



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 41625

(13) A

(51) 7 G01P3/36

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

## (54) ЛАЗЕРНИЙ ДОПЛЕРІВСЬКИЙ АНЕМОМЕТР

1

2

(21) 2000116448

(22) 14.11.2000

(24) 17.09.2001

(46) 17.09.2001, Бюл. № 8, 2001 р.

(72) Землянський Володимир Михайлович

(73) КИЇВСЬКИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ /КМУЦА/

(57) 1. Лазерний доплерівський анемометр, який складається із лазера, блока формування двох лазерних пучків з взаємно ортогональними поляризаціями, який має напівхвильову фазову пластину, частотозсувний пристрій з високочастотним генератором і дзеркало, датчика, який має фокусуючий об'єктив, приймального блока, який включає діафрагму з двома отворами, поляризатор, інтерференційований світлофільтр і фотоприймач, а також з вимірювача доплерівської частоти, який відрізняється тим, що в нього додатково введені в блок формування поляризаційний розщеплювач, на вході якого встановлена напівхвильова фазова пластина, в датчик-діафрагма з чотирма отворами, розміщеними симетрично відносно оптичної осі об'єктива в площині зондуючих пучків, два поляризаційних фільтри, входи яких оптично узгоджені з двома отворами діафрагми, розташованими симетрично відносно оптичної осі, в приймальний блок послідовно встановлені між діафрагмою і фотоприймачем лінза, призма Волластона, лінійний поляризатор, а також

пристрій оптичного узгодження, який забезпечує оптичне узгодження виходу блока формування з входом датчика, а також виходу датчика з входом приймального блока.

2. Лазерний доплерівський анемометр по п.1, який відрізняється тим, що пристрій оптичного узгодження виконаний в вигляді чотирьох одномодових світловодів з пристроями вводу і виводу колімованого пучка на кінцях кожного світловода.

3. Лазерний доплерівський анемометр по п.1, який відрізняється тим, що пристрій оптичного узгодження виконаний в вигляді лінії затримки, встановленої за поляризаційним розщеплювачем на дорозі лазерного пучка, оптична вісь якого співпадає з віссю оптичного резонатора лазера, крім того, приймальний блок і лазер розташовані по одну сторону від оптичної осі датчика, яка складає кут  $90^\circ$  з оптичною віссю приймального блока.

4. Лазерний доплерівський анемометр по п.1, який відрізняється тим, що пристрій оптичного узгодження виконаний в вигляді лінії затримки, встановленої за поляризаційним розщеплювачем на дорозі лазерного пучка, оптична вісь якого співпадає з віссю оптичного резонатора лазера, крім того, приймальний блок і лазер розташовані по різні сторони від оптичної осі датчика, яка складає кут  $90^\circ$  з оптичною віссю приймального блока.

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

Відомий лазерний доплерівський анемометр (ЛДА) [1], до складу якого входить оптично узгоджений лазер, блок формування двох лазерних пучків, в який входить частотозсуваючий пристрій з генератором і дзеркало; датчик, який містить фокусуючий об'єктив, приймальний блок, в який входить лінза, інтерференційний світлофільтр, а також вимірювач доплерівської частоти.

Недоліком даного ЛДА є мала чутливість при

заданому куті  $\gamma$  між зондуючими пучками. Відомий лазерний доплерівський анемометр [2] (прототип), який містить в собі оптично узгоджений лазер, блок формування двох лазерних пучків із взаємно ортогональними поляризаціями, в який входять напівхвильова фазова пластина, частотозсуваючий пристрій з високочастотним генератором і дзеркало; датчик, в який входить фокусуючий об'єктив, приймальний блок, в який входить діафрагма з двома отворами, поляризатор, інтерференційний світлофільтр і фотоприймач, а також вимірювач доплерівської частоти.

(13) A

(11) 41625

(19) UA

Недоліком даного ЛДА є те, що, по-перше, він може працювати при прийманні розсіяного назад випромінювання тільки тоді, коли кут між зондуючими пучками  $\gamma$  дорівнює куту  $\alpha$  між розсіяними пучками ( $\gamma = \alpha$ ), що обмежує область його використання тільки вимірюванням відносно малих швидкостей. По-друге, у відомому ЛДА відбувається неефективне приймання розсіяного назад випромінювання і в схемі може використовуватися одномодовий лазер з відносно великою довжиною когерентності лазерного випромінювання, який має відносно невелику потужність випромінювання.

Задачею винаходу є розширення діапазону перебудови чутливості ЛДА без змінення просторового розділення ( $\gamma = \text{const}$ ), що дає можливість використовувати його як для виміру малих так і великих швидкостей; збільшення ефективності прийому розсіяного випромінювання (100% прийом розсіяного випромінювання забезпечується за рахунок перетворення поляризаційної модуляції в 100% модуляцію інтенсивності), а також збільшення сигналу / шуму на виході фотоприймача.

Поставлена задача досягається тим, що в ЛДА який складається з лазера, блока формування двох лазерних пучків із взаємно ортогональними поляризаціями, який включає в себе напівхвильову фазову пластину, частотозсуваючий пристрій з високочастотним генератором і дзеркало; датчика, який включає в себе фокусує об'єктив; приймального блока, який включає в себе діафрагму з двома отворами, поляризатор, інтерференційний світлофільтр та фотоприймач, а також вимірювач доплерівської частоти додатково введені в блок формування поляризаційний розщеплювач, на вході якого встановлена напівхвильова фазова пластину; в датчик – діафрагма з чотирма отворами, розташованими симетрично відносно оптичної осі об'єктива, два поляризаційних фільтрів, входи яких оптично узгоджені з двома отворами діафрагми, розташованих симетрично оптичної осі; в приймальний блок – послідовно встановлені між діафрагмою і фотоприймачем лінза, призма Волостона та поляризатор, а також оптичноузгоджений пристрій, який забезпечує узгодження виходу блока формування з входом датчика, а також виходу датчика з входом приймального блока.

На фіг. 1 показана блок-схема ЛДА з волоконно-оптичним пристроєм; на фіг. 2 – блок-схема ЛДА для великошвидкісних газових потоків, на фіг. 3 блок – схема ЛДА для рідких потоків, на фіг. 4 геометрія зондуючих і розсіяних пучків для ЛДА з малою чутливістю, на фіг. 5 геометрія розсіяних та зондуючих пучків для режиму роботи ЛДА з максимальною чутливістю.

ЛДА (фіг. 1, 2, 3) складається з: лазера 1, який випромінює лінійно-поляризований пучок 2, напівхвильової фазової пластини 3, поляризаційного розщеплювача 4, який ділить пучок 2 на два пучка 5 і 6 з взаємно ортогональними поляризаціями; частотозсуваючого пристрою 7, підключеного до високочастотного генератора 8, дзеркала 9; поляризаційних фільтрів 10<sub>1</sub> і 10<sub>2</sub>, діафрагми 11 з

чотирма отворами орієнтованими в площині ОХЗ; фокусує об'єктив 12, зони вимірювання 13, розсіяних пучків 14 і 15; діафрагми з двома отворами 16, лінзи 17, призми Волостона 18, лінійного поляризатора 19, інтерференційного світлофільтру 20, фотоприймача 21, вимірювача доплерівської частоти 22, блока формування двох лазерних пучків 5 і 6 з взаємно-ортогональними поляризаціями 23, датчика 24, приймального блоку 25, оптичного узгоджувача пристрою 26; який для ЛДА (фіг. 1) являє собою чотири одномодових світловоди 27, 28, 29 і 30 з пристроями вивода та вводу колімованого лазерного пучка на кінцях кожного світловода; а для ЛДА (фіг. 2 і 3) 26 – це оптична лінія затримки.

ЛДА з волоконно-оптичним узгодженим пристроєм (фіг. 1) працює таким чином.

Лазер 1 випромінює лінійно поляризований пучок 2, який проходить напівхвильову фазову пластину 3 і далі направляється на вхід поляризаційного розщеплювача 4. Азимути швидкої осі пластини 3 і осі пропускання розщеплювача 4 вибирають такими, щоб на виході розщеплювача 4 були сформовані два лазерних пучка 5 і 6 з лінійними і взаємно-ортогональними поляризаціями, наприклад, пучок 5 має азимут 90° а пучок 6 – 0°. Лазерний пучок 6, після проходження частотозсуваючого пристрою 7, зміщується по частоті на фіксуючу

величину  $\Omega_m$  і далі після відбивання від дзеркала 9 направляється на вхід світловода 27. Лазерні пучки 5 і 6 направляються по світловодам 27 і 28 з блока формування 23 в датчик 24. Причому на виході світловода 27 формується колімований

лазерний пучок  $\vec{K}_{05}(\vec{K}_{05}$  – хвильовий вектор п'ятого зондуючого пучка), який має лінійну

поляризацію з азимутом 90° ( $\vec{K}_{05}$  – вертикально поляризований пучок), а на виході світловода 28 –

пучок ( $\vec{K}_{06}$  з горизонтальною поляризацією. Ці пучки 5 і 6 проходять одну пару отворів діафрагми 11, розташованих симетрично відносно оптичної осі датчика 24 ОХ і далі фокусуються під кутом у в

зоні вимірювання 13, через яку із швидкістю  $\vec{V}$  рухається потік рідини або газу. Розсіяне назад випромінювання в напрямках 14 і 15, кут між якими складає  $\alpha$  збирається об'єктивом 12 в межах іншої пари отворів діафрагми 11, розташованих симетрично відносно осі ОХ, а далі направляється на входи поляризаційних фільтрів 10<sub>1</sub> і 10<sub>2</sub>. Чотири кругових отвори діафрагми 11, розташовані в площині паралельно ОХУ (фіг. 1), орієнтовані паралельно осі ОХ в площині зондуючих пучків 5 і 6 (ОХЗ). Тільки в цій площині, як показали дослідження [3], не спостерігаються зміни стану поляризації розсіяного випромінювання при його прийманні назад. Нехай, наприклад, ЛДА вимірює гіперзвукову швидкість повітряного потоку і необхідно забезпечити малу чутливість ЛДА при збереженні високого просторового розділення. В цьому випадку азимут осі пропускання фільтра 10<sub>1</sub> встановлюється 0° а азимут осі пропускання фільтра 10<sub>2</sub> – 90°, і тому на вхід світловода 30

направляється розсіяний пучок  $\vec{K}_{s61}$ , сформований від зонduючого пучка  $\vec{K}_{06}$ , а на

вхід світловода 29 – відповідно пучок  $\vec{K}_{s52}$  від зонduючого пучка  $\vec{K}_{05}$ . (див. фіг. 4). Розсіяні пучки

$\vec{K}_{s61}$  і  $\vec{K}_{s52}$  далі по світловодах 30 і 29 передаються в приймальний блок 25 і на виході світловодів формуються два колімірованих розсіяних пучка з лінійними взаємно-ортогональними поляризаціями, які після проходження двох отворів діафрагми 16 і лінзи 17

направляються під кутом  $\beta$  на вхід призми Волластона 18 ( $\beta$  – параметр призми Волластона).

На виході призми 18 забезпечується просторове зміщення розсіяних пучків  $\vec{K}_{s61}$  і  $\vec{K}_{s52}$ ,

які мають лінійні взаємно ортогональні поляризації і різні частоти, величини яких визначаються доплерівським здвигом. В силу симетрії схеми забезпечується рівність оптичного ходу як зонduючих пучків 4 і 5, так і розсіяних

пучків  $\vec{K}_{s61}$  і  $\vec{K}_{s52}$ , тому пучки  $\vec{K}_{s61}$  і  $\vec{K}_{s52}$  на вході поляризатора 19 мають високу ступінь когерентності і рівні інтенсивності. Якщо азимут осі пропускання поляризатора 19 вибрати рівним куту  $45^\circ$  з направленням коливання електричного

вектора електромагнітної хвилі пучка  $\vec{K}_{s61}$  (або  $\vec{K}_{s52}$ ), то на виході поляризатора 19 буде спостерігатися 100% модуляція по інтенсивності розсіяного випромінювання на частоті рівній (див. фіг. 4),

$$\omega_1 = \Omega_M + (\vec{K}_3 - \vec{K}_1)\vec{V} = \Omega_M + \vec{K}_4\vec{V}, \partial e$$

$$\vec{K}_1 = \vec{K}_{06} - \vec{K}_{05}; \vec{K}_3 = \vec{K}_{s52} - \vec{K}_{s61}.$$

Якщо  $\alpha < \gamma$  (або  $\alpha > \gamma$ ), то ця частота визначається як

$$\omega_1 = \Omega_M \pm \frac{4\pi}{\lambda} \left( sm \frac{\gamma}{2} - sm \frac{\alpha}{2} \right) V \cos \varphi,$$

де  $V \cos \varphi = V_{x, «+»}$  – використовується в формулі, якщо  $\gamma > \alpha$ , а «-» – якщо  $\alpha > \gamma$ . Модулірований розсіяний пучок далі направляється через інтерференційний світлофільтр 20 на фотоприймач 21, частота вихідного сигналу якого вимірюється блоком 22.

Чутливість схеми ЛДА рівна

$$S_{x1} (\Gamma \text{ц/м/с}) = \frac{2}{\lambda} \left( sm \frac{\gamma}{2} - sm \frac{\alpha}{2} \right), \quad (1)$$

таким чином вона вибрана мінімальною  $S_{x \min}$ ,

якщо  $\gamma$  і  $\alpha$  а мало відрізняються один від одного.

Якщо ЛДА (фіг. 1) призначена для вимірювання дуже малих швидкостей, то його легко перевести в режим роботи з максимальною чутливістю, не змінюючи при цьому геометрію зонduючих і розсіяних пучків (див. фіг. 5).

Для цього азимут осі пропускання поляризаційного фільтра 10<sub>1</sub> встановлюється  $90^\circ$  а фільтра 10<sub>2</sub>  $0^\circ$ .

У цьому випадку на виході призми Волластона 18 просторово змішуються когерентні розсіяні

пучки  $\vec{K}_{s51}$  і  $\vec{K}_{s62}$  які мають взаємно ортогональні поляризації і рівні інтенсивності (фіг. 5), а на виході фотоприймача 22 формується сигнал на частоті

$$\omega_2 = \Omega_M + (\vec{K}_1 + \vec{K}_2)\vec{V} = \Omega_M + \frac{4\pi}{\lambda} \left( sm \frac{\gamma}{2} + sm \frac{\alpha}{2} \right) V_x, \quad (2)$$

де  $\vec{K}_2 = \vec{K}_{s51} - \vec{K}_{s62}$ , таким чином чутливість ЛДА зростає і стає рівною

$$S_{x2} (\Gamma \text{ц/м/с}) = \frac{2}{\lambda} \left( sm \frac{\alpha}{2} \right), \text{ та } S_{x2} \gg S_{x1}. \quad (3)$$

Використання волоконно-оптичного варіанту ЛДА (фіг. 1) доцільно, коли область зондування 13 знаходиться в важкодоступній точці. Тоді датчик 24 може бути виконаний мініатюрним та його можна розташувати на достатньо великій відстані від лазера 1 і блоків формування 23 і прийому 25. Режим роботи з максимальною чутливістю (3) використовується при вимірюванні малих швидкостей кровотечі в сосудах живих організмів, наприклад, в області серця при діагностиці серцеечно-сосудистих захворюваннях.

При аеродинамічних дослідженнях, наприклад, конструкцій літаючих апаратів, потрібно використовувати варіант ЛДА (фіг. 2), коли блоки 23, 24, 25 і 26 виконуються і об'єднуються в єдину конструкцію. Швидкості повітряних потоків можуть набирати декілька сотень м/с, тому в цьому випадку необхідно забезпечити як малу чутливість схеми (1), так і високе її просторове розділення, тобто зондувати потік пучками 5 і 6 з відносно великим кутом  $\gamma$ .

Блок формування 23 оптично узгоджений з датчиком 24 через лінію затримки 26, а поляризаційні фільтри 10<sub>1</sub> і 10<sub>2</sub> мають азимут осей пропускання відповідно рівними  $0^\circ$  і  $90^\circ$ . Крім того, виходи фільтрів 10<sub>1</sub> і 10<sub>2</sub> оптично узгоджені з двома входами (через отвори діафрагми 16) приймального блока 24, оптична вісь якого складає  $90^\circ$  з оптичною віссю OZ датчика 24. Оскільки приймальний блок 24 і лазер 1 розташовані по одну сторону від осі OZ, то з допомогою лінії затримки 26 можна компенсувати різницю оптичного ходу і забезпечити високу

ступінь когерентності розсіяних пучків  $\vec{K}_{s61}$  і  $\vec{K}_{s52}$ , і, відповідно, використовувати в схемі потужний лазер.

При гідродинамічних дослідженнях середовищ з рідини доцільно використовувати варіант ЛДА

(фіг. 3), який працює в режимі з максимальною чутливістю  $S_{x2}$  (фіг. 3). В цьому випадку поляризаційні фільтри  $10_1$  і  $10_2$  мають азимут осей пропускання відповідно рівними  $90^\circ$  і  $0^\circ$ , а приймальний блок 25 і лазер 1 розташовані з протилежних сторін від осі OZ. Лінія затримки 26 компенсує різницю оптичного ходу і забезпечує високу степінь часової когерентності розсіяних

пучків  $\vec{K}_{s51} i \vec{K}_{s62}$ , просторово змішаних на виході призми Волластона 18. В іншому ЛДА показані на фіг 2 і 3 працюють аналогічно волоконно-оптичному ЛДА (фіг. 1).

В запропонованому ЛДА усунуті недоліки які присущі прототипу і відомим пристроям. Він може працювати при кутах:  $\alpha < \gamma$  ( $\alpha > \gamma$ ) з прийманням розсіяного назад випромінювання як в режимі малої, так і високої чутливості. В ньому виконується повний 100% прийом розсіяного

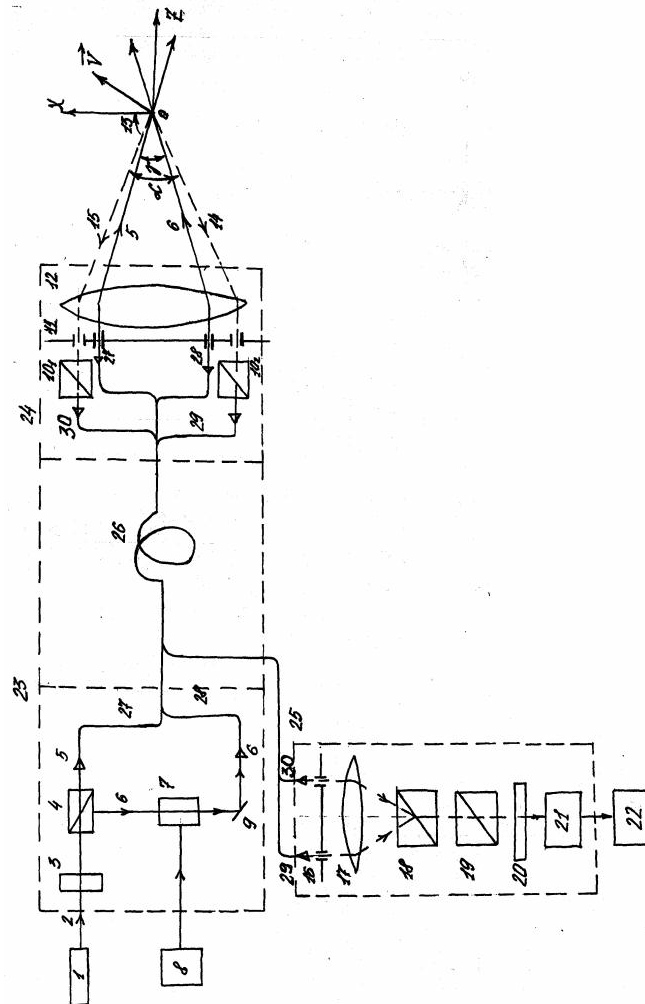
назад випромінювання і забезпечується висока степінь часової когерентності змішаних розсіяних пучків, що збільшує відношення сигналу / шум на виході фотоприймача. Другі переваги ЛДА розібрані при описі його праці.

Джерела інформації:

1. Дубнищев Ю.Н. Ринкевичус Б.С. Методи лазерної доплерівської анемометрії. – М.: Наука, 1982. – С. 204-207 (аналог).

2. Лазерний доплерівський анемометр. Заявка подана в Держпатент України. – 08.2000 р. (прототип).

3. Землянський В.М. Вимірювання швидкості потоків лазерним доплерівським методом. – К.: Вища школа, 1987. – 177 с.



Фіг. 1

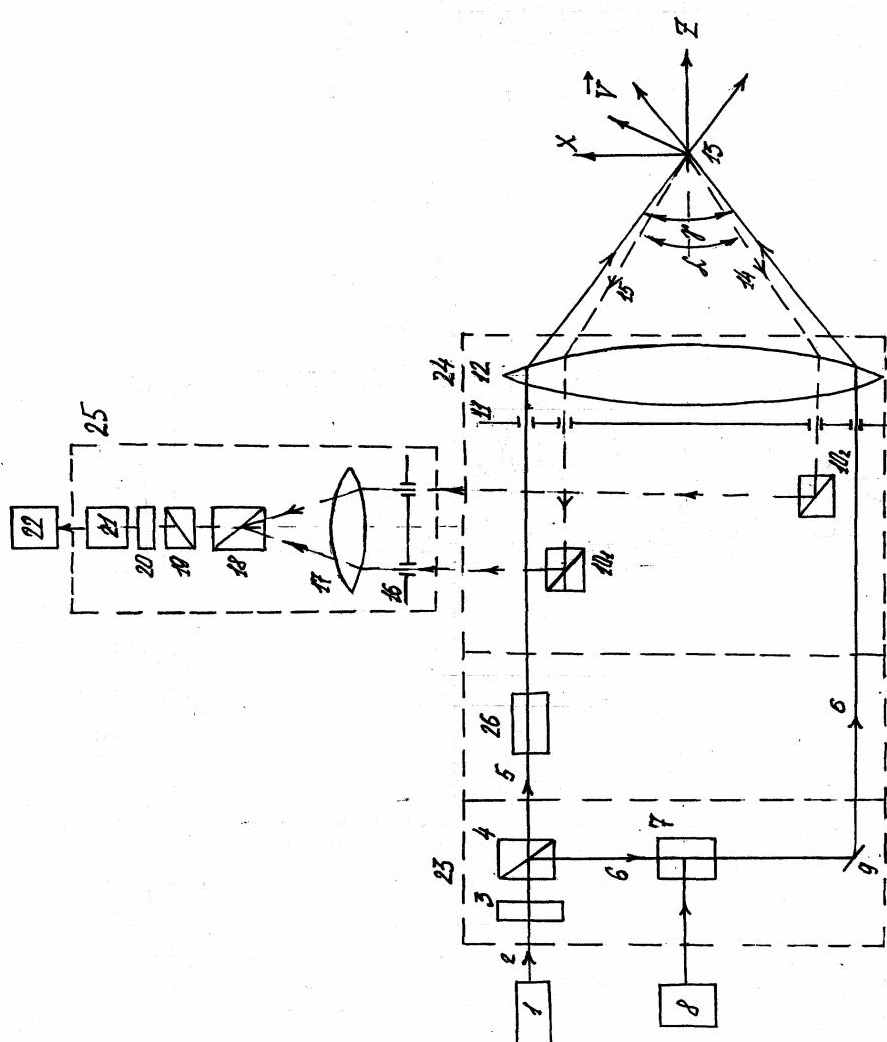
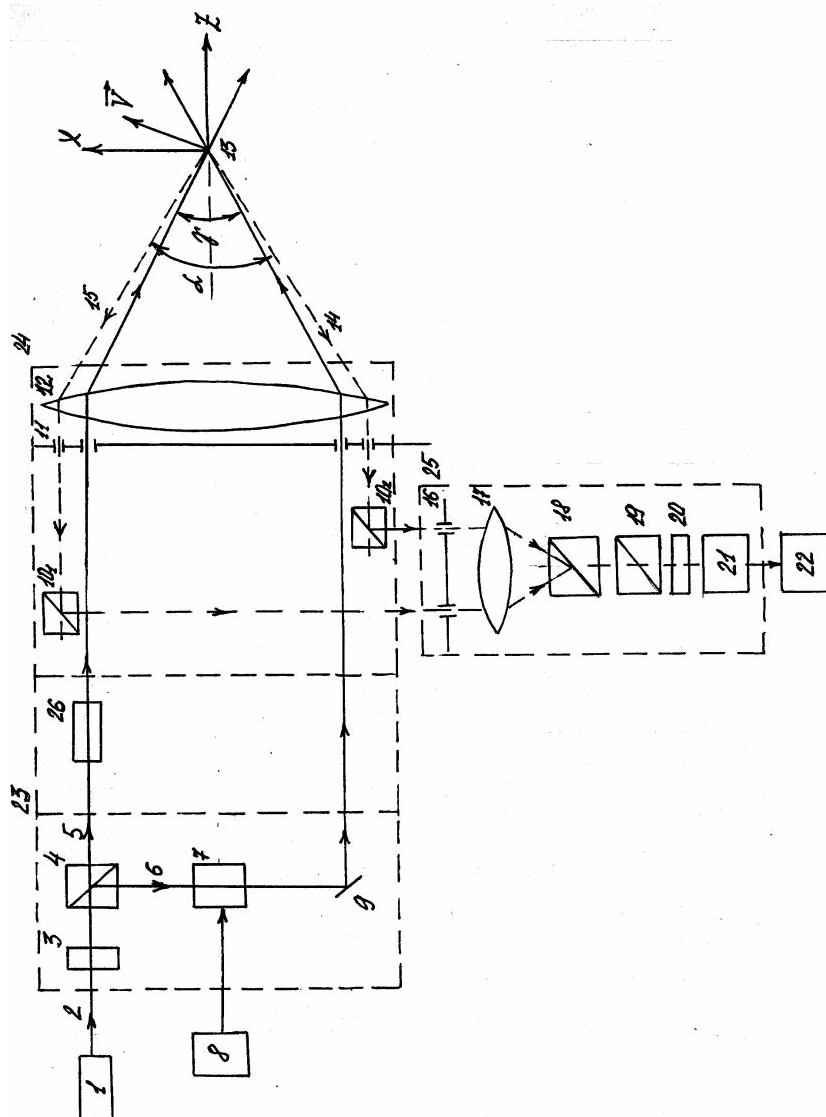
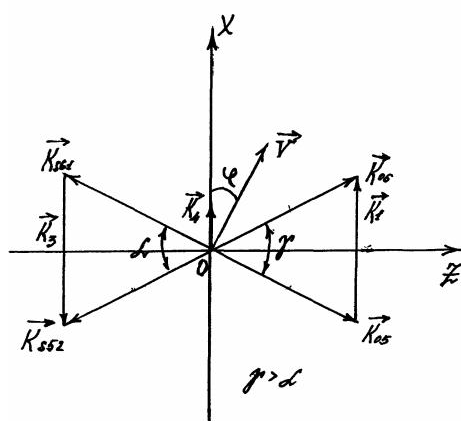


Fig. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

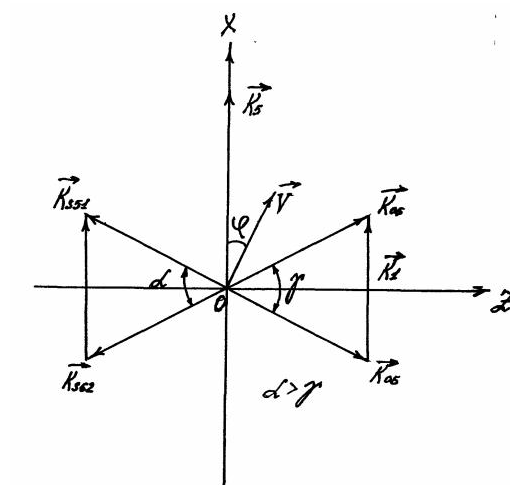


Fig. 5