UŽITNÝ VZOR

(11) Číslo dokumentu:
36 217
(13) Druh dokumentu: **U1**
(51) Int. Cl.:
G21K 1/093 (2006.01)
H05H 1/06 (2006.01)

(19) ČESKÁ REPUBLIKA

ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2022-39606**
(22) Přihlášeno: **11.12.2020**
(47) Zapsáno: **19.07.2022**

(73) Majitel:
Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Praha 8, Libeň, CZ

(72) Původce:
Dr. Alexander Molodozhentsev, Dolní Břežany, CZ
Dr. Konstantin Kruchinin, Dolní Břežany, CZ

(74) Zástupce:
Karel Bauer, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i./CITT, Za Radnicí 835, 252 41 Dolní Břežany

(54) Název užitného vzoru:
Robotické gantry pro radiační terapii obsahující laditelný kompaktní systém fokusace

CZ 36217 U1

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitného vzoru splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.

Robotické gantry pro radiační terapii obsahující laditelný kompaktní systém fokusace

Oblast techniky

Předkládané technické řešení se týká způsobu a kompaktního, flexibilního zařízení schopného vytvářet, urychlovat a dodávat fokusovaný elektronový svazek. První provedení předkládaného technického řešení se zaměřuje na způsob generování urychleného elektronového svazku a na dodání fokusovaného elektronového svazku pomocí plynové cely a aktivní plazmové čočky. Druhé provedení předkládaného technického řešení se zaměřuje na zařízení, které je schopno dodávat fokusovaný elektronový svazek pomocí výše uvedeného způsobu. V navrhovaném provedení se elektronový svazek používá k radiační terapii, kterou lze využít v nemocnicích nebo v centrech pro léčbu rakoviny pomocí radioterapie.

Dosavadní stav techniky

Radiační terapie je dobře známý způsob léčby různých druhů rakoviny. Radiační terapie využívá vysokoenergetického záření, jako jsou rentgenové paprsky, gama paprsky, elektrony, protony, těžké ionty a neutrony, ke zničení rakovinných buněk tím, že poškodí jejich DNA. Existuje však obecná nutnost vytvořit a transportovat nabité částice z emitoru (nebo ze zdroje částic) do těla pacienta s dostatečnou intenzitou, aniž by došlo k výraznějším ztrátám během transportu svazku.

Laserové plazmové urychlovače dodávají elektronovým paprskům energii v rozsahu od několika set MeV až do několika GeV s vysokým nábojem svazku až 100 pC. Svazek elektronů, urychlený vysoce výkonným laserovým pulzem s délkou pulzu ~ 30 fs, má délku pulzu ~ 10 fs. Použití takového elektronového svazku pro radioterapii umožňuje aplikovat v jediném krátkém pulzu ultra-vysokou dávku odpovídající více než 30 Gy/s, čímž se sníží počet ošetření oproti konvenčním dávkovým expozicím (zábleskova terapie, EN: FLASH radiotherapy). Snížení pravděpodobnosti běžných tkáňových komplikací (NTCP) související se zábleskovou radioterapií je velmi významné a potenciální klinický přínos je velmi vysoký. Způsob laserového plazmového urychlovače proto vyvolává v oblasti radioterapie velký zájem. Pro účely radiační terapie by energie elektronového svazku neměla být vyšší než 200 MeV. Laserový plazmový urychlovač umožňuje produkovat takové elektrony při interakci laser-plazma s rozsahem délky ~ 1 cm, což otevírá možnost vytvořit kompaktní laserové zařízení pro radioterapii. Takovým laserovým plazmovým urychlovačem může být plynová cela. Plynová cela obecně obsahuje kapiláru. Plyn nebo plyny jsou do kapiláry přivedeny přes systém řízení toku plynu. U některých provedení se může jednat o dvoustupňovou plynovou celu samostatně napájenou dvěma plyny o různém tlaku.

Nepatentovaný dokument „Laser-Driven Very High Energy Electron/Photon Beam Radiation Therapy in Conjunction with a Robotic System“ (Laserem řízená radiační terapie elektrony/fotony s velmi vysokou energií ve spojení s robotickým systémem); Kazuhisa Nakajima; Appl. Sci. 2015, 5, 1-20; doi:10.3390/app5010001; Publikováno: 29. prosince 2014, popisuje kompaktní zařízení vhodné pro radiační terapii. Toto zařízení je schopné dodávat paprsky elektronů/fotonů do těla pacienta. Zařízení obsahuje laserový systém generující vysoce výkonný laserový pulz; laserový plazmový urychlovač pro urychlení elektronů; systém fokusace elektronového svazku založený na permanentních kvadrupólových magnetech; fokusovací systém pro terapii svazkem fotonů, rotační ‘optický’ portál a systém stabilizace laserového svazku. Systém transportu svazku poskytuje fokusaci elektronového svazku, která využívá permanentní kvadrupólové magnety. Kompaktní ‘optický’ portál obsahuje kompaktní ‘vakuový’ transport laserového svazku pomocí transportních systémů, sérii kvadrupólových magnetů, které fokusují svazek s diagnostikou elektronového svazku a fotonový fokusátor s kolimačním systémem.

Dokument US 5382866 se vztahuje ke způsobu fokusace svazku nabitých částic. Tento způsob, resp. zařízení, využívá plazmovou čočku jako nedílnou součást systému vedení svazku

urychlovače. Urychlovač zde není podrobněji specifikován. Svazek částic je fokusován na cíl pomocí plazmové čočky. Provedení v dokumentu popisuje kapiláru mezi dvěma elektrodami. Pokud je použita plazmová čočka, provozní plyn, Ar nebo H_2, je pod tlakem 50 až 1000 Pa. Uvedené částice jsou rovněž zmíněny obecně a nejsou definovány konkrétní druhy částic.

Nepatentovaný dokument "Active Plasma Lensing for Relativistic Laser-Plasma-Accelerated Electron Beams (Aktivní plazmové čočky pro relativistické paprsky elektronů urychlené laserovým plazmovým urychlovačem); J. van Tilborg; PRL 115, 184802 (2015) PHYSICAL REVIEW LETTERS; DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.184802" popisuje aktivní plazmovou čočku pro fokusaci 100 MeV elektronového svazku generovaného laserovým plazmovým urychlovačem. Laserovým plazmovým urychlovačem je plynová tryska. Jako aktivní plazmová čočka slouží plazmový kanál s kapilárním výbojem skládající se z několikacentimetrové duté trubice o průměru 250 až 1000 μm. Kapilární výboj je naplněn plynným H_2 o tlaku řádově 1333 až 26664 Pa. Dokument dále uvádí, že zařízení obsahující laserový svazek, který je schopný generovat a urychlit elektronový svazek interakcí laser-hmota, známé též jako laserový plazmový urychlovač, který je obzvlášť vhodný pro fokusaci elektronového svazku na cíl. Je obecně známo, že plynová tryska vyžaduje pro tvorbu elektronu velké množství plynu, což je hlavní nevýhodou tohoto řešení. Aby se vytvořila dostatečná hustota elektronového svazku, musí být plynová tryska navíc synchronizována s laserovým pulzem.

Předmětem předkládaného technického řešení je proto poskytnutí flexibilního zařízení, které je kompaktní a které lze použít pro dodání fokusovaného elektronového svazku na objekt, a současně nespotřebovává velké objemy plynu. Úkolem tohoto technického řešení je tedy poskytnout zařízení, které uspoří zdroje a má výše uvedené vlastnosti.

Podstata technického řešení

V prvním ohledu předkládaného technického řešení je poskytnut způsob generování, urychlování a fokusace elektronového svazku a jeho dodání do objektu.

Tento způsob zahrnuje následující kroky:

- dodání laserového svazku do kapiláry plynové cely, přičemž laserový svazek v kapiláře interaguje s plynem tak, že při interakci laseru a plazmatu uvnitř plynové cely dojde ke generování a urychlení elektronového svazku;
- dodání elektronového svazku do laditelné aktivní plazmové čočky;
- průchod elektronového svazku přes laditelnou aktivní plazmovou čočku za současného řízení výbojového proudu procházejícího plynem v laditelné aktivní plazmové čočce, čímž je získán fokusovaný elektronový svazek; a
- výstup fokusovaného elektronového svazku z laditelné aktivní plazmové čočky směrem dopředu k objektu.

V souladu s výše uvedeným předmětem předkládaného technického řešení vstřikovač plynové cely vstřikuje do plynové cely výrazně menší objem plynu v porovnání s plynovou tryskou. Podle experimentu konaného původci je možné plnit objem kapiláry omezeným množstvím plynu (typicky 2 až 3 litry plynného vodíku za hodinu při tlaku cca 10 000 Pa). Laserový pulz excituje plazmovou vlnu s velkou amplitudou, jejichž zrychlující se elektrické pole dokáže zachytit a urychlit elektrony plazmatu. Zrychlené elektrony procházejí laditelnou aktivní plazmovou čočkou pro fokusaci. Tento způsob tedy poskytuje generování, urychlení a následnou fokusaci elektronového svazku laditelnou aktivní plazmovou čočkou, která fokusuje elektronový svazek v obou příčných rovinách současně. Fokusace aktivní plazmové čočky je řízena výbojovým

proudem, přičemž se optimalizuje síla fokusace aktivní plazmové čočky pro široký energetický rozsah, aniž by došlo ke změně polohy čočky – odtud název “laditelná”. Tento způsob, resp. zařízení, dále umožňuje minimalizovat celkovou délku transportního systému elektronového svazku použitím pouze jedné aktivní čočky namísto sady permanentních kvadrupólových magnetů, a navíc zlepšuje fokusační vlastnosti tohoto systému pro transport svazku, který je tak vhodný s ohledem na různé energie svazků. Způsob, resp. zařízení pro provádění tohoto způsobu a ozařovací systém vhodný pro radiační terapii tak může mít nízkou hmotnost, může být méně nákladné a odpadá nutnost používat dodatečná zařízení potřebná pro svazky elektro-kvadrupólových magnetů, což umožňuje kompaktnost nerovinného uspořádání zařízení, kdy urychlovač může být umístěn v úrovni suterénu, což snižuje celkovou stopu zařízení a potřebu stínění. Aktivní plazmová čočka poskytuje vysoký gradient magnetického pole pomocí nastavitelného aplikovaného elektrického pole. Požadovanou fokusaci elektronového svazku lze provést v obou příčných rovinách pomocí pouze jedné délky aktivního plazmatu, což v případě tradičních elektrických nebo permanentních kvadrupólových magnetů není možné. Plynová cela šetří plynovou směs čerpanou do kapiláry k tvorbě elektronového svazku prostřednictvím interakce laseru a plazmatu.

Ve výhodném provedení je výstup fokusovaného elektronového svazku realizován výstupem z rotačního optického gantry.

V jiném výhodném provedení je laserový svazek vystupující z plynové cely směřován do tlumiče svazku.

V dalším výhodném provedení je laserový svazek vystupující z plynové cely směřován k zrcadlu a následně do tlumiče svazku.

V jiném provedení elektronový svazek vystupující z plynové cely prochází nejprve kolimátorem, a teprve poté vstupuje do laditelné aktivní plazmové čočky.

Výhodněji se laserový svazek šíří umělou atmosférou v kapiláře plynové cely, přičemž umělá atmosféra se skládá z čistého vodíku (H_2) nebo ze směsi 98 % H_2 a 2 % N_2, aby mohl být použit ionizační injekční mechanismus urychlení pomocí plazmové vlny.

Výhodněji se elektronový svazek šíří kapilárou laditelné aktivní plazmové čočky, přičemž kapilára obsahuje vodík.

Ve výhodném provedení, aby se minimalizovalo požadovaný výkon laseru na urychlení, je elektronový svazek poskytnut v předem vytvořeném plazmovém kanálu, který umožňuje efektivní externí vedení laserového pulzu v plazmovém médiu s délkou potřebnou k získání požadované energie elektronového svazku. Takový přístup umožňuje použít laserový systém s vysokou opakovací frekvencí se středním výkonem laseru, který je stabilnější a reprodukovatelnější než vysoce výkonové laserové systémy.

Jedno z omezení urychlování laseru v brázdovém poli je spojeno s efektem laserové difrakce, což lze vyřešit použitím předem vytvořeného plazmového kanálu. Experimentálně bylo prokázáno [K.Nakamura et al., Phys of Plasma 14, 056708 (2007)], že použití vlnovodu založeného na výboji umožňovalo provoz při řádově nižší hustotě a s cca 10krát delší vzdáleností než u jiných experimentů a spoléhalo na laserem předem vytvořené plazmové kanály. Pro zrychlení elektronů až na několik set MeV je místo laserů třídy 100TW vyžadován laserový pulz se špičkovým výkonem 10 až 20 TW (doba trvání laserového pulzu ~ 30 fs, špičková energie laseru ~ 500 mJ). Tímto se otevírá možnost použití laserových systémů s vysokou opakovací frekvencí (až 50 Hz).

V druhém ohledu předkládaného technického řešení je popsán způsob ozařování objektu elektronovým svazkem.

Způsob ozařování objektu zahrnuje následující:

- generování laserového svazku, který je schopen laserem řízeného urychlení;
- dodání laserového svazku do kapiláry prostřednictvím optického gantry; a
- způsob generování a fokusace podle některého z předchozích provedení.

V některých provedeních může být ozařovaným objektem vodní fantom nebo pacient podle léčebného plánu.

V třetím ohledu předkládaného technického řešení je poskytnuto zařízení pro fokusaci elektronového svazku a jeho dodání do objektu.

Zařízení obsahuje:

- plynovou celu, která může být s výbojem nebo bez výboje, nastavenou pro příjem laserového svazku, přičemž dochází k urychlení elektronů pomocí mechanizmu plazmové vlny;
- výhodně je laserový svazek schopen generovat elektronový svazek, když laserový svazek projde kapilárou bez výboje (plynovou celu) nebo s výbojem (externí vedení laseru);
- laditelnou aktivní plazmovou čočku nastavenou pro příjem elektronového svazku vystupujícího z plynové cely s výbojem nebo bez výboje, přičemž je provedena fokusace urychlených elektronů; kde
- laditelná aktivní plazmová čočka je opatřena prostředky pro řízení elektrického proudu procházejícího plynem.

Zařízení poskytuje stejné technické výhody, které jsou uvedeny výše. Vzhledem k použití plynové cely namísto plynové trysky, která je použita jako laserem poháněný urychlovač, vyžaduje zařízení výrazně méně výkonný čerpací systém k získání požadované podtlakové umělé atmosféry. Toho lze docílit pouze jedním turbočerpadlem, které lze efektivně využít.

Ve výhodném provedení zařízení dále obsahuje tlumič laserového svazku, který je nastaven k příjmu laserového svazku vystupujícího z plynové cely. Tento tlumič pomáhá zabránit škodám na zařízení, které mohou vzniknout absorbováním energie obsažené v laserovém svazku.

V jiném preferovaném provedení je jako laserem poháněný urychlovač použita alespoň dvoustupňová plynová cela.

Ve výhodném provedení zařízení dále obsahuje prostředek pro přesměrování laserového svazku z optické osy elektronového svazku k tlumiči, přičemž prostředek pro přesměrování je umístěn mezi plynovým článkem a laditelnou aktivní plazmovou čočkou.

V jiném provedení zařízení dále obsahuje systém řízení plynu. Systém řízení plynu obsahuje umělou atmosféru a je připojen k plynovému článku pro přívod umělé atmosféry do kapiláry plynové cely.

V jiném provedení obsahuje systém řízení plynu plynovou směs skládající se z 98 % H_2 a 2 % N_2.

V dalším provedení zařízení dále obsahuje druhý systém řízení plynu obsahující plyn pro kapiláru v laditelné aktivní plazmové čočce, přičemž tento plyn výhodně obsahuje vodík.

Ve čtvrtém aspektu předkládaného technického řešení systém ozařování vhodný pro radiační terapii obsahuje

- zařízení podle kteréhokoliv z předchozích provedení,
- laserový systém generující laserový svazek; a
- rotační optický portál pro šíření laserového svazku z laserového systému do zařízení.

Kromě výše uvedených výhod a v porovnání s nejmodernějším systémem radiační terapie a jeho způsobem přenosu svazku pomocí elektromagnetu nebo permanentního magnetu je dále výrazně snížena velikost a hmotnost radiačního systému při současném zachování jeho flexibility.

Objasnění výkresů

Obr. 1 představuje schematický nákres zařízení podle předkládaného technického řešení s oblastí interakce laseru a plazmy pro urychlení elektronů v plynovém článku a s aktivní plazmovou čočkou pro fokusaci urychlených elektronů.

Obr. 2 představuje druhé provedení zařízení pro tvorbu a fokusaci elektronového svazku s odlišnou polohou tlumiče svazku.

Obr. 3 představuje podrobné schematické zobrazení oblasti interakce laseru a plazmy pro urychlení elektronů v plynové trysce nebo v kapiláře (s kontinuálním tokem plynu nebo s předem vytvořeným plazmovým kanálem) a aktivní plazmovou čočku pro fokusaci urychlených elektronů.

Obr. 4 představuje provedení robotického systému, který využívá optický portál pro dodávání fokusovaného elektronového svazku k objektu.

Příklady uskutečnění technického řešení

Zachycení a vedení elektronového svazku 3 vhodného pro radioterapii, zejména svazku 3 generovaného laserovým urychlovačem, je velmi náročné z důvodu velké divergence elektronových svazků 3 na jeho výstupu. Laditelná aktivní plazmová čočka 4, jako hlavní prvek systému transportu elektronového svazku 3, umožňuje zachytit a fokusovat elektronový svazek 3 ze zdroje laserového plazmového urychlovače, jako je plynová tryska, pomocí azimutálního magnetického pole 46 (zobrazeno na obr. 3) vytvořeného proudem procházejícím podél plazmového kanálu. Obr. 1 představuje schématické zobrazení provedení předkládaného technického řešení, zejména laserového svazku 1, který dopadá do kapiláry 21 plynové cely 2. Plynová cela 2 obsahuje výše uvedenou kapiláru 21, ve které se nachází umělá atmosféra. Umělou atmosféru lze zvolit s ohledem na aktuální stav poznatků. Kapilára 21 je připojena k systému 22 řízení plynu pomocí kanálů 23, které dodávají plyn do kapiláry 21, čímž poskytuje umělou atmosféru dle požadavků na generování a urychlování elektronového svazku 3 laserovým plazmovým urychlovačem. Systém 22 řízení plynu řídí směs plynu a tlak v kapiláře 21 plynové cely 2. V jednom provedení obsahuje plynová cela 2 směs 98 % vodíku a 2 % dusíku, přičemž tato směs je dodána do kapiláry 21 plynové cely 2 prostřednictvím kanálů 23 za současné regulace řídicím systémem 22. Plynová cela 2 obsahuje válec o průměru 20 mm s 3 mm vstupním otvorem pro plyn umístěným na boku, v blízkosti vstupu plynové cely 2, což může představovat výhodné provedení kapiláry 21 plynové cely 2. Taková plynová cela 2 může poskytnout elektronový svazek 3 s energií kolem 4 GeV za předpokladu, že bude použit 200 TW femtosekundový pulzní laser. Pro účely aplikace radiační terapie může být požadovaná energie elektronového svazku 3 omezena na 200 MeV. V jiném provedení může mít kapilára 21 plynové cely 2 průměr v rozmezí 0,1 až 0,25 nm a délku v rozmezí 6 až 10 mm. Pro dosažení elektronového svazku 3 majícího energii

přibližně 200 MeV lze použít kompaktní laserový systém s vysokou opakovací frekvencí (~ 1 J s dobou trvání pulzu ~ 30 fs). V některých provedeních je dostačující femtosekundový pulzní laser o špičkovém výkonu ~10^{18} W/cm^2. Když pulzní laserový svazek 1 interaguje s plynem uvnitř kapiláry 21 plynové cely 2, vytvoří se plazma a ponderomotorická síla 472 (zobrazeno na obr. 3) pulzu laserového svazku 1 vytvoří plazmovou vlnu s velkou amplitudou. Tato vlna rozbije, zachytí a zrychlí elektrony a vytvoří elektronový svazek 3, který je však velmi defokusovaný. Proto se používá jako fokusační prostředek na elektronový svazek 3 laditelná aktivní plazmová čočka 4. Pouze jediná laditelná aktivní plazmová čočka 4 umístěná v blízkosti plynové cely 2 dokáže fokusovat elektronový svazek 3 v obou příčných fázových rovinách. Délka laditelné aktivní plazmové čočky 4 je jen několik centimetrů, např. 3 cm, a je tudíž mnohem kratší, než je typická délka tradičního kvadrupólového elektromagnetu. Kromě kompaktnosti laditelné aktivní plazmové čočky 4 je její fokusační ponderomotorická síla 472 (zobrazeno na obr. 3) regulovatelná nastavením výbojového proudu 45 (zobrazeno na obr. 3) procházejícího plazmatem – proto je fokusace nastavitelná/laditelná a přizpůsobitelná energii elektronového svazku 3. Tato vlastnost umožňuje použít stejnou laditelnou aktivní plazmovou čočku 4 v širokém rozsahu elektronového svazku 3**,** aniž by došlo ke změně jeho polohy při transportu, což není v případě permanentního kvadrupólového magnetu možné. Lze dosáhnout laditelných gradientů vysokého magnetického pole 46 (zobrazeno na obr. 3) dosahující až 1000 T/m. Aby bylo možné fokusovat elektronový svazek 3 s energií ~ 200 MeV, lze použít laditelnou aktivní plazmovou čočku 4 o délce ~ 3 cm, která zachytí divergovaný elektronový svazek 3 ve vzdálenosti ~ 50 cm za plynovou celou 2. Zahrnutí laditelné aktivní plazmové čočky 4 do transportu kompaktního elektronového svazku 3 umožňuje vytvořit kompaktní a laditelný systém, což není možné při použití tradičních elektromagnetických nebo permanentních kvadrupólových magnetů. Použití aktivní plazmové čočky 4 jako klíčového prvku v kombinaci s plynovou celou 2 umožňuje vyvinout „celo-optické“ laserové uspořádání pro robotický radioterapeutický systém, jehož používání poskytuje úsporu plynu, a který vyžaduje méně výkonný čerpací systém.

V provedení zobrazeném na obr. 1 aktivní plazmová čočka 4 obsahuje výbojovou kapiláru 41, což je plynem plněný podlouhlý objem čtvercového nebo kruhového průřezu uvnitř skleněného nebo safírového bloku. V zásadě lze použít podobnou výbojovou kapiláru 41 jako je prvek urychlení laserového plazmatu v plynové cele 2.

Ve výsledku může být celý systém zkonstruován umístěním dvou výbojových kapilár 21 a 41 s minimální vzájemnou vzdáleností. Pro produkci svazku 3 urychlených elektronů je třeba fokusovat laserový svazek 1 na vstupu první kapiláry 21, kde bude laserový svazek 1 zachycen a fokusován v požadované vzdálenosti druhou kapilárou 41, která je použita jako výbojová kapilára 41 aktivní plazmové čočky 4. Plazmový kanál vytvořený elektrickým výbojem ve výbojové kapiláře 41 nebude výrazněji ovlivněn světlem laseru, protože pulz laserového svazku 1 silně diverguje. Aktivní plazmovou čočkou 4 prochází jen malé množství intenzity laserového svazku 1, což nijak neovlivňuje samotné plazma. Obr. 1 dále zobrazuje tlumič 24 pro laserový svazek 1, který vystupuje z plynové cely 2. Tlumič 24 laserového svazku 1 je volitelnou konstrukcí v zařízení, která zabraňuje poškození laditelné aktivní plazmové čočky 4 laserovým svazkem 1. Tlumič 24 laserového svazku 1 může být instalován na vstupu laditelné aktivní plazmové čočky 4, jak je schematicky znázorněno na obr. 1, nebo může být k dispozici jako samostatné těleso – viz obr. 2.

Obr. 2 schematicky znázorňuje provedení, kde se elektronový svazek 3 vystupující z plynové cely 2 šíří společně s laserovým svazkem 1. Laserový svazek 1 je odražen prostředkem 31 pro přesměrování svazku k tlumiči 24 v jiné optické dráze než elektronový svazek 3. Elektronový svazek 3 se dále šíří k laditelné aktivní plazmové čočce 4.

Obě provedení znázorněná na obr. 1 a obr. 2 dále zobrazují systém 42 řízení plynu připojený k výbojové kapiláře 41 laditelné aktivní plazmové čočky 4. Plynem je výhodně vodík, který je dodáván do výbojové kapiláry 41 prostřednictvím kanálů 43. Laditelná aktivní plazmová čočka 4 fokusuje elektronový svazek 3 v souladu s aplikovaným výbojovým proudem 45 (zobrazeno na

obr. 3). Aplikovaný výbojový proud 45 (zobrazeno na obr. 3) je řízen systémem 44, který je zde znázorněn pouze schematicky jako jednoduchý RC obvod, ale může být výrazně sofistikovanější.

Gradient magnetického pole 46 (zobrazeno na obr. 3) v blízkosti středu aktivní plazmové čočky 4 lze odhadnout pomocí následující reakce mezi výbojovým proudem 45 (zobrazeno na obr. 3) I_0 a poloměrem výbojové kapiláry 41 R_c, kde μ_0 je magnetická permeabilita ve vakuu

$$(\partial B/\partial r)_0 = \mu_0 \frac{I_0}{2\pi R_c}.$$

Pokud je výbojový proud 45 (zobrazeno na obr. 3) 300 A a poloměr kapiláry 250 μm, gradient magnetického pole 46 (zobrazeno na obr. 3) ve středu kapiláry je 960 T/m. Gradient magnetického pole 46 (zobrazeno na obr. 3) je úměrný výbojovému proudu 45 (zobrazeno na obr. 3), který prochází plazmovým kanálem.

Obr. 3 představuje podrobné schéma mechanismu fokusace laditelné aktivní plazmové čočky 4, která je implementována do zařízení podle předkládaného technického řešení. Obr. 3 představuje fokusaci laditelné aktivní plazmové čočky 4 řízenou výbojovým proudem 45. Ponderomotorická síla 472 je osově symetrická s nulou na ose. Ponderomotorická síla 472 je síla fokusace působící na jednotlivé elektrony elektronového svazku 3 procházející podél plazmové čočky 4. Aktivní plazmovou čočkou 4 může být safírová výbojová kapilára 41 (zobrazeno na obr. 1) s regulovatelným výbojovým proudem 45 procházejícím plazmatem, která je vytvořena pomocí výbojového elektrického obvodu umístěného blízko kapiláry 21 (zobrazeno na obr. 1) plynové cely 2. Procházející výbojový proud 45 vytvoří magnetické pole 46, které působí na elektronový svazek 3 ponderomotorickou silou 472. Výsledkem je, že v blízkosti středu výbojové kapiláry 41 (zobrazeno na obr. 1) se v závislosti na výbojovém proudu 45 a na poloměru výbojové kapiláry 41 (zobrazeno na obr. 1) vytvoří gradient magnetického pole 46. Elektronový svazek 3 vystupující z laser-plazmové plynové cely 2 s požadovanou energií se šíří laditelnou aktivní plazmovou čočkou 4 umístěnou v blízkosti zdroje, aniž by došlo k výrazné degradaci v krátkém driftovém prostoru mezi nimi. Výbojová kapilára 41 (zobrazeno na obr. 1) s malou příčnou velikostí, typicky menší než 0,5 mm, je naplněna vodíkovým plynem vytvořeným v kompaktním komerčním vodíkovém generátoru za regulovatelného tlaku plynu. Ve výhodném provedení může být ponderomotorická síla 472 fokusace aktivní plazmové čočky nastavena tak, aby provedla požadovanou fokusaci elektronového svazku 3 na objekt 6 pro pevně danou energii fokusovaného elektronového svazku 5. Umožní tak dodat požadovanou velikost fokusovaného elektronového svazku 5 z ozařovacího systému.

"Celo-optické" uspořádání pro radiační terapii

Na obr. 4 je schematicky znázorněn kompaktní rotační systém pro radiační terapii. Systém obsahuje optické zařízení pro transport LCH1, LCH2, LCH3 laserového svazku 1, laserový systém 11 generující laserový svazek 1, který je schopen produkovat elektronový svazek 3 v plynové cele 2, a aktivní plazmovou čočku 4 umístěnou ve vakuové komoře ACH. Hlavním omezením pro tento systém je vzdálenost od výstupu vakuové komory ACH k ose otáčení systému, která je výhodně menší než 1 m, aby vznikl dostatečný prostor pro diagnostické prvky a pro léčený (cílený) objekt 6 (zobrazeno na obr. 4). Rotační "celo-optický" systém vhodný pro radiační terapii obsahuje pouze optické prvky pro transport laserového svazku 1 z laserového systému 11 přes vakuovou trubici, sadu rovinných zrcadel 13 a sférické zrcadlo 15 pro fokusaci pulzního laserového svazku 1 do plynové cely 2 laserového plazmového urychlovače. Aktivní plazmová čočka 4 je umístěna za plynovou celou 2 laserového plazmatického urychlovače a pomocí např. tlumiče 24 (zobrazeno na obr. 1) laserového svazku 1, čímž je chráněna před divergentním laserovým svazkem 1 vycházejícím z urychlovací plynové cely 2 po interakci laseru s plazmatem. Diferenční čerpání se výhodně používá mezi transportem LCH3 laserového svazku 1 a vakuovou komorou ACH pro uchování vysokého vakua při transportu LCH3 laserového svazku 1. Každý transport LCH1 až LCH3 laserového svazku 1 obsahuje vakuovou komoru 12 se zrcadlem 13 schopným měnit směr

dráhy laserového svazku 1. Část transportu LCH3 laserového svazku 1 obsahuje zrcadlo 14 s otvorem pro průchod fokusovaného laserového svazku 1 sférickým zrcadlem 15. Takové schéma bylo experimentálně testováno a schváleno pro dlouhodobý provoz, prováděný například po dobu 24 hodin nepřetržitého provozu s frekvencí opakování 1 Hz. Vakuový systém, distribuce plynu a elektrický systém jsou výhodně připojeny k vakuové komoře ACH. Další komory mohou být vybaveny vakuovým čerpadlem a motorickým systémem pro řízení polohy optických prvků transportního systému laserového svazku 1. Do rotačního systému může být zahrnuta také diagnostika laseru a fokusovaného elektronového svazku 5.

Pro získání laserového svazku 1 s vysokou intenzitou na vstupu plynové cely 2 urychlovače je pulzní laserový svazek 1 s vysokou energií výhodně fokusován do místa s velikostí FWHM ~ 20÷30 μm. Plynová cela 2 urychlovače je synchronizována s pulzním laserovým svazkem 1 a/nebo s nepřetržitým tokem plynu v kapiláře 21 (zobrazeno na obr. 31 a/nebo výbojové kapiláře 41 (zobrazeno na obr. 1) a/nebo v předem vytvořeném plazmovém kanálu v kapiláře 21 (zobrazeno na obr. 3) a/nebo výbojové kapiláře 41 plněné vodíkovým plynem, resp. směsí plynu. Mechanismus samo-vstřikování elektronového svazku 3 umožňuje zachytit elektrony plazmatu do urychlovací vlny, která se pohybuje za laserovým pulzem. Délka urychlení je v případě vodicího režimu určena délkou defázování nebo vyprázdnění/vyčerpání. Nejnovější experimentální úspěchy ukazují, že stabilní elektronový svazek 3 s energií přibližně 200 MeV a s proudem elektronového svazku 3 ~ 100 pC lze generovat s využitím výkonu fokusace laserového pulzu ~ 40 TW. Laditelná aktivní plazmová čočka 4, kterou může být jedna safírová výbojová kapilára 41 o délce 1÷2 cm umístěná za plynovou celou 2 „urychlovače“, umožňuje fokusovat urychlené elektronové svazky 3 a transportovat fokusovaný elektronový svazek 5 k objektu 6 bez výrazných ztrát. Sílu fokusace laditelné aktivní plazmové čočky 4 lze regulovat změnou výbojového proudu 45. Aktivní plazmová čočka 4 může být výhodně synchronizována s pulzem laserového svazku 1 použitým pro laser-plazmové urychlení. V případě výrazné degradace parametrů fokusovaného elektronového svazku 5 způsobené chromatickými a kolektivními efekty lze použít další kolimační systém s motorizovanou regulací velikosti mezery ve vodorovných i svislých rovinách umístěný za aktivní plazmovou čočku 4. Chromatické efekty způsobené velkou příčnou divergencí a velkým šířením energie elektronového svazku 3 lze minimalizovat optimalizací procesu laserem buzeného urychlování v plynové cele 2 urychlovače. V takovém případě lze velikost bodu fokusovaného elektronového svazku 5 regulovat pouze laditelnou aktivní plazmovou čočkou 4.

Výhoda plynové cely 2 v porovnání s plynovou tryskou souvisí s množstvím plynu, který je požadován pro tyto dva systémy. V případě plynové cely 2 je celkový objem plynu (vymezený objemem kanálu v kapiláře 21 (zobrazeno na obr. 3) a/nebo 41) extrémně malý a ve výsledku lze k naplnění tohoto objemu použít kompaktní generátor vodíku.

NÁROKY NA OCHRANU

1. Zařízení pro fokusaci elektronového svazku (3) pro jeho dodání do objektu (6) obsahující:

- plynovou celu (2) nastavenou pro příjem laserového svazku (1) a pro poskytování elektronového svazku (3) urychlením pomocí mechanizmu plazmové vlny;

- laditelnou aktivní plazmovou čočku (4) nastavenou pro příjem elektronového svazku (3) vycházejícího z plynové cely (2), **vyznačující se tím**, že

- laditelná aktivní plazmová čočka (4) je opatřena prostředky pro regulaci elektrického proudu (45) procházejícího plynem.

2. Zařízení podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje tlumič (24) laserového svazku, který je nastaven pro příjem laserového svazku (1) vycházejícího z plynové cely (2).

3. Zařízení podle nároku 2, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje prostředek (31) pro přesměrování laserového svazku (1) z optické osy elektronového svazku (3) k tlumiči (24), přičemž tento prostředek (31) pro přesměrování je umístěn mezi plynovou celou (2) a laditelnou aktivní plazmovou čočkou (4).

4. Zařízení podle kteréhokoliv z nároků 1 až 3, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje systém (22) řízení plynu, který obsahuje umělou atmosféru, přičemž tento systém (22) řízení plynu pro přivedení umělé atmosféry do kapiláry (21) je připojen k plynové cele (2).

5. Zařízení podle nároku 4, **vyznačující se tím**, že systém (22) řízení plynu obsahuje plynovou směs skládající se z 98 % H_2 a 2 % N_2.

6. Zařízení podle kteréhokoliv z nároků 1 až 5, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje druhý systém (42) řízení plynu, který obsahuje plyn pro kapiláru (41) v laditelné aktivní plazmové čočce (4), přičemž tento plyn výhodně obsahuje vodík.

7. Systém ozařování, **vyznačující se tím**, že obsahuje:

- zařízení podle kteréhokoliv z nároků 1 až 6,

- laserový systém generující laserový svazek (1); a

- rotační optický portál pro šíření laserového svazku (1) z laserového systému do zařízení.

4 výkresy

Seznam vztahových značek:

1 laserový svazek

2 plynová cela

3 elektronový svazek

4 aktivní plazmová čočka

5 fokusovaný elektronový svazek

6 objekt

11 laserový systém

12 vakuová komora

13 rovinná zrcadla

14 zrcadlo s otvorem

15 sférické zrcadlo

21 kapilára plynové cely

22 systém řízení plynu

23 kanály

24 tlumič pro laserový svazek

31 prostředek pro přesměrování svazku k tlumiči

41 výbojová kapilára

42 systém řízení plynu

43 kanály

44 systém

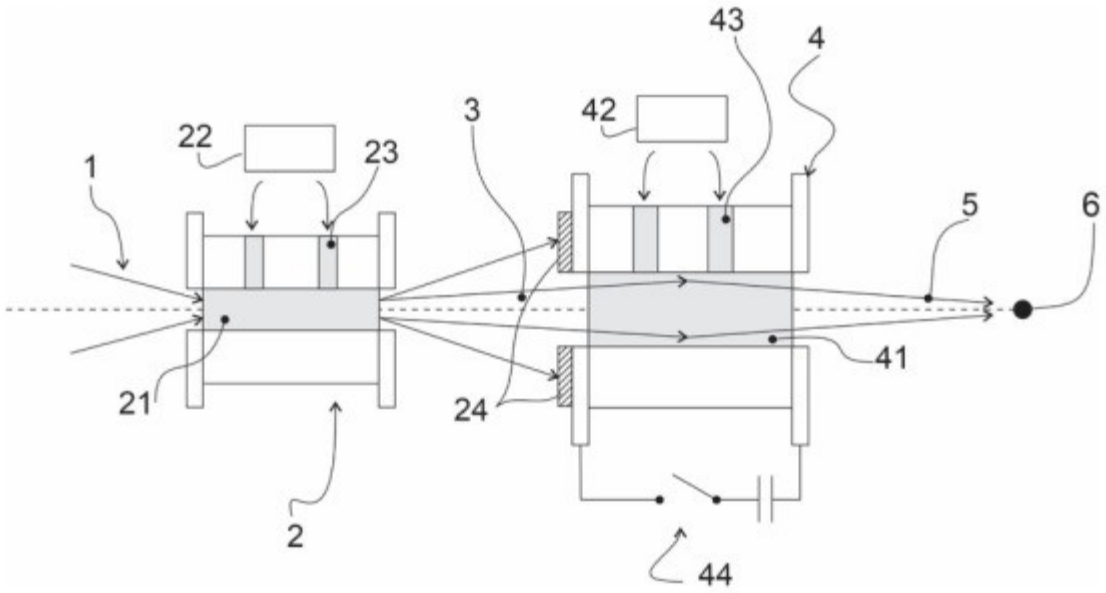
45 výbojový proud

46 magnetické pole

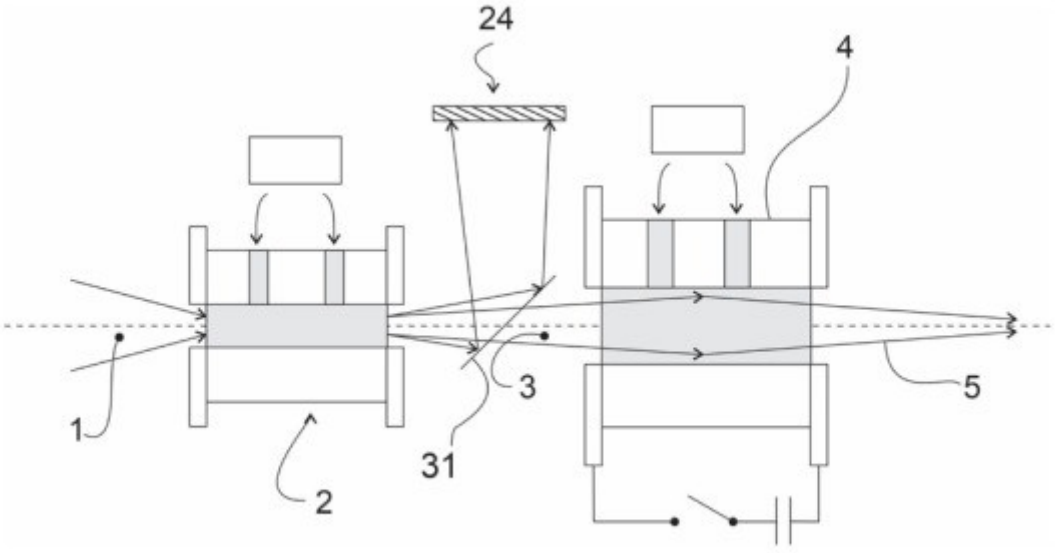
472 ponderomotorická síla

ACH vakuová komora

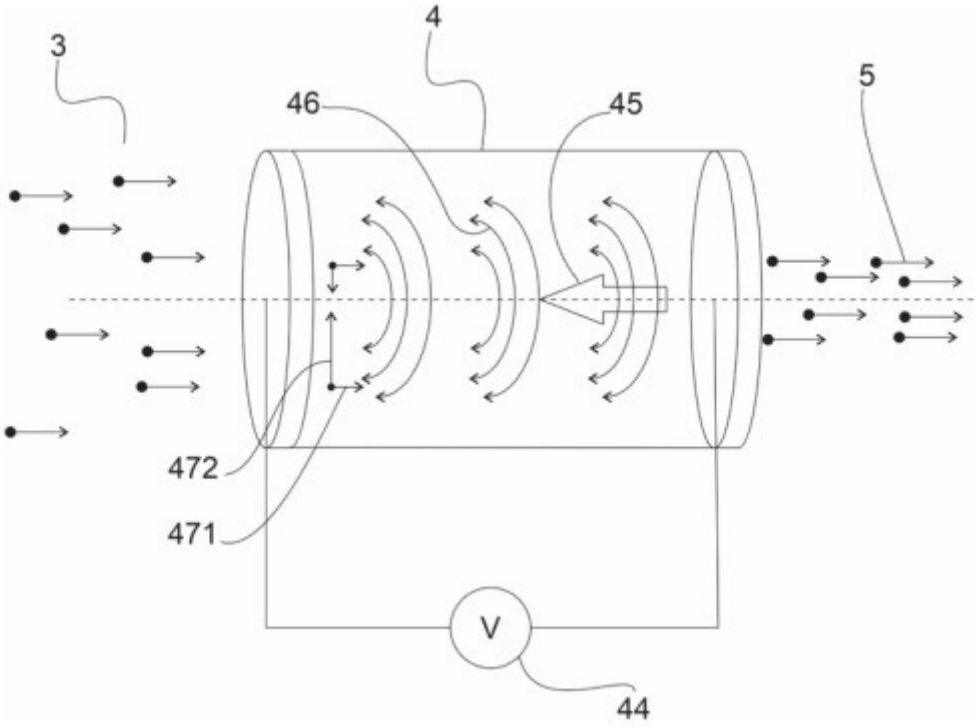
LCH1, LCH2, LCH3 transport laserového svazku



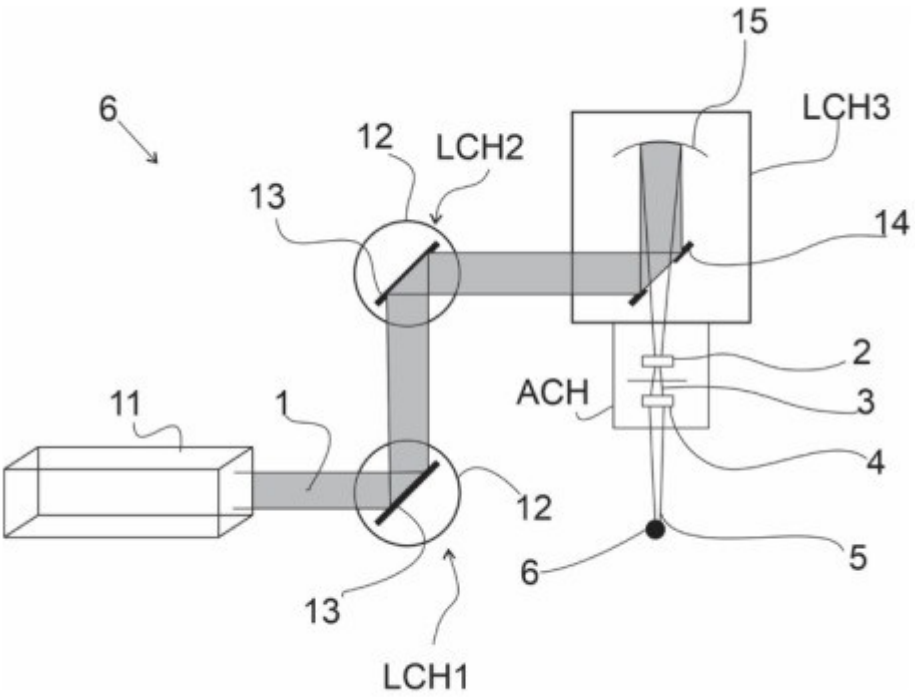
Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4