

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

306 807

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

H01J 37/145 (2006.01)

H01J 37/26 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2016-300**
(22) Přihlášeno: **21.05.2016**
(40) Zveřejněno: **12.07.2017**
(Věstník č. 28/2017)
(47) Uděleno: **31.05.2017**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **12.07.2017**
(Věstník č. 28/2017)

(56) Relevantní dokumenty:
XP024484331 Vashkelis V P; et al. Application of immersion objective lens aberration properties for secondary electrons energy analysis, MICROELECTRONIC ENGINEERING, Vol. 12, Nr. 1- 4, pg 89 - 96, 01.05.1990 doi:10.1016/0167-9317(90)90019-P, EP 2629317 B; US 5528048 A.

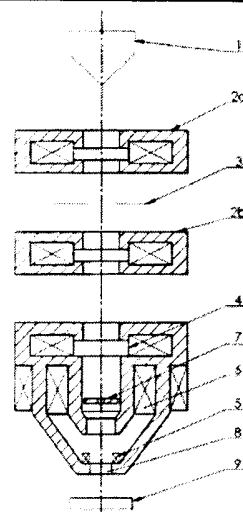
(73) Majitel patentu:
TESCAN Brno, s.r.o., Brno, CZ

(72) Původce:
Ing. Jaroslav Jiruše, Ph.D., Blansko, CZ
Ing. Filip Lopour, Ph.D., Brno, CZ
Mgr. Miloš Havelka, Zbýšov, CZ
Mgr. Jan Polster, Ph.D., Brno, CZ
Ing. Josef Ryšávka, Luleč, CZ
Ing. Martin Zadražil, Ph.D., Brno, CZ

(74) Zástupce:
Inpartners Group, Ing. Michal Jordán, Koliště 13a,
602 00 Brno

(54) Název vynálezu:
Rastrovací elektronový mikroskop a způsob jeho provozu

(57) Anotace:
Rastrovací elektronový mikroskop obsahuje tři objektivové čočky – vzdálenou objektivovou čočku (4) a blízkou objektivovou čočku (6), které jsou konvenčního typu a pod nimi imerzní objektivovou čočku (8) imerzního typu. Činnost těchto tří objektivových čoček lze ovládat nezávisle na ostatních a tím lze dosáhnout různých kombinací aktivních objektivových čoček. Rastrovací elektronový mikroskop díky tomu poskytuje různé způsoby použití. Mezi jednotlivými způsoby lze přepínat a je možné tedy volit nejvhodnější způsob zobrazení pro danou aplikaci.



CZ 306807 B6

Rastrovací elektronový mikroskop a způsob jeho provozu

Oblast techniky

5

Předložený vynález se týká uspořádání čoček v rastrovacích elektronových mikroskopech, které umožňuje vysoké rozlišení, velkou hloubku ostroty a velké zorné pole. Díky použití tří objektivových čoček má uživatel k dispozici množství zobrazovacích režimů.

10

Dosavadní stav techniky

Rastrovací elektronové mikroskopy se skládají ze zdroje primárních elektronů, kondenzorové čočky, která reguluje proud primárních elektronů, z aperturní clony, objektivové čočky, rastrovacích a centrovacích prvků a detektoru. Kondenzorová čočka reguluje proud primárních elektronů. Objektivová čočka je obvykle elektromagnetická. Taková čočka je tvořena cívkou, kterou protéká proud, a obalem z magnetického materiálu, tvořícího součást magnetického obvodu čočky. Cívka může mít jedno, dvě nebo více vinutí, což je možno využít pro zachování konstantního tepelného výkonu cívky při změně intenzity magnetického pole vytvářeného čočkou. V místě, kde je obal cívky přerušen, vzniká mezi tzv. pólovými nastavci magnetické pole, které formuje svazek elektronů. Elektromagnetická čočka může být konvenční nebo imerzní. Konvenční čočka má dva pólové nastavce s axiální mezerou, v níž magnetické pole čočky lokálně ovlivňuje proud primárních elektronů (elektronový svazek) a nedosahuje podstatným způsobem do oblasti vzorku. Imerzní čočka může mít buď jeden pólový nastavec, v tom případě se magnetické pole uzavírá přes komoru mikroskopu nebo čočka může mít dva pólové nastavce s radiální mezerou. Při použití imerzní čočky je zkoumaný vzorek vnořen do magnetického pole vytvářeného čočkou. Výhodou imerzních čoček oproti konvenčním je zmenšení optických vad (aberrací) zobrazení a zlepšení rozlišovací schopnosti elektronového mikroskopu.

Elektromagnetické čočky lze také nahradit čočkami elektrostatickými, které využívají namísto cívek elektrody, případně lze vytvořit čočku kombinovanou spojením cívek, magnetického obvodu a elektrod.

Nevýhodou běžného rastrovacího elektronového mikroskopu je, že může využívat zpravidla pouze jednu objektivovou čočku s danými vlastnostmi a tím pádem má velmi omezený počet stupňů volnosti nastavení zobrazovacích režimů mikroskopu. Pokud je například objektiv optimalizován pro vysoké rozlišení, má zpravidla jen relativně malou dosažitelnou velikost zorného pole a malou hloubku ostroty. Aperturní clonou a kondenzorem lze regulovat rozbíhavost (aperturní úhel) primárního svazku a zároveň požadovaný proud elektronů, prošlých aperturní clonou. Pro objektivovou čočku, fokusující primární svazek elektronů na vzorek, však existuje v tomto uspořádání jen relativně úzký rozsah velikosti proudu elektronů, jemuž odpovídá aperturní úhel potřebný pro optimální rozlišení. Při změně proudu prošlých elektronů (a tím i změnou aperturního úhlu) se tak rozlišovací schopnost objektivové čočky snižuje.

Pokud je například objektiv nastaven pro optimální aperturní úhel odpovídající malému proudu, ztrácí svou rozlišovací schopnost při vysokých proudech.

Tuto nevýhodu odstraňuje patent US 5124556. V dokumentu je všeobecně popsáno uspořádání dvou kondenzorových čoček, aperturní clony a dvou objektivových čoček, z nichž jedna objektivová čočka je pomocná a slouží pro kontrolu aperturního úhlu svazku nabitých částic dopadajícího na zkoumaný vzorek. Zmíněné uspořádání umožňuje udržovat optimální aperturu na větším rozsahu proudů primárního elektronového svazku dopadajícího na vzorek. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že zorné pole je relativně malé.

- V patentu US 7705298 je popsáno zařízení, které se skládá ze tří kondenzorových čoček (dvě elektromagnetické a jedna elektrostatická) a objektivové čočky, která je kombinací elektromagnetické imerzní dvoupólové čočky a elektrostatické čočky. Tyto objektivové čočky tvarují elektromagnetické a elektrostatické pole pro fokusaci primárního elektronového svazku na vzorek.
- 5 Dále se zařízení skládá z rychle reagující elektromagnetické pomocné čočky sloužící pro rychlou změnu fokusace svazku na vertikálně členitém vzorku. V tomto dokumentu však není zmíněna možnost použití více zobrazovacích režimů a pomocná čočka nemůže díky svým vlastnostem sloužit k zobrazování, ale pouze jako doplněk k hlavní objektivové čočce.
- 10 V patentu EP 0708975 je popsáno uspořádání dvou objektivových čoček, z nichž je objektivová čočka umístěna blíže ke vzorku imerzní a od vzorku vzdálenější objektivová čočka je konvenční. Tyto dvě čočky však nepracují v součinnosti, ale střídají zobrazení pomocí imerzní čočky pro co nejvyšší rozlišení a zobrazení pomocí konvenční čočky pro režim bez magnetického pole na vzorku, což je vhodné například pro vzorky z magnetických materiálů. Navíc zde není zmíněna
- 15 možnost využití většího počtu zobrazovacích režimů.

Zařízení známé z patentu JP 2969219 obsahuje dvě kondenzorové čočky a dvě objektivové čočky. Objektivové čočky jsou elektromagnetické a jsou uspořádány stejně jako v řešení z EP 0708-975. Jedna elektromagnetická objektivová čočka je konvenční, druhá elektromagnetická objektivová čočka je imerzní. Nevýhodou obou těchto řešení je to, že jsou kvůli dosažení co největšího rozlišení obě čočky umístěny co nejblíže ke vzorku a nelze tudíž dosáhnout velkého zorného pole, které je důležité především pro snadnou navigaci na vzorku.

20

V patentu US 7223983 je popsáno uspořádání minimálně jedné kondenzorové čočky, dvou vychylovacích cívek pro řízení směru elektronového paprsku, následně je umístěn detektor sekundárních elektronů, rastrovací cívky, pomocná objektivová čočka a objektivová čočka. Zmíněné prvky seskupení mikroskopu jsou elektromagnetického charakteru. Zařízení umožňuje vychylování svazku pod velkým úhlem tak, aby nebyl obraz zkreslený. Možnost využití více zobrazovacích režimů zde také není zmíněna.

25

U žádného ze známých systémů tedy nelze na jednom zařízení v různých zobrazovacích režimech dosáhnout současně vysokého rozlišení, zvýšené hloubky ostrosti i velkého zorného pole.

30

35 Podstata vynálezu

Podstatou vynálezu je rastrovací elektronový mikroskop s alespoň jednou kondenzorovou čočkou a třemi objektivovými čočkami a množstvím zobrazovacích režimů takového mikroskopu.

40 Rastrovací elektronový mikroskop obsahuje zdroj primárních elektronů, alespoň jednu kondenzorovou čočku, aperturní clonu, rastrovací cívky, alespoň jeden detektor signálních elektronů, držák vzorku, vzdálenou objektivovou čočku umístěnou mezi kondenzorovou čočkou a držákem vzorku, imerzní objektivovou čočku umístěnou mezi vzdálenou objektivovou čočkou a držákem vzorku a blízkou objektivovou čočku umístěnou mezi vzdálenou objektivovou čočkou a imerzní

45 objektivovou čočkou.

Rastrovací elektronový mikroskop podle předkládaného vynálezu tedy používá pro fokusování primárního svazku elektronů až tři objektivové čočky. Vzdálená objektivová čočka a blízká objektivová čočka jsou čočky konvenční. Vzdálená objektivová čočka a blízká objektivová čočka

50 můžou být elektromagnetické nebo elektrostatické. Třetí čočka je imerzní objektivová čočka elektromagnetického typu, tzn., že vzorek je ponořený do magnetického pole tvořeného touto imerzní objektivovou čočkou.

Kondenzorové čočky mikroskopu v součinnosti s aperturní clonou slouží k regulaci proudu primárního elektronového svazku. Kondenzorové čočky jsou obvykle elektromagnetické, ale alternativně mohou být také elektrostatické nebo kombinované.

5 Pro detekci signálních elektronů, které jsou emitovány ze vzorku po dopadu primárního elektronového svazku, je v rastrovacím elektronovém mikroskopu umístěn alespoň jeden detektor signálních elektronů a to buď v komoře vzorku, nebo v elektronovém tubusu. Signálními elektrony se rozumí například sekundární elektrony nebo zpětně odražené elektrony. Detektor signálních elektronů může být v elektronovém tubusu umístěn libovolně mezi imerzní objektivovou čočkou
10 a kondenzorovou čočkou. S výhodou lze do komory vzorku nebo do elektronového tubusu umístit také více detektorů signálních elektronů, které mohou být využívány v závislosti na požadovaném signálu nebo v závislosti na kombinaci využívaných objektivových čoček. Detektory signálních elektronů mohou být umístěny ze strany (kolmo nebo šikmo k optické ose) nebo anulárně (kolem optické osy). Také lze využít bez omezení běžně užívané typy detektorů, například scintilační detektor, Everhartův-Thornleyův detektor nebo polovodičový detektor. Pro lepší detekci lze
15 používat pomocné elektrody, které usměrňují signální elektrony směrem k detektoru. V rastrovacím elektronovém mikroskopu mohou být kromě detektoru signálních částic také umístěny detektory různých jiných signálů, například katodoluminiscence, rentgenového záření, sekundárních iontů nebo transmisních elektronů.

20 Další součástí rastrovacího elektronového mikroskopu podle předkládaného vynálezu jsou rastrovací cívkky, které mohou být umístěny nad vzdálenou objektivovou čočkou, nad blízkou objektivovou čočkou nebo pod blízkou objektivovou čočkou. Pokud je pod rastrovacími cívkami alespoň jedna aktivní objektivová čočka, je pivot rastrování zpravidla umístěn do hlavní roviny
25 poslední aktivní objektivové čočky, která primární elektronový svazek fokusuje na vzorek.

Pro lepší vycentrování soustavy s více čočkami je výhodné použít několik centrovacích prvků, které mohou být libovolně umístěny mezi jednotlivými čočkami.

30 Držák rastrovacího elektronového mikroskopu podle předkládaného vynálezu může být uzpůsoben pro přivedení libovolného napětí na vzorek nebo přímo na držák vzorku. Přivedené napětí pak vytvoří elektrostatické pole v blízkosti vzorku. Je-li přiváděné napětí záporné, přispívá takto vzniklé elektrostatické pole ke zlepšení rozlišení celé zobrazovací soustavy. Přivedení malého kladného napětí vytvoří pole, které může být použito pro zlepšení detekce či řízení druhu detekovaného signálu. Toto elektrostatické pole se může případně překrývat s magnetickým polem
35 imerzní objektivové čočky. Tato možnost může být využita v součinnosti s blízkou objektivovou čočkou, vzdálenou objektivovou čočkou nebo imerzní objektivovou čočkou i s jejich kombinacemi.

40 Rastrovací elektronový mikroskop podle předkládaného vynálezu může být dále vybaven druhým tubusem pro fokusovaný iontový svazek, který lze použít pro analýzu nebo opracování vzorku fokusovaným iontovým svazkem.

Pro vysvětlení funkčnosti zobrazovacích režimů jsou v textu popisovány objektivové čočky ve stavu aktivním a neaktivním. Odborníkovi znalému této oblasti techniky je ovšem zřejmé, že lze
45 cívkky, resp. elektrody, všech čoček budit různým proudem, resp. přikládat různá napětí, a ovlivňovat tak tvar a intenzitu polí podle potřeby. Má se za to, že v případě aktivní čočky tato čočka generuje elektromagnetické/elektrostatické pole, nebo oba druhy polí v případě kombinované čočky, a naopak neaktivní čočka příslušné pole negeneruje. Za stav neaktivní čočky považujeme i
50 případ, kdy materiál magnetického obvodu čočky generuje remanentní magnetické pole. Dále lze za neaktivní považovat i takovou čočku, jejíž cívkou s větším počtem vinutí protéká proud takovým způsobem, že magnetická pole generovaná jednotlivými vinutími se vzájemně vyruší, tzn., že vektorový součet polí generovaných jednotlivými vinutími je v oblasti prostoru čočky roven nule. Aktivitu tří objektivových čoček lze ovládat nezávisle na sobě. Lze tak použít různé kombi-

nace aktivních a neaktivních objektivových čoček. Tím získáváme možnost přepínání konvenčních čoček a imerzní čočky mikroskopu a získáváme výhody obou.

5 Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu s aktivní pouze vzdálenou objektivovou čočkou nabízí možnost zobrazení pozorovaného vzorku s velkým zorným polem a velkou hloubkou ostrosti.

10 Při přepnutí do režimu fokusace primárního elektronového svazku pouze blízkou objektivovou čočkou lze dosáhnout lepšího rozlišení než v předešlém případě, neboť je aktivní čočka umístěna blíže ke vzorku. Zorné pole a hloubka ostrosti je ovšem menší než v předešlém případě.

15 Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu s aktivní imerzní objektivovou čočkou a s neaktivní blízkou objektivovou čočkou a neaktivní vzdálenou objektivovou čočkou přináší ještě vyšší rozlišení.

Činnost těchto tří čoček lze různými způsoby kombinovat a tím dosáhnout různých vlastností obrazu. Obvykle má aktivní objektivová čočka, vzdálenější od vzorku, funkci optimalizace aperturního úhlu pro čočku, která fokusuje svazek elektronů na vzorek.

20 Pokud je aktivní pouze jediná objektivová čočka, je možno dosáhnout nejmenší stopy primárního svazku při jednom nastavení proudu ve svazku, které odpovídá optimálnímu aperturnímu úhlu. Pokud je však potřeba použít pro zobrazování jinou velikost proudu primárního svazku, pak se změni poloha křížiště vytvářeného kondenzorovou čočkou tak, že svazek nedopadá na objektivovou čočku s optimálním aperturním úhlem. Rastrovací elektronový mikroskop podle předkládaného vynálezu však umožňuje aktivovat další objektivovou čočku, umístěnou mezi zmíněnou
25 objektivovou čočkou a aperturní clonou tak, aby nastavila optimální aperturní úhel primárního elektronového svazku pro objektivovou čočku fokusující svazek na vzorek, a to i pro velký rozsah proudů ve svazku. Pokud je tedy čočka, fokusující svazek na vzorek, naladěna pro určitý optimální aperturní úhel lze pomocí vzdálené objektivové čočky tento úhel zachovat i při měnícím se proudu elektronů procházejícím aperturní clonou.
30

Při provozu rastrovacího elektronového mikroskopu, kdy je aktivní vzdálená objektivová čočka, která má funkci optimalizace aperturního úhlu, a současně je aktivní blízká objektivová čočka, která ostří na vzorek, dostáváme dobré rozlišení pro velký rozsah proudů primárního svazku, a přitom poměrně velkou hloubku ostrosti, větší než v případě zobrazování pomocí imerzní čočky a menší než v případě zobrazování pomocí vzdálené objektivové čočky.
35

Pro některé druhy zkoumaných vzorků je výhodou, že v tomto režimu, kdy není aktivní imerzní objektivová čočka, není vzorek ponořen do magnetického pole imerzní objektivové čočky. V magnetickém poli imerzní objektivové čočky například lze jen omezeně pozorovat vzorky z magnetických materiálů. Tento způsob provozu také není vhodný například pro současnou práci s fokusovaným iontovým svazkem, protože magnetické pole imerzní objektivové čočky ovlivňuje iontový svazek.
40

45 Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu s aktivní imerzní objektivovou čočkou v kombinaci se vzdálenou objektivovou čočkou nebo blízkou objektivovou čočkou pomáhá dosáhnout optimálního aperturního úhlu pro velký rozsah proudů primárního elektronového svazku.

50 Dalším způsobem provozu je případ, kdy je aktivní blízká objektivová čočka a imerzní objektivová čočka tak, že blízká objektivová čočka vytváří sbíhavý primární elektronový svazek a imerzní objektivová čočka dále ostří primární elektronový svazek na vzorek. Zobrazení imerzní objektivovou čočkou bývá zpravidla omezeno na určitý rozsah pracovních vzdáleností vzorku od čočky, zvláště při vysokých energiích primárního svazku. Výše zmíněný způsob kombinace blízké a imerzní objektivové čočky umožňuje tento rozsah pracovních vzdáleností zvýšit.

Rastrovací elektronový mikroskop podle předkládaného vynálezu lze také použít s aktivní imerzní čočkou tak, že kondenzorové čočky vytvářejí takové pole, že primární elektronový svazek nevytvoří křížiště mezi kondenzorovou čočkou a imerzní objektivovou čočkou. Tím se potlačí jevy, které vznikají v křížišti, kde je velká hustota nabitých částic, které navzájem interagují, což může zhoršit výsledné rozlišení. Avšak tento režim neumožňuje regulaci proudů primárního elektronového svazku v takovém rozsahu jako režim, kdy kondenzorové čočky křížiště vytváří.

Pokud je rastrovací elektronový mikroskop vybaven zařízením s fokusovaným iontovým svazkem, lze jej s výhodou využít například pro vytváření struktur na vzorku. Proces obrábění vzorku pomocí fokusovaného iontového svazku je možno kontrolovat při zobrazování rastrovacím elektronovým mikroskopem v režimu s aktivními konvenčními objektivovými čočkami, které neovlivňují fokusovaný iontový svazek a po skončení práce je možno vzorek zobrazit v režimu s imerzní objektivovou čočkou, poskytující vyšší rozlišení. Rastrovací elektronový mikroskop umožňuje přepínat různé zobrazovací režimy automaticky.

Objasnění výkresů

Vynález je blíže vysvětlen v popisu příkladů jeho provedení pomocí připojených výkresů. Pro lepší přehlednost jsou ve výkresech znázorněny jen ty části zařízení, které jsou důležité z hlediska principu předkládaného vynálezu.

Na obr. 1 je schematicky znázorněno uspořádání prvků elektronového rastrovacího mikroskopu.

Na obr. 2 je schematicky znázorněno uspořádání prvků elektronového rastrovacího mikroskopu v kombinaci s napětím přivedeným na držák vzorku.

Na obr. 3 je schematicky znázorněno uspořádání prvků elektronového rastrovacího mikroskopu se zcela oddělenými magnetickými obvody jednotlivých čoček.

Na obr. 4 je schematicky znázorněno zařízení zahrnující elektronový rastrovací mikroskop a zařízení využívající fokusovaný iontový svazek.

Na obr. 5 je znázorněn zobrazovací režim elektronového rastrovacího mikroskopu, při kterém jsou imerzní objektivová čočka a blízká objektivová čočka neaktivní a vzdálená objektivová čočka aktivní.

Na obr. 6 je znázorněn zobrazovací režim elektronového rastrovacího mikroskopu, při kterém je imerzní objektivová čočka aktivní a blízká i vzdálená objektivová čočka neaktivní.

Na obr. 7 je znázorněn zobrazovací režim elektronového rastrovacího mikroskopu, při kterém jsou imerzní objektivová čočka a vzdálená objektivová čočka aktivní a blízká objektivová čočka neaktivní.

Na obr. 8 je znázorněn zobrazovací režim elektronového rastrovacího mikroskopu, při kterém jsou imerzní objektivová čočka a blízká objektivová čočka aktivní a vzdálená objektivová čočka neaktivní.

Na obr. 9 je znázorněn zobrazovací režim elektronového rastrovacího mikroskopu, při kterém jsou imerzní objektivová čočka, blízká objektivová čočka i vzdálená objektivová čočka aktivní.

Na obr. 10 je znázorněn zobrazovací režim elektronového rastrovacího mikroskopu, při kterém jsou imerzní objektivová čočka a vzdálená objektivová čočka neaktivní a blízká objektivová čočka aktivní.

Na obr. 11 je znázorněn zobrazovací režim elektronového rastrovacího mikroskopu, při kterém je imerzní objektivová čočka neaktivní a blízká objektivová čočka i vzdálená objektivová čočka aktivní.

- 5 Na obr. 12 je znázorněn zobrazovací režim elektronového rastrovacího mikroskopu, při kterém je imerzní objektivová čočka aktivní, blízká a vzdálená objektivová čočka neaktivní, a kdy kondenzorové čočky nevytváří reálné křižště elektronového svazku.

10 Příklady uskutečnění vynálezu

Uspořádání prvků rastrovacího elektronového mikroskopu se dvěma kondenzorovými čočkami a třemi objektivovými čočkami je znázorněno na obr. 1. Zdroj 1 primárních elektronů generuje svazek primárních elektronů. Za zdrojem 1 primárních elektronů jsou dále směrem k držáku 9 vzorku řazeny magnetické kondenzorové čočky 2a a 2b. Mezi kondenzorovými čočkami 2a a 2b je dále řazena aperturní clona 3. Za kondenzorovými čočkami 2a a 2b ve směru k držáku 9 vzorku následuje vzdálená objektivová čočka 4. Tato vzdálená objektivová čočka je elektromagnetická, konvenční s axiální mezerou mezi pólovými nástavci. Pod vzdálenou objektivovou čočkou 4 následuje anulární detektor 7 signálních elektronů. Detektor 7 signálních elektronů může být například scintilačního nebo polovodičového typu. Za detektorem 7 signálních elektronů následuje blízká objektivová čočka 6. Blízká objektivová čočka 6 je elektromagnetická, konvenční s axiální mezerou mezi dvěma pólovými nástavci. Kteroukoliv z uvedených elektromagnetických čoček (kondenzorové čočky 2a a 2b, vzdálená objektivová čočka 4 a blízká objektivová čočka 6 lze nahradit elektrostatickými čočkami, například typu einzel lens tedy čočkami, z nichž vychází 25 fokusovaný svazek se stejnou energií, s jakou do čočky vchází. Jednpatrové rastrovací cívkou 5 ovládající pohyb primárního elektronového svazku po povrchu vzorku, jsou umístěny uvnitř blízké objektivové čočky 6. Pod blízkou objektivovou čočkou 6 je umístěna imerzní objektivová čočka 8. Pod imerzní objektivovou čočkou 8 je umístěn držák 9 vzorku uzpůsobený k umístění vzorku. V tomto příkladu provedení je imerzní objektivová čočka 8 imerzní, jednopólová, alternativně však může být i imerzní dvoupólová s radiální mezerou mezi pólovými nástavci. Blízká dvoupólová čočka 6 a imerzní objektivová čočka 8 jsou v tomto provedení vzájemně uspořádány tak, že mají propojené magnetické obvody, tedy že dolní magnetický pól blízké dvoupólové objektivové čočky 6 je současně magnetickým pólem imerzní objektivové čočky 8.

35 Primární elektronový svazek generovaný zdrojem 1 primárních elektronů v tomto uspořádání prochází nejprve kondenzorovou čočkou 2a, která spolu s aperturní clonou 3 slouží k nastavení proudu elektronů, prošlých na vzorek. Druhá kondenzorová čočka 2b pak může mít např. funkci udržování pevné polohy křižště se změnou proudu prošlého aperturní clonou 3. Primární elektronový svazek následně prochází vzdálenou objektivovou čočkou 4. V případě že je tato čočka 40 aktivní lze s výhodou díky její velké vzdálenosti od držáku 9 vzorku dosáhnout velkého zorného pole a velké hloubky ostrosti. Vzdálená objektivová čočka 4 je tedy určena pro zobrazení vhodné k navigaci na vzorku a zkoumaný vzorek také není ponořen do elektromagnetického pole vytvářeného vzdálenou objektivovou čočkou 4. Tuto čočku lze s výhodou použít pro pozorování vzorků, pro které je přítomnost elektromagnetického pole v jejich okolí nežádoucí, například vzorků z magnetických materiálů. Primární elektronový svazek dále prochází blízkou objektivovou čočkou 6. Pokud je tato čočka aktivní, zobrazuje menší zorné pole než vzdálená objektivová čočka 4, avšak díky své menší vzdálenosti od držáku 9 vzorku má lepší rozlišení než vzdálená objektivová 45 čočka 4. Následně primární elektronový svazek prochází ve směru k držáku 9 vzorku imerzní objektivovou čočkou 8. Tato imerzní objektivová čočka 8, pokud je aktivní, generuje elektromagnetické pole, do něhož je ponořen zkoumaný vzorek. Díky tomu umožňuje dosažení ještě 50 lepšího rozlišení než blízká objektivová čočka. Po dopadu primárního elektronového svazku na vzorek umístěný na držáku 9 vzorku dochází k emisi signálních částic, které jsou detekovány pomocí detektoru 7.

Aktivitu jednotlivých čoček lze vzájemně kombinovat a tím dosáhnout více zobrazovacích režimů. Pomocí rastrovacích cívek 5 lze měnit polohu pívotu a tím dosáhnout další optimalizace jednotlivých zobrazovacích režimů. Přepínání různých zobrazovacích režimů je dále výhodné pro postupné zkoumání množství vzorků, které jsou například umístěny na jednom otočném držáku 9 vzorku. Takové vzorky mohou být například určeny k opracování i k pozorování, mohou mít různou povrchovou strukturu, mohou být magnetické i nemagnetické a mohou být určeny k množství různých druhů pozorování a analýz, jako jsou detekce charakteristického rentgenového záření (Energy/Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy, zkráceně EDS a WDS), elektronová difrakce (Electron Backscatter Diffraction, zkráceně EBSD), detekce katodoluminiscenčního záření (Cathodo Luminescence, zkráceně CL) a další. Podle potřeby se poté zapínají a vypínají jednotlivé objektivové čočky.

Na obr. 2 je znázorněn další příklad elektronového rastrovacího mikroskopu. Na rozdíl od obr. 1 elektronový rastrovací mikroskop obsahuje jednu kondenzorovou čočku 2. Aperturní clona 3 je umístěna pod kondenzorovou čočkou 2. Následuje anulární detektor 7 signálních elektronů. Zařízení dále obsahuje dvoupatrové rastrovací cívký 5, které jsou umístěny pod vzdálenou objektivovou čočkou 4. Blízká objektivová čočka 6 a imerzní objektivová čočka 8 mají částečně shodné magnetické obvody, ale každá z čoček má vlastní pólové nástavce. Držák 9 vzorku je uzpůsoben k přivedení napětí na vzorek. Aplikované napětí vytvoří elektrostatické pole mezi držákem 9 vzorku a pólovým nástavcem imerzní objektivové čočky 8, které může ovlivňovat primární elektronový svazek. Přivedením záporného napětí na vzorek se vytvoří elektrostatické pole zpomalující primární elektronový svazek. To umožňuje snížení optických vad tubusu elektronového rastrovacího mikroskopu a dosáhnout lepšího rozlišení. Na držák 9 vzorku lze také alternativně přivést kladné napětí.

Na obr. 3 je znázorněn další příklad provedení rastrovacího elektronového mikroskopu. Rastrovací elektronový mikroskop obsahuje aperturní clonu 3 umístěnou pod kondenzorovými čočkami 2a a 2b. Vzdálená objektivová čočka 4, blízká objektivová čočka 6 a imerzní objektivová čočka 8 jsou vzájemně oddělené a nemají propojené magnetické obvody. Imerzní objektivová čočka 8 je dvoupólová s radiální mezerou mezi pólovými nástavci. Dále zařízení obsahuje rastrovací cívký 5 umístěné mezi blízkou objektivovou čočkou 6 a vzdálenou objektivovou čočkou 4 a detektor 7 signálních elektronů umístěný z boku. Stejně jako v případě anulárního detektoru může být tento detektor různého typu, případně lze použít více detektorů v umístění z boku nebo v kombinaci s anulárními detektory.

Rastrovací elektronové mikroskopy zobrazené na obrázcích 1, 2 a 3 jsou jenom příkladem uskutečnění předkládaného vynálezu. Běžnému odborníkovi znalému oboru mohou být zřejmé i další možné kombinace výše popsaných provedení. Zařízení je také možné rozšířit o další součásti používané v elektronových rastrovacích mikroskopech jako například monochromátory, korektory optických vad a podobně.

Na obrázku 4 je náčrt zařízení zahrnující pracovní vakuovou komoru 10, ve které jsou umístěny rastrovací elektronový mikroskop 11, popsaný výše, zařízení 12 využívající fokusovaný iontový svazek a držák 9 vzorku. Vzájemná poloha optických os rastrovacího elektronového mikroskopu 11 a zařízení 12 využívajícího fokusovaný iontový svazek může být koincidenční, paralelní nebo jiné.

Na obr. 5 je náčrt zobrazovacího režimu, který se běžně používá v první fázi zkoumání povrchu vzorku, kdy jsou imerzní objektivová čočka 8 a blízká objektivová čočka 6 neaktivní a aktivní je pouze vzdálená objektivová čočka 4. Tento zobrazovací režim umožňuje zobrazení velké oblasti zkoumaného povrchu vzorku nebo dokonce několika vzorků umístěných na držáku 9 vzorku najednou a velkou hloubku ostroty, bez přítomnosti magnetického pole na vzorku.

Na obr. 6, 7, 8 a 9 jsou náčrtý zobrazovacích režimů s aktivní imerzní objektivovou čočkou 8. V případě, že jsou blízká objektivová čočka 6 a vzdálená objektivová čočka 4 neaktivní a je ak-

5
10
15
20
25
30

ktivní pouze imerzní objektivová čočka 8, dochází ke stavu s velkým rozlišením zobrazovaného povrchu vzorku a vzorek je ponořen v magnetickém poli. Nevýhodou je malá hloubka ostroty při pozorování a malé zorné pole. Tato možnost je znázorněna na obr. 6. Na obr. 7 je zobrazen režim, kdy lze dále fokusovat elektronový primární svazek kombinací aktivní imerzní objektivové čočky 8 s aktivní vzdálenou objektivovou čočkou 4. Výhodou tohoto režimu je vysoké rozlišení při velkém rozsahu proudů primárního elektronového svazku. V případě dodatečného aktivování blízké objektivové čočky 6 (obr. 9) je navíc umožněno dynamické ostření, například v průběhu rastrování primárním svazkem po povrchu nakloněného vzorku. Na obr. 8 je zobrazen režim s aktivní imerzní objektivovou čočkou 8 a blízkou objektivovou čočkou 6. Blízká objektivová čočka 6 může plnit funkci optimalizace aperturního úhlu nebo vytváří sbíhavý svazek. Výhodou vytváření sbíhavého svazku je možnost dosažení nižší pracovní vzdálenosti než v případě samostatně aktivní imerzní čočky 8. Dodatečnou aktivací vzdálené objektivové čočky 4 lze navíc dosáhnout optimalizace aperturního úhlu. Na obr. 9 je znázorněna výše uvedená kombinace zapnutých objektivových čoček 4, 6, 8.

Na obr. 10 a 11 jsou nákresy zobrazovacích režimů s neaktivní imerzní objektivovou čočkou 8 a aktivní blízkou objektivovou čočkou 6. V tomto případě lze zkoumat povrchy vzorků, které nemohou být vloženy do magnetického pole. Použití imerzní objektivové čočky 8 je například nevhodné při pozorování magnetických materiálů nebo při současné práci s fokusovaným iontovým svazkem. V tomto režimu může mít vzdálená objektivová čočka 8 funkci optimalizace aperturního úhlu a blízká objektivová čočka 6 funkci ostření na vzorek. Poloha pivotu rastrování je v tomto případě v hlavní rovině blízké objektivové čočky 6. Tím lze dosáhnout dobrého rozlišení při velkém rozsahu proudů ve svazku. Pokud má vzdálená objektivová čočka 4 funkci ostření na vzorek a blízká objektivová čočka 6 funkci ohybu svazku a vytváření pivotu rastrovacích cívek 5, je první pivot umístěn nad blízkou objektivovou čočkou 6 a druhý pivot se vytváří pod ní tak, aby úhel rozkmitu svazku byl co největší. Výhodou tohoto režimu je velká hloubka ostroty a maximální zorné pole. Pokud má vzdálená objektivová čočka 4 funkci vytváření křížového a blízká objektivová čočka 6 funkci vytváření rovnoběžného svazku a jeho ohyb do zkoumaného místa na vzorku, vytváří se pivot v rovině vzorku. Výhodou tohoto režimu je možnost analýzy krystalových rovin, kdy na jedno místo na vzorku dopadá rovnoběžný svazek pod proměnným úhlem.

Na obrázku 12 je zobrazen režim, kdy kondenzorové čočky 2 nevytvářejí reálné křížové primárního elektronového svazku, pouze mění jeho rozbíhavost tak, aby optimalizovaly úhel primárního elektronového svazku procházejícího aperturou 3. V tomto režimu je také možné kondenzorové čočky 2 zcela vypnout.

Navrhovaný vynález umožňuje používání objektivových čoček podle požadovaných podmínek. Je tedy zřejmé, že lze různě kombinovat zapnuté objektivové čočky, nebo je možné objektivové čočky využívat samostatně.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Rastrovací elektronový mikroskop obsahující zdroj (1) primárních elektronů, alespoň jednu kondenzorovou čočku (2, 2a, 2b), aperturní clonu (3), rastrovací cívkou (5), alespoň jeden detektor (7) signálních elektronů, držák (9) vzorku, vzdálenou objektivovou čočku (4) umístěnou mezi kondenzorovou čočkou (2, 2a, 2b) a držákem (9) vzorku, elektromagnetickou imerzní objektivovou čočku (8) umístěnou mezi vzdálenou objektivovou čočkou (4) a držákem (9) vzorku, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že dále obsahuje blízkou objektivovou čočku (6) umístěnou mezi vzdálenou objektivovou čočkou (4) a imerzní objektivovou čočkou (8).

2. Rastrovací elektronový mikroskop podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že kterákoliv čočka ze skupiny kondenzorová čočka (2, 2a, 2b), vzdálená objektivová čočka (4) a blízká objektivová čočka (6) je provedena jako elektromagnetická.
- 5 3. Rastrovací elektronový mikroskop podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že kterákoliv čočka ze skupiny kondenzorová čočka (2, 2a, 2b), vzdálená objektivová čočka (4) a blízká objektivová čočka (6) je provedena jako elektrostatická.
- 10 4. Rastrovací elektronový mikroskop podle kteréhokoliv z nároků 1 až 3, **vyznačující se tím**, že imerzní objektivová čočka (8) je jednopólová.
- 5 5. Rastrovací elektronový mikroskop podle kteréhokoliv z nároků 1 až 3, **vyznačující se tím**, že imerzní objektivová čočka (8) je dvoupólová.
- 15 6. Rastrovací elektronový mikroskop podle kteréhokoliv z nároků 1 až 5, **vyznačující se tím**, že držák (9) vzorku je uzpůsoben pro přivedení napětí na vzorek.
- 20 7. Rastrovací elektronový mikroskop podle kteréhokoliv z nároků 1 až 6, **vyznačující se tím**, že rastrovací cívky (5) jsou umístěny nad blízkou objektivovou čočkou (6).
8. Rastrovací elektronový mikroskop podle nároku 7, **vyznačující se tím**, že rastrovací cívky (5) jsou umístěny nad vzdálenou objektivovou čočkou (4).
- 25 9. Rastrovací elektronový mikroskop podle kteréhokoliv z nároků 1 až 6, **vyznačující se tím**, že rastrovací cívky (5) jsou umístěny pod blízkou objektivovou čočkou (6).
10. Rastrovací elektronový mikroskop podle kteréhokoliv z nároků 1 až 9, **vyznačující se tím**, že je dále vybaven zařízením s fokusovaným iontovým svazkem.
- 30 11. Rastrovací elektronový mikroskop podle kteréhokoliv z nároků 1 až 10, **vyznačující se tím**, že kterákoliv čočka ze skupiny vzdálená objektivová čočka (4), blízká objektivová čočka (6) a imerzní objektivová čočka (8) může být aktivní a lze ji ovládat nezávisle na ostatních čočkách.
- 35 12. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle kteréhokoliv z nároků 1 až 11, **vyznačující se tím**, že kondenzorová čočka (2, 2a, 2b) je aktivní tak, že primární elektrony nevytvářejí reálné křižště mezi kondenzorovou čočkou (2, 2a, 2b) a imerzní objektivovou čočkou (8).
- 40 13. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle kteréhokoliv z nároků 1 až 12, **vyznačující se tím**, že zahrnuje režim s neaktivní, imerzní objektivovou čočkou (8) a s aktivní vzdálenou objektivovou čočkou (4).
- 45 14. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle nároku 13, **vyznačující se tím**, že je dále neaktivní blízká objektivová čočka (6).
15. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle kteréhokoliv z nároků 1 až 12, **vyznačující se tím**, že zahrnuje režim s aktivní imerzní objektivovou čočkou (8).
- 50 16. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle nároku 15, **vyznačující se tím**, že je dále neaktivní vzdálená objektivová čočka (4) a neaktivní blízká objektivová čočka (6).

17. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle nároku 15, **v y z n a ě u j í - c í s e t í m**, že je dále aktivní vzdálená objektivová čočka (4) a neaktivní blízká objektivová čočka (6).
- 5 18. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle nároku 15, **v y z n a ě u j í - c í s e t í m**, že je dále neaktivní vzdálená objektivová čočka (4) a aktivní blízká objektivová čočka (6).
- 10 19. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle nároku 15, **v y z n a ě u j í - c í s e t í m**, že je dále aktivní vzdálená objektivová čočka (4) a aktivní blízká objektivová čočka (6).
- 15 20. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle kteréhokoliv z nároků 1 až 12, **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že zahrnuje režim s neaktivní imerzní objektivovou čočkou (8) a s aktivní blízkou objektivovou čočkou (6).
21. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle nároku 20, **v y z n a ě u j í - c í s e t í m**, že je dále neaktivní vzdálená objektivová čočka (4).
- 20 22. Způsob provozu rastrovacího elektronového mikroskopu podle nároku 20, **v y z n a ě u j í - c í s e t í m**, že je dále aktivní vzdálená objektivová čočka (4).

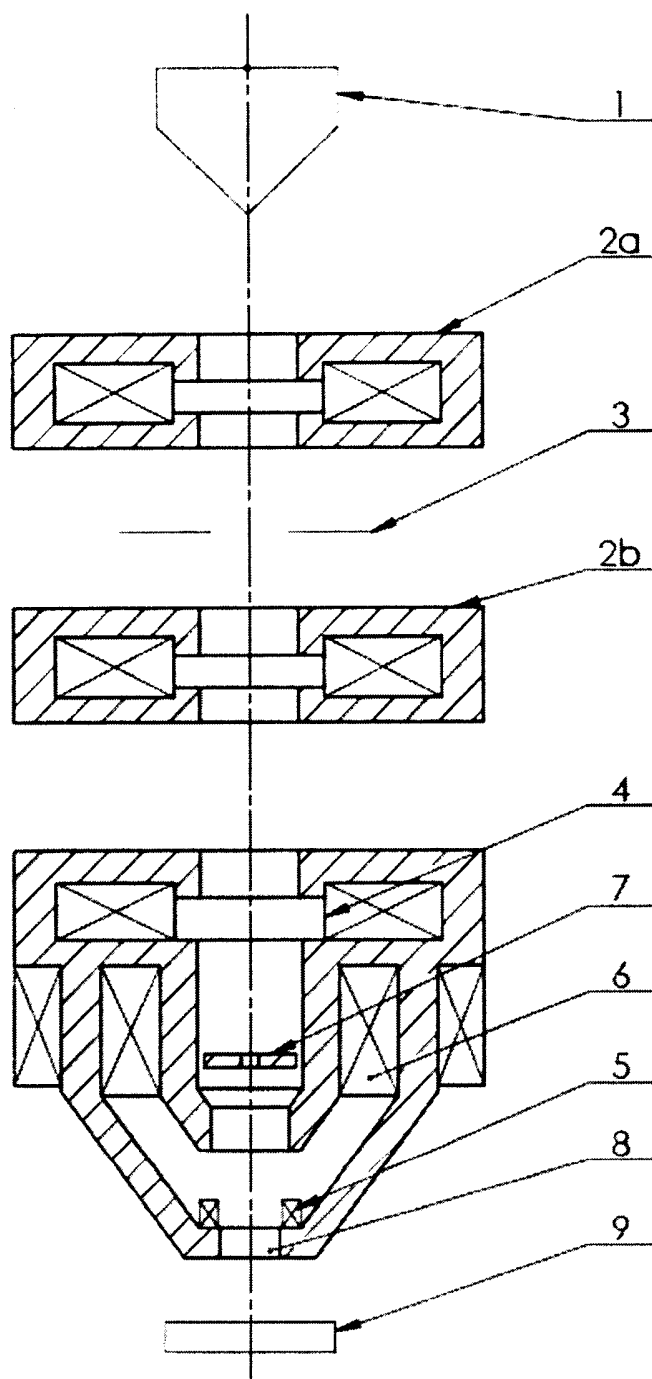
25

12 výkresů

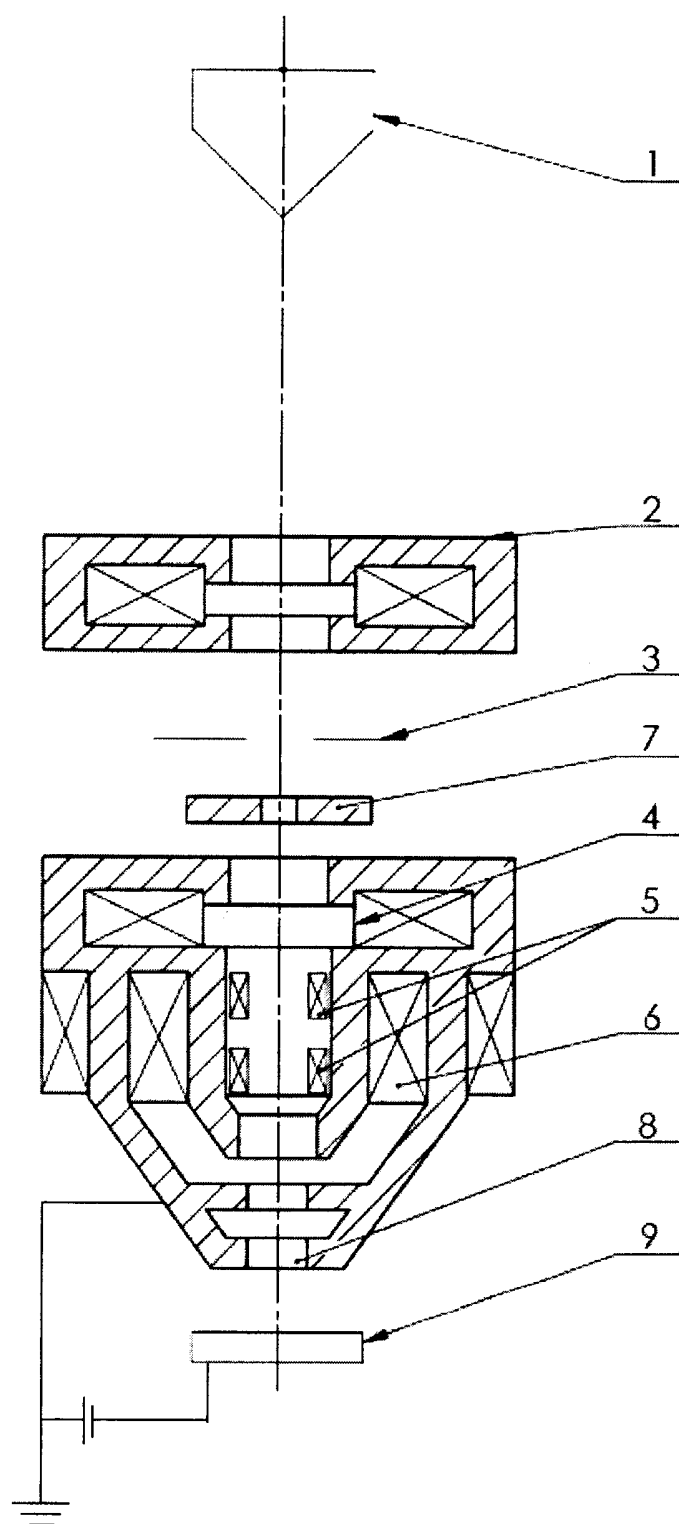
30

Seznam vztahových značek:

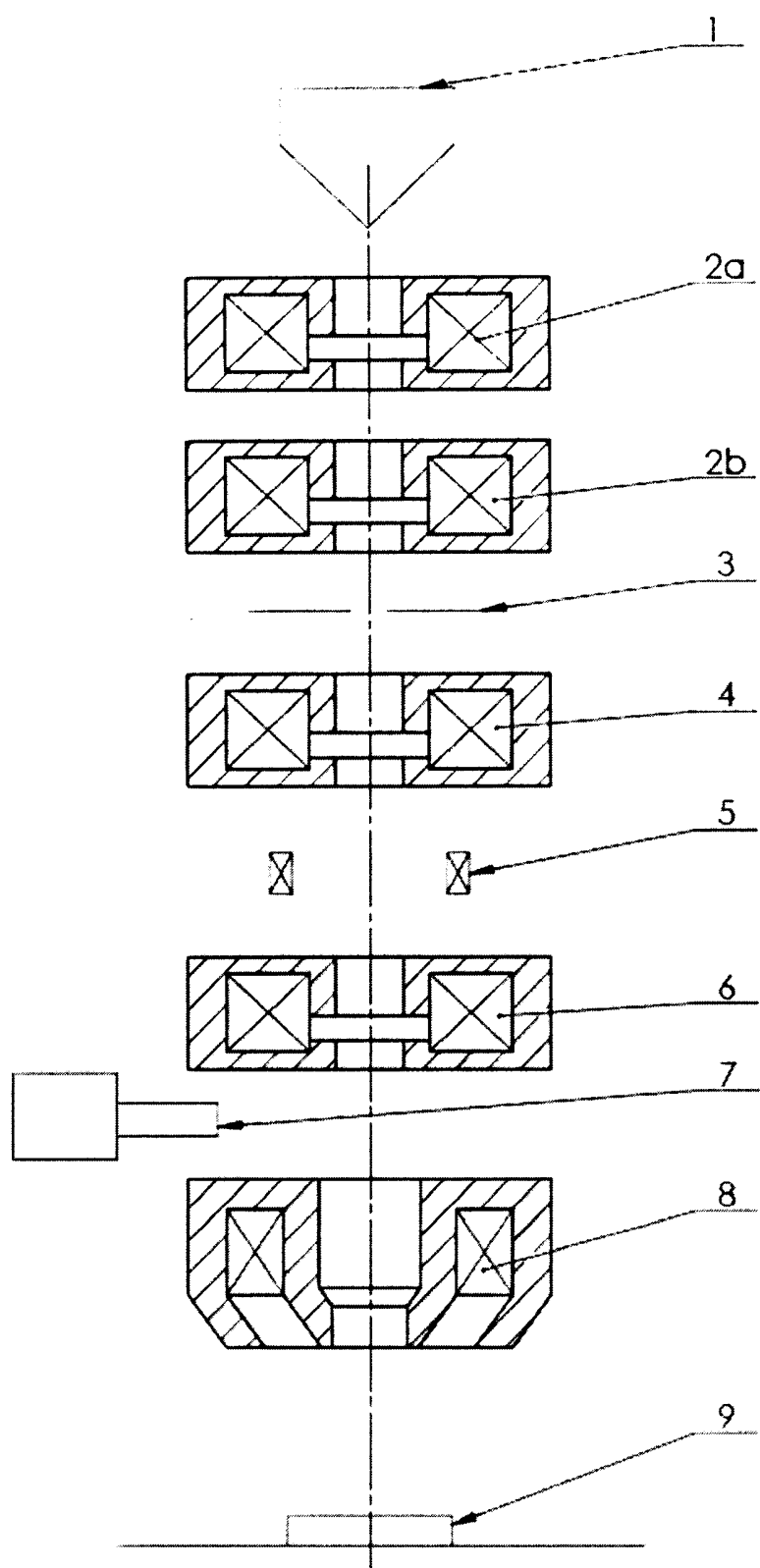
- 1 - Zdroj primárních elektronů
 2 - Kondenzorové čočky (a, b)
 3 - Aperturní clona
 35 4 - Vzdálená objektivová čočka
 5 - Rastrovací cívky
 6 - Blízká objektivová čočka
 7 - Detektor signálních elektronů
 8 - Imerzní objektivová čočka
 40 9 - Držák vzorku
 10 - Vakuová komora
 11 - Rastrovací elektronový mikroskop
 12 - Zařízení využívající fokusovaný iontový svazek



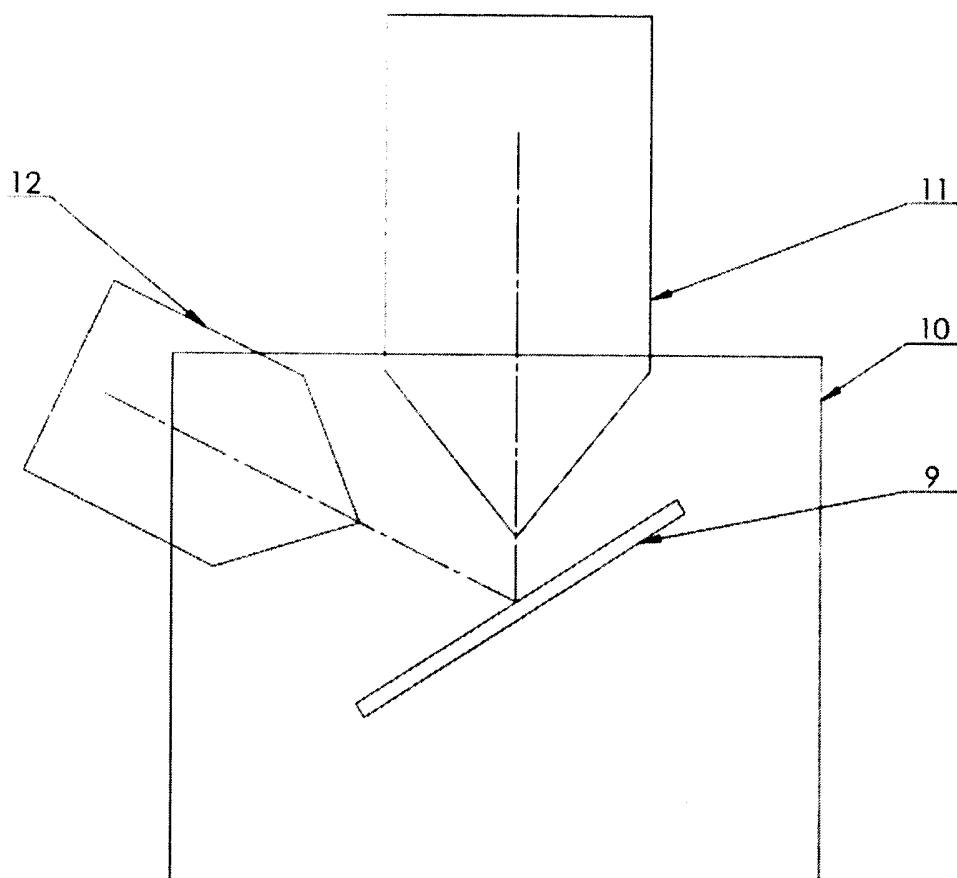
Obr. 1



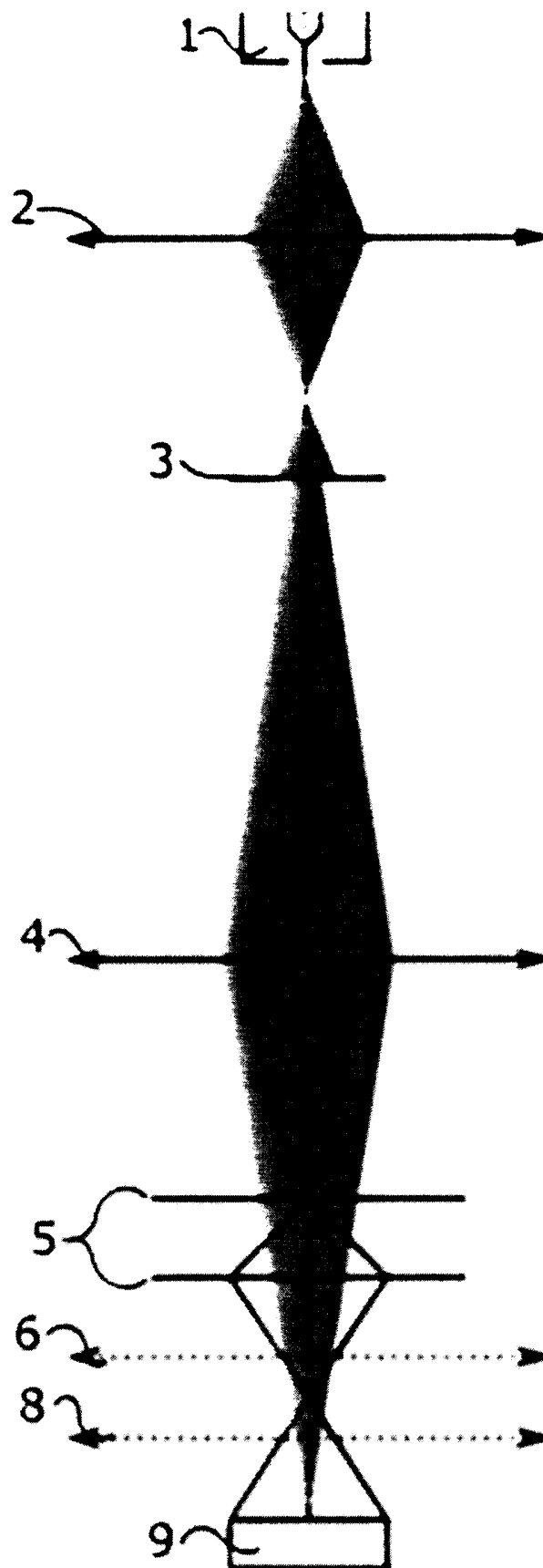
Obr. 2



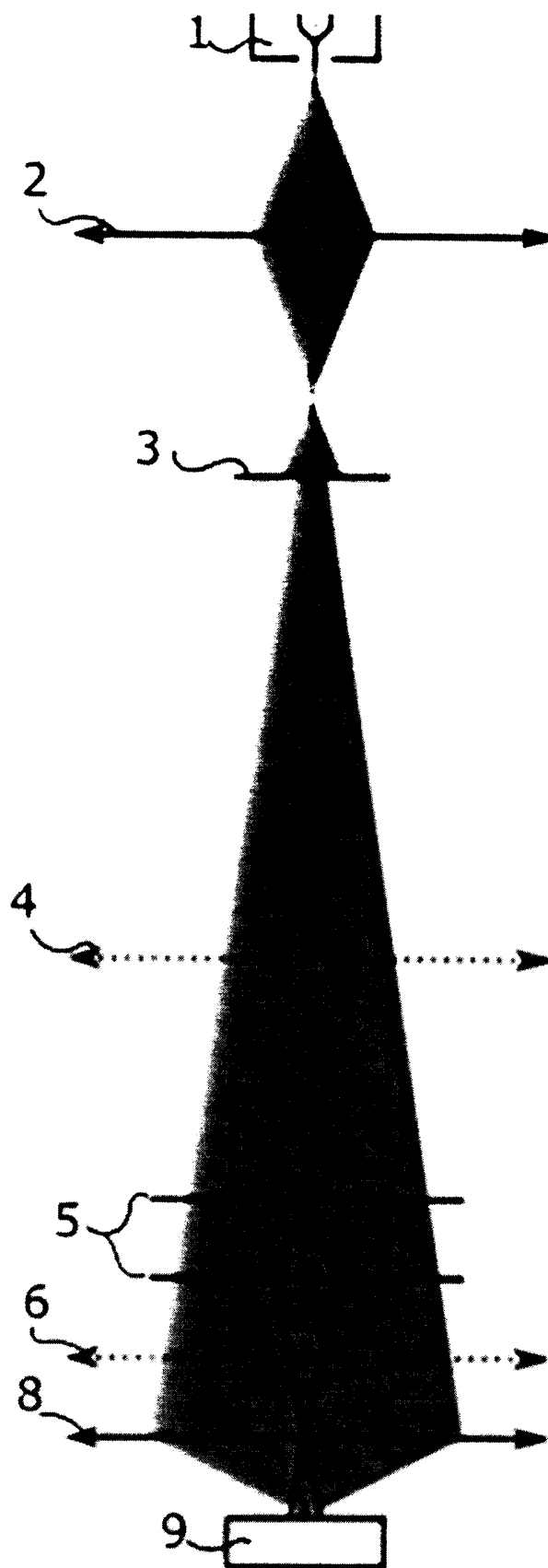
Obr. 3



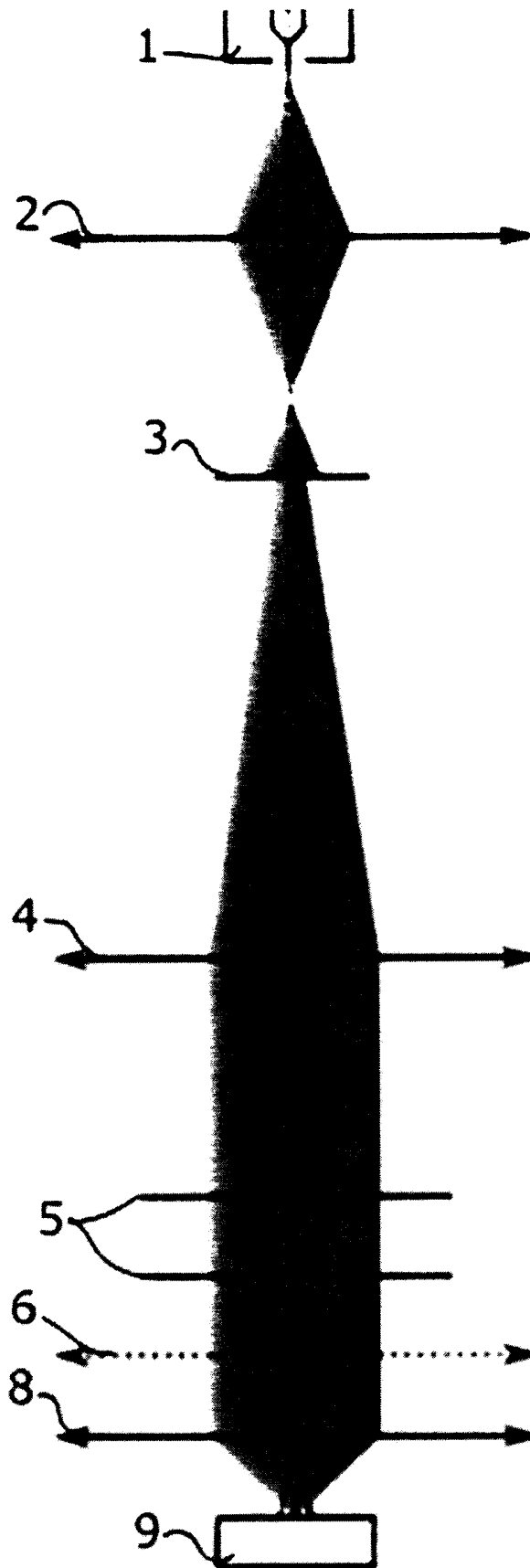
Obr. 4



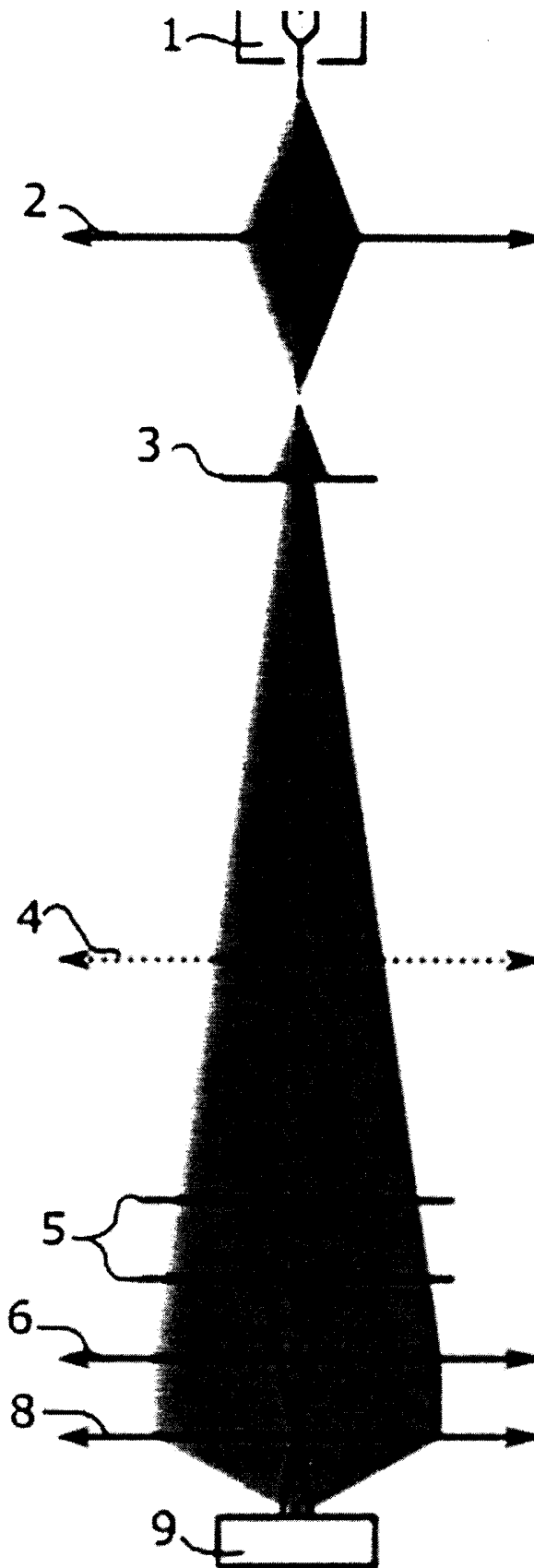
Obr. 5



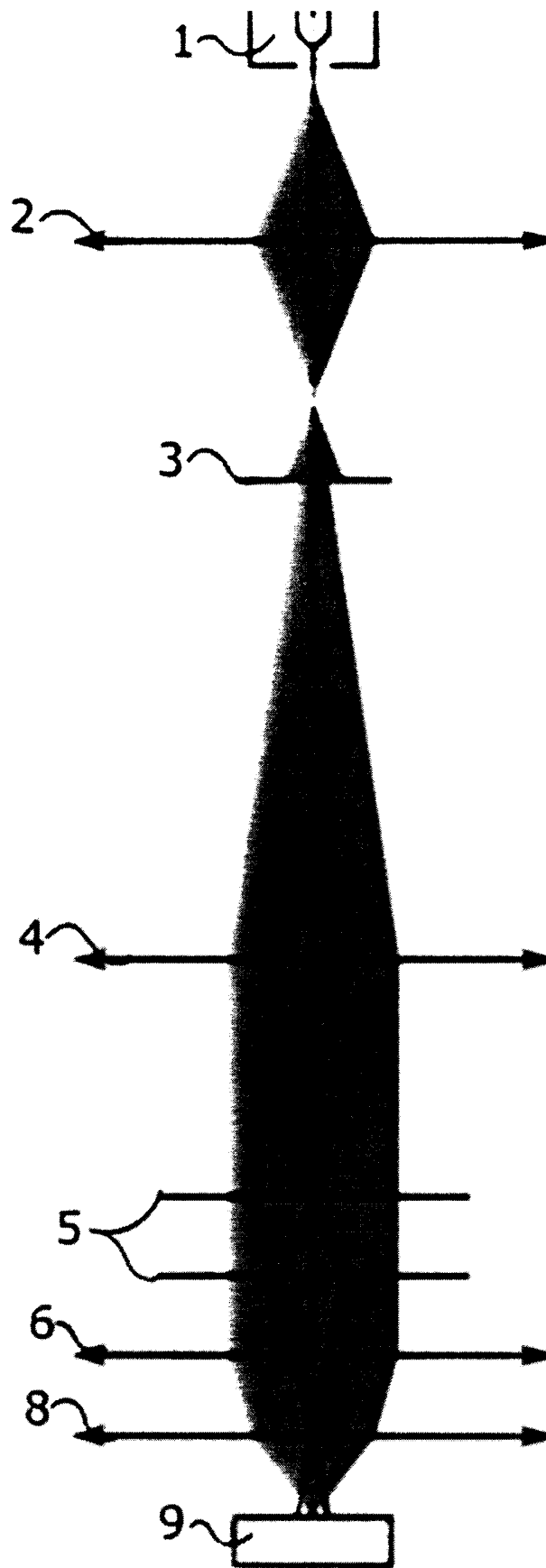
Obr. 6



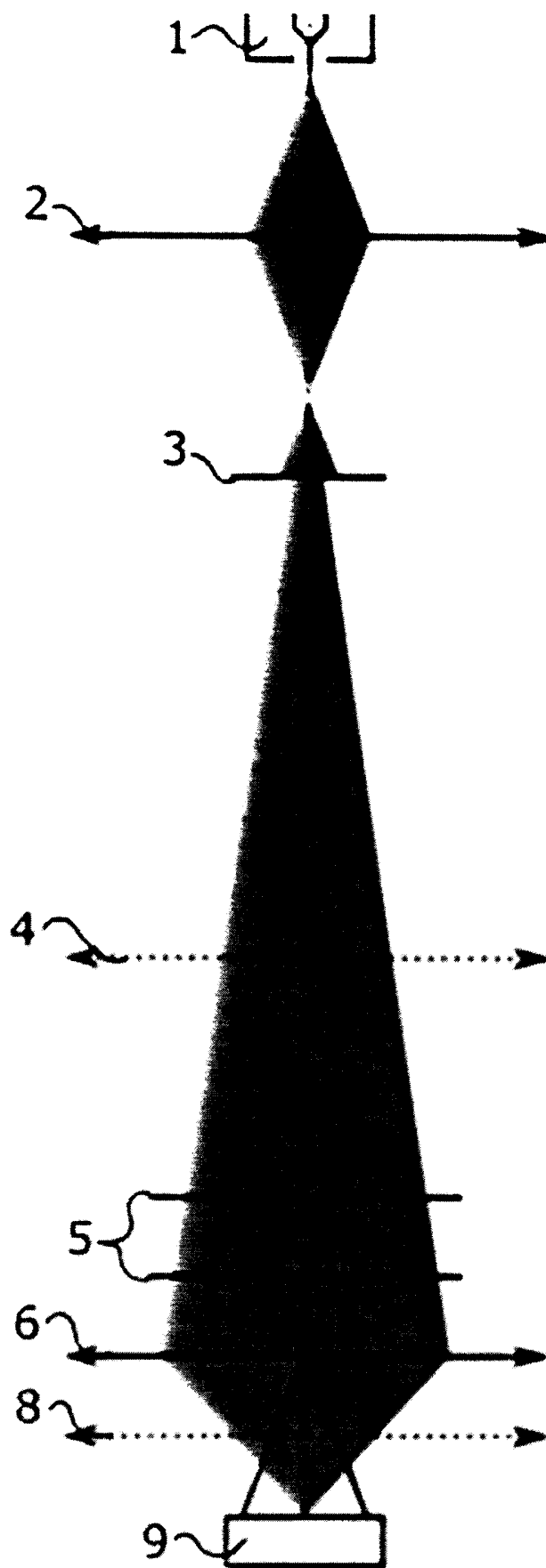
Obr. 7



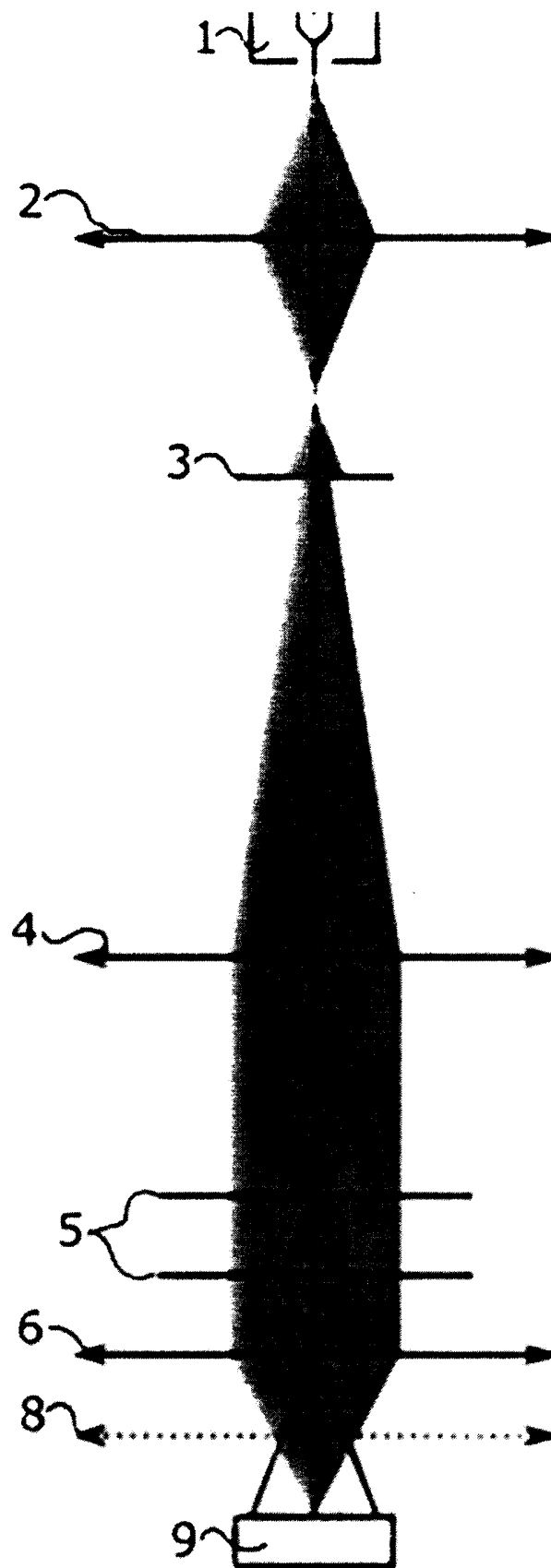
Obr. 8



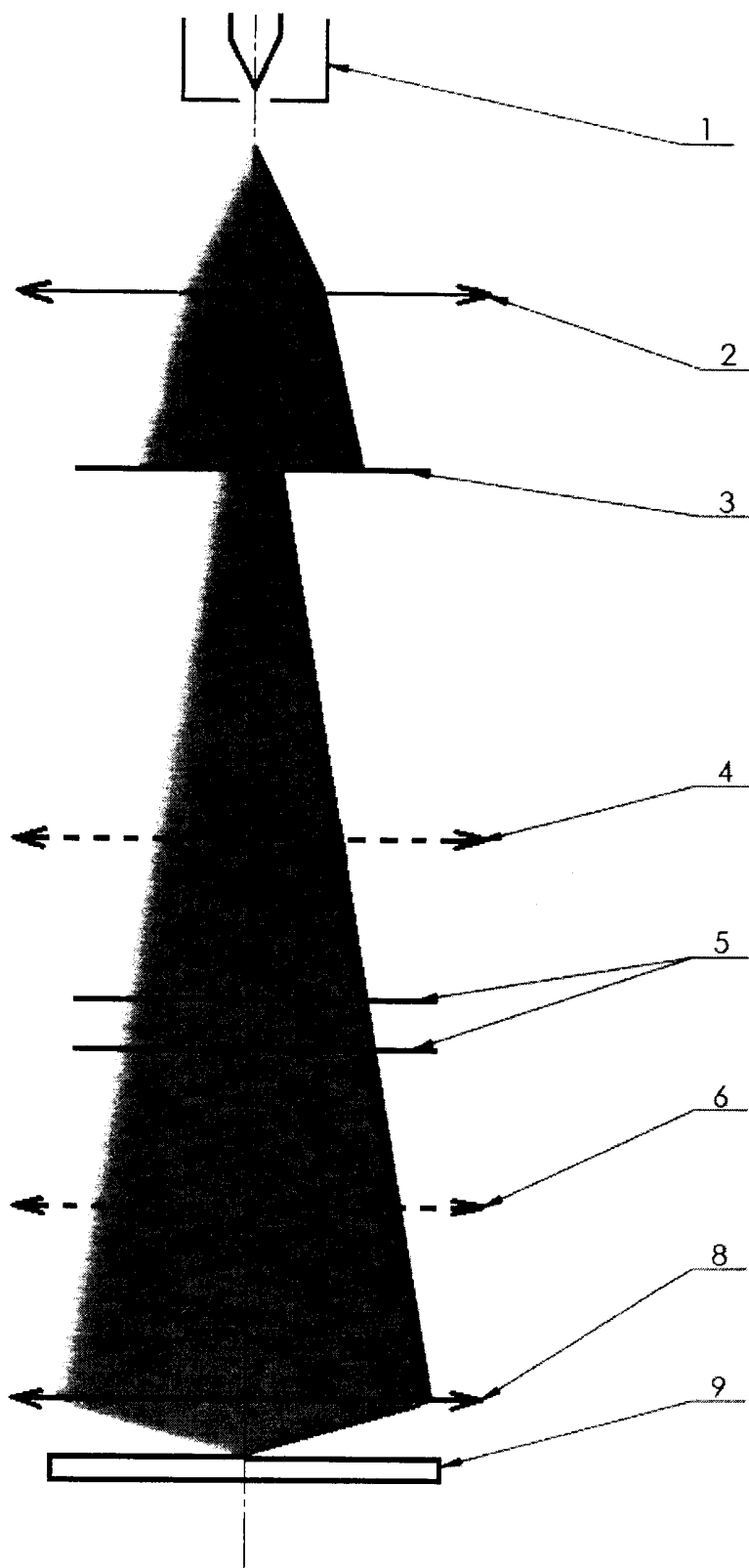
Obr. 9



Obr. 10



Obr. 11



Obr. 12