} + S_{12} + S_{21} + S_{22} \\ I_{\psi 2}^B &= S_{11} + S_{13} - S_{21} - S_{23} & I_{\psi 2}^E &= S_{11} + S_{12} - S_{21} - S_{22} \\ I_{\psi 1}^C &= S_{11} + S_{14} + S_{21} + S_{24} & I_{\Delta 1}^E &= S_{11} + S_{12} + S_{41} + S_{42} \\ I_{\psi 2}^C &= S_{11} + S_{14} - S_{21} - S_{24} & I_{\Delta 2}^E &= S_{11} + S_{12} - S_{41} - S_{42} \\ I_{\Delta 2}^C &= S_{11} + S_{14} - S_{41} - S_{44} & I_{\psi 1}^F &= S_{11} + S_{12} + S_{31} + S_{32} \\ I_{\psi 2}^D &= S_{11} + S_{14} - S_{31} - S_{34} & I_{\psi 2}^F &= S_{11} + S_{12} - S_{31} - S_{32} \end{aligned}$$

решая которую, получаем компоненты матрицы Мюллера.

Преимущество заявляемого способа определения матрицы Мюллера заключается прежде всего в расширении возможностей стандартного эллипсометра для исследования образцов с оптической анизотропией. Данная оптическая схема упрощает процесс юстировки и тем самым позволяет установить прибор на сверхвысоковакуумную камеру для in situ измерений.

Формула изобретения

Способ определения матрицы Мюллера, заключающийся в том, что исследуемый образец освещают поляризованным световым пучком и измеряют изменение поляризации при отражении, используя разделение отраженного луча на р- и s-компоненты с разложением по амплитуде и фазе, получая на выходе четыре световых пучка с интенсивностями $I_{\psi 1}$, $I_{\psi 2}$, $I_{\Delta 1}$, $I_{\Delta 2}$, при этом азимутальные углы оптических элементов принимают фиксированные значения в определенных комбинациях, поляризатор фиксируют в положениях $P=0^\circ$, -45° , $+45^\circ$, анализатор в амплитудном канале $A_{\psi}=0^\circ$, 45° , фазовом канале $A_{\Delta}=45^\circ$, ромб Френеля $R=0$ и проводят измерения, соответствующие следующим конфигурациям:

А: P45SR0W $_{\psi}$ 45W $_{\Delta}$ 45

40 В: P45SR0W $_{\psi}$ 0W $_{\Delta}$ 45

Ф: P0SR0W $_{\psi}$ 45W $_{\Delta}$ 45

Е: P0SR0W $_{\psi}$ 0W $_{\Delta}$ 45,

где S - исследуемый образец, W $_{\psi}$ и W $_{\Delta}$ - призмы Волластона в амплитудном и фазовом измерительных каналах соответственно,

отличающийся тем, что изменяют состояние поляризации падающего на образец света с линейной на круговую, устанавливая в оптический тракт перед образцом фазовую пластинку в положении $D=0^\circ$ и проводят измерения, соответствующие конфигурациям:

C: P-45D0SR0W ψ 0W Δ 45

D: P-45D0SR0W ψ 45W Δ 45, а компоненты матрицы Мюллера S_{ij} определяют, решая следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned}
 5 \quad I_{\psi 1}^A &= S_{11} + S_{13} + S_{31} + S_{33} & I_{\Delta 1}^B &= S_{11} + S_{13} + S_{41} + S_{43} \\
 I_{\psi 2}^A &= S_{11} + S_{13} - S_{31} - S_{33} & I_{\Delta 2}^B &= S_{11} + S_{13} - S_{41} - S_{43} \\
 I_{\psi 1}^B &= S_{11} + S_{13} + S_{21} + S_{23} & I_{\psi 1}^E &= S_{11} + S_{12} + S_{21} + S_{22} \\
 10 \quad I_{\psi 2}^B &= S_{11} + S_{13} - S_{21} - S_{23} & I_{\psi 2}^E &= S_{11} + S_{12} - S_{21} - S_{22} \\
 I_{\psi 1}^C &= S_{11} + S_{14} + S_{21} + S_{24} & I_{\Delta 1}^E &= S_{11} + S_{12} + S_{41} + S_{42} \\
 I_{\psi 2}^C &= S_{11} + S_{14} - S_{21} - S_{24} & I_{\Delta 2}^E &= S_{11} + S_{12} - S_{41} - S_{42} , \\
 15 \quad I_{\Delta 2}^C &= S_{11} + S_{14} - S_{41} - S_{44} & I_{\psi 1}^F &= S_{11} + S_{12} + S_{31} + S_{32} \\
 I_{\psi 2}^D &= S_{11} + S_{14} - S_{31} - S_{34} & I_{\psi 2}^F &= S_{11} + S_{12} - S_{31} - S_{32}
 \end{aligned}$$

20 где $I_{\psi 1,2}^{A,B,C,D,E,F}$ - интенсивности p- и s-компонент в амплитудном измерительном канале плеча анализатора, $I_{\Delta 1,2}^{A,B,C,D,E,F}$ - в фазовом измерительном канале для различных конфигураций оптических элементов.

25

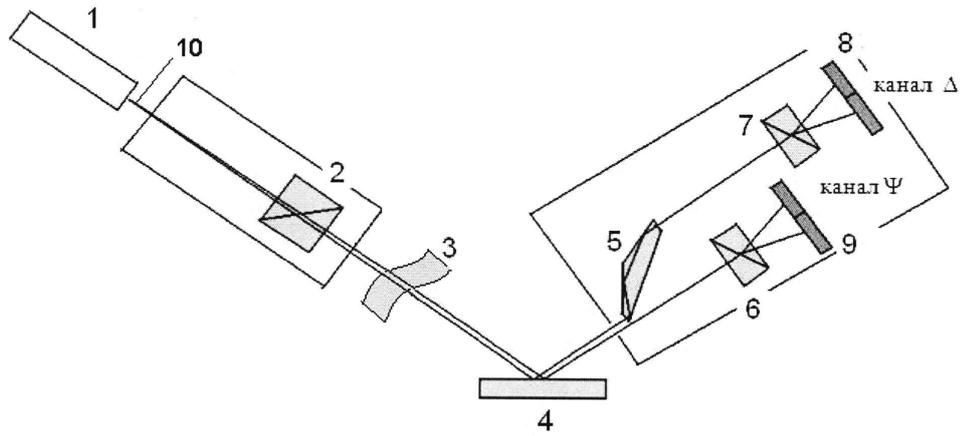
30

35

40

45

Способ определения матрицы Мюллера



ФИГ.1