

UŽITNÝ VZOR

(11) Číslo dokumentu:

36 751

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

H01J 49/02 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2022-40523**
(22) Přihlášeno: **25.11.2022**
(47) Zapsáno: **17.01.2023**

- (73) Majitel:
Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, CZ
Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Brno,
Královo Pole, CZ
- (72) Původce:
RNDr. Thuy Dung Tran, Ph.D., Praha 8, Střížkov,
CZ
Mgr. Lukáš Slodička, Ph.D., Olomouc, Lošov, CZ
Ing. Ondřej Číp, Ph.D., Brno, Nový Lískovec, CZ
- (74) Zástupce:
KANIA, SEDLÁK, SMOLA, s.r.o., Mendlovo
náměstí 907/1a, 603 00 Brno, Staré Brno

- (54) Název užitého vzoru:
**Směrový detektor fluorescence z iontů v
Paulově pasti**

CZ 36751 U1

Směrový detektor fluorescence z iontů v Paulově pasti

Oblast techniky

5

Technické řešení se týká směrového detektoru fluorescence z iontů v Paulově pasti, který umožňuje zefektivnění detekce signálu emitovaného ionty zachycenými v Paulově pasti ve volném prostoru.

10

Dosavadní stav techniky

Atomární ionty zachycené v Paulových pastech představují klíčový stavební prvek široké škály zařízení v oblasti kvantové sensoriky, metrologie, a zpracování informace. Tato zařízení využívají extrémní izolace iontů od okolního prostředí, což umožňuje jejich stabilní koherentní manipulaci. Klíčovým limitujícím parametrem pro další zefektivnění těchto zařízení je relativně nízká detekční účinnost světla emitovaného ionty ve volném prostoru, kde celková absolutní účinnost detekce fotonů z iontů dosahuje typicky jenom jednotky procent. Tato účinnost je omezená konečnou numerickou aperturou detekčních optických sestav. Pracovní vzdálenost detekčních optických sestav sestávajících z dielektrických komponent musí být řádově v jednotkách centimetrů pro zajištění stabilního potenciálu Paulovy pasti a nízkých rychlostí ohřevu iontů, což klade extrémně vysoké požadavky na realizaci refrakčních detekčních optických sestav s numerickou aperturou $NA > 0,6$. Častý požadavek na implementaci detekčních optických sestav vně vakuových komor navíc implikuje ještě další navýšení pracovní vzdálenosti a odpovídající snížení efektivní numerické apertury. Pokusy s parabolickými a sférickými reflexními detekčními optickými sestavami potvrdily jejich extrémní citlivost na residuální optické aberace a v praktických realizacích dosud nevedly k významnému překonání účinností dosažených refrakčními detekčními optickými sestavami. I když vazba iontů do optických rezonátorů s vysokou jemností a kooperativitou slibuje samotné dosažení účinnosti kolekce emitovaného fotonu do dobře definovaného gaussovského prostorového módu, odpovídající režim interakce světla a iontu vede v režimu realistických parametrů rezonátorů k velmi nízké četnosti emisí fotonu v řádu desítek tisíc za sekundu. Pro porovnání, emise světla z iontu zachyceného ve volném prostoru dosahuje desítek milionů fotonů za sekundu. Účinnost kolekce je tedy v případě vazby do optického rezonátoru kompenzována extrémně nízkým počtem detekovatelných fotonů, což má za přímý důsledek extrémně nízkou rychlost kvantových výpočetních protokolů a stabilitu metrologických aplikací. To zdůrazňuje význam efektivní kolekce světla z iontů ve volném prostoru.

Podstata technického řešení

40

Nevýhody dosavadního stavu techniky jsou eliminovány směrovým detektorem fluorescence iontů v Paulově pasti, který obsahuje

- Paulovu past, která obsahuje radiální elektrody uspořádané s rovnoměrným úhlovým rozestupem kolem osy Paulovy pasti, první axiální elektrodu a druhou axiální elektrodu, které jsou uspořádány navzájem protilehle na ose Paulovy pasti,

- vakuovou komoru, ve které je uspořádaná Paulova past, přičemž tato vakuová komora má první okénko, které je uspořádáno kolmo na osu Paulovy pasti a je přivrácené k první axiální elektrodě, a druhé okénko, které je přivrácené ke štěrbině mezi druhou axiální elektrodou a radiálními elektrodami a/nebo ke štěrbině mezi navzájem sousedícími radiálními elektrodami,

- kameru uspořádanou vně vakuové komory a

55

- plan-konvexní čočku uspořádanou mezi prvním okénkem a kamerou pro fokusaci záření vystupujícího prvním okénkem do obrazové roviny kamery,

5 přičemž první axiální elektroda obsahuje první optickou průchodku, která je uspořádaná na ose a jejíž vstup je přivrácený k vnitřnímu prostoru Paulovy pasti a výstup je přivrácený k prvnímu okénku.

10 Směrový detektor s výhodou dále obsahuje interferenční filtr uspořádaný mezi plan-konvexní čočkou a kamerou.

Rovněž je výhodné, když směrový detektor dále obsahuje zdroj stejnosměrného napětí, který je propojený s axiálními elektrodami.

15 Směrový detektor přednostně dále obsahuje zdroj radiofrekvenčního napětí, který je propojený s radiálními elektrodami.

S výhodou směrový detektor dále obsahuje první diodový laser pro vysílání laserového záření druhým okénkem do Paulovy pasti do oblasti osy.

20 Směrový detektor přednostně dále obsahuje druhý diodový laser pro vysílání laserového záření druhým okénkem do Paulovy pasti oblasti osy.

S výhodou je kamera typu EM-CCD.

25 Vakuová komora přednostně obsahuje třetí okénko a druhá axiální elektroda obsahuje druhou optickou průchodku, která je uspořádaná na ose a jejíž vstup je přivrácený k vnitřnímu prostoru Paulovy pasti a výstup je přivrácený k třetímu okénku.

30 Rovněž je výhodné, když je vzájemná vzdálenost axiálních elektrod 4,5 mm a vzájemná vzdálenost navzájem protilehlých radiálních elektrod je 1,13 mm.

35 Optimalizace využívá interferenci koherentního signálu z iontů v dalekém poli s cílem maximalizace signálu v daném směru pro pevně daný prostorový úhel. Pro optimalizaci byl uvažován řetízek iontů - dipólových emitorů na stejném coulombickém potenciálu. Numerické simulace prokázaly významné zvýšení detekční účinnosti světla v optických systémech s realistickou - malou numerickou aperturou a na efektivní řádové navýšení účinnosti detekce postačující řetízky obsahující méně než deset iontů. Pilotní testovací použití experimentálního zařízení pro optimalizaci demonstrovalo významné zvýšení emise i přes reálný konečný pohyb iontů v Paulově pasti po dopplerovském laserovém zchlazení.

40

Objasnění výkresů

45 Technické řešení je dále podrobněji popsáno pomocí příkladného provedení, které je schematicky znázorněno na obr. 1. Na obr. 2 je graf závislosti intenzity na napětí axiálních elektrod. Na obr. 3 je detail schématu, kde jsou vyznačeny úhel dopadu a směr detekce. Na obr. 4 je řez příkladným provedení sestavy axiálních a radiálních elektrod.

50 Příklady uskutečnění technického řešení

Směrový detektor fluorescence z iontů v Paulově pasti s využitím Braggovské difrakce znázorněný na obr. 1 obsahuje vakuovou komoru 1.

5 Ve vakuové komoře 1 je uspořádána lineární Paulova past, která v tomto příkladném provedení obsahuje čtyři radiální elektrody 4, které jsou uspořádány kolem osy z se stejným vzájemným úhlovým rozstupem a jsou každá svou vnitřní hranou přivrácena k ose z, se kterou jsou tyto vnitřní hrany radiálních elektrod 4 rovnoběžné. Radiální elektrody 4 mohou být například žiletkové.

Radiální elektrody 4 jsou propojeny se zdrojem 8 radiofrekvenčního napětí tak, že jsou střídavě buzeny vždy dvojice navzájem protilehlých radiálních elektrod 4.

10 Paulova past dále obsahuje dvojici axiálních elektrod 5, 6, které jsou k sobě navzájem přivráceny a prochází jimi osa z.

Axiální elektrody 5, 6 jsou propojeny se zdrojem 7 stejnosměrného napětí, který je uzpůsobený tak, že umožňuje změnu napětí alespoň v rozsahu 428 V až 856 V.

15 V realizovaném příkladném provedení, jehož elektrody 4, 5, 6 jsou v řezu znázorněny na obr. 4, byla vzájemná vzdálenost axiálních elektrod 5, 6 o velikosti 4,5 mm a vzdálenost navzájem protilehlých radiálních elektrod 4 byla 1,13 mm.

20 V provedení z obr. 4 mají axiální elektrody 5, 6 tvar disku s centrálním výstupkem ve tvaru dutého komolého kužele, kterým jsou k sobě navzájem axiální elektrody 5, 6 přivráceny.

25 První axiální elektroda 5 obsahuje první optickou průchodku 50 odpovídající otvoru s efektivní numerickou aperturou $NA = 0,07$ pro ionty ve středu lineární Paulovy pasti, umožňující fotonovou kolekci v axiálním směru. Optická průchodka 50 tvoří lineární kanálek o průřezu 0,5 mm procházející v ose z.

30 Druhá axiální elektroda 6 v provedení z obr. 4 obsahuje druhou optickou průchodku 60, která by mohla být rovněž využita pro detekci fluorescence.

35 Vakuová komora 1 obsahuje první okénko 31, ke kterému je přivrácená vnější plocha první axiální elektrody 5, přičemž je první okénko 31 uspořádáno v podstatě kolmo na osu z. Vakuová komora 1 dále obsahuje druhé okénko 32, které je přivrácené ke štěrbině mezi druhou axiální elektrodou 6 a radiálními elektrodami 4, nebo ke štěrbině mezi dvojicí navzájem sousedících radiálních elektrod 4. Vakuová komora 1 dále obsahuje alespoň jednu neznázorněnou přírubu pro připojení vývěvy a případně uzavíratelný otvor pro vkládání zdroje iontů.

40 Směrový detektor dále obsahuje plan-konvexní čočku 10, která je uspořádána vně vakuové komory 1 souběžně s okénkem 31, a kameru 12 uspořádanou pro snímání záření vystupujícího z vakuové komory 1 okénkem 31 a procházejícího plan-konvexní čočkou 10. V daném příkladném provedení má plan-konvexní čočka 10 ohniskovou vzdálenost $f = 200$ mm.

45 Kamera 12 je typu EM-CCD (Electron Multiplying Charge Coupled Device), například od firmy ANDOR, typ IXON.

Mezi plan-konvexní čočkou 10 a kamerou 12 je uspořádaný optický interferenční filtr 11.

50 Směrový detektor v tomto příkladném provedení dále obsahuje první diodový laser 21 pro vysílání paprsku o vlnové délce 397 nm, první odražeč 41 a první optické vlákno 51, které jsou uspořádané pro odraz paprsku z prvního diodového laseru 21 prvním odražečem 41 do vstupního konce prvního optického vlákna 51, jehož výstup je nasměrovaný do druhého okénka 32 vakuové komory 1 tak, že z něj vystupující paprsek se dostává do vnitřku Paulovy pasti do oblasti osy z.

55 Navíc je v tomto příkladném provedení přítomen druhý diodový laser 22 pro vysílání paprsku o vlnové délce 866 nm, druhý odražeč 42 a druhé optické vlákno 52, které jsou uspořádané pro

odraz paprsku z druhého diodového laseru 22 druhým odražečem 42 do vstupního konce druhého optického vlákna 52, jehož výstup je nasměrovaný do druhého okénka 32 vakuové komory 1 tak, že z něj vystupující paprsek se dostává do vnitřku Paulovy pasti do oblasti osy z.

- 5 Znázorněně příkladné provedení směrového detektoru pracuje následovně: Do vakuové komory 1 se vloží zdrojový materiál, vakuová komora 1 se uzavře a odčerpá.

Zapne se zdroj 8 radiofrekvenčního napětí pro buzení radiálních elektrod 4 lineární Paulovy pasti a zdroj 7 stejnosměrného napětí pro napájení axiálních elektrod 5, 6.

10

Následně se ze zdrojového materiálu, například čistého vápníku, generují známým způsobem ionty, které se dostávají do Paulovy pasti. Ionty $^{40}\text{Ca}^+$ jsou laserově chlazeny blízko dopplerovskému limitu pomocí prvního diodového laseru 21 s vlnovou délkou 397 nm na dipólovém přechodu valenčního elektronu iontu $4\text{S}_{1/2} \rightarrow 4\text{P}_{1/2}$. Druhý diodový laser 22 se použije jako přečerpávací laser o vlnové délce 866 nm pro depopulaci metastabilního $3\text{D}_{3/2}$ stavu.

15

Světlo odražené v axiálním směru lineární Paulovy pasti prochází optickou průchodkou 50 v první axiální elektrodě 5, prochází prvním okénkem 31, sbírá se plan-konvexní čočkou 10, kterou je fokusováno do obrazové roviny shodné s rovinou kamery 12.

20

Na radiální elektrody 4 je přitom přiváděno radiofrekvenční napětí $U_{\text{rf}} \cos(\omega_{\text{rf}} t)$ o amplitudě U_{rf} a frekvenci ω_{rf} . To vytváří pole, které zachycuje ionty v radiálním směru. Zároveň jsou ionty zachyceny v axiálním směru pomocí stejnosměrného napětí U_{tip} aplikovaného na axiální elektrody 5, 6.

25

Jednou ze tří normálních složek pohybu iontů v lineární Paulově pasti je tzv. axiální pohyb. Frekvence odpovídající oscilace lze vyjádřit jako

$$\omega_z = \sqrt{\frac{2qU_{\text{tip}}\kappa}{mz_0^2}}, \quad (1)$$

30

kde q je náboj iontu, m je hmotnost iontu, z_0 je délka lineární Paulovy pasti, tedy vzájemná vzdálenost axiálních elektrod 5, 6, κ je geometrický faktor pasti. Frekvence ω_z tedy není závislá na parametrech radiofrekvenčního napětí. Vztah pro výpočet frekvence sekulárního pohybu iontu v radiálním směru je

35

$$\omega_r = \frac{qU_{\text{rf}}}{mr_0^2 \omega_{\text{rf}} \sqrt{2}}, \quad (2)$$

kde r_0 je poloměr pasti, tedy vzdálenost břítu radiální elektrody 4 od osy z.

- 40 Ionty zachycené v lineární Paulově pasti se seřadí na ose z, kde vytvoří tzv. iontový řetízek, přičemž jejich poloha na ose z je dána jednak velikostí vzájemně odpudivé síly iontů a jednak napětím na axiálních elektrodách 5, 6, kterým jsou ionty tlačeny k sobě. Při přílišném stlačení v axiálním směru může dojít k tomu, že ionty již nebudou v řadě za sebou, ale v tzv. zig-zag konfiguraci, což by zkomplikovalo optimalizaci rozptylové konfigurace a laserového chlazení
- 45 iontů. Pro eliminaci tohoto jevu je třeba splnit podmínku

$$A = \left(\frac{\omega_z}{\omega_r}\right)^2 < A_{\text{crit}}, \quad (3)$$

kde $A_{\text{crit}} = 2,94N^{-1,8}$, kde N je počet iontů. Tedy jinými slovy je třeba, aby byla hodnota ω dostatečně vysoká pro dostatečné stlačení iontů v radiálním směru.

Vzdálenost mezi ionty je neekvidistantní. Ionty na kraji řetízku jsou od sebe dál než ionty vprostřed. Avšak jejich relativní vzdálenost je přesně určená a jednoduše dopočitatelná řešením soustavy diferenciálních rovnic.

Reálná rovnovážná pozice i -tého iontu v řetízku může být dopočtena jako

$$z_i = lv_i, \quad (4)$$

kde

$$l^3 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m \omega_z^2} \quad (5)$$

je škálovací parametr, který je pro daný iont závislý na ω . Ionty v řetízku jsou k sobě více stlačeny při vyšších hodnotách frekvence axiálního sekulárního pohybu.

Obdobně jako se u Youngova dvojštěrbínového experimentu počítá průběh intenzity světla na stínítku, uvažuje se v tomto řešení rozložení intenzity interferenčního obrazce vzniklého koherentním složením signálu odraženého od jednotlivých iontů v iontovém řetízku v dalekém poli. Pro daný úhel α dopadu laserového svazku z prvního diodového laseru 21 vzhledem k ose \underline{z} a pro daný počet N iontů se dopočítá závislost intenzity v bodě daném úhlem β odrazu vzhledem k ose \underline{z} jako

$$I(\beta) = \left| \sum_{j_1=1}^N \sum_{j_2=1}^N \cos[kl(v_{j_1} - v_{j_2})(\cos \alpha - \cos \beta)] \right|, \quad (6)$$

kde k je vlnové číslo, l je škálovací parametr ze vzorce **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, v_{j_1} a v_{j_2} jsou relativní pozice iontů. Cílem optimalizace je najít takové l , a tedy jemu odpovídající ω , aby v axiálním směru kolem hodnoty $\beta = 0^\circ$ byla co nejvyšší celková pravděpodobnost detekce rozptýlené fluorescence. Pro svazek laseru dopadající kolmo na iontový řetízek, $\alpha = 90^\circ$, je interferenční obrazec symetrický kolem osy kolmé na řetízek. To kromě redukce počtu vypočítaných bodů přináší výhodu v možnosti detekce signálu z obou stran, tedy signálu získaného z obou optických průchodků 50, 60. Pro případ dipólového záření je třeba vzorec **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** vynásobit faktorem zohledňující geometrii dipólu. Pro vyjádření efektivity detekce fluorescence v 3D prostoru uvažujeme výraz pro zářivý tok Φ dopočítaný jako

$$\Phi = I\Omega, \quad (7)$$

kde Ω je prostorový úhel.

Relativní zářivý tok pro daný počet iontů a danou numerickou aperturu NA , který je v detekčním zařízení maximalizován, vyjadřujeme jako

$$\Phi_{\text{rel}} = \frac{\Phi_{\text{NA}}}{\Phi_{\text{celk}}}, \quad (8)$$

kde Φ_{NA} je zářivý tok signálu odraženého od N iontů v axiálním směru pro danou numerickou aperturu a Φ_{celk} je celkový zářivý tok signálu odraženého od N iontů do celého prostorového úhlu $\Omega = 4\pi$.

Pro pozorování průběhu závislosti směrovosti emitované fluorescence a relativní detekční účinnosti bylo na axiální elektrody 5, 6 aplikováno napětí U_{tip} o hodnotách od 428 V až 856 V. S měnícím se napětím U_{tip} byl pozorován interferenční signál s kontrastem $V = 0,61$. Ve srovnání s případem, kdy by při stejném počtu iontů nedocházelo k interferenci, odpovídá vylepšení relativní detekční účinnosti faktoru 3,5. Což je v souladu se simulací uvažující termální pohyb iontů.

Na obr. 3 jsou znázorněny radiální elektrody 4 a axiální elektrody 5, 6. Dále je zde zobrazen interferenční obrazec vznikající po dopadu světla pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ a následném odrazu pod úhlem β od pěti zachycených iontů. Škálovací parametr určující jejich vzájemnou vzdálenost je v ilustrovaném případě $l \doteq 4.8 \mu\text{m}$. Schéma ilustruje definici orientace pasti a směru, ve kterém určujeme numerickou aperturu, která je $NA = \sin(\beta_{\text{NA}})$, kde β_{NA} je polovina vrcholového úhlu kužele paprsků vystupujících z axiální elektrody.

Klíčovým pozitivním aspektem prezentovaného zařízení je, že optimální hodnota směrovosti interferenčního obrazce vytvořeného braggovskou interferencí na lineárním iontovém řetízku není limitovaná nestejnou vzájemnou vzdáleností iontů v lineární Paulově pasti. Pro každou numerickou aperturu směrového detektoru je možné najít optimální konfiguraci počtu iontů a škálovacího parametru jejich relativní vzdálenosti l , kdy dochází ke konstruktivní interferenci a hodnoty relativního zářivého toku jsou blízké hodnotám pro ekvidistantní mnohašterbinovou interferenci. Další důležitou pozitivní vlastností směrového detektoru je, že termální reziduální pohyb iontů v lineární Paulově pasti sice představuje dominantní limit pro účinnost zařízení, jeho energie po základním dopplerovském chlazení pro uvažované lehké ($^{40}\text{Ca}^+$) i těžké ($^{40}\text{Ba}^+$) atomární ionty však umožňuje přímé pozorování prakticky významných zisků účinnosti detekce fluorescence pro optimalizované relativní detekční účinnosti.

NÁROKY NA OCHRANU

1. Směrový detektor fluorescence iontů v Paulově pasti, **vyznačující se tím**, že obsahuje

5 - Paulovu past, která obsahuje radiální elektrody (4) uspořádané s rovnoměrným úhlovým rozestupem kolem osy (z) Paulovy pasti, první axiální elektrodu (5) a druhou axiální elektrodu (6), které jsou uspořádány navzájem protilehle na ose (z) Paulovy pasti,

10 - vakuovou komoru (1), ve které je uspořádaná Paulova past, přičemž tato vakuová komora (1) má první okénko (31), které je uspořádané kolmo na osu (z) Paulovy pasti a je přivrácené k první axiální elektrodě (5), a druhé okénko (32), které je přivrácené ke štěrbině mezi druhou axiální elektrodou (6) a radiálními elektrodami (4) a/nebo ke štěrbině mezi navzájem sousedícími radiálními elektrodami (4),

- kameru (12) uspořádanou vně vakuové komory (1) a

- plan-konvexní čočku (10) uspořádanou mezi prvním okénkem (31) a kamerou (12) pro fokusaci záření vystupujícího prvním okénkem (31) do obrazové roviny kamery (12),

15 přičemž první axiální elektroda (5) obsahuje první optickou průchodku (50), která je uspořádaná na ose (z) a jejíž vstup je přivrácený k vnitřnímu prostoru Paulovy pasti a výstup je přivrácený k prvnímu okénku (31).

2. Směrový detektor podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje interferenční filtr (11) uspořádaný mezi plan-konvexní čočkou (10) a kamerou (12).

20 3. Směrový detektor podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje zdroj (7) stejnosměrného napětí, který je propojený s axiálními elektrodami (5, 6).

4. Směrový detektor podle kteréhokoli z nároků 1 až 3, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje zdroj (8) radiofrekvenčního napětí, který je propojený s radiálními elektrodami (4).

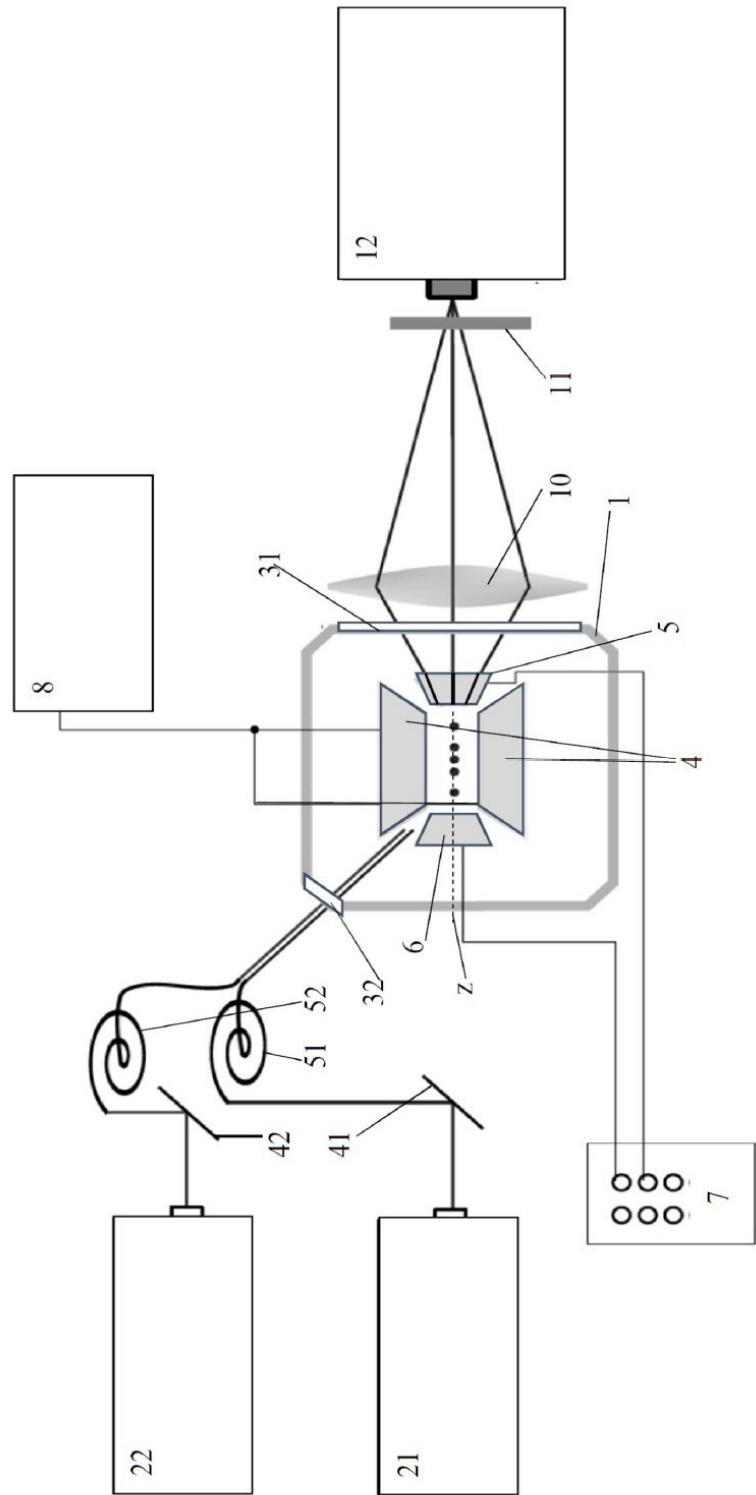
25 5. Směrový detektor podle kteréhokoli z nároků 1 až 4, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje první diodový laser (21) pro vysílání laserového záření druhým okénkem (32) do Paulovy pasti do oblasti osy (z).

6. Směrový detektor podle kteréhokoli z nároků 1 až 5, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje druhý diodový laser (22) pro vysílání laserového záření druhým okénkem (32) do Paulovy pasti oblasti osy (z).

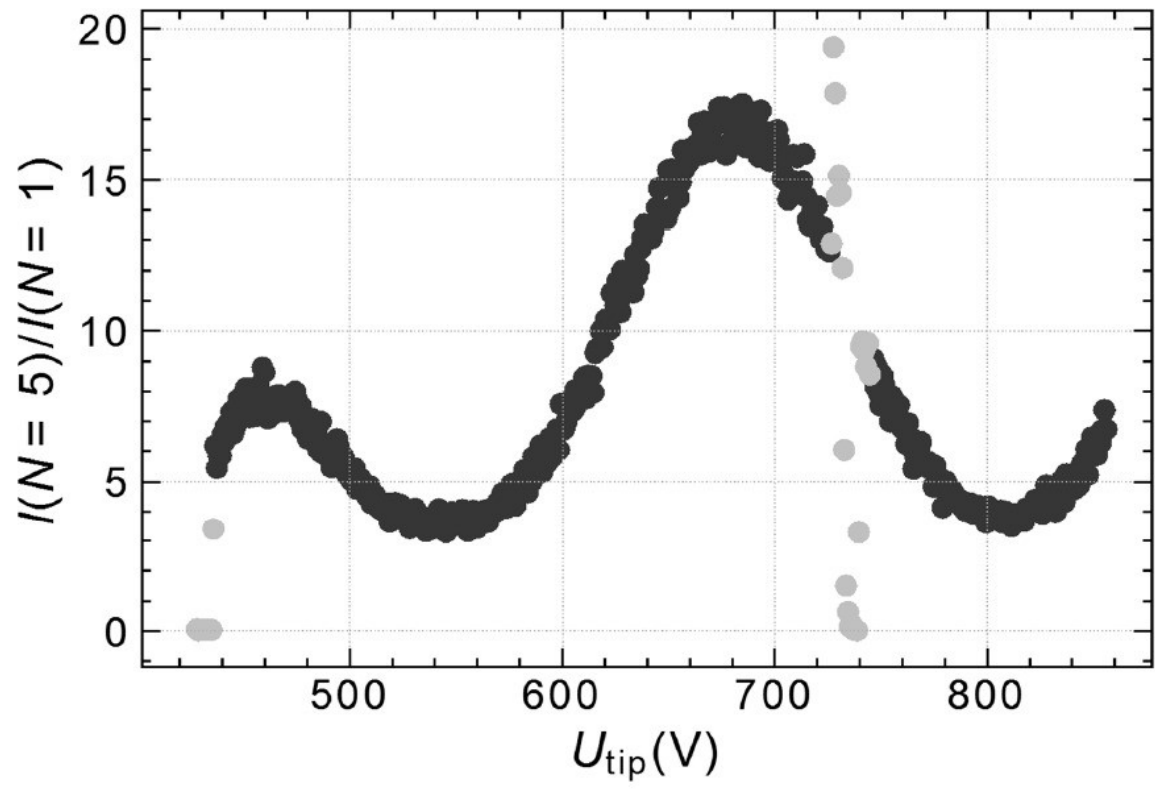
30 7. Směrový detektor podle kteréhokoli z nároků 1 až 6, **vyznačující se tím**, že kamera (12) je kamera typu EM-CCD.

8. Směrový detektor podle kteréhokoli z nároků 1 až 7, **vyznačující se tím**, že vakuová komora (1) obsahuje třetí okénko a druhá axiální elektroda (6) obsahuje druhou optickou průchodku (50), která je uspořádaná na ose (z) a jejíž vstup je přivrácený k vnitřnímu prostoru Paulovy pasti a výstup je přivrácený k třetímu okénku.

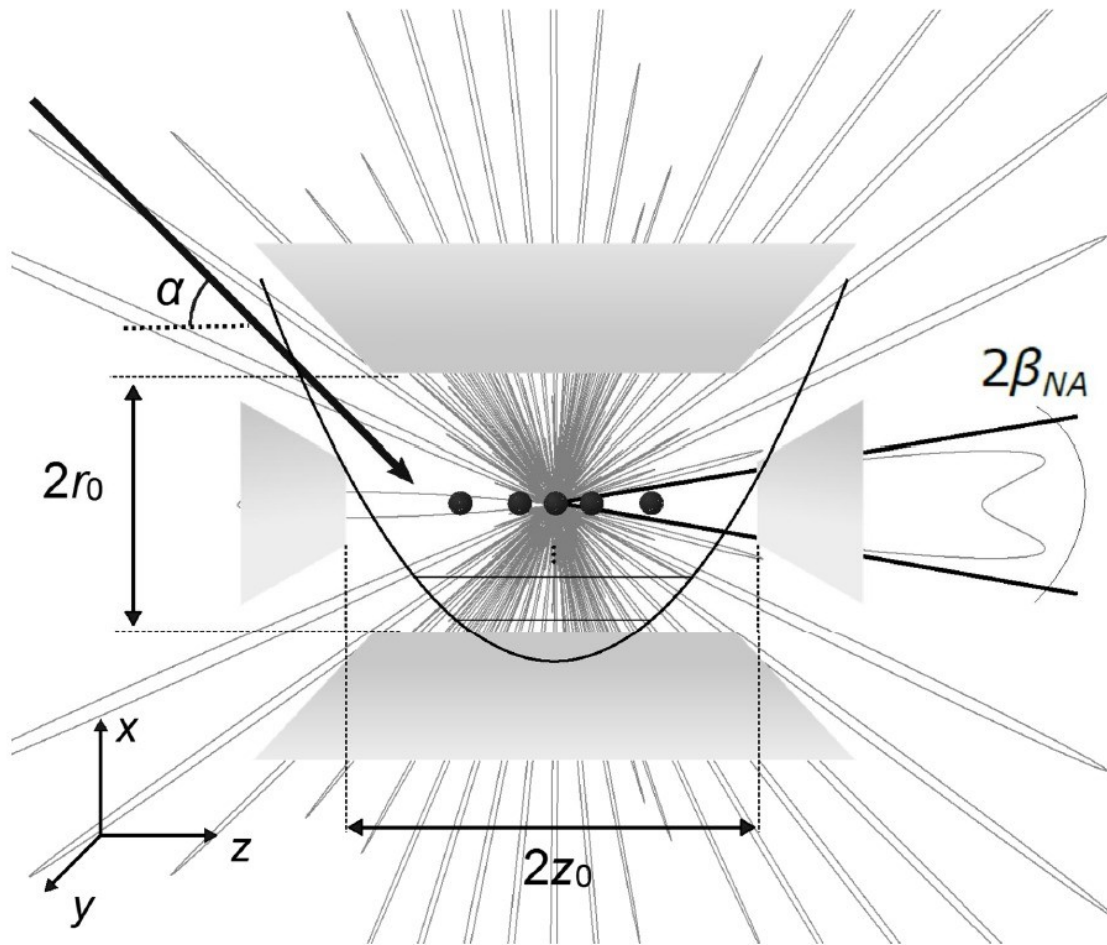
35 9. Směrový detektor podle kteréhokoli z nároků 1 až 8, **vyznačující se tím**, že vzájemná vzdálenost axiálních elektrod (5, 6) je 4,5 mm a vzájemná vzdálenost navzájem protilehlých radiálních elektrod (4) je 1,13 mm.



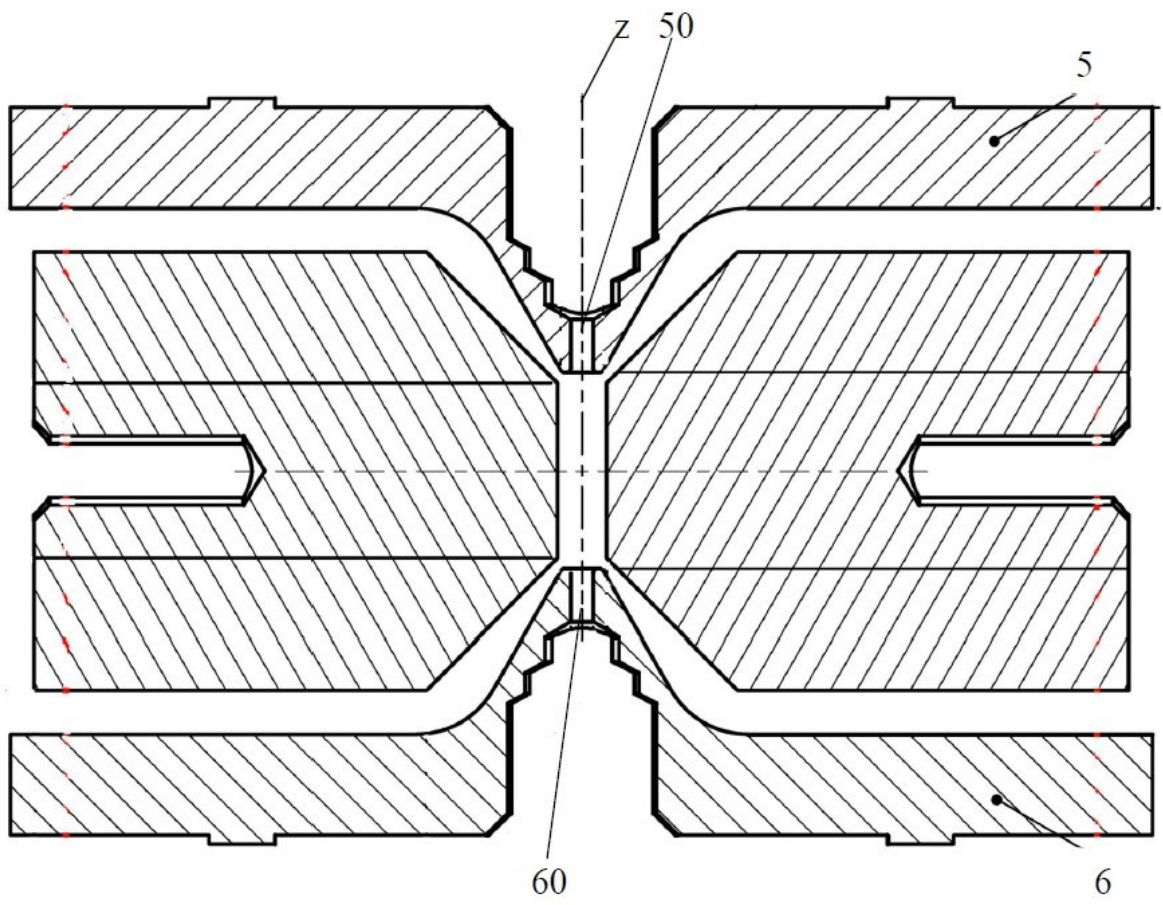
Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4