



(19) **HU**

**MAGYAR KÖZTÁRSASÁG**  
**Magyar Szabadalmi Hivatal**

(11) Lajstromszám: **224 767**

(13) **B1**

## SZABADALMI LEÍRÁS

(21) A bejelentés ügyszáma: **P 02 01537**

(22) A bejelentés napja: **2002. 05. 08.**

(51) Int. Cl.: **G01N 30/72** (2006.01.)

**H01J 49/00** (2006.01.)

(40) A közzététel napja: **2003. 12. 29.**

(45) A megadás meghirdetésének dátuma a Szabadalmi  
Közlöny és Védjegyértesítőben: **2006. 02. 28.**

(72) (73) Feltaláló és szabadalmas:

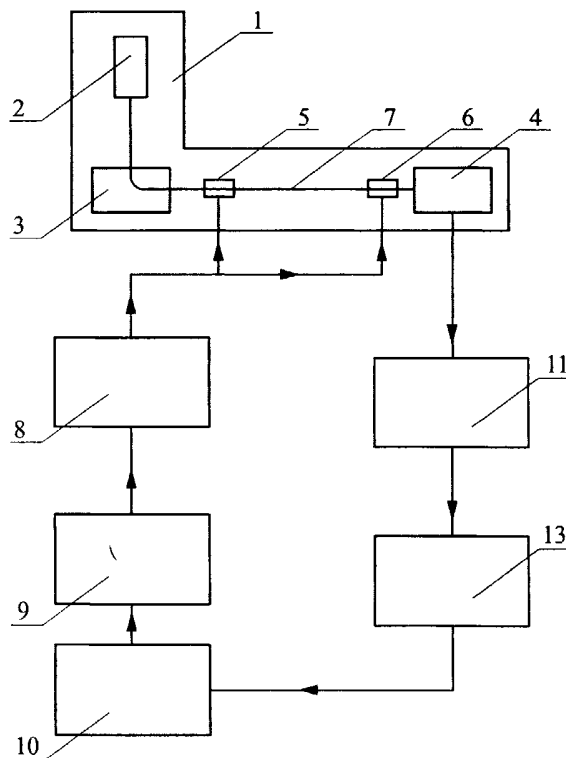
**dr. Hárs György, Budapest (HU)**

(54) **Folyamatos ionkibocsátású repülési idő-tömegspektrométer, és eljárás különböző tömeg/töltés  
viszonyú ionok áramának szelektív meghatározására**

(57) Kivonat

A repülési idő-tömegspektrométerek impulzusüzemű ionindítást alkalmaznak. Ennek hátrányos következményei vannak. A találmány mérés technikai eljárást tartalmaz folytonos ionkibocsátású ionforrás alkalmazásához. Ennek lényege, hogy az ionnyalábot intenzitásában koszinusz-időfüggvény szerint modulálják, és a detektorba érkező jel amplitúdóját és a modulálójelhez képesti fázishelyzetét minden modulálófrekvenciánál regisztrálják. A regisztrálás történhet a kimenőjelnek és a modulálójelnek analóg összeszorozásával és aluláteresztő szűrésével, vagy pedig az ionnyaláb ismételt modulációjával. A futási idő-spektrumot a regisztrátum Fourier-transzformációjával számítógéppel előállítják.

A berendezés legjellemzőbb kiviteli alakjában a következő: A széles sávú teljesítményerősítő (8) bemenete a programozott frekvenciájú oszcillátor (9) kimenetére csatlakozik, ennek frekvenciavezérlő bemenete pedig a számítógép (10) kimenetével van összekötve. A detektor (4) kimenete a jel előerősítő (11) bemenetével van összekötve. A széles sávú teljesítményerősítő (8) mindkettő modulátort (5, 6) ugyanazzal a jellel hajtja meg. Az előerősítő (11) kimenete aluláteresztő szűrőn (13) keresztül a számítógép (10) adatgyűjtő bemenetére kapcsolódik.



2. ábra

HU 224 767 B1

A találmány tárgya olyan folyamatos ionkibocsátású repülésiidő-tömegspektrométer, amely kiküszöböli a korábban ismert legközelebbi technikai megoldás (US 4 707 602) fogyatékoságainak jelentős részét.

A repülésiidő-tömegspektroszkópia a tömegspektroszkópiai módszereknek egy speciális ága. A tömegspektroszkópia lényege a következő: meg kívánjuk határozni valamely minta vegyi összetételét. A minta lehet gáz-, folyadék- vagy szilárd halmazállapotú. A vizsgálathoz a minta egy kis részét ionizálni kell és a tömegspektrométer vákuumterébe kell juttatni. Ezt követően a tömegspektrométer-berendezés az ionokat tömeg per töltés viszonyuk szerint szétválasztja. Az ionok domináns része egyszerűen töltött, így a kapott spektrumot röviden tömegspektrumnak nevezzük. A szétválasztás történhet helyben, vagyis hogy más tömeg per töltés viszonyú ion máshová érkezik, történhet azonban időben is, vagyis hogy a más tömeg per töltés viszonyú ion más időben érkezik ugyanazon helyre. Jelen találmány esetében éppen ez utóbbi módszer szerepel. Minden tömegspektrométer-berendezés elektromos és/vagy mágneses mezőket használ a kívánt tömegszétválasztás elérésére, ezért szükséges a mintából ionokat generálnunk, mivel ezek töltése képes kölcsönhatni az alkalmazott mezőkkel.

A szakirodalomban sok publikáció foglalkozik a repülésiidő-tömegspektrometriával. Ezek közül említem: B. A. Mamyrin, Time-of-flight mass spectrometry (concepts, achievements and prospects), International Journal of Mass Spectrometry 206 (2001) 251–266, amely 2001. évben jelent meg, és összefoglaló képet ad a repülésiidő-tömegspektroszkópia mérés technikájának fejlődéséről. A többi publikáció valamely fontos mérés technikai részletkérdés diszkussziójával foglalkozik, vagy pedig egy adott vegyészeti alkalmazás kapcsán tárgyalja a módszert. Ilyenek: EP 0 575 778, US 6 198 096, US 4 707 602. Az elsőként említett európai szabadalom egy speciális gerjesztéssel vezérelt ioncsapda-elrendezést tárgyal, a második amerikai szabadalom egy álvéletlen zajjal meghajtott repülésiidő-spektrométert ír le. Ezek csupán tárgyukban hasonlóak, de nem relevánsak. A harmadik amerikai szabadalom ismerteti a technika állásának megfelelő folyamatos ionkibocsátású repülésiidő-tömegspektrométer mérés technikai eljárását és annak egy megvalósítását.

A technika állása szerint a folyamatos ionkibocsátású repülésiidő-tömegspektrométer a következő módon működik. Az ionok ionforrásban keletkeznek, elektromos mező gyorsításának hatására azonos kinetikus energiára tesznek szert, majd a tömeg per töltés viszonyuk négyzetgyökének reciprokával arányos sebességük miatt egy adott repülési távolságot tömeg per töltés viszonyuk négyzetgyökével arányos időtartam alatt tesz meg. A keresett tömeginformációt tehát a repülés ideje adja. Az ionok keltése időben folyamatos stationárius, azaz nem impulzus jellegű. A létrehozott ionnyalábot a futási tér elején a kihúzóelektrodra (draw-out electrode) adott szinuszos feszültséggel modulálják. A futási tér végén található detektor kapuzóelektrodjára (detector gate) kapcsolt azonos szinuszos

feszültséggel a detektor kimenőjelét ismételt modulálják. A modulálójel frekvenciáját egyenletes lépésekben növelik. A detektált jelet aluláteresztő erősítést követően Fourier-transzformációnak vetik alá, amelyből a futásiidő-spektrum keletkezik.

Az US 4 707 602 számú szabadalmi leírás szerinti repülésiidő-tömegspektrométer mérés technikai nehézségei és korlátjai döntően a moduláció megvalósításának tökéletlenségéből fakadnak, mivel a modulációt a meglévő impulzusüzemű spektrométeren egyébként más célra szolgáló elektrodák (draw-out electrode, detector gate) alkalmazásával valósították meg, nem pedig a célra tervezett eszköz segítségével.

Az elektrodával történő modulációval az alapvető probléma az, hogy az ilyen moduláció folyamata lényegében nemlineáris folyamat. Ennek az a következménye, hogy míg a modulációt végrehajtó elektroda meghajtása tiszta szinuszos időfüggvény szerint zajlik, addig a modulált nyaláb intenzitása nem tiszta szinuszos időfüggvény lesz. Ennek következtében a Fourier-transzformáció eredményeképpen előálló futásiidő-spektrumban magasabb felharmonikusokból származó további csúcsok jelennek meg, az alapharmonikus idő egész számú többszöröseinél. Ezek a csúcsok nem valóságos ionok futási idejét jelzik, csupán egy káros mérés technikai effektus eredményei. Ez a hatás erősen zavaró és teljes kiküszöbölése elektrodával történő moduláció esetében nem lehetséges.

A kitűzött cél tehát a magasabb harmonikus csúcsok futásiidő-spektrumban történő megjelenésének megakadályozása.

A célkitűzés szerinti feladat megoldására szolgáló találmány egyrészt: eljárás különböző tömeg/töltés viszonyú ionok áramának szelektív meghatározására repülésiidő-tömegspektrométerhez. Időben folyamatosan ionokat keltünk, villamos térrel azonos kinetikus energiára gyorsítunk, és így egy ionnyalábot hozunk létre. Az ionnyalábon helyileg közvetlenül az ionkeltés után, időben szinuszos intenzitásmodulációt végzünk, melyhez egy modulálójelet használunk. A modulálójel frekvenciáját időben változtatjuk. Egy adott úthossz befutását követően az ionnyaláb áramát detektáljuk. A detektált áramjel amplitúdóját és a modulálójelhez viszonyított fázishelyzetét regisztráljuk, és Fourier-transzformációt alkalmazunk a különböző töltés/tömeg viszonyú ionok futásiidő-spektrumának előállítására. E találmány szerint az amplitúdó és a relatív fázishelyzet regisztrálásához a nyaláb detektált áramjelét és a modulálójelet analóg módon megszorozzuk.

A találmány másrészt eljárás különböző tömeg/töltés viszonyú ionok áramának szelektív meghatározására repülésiidő-tömegspektrométerhez. Időben folyamatosan ionokat keltünk, villamos térrel azonos kinetikus energiára gyorsítunk, és így egy ionnyalábot hozunk létre. Az ionnyalábon helyileg közvetlenül az ionkeltés után, időben szinuszos intenzitásmodulációt végzünk, melyhez egy modulálójelet használunk. A modulálójel frekvenciáját időben változtatjuk. Egy adott úthossz befutását követően az ionnyaláb áramát detektáljuk. A detektált áramjel amplitúdóját és a mo-

dulólójelhez viszonyított fázishelyzetét regisztráljuk, és Fourier-transzformációt alkalmazunk a különböző töltés/tömeg viszonyú ionok futásiidő-spektrumának előállítására. E találmány szerint viszont az amplitúdó és a relatív fázishelyzet regisztrálásához az ionnyaláb intenzitását a detektálást megelőzően ugyanazon modulálójellel ismételt moduláljuk.

Mindkét fenti találmány esetében előnyös, ha az ionnyalábot intenzitásban oly módon moduláljuk, hogy azt először a nyalábra merőleges irányban eltérítjük, majd az eredeti nyaláb vonalába helyezett centrális apertúrán átvezetjük.

A találmány harmadrészt folyamatos ionkibocsátású repülésiidő-tömegspektrométer. Tartalmaz egy vákuumkamrában elhelyezkedő ionforrást és ionoptikai elemeket, amelyek egy ionnyalábot állítanak elő. Továbbá energiaszűrőt vagy nyalábkésleltető elektrosztatikus reflektort, detektort és 1–100 MHz modulációs frekvenciájú modulátort. Az ionnyaláb a modulátoron halad keresztül. A modulátor egy teljesítményerősítő kimenetével van összekötve. A teljesítményerősítő bemenete egy programozott frekvenciájú oszcillátor kimenetére csatlakozik. A programozott frekvenciájú oszcillátor frekvenciavezérlő bemenete pedig egy számítógép kimenetével van összekötve. A detektor kimenete egy előerősítő bemenetével van összekötve.

E találmány szerint az előerősítő sávszélessége megegyezik az alkalmazott maximális modulációs frekvenciával. Az előerősítő kimenete egy analóg szorzó egyik bemenetére kapcsolódik, amelynek másik bemenete a programozott frekvenciájú oszcillátor kimenetére csatlakozik. Az analóg szorzó kimenete pedig egy aluláteresztő szűrőn keresztül a 10 számítógép adatgyűjtő bemenetére kapcsolódik.

A találmány negyedrészt folyamatos ionkibocsátású repülésiidő-tömegspektrométer. Tartalmaz egy vákuumkamrában elhelyezkedő ionforrást és ionoptikai elemeket, amelyek egy ionnyalábot állítanak elő. Tartalmaz továbbá energiaszűrőt vagy nyalábkésleltető elektrosztatikus reflektort, detektort, 1–100 MHz modulációs frekvenciájú két darab modulátort. Az ionnyaláb a modulátorokon halad keresztül. A modulátorok egy teljesítményerősítő kimenetével vannak összekötve. A teljesítményerősítő bemenete egy programozott frekvenciájú oszcillátor kimenetére csatlakozik. A programozott frekvenciájú oszcillátor frekvenciavezérlő bemenete pedig egy számítógép kimenetével van összekötve. E találmány esetében a detektor kimenete egy előerősítő bemenetére csatlakozik, melynek kimenete egy aluláteresztő szűrőn keresztül a számítógép adatgyűjtő bemenetére kapcsolódik. A modulátor az ionok áramlási irányát tekintve a detektor előtt helyezkedik el.

Az alábbiakban összefoglalom a továbbfejlesztett folyamatos ionkeltéssel működő repülésiidő-tömegspektrométer előnyös tulajdonságait, a mellékelt ábrákra hivatkozva

az 1. ábra folytonos ionkibocsátás alkalmazásával működő repülésiidő-tömegspektrométer blokkvázlata. A detektált ionáram amplitú-

dójának és fázishelyzetének regisztrálása 12 analóg szorzó alkalmazásával történik, a 2. ábra Folytonos ionkibocsátás alkalmazásával működő repülésiidő-tömegspektrométer blokkvázlata. A detektált ionáram amplitúdójának és fázishelyzetének regisztrálása a 7 ionnyaláb detektálását közvetlenül megelőző második modulációval történik.

A 12 analóg szorzó alkalmazása révén megakadályozható, hogy fellépjenek a nemlineáris moduláció következtében egyébként létrejövő magasabb felharmonikus csúcsok, így a mért futásiidő-spektrumban minden csúcs valós ionáramot reprezentál, amely elengedhetetlen feltétele az analitikai alkalmazásnak (1. ábra, 1. és 4. ip.).

A technika állása szerinti a (US 4 707 602) szabadalmi leírásnak megfelelő berendezésben használatos detektor szükséges sávszélessége igen magas, 100 MHz lehet. A 2. igénypont szerinti eljárás és az 5. igénypont szerinti berendezés (2. ábra) esetében második 6 modulátor a 4 detektor előtt helyezkedik el, és így a jelet alapsávba visszakeveri, aminek következtében a detektálandó jel sávszélessége lecsökken a 10 kHz körüli tartományba, amely nagyban egyszerűsíti a mérés technikai feladatot, vagyis lassú 4 detektor használata is lehetségessé válik.

Alább matematikailag bizonyítom, hogy a magasabb harmonikusoktól mentes működés szükséges és elégséges feltétele legalább az egyik modulátor tiszta szinuszos működése. Az analóg szorzó integrált áramkör olcsón beszerezhető, és a detektor után alkalmazva megoldja a problémát, mivel linearitása sokkal jobb, mint az elektródmodulációnak.

A teljes ionáram több különböző tömeg per töltés viszonyú ionáramának összege

$$I_{\text{tot}} = i_1 + i_2 + \dots + i_n + \dots$$

Az ezekhez tartozó futási idők rendre

$$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n, \dots$$

Az ionnyaláb elején és a végén a modulálófűgvények a következők rendre:

$$A(\omega) \bmod(\omega t) \dots \text{és} \dots B(\omega) \bmod(\omega t)$$

ahol  $\bmod(\omega t)$  és  $\text{Mod}(\omega t)$   $2\pi/\omega$ -ban periodikus függvények,  $A(\omega)$  és  $B(\omega)$  ezek amplitúdói a moduláló-körfrekvencia függvényében. Közvetlenül az első modulálást követően A nyaláb áramának időfüggvénye a következő:

$$I_1(t) = (i_1 + i_2 + \dots + i_n + \dots) A(\omega) \bmod(\omega t)$$

A repülési hossz befutása után:

$$I_2(t) = A(\omega) \{ i_1 \bmod[\omega(t - \tau_1)] + \dots + i_n \bmod[\omega(t - \tau_n)] + \dots \}$$

A második modulálást követően az ionáram időfüggvénye a következő:

$$I_3(t) = A(\omega) B(\omega) \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} i_k \bmod[\omega(t - \tau_k)] \text{Mod}(\omega t) \right\}$$

A továbbiakban a modulálófűgvényeket koszinuszos Fourier-sorokkal tekintjük:

$$\bmod[\omega(t - \tau_k)] = a_0 + a_1 \cos[\omega(t - \tau_k)] + a_2 \cos[2\omega(t - \tau_k)] + \dots + a_3 \cos[3\omega(t - \tau_k)] + \dots$$

$$\text{Mod}(\omega t) = b_0 + b_1 \cos \omega t + b_2 \cos 2\omega t + \dots$$

Két sor szorzásakor minden tagot minden taggal meg kell szorozni. Az alkalmazott aluláteresztő szűrés

következtében csak az időfüggetlen DC komponensek maradnak meg. Ezek az azonos frekvenciájú Fourier-komponensek amplitúdói szorzatának fele nagyságúak. Itt felhasználtuk az alábbi trigonometrikus azonosságot:

$$\cos\alpha\cos\beta = \frac{1}{2}[\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)]$$

A második modulációt követően tehát az ionnyaláb áramának időátlaga:

$$K(\omega) = \frac{A(\omega)B(\omega)}{2} \sum_{k=1}^{\infty} i_k [a_0 b_0 + a_1 b_1 \cos(\omega\tau_k) + a_2 b_2 \cos(2\omega\tau_k) + \dots + a_n b_n \cos(n\omega\tau_k) + \dots]$$

Itt látható a bizonyítandó állítás. Ha mindkét modulátornak vannak felharmonikusai, akkor a keletkező kimenőjelben megjelennek ezek páronkénti szorzatai, és vele megjelennek a szellemcsúcsok ( $\tau_k, 2\tau_k, 3\tau_k, \dots, n\tau_k$ ) a futásiidő-spektrumban.

Ha azonban a második modulátor lineáris üzemen működik, akkor

$$Mod(\omega t) = b_0 + \cos\omega t \text{ vagyis } b_2 = b_3 = \dots = b_n = 0$$

$$K(\omega) = \frac{A(\omega)B(\omega)}{2} \sum_{k=1}^{\infty} i_k [a_0 b_0 + a_1 b_1 \cos(\omega\tau_k)]$$

Itt bevezetjük az  $R(\omega)$  függvényt, amely a lineárisnak tekintett mérőrendszer frekvenciafüggő amplitúdóátvitelét jellemzi:

$$R(\omega) = \frac{A(\omega)B(\omega)}{2}$$

Ezzel

$$K(\omega) = R(\omega) \sum_{k=1}^{\infty} i_k [a_0 b_0 + a_1 b_1 \cos(\omega\tau_k)]$$

$$K(\omega) = R(\omega) \{a_0 b_0 + a_1 b_1 [\cos(\omega\tau_1) + \cos(\omega\tau_2) + \dots + \cos(\omega\tau_n)]\}$$

Hanyagoljuk el a frekvenciától független tagot:

$$K(\omega) = R(\omega) a_1 b_1 [\cos(\omega\tau_1) + \cos(\omega\tau_2) + \dots + \cos(\omega\tau_n)]$$

A mérőrendszer  $R(\omega)$  amplitúdókarakterisztikája a fenti jelből kalibráció segítségével kiküszöbölhető. Ehhez egy olyan mérésre van szükség, amikor tudjuk, hogy csak egyfajta tömeg per töltés viszonyú ion van a spektrométerben. Ennek futási ideje legyen  $\tau_1$ .

$$K(\omega) = R(\omega) a_1 b_1 \cos(\omega\tau_1)$$

Ez egy frekvenciában csökkenő amplitúdójú koszinuszfüggvény, amely amplitúdóját egy frekvenciafüggő kalibrálódófüggvénnyel konstansra felszorozzuk. Az így korrigált jel már nem fogja tartalmazni a mérőrendszer amplitúdókarakterisztikájának zavaró hatását. A továbbiakban a kalibrált függvénnyel foglalkozunk.

$$K^*(\omega) = i_1 \cos(\omega\tau_1) + i_2 \cos(\omega\tau_2) + \dots + i_n \cos(\omega\tau_n)$$

$$K^*(f) = i_1 \cos(2\pi f\tau_1) + i_2 \cos(2\pi f\tau_2) + \dots + i_n \cos(2\pi f\tau_n)$$

Ezt  $f$  frekvencia szerint Fourier-transzformálva a különböző tömeg per töltés viszonyú ionok intenzitásait kapjuk a nekik megfelelő futási időknél. A Fourier-transzformáció végrehajtásához számítógépes gyors Fourier-transzformációt (FFT) használunk.

## SZABADALMI IGÉNYPONTOK

1. Eljárás különböző tömeg/töltés viszonyú ionok áramának szelektív meghatározására repülésiidő-tömegspektrométerhez, ahol időben folyamatosan ionokat keltünk, villamos térrel azonos kinetikus energiára gyorsítunk, és így egy ionnyalábot (7) hozunk létre, az ionnyalábon (7) helyileg közvetlenül az ionkeltés után időben szinuszos intenzitásmodulációt végzünk, melyhez egy modulálójelet használunk, a modulálójel frekvenciáját időben változtatjuk, egy adott úthossz befutását követően az ionnyaláb (7) áramát detektáljuk, a detektált áramjel amplitúdóját és a modulálójelhez viszonyított fázishelyzetét regisztráljuk, és Fourier-transzformációt alkalmazunk a különböző töltés/tömeg viszonyú ionok futásiidő-spektrumának előállítására, *azzal jellemezve*, hogy az amplitúdó és a relatív fázishelyzet regisztrálásához a nyaláb detektált áramjelét és a modulálójelet analóg módon megszorozzuk.

2. Eljárás különböző tömeg/töltés viszonyú ionok áramának szelektív meghatározására repülésiidő-tömegspektrométerhez, ahol időben folyamatosan ionokat keltünk, villamos térrel azonos kinetikus energiára gyorsítunk, és így egy ionnyalábot (7) hozunk létre, az ionnyalábon (7) helyileg közvetlenül az ionkeltés után időben szinuszos intenzitásmodulációt végzünk, melyhez egy modulálójelet használunk, a modulálójel frekvenciáját időben változtatjuk, egy adott úthossz befutá-

sát követően az ionnyaláb (7) áramát detektáljuk, a detektált áramjel amplitúdóját és a modulálójelhez viszonyított fázishelyzetét regisztráljuk, és Fourier-transzformációt alkalmazunk a különböző töltés/tömeg viszonyú ionok futásiidő-spektrumának előállítására, *azzal jellemezve*, hogy az amplitúdó és a relatív fázishelyzet regisztrálásához az ionnyaláb intenzitását a detektálást megelőzően ugyanazon modulálójellel ismételt moduláljuk.

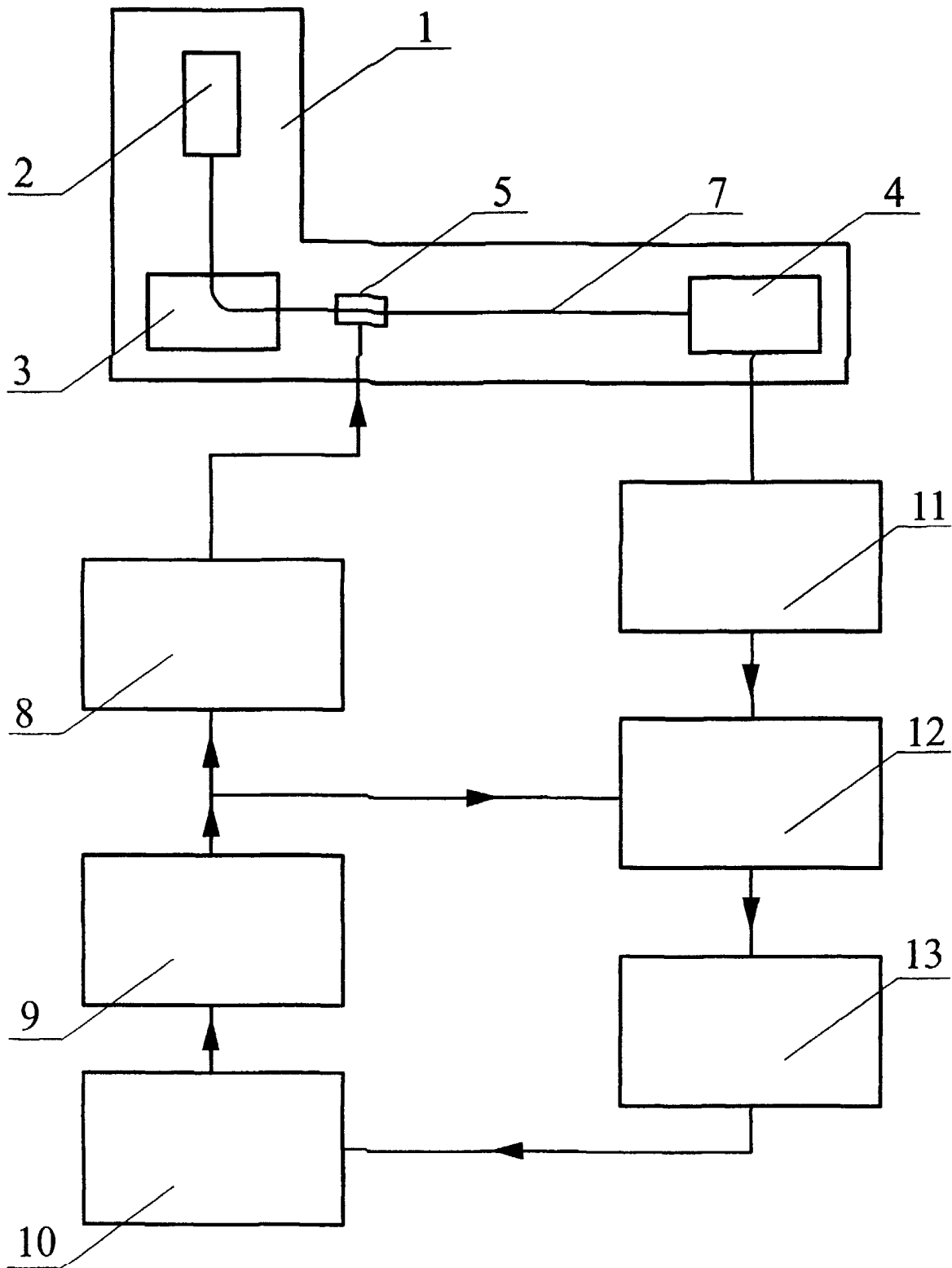
3. Az 1. vagy a 2. igénypont szerinti eljárás, *azzal jellemezve*, hogy az ionnyalábot (7) intenzitásában oly módon moduláljuk, hogy az ionnyalábot (7) először a nyalábra merőleges irányban eltérítjük, majd az eredeti nyaláb vonalába helyezett centrális apertúrán átvesszük.

4. Folyamatos ionkibocsátású repülésiidő-tömegspektrométer, amely tartalmaz egy vákuumkamrában (1) elhelyezkedő ionforrást (2) és ionoptikai elemeket, amelyek egy ionnyalábot (7) állítanak elő, továbbá energiaszűrőt vagy nyalábkésselletető elektrosztatikus reflektort (3), detektort (4), 1–100 MHz modulációs frekvenciájú modulátort (5), az ionnyaláb (7) a modulátoron (5) halad keresztül, és a modulátor (5) egy teljesítményerősítő (8) kimenetével van összekötve, a teljesítményerősítő (8) bemenete egy programozott frekvenciájú oszcillátor (9) kimenetére csatlakozik, a programozott frekvenciájú oszcillátor (9) frekvenciavezérlő bemenete egy számítógép (10) kimenetével van

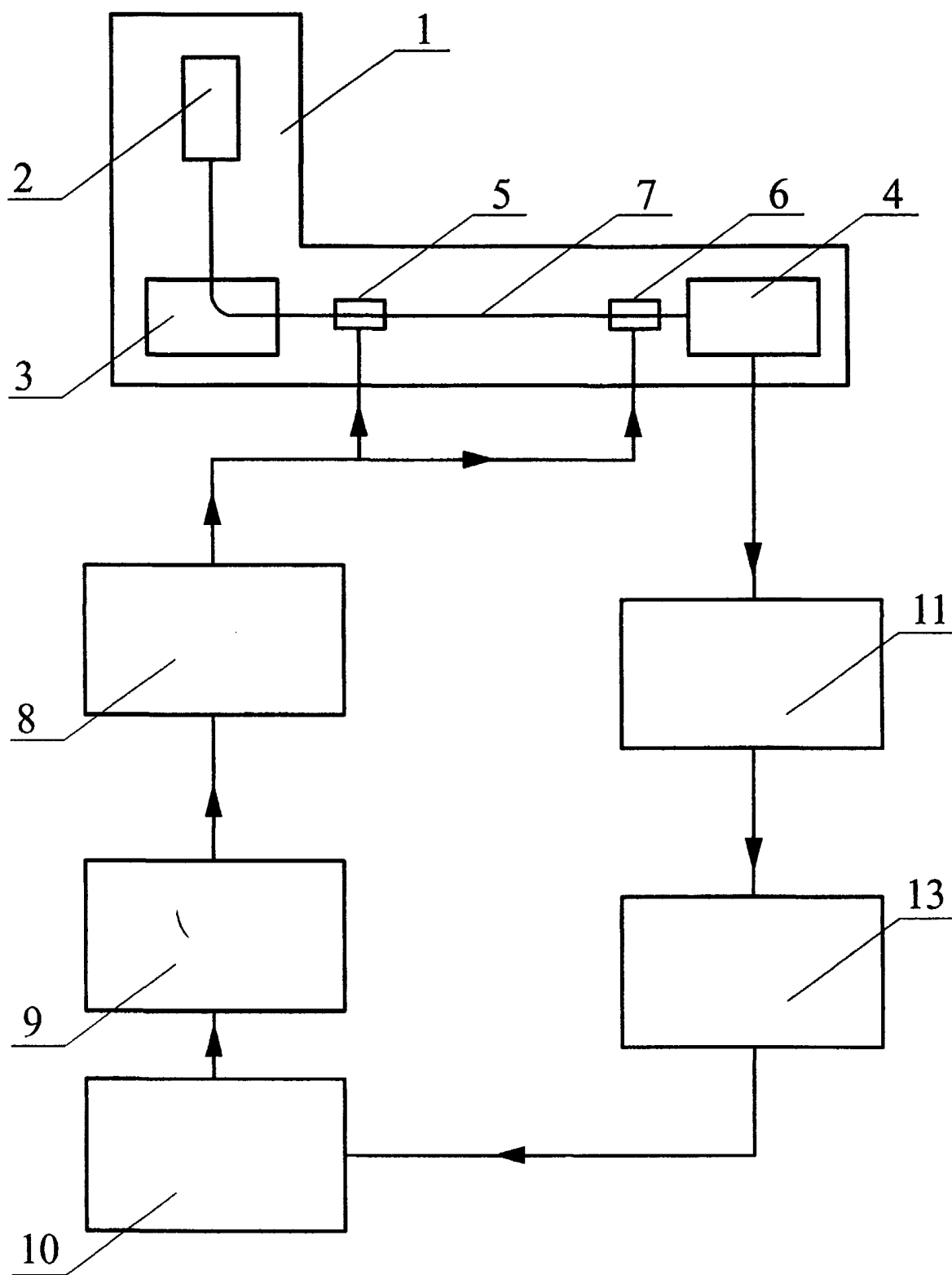
összekötve, a detektor (4) kimenete egy előerősítő (11) bemenetével van összekötve, *azzal jellemezve*, hogy az előerősítő (11) sávszélessége megegyezik az alkalmazott maximális modulációs frekvenciával, az előerősítő (11) kimenete egy analóg szorzó (12) egyik bemenetére kapcsolódik, amelynek másik bemenete a programozott frekvenciájú oszcillátor (9) kimenetére csatlakozik, az analóg szorzó (12) kimenete egy aluláteresztő szűrőn (13) keresztül a számítógép (10) adatgyűjtő bemenetére kapcsolódik.

5. Folyamatos ionkibocsátású repülésiidő-tömegspektrométer, amely tartalmaz egy vákuumkamrában (1) elhelyezkedő ionforrást (2) és ionoptikai elemeket, amelyek egy ionnyalábot (7) állítanak elő, továbbá energiaszűrőt vagy nyalábkésleltető elektrosztatikus

reflektort (3), detektort (4), 1–100 MHz modulációs frekvenciájú két darab modulátort (5, 6), az ionnyaláb (7) a modulátorokon (5, 6) halad keresztül, és a modulátorok (5, 6) egy teljesítményerősítő (8) kimenetével vannak összekötve, a teljesítményerősítő (8) bemenete egy programozott frekvenciájú oszcillátor (9) kimenetére csatlakozik, a programozott frekvenciájú oszcillátor (9) frekvenciavezérlő bemenete egy számítógép (10) kimenetével van összekötve, *azzal jellemezve*, hogy a detektor (4) kimenete egy előerősítő (11) bemenetére csatlakozik, az előerősítő (11) kimenete egy aluláteresztő szűrőn (13) keresztül a számítógép (10) adatgyűjtő bemenetére kapcsolódik, valamint a modulátor (6) az ionok áramlási irányát tekintve a detektor (4) előtt helyezkedik el.



1. ábra



2. ábra