



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 41580

(13) A

(51) 7 G01P3/36

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ І ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

1

2

(21) 2000084753

(22) 09.08.2000

(24) 17.09.2001

(46) 17.09.2001, Бюл. № 8, 2001 р

(72) Землянський Володимир Михайлович

(73) Землянський Володимир Михайлович

(57) 1. Спосіб вимірювання швидкості потоку шляхом зондування рухомого потоку лазерним пучком і виділення для двох напрямків прийому розсіяних пучків з наступним їх оптичним змішуванням на фотокатоді квадратичного детектора, який відрізняється тим, що потік зондують двома лазерними пучками з взаємоортогональними поляризаціями і різницею частот Ω_m , в кожному напрямі прийому виділяють два розсіяних пучки, що мають взаємоортогональні поляризації, а перед оптичним змішуванням розсіяних пучків здійснюють спочатку для однієї з пар просторово поєднаних розсіяних пучків перетворення їх стану поляризації на взаємоортогональне і потім поляризаційну фільтрацію, а на виході детектора вимірюють частоту високочастотного сигналу пропорційну проекції вектора швидкості на геометричну суму векторів, один з яких рівний різниці хвильових векторів двох зондуючих пучків, а інший - різниці хвильових векторів двох розсіяних пучків.

2. Пристрій для вимірювання швидкості потоку, що складається з оптично узгоджених лазера, фокусуючого і збираючого об'єктивів, діафрагми з двома отворами, дзеркала, змішувача, що забезпечує просторове поєднання розсіяних пучків на фотокатоді блока фотоприймача, що складається з послідовно встановлених діафрагми, інтерференційного світлофільтра і фотоприймача, а також вимірювача доплерівської частоти, вхід якого сполучений з виходом фотоприймача, який відрізняється тим, що в нього додатково введені між лазером і фокусуючим об'єктивом світлоподільник і дзеркало, які формують два паралельних лазерних пучки симетричних і паралельних оптичній осі фокусую-

чого об'єктива, частотозсувний пристрій і півхвильова фазова пластина, розташованих на шляху одного з лазерних пучків, а також півхвильова фазова пластина на шляху однієї з пар розсіяних пучків і поляризаційний фільтр, встановлений на вході блока фотоприймача.

3. Пристрій по п.2, який відрізняється тим, що оптичні осі фокусуючого і збираючого об'єктивів співпадають, а відстань між двома отворами діафрагми, розташованими симетрично відносно оптичної осі схеми Oz в площині зондуючих пучків Oxz , рівна

$\alpha_x = 2F \tan(\gamma/2)$, причому оптична вісь резонатора лазера і оптична вісь блока фотоприймача розташовані в площині Oxz з протилежних сторін відносно оптичної осі схеми Oz , де F - фокусна відстань збираючого об'єктива, γ - кут між двома лазерними пучками.

4. Пристрій по п.3, який відрізняється тим, що відстань між двома отворами діафрагми рівна

$\alpha_x > 2F \tan(\gamma/2)$ або $\alpha_x < 2F \tan(\gamma/2)$.

5. Пристрій по п.2, який відрізняється тим, що оптичні осі фокусуючого і збираючого об'єктивів співпадають, а відстань між двома отворами діафрагми, розташованими симетрично відносно оптичної осі схеми Oz в площині зондуючих пучків Oxz , вибирають з умови $\alpha_x > 2F \tan(\gamma/2)$ або , причому оптична вісь резонатора лазера і оптична вісь блока фотоприймача розташовані в площині Oxz з однієї сторони відносно оптичної осі схеми Oz .

6. Пристрій по п.2,3,4,5, який відрізняється тим, що змішувач виконаний у вигляді складової призми, наприклад, з світлоподільника і призми повного внутрішнього відбиття, яка забезпечує напрям на фотоприймач усього розсіяного випромінювання падаючого на вхід складової призми, а діафрагма перед фотоприймачем виконана з двома отворами.

Винахід відноситься до вимірювальної техніки і може бути використаний для вимірювання швидкості потоків рідини або газу.

Відомий спосіб вимірювання швидкості потоків [1], заснований на зондуванні лазерними пучками

потоку з наступним оптичним змішуванням на фотокатоді квадратичного детектора опорного і розсіяного пучків

Відомі лазерні пристрої, що реалізують цей спосіб [2], які використовують лазер, розщинник,

(13) A

(11) 41580

(19) UA

фокусуючий і збираючий об'єктиви, фотоприймач і вимірювач доплерівської частоти.

Недоліком даного способу і пристрою є залежність ширини спектра доплерівського сигналу від кутової розбіжності лазерних зондуючих пучків, невисока чутливість, змінити яку можливо тільки шляхом зміни конструктивних розмірів схеми зондування, і, отже, невисока точність.

Відомий спосіб вимірювання швидкості потоків [3], заснований на зондуванні лазерними пучками потоку з подальшим оптичним зміщенням на фотокатоді квадратичного детектора двох розсіяних пучків.

Відомі лазерні пристрої, що реалізують цей спосіб [2], що включають лазер, фокусуючий і збираючий об'єктиви, діафрагму з двома отворами, дзеркало, змішувач, фотоприймач і вимірювач доплерівської частоти.

Недоліком даного способу і пристрою є невисока чутливість, змінити яку можливо тільки шляхом зміни кута α між розсіяними пучками, що, поперше, приводить до погіршення просторового розділення (що недопустимо в ряді випадків, наприклад, при вимірюванні високошвидкісних потоків з високим градієнтом швидкості) і, по-друге, вимагає зміни конструктивних параметрів, збільшення габаритів, ваги і додатковою юстировки схеми.

В основу винаходу поставлено задачу підвищення чутливості, розширення діапазону зміни чутливості при збереженні високого просторового розділення, що дозволяє вимірювати як гіперзвукові, так і дуже малі швидкості потоків, не змінюючи конструктивних параметрів при переході від режиму роботи з максимальною чутливістю S_{\max} до мінімальної S_{\min} , і не виконуючи додатково юстировку схеми.

Поставлена задача досягається тим, що в способі заснованому на зондуванні рухомого потоку лазерними пучками і виділенні для двох напрямків прийому розсіяних пучків з наступним їх оптичним змішуванням на фотокатоді квадратичного детектора, додатково здійснюють зондування потоку двома пересіченими лазерними пучками з взаємоортогональними поляризаціями і різницею частот Ω_m і в кожному напрямку прийому виділяють два розсіяних пучка, що мають взаємоортогональні поляризації, а перед оптичним змішуванням розсіяних пучків здійснюють для однієї з пар просторово поєднаних розсіяних пучків перетворення їх стану поляризації на взаємоортогональні, а також поляризаційну фільтрацію, з подальшим виділенням на виході детектора високочастотного сигналу на частоті, пропорційній проекції вектора швидкості на геометричну суму двох векторів, один з яких рівний різниці хвильових векторів двох зондуючих пучків, а інший - різниці хвильових векторів двох розсіяних пучків.

Для пристрою поставлена задача досягається тим, що в пристрої, що включає оптично узгоджені лазер, фокусуючий і збираючий об'єктиви, діафрагму з двома отворами, дзеркало і змішувач, блок фотоприймача, що складається з послідовно встановлених діафрагми, інтерференційного світлофільтра і фотоприймача, а також вимірювача доплерівської частоти, додатково введені між лазером і фокусуючим об'єктивом світлодіодник і дзеркало,

які формують два паралельних лазерних пучки, симетричних і паралельних оптичній осі фокусуючого об'єктива, частотозсувний пристрій і півхвильова фазова пластина, розташовані на шляху одного з лазерних пучків, а також півхвильова фазова пластина на шляху однієї з пар розсіяних пучків, та поляризаційний фільтр, встановлений на виході блоку фотоприймача.

Крім того пристрій відмінний тим, що оптичні осі фокусуючого і збираючого об'єктивів співпадають, а відстань між двома отворами діафрагми, розташованими симетрично відносно оптичної осі схеми Oz в площині зондуючих пучків Oxz , рівна

$$a_x = 2F \tan(\gamma/2),$$

причому оптична вісь резонатора лазера і оптична вісь блоку фотоприймача розташовані в площині Oxz з протилежних сторін відносно оптичної осі схеми Oz , де F - фокусна відстань збираючого об'єктива, γ - кут між двома лазерними пучками.

Крім того пристрій відмінний тим, що відстань між двома отворами діафрагми рівна

$$a_x > 2F \tan(\gamma/2) \text{ або } a_x < 2F \tan(\gamma/2).$$

Крім того пристрій відмінний тим, що оптичні осі фокусуючого і збираючого об'єктивів співпадають, а відстань між двома отворами діафрагми, розташованими симетрично відносно оптичної осі схеми Oz в площині зондуючих пучків Oxz , вибирають з умови $a_x > 2F \tan(\gamma/2)$ або $a_x < 2F \tan(\gamma/2)$ причому оптична вісь резонатора лазера і оптична вісь блоку фотоприймача розташовані в площині Oxz з однієї сторони відносно оптичної осі схеми Oz .

Крім того пристрій відмінний тим, що змішувач виконаний у вигляді складової призми, наприклад, з світлодіодника і призми повного внутрішнього відбиття, яка забезпечує напрям на фотоприймач усього розсіяного випромінювання падаючого на вхід складової призми, а діафрагма перед фотоприймачем виконана з двома отворами.

На фіг. 1 представлена блок-схема пристрою, що реалізовує спосіб вимірювання швидкості потоку, на фіг. 2 - блок-схема пристрою для вимірювання високошвидкісних потоків, на фіг. 3 і 4 - геометрія зондуючих і розсіяних пучків, відповідно для пристроїв, поданих на фіг. 1 і 2, на фіг. 5 - змішувач, що складається з напівпрозорої призми 18₁ і призми повного внутрішнього відбиття 18₂.

Пристрій (фіг. 1, 2) містить оптичне узгоджені: лазер 1, випромінюючий вертикально поляризований пучок 2, розщинник 3, який ділить лазерний пучок 2 на два пучка 4 і 5 рівні по потужності; частотозсувний пристрій 6, підключений до генератора високої частоти 7; дзеркало 8; півхвильову фазову пластину 9; фокусуючий об'єктив 10, який фокусує два лазерних пучка в зону вимірювання 11 (місце перетину двох лазерних пучків під кутом γ), 12 і 13 - розсіяне випромінювання, що збирається об'єктивом 14 під кутом $\alpha/2$ до оптичної осі схеми Oz , діафрагму з двома отворами 15; дзеркало 16; півхвильову фазову пластину 17; змішувач 18; поляризаційний фільтр 19; діафрагму 20; інтерференційний світлофільтр 21; фотоприймач 22 і вимірювач доплерівської частоти 23.

Пристрій, що реалізовує спосіб вимірювання швидкості потоку (фіг. 1) працює таким чином. Ла-

зер 1 випромінює потужний безперервний лазерний пучок 2 вертикальної поляризації, який ділиться розщинником 3 на два пучка 4 і 5 рівної інтенсивності. Пучок 5 після проходження частотозсувного пристрою 6, підключеного до генератора високої частоти 7, зміщується по частоті на величину Ω_M і далі, відбившись від дзеркала 8, проходить півхвильову фазову пластинку 9, на виході якої лазерний пучок 5 має горизонтальну поляризацію і частоту $\omega_0 + \Omega_M$ (ω_0 - частота електромагнітного випромінювання лазера). Два паралельних лазерних пучка 4 і 5, що розповсюджуються в площині Oxz симетрично відносно оптичної осі Oz , фокусуються об'єктивом 10 в зону вимірювання

11, через яку зі швидкістю \vec{V} рухається потік рідини або газу. Розсіяне на мікрочастинах потоку випромінювання збирається об'єктивом 14 в межах круглих отворів діафрагми 15. Причому, в напрямках 12 і 13 розповсюджується розсіяне випромінювання як від зонduючого пучка \vec{K}_{04} так і пучка

\vec{K}_{05} (\vec{K}_{04} , \vec{K}_{05} - хвильові вектори зонduючих пучків 4 і 5, модулі яких рівні $|\vec{K}_{04}| = |\vec{K}_{05}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ де

λ - довжина хвилі випромінювання лазера). Розсіяне випромінювання від пучка \vec{K}_{04} в напрямку 12 задається хвильовим вектором \vec{K}_{41} (фіг 3), а від пучка \vec{K}_{05} - хвильовим вектором \vec{K}_{51} . Ці пучки

\vec{K}_{41} і \vec{K}_{51} мають при прийомі розсіяного уперед випромінювання лінійні взаємоортогональні поляризації, а їх частоти приймають різні доплерівські зсуви. Відповідно розсіяні пучки \vec{K}_{52} і \vec{K}_{42} в напрямку 13 також мають лінійні взаємоортогональні поляризації і відповідні доплерівські зсуви частот. Розсіяні пучки \vec{K}_{51} і

\vec{K}_{41} мають при прийомі розсіяного уперед випромінювання лінійні взаємоортогональні поляризації, а їх частоти приймають різні доплерівські зсуви. Відповідно розсіяні пучки \vec{K}_{52} і \vec{K}_{42} в напрямку 13 також мають лінійні взаємоортогональні поляризації і відповідні доплерівські зсуви частот. Розсіяні пучки \vec{K}_{51} і

\vec{K}_{41} після проходження півхвильової фазової пластини 17 мають відповідно горизонтальну і вертикальну поляризації. Хвильові вектори пари пучків \vec{K}_{52} і \vec{K}_{42} просторово поєднуються з

хвильовими векторами пучків \vec{K}_{51} і \vec{K}_{41} за допомогою змішувача 18 і далі прямують на поляризаційний фільтр 19. Нехай поляризаційний фільтр 19 має азимут осі пропускання рівний 0° , тоді через фільтр 19, діафрагму 20 і інтерференційний світлофільтр 21 проходять тільки розсіяні пучки, що мають горизонтальні поляризації \vec{K}_{51} і

\vec{K}_{41} . Внаслідок оптичного зміщення цих пучків на виході фотоприймача формується високочастотна складова сигналу на частоті

$$\omega_1 = \Omega_M + (\vec{K}_{05} - \vec{K}_{04})\vec{V} + (\vec{K}_{41} - \vec{K}_{51})\vec{V} = \Omega_M + (\vec{K}_{41} + \vec{K}_{51})\vec{V} = \Omega_M + \vec{K}_4\vec{V} = \Omega_M + \frac{4\pi}{\lambda} [\sin(\gamma/2) + \sin(\alpha/2)]V_x = \Omega_M \pm \omega_{d1}$$

де α - кут між розсіяними пучками 12 і 13, $V_x = V \cos \varphi$ - горизонтальна проекція вектора швидкості, модуль і знак якої вимірюється вимірювачем 23.

Таким чином, частота сигналу ω_1 визначається проекцією вектора швидкості \vec{V} на геометричну суму векторів

$$\vec{K}_4 = \vec{K}_{41} + \vec{K}_{51},$$

де $\vec{K}_4 = \vec{K}_{05} + \vec{K}_{04}$ - рівний різниці хвильових векторів зонduючих пучків,

а $\vec{K}_3 = \vec{K}_{51} - \vec{K}_{41}$ - різниці хвильових векторів розсіяних пучків.

Внаслідок симетрії схеми (фіг 3) \vec{K}_4 паралельний осі Ox , тому в даному варіанті схема вимірює горизонтальну проекцію швидкості $V_x = V \cos \varphi$. Чутливість схеми рівна

$$S_x \left[\frac{\Gamma \eta}{\text{м/сек}} \right] = \frac{2[\sin(\gamma/2) + \sin(\alpha/2)]}{\lambda} \quad (1)$$

Якщо, наприклад, $\gamma \leq \alpha$ то чутливість рівна

$$S_x \geq \frac{4 \sin(\alpha/2)}{\lambda}, \quad \text{тобто в два і більше раз (якщо } \gamma \leq \alpha \text{) більше, ніж в прототипі при тому ж куті } \alpha$$

Якщо $\gamma = \alpha$ та оптичні осі 10 і 15 співпадають, то в цьому випадку відстань між отворами діафрагми 15 вибирається рівною

$$d_x = 2F_1 \tan(\gamma/2), \quad \text{де } F_1 - \text{фокусна відстань об'єктиву 14}$$

Зонduючі пучки 4 і 5 на вході поляризаційного фільтра 19 мають горизонтальні поляризації і тому вони не проходять через фільтр 19 на фотоприймач 23. Такий варіант побудови схеми дуже простий для юстировки, оскільки для цього досить забезпечити просторове поєднання хвильових векторів \vec{K}_4 і \vec{K}_3 на виході змішувача 18. У цьому випадку автоматично забезпечується просторове поєднання хвильових векторів розсіяних пучків на фотокатоді фотоприймача 22. Крім того в схемі забезпечується рівність оптичного ходу двох електромагнітних хвиль, що змішуються

$$\Delta L_0 = \Delta L_s, \quad \text{де } \Delta L_0 - \text{різниця оптичного ходу між зонduючими пучками 4 і 5, } \Delta L_s - \text{різниця оптичного ходу між розсіяними пучками, що змішуються}$$

виконання цієї умови дозволяє використати в схемі потужні лазери з малою довжиною когерентності.

Якщо в схемі (фіг 1) $\gamma < \alpha$ або $\gamma > \alpha$, то схема (фіг 1) може також працювати, коли оптична вісь збираючого об'єктиву складає деякий кут з оптичною віссю фокусувального об'єктиву. Нехай, наприклад, в системі координат $Oxyz$ напрям оптичної

осі об'єктиву 10 співпадає з віссю Oz , а напрям осі об'єктиву 14 задається кутами (β, θ) , де відповідно θ - кут, що відлічується від осі Oz , а β - кут, що відлічується від осі Oz в площині Oxz . Тоді, якщо $\theta = 0$, а $\beta = \pm \Delta$ або навпаки $\beta = 0$, а $\theta = \pm \Delta\theta$, то область можливої зміни кутів $\pm \Delta\beta$ і $\pm \Delta\theta$ визначається розрахунковим шляхом [4] і виходячи з умови збереження незмінного стану поляризації випромінювання при розсіянні його на мікрочастинах. У схемі (фиг 1) область вимірювання 11 визначається зоною, в якій перетинаються зондуєчі пучки 4 і 5, тому розміри цієї зони легко експериментально виміряти що неможливо здійснити в прототипі.

Розглянемо випадок, коли $\alpha > \gamma$ ($\alpha < \gamma$) і поляризаційний фільтр 19 має азимут осі пропускання рівним 90° , тоді через фільтр 19, діафрагму 20 і інтерференційний світлофільтр 21 проходять тільки розсіяні пучки з вертикальною поляризацією. Внаслідок оптичного зміщення цих пучків на виході фотоприймача 22 формується високочастотна складова сигналу на частоті (фиг 4)

$$\omega_2 = \Omega_M + (\bar{K}_{05} + \bar{K}_{04})\bar{V} - (\bar{K}_{14} - \bar{K}_{15})\bar{V} = \Omega_M + (\bar{K}_1 - \bar{K}_2)\bar{V} = \\ = \Omega_M - \bar{K}_2\bar{V} = \Omega_M \mp \frac{4\pi}{\lambda} [\sin(\gamma/2) - \sin(\alpha/2)]V_x = \Omega_M \mp \omega_{D2}$$

, де

$\bar{K}_2 = \bar{K}_{S_4} - \bar{K}_{S_5}$; $\bar{K}_5 = \bar{K}_1 - \bar{K}_2$, знак «-» використовується, якщо $\alpha > \gamma$, знак «+» - якщо $\alpha < \gamma$.
У цьому випадку чутливість схеми

$$S_x \left[\frac{\Delta o}{i / \tilde{n} \Delta \epsilon} \right] = \frac{2[\sin(\gamma/2) - \sin(\alpha/2)]}{\lambda} \quad (2)$$

може бути вибрана дуже малою, що особливо важливо при вимірюванні високошвидкісних потоків. Наприклад при гіперзвукових швидкостях доплерівський зсув ω_{D2} у відомих схемах складає ГГц, що ускладнює обробку і точне вимірювання цих частот. У прототипі пониження доплерівської частоти ω_{D2} можливо досягнути за

рахунок зменшення кута α , однак при цьому істотно знижується просторове розділення схеми. У схемі (фиг 1) перехід від режиму роботи з високою чутливістю (1) до режиму з малою чутливістю (2) досягається шляхом зміни азимута осі пропускання фільтра 19 на 90° . При цьому зберігається високе просторове розділення, оскільки воно визначається кутом γ , який залишиться *const*.

Якщо пристрій призначається тільки для режиму роботи з малою чутливістю, то більш переважним є варіант побудови схеми поданий на фиг 2. У цій схемі як лазер 1 так і фотоприймач 22 знаходяться з однієї сторони від осі Oz , і, крім того, $\alpha > \gamma$ ($\alpha < \gamma$) і азимут осі пропускання фільтра 19 встановлюється рівним 90° , що відповідає режиму роботи

з малою чутливістю (фиг 4). Такий варіант побудови схеми автоматично забезпечує високу ступінь тимчасової когерентності розсіяних пучків $\bar{K}_{S_{41}}$ і

$\bar{K}_{S_{52}}$, що змінюються (так як виконується умова $\Delta L_0 = \Delta L_5$) і тому можна використати потужний лазер у багатомодовому режимі.

Використання в схемах (фиг 1, 2) змішувача 18 як напівпрозорої призми приводить до 50% втрати потужності розсіяних пучків що прямують на фотоприймач. Більш ефективний прийом розсіяного випромінювання реалізується, коли змішувач виконується у вигляді складової призми 18 (фиг 5), що складається, наприклад, з напівпрозорої призми 18₁ і призми 18₂ повного внутрішнього відбиття. Тоді, якщо перед фотоприймачем встановити діафрагму 20 з двома отворами, то забезпечується практично 100% прийом розсіяного випромінювання.

Спосіб і пристрій (фиг 1, 2) мають також додаткові переваги. У прототипі для визначення знака швидкості необхідно розташувати частотозсувний пристрій на шляху одного з розсіяних пучків, що приводить до істотних втрат потужності розсіяних пучків і зниження відношення сигнал/шуми. У способі та пристрою, що пропонується для визначення знака швидкості необхідно забезпечити частотний зсув одного із зондуєчих пучків (наприклад, за допомогою частотозсувного пристрою 6), потужність якого може бути вибрана із запасом для компенсації втрат в модуляторі.

Спосіб і пристрій, що пропонується усувають недоліки властиві відомим пристроям і прототипу, і дозволяють підвищити більш ніж в два рази чутливість при збереженні високого просторового розділення, незмінності основних конструктивних параметрів і габаритів. Крім того можливо здійснювати зміну режиму роботи і перехід від максимальної чутливості до мінімальної (і навпаки) тільки шляхом зміни азимута осі пропускання поляризаційного фільтра блоку фотоприймача.

Спосіб і пристрій мають також інші додаткові переваги в порівнянні з прототипом, які розкриті в тексті опису роботи пристрою.

Джерела інформації

- 1 Foreman I W, George E, Lewis R D - Appl Phys Lett, 1965, v 7, №4, p 77
- 2 Дубнішев Ю Н, Рінкевичюс Б С. Методи лазерної анемометрії - М. Наука, 1982
- 3, Mazumder M K, Wankum D L - Appl Opt, 1970, v 9, №5, p 633
- 4 Землянський В М. Вимірювання швидкості потоків лазерним доплерівським методом - К. Вища шк, 1987, 177 стор.

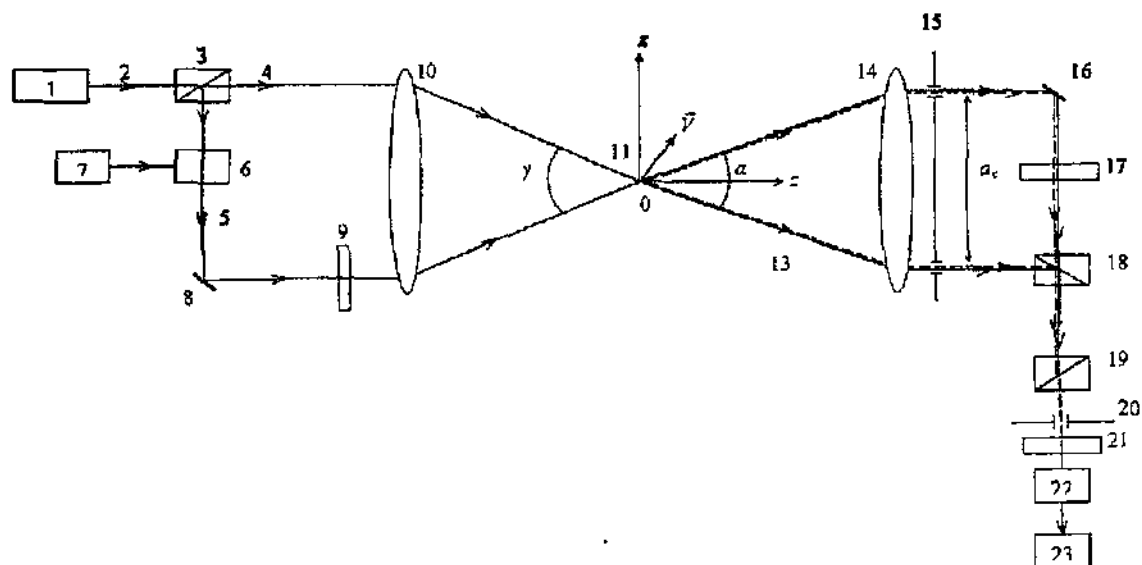


Fig. 1

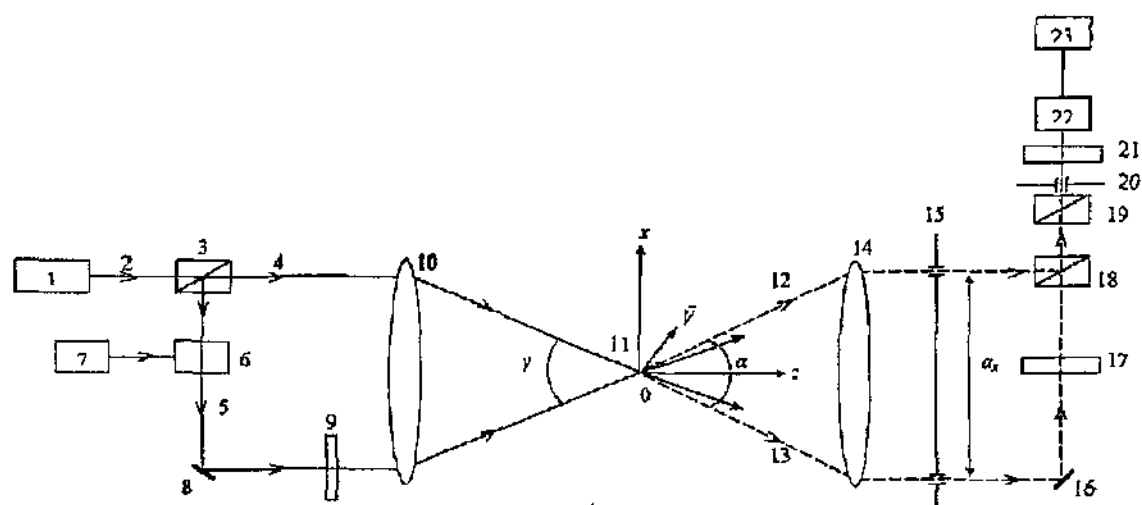


Fig. 2

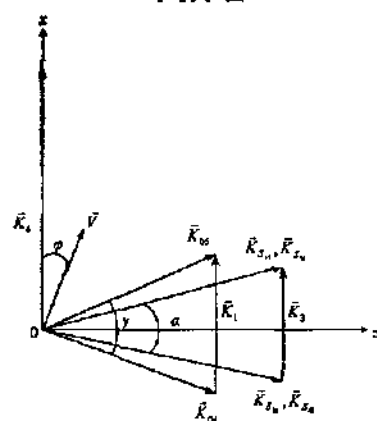
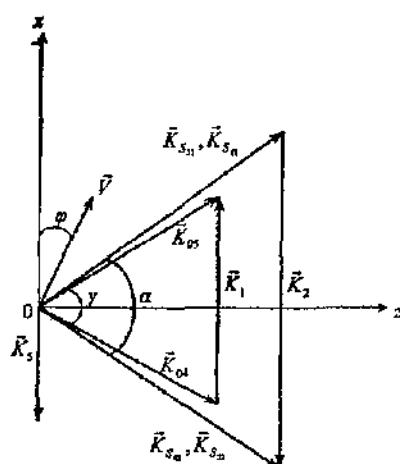
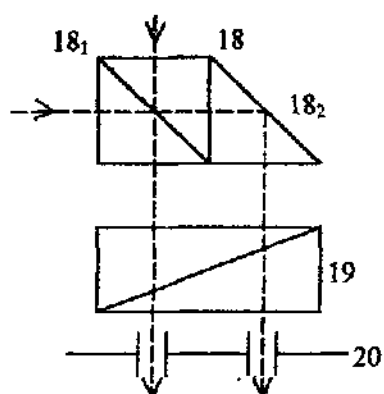


Fig. 3



Фіг. 4



Фіг. 5