



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2015년11월23일

(11) 등록번호 10-1570652

(24) 등록일자 2015년11월16일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01J 49/42 (2006.01) G01N 27/62 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2011-7028183

(22) 출원일자(국제) 2010년05월05일

심사청구일자 2015년04월27일

(85) 번역문제출일자 2011년11월25일

(65) 공개번호 10-2012-0060941

(43) 공개일자 2012년06월12일

(86) 국제출원번호 PCT/US2010/033750

(87) 국제공개번호 WO 2010/129690

국제공개일자 2010년11월11일

(30) 우선권주장

61/176,390 2009년05월07일 미국(US)

(뒷면에 계속)

(56) 선행기술조사문현

US20080111067 A1

US20080121795 A1

WO2008063497 A2*

KR1020090010067 A

*는 심사관에 의하여 인용된 문현

(73) 특허권자

엠케이에스 인스트루먼츠, 인코포레이티드

미국, 매사추세츠 01810, 앤도버, 스위트 201, 테크 드라이브 2

(72) 발명자

브루커, 제라르도, 에이.

미국 80503 콜로라도 롱먼트 하버드 코트 2214

반 앤트워프, 케니스, 디.

미국 80909 콜로라도 콜로라도 스프링스 테이블

메사 웨이 8030

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

특허법인 남엔드남

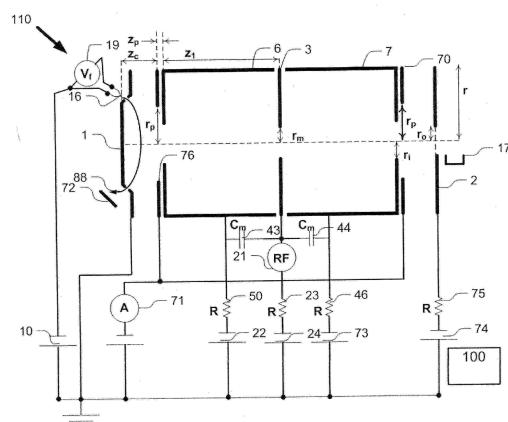
전체 청구항 수 : 총 52 항

심사관 : 김주승

(54) 발명의 명칭 정전 이온 트랩

(57) 요약

이온 트랩은 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과 이들 사이의 중앙 렌즈를 포함하며, 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 정전 포텐셜을 생성하고 구속하는 포텐셜은 비조화인 전극 구조를 포함한다. 이온 트랩은 또한 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 2배의 주파수로 여기시키는 여기 주파수(f)를 가지고 바람직하게는 중앙 렌즈에 연결된 AC 여기 소스를 포함한다. 일 실시예에서, 이온 트랩은 AC 여기 주파수와 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배 사이의 주파수 차이를 질량 선택적으로 감소시키는 스캔 제어부를 포함한다.

대 표 도 - 도1

(72) 발명자

래스본, 쥐., 제프리

미국 80503 콜로라도 롱먼트 샌 마르코 드라이브
4251

해인부흐, 스콧, 씨.

미국 80525 콜로라도 포트 콜린스 스왈로우 로드
801

스콧, 마이클, 앤.

미국 80538 콜로라도 러브랜드 타버나시 드라이브
2708

힌치, 바바라 제인

미국 08854 뉴저지 피스카타웨이 테일러 로드 610
루트거스 유니버시티 디파트먼트 오브 케미스트리
엔드 캐미컬 바이올로지

에르마코브, 알렉세이 브이.

미국 08854 뉴저지 피스카타웨이 테일러 로드 610
루트거스 유니버시티 디파트먼트 오브 케미스트리
엔드 캐미컬 바이올로지

(30) 우선권주장

61/215,501 2009년05월06일 미국(US)

61/325,119 2010년04월16일 미국(US)

61/329,163 2010년04월29일 미국(US)

명세서

청구범위

청구항 1

제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과 이들 사이의 중앙 렌즈를 포함하며, 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조 – 상기 구속하는 포텐셜은 비조화임 – ; 및 구속된 이온들을 상기 이온들의 고유 진동 주파수의 2배의 주파수로 여기시키는 여기 주파수(f)를 가지며, 상기 중앙 렌즈에 직접 연결된 AC 여기 소스를 포함하는, 이온 트랩.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 AC 여기 주파수를 스위핑하는 스캔 제어부를 더 포함하는, 이온 트랩.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 스캔 제어부는 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배보다 높은 여기 주파수로부터 일 방향으로 소정의 스위프율로 상기 AC 여기 주파수(f)를 스위핑하는, 이온 트랩.

청구항 4

제2항에 있어서, 상기 스캔 제어부는 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배보다 낮은 여기 주파수로부터 일 방향으로 소정의 스위프율로 상기 AC 여기 주파수(f)를 스위핑하는, 이온 트랩.

청구항 5

제4항에 있어서, 상기 스위프율은 $d(1/f^n)/dt$ 가 상수이고 n 은 영(0)보다 크도록 설정되는, 이온 트랩.

청구항 6

제5항에 있어서, n 은 1인, 이온 트랩.

청구항 7

제2항에 있어서, 상기 스캔 제어부는 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배가 상기 AC 여기 소스의 주파수보다 낮은 주파수로부터 변하는 방향으로 소정의 스위프율로 상기 정전 포텐셜의 크기(V)를 스위핑하는, 이온 트랩.

청구항 8

제2항에 있어서, 상기 스캔 제어부는 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배가 상기 AC 여기 소스의 주파수보다 높은 주파수로부터 변하는 방향으로 소정의 스위프율로 상기 정전 포텐셜의 크기(V)를 스위핑하는, 이온 트랩.

청구항 9

제1항에 있어서, 상기 전극 구조의 상기 제1 마주보는 미러 전극은:

a) 적어도 하나의 구멍을 가지며, 상기 마주보는 미러 전극 구조의 축을 벗어나 위치하는 제1 플레이트 형상 전극; 및

b) 상기 중앙 렌즈를 향해서 개방되어 있고, 중앙에 위치하는 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극을 포함하고,

상기 전극 구조의 상기 제2 마주보는 미러 전극은:

i) 축방향으로 위치하는 구멍을 갖는 제1 플레이트 형상 전극; 및

ii) 상기 중앙 렌즈를 향해서 개방되고, 중앙에 위치한 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극을 포함하고,

상기 중앙 렌즈는 플레이트 형상이고, 축방향으로 위치하는 구멍을 포함하는, 이온 트랩.

청구항 10

제1항에 있어서, 질량 분석계로서 구성되고,

이온 소스를 더 포함하며,

상기 이온 소스는 기체상 종의 전자 충격 이온화에 의해서 이온들을 생성하는 적어도 하나의 전자 방출 소스, 및 이온 검출기를 포함하는, 이온 트랩.

청구항 11

제10항에 있어서, 상기 적어도 하나의 전자 방출 소스는 고온 필라멘트인, 이온 트랩.

청구항 12

제10항에 있어서, 상기 적어도 하나의 전자 방출 소스는 저온 전자 방출 소스인, 이온 트랩.

청구항 13

제10항에 있어서, 상기 적어도 하나의 전자 방출 소스는 상기 전극 구조의 축을 벗어나 위치하는, 이온 트랩.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 적어도 하나의 전자 방출 소스에 의해서 발생되는 전자들은 상기 전극 구조를 따르는 축에 수직한 축으로부터 20도와 30도 사이의 각도로 떨어져 주입되는, 이온 트랩.

청구항 15

제10항에 있어서, 상기 이온 검출기는 전하-민감 트랜스임피던스(transimpedance) 증폭기인, 이온 트랩.

청구항 16

제10항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 상기 AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양을 측정함으로써 이온들을 검출하는, 이온 트랩.

청구항 17

제10항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 AC 여기 주파수가 변함에 따라서 상기 전극 구조의 전기 임피던스의 변화를 측정함으로써 이온들을 검출하는, 이온 트랩.

청구항 18

제10항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 AC 여기 주파수가 변함에 따라서 이미지 전하들에 의해서 유도되는 전류를 측정함으로써 이온들을 검출하는, 이온 트랩.

청구항 19

제10항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 상기 AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양을 측정함으로써 이온들을 검출하는, 이온 트랩.

청구항 20

제10항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 상기 전극 구조의 전기 임피던스의 변화를 측정함으로써 이온들을 검출하는, 이온 트랩.

청구항 21

제10항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 이미지 전하들에 의해서 유도되는 전류를 측정함으로써 이온들을 검출하는, 이온 트랩.

청구항 22

고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조 – 상기 구속하는 포텐셜은 비조화임 – ;

전극 구조의 중앙 렌즈에 직접 연결되며, 구속된 이온들을 상기 이온들의 고유 진동 주파수의 정수배인 주파수로 여기시키는 여기 주파수를 갖는 AC 여기 소스;

제어 매개변수들을 저장하는 비휘발성 메모리; 및

상기 AC 여기 소스와 상기 전극 구조에 작동 가능하게 연결되어 있으며, 상기 제어 매개변수들을 사용하여 상기 AC 여기 소스와 상기 정전 포텐셜을 제어하는 제어 전자 기기를 포함하는, 이온 트랩.

청구항 23

제22항에 있어서, 상기 비휘발성 메모리와 상기 제어 전자 기기는 상기 전극 구조와 일체인, 이온 트랩.

청구항 24

제22항에 있어서, 상기 제어 매개변수들은 구성 및 교정 매개변수들과 민감도 인자들, 또는 이들의 임의의 조합을 포함하는, 이온 트랩.

청구항 25

제24항에 있어서, 상기 구성 매개변수들은 이온들이 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조에 인가되는 정전 포텐셜들의 크기들, 및 상기 AC 여기 소스에 대한 진폭 및 주파수 설정들을 포함하고, 교정 매개변수들은 상기 이온 트랩의 전압 및 전류 입력 및 출력 교정 매개변수들을 포함하고, 상기 민감도 인자들은 이온들의 고유 진동 주파수로부터 이온 질량 대 전하(m/q) 비율로의 변환 인자를 포함하는, 이온 트랩.

청구항 26

제22항에 있어서, 상기 여기 주파수는 구속된 이온들을 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배의 주파수로 여기시키는, 이온 트랩.

청구항 27

이온 트랩에서 이온들을 트랩핑하는 방법에 있어서,

제1 및 제2 마주보는 미리 전극들과 이를 사이의 중앙 렌즈를 포함하는 전극 구조에서, 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 비조화 정전 포텐셜을 생성하는 단계; 및

여기 주파수(f)를 가지며 상기 중앙 렌즈에 직접 연결된 AC 여기 소스로써 구속된 이온들을 상기 이온들의 고유 진동 주파수의 2배의 주파수로 여기하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 28

제27항에 있어서, 상기 AC 여기 소스의 상기 여기 주파수를 스캔하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 29

제28항에 있어서, 상기 여기 주파수를 스캔하는 단계는, 상기 주파수 차이가 영(0)에 접근함에 따라서 자동공진을 질량 선택적으로 달성하기 위해서, 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배보다 큰 여기 주파수로부터 소정의 스위프율로 실행되는, 방법.

청구항 30

제28항에 있어서, 상기 여기 주파수를 스캔하는 단계는 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배보다 작은 여기 주파수로부터 소정의 스위프율로 실행되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 31

제30항에 있어서, 상기 스위프율은 $d(1/f^n)/dt$ 가 상수이고 n은 영(0)보다 크도록 설정되는, 방법.

청구항 32

제31항에 있어서, n은 1인, 방법.

청구항 33

제28항에 있어서, 상기 여기 주파수를 스캔하는 단계는, 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배가 상기 AC 여기 소스의 주파수보다 낮은 주파수로부터 변하는 방향으로 소정의 스위프율로 상기 정전 포텐셜의 크기(V)를 스위핑하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 34

제28항에 있어서, 상기 여기 주파수를 스캔하는 단계는, 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배가 상기 AC 여기 소스의 주파수보다 높은 주파수로부터 변화하는 방향으로 소정의 스위프율로 상기 정전 포텐셜의 크기(V)를 스위핑하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 35

제27항에 있어서, 상기 제1 마주보는 미러 전극 구조는 적어도 하나의 구멍을 가지며, 상기 마주보는 미러 전극 구조의 축을 벗어나 위치한 제1 플레이트 형상 전극, 및 상기 중앙 렌즈를 향해서 개방되어 있고, 중앙에 위치한 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극을 포함하고, 상기 제2 마주보는 미러 전극 구조는 축방향으로 위치한 구멍을 갖는 제1 플레이트 형상 전극, 및 상기 중앙 렌즈를 향해서 개방되고, 중앙에 위치한 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극을 포함하고, 상기 중앙 렌즈는 플레이트 형상이고, 축방향으로 위치한 구멍을 포함하는, 방법.

청구항 36

제27항에 있어서, 질량 분석계로서 구성되는, 이온 검출기 및 기체상 종의 전자 충격 이온화에 의해서 이온들을 생성하는 적어도 하나의 전자 방출 소스를 포함하는 이온 소스를 이용하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 37

제36항에 있어서, 상기 적어도 하나의 전자 방출 소스는 고온 필라멘트인, 방법.

청구항 38

제36항에 있어서, 상기 적어도 하나의 전자 방출 소스는 저온 전자 방출 소스인, 방법.

청구항 39

제36항에 있어서, 상기 적어도 하나의 전자 방출 소스는 상기 전극 구조의 축을 벗어나 위치하는, 방법.

청구항 40

제39항에 있어서, 상기 적어도 하나의 전자 방출 소스에 의해서 발생되는 전자들은 상기 전극 구조를 따르는 축에 수직한 축으로부터 20도와 30도 사이의 각도로 떨어져 주입되는, 방법.

청구항 41

제36항에 있어서, 상기 이온 검출기는 전하-민감 트랜스임피던스 증폭기인, 방법.

청구항 42

제36항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 상기 AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양을 측정함으로써 이온들을 검출하는, 방법.

청구항 43

제36항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 상기 전극 구조의 전기 임피던스의 변화를 측정함으로써 이온들을 검출하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 44

제36항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 이미지 전하들에 의해서 유도되는 전류를 측정함으로써 이온들을 검출하는, 방법.

청구항 45

제36항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 상기 AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양을 측정함으로써 이온들을 검출하는, 방법.

청구항 46

제36항에 있어서, 상기 이온 검출기는 상기 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 상기 전극 구조의 전기 임피던스의 변화를 측정함으로써 이온들을 검출하는, 방법.

청구항 47

제36항에 있어서, 상기 이온 검출기는, 상기 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 이미지 전하들에 의해서 유도되는 전류를 측정함으로써 이온들을 검출하는, 방법.

청구항 48

이온 트랩에 이온들을 트랩핑하는 방법에 있어서,

전극 구조에서 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 케이블들에 구속되는 비조화 정전 포텐셜을 생성하는 단계;

전극 구조의 중앙 렌즈에 직접 연결되고 여기 주파수를 가지는 AC 여기 소스로써, 구속된 이온들을 상기 이온들의 고유 진동 주파수의 정수배인 주파수로 여기시키는 단계;

비휘발성 메모리에 제어 매개변수들을 저장하는 단계; 및

상기 AC 여기 소스와 상기 전극 구조에 작동 가능하게 연결된 제어 전자 기기들과 상기 제어 매개변수들을 사용해서, 상기 AC 여기 소스와 상기 정전 포텐셜을 제어하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 49

제48항에 있어서, 상기 비휘발성 메모리와 상기 제어 전자 기기는 상기 전극 구조와 일체인, 방법.

청구항 50

제48항에 있어서, 상기 제어 매개변수들은 구성 및 교정 매개변수들과 민감도 인자들, 또는 이들의 임의의 조합을 포함하는, 방법.

청구항 51

제50항에 있어서, 상기 구성 매개변수들은 이온들이 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 상기 전극 구조에 인가되는 정전 포텐셜들의 크기들, 및 상기 AC 여기 소스에 대한 진폭 및 주파수 설정들을 포함하고, 교정 매개변수들은 상기 이온 트랩의 전압 및 전류 입력 및 출력 교정 매개변수들을 포함하고, 상기 민감도 인자들은 이온들의 고유 진동 주파수로부터 이온 질량 대 전하(m/q) 비율로의 변환 인자를 포함하는, 방법.

청구항 52

제48항에 있어서, 상기 여기 주파수는 구속된 이온들을 상기 이온들의 상기 고유 진동 주파수의 2배의 주파수로 여기시키는, 방법.

청구항 53

삭제

청구항 54

삭제

청구항 55

삭제

청구항 56

삭제

청구항 57

삭제

청구항 58

삭제

청구항 59

삭제

청구항 60

삭제

청구항 61

삭제

청구항 62

삭제

청구항 63

삭제

청구항 64

삭제

청구항 65

삭제

청구항 66

삭제

청구항 67

삭제

청구항 68

삭제

청구항 69

삭제

청구항 70

삭제

청구항 71

삭제

청구항 72

삭제

청구항 73

삭제

청구항 74

삭제

청구항 75

삭제

청구항 76

삭제

청구항 77

삭제

청구항 78

삭제

청구항 79

삭제

청구항 80

삭제

청구항 81

삭제

청구항 82

삭제

청구항 83

삭제

청구항 84

삭제

청구항 85

삭제

청구항 86

삭제

청구항 87

삭제

청구항 88

삭제

청구항 89

삭제

청구항 90

삭제

청구항 91

삭제

청구항 92

삭제

청구항 93

삭제

청구항 94

삭제

청구항 95

삭제

청구항 96

삭제

청구항 97

삭제

청구항 98

삭제

청구항 99

삭제

청구항 100

삭제

청구항 101

삭제

청구항 102

삭제

청구항 103

삭제

청구항 104

삭제

청구항 105

삭제

청구항 106

삭제

청구항 107

삭제

청구항 108

삭제

청구항 109

삭제

청구항 110

삭제

청구항 111

삭제

청구항 112

삭제

청구항 113

삭제

청구항 114

삭제

청구항 115

삭제

청구항 116

삭제

청구항 117

삭제

청구항 118

삭제

청구항 119

삭제

청구항 120

삭제

청구항 121

삭제

청구항 122

삭제

청구항 123

삭제

발명의 설명

기술 분야

관련 출원

[0001] 본 출원은 2009년 5월 6일에 출원된 미국 가출원 제61/215,501호, 2009년 5월 7일에 출원된 미국 가출원 제61/176,390호, 2010년 4월 16일에 출원된 미국 가출원 제61/325,119호, 및 2010년 4월 29일에 출원된 미국 가출원 제61/329,163호의 이익을 청구한다.

[0003] 위의 출원들의 전체 내용은 여기에 참고로 포함된다.

배경 기술

[0004] 질량 분석계는 이온들의 질량 대 전하 비율에 따라 이온들을 분리하고 검출하는 분석 기기다. 질량 분석계들은 질량 분리 및 분석을 하기 위해 이온들의 트랩핑 또는 저장이 필요한지에 근거하여 구별될 수 있다. 비-트랩핑 질량 분석계들은 이온들을 트랩핑 또는 저장하지 않으며, 이온 밀도들은 질량 분리 및 분석 전에 기기 내에서 축적 또는 형성되지 않는다. 이 부류의 일반적인 예들은 고 파워 동적 전기장 또는 고 파워 자기장이 각각 단일의 질량 대 전하(m/q) 비율의 이온 빔들의 궤적들을 선택적으로 안정화시키기 위해 사용되는 사중극자 질량 필터들 및 자기 섹터 질량 분석계이다. 트랩핑 분석계는 2개의 하위 범주들로 세분화될 수 있다: 예를 들어 Paul 의 설계의 사중극자 이온 트랩(quadrupole ion trap: QIT)들과 같은 동적 트랩들, 및 더 최근에 개발된 정전 구속 트랩과 같은 정적 트랩들. 현재 이용이 가능하고 질량 분석을 위해 사용되는 정전 트랩들은 일반적으로 오직 이온들의 질량 대 전하 비율에 관련된 진동 주기들로 트랩 내에서 이온들을 이온 에너지에 무관한 진동들 내로 트랩핑하기 위해서 조화(harmonic) 포텐셜 트랩핑 우물들에 의존한다. 몇몇의 현대의 정전 트랩들에서의 질량 분석은 푸리에 변환 질량 분석(Fourier transform mass spectrometry: FTMS)의 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform: FFT) 스펙트럼 디콘볼루션 및 원격 유도 핵연 및 감지 전자 공학의 사용을 통해 수행되어 왔다. 또는, 이온들은 고전압 트랩핑 포텐셜들의 빠른 스위칭 오프에 의해서 순간적으로 추출되어 왔다. 그 다음에 모든 이온들이 빠져 나오고, 이온들의 질량 대 전하 비율들은 비행 시간(time of flight: TOF) 분석을 통해서 결정된다. 몇몇의 최근 개발은 원통형 트랩 설계들 내에서 동적 (의사) 및 정전 포텐셜 장들을 사용하는 이온들의 트랩핑을 결합했다. 이 설계들에서, 정전 포텐셜 우물이 축방향의 이온들을 실질적인 조화 진동 운동들로 구속하기 위해서 사용되는 한편, 사중극자 반경방향 구속 장들은 이온 궤적들을 반경방향으로 구속하기 위해 사용된다. 축방향으로의 이온 운동의 공진 여기는 질량 선택적 이온 방출을 일으키기 위해서 사용된다.

[0005] Ermakov 등에 의한 PCT/US2007/023834 출원은 비조화(anharmonic) 포텐셜 우물 내에서 상이한 질량 대 전하 비율들 및 운동 에너지들의 이온들을 구속하는 정전 이온 트랩을 개시하고 있다. 이온 트랩에는 또한 구속된 이온들을 여기시키는 작은 진폭 AC 구동이 제공된다. 이온들의 진동의 진폭들이 트랩의 물리적 치수를 초과하고 질량 선택된 이온들이 검출되거나, 이온들이 분해되거나 다른 물리적 화학적 변형을 겪을 때까지, AC 구동 주파수

와 이온들의 질량 의존적 고유 진동 주파수들 사이의 자동공진으로 인해, 그들의 에너지들이 증가함에 따라서 구속된 이온들의 진동의 진폭들은 증가된다.

[0006] 자동공진은 여기된 비선형 진동자의 구동 주파수가 시간에 따라 천천히 변할 때 일어나는 지속적인 위상-고정 (phase-locking) 현상이다. 위상-고정에 의해, 진동자의 주파수는 구동 주파수에 고정되고 따르게 된다. 즉, 비선형 진동자는 구동 주파수와 자동적으로 공진하게 된다. 이러한 체계에서, 공진 여기는 연속적이고, 진동자의 비선형에 의해 영향을 받지 않는다. 자동공진은, 시간에 대해 거의 주기적인, 비교적 작은 외부 힘들에 의해 구동되는 비선형 진동자들에서 관찰된다. 구동 주파수가 (비선형 사인에 의해서 결정된 올바른 방향으로) 시간에 따라 천천히 변하면, 진동자는 위상-고정 상태를 유지할 수 있으나, 평균적으로 시간에 따라 그 진폭을 증가시킨다. 이는 피드백이 필요 없는 연속적인 공진 여기 과정을 초래한다. 섭동을 갖는 장시간 위상-고정은 작은 구동 진폭 하에서까지도 응답 진폭의 강한 증가를 초래한다. 구동 진폭은 주파수 스위프율에 관련되며 스위프율에 비례하는 자동공진 한계치가 $3/4$ 제곱까지 상승된다.

[0007] Ermakov 등에 의해서 개시된 정전 이온 트랩은 접지(0 VDC) 포텐셜로 유지되는 2개의 원통형 대칭 캡 전극들과 캡 전극들 사이의 중간에 위치되고, 음의 DC 포텐셜(일반적으로 -1000 VDC)로 유지되는 평면 구멍 트랩 전극을 포함하였다. 이 이온 트랩은 완전히 원통형 대칭이며, 고온 필라멘트로부터 트랩으로 전달되는 전자들의 충격에 의한 가스 분자들과 원자들의 축 상 이온화, 작은 진폭 RF 포텐셜을 캡 전극들 중의 하나에 인가함에 의한 이온들의 AC 여기, 및 축 상 전자 증배 장치에 의한 질량 선택적으로 방출되는 이온들의 검출을 가진다. 이 설계는 (압력이 10^{-6} Torr보다 작은) 고진공 환경들의 양호한 품질의 스펙트럼들을 생성하였으나, 상당한 베이스라인 오프셋들을 갖는 노이즈가 있는 스펙트럼들과 고암(10^{-4} 내지 10^{-5} Torr) 환경에서 스펙트럼 분해능의 손상을 생성했다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) PCT/US2007/023834

발명의 내용

[0009] 몇몇의 실시예들에서, 이온 트랩은 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과 이를 사이의 중앙 렌즈를 포함하며, 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되고 구속 포텐셜은 비조화인 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조를 포함한다. 이온 트랩은 또한 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수와 관련된 주파수로 여기시키는 여기 주파수(f)를 가지며, 바람직하게는 중앙 렌즈에 연결된 AC 여기 소스를 포함한다. 일 실시예에서, 이온 트랩은 AC 여기 주파수와 이온들의 고유 진동 주파수 사이의 관계를 제어하는 스캔 제어부를 포함한다

[0010] 특정 실시예들에서, 이온 트랩은 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과 이를 사이의 중앙 렌즈를 포함하며, 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되며 구속 포텐셜은 비조화인 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조를 포함한다. 이온 트랩은 또한 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 배수의 주파수로 여기시키는 여기 주파수(f)를 가지며, 바람직하게는 중앙 렌즈에 연결된 AC 여기 소스를 포함한다. 일 실시예에서, 이온 트랩은 AC 여기 주파수와 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배 사이의 주파수 차이를 질량 선택적으로 감소시키는 스캔 제어부를 포함한다. 스캔 제어부는 자동공진을 달성하기 위해서 이온들의 고유 진동 주파수의 2배보다 높은 여기 주파수로부터 일 방향으로 소정의 스위프율로 AC 여기 주파수(f)를 스위핑할 수 있다. 또는, 스캔 제어부는 이온들의 고유 진동 주파수의 2배보다 낮은 여기 주파수로부터 일 방향으로 소정의 스위프율로 AC 여기 주파수(f)를 스위핑할 수 있다. 일부 실시예들에서, 스캔 제어부는 소정의 비선형 스위프율로 AC 여기 주파수(f)를 스위핑할 수 있다. 특정 실시예들에서, 비선형 스위프는 연쇄 선형 스위프들로 구성될 수 있다. 스위프율은 $d(1/f^n)/dt$ 가 대략적으로 상수와 같고 n은 영(0)보다 크도록 설정될 수 있다. 일 실시예에서, n은 대략적으로 1과 같다. 다른 실시예에서, n은 대략적으로 2와 같다.

[0011] 다른 실시예들에서, 스캔 제어부는 이온들의 고유 진동 주파수의 2배가 자동공진을 달성하기 위해서 AC 여기 소스의 주파수보다 낮은 주파수로부터 변하도록 하는 방향으로 소정의 스위프율로 정전 포텐셜의 크기(V)를 스위핑할 수 있다. 또는, 스캔 제어부는 이온들의 고유 진동 주파수의 2배가 AC 여기 소스의 주파수보다 높은 주파

수로부터 변하도록 하는 방향으로 소정의 스위프율로 정전 포텐셜의 크기(V)를 스위핑할 수 있다. 스위프율은 비선형일 수 있다.

[0012] 일부 실시예들에서, 제1 마주보는 미러 전극 구조와 제2 마주보는 미러 전극 구조는 불균등하게 바이어싱될 수 있다. 일 실시예에서, 제1 및 제2 마주보는 미러 전극 구조들 각각은 축방향으로 위치한 구멍을 갖는 제1 플레이트 형상 전극 및 중앙 렌즈를 향해서 개방되고, 중앙에 위치한 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극을 포함하고, 중앙 렌즈는 플레이트 형상이고 축방향으로 위치한 구멍을 포함한다.

[0013] 다른 실시예에서, 전극 구조의 제1 마주보는 미러 전극은 적어도 하나의 구멍을 가지며, 마주보는 미러 전극 구조의 축을 벗어나 위치한 제1 플레이트 형상 전극 및 중앙 렌즈를 향해서 개방되어 있고, 중앙에 위치한 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극을 포함한다. 이 실시예에서, 전극 구조의 제2 마주보는 미러 전극은 축방향으로 위치한 구멍을 갖는 제1 플레이트 형상 전극 및 컵의 형상을 가지며, 중앙 렌즈를 향해서 개방되고, 중앙에 위치한 구멍을 갖는 제2 전극을 포함한다. 중앙 렌즈는 플레이트 형상이고, 축방향으로 위치한 구멍을 포함한다.

[0014] 일부 실시예들에서, 이온 트랩은 이온 소스를 포함할 수 있다. 이온 소스는 기체상 종의 전자 충격 이온화에 의해서 이온들을 생성하는 적어도 하나의 전자 방출 소스를 포함할 수 있다. 일 실시예에서, 이온 소스는 2개의 전자 방출 소스들을 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 적어도 하나의 전자 방출 소스는 고온 필라멘트일 수 있다. 다른 실시예들에서, 적어도 하나의 전자 방출 소스는 저온 전자 방출 소스일 수 있다.

[0015] 일부 실시예들에서, 적어도 하나의 전자 방출 소스는 전극 구조의 축을 벗어나 위치될 수 있다. 이 실시예들에서, 적어도 하나의 전자 방출 소스에 의해서 발생되는 전자들은 전극 구조를 따르는 축에 수직한 축으로부터 약 20도와 약 30도 사이의 각도로 주입될 수 있다.

[0016] 이온 트랩은 이온 겹출기를 더 포함함으로써 질량 분석계로서 구성될 수 있다. 일부 실시예들에서, 이온 겹출기는 전극 구조의 축 상에 위치할 수 있다. 다른 실시예들에서, 이온 겹출기는 전극 구조의 축을 벗어나 위치될 수 있다.

[0017] 일부 실시예들에서, 이온 겹출기는 전자 증배 장치일 수 있다. 다른 실시예들에서, 이온 겹출기는 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양을 측정함으로써 이온들을 겹출할 수 있다. 또 다른 실시예들에서, 이온 겹출기는 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 전극 구조의 전기 임피던스의 변화를 측정함으로써 이온들을 겹출할 수 있다. 또 다른 실시예에서, 이온 겹출기는 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 이미지 전하들에 의해서 유도되는 전류를 측정함으로써 이온들을 겹출할 수 있다.

[0018] 다른 실시예들에서, 이온 겹출기는 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양을 측정함으로써 이온들을 겹출할 수 있다. 또 다른 실시예들에서, 이온 겹출기는 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 전극 구조의 전기 임피던스의 변화를 측정함으로써 이온들을 겹출할 수 있다. 또 다른 실시예들에서, 이온 겹출기는 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 이미지 전하들에 의해서 유도되는 전류를 측정함으로써 이온들을 겹출할 수 있다.

[0019] 다른 실시예에서, 이온 트랩은 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과 이들 사이의 중앙 렌즈를 포함하며, 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되고 구속 포텐셜은 비조화인 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조, 및 이온들의 고유 진동 주파수의 배수보다 낮은 여기 주파수로부터 전극 구조에 연결된 AC 여기 주파수와 이온들의 고유 진동 주파수의 배수 사이의 주파수 차이를 질량 선택적으로 감소시키는 스캔 제어부를 포함한다. 일 실시예에서, 스캔 제어부는 소정의 스위프율로 AC 여기 주파수를 스위핑함으로써 주파수 차이를 감소시킨다. 일부 실시예들에서, 스위프율은 비선형 스위프율일 수 있다. 특정 실시예들에서, 비선형 스위프는 연쇄 선형 스위프들로 구성될 수 있다. 다른 실시예에서, 스캔 제어부는 이온들의 고유 진동 주파수의 배수가 AC 여기 소스의 주파수보다 높은 주파수로부터 변하도록 하는 방향으로 소정의 스위프율로 정전 포텐셜의 크기(V)를 스위핑하여 주파수 차이를 감소시킨다.

[0020] 일 실시예에서, 이온 트랩은 기체상 종의 전자 충격 이온화에 의해 이온들을 생성하는 전자 소스, 및 전압력 측정치를 형성하도록 이온들을 수집하는 콜렉터 전극을 포함한다. 이온 트랩은 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조, 및 기체상 종을 분석하는 질량 분석기를 더 포함한다. 일부 실시예들에서, 전극 구조는 중앙 렌즈를 포함한다. 정전 포텐셜은 비조화일 수 있다. 특정 실시예들에서, 이온 트랩은 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배의 주파수로 여기시키는 여기 주파수를 갖는 AC 여기 소스를 더 포함하며, AC 여기 소스는 중앙 렌즈에 연결된다. 일부 실시예들에서, 전자 소스는 전극 구조의 축을 벗어나 위치될 수 있다. 일 실시예에서, 콜렉터 전극은 플레이트 형상이고, 전극 구조와

정렬된 축방향으로 위치한 구멍을 포함한다. 다른 실시예에서, 콜렉터 전극은 전자 소스를 둘러싼다. 또 다른 실시예에서, 상기 콜렉터 전극은 전극 구조 내에 위치한이다.

[0021] 다른 실시예에서, 이온 트랩은 기체상 종의 전자 충격 이온화에 의해 이온들을 생성하는 전자 소스 및 중앙 렌즈를 포함하며 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조를 포함한다. 이온 트랩은 전압력을 측정하는 게이지 및 특정 고유 진동 주파수들을 갖는 구속된 이온들의 밀도들을 전압력에 관련시키는 분압 분석기를 더 포함한다. 일부 실시예들에서, 전극 구조에 의해서 생성된 정전 포텐셜은 비조화일 수 있다. 특정 실시예들에서, 이온 트랩은 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배의 주파수로 여기시키는 여기 주파수를 갖는 AC 여기 소스를 더 포함할 수 있으며, AC 여기 소스는 중앙 렌즈에 연결된다. 일 실시예에서, 전압력 게이지는 이온화 게이지를 포함할 수 있다.

[0022] 또 다른 실시예에서, 이온 트랩은 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과 이들 사이의 중앙 렌즈를 포함하며, 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되고 구속 포텐셜이 비조화인 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조, 및 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배의 주파수로 여기시키는 여기 주파수를 가지며, 중앙 렌즈에 연결된 AC 여기 소스를 포함한다. 이온 트랩은 실질적으로 모든 이온들이 전압력 측정치를 형성하기 위해서 트랩에서 벗어나 이온 겸출기에 의해서 수집되도록, 제1 및 제2 마주보는 미러 전극 구조들 중의 하나를 충분히 불균등하게 바이어싱시키는 바이어스 제어기를 더 포함한다.

[0023] 또 다른 실시예에서, 이온 트랩은 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되고 구속 포텐셜이 비조화인 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조, 및 전극 구조에 연결되며, 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 정수배인 주파수로 여기시키는 여기 주파수를 갖는 AC 여기 소스를 포함한다. 이온 트랩은 제어 매개변수들을 저장하는 비휘발성 메모리, 및 AC 여기 소스와 전극 구조에 동작이 연결되어 있으며, 제어 매개변수들을 이용하여 AC 여기 소스와 정전 포텐셜을 제어하는 제어 전자 기기를 더 포함한다. 제어 매개변수들은 구성 및 교정 매개변수들과 민감도 인자들을 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 비휘발성 메모리와 제어 전자 기기는 전극 구조와 일체일 수 있다. 구성 매개변수들은 이온들이 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조에 인가되는 정전 포텐셜들의 크기들, 및 AC 여기 소스에 대한 진폭 및 주파수 세팅들을 포함하고, 교정 매개변수들은 이온 트랩의 전압 및 전류 입력 및 출력 교정 매개변수들을 포함할 수 있고, 민감도 인자들은 이온들의 고유 진동 주파수로부터 이온 질량 대 전하(m/q) 비율로의 변환 인자를 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 여기 주파수는 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배의 주파수로 여기시킨다.

[0024] 또 다른 실시예에서, 이온 트랩은 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되며 구속 포텐셜은 비조화인 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조, 및 전극 구조에 연결되며, 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 정수배의 주파수로 여기시키는 여기 주파수를 갖는 AC 여기 소스를 포함한다. 이온 트랩은 $d(1/f^n)/dt$ 가 상수와 같고 n은 영(0)보다 크도록 설정된 스위프율로 AC 여기 주파수(f)를 스윕하는 스캔 제어부를 더 포함한다. 일 실시예에서, n은 대략적으로 1과 같다. 다른 실시예에서, n은 대략적으로 2와 같다.

[0025] 이온 트랩에서 이온들을 트랩핑하는 방법은, 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과, 이들 사이의 중앙 렌즈를 포함하는 전극 구조에서, 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 비조화 정전 포텐셜을 생성하는 단계, 및 여기 주파수(f)를 가지며, 중앙 렌즈에 연결된 AC 여기 소스로써 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배의 주파수로 여기시키는 단계를 포함한다. 일 실시예에서, 방법은 AC 여기 소스의 여기 주파수를 스캔하고 AC 여기 주파수와 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배 사이의 주파수 차이를 질량 선택적으로 감소시키는 단계를 더 포함한다. 여기 주파수를 스캔하는 단계는 주파수 차이가 영(0)에 접근함에 따라서 자동 공진을 질량 선택적으로 달성하기 위해서 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배보다 큰 여기 주파수로부터 소정의 스위프율로 수행될 수 있다. 또는, 여기 주파수를 스캔하는 단계는 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배보다 작은 여기 주파수로부터 소정의 스위프율로 수행될 수 있다. 일부 실시예들에서, 스위프율은 비선형 스위프율일 수 있다. 특정 실시예들에서, 비선형 스위프는 연쇄 선형 스위프들로 구성될 수 있다. 스위프율은 $d(1/f^n)/dt$ 가 대략적으로 상수와 같고 n은 영(0)보다 크도록 설정될 수 있다. 일 실시예에서, n은 대략적으로 1과 같다. 다른 실시예에서, n은 대략적으로 2와 같다.

[0026] 다른 실시예들에서, 여기 주파수를 스캔하는 단계는 이온들의 고유 진동 주파수의 2배가 AC 여기 소스의 주파수 보다 낮은 주파수로부터 변하도록 하는 방향으로 소정의 스위프율로 정전 포텐셜의 크기(V)를 스윕하는 단계를 포함할 수 있다. 또는, 여기 주파수를 스캔하는 단계는 이온들의 고유 진동 주파수의 2배가 AC 여기 소스의 주파수보다 높은 주파수로부터 변하도록 하는 방향으로 소정의 스위프율로 정전 포텐셜의 크기(V)를 스윕하는

단계를 포함할 수 있다. 스위프율은 비선형일 수 있다.

[0027] 일부 실시예들에서, 제1 마주보는 미러 전극 구조와 제2 마주보는 미러 전극 구조는 불균등하게 바이어싱될 수 있다. 일 실시예에서, 제1 및 제2 마주보는 미러 전극 구조들 각각은 축방향으로 위치한 구멍을 갖는 제1 플레이트 형상 전극 및 중앙 렌즈를 향해서 개방되고, 중앙에 위치한 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극을 포함하고, 중앙 렌즈는 플레이트 형상이고 축방향으로 위치한 구멍을 포함한다.

[0028] 다른 실시예에서, 제1 마주보는 미러 전극 구조는 적어도 하나의 구멍을 가지며 마주보는 미러 전극 구조의 축을 벗어나 위치한 제1 플레이트 형상 전극, 및 중앙 렌즈를 향해서 개방되어 있고, 중앙에 위치한 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극을 포함한다. 이 실시예에서, 제2 마주보는 미러 전극 구조는 축방향으로 위치한 구멍을 갖는 제1 플레이트 형상 전극, 및 중앙 렌즈를 향해서 개방되고, 중앙에 위치한 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극을 포함한다. 중앙 렌즈는 플레이트 형상이고, 축방향으로 위치한 구멍을 포함한다.

[0029] 일부 실시예들에서, 방법은 이온 소스를 이용하는 단계를 포함할 수 있다. 다른 실시예들에서, 방법은 질량 분석계로서 구성된 이온 검출기를 이용하는 단계를 더 포함할 수 있다. 이온 소스는 기체상 종의 전자 충격 이온화에 의해서 이온들을 생성하는 적어도 하나의 전자 방출 소스를 포함할 수 있다. 일 실시예에서, 이온 소스는 2개의 전자 방출 소스들을 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 적어도 하나의 전자 방출 소스는 고온 필라멘트 일 수 있다. 다른 실시예들에서, 적어도 하나의 전자 방출 소스는 저온 전자 방출 소스일 수 있다.

[0030] 일부 실시예들에서, 적어도 하나의 전자 방출 소스는 전극 구조의 축을 벗어나 위치될 수 있다. 이 실시예들에서, 적어도 하나의 전자 방출 소스에 의해서 발생되는 전자들은 전극 구조를 따르는 축에 수직한 축으로부터 약 20도와 약 30도 사이의 각도로 주입될 수 있다.

[0031] 일부 실시예들에서, 이온 검출기는 전극 구조의 축 상에 위치될 수 있다. 다른 실시예들에서, 이온 검출기는 전극 구조의 축을 벗어나 위치될 수 있다.

[0032] 일부 실시예들에서, 이온 검출기는 전자 증배 장치일 수 있다. 다른 실시예들에서, 이온 검출기는 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양을 측정함으로써 이온들을 검출할 수 있다. 또 다른 실시예들에서, 이온 검출기는 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 전극 구조의 전기 임피던스의 변화를 측정함으로써 이온들을 검출할 수 있다. 또 다른 실시예들에서, 이온 검출기는 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라서 이미지 전하들에 의해서 유도되는 전류를 측정함으로써 이온들을 검출할 수 있다.

[0033] 다른 실시예들에서, 이온 검출기는 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양을 측정함으로써 이온들을 검출할 수 있다. 또 다른 실시예들에서, 이온 검출기는 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 전극 구조의 전기 임피던스의 변화를 측정함으로써 이온들을 검출할 수 있다. 또 다른 실시예들에서, 이온 검출기는 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라서 이미지 전하들에 의해서 유도되는 전류를 측정함으로써 이온들을 검출할 수 있다.

[0034] 다른 실시예에서, 이온 트랩에서 이온들을 트랩핑하는 방법은 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과 이들 사이의 중앙 렌즈를 포함하는 전극 구조에서 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 비조화 정전 포텐셜을 생성하는 단계를 포함한다. 이 방법은 전극 구조에 연결된 AC 여기 소스의 여기 주파수를 스캔하고, 이온들의 고유 진동 주파수의 배수보다 작은 여기 주파수로부터 AC 여기 주파수와 이온들의 고유 진동 주파수의 배수 사이의 주파수 차이를 질량 선택적으로 감소시키는 단계를 더 포함한다. 일 실시예에서, 스캔 제어부는 소정의 스위프율로 AC 여기 주파수를 스위핑하여 주파수 차이를 감소시킨다. 다른 실시예에서, 스캔 제어부는 이온들의 고유 진동 주파수의 배수가 AC 여기 소스의 주파수보다 높은 주파수로부터 변하도록 하는 방향으로 소정의 스위프율로 정전 포텐셜의 크기(V)를 스위핑하여 주파수 차이를 감소시킨다. 일부 실시예들에서, 스위프율은 비선형 스위프율일 수 있다.

[0035] 일 실시예에서, 이온 트랩을 이용하여 전압력을 측정하는 방법은 기체상 종의 전자 충격 이온화에 의해서 전자 소스로써 이온들을 생성하는 단계, 전압력 측정치를 형성하도록 콜렉터 전극으로써 이온들을 수집하는 단계, 전극 구조를 이용하여 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 단계, 및 기체상 종을 분석하기 위한 질량 분석기를 제공하는 단계를 포함한다. 일부 실시예들에서, 정전 포텐셜은 비조화일 수 있다. 이 방법은 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배의 주파수로 여기시키는 여기 주파수를 가지며, 중앙 렌즈에 연결된 AC 여기 소스를 제공하는 단계를 더 포함할 수 있다. 특정 실시예들에서, 전극 구조는 중앙 렌즈를 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 전자 소스는 전극 구조의 축을 벗어나 위치될 수 있다. 일 실시예에서, 콜렉터 전극은 플레이트 형상이고, 전극 구조와 정렬된 축방향으로 위치한 구멍을 포함한

다. 다른 실시예에서, 콜렉터 전극은 전자 소스를 둘러싼다. 또 다른 실시예에서, 콜렉터 전극은 전극 구조 내에 위치한다.

[0036] 다른 실시예에서, 이온 트랩을 이용하여 절대 분압을 측정하는 방법은 기체상 종의 전자 충격 이온화에 의해서 전자 소스로써 이온들을 생성하는 단계, 중앙 렌즈를 포함하는 전극 구조를 이용하여 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 단계, 전압력 게이지로써 전압력을 측정하는 단계, 및 분압 분석기로써 특정 고유 진동 주파수들을 갖는 구속된 이온들의 밀도들을 전압력에 관련시키는 단계를 포함한다. 일부 실시예들에서, 전극 구조에 의해 생성되는 정전 포텐셜은 비조화일 수 있다. 특정 실시예들에서, 이온 트랩은, 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배의 주파수로 여기시키는 여기 주파수를 가지며, 중앙 렌즈에 연결된 AC 여기 소스를 포함할 수 있다. 일 실시예에서, 전압력 게이지는 이온화 게이지를 포함할 수 있다.

[0037] 또 다른 실시예에서, 이온 트랩으로써 전압력을 측정하는 방법은 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과 이를 사이의 중앙 렌즈를 포함하는 전극 구조에서 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 비조화 정전 포텐셜을 생성하는 단계, 여기 주파수를 가지며 중앙 렌즈에 연결된 AC 여기 소스로써 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배의 주파수로 여기시키는 단계, 및 실질적으로 모든 이온들이 트랩에서 벗어나 이온 검출기에 의해서 수집되도록 바이어스 제어기로써 제1 및 제2 마주보는 미러 전극 구조들 중의 하나를 충분히 불균등하게 바이어싱시키는 단계를 포함한다.

[0038] 또 다른 실시예들에서, 이온 트랩에서 이온들을 트랩핑하는 방법은 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 전극 구조에서 비조화 정전 포텐셜을 생성하는 단계, 전극 구조에 연결되며 여기 주파수를 가지는 AC 여기 소스로써 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 정수배인 주파수로 여기시키는 단계, 및 비휘발성 메모리에 구성 및 교정 매개변수들과 민감도 인자들을 저장하는 단계를 포함한다. 일 실시예에서, 구성 매개변수들은 이온들이 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조에 인가되는 정전 포텐셜들의 크기들 및 AC 여기 소스에 대한 진폭 및 주파수 세팅들을 포함할 수 있고, 교정 매개변수들은 이온 트랩의 전압 및 전류 입력 및 출력 교정 매개변수들을 포함할 수 있고, 민감도 인자들은 이온들의 고유 진동 주파수로부터 이온 질량 대전하(m/q) 비율로의 변환 인자를 포함할 수 있다.

[0039] 또 다른 실시예에서, 이온 트랩에서 이온들을 트랩핑하는 방법은 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 전극 구조에서 비조화 정전 포텐셜을 생성하는 단계, 여기 주파수를 가지며, 전극 구조에 연결된 AC 여기 소스로써 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 정수배의 주파수로 여기시키는 단계, 및 $d(1/f^n)/dt$ 가 대략적으로 상수와 같고 n 은 영(0)보다 크도록 설정된 소정의 스위프율로 여기 주파수(f)를 스캔하는 단계를 포함한다. 일 실시예에서, n 은 대략적으로 1과 같다. 다른 실시예에서, n 은 대략적으로 2와 같다.

[0040] 본 발명은 더 높은 압력(10^{-4} 내지 10^{-5} Torr)에서의 질량 스펙트럼들의 향상된 품질 및 이온 트랩의 동작 압력 범위(10^{-4} 내지 10^{-10} Torr)에 걸친 질량 스펙트럼들의 감소된 베이스라인과 같은 많은 이점을 갖는다.

도면의 간단한 설명

[0041] 위에서 설명한 내용은 유사한 참조부호들이 다른 도면들에서 동일한 부분들을 지칭하는 첨부 도면들에 도시된 바와 같이 본 발명의 예시적 실시예들의 아래의 더 상세한 설명으로부터 명백해질 것이다. 도면들은 반드시 올바른 축척일 필요는 없으며, 그 대신에 본 발명의 실시예들을 설명하는 데에 중점을 두었다.

도 1은 정전 이온 트랩의 개략도이다.

도 2a는 비조화 포텐셜 우물의 도면이다.

도 2b는 0 VDC의 출구 플레이트 전압과 -15 VDC의 출구 플레이트 전압에 있는 도 2a의 비조화 포텐셜 우물의 일부의 도면이다.

도 2c는 조화 포텐셜 우물과 비조화 포텐셜 우물의 도면이다.

도 3은 자동공진을 사용하여 얻어지는 질량 스펙트럼과 역방향으로 AC 여기 주파수를 스캔하여 얻어지는 질량 스펙트럼의 도면이다.

도 4는 선형, 로그, $1/f$, 및 $1/f^2$ 주파수 스캔들에 대한 스위프 시간의 함수로서의 AC 여기 주파수의 도면이다.

도 5a는 389 kHz의 고정된 RF 주파수에서 중앙 렌즈 상의 고전압(HV)을 스캔하여 얻어지는 질량 스펙트럼의 도면이다.

도 5b는 축 상의 이온화를 사용하고 자동공진으로 그리고 역방향으로 RF 주파수를 스캔하여 얻어지는 질량 스펙트럼들의 도면이다.

도 5c는 축을 벗어난 이온화를 사용하고 자동공진으로 그리고 역방향으로 RF 주파수를 스캔하여 얻어지는 질량 스펙트럼들의 도면이다.

도 6a는 축 상의 이온화를 사용하는 정전 이온 트랩의 일부의 개략도와 거리의 함수로서의 전자 밀도의 도면이다.

도 6b는 축을 벗어난 이온화를 사용하는 정전 이온 트랩의 일부의 개략도와 거리의 함수로서의 전자 밀도의 도면이다.

도 7은 2개의 전자 방출 소스들을 갖는 정전 이온 트랩의 도면이다.

도 8은 저온 전자 방출 소스를 사용하는 정전 이온 트랩의 개략도이다.

도 9는 축 상의 이온 검출을 사용하는 정전 이온 트랩의 개략도이다.

도 10은 축을 벗어난 이온 검출을 사용하는 정전 이온 트랩의 개략도이다.

도 11은 AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양을 측정하여 이온들을 검출하기 위해서 사용되는 정전 이온 트랩의 개략도이다.

도 12는 도 11의 이온 트랩으로써, 그리고 -400 VDC의 고정 중앙 렌즈 전압을 이용하여 얻어지는 질량 스펙트럼의 도면이다. 물의 방출 주파수는 654 kHz이었고, 아르곤의 방출 주파수는 437 kHz였다. 이온들은 전자 증배 검출기에 의해서 검출되었다.

도 13은 540 kHz의 고정된 RF 주파수로 정전 포텐셜의 크기를 스캔하여 도 11의 이온 트랩으로써 얻어지는 질량 스펙트럼의 도면이다. 물은 -270 VDC에서 방출되었고, 아르곤은 -600 VDC에서 방출되었다. 이온들은 전자 증배 검출기에 의해서 검출되었다.

도 14는 출구 컵(7)에 결합된 RF를 가지며, 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라 흡수되는 RF 파워의 양을 측정하여 이온들을 질량 선택적으로 검출하도록 구성된 도 11의 이온트랩의 개략도이다.

도 15는 도 14의 회로와 정전 이온 트랩의 동가 전기 회로의 개략도이다.

도 16은 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라 약하게 구동되는 진동자 소스로부터 RF 신호의 진폭의 변화를 측정함으로써 얻어지는 질량 스펙트럼의 도면이다.

도 17은 -200 VDC와 -275 VDC 전환 플레이트 전압에서 445 kHz에서 진동하는 질소 이온들의 에너지를 지시하는 정전 포텐셜의 크기를 스캔하는 동안에 2개의 지점에 있는 포텐셜 에너지 우물들의 도면이다.

도 18은 정전 이온 트랩에서 거리의 함수로서의 전자 에너지의 도면이다.

도 19는 이온들을 생성하기 위해서 50 eV, 60 eV, 및 70 eV 전자들을 이용하고 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라 전극 구조의 전기 임피던스의 변화를 측정함으로써 얻어지는 질량 스펙트럼들의 도면이다.

도 20은 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라 결합된 RF 진폭에서의 변화를 측정함으로써 이온들을 검출하기 위해서 사용되는 정전 이온 트랩의 개략도이다.

도 21은 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라 결합된 RF 진폭에서의 강하를 측정하여 얻어지는 질량 스펙트럼의 도면이다.

도 22는 계산된 방출 주파수들과 실험적인 방출 주파수들을 갖는 질량 스펙트럼의 도면이다.

도 23은 3.5×10^{-7} Torr의 본질적으로 순수한 질소와, 7.5×10^{-7} Torr의 체적에 의한 N₂:Ar의 1:1 혼합물의 질량 스펙트럼들의 도면이다.

도 24는 전자 방출 소스를 둘러싸는 이온 콜렉터의 개략도이다.

- 도 25는 전자 방출 소스에 인접한 링 전극으로서 형성된 이온 콜렉터의 개략도이다.
- 도 26은 입구 플레이트의 외부에 위치하는 링 전극으로서 형성된 이온 콜렉터의 개략도이다.
- 도 27은 정전 이온 트랩의 전극 구조 내에 위치하는 이온 콜렉터의 개략도이다.
- 도 28은 정전 이온 트랩을 사용하는 조합 전압력 측정 및 분압 측정 장치의 개략도이다.
- 도 29는 증가하는 스위프율을 가지는 자동공진 방출 한계치의 그래프의 도면이다.
- 도 30a는 개방된 전자 게이트를 가지는 대표적 전자빔 프로필을 보여주는 펄스 전자 소스를 갖는 정전 이온 트랩의 개략도이다.
- 도 30b는 폐쇄된 전자 게이트를 가지는 대표적 전자빔 프로필을 보여주는 펄스 전자 소스를 갖는 정전 이온 트랩의 개략도이다.
- 도 31은 정전 이온 트랩의 펄스 동작에 대한 단일 펄스 전자 방출 및 RF 여기 소스 스캐닝의 타이밍 다이어그램들의 도면이다.
- 도 32는 정전 이온 트랩의 펄스 동작에 대한 더블 펄스 전자 방출 및 RF 여기 소스 스캐닝의 타이밍 다이어그램들의 도면이다.
- 도 33은 진공 챔버에 존재하는 2 종류의 기체들을 도시하는 도면이다.
- 도 34는 이온화 게이지에 의해 보고되는 전압력의 유도식이다.
- 도 35는 각 질량에 대해 방출되는 전하의 양의 유도식이다.
- 도 36은 기체 A의 분압의 유도식이다.
- 도 37은 ART MS 및 SRS RGA에 의해서 측정된 질소와 불활성 기체들의 분압의 그래프이다.
- 도 38은 ART MS 시스템을 도시하는 도면이다.
- 도 39는 전방 패널 어셈블리가 마스터인 ART MS 독립형 구성을 도시하는 도면이다.
- 도 40은 단일 (외부) 호스트 구성을 갖는 ART MS를 도시하는 도면이다.
- 도 41은 네트워크 호스트 구성을 갖는 ART MS를 도시하는 도면이다.
- 도 42는 로컬/원격 상태 전환 다이어그램을 도시하는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0042] 본 발명의 예시적 실시예들에 대한 설명은 다음과 같다.

[0043] 이온 트랩은, 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들과 이를 사이의 중앙 렌즈를 포함하며, 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되며 구속 포텐셜은 비조화인 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조를 포함한다. 이온 트랩은 또한 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 배수의 주파수로 여기시키는 여기 주파수(f)를 갖는 AC 여기 소스를 포함하고, AC 여기 주파수 소스는 바람직하게는 중앙 렌즈에 연결되어 있다.

[0044] 도 1을 참조하면, 이온 트랩(110)은 2개의 플레이트들(1, 2), 2개의 컵 형상 전극들(6, 7), 편평한 중앙 렌즈(3)로 구성된 전극 구조를 포함한다. 이 예에서, 각 플레이트(1, 2)는 약 0.025"의 두께와 약 1"의 직경을 갖는다. 플레이트(1)는 약 0.075"의 높이와 약 0.625"의 최대 치수를 갖는 돌출부(돌출부는 원형 또는 정사각형일 수 있음)를 포함하며, 적어도 하나의 슬릿이 돌출부의 측면을 따라서 위치되고, 이온 트랩(110)의 원통형 대칭 축을 벗어나 있다. 플레이트(2)는 편평하고 약 0.125" 직경($r_o=0.0625"$)의 원형 구멍을 포함하며, 전기 주조된 금속으로 만들어진 미세한 메시 그리드가 원형 구멍에 걸쳐 제공된다. 각각의 컵 형상의 전극(6, 7)은 약 0.75"의 길이($z_1=0.75"$)와 약 1"의 직경($r=0.5"$)을 가지며, 약 0.25" 직경($r_i=0.125"$)의 원형 구멍이 각 컵 전극의 하부에 제공된다. 컵 형상의 전극들(6, 7)은 도 1에 도시된 바와 같이, 마주 보는 미러 이미지 배열에서 서로를 마주 보는 컵들이 넓은 개구들을 가지도록 배열된다. 플레이트(1)의 돌출부는 컵 전극(6)으로부터 이격되어 있다. 플레이트(1)와 컵 전극(6) 사이의 간격은 약 0.175"이고, 플레이트(2)와 컵 전극(7) 사이의 간격은 약 0.25"이다. 편평한 플레이트들(1, 2)은 컵 전극들(6, 7)의 하부에 각각 인접하여 있다. 편평한 중앙 렌즈(3)는

각 컵 전극으로부터 약 0.025"의 간격을 가지고, 컵 전극들(6, 7) 사이에 위치한이다. 편평한 중앙 렌즈(3)는 약 1"의 직경을 가지며, 약 0.187" 직경($r_m=0.0935"$)의 원형 구멍을 갖는다. 또는, 중앙 렌즈(3)는 원통형일 수 있다. 전극 구조는 약 2.075"의 전장과 약 1"의 직경을 갖도록 원통형으로 대칭이다. 아래의 도 1의 추가적인 설명에서, 플레이트(1)는 입구 플레이트(1)로 불리고, 컵 형상 전극(6)은 입구 컵(6)으로 불리고, 중앙 렌즈(3)는 전환 플레이트(3)로 불리고, 컵 형상 전극(7)은 출구 컵(7)으로 불리며, 플레이트(2)는 출구 플레이트(2)로 불리며, 그 이유는 이온들이 좌측으로부터 전극 구조로 들어 가며, 다르게 규정되지 않는 한, 우측의 출구 플레이트(2)를 통해 나올 때 검출되기 때문이다. 입구 컵(6)과 출구 컵(7)이 도 1에서 솔리드 컵들로 도시되어 있지만, 이와 같은 전극 구조들이 천공된 금속 또는 그리드 재료, 또는 적층된 링 어셈블리로 만들어질 수 있다는 것이 본 기술 분야에 잘 알려져 있다. 개방 전극 구조는 더 높은 기체 전도성, 기체 조성물의 과도 변화에 대한 더 빠른 응답, 및 정전기 장들을 변형시킬 수 있는 컵들 내의 표면 오염의 형성에 대한 더 낮은 민감성을 제공할 것이다. 솔리드 금속 구조들은, 예를 들어, 플라스틱, 세라믹, 또는 다른 유사한 재료들과 같은 기재들로 만들어진 금속 코팅 구조들에 의해서 대체될 수 있다는 것이 본 기술 분야에 잘 알려져 있다.

[0045] 양 이온들을 트랩핑하기 위한 정전 포텐셜은 약 -850 VDC에 있는 전환 플레이트(3), 각각 약 -90 VDC에서 있는 컵 전극들(6,7), 약 0 VDC에 있는 입구 플레이트(1), 및 약 0 내지 약 -30 VDC, 바람직하게는 약 0 내지 -10 VDC의 조정 가능한 바이어스에 있는 출구 플레이트(2)를 바이어싱하여 전극 구조 내에 생성된다. SIMION(Scientific Instrument Services, Inc., Ringoes, NJ)으로 계산되고 도 2a에 도시된 바와 같이 중앙 축에 따르는 정전 포텐셜은 비조화이며, 출구 플레이트(2)에 적용된 바이어스에 따라서, 도 2a에 도시된 바와 같이 그리고 도 2b에 도시된 출구 플레이트(2) 근처의 정전 포텐셜 프로필의 확대도에서 가변적으로 비대칭이다. 비대칭은 아래에서 추가로 설명되는 바와 같이 트랩의 출구 측의 이온들을 우선적으로 방출하기 위해서 정전 포텐셜 프로필에서 생성된다. 음이온들을 트랩핑하기 위한 정전 포텐셜은 전극 구조에 인가되는 바이어스 포텐셜의 사인을 바꿈으로써 생성될 수 있다.

[0046] 조화 진동자는 그의 평형 위치로부터 변위되었을 때 (예를 들면, 후크의 법칙에 따라) 변위에 비례하는 복원력을 겪는 시스템이다. 만약 선형 복원력이 시스템에 작용하는 유일한 힘이라면, 시스템은 단순한 조화 진동자가 될 것이며, 이는 단순한 조화 운동을 겪을 것이다: 진폭(또는 저장 에너지)에 의존하지 않는 일정한 주파수를 가지는, 평형 지점에 대한 사인곡선 진동들. 조화 포텐셜 우물에 트랩핑된 이온들은 선형 장들을 겪고, 오직 이온들의 질량 대 전하 비율과 (트랩 구조와 정전 전압들의 크기의 조합에 의해서 정의되는) 이차 포텐셜 우물의 특정 형상에 따라서 고정된 고유 주파수에서 진동하는 단순한 조화 운동을 겪는다. 조화 진동자 포텐셜 에너지 우물에서 트랩핑된 주어진 이온에 대한 고유 진동 주파수는 그의 에너지 또는 진동의 진폭에 의해서 영향을 받지 않으며, 고유 진동 주파수와 질량 대 전하 비율의 제곱근 사이의 엄밀한 관계가 존재하며, 즉 더 큰 질량 대 전하 비율을 갖는 이온들이 더 작은 질량 대 전하 비율을 갖는 이온들보다 더 작은 고유 진동수에서 진동한다. 높은 공차의 기계적 어셈블리를 일반적으로 조심스럽게 선택된 조화 우물들, 셀프 번청, 등시성(isochronous) 진동들 및 유도성 광업(FTMS) 및 TOF 검출 스킁들에 대한 고분해능 스펙트럼 출력을 확립할 것이 요구된다.

[0047] 가장 일반적인 용어들에 있어서, 비조화는 단순히 조화 진동자인 것으로부터의 시스템의 일탈이며, 즉 단순 조화 운동으로 진동하지 않는 진동자는 비조화 또는 비선형 진동자로 알려져 있다. 조화 트랩들과 완전히 대조적으로, 이 트랩은 (1) 이온 트랩핑, 및 (2) 질량 선택적 자동공진 여기 및 이온들의 방출의 수단으로서 이온 진동 운동에서 강한 비조화를 이용한다. 일반적인 정전 이온 트랩을 위한 이온 트랩 축에 따른 이온 포텐셜 대 변위가 도 2a에 도시되어 있다. 이러한 포텐셜 우물에서의 이온의 고유 진동 주파수는 진동의 진폭에 의존하며 비조화 진동 운동을 초래한다. 이는 이러한 포텐셜 우물에 트랩핑된 특정 이온의 고유 진동 주파수가 4개의 인자들: (1) 트랩 구조의 상세한 내용들, (2) 이온의 질량 대 전하 비율(m/q), (3) (그의 에너지와 관련된) 이온의 진동의 순간 진폭 및 (4) 컵 전극들과 중앙 렌즈 전극 사이에 확립된 전압 구배에 의해서 정의된 포텐셜 우물의 깊이에 의해서 결정된다는 것을 의미한다. 도 2a에 도시된 바와 같은 비선형 축방향 장에 있어서, 더 큰 진동 진폭들을 갖는 이온들은 더 작은 진동 진폭들을 갖는 동일한 질량 이온들보다 더 낮은 고유 진동 주파수들을 갖는다. 환언하면, 비조화 진동들에 있어서, 트랩핑된 이온들은 그들의 에너지가 증가하면 고유 진동 주파수의 감소와 진동 진폭의 증가를 겪게 된다.

[0048] 도 2a는 대부분의 바람직한 트랩 실시예들에서 일반적으로 만나게 되는 음의 비선형 사인을 갖는 비조화 포텐셜의 예를 도시한다. 도 2c는 조화 포텐셜 프로필과 비조화 이온 트랩 사이의 차이를 도시하고 있다. 이러한 타입의 비조화 포텐셜 트랩에서 진동하는 이온들은, 에너지를 얻어감에 따라, 예를 들어, 자동공진에 의해서, 증가하는 진동 궤적들과 감소하는 주파수들을 경험할 것이다. 그러나, 본 발명은 선형으로부터의 음의 편차를 갖는 비조화 포텐셜들을 갖는 트랩에 한정되지 않는다. 또한, 조화(즉, 2차의) 포텐셜로부터 양의 편차를 갖는 정

전 트랩들을 형성하는 것이 가능하며, 이 경우 자동공진을 일으키기 위해 요구되는 트랩 조건들에서의 변화들은 음으로 편향된 포텐셜들에 대해서 요구되는 것들과 반대가 될 것이다. 이러한 포텐셜은 또한 이온들의 비조화 진동들에 대해서 책임이 있으나, 도 2c에 도시된 음의 비조화 곡선과 비교하여 이온 에너지와 진동 주파수 사이의 반대된 관계들을 가질 수 있다. 자동공진 하에서 개선된 파편화율들(fragmentation rates)로 인도할 수 있는 이온 에너지와 진동 주파수들 사이의 특정 관계들을 달성하기 위해서 비조화 트랩들에서 양으로 편향된 포텐셜들을 사용하는 것이 가능하다.

[0049]

진동 운동에 있는 이온들을 구속하기 위해서 비조화 포텐셜들을 사용하는 이점은 제조 요건들이 훨씬 덜 복잡하고 엄격한 선형 장들이 요건인 조화 포텐셜 정전 트랩들에서보다 가공 공차들이 훨씬 덜 엄격하다는 것이다. 트랩의 성능은 비조화 포텐셜에 대한 엄격하거나 독특한 함수 형식에 의존하지 않는다. 포텐셜 트랩핑 우물에서의 강한 비조화의 존재는 자동공진을 통한 이온 여기에 대한 기본적인 전제조건인 반면에, 트랩 내에 존재하는 트랩핑 포텐셜들의 정확한 함수 형식의 조건에 관련하여 만족하기 위한 엄격하거나 독특한 요건들 내지는 조건들이 없다. 게다가, 질량 분석 또는 이온-빔 소성 성능은 또한 유닛 대 유닛 변화에 덜 민감하며, 다른 대부분의 질량 분석 기술과 비교하여 비조화 공진 이온 트랩 질량 분석계(ART MS)를 위한 더 완화된 제조 요건들을 허용한다. 도 2a의 곡선에 도시된 비조화 포텐셜은 단지 참고를 위해서 명백하게 제공되고 있으며, 본 발명의 범위를 이탈하지 않고 비조화 포텐셜에 대한 형태와 세부 사항의 다양한 변화가 이루어질 수 있음이 당업자에 의해 이해될 것이다.

[0050]

이온 트랩은 또한 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 배수의 주파수로 여기시키는 여기 주파수(f)를 갖는 AC 여기 소스를 포함한다. 이온들의 고유 진동 주파수의 배수는 고유 진동 주파수의 1배, 2배, 또는 그 이상의 배수를 포함한다. AC 여기 소스는 컵 전극들(6,7) 및 입구 플레이트(1) 및 출구 플레이트(2), 예를 들어, 입구 컵(6) 및 입구 플레이트(1), 또는 바람직하게는, 도 1에 도시된 바와 같은 전환 플레이트(3)(중앙 렌즈)에 직접 연결될 수 있다. 도 1을 참조하면, AC 여기 소스(21)는 전환 플레이트(3)에 연결되고, 인가되는 RF는 또한 광학 커페시터들(43,44)을 통해 컵 전극들(6,7)로 각각 분배된다. 전환 플레이트(3)로의 AC 여기 소스(21)의 직접적인 적용은 RF 분배의 대칭적 배열을 형성하고, 놀랍게도, 이온들을 그의 고유 진동 주파수의 2배로 효과적으로 여기할 수 있게 한다. 전환 플레이트(3)에 적용되었을 때, AC 여기 소스는 이온들이 출구 컵을 향해 이동할 때와 이온들이 입구 컵을 향해 이동할 때 되돌아 오는 중에 이온들을 여기시킨다.

[0051]

이온 트랩에는 또한 도 1에 도시된 스캔 제어부(100)가 제공되어 있으며, 스캔 제어부(100)는 AC 여기 주파수와 이온들의 고유 진동 주파수의 2배 사이의 주파수 차이를 질량 선택적으로 감소시킨다. 일 실시예에서, 스캔 제어부(100)는 자동공진을 달성하기 위해서 이온들의 고유 진동 주파수의 2배보다 높은 여기 주파수로부터 이온들의 고유 진동 주파수의 2배보다 낮은 주파수를 향하여 일 방향으로 소정의 스위프트로 AC 여기 주파수(f)를 스위핑한다. 일반적인 정전 이온 트랩에 있어서, 비조화 포텐셜 우물로써, 주어진 질량 대 전하 비율(m/q)의 이온들의 그룹의 자동공진 여기는 다음과 같이 달성된다.

[0052]

1. 이온들은 정전기적으로 트랩핑되고, 고유 진동 주파수(f_M)를 가진 비조화 포텐셜 내에서 비선형적 진동들을 겪는다.

[0053]

2. AC 구동 장치는 이온들의 고유 진동 주파수의 위($f_d > f_M$) 또는 이온들의 고유 진동 주파수의 배수 위, 예를 들어, 2배 위($f_d > 2f_M$)의 초기 구동 주파수(f_d)를 갖는 시스템에 연결되어 있다.

[0054]

3. 순간 주파수 차이가 거의 영(0)으로 접근할 때까지, 구동 주파수(f_d)와 이온들의 고유 진동 주파수의 배수(f_M) 사이의 양의 주파수 차이를 연속적으로 감소시키는 것은 이온들의 진동 운동이 구동 장치와 지속적인 자동 공진 상태로 위상 고정하는 것을 야기한다. (자동공진 진동자에서, 이온들은 그 다음에 그들의 고유 진동 주파수를 구동 주파수에 위상 고정된 상태로 유지하도록 요구될 때 구동 장치로부터 에너지를 추출하여 그 진동의 순간 진폭을 자동적으로 조정할 것이다).

[0055]

4. 구동 주파수와 이온들의 고유 진동 주파수 사이의 음의 차이를 향해 트랩 조건들을 변화시키는 추가적인 시도들이 그 다음에 에너지가 AC 구동 장치로부터 진동 시스템 내로 전달되게 하며, 이온들의 진동 진폭과 주파수를 변화시킨다.

[0056]

5. 도 2c에 도시된 것과 같은 포텐셜(음의 비선형)을 가지는 일반적인 정전 이온 트랩에 대해, 에너지가 구동 장치로부터 진동 시스템으로 전달됨에 따라, 진동 진폭들은 더 커지고 이온들은 엔드 플레이트들에 더 가깝게 진동한다. 결국, 이온들의 진동 진폭이 측면 전극이 반투명하면(예, 메시) 이온이 측면 전극을 때리거나 트랩을

떠나는 지점에 도달하게 된다.

[0057] 위에서 설명된 자동공진 여기 과정은, 1) 저장된 동안, 이온들이 새로운 화학적/물리적 과정들 겪도록 야기하도록 이온들을 여기하고/하거나, 2) 질량 선택적 방식으로 트랩으로부터 이온을 방출하기 위해서 사용될 수 있다. 이온의 방출은 전체 질량 분석 검출 시스템들을 실행하기 위해서뿐만 아니라 펠스 이온 소스들을 동작시키기 위해서 사용될 수 있으며, 이 경우에 검출 방법이 자동공진 이벤트들 및/또는 방출된 이온들을 검출하도록 요구된다.

[0058] 또는, 스캔 제어부(100)는 역방향, 즉, 이온들의 고유 진동 주파수의 2배보다 낮은 주파수로부터 이온들의 고유 진동 주파수의 2배보다 높은 주파수를 향하여, 소정의 스위프율로 AC 여기 주파수(f)를 스위핑할 수 있다. 이 역방향 스캔 모드는 상술한 바와 같은 지속적인 위상 고정 및 자동공진을 생성하지 않고, 도 3에 도시된 바와 같이, 대부분의 경우에, 적절히 유용한 스펙트럼들을 발생시킨다.

[0059] 스캔 제어부(100)가 AC 여기 주파수(f)를 스위핑하는 스위프율은 선형 스위프율(즉, df/dt 는 상수와 같다), 또는 바람직하게는, 비선형 스위프율일 수 있고, 가장 바람직하게는, $d(1/f^n)/dt$ 는 상수이고 n은 영(0)보다 크도록 설정될 수 있다. 몇개의 가능한 주파수 스캔 프로필들이 도 4에 도시되어 있다. 자동공진 조건들 하에서 ART MS 트랩이 적절히 동작하기 위해서는, 높은 값에서 낮은 값으로 주파수들을 스캔하는 것이 필요하다. 선형 주파수 스캔들은 ART MS 여기와 양립될 수 있으나, 낮은 질량 범위에 걸쳐서 가장 효율적인 이온 방출을 제공하지 않는다. ART MS가 적절히 실행되기 위해서, AC 여기를 제공하기 위해 사용되는 함수 발생기는 미리 규정된 전압 (V_{pp})과 적절한 주파수 스캔 시간 프로필을 가지는, 미리 규정된 주파수 값들 사이에서 위상 연속적 RF 신호의 소스이어야 한다. 직접 디지털 주파수 합성(DDS)을 위해, 왜곡된 피크들과 우조화들의 부재를 보장하도록 적절한 출력 여과를 갖는 고샘플율 디지털 아날로그 컨버터(DAC) 출력을 또한 갖는 것이 중요하다. 대부분의 저 비용의, 상업적으로 사용 가능한 DDC 칩들은 불연속의 작은 주파수 증분들의 위상 연속적 연쇄로서 주파수 스위프들을 생성한다. 단계당 약 136 Hz까지 작은 주파수 단계들은 여기서 설명되는 모든 실시예에 대한 실험들에서 양호한 품질의 스펙트럼들을 생성했다.

[0060] 비조화 공진 이온 트랩 질량 분석계들을 동작시키기 위해 선형 스캔들($df/dt=상수$)이 사용되었다. 선형 스캔들은 가장 상업적인 함수/임의 파형 발생기들(FAWG)에 의해서 지원되므로 실행하기에 편리하고 용이하다. 선형 스캔들은 완전히 적절하며, 좁은 질량 범위 스캔들에 대해 일반적으로 선호되나, 주파수는 일정 비율로 감소하기 때문에 큰 질량 범위들에 대해 잘 실행되지 않으며, 이온들의 질량은 주파수의 제곱과 역으로 관련되어 있고, 따라서, 가벼운 이온들은 스캔에서 일찍 방출되고, 인접한 질량들 사이의 시간 간격은 감소하는 주파수와 함께 감소한다. 그러므로 선형 스캔들은 따라서 스캔 시간 활용의 관점에서 효율적이지 않다. 낮은 주파수들에서 사용되는 상대적으로 긴 스캔 시간이 우조화(superharmonic) 주파수들에 있는 이온들의 방출을 용이하게 하므로(즉, 매우 복잡한 스펙트럼들을 제공), 선형 스캔들은 낮은 질량들(즉, 10 미만의 원자 질량 단위들 (amu))을 포함하는 큰 질량 범위 스캔들에 대해서 추천되지 않는다. 선형 주파수 스캔들이 상당한 효율로 낮고 높은 분자량 종들을 적절히 방출할 수 없으므로, 이들은 큰 질량 범위들에 대해서 또한 추천되지 않는다. 고정된 주파수 범위에 대해서, 더 무거운 이온들의 효율적인 방출은 더 가벼운 이온들에 대한 스캔 시간들보다 더 긴 스캔 시간들을 요구한다. 선형 스캔들을 적용할 때, 관심이 있는 특정 피크(들)에 대해 이상적인 스캔 시간이 선택된다. 실제로 좁은 질량 범위들(즉, 수 amu)을 원하지 않으면, 선형 스캔들은 일반적으로 ART MS 트랩들의 동작에 대해 이상적이지 않은 것으로 인정된다. 개별 질량 범위 각각에 대해 최적화된, 연쇄적인 일련의 선형 스캔들은 큰 질량 범위들에 대해 스캔들을 실행하기 위해 사용될 수 있으며, 멀티 세그먼트 선형 스캔들은 하기의 비선형 주파수 스캔 프로필들을 계산하기 위해서 선형 스캔 프로필들을 연쇄시키는 것은 기기 성능의 실질적인 손실이 없이 저렴한 DDS 칩들을 기반으로 ART MS 시스템들의 개발을 가능하게 한다. 연속적인 선형 세그먼트들 사이에서 위상의 연속성이 확보되지 못하는 최저 비용의 DDS 칩들의 일부에 대해서, 주파수 범위들의 세밀한 계산들이 관심이 있는 질량 피크들에서 위상의 불연속성을 피하기 위해서 사용될 수 있다.

[0061] 세밀한 분석에 따르면, 모든 질량들에서 이온들의 방출을 최적화하기 위해서 요구되는 시간에 따른 주파수 변화율($[df/dt]$)의 진폭은 이온들의 질량에 반비례하여 감소될 필요가 있다. 환언하면, 더 무거운 이온들이 더 가벼운 이온들보다 더 느린 스캔 유파(즉, 더 작은 $[df/dt]$ 값들)에 의해 더 효율적으로 방출된다. 더 무거운 이온들은 더 느리게 진동을 하고, 이에 따라서, RF 장 진동들로부터 충분한 에너지를 수집하기 위해서 더 많은 시간을 요구한다. 주어진 RF 진폭에 대해, 이온이 자동공진에 대해서 트랩으로부터 방출될 수 있기 전에 최소의 진동들이 요구되는 것으로 믿어진다. 그러므로, 이상적으로는, 시간에 따른 주파수 변화율($[df/dt]$)은 증가하는 질량

의 이온들이 트랩으로부터 방출됨에 따라 감소되어야 한다. 이 스캔 프로필은 위상 연속적인 RF 신호의 발생을 더 복잡하게 만들지만, 고속의 임의 과정 발생기의 사용이 성공적일 것을 요구한다. 상술한 바와 같이, 피스 마디의 선형 피트들(piece-wise linear fits)은 또한 이상적인 비선형 주파수 프로필들을 계산하기 위해서 사용되어 왔으며, 상업적 기기화의 발전을 위한 저비용 DDS 칩들의 사용을 가능하게 한다.

[0062] 주파수의 대수가 시간에 따라 선형적으로 변하는 대수의 주파수 스캔들($d(\log f)/dt = \text{상수}$)은 가장 상업적으로 유용한 FAWG들로써 생성될 수 있다. 대수의 스캔들은 일반적으로 선형 스캔들보다 더 나은 결과들을 제공한다: 1) 스펙트럼들은 낮은 질량들에서 (아래에서 설명되는) 더 적은 우조화 피크들을 포함한다, 2) 더 높은 분자량 화합물들은 선형 스캔들의 스캔 시간들에 상당하는 스캔 시간들 동안에 트랩으로부터 더 효율적으로 방출된다. 대수의 주파수 스캔들은 큰 질량 범위 스펙트럼 수집에 대해 선형 스캔들보다 항상 선호되나, 이들은 가볍거나 더 무거운 이온들이 방출될 필요가 있는지에 따라 세밀하게 스캔 시간들을 조정할 필요가 여전히 있으므로 여전히 이상적이지 않다. 효율적으로 더 무거운 이온들을 방출할 수 있기 위해서, 스캔 시간들은 증가될 필요가 있으며, (아래에서 추가로 설명될) 우조화들은 스펙트럼들을 여전히 오염시킬 것이다.

[0063] 바람직한 스캔 모드는 $n=1$ 및 $n=2$ 인 도 4에 도시된 바와 같이 $d(1/f^n)/dt$ 가 대략적으로 상수와 같고 n 은 영 (0)보다 크도록 주파수 스위프율을 설정하는 것을 포함한다. "1/f" 주파수 스위프들은 질량에 따라 선형으로 감소하는 주파수 스위프들을 제공한다. 이는 정확히 이온 방출에 대해 최적이 되도록 경험적으로 결정되는 종류의 관계이다. "1/f" 스캔들은 모든 스캔 스위프 모드들의 가장 명확하고 가장 효율적인 스펙트럼을 체계적으로 제공해 왔다. 예를 들어, 70 밀리초 주파수 스위프는 동등한 로그 스캔에 대해 요구되는 250 밀리초와 대조되는 70 밀리초에서 1 amu와 100 amu 사이의 최적의 데이터 출력을 제공한다. 상대적으로 적은 시간이 더 높은 주파수들, 더 높은 조화 기여들의 견지에서 훨씬 더 명료한 주파수들에서 소모되므로, 스캔들은 더욱 빠르다. $1/f$ 스캔들에 추가하여, $1/f^2$ 스캔들($d(1/f^2)/dt = \text{상수}$)을 고려하는 것이 또한 유용할 것이다. 이 스캔 모드의 가장 중요한 이점은 주파수들이 시간에 대해 비선형 방식으로 스캔되더라도, 상이한 질량 피크들이 질량 대 시간의 선형 관계에서 방출된다는 것이다. $1/f^2$ 스캔에서, 이온들은 그의 질량 대 전하 비율에 엄격히 비례하는 시간에 트랩으로부터 방출되며, 즉 질량 대 전하 비율과 방출 시간 사이에는 직선 선형 관계가 있다: $?m/?t = \text{상수}$. 질량 표준에 대해 적절히 보정을 함으로써, 방출 시간들을 질량들로 변환하는 것이 단순하고, 이는 수집된 질량 방출 데이터로부터 질량 스펙트럼을 발생시키기 위해서 많은 처리 동력을 요구하지 않는다.

[0064] 또는, 도 1에 도시된 스캔 제어부(100)는 이온들의 고유 진동 주파수의 2배가 AC 여기 소스의 주파수보다 낮은 주파수로부터 AC 여기 소스의 주파수보다 높은 주파수를 향해 변하도록 하는 방향으로 소정의 스위프율로 정전 포텐셜의 크기(V)를 스위핑하기 위해서 사용될 수 있다. 전환 플레이트(3) 상의 바이어스는 도 2a에 도시된 정전 포텐셜 우물의 하부에서 전압을 설정한다. 이온들의 고유 진동 주파수는 트랩핑하는 포텐셜 우물의 깊이에 의해서 설정된다. 전환 플레이트 바이어스 전압에서의 어떠한 변화도 이온들의 고유 진동 주파수의 이동을 초래한다. 사실, 고정된 질량 대 전하 비율의 이온들의 왕복 시간은 도 2a에 도시된 바와 같은 트랩핑 포텐셜의 제곱근과 관련된다. 트랩핑 포텐셜 우물이 얕아짐에 따라서, 이온들의 왕복은 더욱 길어지고 고유 진동 주파수는 더 작아지며, 즉 전환 전압이 감소함에 따라 스펙트럼의 피크들은 더 낮은 주파수들로 이동한다. 전환 플레이트 (3) 상에서의 바이어스의 스위프율은 비선형 스위프율일 수 있다. 도 5a에 도시된 바와 같이, 이온들을 질량 선택적으로 여기시키는 자동공진을 사용함으로써, 이온들의 고유 진동 주파수의 2배가 AC 여기 소스의 주파수보다 낮은 주파수로부터 AC 여기 소스의 주파수보다 높은 주파수를 향해 변하도록, 전환 플레이트(3) 상의 바이어스는 낮은 값으로부터 높은 값으로의 방향으로 스위핑될 수 있다. 또는, 전환 플레이트(3) 상에서의 바이어스는 역방향 스캔 모드로 스위핑될 수 있으며, 이 경우, 이온들의 고유 진동 주파수의 2배가 AC 여기 소스의 주파수보다 높은 주파수로부터 AC 여기 소스의 주파수보다 낮은 주파수를 향해 변하도록, 전환 플레이트(3) 상에서의 바이어스는 높은 값으로부터 낮은 값으로의 방향으로 스위핑된다. 역방향 스캔 모드는 자동공진을 사용하지는 않으나, 그럼에도 불구하고 종종 역방향 스캔 모드에서의 주파수 스위핑을 사용하는 스펙트럼을 도시하는 도 5b에 도시된 바와 같이, 특히 (아래에서 설명될) 축 상 이온화로써, 양호한 품질의 스펙트럼들을 생성한다. 도 5c에 도시된 바와 같이, (아래에서 설명될) 축을 벗어난 이온화를 가진 주파수의 역방향 스캐닝은 좋지 않은 품질의 스펙트럼을 생성한다. 일 실시예에서, AC 여기 소스의 주파수와 전환 플레이트(3) 상의 바이어스는 스캔 동안에 모두 변화된다.

[0065] 도 6a에 부분적으로 도시된 축 상 이온화를 사용하는 일 실시예에서, 제1 및 제2 마주보는 미러 전극 구조들 각각은 축방향으로 위치하는 구멍을 갖는 제1 플레이트 형상 전극(입구 플레이트)(1)과 중앙 렌즈를 향해서 개방되고, 중앙에 위치하는 구멍을 갖는 컵 형상의 제2 전극(6)을 포함하고, 중앙 렌즈는 플레이트 형상이고 축방향

으로 위치하는 구멍을 포함한다. 이 실시예에서는, 도 6a의 그레프에 도시된 바와 같이, 전자 방출 소스(16)에 의해 생성된 전자 밀도는 입구 플레이트(1)에 근접하여 가장 크고, 전자 에너지는 또한 입구 플레이트(1)로부터 더 멀리 떨어진 경우보다 더 크다. 따라서, 대부분의 이온들은 상대적으로 고 에너지의 전자들과의 충격에 의해서 입구 플레이트(1)에 근접하여 형성되고, 고 에너지 이온들은 트랩핑되기 전에 전극 구조로부터 이탈하기가 쉬우며, 스펙트럼들에 큰 베이스라인 오프셋을 초래한다. 도 6a는 또한 트랩에 들어가는 전자들이 결국 되돌아와서 입구 플레이트(1)를 향해서 다시 반사되는 것을 도시하고 있다. 이온들이 입구 플레이트(1)의 후방 평면을 향해 가속됨에 따라, 더 많은 이온들이 제2라운드의 이온화에 있어서 형성된다. 전자들이 입구 그리드에 도달함에 따라, 이들 중 일부는 그리드 와이어들 및 인접한 표면들과 충돌하며, 전자 자극 탈착(ESD)를 통해서 에너지가 충만한 이온들을 방출한다. ESD에 의해 방출되는 에너지가 충만한 이온들 중의 일부는 또한 트랩핑되지 않고 전극 구조로부터 빠져 나오기 쉽고, 질량 분석계의 베이스라인 오프셋 신호에 추가적으로 기여한다.

[0066]

도 6b에 부분적으로 도시된 바와 같은, 축을 벗어난 이온화를 사용하는 바람직한 실시예에서, 제1 플레이트 형상 전극(입구 플레이트)(1)은 마주보는 미러 전극 구조의 축을 벗어나 위치한 적어도 하나의 구멍을 포함한다. 도 6b의 그레프에 도시된 바와 같은 이 실시예에서, 전자 방출 소스(16)에 의해 생성되는 전자 밀도는 트랩 내에서 더 깊이 국소화되고, 입구 플레이트(1)로부터 멀어지며, 그러므로 전자들과의 충격에 의해서 생성되는 이온들은 낮은 에너지를 갖고 트랩핑될 확률은 증가하게 된다. 축을 벗어난 이온화는 또한 축 상 이온화와 연결하여 설명되는 트랩(즉, 도 6a)의 출구 플레이트(2)와 직접 시야선에 있는 ESD 이온들의 발생을 제거한다. 그 결과, ESD는 도 6b에 도시된 축을 벗어난 이온화 스킴에서 베이스라인 오프셋 신호에 훨씬 덜 기여를 한다. 입구 플레이트(1)에 근접하여 형성되는 이온들은 트랩핑이 되지 않은 채 트랩을 벗어나기에 충분한 에너지를 가지며, 따라서 이 이온들은 이온 질량에 무관하고, 이에 따라서 검출기 노이즈에 실질적인 기여를 하는 이온 검출기에 의해서 측정되는 신호에 있어서 베이스라인 오프셋(증가)을 생성한다. 증가된 베이스라인 노이즈는 계속적인 이온 충격으로 인하여 이온 검출기의 수명에 악영향을 주고, 베이스라인 삭감에 대한 추가적인 신호 처리를 요구하고, 센서의 검출 한계들을 증가시킨다(악영향을 준다). 센서의 출력 신호에 대한 베이스라인 오프셋의 상대적인 기여는 또한 축 상 이온화가 사용될 때 시스템에서의 전압력의 함수로서 증가하는 것으로 나타난다. 축을 벗어난 이온화는 베이스라인 오프셋을 최소화하며 ART MS 장치의 작동 압력의 동적 범위를 효과적으로 향상시키는 것으로 보여졌으며, 즉 트랩은 압력이 증가함에 따라 분해능이 덜 열화된 큰 압력 범위에 걸쳐 작동될 수 있다. 축을 벗어난 이온화의 추가적인 이점은, 도 7에 도시된 바와 같이, 2개의 전자 방출 소스들(16)이 사용될 수 있다는 것이다. 적어도 하나, 바람직하게는 2개의 전자 방출 소스들에 의해서 발생되는 전자들은 전극 구조를 따르는 축에 수직인 축으로부터 멀리 약 20도와 약 30도 사이의 각도로, 바람직하게는 약 25도로 주입된다. 전자들이 압력 플레이트(76)(도 1에 도시됨) 또는 인접한 전극 구조들의 어느 부분도 때리지 않도록 전자 주입 각도가 선택되며, 그렇지 않은 경우, 전자 빔은 결과로 생성된 스펙트럼에서 2차적인 전자들과 전기 노이즈를 발생시킬 수 있다. 전자 방출 소스의 바람직한 정렬에 있어서, 도 6b에 도시된 바와 같이, 전자 방출 소스(16)로부터의 전자 빔은 입구 플레이트(1)의 타측에 있는 출구 슬릿을 향하며, 전자 전류는 전자 측정 플레이트(72)에 의해서 측정될 수 있다. 또는, 출구 슬릿으로부터 유출되는 전자 빔은 아래에서 설명되고 도 26에 도시된 외부에 위치한 이온화 게이지 구조를 위한 이온화 소스로서 사용될 수 있다. 전자 방출 이온 소스(16)는 도 6a 및 도 6b에 도시된 고온 필라멘트일 수 있거나, 예를 들어, 도 8에 도시된 전자 발생기 어레이(EGA)(80)와 같은 저온 전자 방출 소스일 수 있다. 전자들의 포인트 소스들로서 동작하는 EGA들이 이용 가능하며, 축을 벗어난 이온화에 사용하기에 적합하다. 다른 축을 벗어난 이온화 배열들은, 예를 들어, 입구 컵(6)의 측면 개구를 통해서 이온들을 도입하거나 펠스 주입에 의해 기기의 외부에서 생성된 이온들을 도입하는 것을 포함할 수 있다. 도 1에 도시된 단순한 구성은 제조의 상대적으로 용이함과 저비용, 전압력 측정과의 양립 가능성, 및 장 대체 가능성 필라멘트 어셈블리를 위한 설계와의 양립 가능성으로 인해 선호되었으며, 필라멘트는 전극 구조의 최상부에 위치되었다.

[0067]

질량 분석계로서 구성되므로, 이온 트랩은 또한 이온 검출기를 포함한다. 도 9에 도시된 일 실시예에서, 이온 검출기(17)는 전극 구조의 축 상에서 트랩의 외부에 위치될 수 있다. 바람직한 실시예에서, 도 10에 도시된 바와 같이, 이온 검출기(17)는 전극 구조의 축을 벗어나 위치한다. 이온 검출기는, 예를 들어, 전자 증배 장치일 수 있다. 패러데이 컵들은 또한 이온 신호들을 수집하기 위해서 사용될 수 있으나, 작은 이용 가능한 신호들은 센서의 속도 이점들을 유지하기 위해서 피코암페어 수준 신호 검출과 양립될 수 있는 고속 전위계들의 설계에 극한적인 요구사항들을 부과한다. 또는, 이온 검출기는 Scheidemann 등에게 2009년 3월 31일 하여된 미국 특허 제7,511,278호에 설명된 바와 같이, 지지 요소에 배치된 다수의 전기 전도성 구조들을 포함할 수 있으며, 그 전체 내용과 교시는 전체가 참고로 여기에 포함된다. 구조들은 서로 전기적으로 절연되어 있으며, 각 구조는 전자 판독 기기에 전기적으로 연결될 수 있다. 구조들은 지지 요소와 입사각을 형성하는 방향으로 입자들의 빔을 받

는다. 홈(trough)이 범 방향에서 볼 때 각각 2개의 연속적인 구조를 사이에 배치되며, 적어도 부분적인 중첩이 각각 2개의 연속적인 구조들 사이에 존재한다. M. Bonner Denton은 Denton 등에게 2009년 3월 3일 허여된 미국 특허 제7,498,585호에서 질량 분석 검출을 위한 이와 같은 구조의 실질적인 실행 및 활용을 보여주었으며, 그 전체 내용과 교시는 그 전체가 참고로 여기에 포함된다. 여기에 설명된 대부분의 이온 및 전자 검출기들이 특히 이온 및 전자 전류를 측정하기 위해서 설계된 트랜스임피던스 증폭기들에 의존해 왔으나, 전하 민감 증폭기들을 이용하여 이온 및 전자 검출 및 측정을 실행하는 것이 또한 가능하다. 질량 분석계 및 이온 운동 분석계와 양립 될 수 있는 고속 전하 민감 트랜스임피던스 증폭기들은 수개의 연구 그룹에 의해 보여져 왔으며, 간단한 예가 Gresham 등에게 2008년 7월 22일에 허여되었으며, 그 전체 내용과 교시가 여기에 참고로 포함된 미국 특허 제 7,403,065호에 설명되어 있다.

[0068] 또는, 이온들은 AC 여기 소스 주파수가 변함에 따라 또는 정전 포텐셜의 크기가 변함에 따라 이온 트랩의 전기적 특성을 측정하여 질량 선택적으로 검출될 수 있다. 전기적 특성은 (1) AC 여기 소스로부터 흡수된 RF 파워의 양, (2) 전극 구조의 전기 임피던스의 변화, 및/또는 (3) 이온들이 AC 여기 소스와 위상 고정되고 엔드 플레이트들에 더 가깝게 진동함에 따라 엔드 플레이트들에서 발생하는 이미지 전하들에 의해서 유도되는 전류들을 포함한다. 여기에서 설명되는 정전 이온 트랩들은, 동일한 질량 대 전하 비율의 이온들이 넓은 범위의 진동 주파수들과 위상들을 갖도록, 이온 에너지들 및/또는 주입 시간들을 엄격히 제어하는 것을 포함하지 않는다. 그 결과로, 이온들은 등시성 방식으로 진동하지 않으며, 고속 푸리에 변환 디콘볼루션과 조합된 중앙 플레이트(또는 튜브)에서의 유도된 미러 전하 과도현상들의 유도 꾹업은 여기에 적용되지 않았다. 그러나, 세밀하게 제어되는 이온 에너지들과 주입 시간들을 갖는 정전 이온 트랩들에 대해, 자동공진 여기는 대부분의 현재 이용 가능한 비자동공진 정전 이온 트랩들에서와 같이, 중앙 플레이트(또는 튜브)에서의 이미지 전하 과도현상들을 따름으로써 이온들의 공진 주파수가 모니터링되는 검출 스킴과 조합될 수 있다.

[0069] 질량 선택적 이온 검출은 트랩 내로의 RF 파워의 소산에 있어서의 변화들을 모니터링함으로써 실행될 수 있다. 주파수가 고정된 HV에서 스캐닝됨에 따라 또는 HV가 고정된 주파수에서 스캐닝됨에 따라, 상이한 질량들을 갖는 이온들이 RF 장들과 자동공진하게 되고 RF 장 진동들과의 진동을 위상 고정시킬 것이다. 자동공진 여기 중에 이온들에 의해 얻어지는 에너지는 RF 장으로부터 추출되며, 전용 회로들을 이용하여 RF 파워 소비에 있어서의 이러한 갑작스런 변화들을 검출하는 것이 가능하다. 예를 들어, RF 파워 흡수가 검출될 수 있으며, "약하게 구동되는 진동자들(WDO)"의 도움으로 계량화될 수 있다. WDO들은 예들 들어, Paul 트랩에서의 이온 진동을 트래킹하기 위해 이온 트랩에서의 RF 장들로부터의 에너지 흡수를 검출하는데 사용되어 왔다. A. Kajita, M. Kimura, S. Ohtani, H. Tawara, 및 Y. Saito, *Anharmonic Oscillations of Mixed Ions in an RF Ion Trap*, J. Phys. Soc. Jpn., 59(4) pp. 1127-1130 (1990)을 참고하기 바란다. 이온 트랩의 전기적 특성에서의 변화들을 측정하여 이온들을 검출하기 위해서 사용되는 ART MS 이온 트랩의 일 실시예가 도 11에 도시되어 있다. 이전의 트랩 설계와의 주요한 차이는 입구/출구 플레이트 및 컵들이 서로 전기적으로 절연되어 있다는 것이었다. 컵들과 플레이트들에 대한 별도의 전압 바이어스 제어들을 갖는 것은 엔드 플레이트들 상의 이미지 전류들의 효과를 더 잘 특징짓기 위해서 필요한 것으로 생각되었다. 이 트랩은 100 kOhm 저항기를 통해서 입구 컵을 접지하면서 입구 플레이트에 RF 구동을 적용하는 것에 대해서 제일 먼저 특징지어졌다. 물과 아르곤에 대한 방출 주파수들은 상이한 전환 플레이트 전압들에 대해서 측정되었으며, 스캔 조건들은 다음과 같다: 1.25 MHz 내지 375 kHz, 대수 주파수 스위프, 12 msec 스캔 시간, 50 mV RF V_{p-p}.

[0070] 방출 주파수들은 SIMION을 이용하여 동일한 2개의 이온들(물과 아르곤)에 대해 계산된 것들과 비교되었다. 표 1에 나타낸 데이터는 SIMION이 상이한 전압들에 대한 방출 주파수들의 매우 정확한 측정을 제공하였다는 것을 보여 주며, a) SIMION이 작은 퍼센트의 정확도 내에서 방출 주파수들을 계산하는데 사용될 수 있고, b) 방출 주파수들은 입구/출구 플레이트들에 인접하게 위치한 이온들의 진동 주파수들에 대응하는 것을 보여준다. 주파수 스캔들이 -1000 VDC와 -300 VDC 트랩핑 포텐셜 사이에서 얻어졌다. 도 12는 -400 VDC 중앙 렌즈 트랩핑 포텐셜에서 얻어진 대표적 스펙트럼을 보여준다. x 축은 디지털 오실로스코프로써 측정된 스캔 시간이고, y 축은 SR 570 트랜스임피던스 증폭기(Stanford Research Systems, Sunnyvale, CA)에 의해 제공된 전자 증폭기(17)에 의해 검출된 mV 단위의 이온 전류이다. 437 kHz에서의 관찰된 아르곤 피크는 448 kHz의 계산된 방출 주파수와 잘 비교된다.

표 1

[0071]

계산된 방출 주파수 및 실험적 방출 주파수

전환 전압 (-HV, Volts)	물-방출 주파수. kHz	아르곤-방출 주파수. kHz	아르곤-계산된 주파수. kHz (SIMION) 방출 주파수. kHz
-1000	1033	692	
-900	980	657	
-800	924	619	
-700	864	579	
-597	800	536	
-500	731	490	
-400	654	437	448
-300	568	380	386

[0072]

도 11에 도시된 동일한 트랩은 그 다음에 EMCO HV 모듈, 모델 CA20N-5(EMCO, Sutter Creek, CA)에 기반하는 HV 증배기 회로를 이용하여 HV 스캔들(즉, 고정 주파수 스캔들)을 실행하도록 재구성되었다. AC 여기 주파수가 540 kHz에서 고정된 반면에, 중앙 렌즈 상의 HV는 약 -200 VDC와 -800 VDC 사이에서 스캔되었다. 이온 방출은 전압 스위프 경사의 양측에서 관찰되었다: 자동공진 및 역방향 스캔들 - 즉, 전압이 상향 또는 하향으로 스캔되는 이온들이 방출되었다. RF 소스는 120 mVpp의 진폭을 갖는 540 kHz의 주파수로 설정된 FAWG, Agilent 33220이었다. RF에 대한 RF 주입 지점은, 필라멘트로부터의 전자 전류를 갖는 함수 발생기의 출력의 로딩을 피하기 위해서, (도 11에 도시된 바와 같이) 입구 플레이트로부터 입구 캡으로 스위칭되었다. 이전의 주파수 스캔 결과들(표 1)에 기반하여, Ar 이온들은 540 kHz의 여기 주파수에 대한 약 -600 VDC의 포텐셜에서 방출될 것으로 기대되었다. 도 13은 (도 11에 도시된) 전자 증배기 이온 검출기(17)에 의해 검출된 바와 같은 물 및 아르곤 피크들을 포함하는 HV 스캔 스펙트럼을 보여준다. 아르곤은 표 1에서 예측되는 바와 같이 -600 VDC에서 방출되었다. 주파수와 HV 스캔들이 이 트랩에서 질량 스펙트럼들을 발생시키기 위해 사용될 수 있다는 것이 도 12 및 13 으로부터 명백하다. 도 13은 HV가 증가하는 진폭 - 즉, 자동공진 스캔의 방향으로 스캐닝된 HV 스위프의 예이다. 아르곤은 전압이 증가하는 진폭의 방향으로 스캔되는 감소하는 진폭의 방향으로 스캔되는 -600 VDC에서 방출되었으며, 즉 HV 스캔들이 자동공진 또는 역방향 스캔 방출에 대해 사용될 수 있다.

[0073]

다른 실시예에서, 도 11의 ART MS 이온 트랩은 도 14에 도시된 바와 같이 변형되었다. RF는 트랩에 물리적으로 연결된 채로 446 kHz의 주파수에서 공진하는 약하게 구동되는 진동기(WDO)를 통해서 출구 캡(7) 내로 결합된다. WDO는 별별로 연결된 298 microH 인덕터와 270 pF 커패시터(세라믹)으로 구성된 LC 탱크 회로로서 설계되었다. 탱크와 직렬로 연결되는 500 KOhm 저항기는 WDO가 RF를 그의 저장된 에너지로부터 트랩으로 전달하도록 함수 발생기가 LC 탱크로 전달할 수 있는 파워의 양을 제한하였다. LC 탱크 자체는 품질 인자를 가졌으며 공진 시에 Q ≈ 100이었고, 함수 발생기의 출력이 300 mVpp로 설정되는 동안에 트랩에 27 mVrms의 신호를 제공하였다. 탱크를 입구 캡 대신에 출구 캡에 연결함으로써, 전자 빔 전류에서의 변화들이 탱크의 위상 고정 출력에 기여하는 것을 방지하여, WDO 출력을 모니터링하면서 훨씬 더 명료한 신호들을 제공하였다. WDO의 출력은 SR844 로크-인 증폭기(Stanford Research Systems, Sunnyvale, CA)로써 모니터링되었다. 로크-인 증폭기의 Ch1(x) 및 Ch2(Y) 출력들은 WDO 신호의 진폭(R)과 위상(θ)을 표시하도록 구성되었으며, 디지털 오실로스코프의 별도의 입력들에 연결되었다. 공진 탱크는 트랩에 AC 신호를 전달하였고, 에너지가 RF 장으로부터 흡수될 때마다(즉, 탱크 손실) RF 진폭의 감지 가능한 강하를 제공하였다. 로크-인 증폭기는 기준 신호로서 함수 발생기의 출력을 이용하여 WDO 신호의 진폭을 모니터링하였다. 이 단순한 전기 회로에서, 트랩은 도 15에서 Ztrap로서 도시된 LC 탱크에 별별로 연결된 임피던스 부하로서 전기적으로 나타내어질 수 있었다. 이 위상 민감형 방식에서의 RF 신호를 측정하는 것은 자동공진 여기를 검출하기 위한 2개의 다른 방법을 제공하였다: 1) WDO 출력의 진폭의 강하들을 측정하여 트랩으로부터의 파워 흡수를 측정하는 방법, 2) RF 신호의 X 및 Y 성분들을 측정. 즉, RF 파워가 전극 구조 내에서 트랩핑된 이온들에 의해서 흡수됨에 따라, 전극 구조의 전기 임피던스(도 15에 도시된 Ztrap)에서의 변화를 측정하는 방법.

[0074]

도 16은 3.5E-7 Torr에서의 공기에 대한 RF 파워 흡수 스펙트럼을 보여 준다. 선형 HV 스위프들은 함수 발생기의 톱니 출력에 연결된 고 파워 HV 증폭기(Trek Inc., Model 623B-L-CE)로써 발생되었다. AC 여기 주파수는 446 kHz이고, 스캔 움은 30 Hz이고, HV는 -100 VDC로부터 -600 VDC로 스캔되었다. 상향 피크를 보여주는 트레이스는 이온 방출 신호, 즉 (도 11에 도시된) 전자 증배기(17)에 의해서 검출된 승산된 이온 전류에 상응한다. 예상된 대로, 2개의 방출 피크들이 존재하며, 하나는 질소(-270 VDC, 28 amu)에 대한 것이고 하나는 산소(-310

VDC, 32 amu)에 대한 것이다. 이 트랩 설계에 이용되는 전자 증배기(17)는 오직 이온들이 트랩으로부터 방출되는 정확한 전압을 결정하기 위해 포함되는 반면에, 파워 흡수는 트랩 내에서 특정 질량 대 전하 비율들의 존재를 검출하기 위해서 요구되는 모든 것이라고(즉, 전자 증배기는 이 검출 방법에 대해서 요구되지 않는다) 아래에서 설명될 것을 것을 주목하라. 하부 트레이스는 HV가 스캐닝될 때 WDO의 RF 출력의 진폭(R)에 상응한다. 예상된 바와 같이, RF 진폭은 자동공진이 (HV = -200 VDC에서) 시작하면 강하한다. 진폭은 이온들이 에너지를 얻고 더 높은 에너지의 이온들이 비조화 정전 이온 트랩들에서의 자동공진 여기의 특성인 "에너지 번청" 과정에서 이들에 합류함에 따라 계속하여 감소한다. 이온들이 트랩을 떠나기 시작하고 RF 흡수가 더 이상 발생하지 않자마자, RF 강도의 감소는 끝나게 된다. 질소 이온들의 방출이 (SIMION 모델 계산들과 일치하게) 약 -270 VDC에서 발생하며, 예상된 대로, 위상 고정된 이온들이 트랩을 떠나거나 출구 플레이트의 벽들에 의해서 흡수되자마자, RF 진폭은 완전한 세기로 되돌아 간다. N_2 및 O_2 이온들에 대해 예상되는 바와 같이, 2개의 이온 방출 피크들과 또한 2개의 RF 흡수 과도현상들이 존재한다. RF 흡수가 이온 방출 전압보다 훨씬 작은 HV 진폭에서 시작한다는 사실은 포텐셜의 비조화 상태의 확대이며, HV가 증가함에 따라 세기의 강하가 매우 점진적이라는 사실은 현재의 자동공진 여기 이론들과 일치하는 에너지 번청 과정이 있다는 것을 확인한다. RF 흡수가 이온 방출 피크가 나타날 때 갑자기 끝난다는 사실은 이온들이 트랩으로부터 효과적으로 방출되고/되거나 입구 및 출구 플레이트들의 벽들에 의해서 흡수된다는 것을 가리킨다. RF 파워 흡수는 ART MS 적용들에 대한 압력 범위를 효과적으로 증대시키는 10^{-4} Torr의 압력에서 이온들을 검출하기 위해서 적용되어 왔다. RF 파워 흡수는 전자 증배기에 의한 이온의 방출이 관찰되지 않도록 트랩의 조건들이 조정되더라도 여전히 검출 가능하다: 즉, RF 진폭 값들이 방출 한계치 아래로 조정되더라도, 또는 출구 플레이트의 전압이 이온들이 더 이상 트랩으로부터 빠져 나가지 않는 지점으로 상승하면, RF 파워 흡수가 관찰되었다. 파워 흡수 측정들이, 축 상 이온화가 이 검출 스킵과 완전히 양립 가능성성이 있도록, 트랩으로부터의 이온 누출에 의해서 영향을 받지 않는다. 충돌 유도 파편화를 위한 여기에 앞서 트랩에서 일정한 종들의 존재를 확인하기 위해서 RF 파워 흡수 검출의 사용을 구상하는 것이 가능하다.

[0075] 도 16에서의 RF 파워 흡수가 -200 VDC에서 검출 가능하게 되기 시작하므로, SIMION이 이들이 RF 장과 위상 고정될 때 검출 가능한 흡수 신호를 먼저 생성하는 이온들의 에너지를 계산하기 위해서 사용되었다. 계산된 바와 같이, SIMION을 이용하여, -200 VDC 트랩핑 포텐셜에 대하여, -18 V 등전위의 질소 이온들이 440 kHz의 고유 진동 주파수로써 진동하며, 이러한 검출 스킵에 대해서 검출 가능한 RF 흡수 수준들을 제공하기 위한 첫번째 것들이다(도 17을 참조). 70 eV 전자들을 이용하는 것은 \approx -20 VDC 등전위에서 시작하는 이온들에 대한 상당한(즉, 검출 가능한) RF 흡수 신호를 생성하는 것으로 보인다. 더 낮은 포텐셜 에너지들에서의 이온들은 더 낮은 농도로 (즉, 트랩 내에서 더 침투하는 전자들의 이온화의 더 낮은 효율로 인해) 존재하며, 자동공진 위상 고정이 발생할 때 RF 신호의 상당한 감소를 초래하지 않는다. 도 18은 트랩 내의 이온들과 전자들의 에너지들을 보여 준다. 전자들은 70 eV의 운동 에너지(KE)로 트랩 내로 들어가서 그들이 영(0)의 운동 에너지를 갖는 -70 VDC 등전위에서 돌아 나오게 된다. 전자들은 질소를 이온화하기 위해서 적어도 15 eV의 KE를 필요로 하므로, -55 VDC 등전위(즉, 이의 우측의)를 초과하는 상당한 이온 농도는 기대되지 않으며, 즉, 이온화 체적은 입구 플레이트 그리드에서 시작하여 -55 VDC 등전위에서 끝난다. 0 VDC 및 -55 VDC 등전위들 내에서, 전자들은 모두 질소에 대한 이온화 한계치 위에 있는 70 eV와 15 eV 사이의 운동 에너지들을 갖는다. 그러나, 전자 충격 이온화에 의해서 형성되는 전자 에너지 및 이온 밀도를 갖는 한계치들 위의 이온화 효율은 이온이 입구 플레이트 그리드로부터 트랩 내로 이동(즉, 도 18의 우측으로 이동)할 때 감소할 것으로 예측된다. 적어도 50 eV의 운동 에너지를 갖는 전자들이 이 트랩에서 이 실험적 셋업을 갖는 RF 진폭의 검출 가능한 강하를 제공할 위상 고정된 이온들의 임계농도를 얻기 위해 요구된다.

[0076] 도 19에 나타낸 바와 같이, RF 흡수 대역의 폭은 전자 에너지에 따라 변경된다. 트랩에 들어가는 전자들의 에너지가 감소함에 따라, 이온화 체적 또한 감소하며, RF 파워를 흡수할 수 있는 이온들의 에너지 범위가 감소되어, 도 19에 도시된 바와 같이, 전자 에너지가 70eV부터 50eV까지 감소함에 따라 진폭 강하의 경사를 더 가파르게 한다. 이 도면에서의 3개의 곡선들은 HV 범위들 내에서의 차이를 강조하기 위해 진폭을 정규화했다. 전자 에너지의 변화는 방출 전압에 영향이 없었으나, RF 흡수가 일어나는 전압의 범위에 상당한 영향을 준다. 전자 에너지가 증가하고 트랩 내부의 이온화 체적이 증가함에 따라, RF 흡수가 검출될 수 있는 HV들의 범위가 또한 증가한다. 도 19에 나타낸 바와 같이, RF 흡수의 시작은 약 70eV 전자들에 대해 -250VDC부터 50eV 전자들에 대해 -300VDC까지 변하는 것 같다. 가스 압력이 증가됨에 따라 RF 흡수가 관찰되는 HV들의 범위 내에서의 유사한 감소가 또한 발생되었다. 출구 플레이트의 전압을 이온이 전혀 벗어날 수 없는 지점까지의 증가시키는 것은 흡수 신호를 무효화하지 못했으며, 시작 한계치에 최소의 영향을 주었다. 그러나, 이는 일반적으로 이온들이 트랩을 벗어나게 하게 허용될 때 관찰된 급격한 방출 파도 전류의 경사도를 감소시켰다. 이온들이 트랩을 전혀 벗어나

지 않게 하는 경우, 방출 곡선의 경사도는 도 19에 나타낸 것만큼 가파르지 않다.

[0077]

HV 스캔들에서, 특정 질량 대 전하 비율의 이온들은 어떤 한계치 고 전압에서 RF 필드와 록-업(위상 고정)되며, 고 전압 진폭이 증가함에 따라, 추가적인 이온들(더 높은 에너지들에 있는)이 위상 고정 번치와 결합됨에 따라 이들 이온들은 에너지를 얻기 시작하게 된다. 이온들의 에너지가 상승함에 따라, 이온들의 위상 고정 번치는 그 집단이 증가되며, 이를 에너지 번칭이라 한다. 이온 집단의 증가는 이온화 에너지 전압보다 훨씬 낮은 HV 진폭에서 시작되는 RF 흡수의 느린 상승으로서 도 19에서 쉽게 확인된다. 이온 번치가 새로운 이온들을 얻고 번치는 에너지가 상승함에 따라 이온들이 증가하는 진동 진폭들과 함께 엔드 플레이트들 사이에서 앞뒤로 진동한다. 이러한 현상을 시각화하기 위한 간편한 방법은 두 개의 플레이트들 사이에서 전후로 진동하고 그의 벽들에 점점 더 근접하는 이온들의 그룹의 질량의 중심에 대해 고려하는 것이다. 자동공진 이온 번치의 질량 중심(CM)이 엔드 플레이트들 사이에서 전후로 진동함에 따라, 이러한 2극성의 진동이 엔드 플레이트들에 이미지 전류들을 유도할 것이라 예상된다. 2극성의 진동은 그 진폭이 증가하고, HV가 증가함에 따라 이온들이 벽들에 더 접근하기 때문에, 이미지 전류들이 HV가 스캐닝됨에 따라 증가할 것이라 또한 예상된다. 이러한 유도 이미지 전류의 증가는 추가적인 이온들이 자동공진 여기에 기인하는 에너지 번치화 과정을 통해 꾹눌림에 따라 CM 내에 축적되는 전하들이 또한 증가하게 된다는 사실에 의해 또한 악화된다. 주파수 의존 이미지 전류들이 ART MS 트랩들 내의 질량 스펙트럼 발생을 위해 상보적인 검출 스킴을 제공할 것이라 예상된다. 이미지 전류 꾹눌림은 엔드 플레이트 검출, 및 중앙 플레이트 검출을 포함하는 다양한 방법들로 그리고 트랩 체적 내부의 보조 유도 코일들 및 링들의 배치를 통해서도 달성을 할 수 있다. 과거에는 유도 꾹눌림이 질량 분석계에서의 이온 검출을 위해 이용되었으나, 종래 기술의 구현들은 일반적으로 이미지 전류 스파이크 검출을 위한 필요한 코히어런스를 제공하기 위해 동시 성 및 등에너지 이온들의 생성을 필요로 했다. ART MS 트랩들은 이온들이 트랩 내부 어디로든지 유도될 수 있고 동시성 및 등에너지 요건을 필요치 않는다는 이점들을 갖는다. RF 필드의 이온 번치들의 위상 고정은 감응 이미지 전류 검출을 구현하는 데에 필요한 코히어런트 CM 운동을 발생시켰다.

[0078]

WDO를 필요로 하지 않는 트랩 내에서의 RF 파워 흡수를 검출하기 위한 단순한 방법은 RF 소스 플레이트에 용량성으로 결합된 전극들에서의 "RF rms 진폭"의 주파수 의존 강하들을 검출하는 것이다. 트랩 내부의 RF 파워 흡수는 트랩 내부의 RF 필드 세기를 감소시키고, 결국 이웃한 전극 구조들에 용량성으로 결합된 RF의 진폭을 낮춘다. 순수한 전기적 관점에서, RF 진폭의 강하는 RF 소스 플레이트에 이웃한 전극 플레이트들과 결합되는 RF의 양에 영향을 주는 트랩의 임피던스에서의 변화로서 해석될 수 있다. 따라서, 도 20에 나타낸 이온 트랩의 실시 예를 이용하여, RF 필드 진폭 또는 트랩 임피던스의 미세한 변화는 HV를 스캐닝함으로서 엔드 플레이트들에서 검출될 수 있다. 이는 트랩의 임피던스 변화의 측정에 의존하는 측정의 매우 단순한 실행임을 주목하라. FAWG로부터의 RF는 WDO가 없이 입구 컵에 직접적으로 인가되었다. FAWG로부터의 RF 신호는 분리되어 이미지 전류들의 위상에 민감한 검출을 위한 로크-인의 REF 입력에 연결된다. 그 다음에 로크-인의 입력은 출구 컵 및 출구 플레이트 상의 유도 전류들을 위상에 민감하게 검출하기 위해 사용되었다. 결합된 RF 진폭이 RF 여기 신호에 위상 고정되므로, 로크-인 증폭기는 이러한 형태의 측정에 이상적인 검출기이다. 먼저, 입구 컵에 인가되는 RF 전압이 에너지가 위상 고정 이온들에 의해 FAWG로부터 흡수될 때 진폭의 강하가 관찰되지 않음을 확인하기 위해 조심스럽게 모니터링되며, FAWG가 파워 요건들로 유지되고 진폭의 감지할 수 있는 변화들이 입구 플레이트에서 관찰되지 않았다. 그 다음에, 로크-인 신호 입력이 출구 플레이트에 연결되었으며, RF 신호의 진폭의 상당한 변화가 이온들의 자동공진 여기에 상응하는 주파수로 스캔하는 동안 관찰되었다. 출구 플레이트에서 관찰되는 진폭 변화들은 트랩 내부의 RF 필드 세기의 감소(즉, 또는 임피던스 변화들)에 의해 야기된다. 신호는 검출 및 측정이 비교적 용이하고, RF 진폭 검출의 예를 나타내는 도 21에 나타낸 바와 같이, WDO와 함께 수집되는 흡수 신호들의 형상을 따른다. RF 주파수는 600kHz이고, 전압은 입구 컵에 연결된 100mV_{pp}였다. 출구 플레이트 상에서의 공칭 용량성 결합 RF 진폭은 RF 소스에 대해 +15도 위상 이동을 갖는 0.5mV였다(가스 부하의 부재시 측정). 신호 파도 현상은 3.5×10^{-7} Torr 수준의 공기에 기인하며, N₂ 및 O₂ 신호들이 분명하였다. 출구 플레이트에서의 RF 진폭의 강하는 용이하게 검출되며, 도 21에 나타낸 곡선의 형상은 예를 들면, 도 19와 같이, 상술한 파워 흡수 곡선들과 완전히 일치한다. 바꾸어 말하면, RF 진폭은 파워가 RF 필드로부터 흡수되는 비율과 연관되어 강하된다. 질소 및 산소 모두를 도 21에 나타낸 흡수 스펙트럼에서 명백히 볼 수 있으며, 이는 이온 방출 또는 전자 증배기가 없는 이온 검출을 증명한다. 다시 한 번, -500VDC의 가파른 에지는 질소 이온들이 트랩으로부터 방출되는 전압에 상응한다. 이온 방출 에지의 좌측으로의 RF 진폭의 더 느린 감소는 에너지 번칭 효과가 발생함에 따른 전하 밀도의 점진적인 증가에 상응한다. 도 21에 구현된 단순한 검출 스킴은 RF 진폭 측정들을 실행하기 위한 로크-인 증폭기의 이용에 의존한다; 그러나, 매우 저렴한 비용으로 현대의 RMS 감지 방법론들 및 칩들을 이용하여 동일한 측정들을 실행하는 것이 또한 가능하다.

[0079]

자동공진이 발생됨에 따른 트랩 내부에서의 RF 필드 세기의 감소는 또한 트랩이 방출 한계치에 매우 근접한 RF 진폭들과 함께 작동할 때 흥미로운 효과들에 이르게 한다. 예를 들면, 질량 피크들이 이 피크들에 상응하는 가스 분자들의 농도가 증가되고 트랩 내부에서 그들의 RF 파워 흡수가 RF 필드를 방출 한계치 아래로 가져감에 따라 스펙트럼으로부터 사라지는 것이 관찰되었다. 이의 가장 혼란 정후에서, 그러한 종의 가스 농도가 증가함에 따라 스펙트럼 내의 주요 피크가 스펙트럼으로부터 갑자기 사라지고, RF 진폭이 증가하여 RF 필드가 한계치 이상으로 되자마자 피크가 다시 나타난다.

[0080]

상술한 바와 같이, ART MS 트랩들은 가스 혼합물 내에 존재하는 분자들의 질량들을 빠르고 단순하게 식별한다. 가스가 전자에 의해 이온화되는 한, 상응하는 이온들은 그들의 질량 대 전하 비율의 엄밀한 차수로 검출될 것이다. 만일 분해능이 그들의 질량에서 또는 유사한 중량의 분자들의 부재 시에 충분히 높다면, 그들의 존재는 질량 스펙트럼에서 고립된 피크들에 의해 쉽게 식별될 것이다. 사실, ART MS 장치들은 도 22에 나타낸 바와 같이 방출 주파수 및 질량 사이의 업격하고 결정론적인 관계로 인해 단지 단일의 가스 교정만을 필요로 하기 때문에 사중극자 질량 광학계보다 질량 축 교정이라는 면에서 우수하다. ART MS 장치들은 또한 우수한 비율계량 장치들이다. 가스 혼합물 내에 존재하는 상이한 종들의 상대적인 양들 즉, 상대적인 농도들은 일반적으로 스펙트럼 내에서의 피크 진폭들의 비율에 의해 적절하게 나타내진다. ART MS 장치들은 또한 낮은 질량들에서의 작은 사중극자 질량 분석계들의 동작에 영향을 주는 영 블라스트(zero-blast) 효과가 일어나지 않으며, ART MS 센서들을 동위원소 비율 질량 분석계들을 위한 우수한 후보들로 만든다. RF/DC 필드들이 너무 낮아서 모든 이온들의 검출기로의 도달을 막을 수는 없지만, 영 블라스트 신호는 낮은 질량들에서의 사중극자 질량 분석계의 이온 검출기를 범람하고 휩싸는 질량 독립 신호에 상응한다.

[0081]

그러나, ART MS 트랩들은 계산하기에 어렵고, 진동하는 이온 빔 내에 저장될 수 있는 임의의 m/q 의 이온들의 수에 상한을 설정하는 이온 트랩 상의 공간 전하 한계들로 인해 혼합물 내의 이 성분들의 절대 분압들에 상응하는 이온 피크 신호 진폭들을 제공하지 않는다. 도 23은 이온 트랩들 내에서 일어나는 전하 밀도 포화 효과들의 예를 나타낸 도면이다. 전방의 트레이스는 $3.5E-7$ Torr 압력의 공기의 스펙트럼에 상응한다. 후방의 트레이스는 가스 혼합물에 추가된 추가적인 $4E-7$ Torr의 아르곤과 함께 동일한 공기 샘플에 대해 얻은 스펙트럼에 상응한다. 두 가스들은 적절한 비율들로 검출되지만, 트랩에의 아르곤 이온들의 추가는 동일한 총 수준으로 이온 밀도를 유지하기 위해 트랩평원 범으로부터 질소 및 산소 이온들을 변위시킨다. 이러한 전하 포화 효과의 결과로, ART MS 장치들의 정량적 작동은 질량 스펙트럼들에 의해 제공되는 비율계량 정보를 정규화하고, 절대 분압 측정치들을 제공하기 위해 시스템 내의 절대 전압에 대한 지식을 필요로 한다. 예를 들면, 이온화 게이지와 같은 보조 압력 게이지를 가지고 전공 시스템 내의 전압력을 독립적으로 측정할 뿐만 아니라, AMT MS 트랩들을 가지고 절대 전압력 측정치들을 획득하는 적어도 두 개의 가능한 방법들이 있다.

[0082]

첫 번째 접근 방법은 정전 이온 트랩 구조의 안 또는 바깥에 위치하는 적절히 바이어스된 이온 콜렉터 표면들에 의해 수집된 이온 전류들을 측정하는 것이다. 콜렉터 전극들의 위치 및 바이어스에 의존하여, 전압력 측정들은 분압 측정치들과 병행하여 발생하거나 전압력 측정치들을 수집하기 위해 분압 측정치들의 일시적 중단을 필요로 할 수 있다. 도 24를 참조하면, 외부 이온 콜렉터 표면(76)은 전자 방출 필라멘트(16)를 둘러쌀 수 있으며, 트랩 안으로의 그들의 경로 상의 전자들에 의해 형성되는 이온들(89)은 절대 전압력에 비례하는 이온 전류(90)를 제공하기 위해 둘러싸는 보호재 또는 튜브로 형성된 이온 콜렉터(76)에 의해 수집된다. 또는, 이온 콜렉터(76)는 도 25에 나타낸 바와 같이, 링 또는 튜브 전극일 수 있다. 외부 이온 콜렉터 표면(76)은 또한 도 26에 나타낸 바와 같이 전자 빔을 위한 입구 플레이트(1)의 출구 슬릿에 위치될 수 있으며, 전자 콜렉터(72)는 전자 방출 전류 측정을 위해 사용된다. 다른 실시예에서, 도 27에 나타낸 바와 같이, 이온 콜렉터 표면(76)은 입구 컵 전극(6)의 안에 위치될 수 있다. 이 작동 모드에서, 입구 컵(6) 및 전환 플레이트(3)는 동일한 전압, 바람직하게는 +180VDC로 순간적으로 바이어스되며, 이온 콜렉터 전극들은 바람직하게는 접지(OVDC)되어, 이온들이 콜렉터 표면들(76)에 의해 효과적으로 포획되게 한다. 또 다른 실시예에서, 도 28에 나타낸 바와 같이, Bayard-Alpert 이온화 게이지는 텐덤식으로 트랩에 연결될 수 있다. 이 실시예에서, 전압력 측정은 트랩의 외부에서 이루어지며, 이온들의 일부가 분압 분석을 위해 트랩 체적 내로 전달될 때 오직 순간적으로 차단된다. 전압력 측정 중, 이온화 그리드(92)의 바이어스 전압은 입구 컵(6)과 동일한 +180VDC이다. 하나 또는 둘의 접지된 콜렉터들(76)은 시스템 내의 가스의 전압력에 비례한 이온 전류를 제공하는 전자 충격 이온화에 의해 그리드 안에 형성되는 이온들을 꾹꾹 한다. 양극 그리드 이온들의 일부를 트랩 체적 내로 주입하기 위해, 입구 컵 상의 전압은 몇몇 그리드 이온들을 트랩으로 끌어 당기기 위해 약 +180VDC부터 약 +170VDC로 순간적으로 감소되며, 그 다음에 주입된 이온들을 트랩핑하고 이온 검출기(17)를 이용하여 분압 분석을 실행하기 위해 +180VDC로 상승되어, 폴스 모드로 ART MS 트랩을 작동시킨다. 전자 방출 소스(16)는 일반적인 Bayard-Alpert 이온화 게이지에서와 같이 전극

구조의 축으로부터 벗어나 위치한다. 이 접근 방법의 이점은 전압력 측정이 분압(질량) 분석과 조합될 수 있으며, 진공 시스템에서 정량적 및 정성적 분압 구성 분석을 전달할 수 있는 고 품질 전압력 게이지를 제공한다는 것이다. 도 28에 도시된 것과 같은, 텐덤 구성은 ART MS 기술을 위해 가능한 조합 게이지 센서 구성들의 우수한 예이다. 이러한 형태의 구성은 또한 트랩 이온들이 트랩 체적의 외부에 형성되고 정전 게이팅 펄스들을 사용하여 트랩으로 주입되는 기기화 셋업의 좋은 예이다. 예를 들면, 유사한 셋업이 이온 이동도 분광계(IMS)를 벗어나는 이온들을 ART MS 트랩으로 전달하기 위해 고려될 수 있다.

[0083] 도 1에 도시된 바와 같은, 바람직한 실시예에서, 이온 콜렉터 표면(76)은 플레이트일 수 있으며, 입구 플레이트(1) 및 입구 컵(6) 사이의 트랩 체적 내에 위치될 수 있으며, 전극 구조와 정렬된 축방향으로 위치한 구멍을 포함한다. 전압력 측정 중, 이온 콜렉터 표면(76)은 필라멘트로부터 전자들을 밀어내면서 입구 플레이트(1)와 입구 컵(6) 사이에 형성되는 모든 이온을 끌어들이고 수집하기 위해 필라멘트(16)의 바이어스보다 더 음인 전압으로 바이어스된다.

[0084] 전압력을 측정하기 위한 두 번째 접근 방법은 출구 플레이트를 충분히 불균등하게 바이어스하여, 그에 따라 실질적으로 모든 이온들이 트랩을 벗어나고 전압력 측정치를 형성하기 위한 이온 검출기에 의해 수집되게 하는 것이다. 이온 콜렉터는 도 1에 도시된 바람직한 실시예에 나타낸 바와 같이, 패러데이 컵 콜렉터 또는 전자 증배기로서 작동되는 단순한 전극일 수 있다. 약 -15VDC의 전압이 도 1에 나타낸 출구 플레이트(2)에 인가되면, 도 2b에 보다 상세히 나타낸 바와 같이, 도 2a에 나타낸 비조화 포텐셜은 충분히 비대칭이며, 그에 따라 m/q 비율들의 실질적으로 모든 이온들은 트랩을 함께 벗어나고 도 1에 나타낸 이온 검출기(17)에 수집된다. 실질적인 적용들에서, 트랩 안에 형성되는 모든 이온들을 순간적으로 방출하고 분압 작동의 최소 차단과 함께 빠른 전압력 측정치를 제공하도록 출구 플레이트 상의 전압을 빠르게 스위칭하는 것이 가능하다. 마이크로초 시간 규모에서의 전압력 측정치들이 이 작동 모드 하에서 가능하다. 이러한 빠른 전압력 측정치들은 고속 전위계 측정치들(즉, 더 큰 전위계 대역)에 필요한 더 높은 전류 수준들을 제공하는 전자 증배 검출기의 사용으로부터 이익을 얻는다. 이온들을 방출시키기 위해 출구 플레이트 전압의 값을 낮추기 전에 먼저 출구 플레이트 전압을 순간적으로 상승시키는 것이 일반적으로 편리하다는 것이 관찰되었다. 출구 플레이트 상의 전압을 상승시키는 것은 이온 구름을 더 트랩 안으로 강제하며, 일반적으로 출구 플레이트 전압이 스위칭 다운될 때 트랩을 벗어나는 큰 과도 이온 전류 스파이크를 회피한다. 큰 전류 스파이크들은 전자 증배 검출기를 휩쓸 수 있으며, 출구 플레이트 전압이 스위칭 다운된 후에 전위계가 정상 상태 이온 전류 측정치들에 머무르도록 여분의 시간을 가지게 할 수 있다.

[0085] 또 다른 접근 방법에 있어서, 절대 분압 측정치들을 제공하기 위해 ART MS의 비율계량 분압 측정들을 스케일하기 위해 그들의 독립 측정치들을 사용하여, 진공 시스템 내에 동시에 존재하는 보조 게이지들로부터 유용한 전압력 측정치들을 얻는 것이 또한 가능하다. 일반적인 구현은 ART MS 전자 제어 유닛(ECU) 내에 아날로그 입력 포트들을 설치하고, 신뢰할 수 있고, 정확한 실시간 압력 측정치들을 ECU의 마이크로프로세서 및 그의 제어 소프트웨어에 제공하기 위해 보조 게이지들로부터의 아날로그 및 디지털 출력 신호들을 사용하는 것이다. 디지털 및 아날로그 출력 포트들은 보조 게이지 제어기의 디지털 및 아날로그 출력 포트들로부터 압력 측정치들을 획득하도록 ECU에 추가될 수 있다. 유연한 I/O 인터페이스는 ART MS 트랩들의 압력 범위와 양립 가능성이 있고 현재 이용 가능한 넓은 범위의 상업적 게이지 기술들과의 인터페이스에 요구되는 주요 특징이다. 외압 측정치들은 또한 트랩 작동을 활성화시키기 위한 과정에서 적절한 시간을 결정할 뿐만 아니라, 이온 트랩들의 필라멘트 및 전자 증배기의 보호에 사용될 수 있다. 트랩으로부터 전달된 비율계량 분압 정보가 그의 가스 종 의존 압력 측정치들을 조절 및 보정하기 위해 전압력 게이지 제어기에 의해 사용되는 외부 전압력 게이지들과 이온 트랩들 사이의 상조적 상호작용을 구상하는 것이 또한 가능하다.

[0086] ART MS 기술을 기초로 하고 전압력 측정 설비(내부 또는 외부)를 포함하는 분압 분석기는 전압력 측정치들, 비율계량 분압 집중도들을 전달할 수 있으며, ECU 내에 설치된 적절한 계산 능력들은 또한 절대 분압 측정치들을 전달할 수 있다. 비율계량 분압 및 절대 전압력 정보의 조합으로부터 절대 분압 측정치들을 도출하는 데에 요구되는 계산들 및 알고리즘들은 변하는 수준들의 복잡성 및 추정들을 포함할 수 있으나 본 기술 분야에서 잘 이해된다. 포함된 계산들의 복잡성 수준은 모든 이온성 파편들, 모든 분자 종들 및 모든 이온화, 추출 및 검출의 효율성들이 진공 환경에 존재하는 다수의 분자 종들에 대해 알려지고/지거나 고려되는지에 의존한다. 오염 분석, 누설 검출 및 진공 모니터링을 포함한 가장 일반적인 적용들을 위해, 질량 스펙트럼 내의 상이한 피크들의 존재도의 단순한 비율계량 표시는 충분할 것이다. 그러나, 공정 지향 적용들의 일부는 공정 화학 작용들을 엄격한 제어 하에 유지하기 위해 절대 분압 수준들의 실시간 계산을 필요로 할 수 있다.

[0087] ART MS 트랩들을 취급할 때 고려할 필요가 있는 제 1 인자는 정전 트랩 내에 제한된 전하 용량이 있다는 것 -

즉, ART MS 트랩 안에 저장될 수 있는 이온들의 수에 대한 제한이 있다는 것이다. 이미 그의 전하 포화 한계에 있는 트랩 내로 새로운 이온들을 도입하려는 시도는 (1) 새로운 이온들을 위한 자리를 만들기 위해 트랩으로부터 방출되는 과잉의 이온들, (2) 이온 전하의 화학 조성의 변화를 초래한다. 이는 새로운 가스 성분을 가스 혼합물에 추가하는 것이 트랩 안의 총 전하의 양의 증가를 초래하지 않고, 트랩 안에 저장된 종들에 대한 이온들의 상대적 농도의 이동을 초래한다는 것을 의미한다. 총 전하는 동일하게 유지되지만, 상이한 종들 사이의 전하의 비율은 가스 조성의 변화들을 반영하기 위해 변경된다. ART MS 트랩의 화학적 조성의 변화들은 매우 빠르며, 주위 가스 환경에서의 가스 조성의 변화들을 면밀히 추적한다. ART MS 트랩의 전하 용량 한계는 트랩의 (1) 물리적 특성 및 (2) 정전 특성의 복합 함수이다. 작동 중 순 전하 용량은 다음을 포함하는 다수의 인자들에 동적으로 의존한다: (1) 전자 방출 전류, (2) 전압력, (3) 스캔 율, (4) RF 진폭 등. ART MS 트랩에서 사용되는 정전 트랩에 대해, 최대 전하(즉, 전하 포화)는 1E-7 Torr의 압력에서 성취된다(즉, 100 μ A 초과의 방출 전류, ?40mV Rf Vpp, 및 일반적인 80msec 스캐닝 시간을 가정함).

[0088] 가스 분자들은 그들의 분압들에 비례하여 트랩 안에서 이온화되나, 총 전하에 대한 그들의 상대적 기여는 그들의 상대적 이온화 효율들에 의해 가중된다. 예를 들면, 두 종류의 가스들의 50/50 혼합물에 대해, 더 큰 이온화 효율을 갖는 가스는 트랩 내의 상대적으로 더 많은 전하에 - 즉, 두 종들 사이의 이온화 효율들의 비율에 비례하여 - 기여할 것이다. 도 33은 진공 챔버 내에 두 종류의 가스들이 존재하는 예를 나타낸 도면이다. 가스(A)는 분압(PP_A)으로 존재하고, 가스(B)는 분압(PP_B)으로 존재한다. 두 개의 분압들은 아래에서 볼 수 있는 바와 같이 이온화 계이지로부터 보고되는 전압력 측정치와는 다른 시스템 내의 실제 전압력에 함께 합산된다. 이 예에서, 가스(B)가 가스(A)보다 X_{AB} 배 더 큰 이온화 효율을 갖는 것으로 가정한다. 단순화를 위해, 각 가스는 파편화 없이 이온화된다고 가정한다(즉, 모체 분자로 인한 스펙트럼에서의 주요 피크만). 전하 한계에서, 두 가스들 사이의 전하 비율은:

$$Q_B/Q_A = (PP_B/PP_A) * X_{AB}$$

[0089] 또한 전하 한계에서 트랩 내의, 총 전하(Q_T)는 상수이고 다음과 같음을 주목하라:

$$Q_T = Q_A + Q_B$$

[0090] 유사한 방식으로, 동일한 가스 혼합물에 대해 이온 계이지로 측정한 이온 전류는 도 34에 도시된 바와 같이, 두 가스들의 상대적인 이온화 효율들에 의해 또한 가중된다.

[0091] 이온화 계이지에 의해 보고된 전압력은 다음과 같다:

$$P_T = PP_A + X_{AB} * PP_B$$

[0092] 이는 시스템 내의 실제 전압력($PP_B + PP_A$)이 아니라, 이온화 계이지에 의해 보고되고 두 가스의 이온화 효율들에 의해 가중된 전압력임을 주목하라.

[0093] 또한 두 가스들에 대해 동일하다고 가정되는 공통 민감성 인자(a)가 위의 계산에 사용된다는 것을 주목하라: X_{AB} 는 두 가스들의 이온화 효율에 대한 계이지의 민감성 인자의 의존성을 조절하는 보정 인자로서 작용한다. 이 온화 계이지의 양극 그리드 안에 형성된 이온들이 질량과 무관하게 동일한 효율로 일반적으로 수집되지만 그들의 이온화 효율들에 비례하는 상이한 비율들로 이온화되기 때문에, 이는 매우 합리적인 가정이다.

[0094] 스캔 중에 트랩으로부터 방출되는 질량 독립 전하는 각 가스 종들에 대해 트랩 내에 저장된 전하 양에 비례할 것으로 기대된다. 각 질량에 대해 방출되는 전하 양은 도 35에 나타낸 바와 같이 질량 독립 이온 전류를 적분함으로써 계산할 수 있다. 이 첫 번째 예에서, 가스들(A 및 B)은 단일의 피크(즉, 파편화가 없이)를 초래하고 두 피크들 사이에 스펙트럼 오버랩이 존재하지 않는 매우 단순한 사례를 가정했음을 주목하라. 그러나, 만일 전체 파편화 패턴 패키지가 각 종들에 대한 계산들에 고려된다면, 동일한 논거가 확장될 수 있다.

[0095] 종들(A 및 B)에 대한 트랩 내에 저장된 전하 양은 종들(A 및 B)에 대한 트랩으로부터 방출된 전하에 비례한다. 방출된 전하는 종들(A 및 B)에 상응하는 질량 피크들에 대한 이온 전류 대 시간을 적분하여 계산된다. 이 예에서, q_A 및 q_B 는 가스들(A 및 B)에 상응하는 스펙트럼에서의 질량 피크들의 부분으로서 방출된 전하들이다.

[0096] 이 예에서 가스들(A 및 B)에 대한 절대 분압들을 측정하기 위해, 사용자는 다음을 측정해야 한다:

- [0100] 1. 전압력: P_T
- [0101] 2. A 및 B에 대한 방출 전하: q_A 및 q_B
- [0102] 피크 전하의 계산은 다음을 필요로 한다: 피크 식별, 피크 통합 및 가스 할당.
- [0103] 그 다음에 분압의 실제 계산은 다음의 단순한 곱셈들을 필요로 하므로 매우 단순하다:
- [0104] $P_T * (q_A / (q_T)) = PP_A$
- [0105] $P_T * (q_B / (q_T)) = X_{AB} * PP_B$
- [0106] 이러한 매우 단순한 계산은 그의 가스 의존 성분들로의 이온화 케이지 전류의 분해를 제공한다. 성분들이 식별되고 (즉, 가스 퍼팅을 통해), 상대적인 이온화 효율 인자들이 적용되면, 이온화 케이지에 의해 제공되는 전압력 측정치들에 대한 이온화 효율의 영향을 제거하는 것이 가능하다. 바꾸어 말하면, A 및 B가 식별되고, 이온 전류에 대한 그들의 기여가 확인되면, 그들의 실제 분압들(PP_A 및 PP_B)이 계산되고 표시될 수 있다. 그 다음에, "보정된" 분압들은 합산되어 종에서 독립된 전압력 측정치를 제공할 수 있게 된다. 전압력 이온화 케이지와 ART MS 질량 분석계 센서의 조합은 실시간으로 절대 분압들을 계산하고 종에서 독립된 전압력을 보고하는 능력을 긍극적으로 초래하는 센서들의 매우 상조적인 조합을 제공한다.
- [0107] 가스(A)에 대한 수학적 유도식이 도 36에 보여지며, 이전에 설명한 바와 같이, 상대적인 이온화 효율들의 영향은 이온 전류가 상대적인 전하와 조합될 때 상쇄된다.
- [0108] 다수의 가스들을 가지는 더 복잡한 가스 혼합물에 대해, 계산들은 동일하게 유지된다. 각 종의 질량 피크들이 검출되며 혼합물에 존재하는 상이한 가스들과 관련된다. 각 가스로부터의 전하 기여는 질량 피크들의 디콘볼루션 및 이온 전류 적분으로부터 얻어진다. 모든 가스들로부터의 전하 기여가 결정되면, 각 성분의 분압은 이온화 케이지에 의해 보고된 전압력을 각 가스 종의 전하 기여(즉, %기여)로 곱하여 계산된다.
- [0109] 위의 계산에는 몇 가지의 함축적인 가정들이 있다:
- [0110] 1. 트랩은 그의 전하 제한의 근처에서 또는 그 이상에서 작동하는 것으로 가정된다. 이는 작은 크기의 ART MS 트랩들에서의 포화는 ART MS 센서 내의 $1E-7$ Torr의 낮은 압력들에서 명백하다는 사실을 특히 고려하는 큰 가정은 아니다. $1E-7$ Torr 이상에서 작동하는 ART MS 센서들로부터 방출되는 통합된 전하는 가스 조성과 관련이 없는 것으로 보인다. 전하 포화의 시작은 또한 트랩핑 포텐셜, 스캔 율 및 방출 전류와 같은 매개변수들을 변경시킴으로써 조절될 수 있다. 게다가, 위의 계산들은 전하 한계에서 작동하는 트랩에 엄밀히 의존하지 않으며, 사실은, 이는 또한 이러한 한계 아래에서 작동하리라 예상된다.
- [0111] 2. 전하 방출 효율은 조심스럽게 선택된 주파수 스캐닝 프로필들 아래에서 강력한 질량의 함수는 아니다. 이러한 가정은 집중된 실험들을 통해 엄밀히 증명되지는 않았으나, 우리의 절대 분압 계산들의 정확도에 의해 유효하게 된 것 같다. 이온 검출의 효율은 RF 진폭 및 선택된 스캔 프로필에 크게 의존한다. 이온 방출 효율에서의 강력한 질량 의존성이 선형 스위프들 및 대수의 스위프들에 대해 관찰되었다. 그러나, $1/f$ 주파수 스위프 프로필들로 작동되는 ART MS 트랩은 질량에 훨씬 더 적게 의존하는 방출 효율을 제공하는 것 같다. 질량 의존성이 방출 효율에서 관찰되었을 때까지도, 이는 용이하게 교정할 수 있는 질량 의존 조절 인자로서 계산들에 포함될 수 있을 것이다. 트랩으로부터 방출되는 각 가스 종들의 이온들의 수는 트랩 내에 저장된 그 종들의 이온들의 수와 비례한다 - 즉, 트랩으로부터 방출되는 이온들의 전하 비율이 트랩 안의 이온 전하들의 비율을 밀접하게 반영하는 것이 예상된다. 스캔이 진행됨에 따라, 저장된 이온들의 일부는 각 RF 스위프 후에 질량 선택적으로 방출된다. 연속적인 이온화가 사용된다면, 트랩은 새로운 이온들로 계속적으로 로딩되기 때문에, 질량 스캔의 휴지 기간 동안 트랩은 재충전된다. 이러한 가정이 실험을 통해 엄밀히 증명되지 않았을 때까지도, 절대 분압 측정 결과들의 정밀성은 이 가정을 지지한다.
- [0112] 3. 위에서 제시한 예는 모 이온들의 파편화가 전혀 발생되지 않고 피크 오버랩들이 전혀 관찰되지 않은 단순한 질량 스펙트럼을 기초로 했다. 실제로는, 파편화는 일반적으로 복합 분자들에 대해 존재한다. 그러한 경우에서, 각 종들에 상응하는 모든 파편들로부터의 기여를 합산함으로써 전하를 설명할 필요가 있다. 이는 스펙트럼 오버랩이 존재하지 않을 때 실행하는 것이 매우 용이하지만, 스펙트럼들의 스펙트럼 디콘볼루션이 요구될 때 더 복잡해진다. 가스 종들로부터의 총 전하 기여는 모 분자 이온의 기여와 그의 모든 파편들로부터의 전하 기여를 기초로 결정될 필요가 있다. 예를 들면, 질소는 28 및 14 amu의 질량들에서 이온 전하에 기여하며, 두 질량들은

트랩 내에 저장된 총 전하에 대한 질소 가스의 총 기여를 결정하기 위해 고려되어야 한다. 가스 혼합물 내의 성분의 절대 분압을 계산하기 위해, 그 성분이 이온 트랩에 저장된 전하에 기여한 총 전하를 설명할 필요가 있으며, 이는 그의 모든 파편들로부터의 기여를 고려할 필요가 있다.

[0113] 4. 증배기 이득의 질량 의존성은 또한 이 모델에서 고려될 필요가 있다. 그러나, 가장 단순한 계산들을 위해, 증폭에 대한 질량 의존성은 고려되지 않는다.

[0114] 5. 이온화 게이지의 수집 효율은 그들의 질량과 관계없이 모든 이온들에 대해 동일하다. 다른 가스들에 대한 이온화 게이지들의 민감성 인자들을 조절에 필요로 하는 보정 인자들은 상이한 가스들에 대한 이온화 효율들 사이의 비율들과 엄격히 관련된다.

[0115] 6. 트랩 내에 저장된 모든 종들은 각 스캔 중에 스위프된다. 바꾸어 말하면, q_T 가 Q_T 의 적절한 표현이 되도록, 트랩 내에 저장된 종들에 대한 전체 질량 범위의 스캔이 필요하다.

[0116] 각 가스 종들에 대해 트랩으로부터 방출되는 전하의 양은 트랩 내에 저장된 각 가스에 상응하는 전하의 양을 결정하기 위해 측정될 필요가 있다. 만일 가스 분자들이 파편화 없이 이온화된다면, 총 전하에 대한 그의 기여는 각 스캔에 대해 시간에 따라 단지 그의 질량 피크에 대한 전하를 적분하여 쉽게 계산될 수 있다. 이온들은 질량 선택적으로 방출되고, 방출된 이온 전류는 시간에 따라 수집되기 때문에, 이는 총 전하에 대한 각 피크의 기여를 계산하기 위해 피크 하의 전류 대 시간의 적분을 필요로 한다. 이는 또한 총 전하에 대한 각 피크의 기여를 결정하기 위해 스펙트럼 내에서 검출되는 각 피크에 대해 스캔 중 발생되는 이온 전류들을 적분할 필요가 있음을 의미한다. 더 큰 질량들이 더 넓은 피크들을 가지며 전하가 피크의 더 넓은 영역에 걸쳐 기여하므로, 피크들의 진폭들은 각 피크에 대한 상대적인 전하의 적절한 표현이 되지 않음을 주목하라. 전자 충격 중 모 이온들의 파편화는 또한 추가적인 복잡성을 야기한다. 만일 가스가 파편화와 함께 이온화되면, 모든 파편화 피크들에 대한 영역은 확인되고 적분될 필요가 있다. 스펙트럼 오버랩이 상이한 가스 종들 사이에 존재하는 경우에 있어서, 스펙트럼 디콘볼루션 기술들을 사용하여 각 가스의 기여를 중첩된 질량 피크들에 디콘볼루션하는 것이 또한 필요할 것이다.

[0117] 트랩 내의 총 전하에 대한 각 가스의 기여가 계산되면, 각 가스 성분으로부터의 절대 분압 기여는 전압력을 총 전하에 대한 각 가스 종들의 상대적인 기여에 곱함으로써 계산될 수 있다. 이온화 효율은 이온화 게이지 내의 이온 전류 및 이온 트랩 내에 저장된 전하에 대한 각 가스 종들의 기여에 가중치를 부여하기 때문에, 이온화 효율의 영향은 이 과정에서 상쇄된다. 이는 사중극자 질량 분석계들에 의해 공유되지 않는 ART MS 트랩들의 이점이다. 이온화 게이지 전류 측정치들 및 ART MS 전하 통합의 조합은 절대 분압 계산들에서 가스 종속성을 제거할 수 있게 한다.

[0118] 정확한 절대 분압 계산을 실행하기 위해, 다음의 단계들을 따라야 한다:

[0119] 1. 질량 스펙트럼이 수집되어 메모리에 저장된다. 이는 데이터에 대한 속도 및 동적인 범위 요건들에 의존하는 단일 스펙트럼 또는 평균 스펙트럼일 수 있다.

[0120] 2. 피크 발견 알고리즘이 스펙트럼 내의 모든 질량 피크들을 식별하기 위해 실행된다. 피크 식별은 문헌에 잘 기록된 다양한 종류의 피크 발견 알고리즘들 및 방법론들을 통해 실행될 수 있다. 피크들이 검출되고 태깅되는 정확한 방법은 본 방법론에서 중요하지 않다.

[0121] 3. 피크 오버랩들이 더 높은 질량들에 존재한다면, 피크 디콘볼루션 알고리즘이 넓은 피크들을 개개의 성분들로 분리하기 위해 적용되어야 한다. 예를 들면, 작은 트랩들이 약 130 amu의 크세논 가스에 대한 미해상 동위원소 엔벨로프들을 제공하는 것이 특이한 것은 아니다. 그 경우에, 피크 디콘볼루션 알고리즘이 장치의 알려진 분해 능을 기초로 하여 넓은 미해상 동위원소 엔벨로프 피크를 그의 개별 정수 질량 성분들로 분리하기 위해 사용될 수 있다. 피크 디콘볼루션 알고리즘은 질량 분석기 사용자들에 의해 잘 알려져 있으며 많은 상업적으로 이용 가능한 질량 분석 패키지의 일부이다.

[0122] 4. 도 35에 나타낸 바와 같이, 식별된 피크들 아래의 영역들은 총 전하에 대한 그들의 기여들을 결정하기 위해 시간에 대해 적분된다. 이온 전류의 적분은 특정 질량에서 트랩으로부터 방출된 전하의 측정을 제공하기 위해 시간이 흐름에 따라 실행되어야 한다.

[0123] 5. 그 다음에, 모든 식별된 피크들 및 총 전하에 대한 그들의 기여들은 스펙트럼 내의 피크들을 개별 가스들에 할당하고 복합 파편화 패턴들 및 스펙트럼 오버랩들과 같은 문제를 해결하는 가스 식별 엔진에 공급된다. 스펙트럼 식별은 진공 시스템들 내에서 일반적으로 발견되는 가스들에 대한 모 분자들 및 파편들의 질량들 및 존재

도들을 포함하는 정확한 가스 스펙트럼 라이브러리에 의존한다. 대부분의 상업적 라이브러리들은 또한 사용자에게 흥미로울 수 있는 더 많은 화가스들을 포함하도록 사용자 에디팅을 허용한다. 스펙트럼 라이브러리에 대한 질량 피크의 매칭은 질량 분석 산업에서 잘 알려진 다양한 수학적 통계학적 절차들을 통해 실행될 수 있다.

[0124] 6. 그 다음에, 식별된 가스들과 총 전하에 대한 그들의 개별적 상대적 기여들은 분압들을 계산하기 위해 사용된다.

[0125] 7. 백분율의 전하 기여가 식별된 각 가스 종들에 대해 결정되면, 이 백분율은 각 가스로부터 전압력에 대한 분압 기여를 산출하도록 위의 단순한 예에서 나타낸 바와 같이 전압력 데이터에 의해 곱해진다.

[0126] 8. 이온화 게이지로부터의 전압력 측정치들에 대한 각각의 가스로부터의 기여가 결정되면, 식별된 가스들과 관련된 이온화 효율 인자들은 분압 측정치들에 대한 가스 의존성을 제거하고 가스 종 비의존성 분압 측정치를 제공하기 위해 사용된다.

[0127] 명백히, 피크 식별, 피크 디콘볼루션, 스펙트럼 디콘볼루션 및 가스 식별을 실행하기 위한 많은 상이한 방법들이 있다. 그러나, 본 출원은 어떤 특정 절차에 집착하거나 이를 선호하지 않는다. 피크들의 식별, 높은 질량들에서의 피크 오버랩들의 분해, 총 전하에 대한 그들의 기여의 계산 및 가스들의 식별 및 총 전하에 대한 그들의 기여를 결정하는 과정은 실행의 상세한 사항들이 본 출원에 중요하지 않다는 점을 강조하기 위해 매우 총체적으로 설명된다.

[0128] 이러한 일반적인 방법론의 이점들 중 하나는 가스 교정값들(calibrants)을 이용할 수 없을 때까지도 정확한 절대 분압 측정치들을 제공할 수 있다는 것이다. 이는 사중극자 필터들의 예측 가능하지 않은 질량 의존 처리량이 가스 기준 실린더들의 도움 없이 분압들을 계산하는 것을 불가능하게 하는 사중극자 질량 분석계들과의 큰 차이점이다. 트랩 전하가 이온화 게이지의 이온 전류 출력과 조합될 때 질량 범위를 가로지는 그의 질량 방출 효율의 균일성 및 이온화 효율 영향의 상쇄로 인해 교정값을 활용할 수 없을 때까지도, ART MS 트랩은 정확한 분압 수들을 제공할 수 있다.

[0129] 피크 식별 알고리즘의 정확한 상세한 사항들은 본 출원에서는 중요하지 않다. 예들은 가우시안 피팅 및 웨이브렛 분석을 포함한다. 피크 발견 알고리즘의 복잡성 및 고도화는 알고리즘을 실행하는데 사용될 수 있는 하드웨어 및 새로운 스펙트럼이 이용될 수 있기 전에 분석을 완료하기 위해 이용될 수 있는 시간의 양에 의존할 것이다. 이 방법론의 주요 요건은 정확한 전하 기여 계산이 각각의 가스에 대해 실행될 수 있도록 대부분의 피크들이 적절히 식별되고 스펙트럼 오버랩들이 해결되는 것이다.

[0130] 전하를 계산하는데 요구되는 피크 적분 알고리즘들의 정확한 상세한 사항들은 이 출원에서 중요하지 않다. 이 간단한 구현에서, 한 피크의 영역은, 피크의 진폭에 시간에서의 반치전폭(FWHM)을 곱함으로써 계산된다. 더 진보된 계산들에서, 식별되고 완전히 분해된 피크들은 합수 형식들(즉, 가우시안들 혹은 로오렌찌안들과 같은) 및 수학적으로 계산된 영역들과 피팅된다. 가우시안 피팅은 공통 피크 하에 매몰된 복수의 피크들에 디콘볼루션을 적용시키는데 이용될 수 있다는 추가적인 이점을 제공한다. 스펙트럼 오버랩이 피크들의 FWHM이 증가됨에 따라 더 높은 질량들에서 증가하는 것이 예상된다. 예를 들면, 대부분의 작은 ART MS 트랩이 100 amu 아래에서 1 amu 떨어진 피크들을 완전히 분해하는데 어떤 문제를 갖지 않는 반면, 피크 오버랩들은 100 amu 위에서 심각하게 되며, 피크 디콘볼루션이 동위원소의 엔벨로프들을 분해하고 질량에 있어서 매우 가까운 종들 사이의 오버랩들을 분해하는데 요구된다. 피크 디콘볼루션 기법들은 스펙트럼들을 피팅하고 총 전하에 대한 각 동위원소 혹은 기체의 기여를 추정하는 경우에 적용될 수 있다. 일반적으로, 피크의 폭은 분해되어야 하는 스펙트럼의 오버랩이 있을 수 있다는 제1 지시를 제공한다.

[0131] 이 기본적인 방법론이 기체 혼합물들의 분석에 적용되었다. 일반적으로, 복합 기체 혼합물들의 분압 조성들의 매우 정확한 표시들이, 기체 교정 표준들이 없을 때에도 가능했다. 도 37은 2개의 독립적인 기체 소스들이 시스템 속으로 기체들을 누설되게 하는데 이용되었던 시스템의 예를 도시한다.

[0132] 도 37은 절대 분압 계산들의 측면에서 사중극자 기반의 잔여 기체 분석기들에 비교한 ART MS 트랩들의 이점들의 일부를 보여준다. 이는 또한 위에서 설명한 방법론의 정확도를 입증한다. 전압력 측정들은 ART MS 트랩 제어기에 연결된 390 이온화 게이지 모듈(Granville Philips, Longmont, CO)을 이용하여 실행된다. RGA 데이터는 동작의 패러데이 컵(FC) 모드에서 200 amu 범위 사중극자 잔여 기체 분석기(RGA) (Stanford Research Systems(SRS), Sunnyvale, CA)로 획득되었다. 그래프의 좌측으로부터 시작하여, 시스템은 5E-8 Torr의 베이스 압력에 이르기까지 펌핑되었고, 28 amu에서의 피크에 대한 분압은 SRS RGA(28 amu에서의 피크 강도) 및 ART MS 장치(28 amu 피크로부터의 총 전하에 대한 기여)로 계산되었다. 이 경우에서의 28 amu에서의 신호의 대부분이

CO에 기인할지라도, SRS RGA 및 ART MS 센서는 28 amu에서의 질량 피크에 대하여 책임이 있는 종들에 대한 매우 유사한 분압 결과들을 제공했다. 우측으로 이동하여, 시스템은 순수한 질소 기체 소스에 노출되었다. SRS RGA 및 ART MS 센서는 질소 기체에 의하여 분명히 지배되는 2.6E-7 Torr의 전압력 하에서 N₂에 대하여 유사한 분압 값들을 제공했다. 우측으로 더 이동하여, 시스템은 크립톤(Kr) 및 크세논(Xe)을 포함하는 기체의 제2 소스에 노출되었다. 혼합물에 2 기체들을 더 추가함이 챔버 내의 전압력을 약 3.2E-7 Torr로 증가시켰다. ART MS 센서는 예상대로 질소 수준들의 어떤 변화를 보여주지 않았으나, SRS RGA는 새로운 이온들이 이온화 장치로부터의 질소 이온들의 일부를 대체함에 따라 28 amu에서의 질소 신호에서의 작은 감소를 보여주었다. ART MS 장치에 의하여 보고된 크립톤 및 크세논 수준들은 진공 시스템 내의 실제 분압들에 매우 근접한 반면에, SRS RGA는 10의 배수(decade)로 그의 수준들을 완전히 적게 추산했다. 우측으로 더 이동하여, 질소 기체 소스는 차단되었다. 예상대로, 매우 작은 변화가 Kr 및 Xe의 수준들에서 관찰되었다. SRS RGA 및 ART MS 센서는 불활성 기체 수준들에서 작은 감소를 보여 주었고, SRS 사중극자 RGA는 10의 배수로 더 무거운 기체들을 계속하여 적게 보고했다.

[0133] 위의 결과들은 폭넓은 질량 범위에 걸쳐 분포된 종들에 대한 절대 분압 수준들을 적절하게 보고하는 ART MS 게이지의 능력을 입증한다. ART MS 센서 및 이온화 게이지로부터의 데이터의 조합은 이온화 게이지로부터 상이한 기체 성분들로부터의 기여들로 원래의 전압력 측정치들의 분해를 가능하게 한다. 이는 또한 사중극자 RGA들이 처리량이 질량이 증가하면서 감소함에 따라 사중극자 RGA들이 지속적으로 극적으로 무거운 기체들을 실제의 수량보다 적게 표시한다는 것을 입증한다. 이 특별한 경우에, 사용자가 SRS RGA를 이용하여 Kr 및 Xe에 대한 적절한 분압 값을 획득하는 유일한 방법은 기체 보정 요인들을 통해서 분압 측정치들을 조정하기 위한 교정 기체 기준들에 의지하는 것이다. 도 37은 LabVIEW 프로그래밍 환경에서 개발된 맞춤형 소프트웨어를 이용하여 획득되었고, 그 프로그래밍 환경에 만들어진 피크 발견, 함수 피팅 및 적분 함수들 중의 많은 것을 이용했다.

[0134] 이온 트랩은 제어 매개변수들을 저장하는 비휘발성 메모리가 구비될 수 있다. 비휘발성 메모리는 (1) ECU(예를 들면, 커넥터 플랜지의 공기 측에 부착된 메모리 칩)로부터 분리된 센서 헤드(즉, 전극 구조)와 연관될 수 있고, (2) 이는 ECU의 기반구조의 일부일 수 있고, 센서 헤드와 일체이거나 떨어져 있고, (3) 이는 또한 별도로 제공되는 탈착 가능한 플래시 카드 또는 칩일 수 있고, 또는 (4) 위의 모든 것들의 조합일 수 있다. ECU는 센서 헤드와 일체이거나 센서 헤드로부터 떨어져 있을 수 있고, 예를 들면 케이블에 의하여 또는 무선으로 센서 헤드에 작동 가능하게 연결될 수 있다. 제어 매개변수들은 구성 및 교정 매개변수들 및 민감도 인자들을 포함할 수 있다. 구성 매개변수들은 이온들이 구속되는 정전 포텐셜을 생성하는 전극 구조 상에 인가되는 정전 포텐셜들의 크기들, AC 여기 소스에 대한 진폭 및 주파수 설정들, 및 심지어 이온화 소스들을 위한 전자 방출 전류들을 포함한다. 교정 매개변수들은 이온 트랩 전자 장치의 전압 및 전류 입력들 및 출력들과 관련되고, 민감도 인자들은 이온들의 고유 진동 주파수로부터 이온 질량 대 전하 비율(m/q ratio)로의 변환 인자를 포함한다. 구성 매개변수들은 작동 중에 트랩을 적절히 구성하는데 사용된다. 예를 들면, (1) 트랩은 공장이 선택한 정전 포텐셜들에 따라 바이어스되어야 하고, (2) 전자 방출 전류들은 적절한 수준들에서 전달되어야 하며 유지되어야 하고, (3) RF 스캔 매개변수들은 사용자에 의하여 선택된 스캔 조건들에 근거하여 조절되어야 하고, (4) 적절한 함수 형식 및 스캔 시간은 선택된 질량 범위에 따라 RF 스위프에 대하여 선택되어야 한다. ART MS에 대한 구성 매개변수들은 질량 스펙트럼을 생성하는데 요구되는 바이어스 전압들 및 주파수들을 포함한다. 교정 매개변수들은 (1) 정확한 전압들이 디지털 아날로그 컨버터들에 의하여 출력되는 것을 보장하기 위하여, (2) 정확한 전압 측정치들이 모든 아날로그 디지털 컨버터들에 의하여 전달되는 것을 보장하기 위하여, (3) 정확한 전류 측정치들이 모든 내장된 전위계들을 통하여 발생되는 것을 보장하기 위하여, (4) 적절한 RF 스캔들(주파수, 진폭, 프로필 및 시간)이 질량 스펙트럼들의 발생 중에 직접 디지털 주파수 합성기에 의하여 전달되는 것을 보장하기 위하여, (5) 적절한 전자 방출 전류들이 측정 중에 설정되는 것을 보장하기 위하여 요구된다. 교정 매개변수들은 일반적으로 ECU의 전자 장치에 특유한 것으로 생각된다. 민감도 인자들은 제어기의 교정된 전압, 전류, 주파수 측정치들을 (1) 질량 대 전하 비율들, (2) 전압력들, 및 (3) 분압들로 변환하기 위하여 요구된다. 민감도 인자들은 센서에 특유하며, 구성 선택들뿐만 아니라 트랩 구조에 의하여 영향을 받는다.

[0135] 질량 스펙트럼 스캔의 셋업은 다음과 같은 구성 매개변수들의 설정을 요구한다.

[0136] 1. 전자 방출 전류, mA;

[0137] 2. 전자 에너지, eV;

[0138] 3. 입구 플레이트 바이어스, VDC(일반적으로 0 VDC);

[0139] 4. 압력 플레이트 바이어스, VDC. 전압력(일반적으로 -40 VDC) 또는 분압(일반적으로 입구 캡 바이어스와 동일

함) 측정치들이 실행되는지의 여부에 따른 2개의 값들;

[0140] 5. 입구 컵 바이어스, VDC(일반적으로 -90 VDC);

[0141] 6. 중앙 렌즈 HV, VDC(일반적으로 -850 VDC);

[0142] 7. 출구 컵 바이어스 - 일반적으로 입구 컵 바이어스와 동일함;

[0143] 8. 출구 플레이트 바이어스, VDC는 압력, RF 진폭 및 스캔 윈에 좌우됨;

[0144] 9. 전자 증배기 차폐 플레이트 바이어스, VDC(-136 VDC와 +136 VDC 사이, 검출기 구조 및 위치에 따름);

[0145] 10. 전자 증배기 입력 전압;

[0146] 11. 전자 증배기 출력 전압;

[0147] 12. 전위계 이득, A/V;

[0148] 13. RF 진폭 Vpp;

[0149] 14. RF 스캔 프로필: 선형, 로그(log), $1/f^n$; 및

[0150] 15. RF 스캔 시간.

[0151] 적용에 따라, 전체 트랩 내에 바이어스들을 부유시키는 것이 또한 편리할 수 있다. 예를 들면, 접지된 표면들로의 전자들의 손실을 방지하고 인접한 이온화 장치들과의 간섭을 최소화하기 위하여 전자 방출기들에 대하여 양의 바이어스들을 사용하는 것이 유용할 것이다. 이온 트랩에 이온들을 저장하는 것은 제1 및 제2 마주보는 미러 전극들 및 이들 사이의 중앙 렌즈를 포함하는 전극 구조에서 고유 진동 주파수들에 있는 이온들이 궤적들에 구속되는 비조화 정전 포텐셜을 생성하는 단계를 포함한다. ART MS 이온 트랩들 상의 피크 분해능은 적어도 2개의 주요 인자들인 트랩 설계 및 트랩 크기와 관련된다. 일반적으로, 분해능은 트랩 크기와 함께 증가한다. 도 1에서 보여진 실시예는 길이가 약 2인치이고 직경이 약 1인치인 트랩에서 약 100X(반지전폭에 의하여 나누어진 피크 높이로서 측정됨)의 일반적인 분해능에서 작동된다. 직경이 약 0.6인치이고 길이가 약 1인치인 유사하지만 더 작은 트랩이 약 60X의 분해능을 입증하였다. 길이가 약 3인치인 더 큰 트랩은 약 180X의 분해능을 입증하였다. 일반적으로, 더 작은 트랩들은 또한 더 빠른 스캔 윈들을 가능하게 했다. 위에서 설명된 자동공진의 원칙들은 위에서 언급된 이온 트랩들에도 적용된다.

[0152] 분해능은 또한 도 1에 도시된 입구 플레이트(1) 및 출구 플레이트(2)를 각각 포함하는 트랩 설계들에서 향상될 수 있다. 도 11에서 보여진 바와 같이 단지 입구 컵(6)과 출구 컵(7)만을 각각 포함하는 단순한 컵 설계들이 플레이트들(1, 2)을 포함하는 트랩들보다 더 낮은 분해능들을 일관되게 보여주었다. ART MS 트랩들에서의 분해능은 그들의 진동 운동의 진폭이 출구 그리드에 도달함에 따라 반경방향으로 퍼지는 한 그룹의 이온들에 의하여 샘플링되는 트랩핑 포텐셜 우물들의 균일성에 의하여 결정된다고 믿어진다. 입구/출구 플레이트들을 포함하는 트랩들에서, 플레이트들과 컵들 사이의 정전 등전위선들은 더 평평하고(즉, 포텐셜은 반경방향의 위치와는 관계 없음), 엔드 플레이트들에 가깝게 진동하는 모든 이온들은 그들의 최초의 반경방향의 위치와 관계 없이 그들의 축방향 진동 중에 유사한 포텐셜 우물들을 경험한다. 플레이트들을 갖지 않는 트랩들에서, 이온들은 컵들 내에 형성되며, 상이한 반경방향의 위치들에서 진동하는 이온들이 경험하는 포텐셜 우물들의 형상들의 큰 차이들이 관찰된다. 포텐셜 우물 형상들의 확산(spread)은 상이한 반경방향의 위치들로부터 유래되는 이온들에 대하여 상이한 고유 진동 주파수들을 초래하며, 단일 질량의 이온들에 대하여 방출 주파수들의 확산 및 물론 더 낮은 분해능 질량 스펙트럼들을 야기한다. SIMION 계산들은 ART MS 트랩들에서의 플레이트들 및 컵들의 치수들 및 기하학적인 형상들을 최적화하며 또한 효과적인 이온 트랩핑 및 적절한 스펙트럼 분해능에 이르게 하는 적절한 바이어싱 조건들을 한정하는데 성공적으로 사용되어 왔다. 도 1의 간단한 플레이트/컵 설계는 트랩 내의 등전위선들을 조작하고 트랩의 반경방향의 치수에 걸쳐 균일한 정전 포텐셜들을 제공하도록 이용할 수 있는 다수의 설계 선택들 중 오직 하나일 뿐이다. 단순히 도 1은 축을 벗어난 이온화 및 전압에 측정과의 양립 가능성뿐만 아니라 낮은 비용 제조의 이점들을 여전히 보존하면서 단일 컵 설계들에 비교하여 상당한 분해능 향상들을 제공하기 때문에, 도 1은 현재 바람직한 실시예로서 고려된다.

[0153] 고유 진동 주파수들에 있는 이온들을 궤적들에 구속시키기 위한 비조화 정전 포텐셜을 생성하는 것은 전극 구조의 바이어스 전압들 설정하는 것을 포함한다. 출구 컵은 또한 입구 컵에 관련하여 조절 가능한 음의 오프셋으로 설정될 수 있지만, 2개의 컵들인 입구 컵 및 출구 컵은 바람직하게는 모든 현재의 ART MS 트랩 실행들에서 동일

한 전압들로 바이어스된다.

[0154] 2개의 컵들(입구 컵 및 출구 컵)은 바람직하게는 고전압(HV) 커패시터들에 의하여 전환 플레이트에 AC 결합된다. 전환 플레이트로부터의 RF를 컵들에 결합시키는 커패시터들의 사용은 가장 높은 신호에 가장 적은 양의 RF Vpp 및 우조화들로부터의 가장 적은 양의 질량 피크 기여들을 제공하는 값들을 발견함으로써 실험을 통하여 최적화될 수 있다. 성능은 바람직한 실시예와 비교할 때 효율적이지 않았지만, 도 1에 도시된 트랩은 또한 전환 플레이트와 그의 인접한 컵들 사이의 결합시키는 커패시터들이 없이 작동되었다.

[0155] 컵들 상의 전압은 스펙트럼들에서 최대 신호 및 분해능을 보장하도록 조절된다. 컵들 상의 전압은 일반적으로 전환 플레이트 전압의 고정된 일부이다. 사실은, 전환 플레이트 전압이 새로운 값으로 변함에 따라, 전환 플레이트와 컵 전압들 사이의 고정된 비율을 유지하는 것이 일반적으로 바람직하다. 큰 전압 범위에 걸쳐서 HV 스캔들을 실행하면서, 전환 플레이트와 컵 전압들 사이의 일정한 비율을 보존하는 것이 분명히 요구된다. 바람직한 실시예에서, 컵 전압은 일반적으로 전환 바이어스 전압의 약 10분의 1이다(입구 플레이트가 접지되어 있다고 가정함). 컵들 상의 적절한 전압은 일반적으로 안정된 이온 궤적들 및 크고 안정된 신호를 보장하도록 조절된다. 일반적으로, 적절한 트랩 작동에 이르게 하는 좁은 범위의 전압들이 있다. 일반적으로, 최대 강도가 질량 스펙트럼에 있는 모든 신호들에 대하여 달성될 때까지 컵 포텐셜을 조절함으로써 이상적인 전압이 선택된다. 컵 전압은 강도 및 분해능 둘 다에 영향을 주며, 어떤 경우에는 신호는 분해능의 증가를 위하여 희생될 수 있다.

[0156] 입구 컵 전압은 또한 트랩 내의 전자들에 의하여 형성된 아크 궤적에 영향을 주며, 입구 컵 전압이 조절될 때 전자 에너지를 재조절하도록 요구될 수 있다. 일반적으로, 더 높은 분해능이 필요하지 않으면, 최대 신호를 제공하는 값 이외의 다른 값으로 컵 전압을 조절할 어떤 이유도 없다.

[0157] 바람직한 실시예는 전환 플레이트 상에 약 -850 VDC를 사용하며, 컵 전압은 일반적으로 최대 신호를 제공하도록 약 -90 VDC로 조절된다. 컵 전압은 분해능에 대한 강도에 관하여 상이한 결과들을 갖는 약 -80과 -100 VDC 사이의 어떤 값으로 조절될 수 있다. 컵 전압의 변화는 피크들의 진폭 및 분해능에 영향을 줄뿐만 아니라 피크들의 방출 주파수에도 영향을 준다. 컵 전압들의 변화는 비조화 포텐셜 곡선의 형상을 변화시키기 때문에, 컵 전압들의 변화는 또한 고유 진동 주파수에 영향을 준다고 예상된다. 그 결과로, 전환 바이어스 전압이 변하지 않더라도, ART MS 장치의 질량 축은 컵 전압이 변화될 때마다 재교정되어야 한다.

[0158] 정상 셋업 중에, 전환 바이어스 전압은 첫 번째로 선택된다. 바람직한 실시예에서, 바람직한 전환 플레이트 전압은 -850 VDC이었으며, 컵들은 -80 VDC와 -110 VDC의 사이에서 작동되었다. 가장 높은 분해능은 일반적으로 범위에서 끝의 값인 -100 VDC에서 획득된다. 트랩에서 사용된 실제 전압은 일반적으로 SIMION 모델들을 이용하여 정확하게 예측될 수 있지만, 이는 최적화의 결과이다. 피크 진폭 및 분해능은 최적화 중에 추적된 성능지수들이다. 일반적으로, 우리는 가능한 가장 뾰족한 피크들 및 가장 큰 진폭들을 찾는다. 질량 규격들에서 흔히 있는 일이지만, 피크들이 좁아짐에 따라 피크 강도가 감소하는 경향이 있으므로, 항상 2개의 성능지수들 간에 이루어지는 절충이 있다. 컵 전압이 조절되는 동안에, 방출 주파수들이 변할 것이기 때문에 교정이 조절되어야 할 것이다.

[0159] 전환 플레이트 바이어스는 정전 포텐셜 우물의 바닥에서의 전압을 설정한다. 이온들의 고유 진동 주파수들은 트랩핑 포텐셜 우물의 깊이에 의하여 설정된다. 전환 플레이트 바이어스 전압에서의 임의의 변화는 이온들의 고유 진동 주파수들에서의 변화를 초래한다. 사실상, 고정된 m/q 비율의 이온들에 대한 왕복 시간은 트랩핑 포텐셜의 제곱근과 관련된다. 트랩핑 포텐셜 우물이 얕아짐에 따라, 이온들에 대한 왕복이 길어지고 고유 진동 주파수가 작아지며, 즉 전환 플레이트 전압 크기가 감소함에 따라(더 음의 값이 됨에 따라) 스펙트럼에서의 피크들은 더 낮은 주파수들로 이동한다. 전환 플레이트 바이어스 전압은 일반적으로 트랩의 기하학적인 설계에 근거하여 선택되고 설정되며, 주파수 스캔들 중에 좀처럼 변화되지 않는다. -200 VDC와 -2000 VDC 사이의 전압들이 ART MS 트랩들을 성공적으로 작동시키는데 이용되었으며 그들 모두는 유용한 스펙트럼들을 제공하였다. 도 1에 도시된 바람직한 실시예에 대한 바람직한 전환 플레이트 바이어스 전압은 비싼 HV 절연 요소들, 케이블들 및 커넥터들을 필요로 하지 않고 적절한 성능을 제공하기 때문에, 바람직한 전환 플레이트 바이어스 전압은 -850 VDC이다. 일반적으로, 전환 플레이트 전압은 트랩에 진입하는 전자들이 트랩 안으로 너무 멀리 이동하지 않도록 선택된다 - 트랩이 입구/출구 컵들에 추가하여 입구/출구 플레이트들을 포함한다면 이는 특히 중요하다. 입구 플레이트가 설계에 존재한다면, 이온들은 입구 플레이트와 입구 컵 사이에 형성되어야 한다.

[0160] 트랩핑 포텐셜 우물의 깊이는 또한 이온들의 방출들에 요구되는 RF Vpp의 최소치에 영향을 준다. "한계치"인 RF Vpp 는 트랩으로부터 이온들을 방출시키는데 요구되는 최소 RF 피크 대 피크 진폭이다. 일반적으로, 포텐셜 우물이 더 깊어짐에 따라, 즉 트랩으로부터 이온들을 방출하기 위해서 이온들이 "더 강하게 충격을 받는" 것을 필

요로 함에 따라, RF Vpp 한계치의 진폭은 증가한다. 포텐셜 우물이 더 얕아짐에 따라, 이온들을 방출하는데 요구되는 RF Vpp의 진폭은 더 작아진다. 포텐셜 우물이 더 깊어지고 이온들의 진동의 주파수가 증가함에 따라, 이온들이 더 빨리 이동하므로 스캔 시간들은 또한 트랩 내에서 감소될 수 있다.

[0161] ART MS 이온 트랩의 작동은 여기 주파수(f)를 갖는 AC 여기 소스를 이용하여 바람직하게는 구속된 이온들을 이온들의 고유 진동 주파수의 약 2배인 주파수로 여기시키는 단계를 포함할 수 있으며, AC 여기 소스는 바람직하게는 중앙 렌즈에 연결된다. ART MS 이온 트랩들의 이점은 비조화 정전 트랩핑 포텐셜에 의하여 생성되는 자동 공진이 비교적 낮은 진폭의 RF 진폭들(RF Vpp)을 이용하여 구속된 이온들의 여기를 가능하게 한다는 것이다. AC 여기 소스를 전환 플레이트로 결합시키는 이점은 입구 또는 출구 플레이트들로의 RF 결합에 비교하여 더 높은 조화 성분들로부터의 스펙트럼들에 대한 기여를 최소화하는 더 대칭적인 RF 결합이다. 위에서 설명한 바와 같이, AC 여기 소스의 전환 플레이트로의 결합의 추가적인 놀라운 결과는 이온들이 그들의 진동의 고유 주파수의 2배인 주파수에서 트랩으로부터 방출된다는 것이다.

[0162] ART MS 트랩의 작동 중에 AC 여기를 한정하는 주요 매개변수들은:

[0163] 1. 주파수 범위: 원하는 질량 범위에 의하여 결정됨. 방출 주파수는 이온 질량의 제곱근과 염밀히 관련된다. 바람직한 실시예에서, 전환 전압이 -850 VDC일 때, 물에 해당하는 방출 주파수는 양 엔드 플레이트들 사이에서의 물 이온의 고유 진동 주파수의 2배인 약 570에서 600 KHz이다.

[0164] 2. 진폭-RF Vpp: RF Vpp의 진폭은 진폭이 이온들의 방출을 위한 한계치를 넘지만 우조화들을 갖는 방출에 대한 한계치 아래에 있는 것을 요구하는 절충으로 인해 중요하다. 일단 한계치에 도달하면, 질량 피크들의 진폭은 RF Vpp와 함께 증가한다. 그러나, 높은 RF Vpp 값들은 RF Vpp 한계치의 바로 위에서의 작동에 비교하여 우조화들로부터의 더 높은 기여들 및 감소된 분해능을 갖는 스펙트럼들을 초래한다.

[0165] 3. 스캔 시간: 이는 전자 장치가 상위 주파수(낮은 질량)로부터 하위 주파수(높은 질량)까지 스캔하는 데 소요되는 시간이다. 더 높은 스캔 율들은 일반적으로 더 큰 RF Vpp가 한계치 위에서 유지되는 것을 요구하며, 감소된 분해능을 표시한다.

[0166] 4. 스위프 함수 형식: 이는 주파수 스위프의 함수 형식이다. 일반적으로, 다음의 함수 형식들이 스캔들을 위하여 고려되었음: 선형, 로그, $1/f$, $1/f^2$ 및 더 일반적인 $1/f^n$ (n 은 1 이상임).

[0167] 5. RF 파형: 사인파 및 구형파 RF 여기가 이온 여기를 위하여 일상적으로 사용된다. 사인파들이 현실적인 이유로 바람직하지만, 구형파들이 매우 유용할 수 있으며 그 이유는 이런 설계는 전용의 직접 디지털 합성 소스를 필요로 하지 않고, 표준 마이크로프로세서 전자 장치 보드들, 또는 필드 프로그래머블 게이트 어레이들, 또는 주문형 집적 회로(ASIC)들의 일부에 이미 만들어진 펄스 폭 변조(PWM) 출력 모듈들의 사용을 가능하게 해서, 비용, 전력 소비, 복잡성 및 크기를 줄이기 때문이다.

[0168] 6. AC 결합 스킵: AC 여기는 예를 들면, 입구 컵 또는 플레이트, 전환 플레이트, 또는 출구 컵 또는 플레이트과 같은 트랩 내의 몇몇의 상이한 전극들에 인가될 수 있다. 전환 플레이트 결합은 바람직한 여기 방법이다.

진폭-RF Vpp

[0169] 바람직한 실시예에서의 AC 여기는 일반적으로 50 Ohm 저항기로 끝나는 평형/비균형 변성기(BALUN transformer)를 사용하여 전환 플레이트로 결합된다. BALUN 변성기들은 일반적으로 그들의 낮은 비용 및 큰 대역폭 때문에 케이블 텔레비전 스프리터들에 사용된다. RF의 중심 플레이트로의 결합은 바람직하며, 그 이유는 그것이 트랩을 통하여 RF를 분배하는데 요구되는 전기적인 스킵을 단순화하고, 또한 이온들의 고유 진동 주파수의 2배인 주파수에 있는 이온들을 방출한다는 것을 보여 주었기 때문이다. 또한, 바람직한 실시예에서, 중심 플레이트 여기가 우조화 여기에 기인하여 더 적은 스판리어스(spurious) 피크들을 생성한다는 것을 보여주었다.

[0170] AC 여기 진폭은 이온들이 방출되도록 자동공진 한계치 위에서 유지되어야 한다. 방출 한계치는 스캔 속도, 이온들의 초기 에너지, 포텐셜의 깊이, 트랩핑 포텐셜의 대칭 및 전압력에 좌우된다. RF의 진폭은 임의의 신호를 획득하기 위하여 한계치 위에서 설정되어야 한다. 일반적으로, 한계치에 근접한 작동은 가장 높은 질량 분해능을 제공한다. RF Vpp가 증가함에 따라, 최대치(plateau)가 달성을 때까지 신호의 진폭도 또한 증가한다. 그 시점에서, RF 강도의 증가로 인하여 임의의 중요한 강도 이득들 없이 피크들이 넓어진다(즉, 분해능의 손실). 또한, RF Vpp의 증가는 보통 더 높은 조화들에 의한 여기에 기인하는 스판리어스 피크들의 출현을 야기한다.

[0172] 바람직한 실시예에서의 -850 VDC의 트랩핑 포텐셜을 갖는 대표적인 트랩은 2 MHz와 100 KHz 사이에서 스캔되는

RF Vpp의 약 50 mV에서 작동한다. 더 높은 RF Vpp 값들이 더 빠른 스캔 율들 및 더 높은 압력들을 위하여 요구된다. RF Vpp 값들은 바람직한 실시예에서 250 mV를 결코 초과하지 않았다. RF Vpp는 다음 사항들에 적응하기 위하여 동적으로 조절되어야 한다:

[0173] 1. 더 높은 압력들,

[0174] 2. 스캔 율/스캔 속도의 변화들,

[0175] 3. 상이한 전환/컵 바이어스 전압들,

[0176] 4. 트랩핑 포텐셜 대칭의 변화들, 및

[0177] 5. 주파수 스캔의 함수 형식에 대한 조절들

[0178] RF Vpp 조절들은 분해능, 강도 및 우조화들로부터의 스펙트럼에 대한 상대적 기여 사이의 상호 작용을 제어하도록 설계된다. RF Vpp는 또한 스캔 중에, 예를 들면, 주파수를 감소시키면서 RF Vpp 진폭을 증가시킴으로써, 조절될 수 있다. 주파수 스캔들 중의 진폭의 동적인 조절은 ART MS 스펙트럼들을 사중극자 및 자기 섹터 질량 분석계들과 같은 다른 질량 분리 기구들로부터의 스펙트럼들에 더 양호하게 매칭시킬 수 있다.

[0179] 시스템에서의 압력이 증가함에 따라, 신호 진폭 및 분해능은 종종, RF Vpp 전압의 증가에 의하여 향상된다. 발상은 산란시키는 충돌들이 이온들이 효과적으로 추출되지 못하게 하기 전에 이온들이 트랩으로부터 방출되는 데 필요한 시간을 줄이는 것이다. RF 값들이 더 큰 상태에서 "이온들에 더 강하게 충격을 주는" 것은 이온들이 더 빨리 그리고 산란시키는 충돌들에 기인한 손실들 없이 트랩을 떠나게 한다.

[0180] 스캔 시간들이 더 짧아짐에 따라, AC 여기 주파수가 이온들의 고유 진동 주파수를 넘어서는 시간 동안에 충분한 이온들이 트랩으로부터 방출되는 것을 보장하기 위하여 RF Vpp 전압을 증가시키는 것이 종종 요구된다. 하나의 이온에 대한 방출 한계치는 주파수 스위프율과 직접 관련되며, 즉, 주파수 스위프율이 높아질수록, 방출을 위한 한계치가 높아지고, 도 29에서 보여준 바와 같이 인가되어야 하는 RF Vpp가 높아진다. 도 29에서 보여진 실험적인 결과들은 자동공진 이론의 예측들과 일치한다.

[0181] 트랩핑 포텐셜의 깊이가 증가함에 따라, 이온들이 더 깊은 우물로부터 올라가야 하기 때문에, RF 여기의 진폭도 역시 증가되어야 한다. 환연하면, 이온들이 트랩으로부터 빠져 나오기 위하여 더 많은 에너지를 획득해야 하므로, 방출 한계치는 증가한다.

[0182] AC 여기 진폭은 또한 출구 플레이트 전압 설정에 근거하여 조절된다. 출구 플레이트에 대한 전압이 더 음으로 될수록, 이온들의 방출 한계치들이 감소하므로, 더 낮은 AC 여기 진폭들을 갖는 이온들을 방출하는 것이 더 용이해진다. 그러나, 출구 플레이트 전압이 떨어짐에 따라, 우조화들에 기인한 질량 피크들의 더 높은 존재를 보는 것도 또한 흔하다. 중요한 피크들의 피크 강도들을 동일한 수준들로 유지시키기 위하여 RF Vpp를 증가시키면서 동시에 출구 플레이트 상의 전압을 증가시킴으로써(출구 플레이트를 덜 음으로 설정함으로써) 우조화들의 발생 정도를 감소시켜서 하나의 스펙트럼의 모습을 향상시키는 것이 보통이다.

[0183] 축에서 벗어난 전자 이온화가 사용될 때, RF Vpp와 출구 플레이트의 전압 사이에는 엄격한 관계가 있다. 그 이유는 간단하며, 축에서 벗어난 이온화가 사용될 때, 이온들은 포텐셜 우물 깊은 곳에서 형성되기 때문이다. 그 결과로, 축에서 벗어난 전자 이온화가 사용될 때보다 더 높은 RF Vpp 한계치들이 트랩으로부터 이온들을 방출시키기 위하여 요구된다. 출구 플레이트 상의 전압이 떨어짐에 따라(더 음의 값으로 됨), 트랩으로부터 이온들을 방출하기 위하여 요구되는 여기의 양은 감소하고, 이온들을 방출시키기 위하여 요구되는 RF Vpp의 양도 역시 동일한 스캔 시간 동안 감소된다. ART MS 스캔은 관련되는 질량 범위 및 요구되는 스캔 시간들에 따라서 상이한 주파수 스위프 프로필들을 사용할 수 있다. 일반적으로, 스캔 프로필이 변함에 따라, 상이한 전압들이 하나의 트랩으로부터의 방출을 최적화하기 위하여 요구된다. 상이한 스캔 유통들을 위한 RF Vpp는 우조화들의 허용할 수 있는 수준들과 양립될 수 있는 최대 이온 방출을 보장하기 위하여 조절되어야 한다.

[0184] RF Vpp의 진폭은 또한 사인파 또는 구형파 AC 여기가 선택되는지의 여부에 좌우될 것이다. 일반적으로, 구형파들이 AC 여기들을 위하여 선택된다면, 더 낮은 RF Vpp 값들이 요구된다. 사인파로부터 구형파로의 스위칭은 종종 우조화들의 존재를 감소시키고 분해능을 한계치 값들에 근접하게 유지시키기 위하여 RF Vpp를 감소시킬 필요성을 초래한다.

[0185] 인가된 여기 주파수의 배수들에 해당하는 주파수에 있는 이온들의 방출에 상응하는 피크는 우조화 피크들이라고 불리며, 일반적으로 낮은 질량들에서 나타날 수 있다. 예를 들어, 어떠한 트랩 조건들 하에서는, $(\text{H}_2\text{O})^+$ 이온들에

상응하는) 18 amu에서의 큰 피크가 또한 존재할 때, 스펙트럼에서 4.5 amu에서 피크가 나타난다. 4.5 amu에서의 피크는 주요 18 amu 여기 주파수(즉, 600 kHz)의 제2 조화(즉, 1.2 MHz 우조화)에서의 여기에 상응한다. 일반적인 규칙으로서, 이온들의 우조화 방출은, RF 여기가 전환 플레이트에 적용되는 경우, 고유 진동 주파수 또는 고유 진동 주파수의 2배에서의 방출보다 더 높은 RF V_{pp} 한계치들을 요구한다. 바람직한 실시예에서 우조화들의 모습과 완화에 이르게 하는 인자들은 다음과 같다.

[0186] 1. RF V_{pp} : 이온들이 그들의 고유 진동 주파수의 배수들에 의해서 방출되는 것을 허용하는 어떠한 한계치 위로 RF V_{pp} 가 증가될 때, 우조화 피크들이 나타난다. 일반적으로, 우조화 피크들은 가장 높은 한계치들을 가지므로 RF V_{pp} 가 감소함에 따라 스펙트럼으로부터 제일 먼저 사라진다. 환연하면, 우조화들의 방출에 대한 한계치가 고유 진동 주파수(또는 전환 플레이트 펌핑을 위한 고유 진동 주파수의 2배)에서의 방출에 대한 한계치보다 크므로, 우조화 피크들은 RF V_{pp} 가 감소됨에 따라 제일 먼저 스펙트럼으로부터 사라진다.

[0187] 2. 출구 플레이트 전압: 우조화들의 존재는 출구 플레이트 상의 전압에 의해서 영향을 받는다. 출구 플레이트 상의 전압이 강하함에 따라(즉, 양의 이온들에 대해 더 음의 값이 됨에 따라), 우조화 피크들의 상대적인 존재도가 증가된다. 매우 종종, 출구 플레이트 상의 전압을 증가시켜 스펙트럼으로부터 우조화들이 사라지게 할 수 있다. 출구 플레이트 전압을 낮추는 것(출구 플레이트 바이어스를 더 음의 값으로 설정하는 것)은 우조화들의 방출에 대한 한계치를 낮춘다.

[0188] 3. 스캔 프로필: 주파수 스캔 함수의 형상은 스펙트럼의 품질에 영향을 준다. 선형 스캔들은 낮은 질량들에서의 그들의 상대적으로 느린 스캔 율로 인해 우조화 피크들의 존재에 특히 민감하다. 일반적으로, 1/f 스캔 프로필들은 낮은 질량과 높은 질량 방출 효율들사이의 최상의 균형을 제공하면서, 동시에 우조화들의 낮은 입사를 제공하기 위해서 본 바람직한 실시예에서 사용되어 왔다. 대부분의 우조화들은 낮은 질량에서 나타나고, 낮은 질량들이 더 무거운 질량들보다 더 빠른 스캔 유통으로 방출될 수 있으므로, 낮은 질량들에서 상대적으로 더 빠르게 스캔하는 것은 우조화 방출에 대한 방출 한계치들을 증가시키고, 스펙트럼들에 대한 이들의 기여를 감소시킨다. 낮은 질량들에서의 절대 질량 분해능 값들은 일반적으로 매우 높고, 결과적으로, 이들이 스펙트럼에서의 기본적인 피크들과 중첩되지 않으면 우조화로 인한 스팍리어스 피크들을 확인하는 것이 일반적으로 용이하다.

[0189] 4. 스캔 시간: 스캔 시간은 우조화들의 존재에 중대한 영향을 끼친다. 이는 이온들의 방출에 대한 RF V_{pp} 한계치가 도 29에 도시된 바와 같이 스캔 시간의 증가에 따라 감소하기 때문이다. 스캔 시간이 짧아짐에 따라, 방출을 위한 한계치는 증가하고, 우조화 피크들은 스펙트럼에서 사라진다. 이는 더 빠르게 스캔하거나, 높은 질량보다 낮은 질량(즉, 더 높은 주파수)에서 더 빠르게 스캔하는 스캐닝 프로필들을 사용하는 것이 종종 스펙트럼 순도를 달성하기 위한 가장 좋은 접근 방법인 이유이다.

[0190] 5. 전자 에너지: 우조화들의 방출을 위한 한계치는 이온들이 포텐셜 우물 내에서 얼마나 깊이 형성되는지와 관련된다. 입구 플레이트에 더 가깝게 형성되는 이온들(즉, 더 높은 에너지)은 트랩으로부터 내보내기 위해서 낮은 여기를 요구하며, 이는 더 낮은 여기 한계치들을 초래한다. 그 결과로, 전자 에너지가 감소되고 이온들이 입구 플레이트의 후방 표면에 더 가깝게 형성될 때마다, 우조화들로부터의 기여에 있어서 상대적인 증가가 관찰된다. 이는 출구 플레이트 전압이 감소될 때(즉, 더 음의 값이 될 때) 우조화 피크들이 더욱 현저하게 되는(즉, 크기가 증가되는) 이유이다.

[0191] 6. 트랩 포텐셜 우물: 포텐셜 우물이 더 깊어짐에 따라, 이온들의 방출을 위한 한계치는 더 커진다. 우조화 피크들은 그의 한계치들이 이미 더 높기 때문에 스펙트럼으로부터 제일 먼저 사라진다. RF V_{pp} 를 일정하게 유지하면, 단순히 포텐셜의 깊이를 증가시켜서 우조화들을 제거하는 것이 가능하다. 트랩핑 포텐셜들이 여기에 기술된 대부분의 주파수 스위프들 중에 일정하게 유지되지만, 전극 전압들이 또한 스캔 중에 트랩핑 조건들을 변화시키기 위해서 변경될 수 있음이 본 기술 분야의 기술자에게 명백하게 되어야 한다.

[0192] 7. 전환 플레이트/입구-출구 컵 RF 커플링: 스펙트럼들에 대한 우조화들의 기여는 또한 RF가 트랩에 걸쳐 분배되는 방식에 의해 영향을 받는다. 바람직한 실시예에서, RF V_{pp} 는 한 쌍의 커패시터들을 사용하여 트랩에 걸쳐 분배되고, 정확한 커플링 구성은 실험적으로 결정되었다. 전환 플레이트와 컵 사이에 위치한 커플링 커패시터를 제거하는 것은 더 높은 RF V_{pp} 가 트랩을 작동시키기 위해 요구될 때 상당한 양의 추가적인 우조화들을 생성하는 것이 발견되었다.

[0193] 이 바람직한 실시예는 전환 플레이트 RF 커플링으로 작동한다. 그 결과로, 이온들은 그들 고유 진동 주파수의 2

배로 자연적으로 방출된다. 전환 플레이트 RF 커플링을 갖는 이온 트랩의 작동을 가시화하는 하나의 방법은 단순히 일측으로부터 차일드를 미는 것보다는 체인을 잡아당겨 스윙 상에서 차일드를 펌핑하는 것이다. 이 경우에, 가장 효율적인 펌핑은 스윙하는 차일드의 고유 진동 주파수의 2배에서 달성된다. 전환 플레이트 RF 커플링이 그의 고유 진동 주파수의 2배로 방출되는 이온들을 이미 생성하고 있지만, 이는 우조화 여기로서 기술적으로 설명되지는 않는다. 우조화 피크들은 전환 플레이트 RF 커플링이 사용되는 경우에 여전히 존재하지만, 표준 방출 주파수의 2배에서 방출되는 피크들에 상응한다(즉, 이온들의 고유 진동 주파수의 4배). 위에서 설명된 동일한 가이드라인들은, 그들이 이온들이 정확히 그 고유 진동 주파수들로 방출되는 경우에 적용되므로, 이러한 우조화들의 완화에 적용된다.

[0194] ART MS 이온 트랩에서, 모든 이온들은 초기에 트랩핑되고, 그 다음에 질량이 큰 순서대로 트랩으로부터 질량 선택적으로 방출된다. 질량 선택적인 방출은 바람직하게는 이온들을 트랩으로부터 방출시키기 위해 RF 스캔들을 사용한다. 자동공진을 사용하여 이온들 방출시키는 것은 높은 주파수 값에서 낮은 주파수 값으로 그의 고유 진동 주파수(또는 바람직한 실시예에서의 그의 고유 진동 주파수의 2배)를 가로질러 스캔하는 것을 의미한다. 대부분의 경우에, 전체 질량 스펙트럼 정보가 얻어질 수 있도록, 주파수 범위는 매우 넓은 질량 범위들을 커버하도록 스캔된다. 그러나, 트랩으로부터 오직 하나 또는 적은 질량들을 방출하는 좁은 주파수 범위들을 스캔하는 것도 동일하게 가능하다.

[0195] 좁은 주파수 스캔들은 가깝게 이격된 이온들의 비율을 실시간으로 빠르게 모니터링하는 것을 허용하기 때문에 유용하다. 예를 들어, N_2/O_2 혼합물들을 모니터링하고 복합 진공 챔버에서 공기의 누출이 없음을 확인하기 위해 26과 34 amu 사이에서 스캔하는 것이 의미가 있을 수도 있다. 이러한 짧은 범위의 스캔들의 이점은 그것들이 매우 고속에서 실행될 수 있다는 것이다. 사실, 이 바람직한 실시예는 0.5 msec의 짧은 시간들에서 단일 종을 모니터링하는 것을 허용한다. N_2 및 O_2 피크들 모두를 커버하는 공기 스캔들은 도 1의 바람직한 실시예를 사용하여 1 KHz 반복률로 실행되어 왔다.

[0196] ART MS와 사중극자 질량 필터 사이의 차이는, ART MS에서, 활성 스캐닝이 특정 질량 대 전하 비율을 질량 선택적으로 방출한다는 것이다. 사중극자 질량 필터에서, 필터는 특정 질량에서 실제적으로 파킹될 수 있고, 그 다음에 피크의 집중도에 있어서의 순간적인 변화가 실시간으로 모니터링될 수 있다. 이는 단일 기체 모니터링의 중대한 이점처럼 보이나, 대부분의 사중극자 질량 필터들은 실시간으로 이러한 측정을 실행하도록 요구되는 대역폭을 갖지 않으며, 질량 집중도에 있어서의 변화의 모니터링은 일반적으로 표준 사중극자-질량-필터-기반의 잔류 기체 분석기들(RGA)에서 수십 밀리초마다 데이터를 수집하는 것에 제한된다.

[0197] ART MS 이온 트랩에서, FFT 반전(inversion)을 거쳐 발생되는 광역 주파수 스펙트럼 RF를 사용하여 이온들을 질량 선택적으로 방출하는 것이 또한 가능하다. 특정 질량 대 전하의 이온들을 질량 선택적으로 방출하는 것은 관심 이온들의 주파수 피크와 중첩되는 주파수 범위로 RF를 조절함으로써 달성될 수 있다. FFT 반전 알고리즘은 트랩에 적용될 수 있는 넓은 스펙트럼 RF를 발생시킬 수 있다. 이는 효율적인 이온 방출로 이어지지 않을 수 있으나(실제 스캐닝이 이루어지지 않을 때 자동공진이 포함되지 않으므로), 이러한 모드는 트랩을 오직 특정 질량의 이온들이 방출되는 것을 허용하는 필터로서 본질적으로 작동하게 할 수 있다. 트랩은 특정 질량에서 유지될 수 있으며, 농도에 있어서의 순간적인 변화들이 모니터링될 수 있다.

[0198] 이온들은 도 1에 도시된 고온 필라멘트(16)와 같은 방출 소스로부터의 전자들을 사용하여 전자 충격 이온화에 의해 ART MS 이온 트랩에서 생성된다. 축 상 ART MS 트랩에서, 필라멘트와 입구 플레이트 사이의 전압 차이는 전자들이 트랩에 들어갈 때 전자들에 최대 에너지 및 전자들이 포텐셜 우물 내에서 되돌아 오는 포텐셜을 설정 한다. 전자 빔에 의해 한정되는 이온화 체적은 전자들이 트랩 내로 들어갈 때 전자들의 에너지를 변경하고 또한 전환 플레이트 바이어스 전압을 변화시켜서 변경될 수 있다. 일반적으로, 이온화 체적은 전자들의 에너지를 증가시키거나 전환 플레이트 상의 바이어스 포텐셜의 크기를 낮추어 증가된다. 이온화 체적을 증가시키는 것은 일반적으로 더 센 피크들을 생성하지만, 또한 이온들이 더 넓은 공간에 분배된 포텐셜 우물들 상에서 진동하므로 장치의 분해능을 감소시킨다. 진공 시스템의 벽들에 관련된 필라멘트 바이어스는 또한 진공 시스템의 벽들 및 이 시스템의 다른 이온화 기반 장치들에 전자들이 도달할 가능성을 한정하므로 중요하다. 필라멘트는 일반적으로 에너지가 충만한 전자들을 접지된 입구 플레이트로 전달하기 위해 음의 포텐셜에서 바이어스되었다. 그러나, 전자들이 필라멘트로부터 입구 플레이트로 여전히 가속되나 진공 시스템의 (접지된) 벽들에 도달할 기회를 갖지 않도록, 입구 플레이트와 필라멘트는 양자 모두 양의 포텐셜로 바이어스될 수 있다. 실험은 필라멘트 방출기가 챔버 벽의 포텐셜에 대해 양으로 바이어스될 때마다, 트랩 내로 방출된 전자들의 더 효율적인 커플링을 일관되게 보여 준다. 필라멘트 또는 저온 전자 방출 표면 상에서의 양의 바이어스들은 또한 ART MS 트랩과 진공 시스

템의 다른 게이지들 또는 센서들 사이의 간섭의 가능성은 줄여준다.

[0199] 필라멘트 바이어스 전압의 주의 깊은 제어는 축을 벗어난 이온화에 훨씬 더 관련이 있다. 이 경우에, 필라멘트와 입구 플레이트 사이의 전압의 변화는 전자들이 트랩 내로 들어갈 때 전자들의 최대 에너지를 설정하고, 또한 전자들이 트랩 내에서 따르는 아크 궤적을 설정한다. 이온들의 초기 에너지는 이온들이 형성되는 트랩 체적 내의 정확한 위치에 밀접하게 관련된다. 전자 에너지를 변화시키는 것은 (예전된) 이온들의 방출 주파수에 절대적으로 영향을 주지는 않는 것으로 보여져 왔으나, 다음과 같은 실질적인 영향을 준다.

[0200] 1. 피크의 높이들

[0201] 2. 우조화에 대한 기여, 및

[0202] 3. 베이스라인 오프셋 수준들.

[0203] 축을 벗어난 이온화 트랩에서, 이온들은 일반적으로 트랩 내에서 깊이 형성된다. 이온들의 정확한 근원은 입구 플레이트의 평면에 대한 필라멘트의 각도 배향과 전자들의 에너지에 좌우된다. 전자들의 에너지가 증가함에 따라, 전자들은 트랩 내로 더 (즉, 더 낮은 포텐셜 에너지 값들로) 도달하고, 더 높은 RF V_{pp}가 동일한 스캔 시간에서 트랩으로부터 이온들을 방출하도록 요구된다(즉, 방출 한계치가 증가한다). 만약 아크가 너무 짧아지면, 전자 아크의 끝은 입구 플레이트의 후방 평면에 도달할 수 있으며 진동 빔의 시야선 내에 이온들을 형성할 수 있다. 그 결과로, 후방 벽에 가깝게 형성되는 이온들의 일부는 그 다음에 진동 없이 트랩으로부터 방출되어, 베이스라인 오프셋을 증가시키고, 노이즈를 발생하고, 전자 증배기 수명을 감소시킨다. 입구 플레이트의 후방에 가깝게 형성되는 이온들은 또한 더 낮은 방출 한계치들을 가지며, 낮은 질량들에서 우조화 피크들에 기여하면서, 우조화들로서 더 용이하게 방출될 수도 있다.

[0204] 도 1의 바람직한 실시예 내에서, 전자 바이어스 전압을 조정하기 위해 사용되는 일반적인 절차는 다음과 같다:

[0205] 1. 입구 컵에 대한 낮은 전압 차이 설정, 예를 들어, 입구 컵에 대해 -50 VDC에서 출발한다. 이 설정에서는, 종종 상당한 베이스라인 오프셋, 낮은 신호, 및 높은 노이즈 수준들이 존재한다.

[0206] 2. 전압 차이를 증가시킨다. 전압 차이가 -60 VDC를 넘어 (더 음의 값으로) 갑에 따라, 베이스라인은 강하하기 시작하고 신호는 증가한다. 일부 우조화들은 여전히 분명할 수 있으나, 베이스라인은 사라지기 시작한다.

[0207] 3. 피크 높이들의 높이가 최적화되고, 베이스라인이 최소화되고, 우조화들이 또한 최소화될 때까지, 전자 에너지를 계속하여 증가시키며, 즉, 필라멘트 바이어스를 더 음의 값으로 만든다.

[0208] 바람직한 실시예에서, 만약 필라멘트 바이어스가 입구 플레이트에 대하여 -60 VDC보다 더 양의 값이 되면, 베이스라인 오프셋은 분명해진다. 전압 차이의 크기가 증가함에 따라, 스펙트럼들의 품질이 개선되고, 스펙트럼들은 일반적으로 전압 차이가 -90 VDC에 도달함에 따라 최적화된다. 합리적인 스펙트럼들은 일반적으로 -70과 -110 VDC 사이에서 수집된다.

[0209] 전자 에너지가 감소되고, 전자 아크들이 더 짧아짐에 따라, 이온들은 입구 플레이트의 후방 평면에 더 가깝게 형성되고, 이온들을 트랩으로부터 방출하는 것이 더 용이해진다. 일반적으로, 이는 또한 증가된 수준의 우조화들을 초래한다. 일반적으로, 우조화들은 출구 플레이트 전압을 증가시키고(이를 덜 음의 값으로 설정하고), 전자 에너지를 증가시키고, RF V_{pp}를 감소시켜서 제거된다. 입구 플레이트의 후방 평면을 때리는 낮은 에너지의 전자들은 또한 상술한 ESD 과정을 통해 에너지가 충만한 이온들을 형성할 수 있다. 출구 플레이트 구명과의 시야선에서 발생되는 ESD 이온들은 베이스라인 오프셋 수준들과 노이즈에 기여할 수 있다. 입구 플레이트의 후방 평면과 충돌하는 벗어난 전자들에 의한 ESD 이온들의 방출은 스테인레스 스틸과 비교하여 ESD 이온 수준들을 감소시키도록 도시된, 예를 들어, 금 및 백금 코팅들과 같은 특수한 코팅들을 플레이트의 후방에 적용하여 최소화될 수 있다.

[0210] 축을 벗어난 이온화의 자연적 결과는 진동하는 이온 빔과 정렬된 이온들을 생성하는 전자 빔 아크의 색션이 가능한 최대 전자 에너지에 있는 전자들을 가지고 있지 않다는 것이다. 빔에 노출된 아크 시야선의 도는 지점에서, 전자 빔은 축방향 속도 성분을 잃었으나, 반경방향 속도의 초기 성분을 여전히 보유한다. 이 방식으로 계산된 출현 포텐셜들은 항상 과도한 추정치들이므로, 필라멘트와 입구 플레이트 사이의 전압 차이는 다른 기체들에 대한 이온화 포텐셜들을 계산하기 위해 사용되어서는 안된다.

[0211] 펄스들에 있어서, 연속적으로 또는 간헐적으로 ART MS 이온 트랩에서 이온들이 생성될 수 있다. 펄스식 충전(pulsed filling)은 이온들이 미리 규정된 단시간 동안에 트랩 내에서 형성되고, 로딩되는 대안의 작동 모드이

다. 그의 가장 단순하고 가장 일반적인 실행에 있어서, 펠스식 충전은 어떠한 AC 여기도 없는 상태에서 이온들의 발생을 포함하며, 이온들은 순전히 정전 트랩핑 조건들의 영향 하에서 생성되고 트랩핑되고, 그 다음에 RF 주파수 또는 트랩핑 포텐셜 스캔은 이온들의 질량 선택적 방출을 생성하도록 트리거된다. 사이클은 각각의 새로운 이온 펠스에 대해서 반복될 수 있다. 펠스식 작동의 이점은 이온 트랩 내에서의 공간 전하 형성의 개선된 제어이다. 트랩 내에서의 큰 이온 농도는 피크의 확장, 분해능 손실, 동적 범위 손실, 피크 위치 이동, 비선행 압력 의존 응답, 신호 포화, 및 배경 노이즈 수준들의 증가를 야기한다. 펠스식 작동의 다른 이점은 질량 선택적 저장, 과편화, 또는 분리 실험들 중에 초기 이온화 조건들의 더 양호한 제어이다. 예를 들어, 트랩으로부터 완전히 원하지 않는 이온들을 제거하기 위해, 크리닝 주파수 스위프가 온되어 있는 중에 새로운 이온들을 도입하는 것을 중단하는 것이 필요하다.

[0212] 전자 충격 이온화에 의존하는 비조화 정전 이온 트랩들은 전자 빔을 온 또는 오프시키기 위해 전자 게이트들을 포함할 수 있거나, 트랩의 이온화 체적으로 들어가는 전자 플러스들의 듀티 사이클을 제어하기 위해, 예를 들어, 전자 발생기 어레이들과 같은, 필드 방출에 기반하는 저온 전자 방출기들의 빠른 텐 온/오프 시간들에 의존할 수 있다. 게이트된 외부 이온화 소스들은 본 기술 분야에 잘 알려져 있다.

[0213] 펠스식 충전 작동에 있어서, 이온화 듀티 사이클 또는 충전 시간은 피드백 배열들을 통해서 결정될 수 있다. 트랩 내의 총 전하는 각 스캔의 끝에서 통합될 수 있으며, 다음 스캔 사이클에 대한 충전 조건들을 결정하기 위해 사용될 수 있다. 전하 통합은 (1) 위에서 설명된 전압력 측정에서 전용 전하 수집 전극으로 트랩 내의 모든 이온들을 단순히 수집하거나, (2) 질량 스펙트럼에서 총 전하를 통합하거나, (3) 다음 스캔에 대한 이온화 듀티 사이클을 한정하기 위해, 예를 들면, 보조 전극 내로 유입되는 전류와 같은 총 이온 전하의 대표적인 측정을 사용함으로써 달성될 수 있다. 위에서 설명되고 도 24 내지 도 26에 도시된 바와 같이, 압력이 증가함에 따라 트랩의 외부에 형성된 이온들의 수를 측정하여 총 전하가 또한 결정될 수 있다. 이온 충전 시간들은 또한 이전의 질량 스펙트럼에 존재하는 특정 질량 분배들 또는 집중화 프로필들에 기반하거나, 기체 혼합물의 특정 피분석 분자들의 존재, 정체성, 및 상대적 농도들에 기반하거나, 예를 들어, 특정한 종들에 대한 질량 분해능, 민감도, 신호 동적 범위, 또는 검출 한계들과 같은 질량 분석계에 대한 목표 규격들에 기반하여 조정될 수 있다.

[0214] 전자 충격 조건들 하의 펠스식 충전 작동은 도 30a와 도 30b에 도시되어 있다. 에너지가 매우 충만한 전자들의 짧은 펠스들은 전자 게이트들과 축 상 전자 충격 이온화를 사용하여 AC 여기가 없는 상태에서 트랩 내로 도입되었다. 펠스식 이온화는 예를 들어, MEMS 설계들에 기반하거나 저온 전자 방출기들에 기반하는 ART MS 어레이들에서, 축 상 전자 빔들과 작동할 때 베이스라인 노이즈를 최소화시킨다. 도 30a에 도시된 바와 같이, 전자 방출기(16), 리펠러 플레이트(85), 그리드 전극(86) 및 게이트 전극(87)로 구성된 전자 총은 전자 빔(88)을 접지된 입구 컵(6) 내로 펠스화시키기 위해 사용되었다. 그리드 및 게이트 전극들이 -60 VDC로 바이어스되는 반면, 필라멘트(16) 및 리펠러(85)는 -70 VDC로 바이어스되어, 전자들이 70 eV의 에너지를 갖는, 즉 게이트가 개방된, 입구 컵의 그리드에 도달하게 한다. 그 다음에, 도 30b에 도시된 바와 같이, 전자들이 돌아와서 입구 컵의 메시에 도달하지 못하도록, 게이트는 게이트 바이어스(87)를 = -85 VDC(즉, 전자 방출기 바이어스보다 더 음의 값으로)로 빠르게 스위칭하여 폐쇄된다. 이러한 단순한 전자 총 설계의 이점들은 나노초의 범위의 스위칭 시간들을 갖는 빠른 응답, 일정한 전자 추출 장, 및 상대적으로 콤팩트한 설계를 포함한다. 방출기의 표면과 그리드 전극 사이의 전압 차이에 의해서 설정되는 그리드 바이어스가 게이트가 온 또는 오프될 때 변하지 않기 때문에 전자 추출 장이 일정하여, 전자 방출 효율을 개선한다. 게이트가 폐쇄될 때, 필라멘트 방출은 필라멘트를 태울 위험이 없이 피드백 루프로써 제어될 수 있다. 게이트된 전자 소스들은 본 기술 분야에 잘 알려져 있으며, 도 30a 및 도 30b에 도시된 예는 단지 하나의 대표적인 실행이다.

[0215] 펠스식 충전 실험을 위한 타이밍 다이어그램이 도 31에 도시되어 있다. 상부 그래프는 전자 방출 전류가 활성화 되는 시간을 나타내는데, 이 경우에는 5msec 충전 시간에 상응한다. 이 시간은 수십 나노초부터 수 밀리초의 범위에 있을 수 있다. 게이트-온 주기 중에 방출 전류 수준들은 수 마이크로암페어로부터 수 밀리암페어의 범위에 있을 수 있다. 중간 그래프는 RF 주파수가 높은 값으로부터 낮은 값으로 스캐닝되는 시간을 보여 준다. 그래프에 보여진 바와 같이, 진동 빔에 저장되지 않은 이온들이 트랩을 떠나도록 허용하기 위하고 검출 전자기기가 새로운 수준에 응답하도록 허용하기 위해서 RF 스캔이 시작되는 시간과 게이트가 폐쇄되는 시간 사이에는 작은 지역 기간이 존재한다. 이 지역은 저장되지 않은 이온들에 의해서 야기되는 모든 배경 신호가 하부 그래프에 명료하게 도시된 바와 같이 트랩으로부터 소산되는 것을 보장하기 위해 필요하다. 일반적으로, 검출 전자기기가 제한된 대역폭을 가지면, 더 긴 지역 시간이 필요할 수 있으나, 0.1 밀리초 미만의 지역은 노이즈가 소산되기에 충분하다. 하부 그래프에서 낮은 베이스라인 수준들에 의해 보여지는 바와 같이, RF 스캔이 시작될 때, 트랩으로부터 질량 선택적으로 방출되는 트랩핑된 이온을 제외하고 본질적으로 이온들이 검출되지 않는다. 펠스식 전

차 충격 이온화는 축 상 이온화를 이용하여 ART MS 트랩들에서 베이스라인 오프셋 노이즈를 감소시키는 편리한 방법이다.

[0216] 일단 전자 게이트가 폐쇄되면, 전자 충격 이온화에 의해 트랩에 더 이상의 이온들이 추가되지 않는다. 이온들이 그들의 진동 운동에서 트랩핑될 때, 하나의 컵으로부터 다른 컵으로 진동하므로 중성 원자들 및 분자들과 충돌 하며, 일부 이온들은 산란시키는 충돌들로 인해 각 진동 사이클 후에 상실된다. 따라서, 스캔 시간이 트랩에서 이온들의 체류 시간을 초과하지 않도록 스캔 시간을 조정하는 것이 중요하다. 일반적으로, (10^{-8} Torr 미만의) 초고진공(UHV) 압력들에서 트랩에서의 이온들의 체류 시간이 일반적으로 약 10 밀리초 내지 약 100 밀리초의 범위에 있다. 도 31은 45 msec의 스캔 시간으로 10^{-8} Torr에서 유용한 스펙트럼을 발생시키는 능력을 명백히 보여 준다. 그러나, 트랩의 압력이 증가함에 따라, 스캔 시간은 이온 중립 산란으로 상실되기 전에 모든 이온들을 트랩으로부터 방출시키도록 조정되어야(즉, 감소되어야) 한다. 약 10^{-5} Torr에서, 스캔 시간들은 이온들이 상실되기 전에 확실히 방출되도록 1 밀리초, 즉 트랩에서의 이온들의 체류 시간만큼 빨라야 한다. 더 빠른 스캔 시간들을 달성하기 위해서, 제한된 질량 범위에 걸쳐 스캔하는 것이 필요하거나, 질량 피크가 스펙트럼에서 나타나는 것이 예견되기 바로 전에 스캔을 통해 이온화 펄스들을 전달할 필요가 있을 수 있다. 이온화(전자 게이트 온)와 겹출(전자 게이트 오프) 사이의 시간을 단축시키고 또한 RF V_{pp} 를 증가시킴으로써, 더 높은 압력에서 조차 더 많은 신호를 얻는 것이 가능하다. 스펙트럼에서 관심 있는 2개의 피크들이 나타나기 바로 전에 이온화가 2회 발생하는 스캐닝 모드의 예가 도 32에 도시되어 있다. 관심 있는 피크가 나타나기 바로 전에 스캔 중에 이온화 펄스를 도입하는 것은 이온들이 여기되고, 트랩으로부터 방출되기 바로 전에 이온들을 생성하여, 충돌 손실들이 최소화되게 한다. 이 작동 방법은 노이즈를 여전히 최소화하면서 이온 신호를 개선한다. 관심 있는 2개의 피크들인 질량 피크들(1,2)은 미리 선택되고, 이온화가 시간 조정되어, 질량 피크(1)과 질량 피크(2)에 상응하는 이온들이 더 높은 압력들에서 산란시키는 충돌들에 손실될 시간을 갖지 못하게 한다. 그러나, 고속 주파수 스캔들은 일반적으로 분해능을 감소시킬 수 있는 더 높은 RF V_{pp} 전압들을 요구한다.

[0217] 펄스식 작동은 또한 ART MS 트랩을 이온 저장 장치로서 사용하기 위해 중요하다. 트랩은 이온들로 충전될 수 있으며, 그 다음에 RF 여기는 트랩으로부터 특정 질량을 갖는 원하지 않는 이온들을 방출하거나, 모든 다른 질량들을 방출함으로써 트랩에서 미리 선택된 질량을 갖는 이온들을 저장하거나 미리 집중시키기 위해 사용될 수 있다. 펄스식 작동은 일반적으로 자동공진 여기가 충돌-유도 또는 전자-부착 분해를 통해 트랩에 저장된 이온들을 화학적으로 반응시키기 위해 사용될 때 선호된다. 또는, 전압력 측정이 짧은 전자 펄스로 트랩을 충전하여 얻어 질 수 있으며, 다수의 주파수 스캔들 후에 시간에 따른 이온 신호의 감쇠를 측정하는 것이 뒤따르며 - 신호 감쇠율은 압력에 엄밀히 관련된다. 예를 들어, 단일 이온화 펄스는 고정된 시간에 의해 분리되는 2 스캔 사이클들이 뒤따를 수 있다. 제1 및 제2 스캔 사이의 신호 감쇠는 트랩 안의 압력에 직접 관련되어 있다. 또는, 2 주파수 스캔들은 연이어 실행될 수 있으나, 이온화 펄스와 주파수 스캔의 시작 사이에 다른 지연들을 갖는다. 더 짧은 지연 스캔의 감쇠율과 비교되는 더 긴 지연 스캔을 위해 측정된 신호의 감쇠율의 차이는 트랩 내의 전압력의 표시일 수 있다.

[0218] 고진공 시스템에서의 압력이 증가함에 따라, ART MS 트랩의 작동 매개변수들은 가능한 한 최상의 신호를 제공하기 위해 최적화될 필요가 있다. 또한, 압력이 너무 높아질 때에, 감소된 수명 또는 파국적인 고장에까지 이르게 할 수 있는 손상시키는 조건 하에서의 작동으로부터 필라멘트와 전자 증배기를 보호할 필요가 있다.

[0219] 일반적으로, 전압력이 증가할 때, 우리는 다음의 것들을 변경하기 위해 고정된 매개변수들로써 작동되는 ART MS 센서로부터 신호를 예측하여야 한다:

[0220] 1. 신호 진폭,

[0221] 2. 질량 분해능,

[0222] 3. 신호 대 잡음비 (SNR)

[0223] 4. 질량 교정

[0224] 5. 피크 형상

[0225] 6. 배경 오프셋 신호 수준들

[0226] 증가하는 압력의 함수로서 트랩 성능에 영향을 주는 몇몇의 물리적인 전자 인자들이 있다. 아래의 목록은 일부

예들을 포함한다:

[0227] 1. 증가하는 압력과 함께 평균 자유 경로의 감소

[0228] 2. 압력이 증가할 때 더 빈번하게 산란시키는 충돌들을 겪는 이온들에 대한 RF와의 위상 고정의 손실

[0229] 3. 압력이 증가할 때 이온 구름의 물리적 확산

[0230] 4. 압력이 증가할 때 - 즉 충돌적으로 유도되는 해리(CID)로 인한 - 파편화 패턴들에서의 변화

[0231] 5. 증가하는 압력과 함께 이온 체류 시간의 감소

[0232] 6. 압력과 함께 전자 증배기 노이즈의 증가

[0233] 7. 증가하는 압력과 함께 트랩 내에서의 전하의 더 빠른 형성

[0234] 8. 증가하는 압력과 함께 이온 구름 밀도의 포화

[0235] 9. 압력의 증가와 함께 트랩 내의 공간 전하의 변화

[0236] 10. 증가하는 압력과 함께 RF 파워 흡수의 증가

[0237] 11. 압력이 증가함에 따른 필라멘트 온도의 증가

[0238] 12. 압력이 증가함에 따른 필라멘트에서의 열적 과정들의 증가

[0239] 13. 전압력과 함께 필라멘트 근처에서 이온 전하 밀도의 변화

[0240] 14. 압력이 증가함에 따른 전극들 사이에서 가능한 아킹(arcing).

[0241] 다른 압력들에서의 작동 중에 가장 일반적으로 조정되는 매개변수들은 (이들에 한정되지는 않으나) 다음을 포함한다:

[0242] 1. 전자 방출 전류

[0243] 2. 피라멘트 리펠러 바이어스 전압

[0244] 3. RF Vpp 진폭

[0245] 4. 출구 플레이트 바이어스 전압

[0246] 5. 전자 증배기 바이어스 전압

[0247] 6. 질량 측 교정 매개변수

[0248] 7. 스캔 속도

전자 방출 전류: 초고진공(UHV) 수준들에서의 작동은 높은 신호 수준들과 증가된 SNR들을 달성하기 위해 표준 고진공(HV) 수준들 하의 작동에 관련된 전자 방출 전류의 증가를 요구한다. UHV 수준들에서, 트랩은 전하로 완전히 포화되지 않으며, 스펙트럼에서의 이온 신호들은 시스템에서의 전압력을 트래킹하는 경향이 있다. 압력이 증가함에 따라, 질량 스펙트럼에서의 신호 강도들은 결국 트랩이 전하들로써 포화됨에 따라(즉, 트랩이 가득 차에 따라), 최대치에 도달한다. UHV 수준들에서 이온 신호들을 증가시키기 위해, 그리고 최적의 SNR들을 달성하기 위해서, 스캐닝 율을 감소시키고/시키거나 전자 방출 전류를 증가시키는 것이 필요하다. 압력이 1E-5 Torr에 가까운 수준에 도달하면, 신호의 SNR을 개선하기 위해 전자 방출 전류를 감소시키는 것이 편리하다는 것이 일반적으로 관찰된다. 노이즈 플로어 수준들의 증가들은 일반적으로 전압력이 증가함에 따라 보여지며, 전자 방출 전류의 감소는 종종 문제를 완화시킨다. 전자 방출 전류는 또한 베이스라인 오프셋 신호들의 제어에서 역할을 가진다(아래 참조). 전자 방출 설정은 필라멘트 온도에 영향을 주고, 이와 같이 필라멘트 수명과 필라멘트에서의 피분석물 분해에 충격을 준다. 높은 압력들에서 방출 전류를 감소시키는 것은 또한 필라멘트 수명을 증가시키고, 필라멘트 표면에서 열 분해를 통한 부산물의 생산을 감소시킨다.

필라멘트 리펠러 전압: 리펠러는 종종 전자 빔의 초점을 맞추고, 전자 빔의 트랩 체적 내로의 결합을 개선하기 위해 고온 필라멘트 뒤에 위치한다. 리펠러들의 사용은 엄격한 결합 요건들이 보통 존재하는, 측을 벗어난 이온화 소스들에서 매우 일반적이다. 필라멘트 리펠러 전압은 전자 에너지, 필라멘트 바이어스, 및 전자 방출 전류의 함수이다. 리펠러 전압은 최적의 SNR들을 달성하기 위해 각각의 새로운 방출 전류에서 최적화될 필요가 있다. 방출 전류는 압력으로써 조정될 필요가 있으며, 필라멘트 리펠러 전압도 압력으로써 조정될 필요가 있다.

리펠러 전압은 트랩 내로의 전자들의 결합에 직접 영향을 주고, 이와 같이, 신호 강도, SNR, 및 피크 형상에 영향을 준다.

[0251] RF 진폭: RF V_{pp} 진폭은 ART MS 트랩들에 있어서 중요한 매개변수다. 한계치에 너무 가까운 RF V_{pp} 를 갖는 ART MS 센서의 작동은 이온 밀도가 압력의 증가로 증가함에 따라 신호의 손실을 야기할 수 있으며, 트랩 내의 효과적인 RF 장은 한계치 아래로 떨어진다. 일반적으로, ART MS 트랩에서 일관된 SNR 수준들을 달성하도록 요구되는 RF V_{pp} 진폭은 압력과 함께 증가한다. RF V_{pp} 의 증가는 일반적으로 질량 분해능의 감소와 함께 이온 신호의 증가를 야기한다. 일반적으로, RF V_{pp} 값들은 트랩 작동이 1-2 E-7 Torr 값에서 조정되고 압력이 1E-5 Torr 수준들에 가깝게 도달하면 조정될 필요가 있다. 높은 압력들에서의 RF V_{pp} 의 증가는 일반적으로 SNR에서의 큰 이득들에 대해서 일반적으로 오프셋되는 질량 분해능의 감소를 가져온다. RF V_{pp} 수준들은 우조화들이 스펙트럼들에 영향을 줄 수 있기 때문에 주의깊게 균형을 이루어야 한다. 사용자는 SNR, 질량 분해능 및 우조화 기여들 사이의 최상의 균형을 결정해야 한다. RF V_{pp} 진폭의 증가는 일반적으로 1E-5 Torr에서 또는 그 위에서 수집되는 스펙트럼들에서 SNR을 개선하는 최상의 방법이다. RF V_{pp} 진폭의 증가는 출구 플레이트 전압에서의 증가가 발생하면 신호들을 일정하게 유지하도록 요구된다 (아래 참조).

[0252] 출구 플레이트 바이어스 전압: 대부분의 ART MS 트랩들에서, 베이스라인 오프셋 신호의 증가가 압력이 증가함에 따라 관찰된다. 문제는 축 상 이온화에서 가장 심각하고, 축을 벗어난 이온화 소스들에서 덜 중요하다. 베이스라인 오프셋 신호의 진폭을 감소시키기 위해서, 출구 플레이트 전압은 증가되어야 하고, 입구 플레이트 전압에 더 가깝게 이동해야 한다. ART MS 트랩들은 일반적으로 출구 플레이트에 대해 약간 양으로 바이어스된 입구 플레이트로써 작동한다. 그러나, 더 높은 출구 플레이트 전압들은 일반적으로 압력이 증가함에 따라 선호된다. 출구 플레이트 전압과 RF V_{pp} 값들 사이에는 명백한 상호작용이 존재하며, 사용자는 SNR을 최적화하고, 베이스라인 오프셋을 감소시키고, 우조화들이 계속 체크되도록 하기 위해 매개변수를 선택하는 중에 주의해야 한다. 베이스라인의 증가는 트랩을 나가는 구속되지 않은 이온들에 대해서 야기된다. 증가하는 압력에서 베이스라인 오프셋을 감소시키는데 유용한 다른 접근 방법은 방출 전류를 감소시키는 것이다.

[0253] 질량 축 교정 매개변수: ART MS 트랩의 압력이 증가함에 따라, 질량 스펙트럼들에서의 피크 위치들의 변화를 흔히 볼수 있다. 미묘한 변화가 트랩 내에서 전하 밀도의 변화에 의해 야기된다. 트랩 내의 전압이 변함에 따라, 질량 축 교정에 있어서의 변화들이 또한 예상된다. 사용자들은 각각의 압력 또는 압력 범위에서 트랩 작동 매개변수들과 매칭되는 교정 매개변수들을 가져야 한다.

[0254] 전자 증배기(EM) 전압: 시스템에서의 압력이 증가함에 따라, 이온 피드백으로 인하여 전자 증배기로부터 증가된 노이즈를 보는 것이 가능하다. 이온 피드백 보상을 갖는 양호한 품질의 전자 증배기들은 덜 영향을 받을 것이다. 한편, 신호 증폭(즉, 트랩 이온 출력)이 압력과 함께 감소함에 따라, SNR을 개선하기 위해 증배기 이득을 증가시키는 것이 필요할 수 있다. EM 전압의 증가는 일반적으로 EM 수명의 감소를 야기하나, SNR 수준들을 보존하기 위해 요구될 것이다.

[0255] 스캔 속도: 더 높은 압력들에서, 더 높은 스캔 율에서 스캔하는 것은 종종 의미가 있다. 더 높은 스캔 율들은 트랩 내에서 전하 밀도를 더 낮게 하며, 노이즈의 효과들과 신호 상에서의 베이스라인 오프셋을 감소시킬 수 있다. 더 높은 스캔 율들이 RF V_{pp} 한계치들을 증가시키므로, 이 조정은 보통 RF 신호 수준들에 대한 상당한 조정이 따른다. 더 높은 압력들에서의 더 높은 스캔 율들은 또한 압력이 증가함에 따라 트랩에서 이온의 체류 시간이 더 짧아진다는 생각과 일치한다.

[0256] 보호 모드들: 압력이 증가함에 따라, 유닛이 먼저 온될 때, 전자 증배기와 전환 플레이트에서 바이어스 전압이 증가되는 속도를 조심스럽게 제어하는 것이 유용할 것이다. 일반적으로, 바이어스 전압의 갑작스런 증가들은 더 높은 압력들에서의 더 느린 증가들보다 더 많은 아크들을 야기하는 것으로 알려져 있다.

[0257] 압력이 증가함에 따라, 그 아래에서 사용자가 EM과 필라멘트를 편안하게 작동시킬 수 있는 최대 압력 값들, 즉, 한계치들을 설정하는 것이 유용할 것이다. 압력이 미리 규정된 양의 시간 동안 한계치 위에서 유지되면, 사용자는 또한 ART MS 센서를 셋다운하는 시간 지연 트리거들을 설정할 수 있다. 이 기능은 유닛을 손상시킬 수 없는 간단한 압력 과도현상들의 존재 하에서 센서 셋다운들을 최소화하기 위해 유용하다.

[0258] 필라멘트가 다른 종들보다 어떠한 종들에 더 민감할 수 있으므로, 필라멘트 및 EM 보호 모드들과 한계치들은 또한 종에 의존적일 수 있다.

[0259] 비조화 공진 이온 트랩의 특성

ART MS 장치의 본질은 각각의 기체 성분이 그 자체의 공진 주파수로 진동하면서, 분석될 샘플 기체로부터의 이온들로 빠르게 충전하는 것이다. 연속적인 m/q 이온들을 선택적으로 방출하기 위한 에너지 요건들은 매우 작고, 낮은 파워의 전자 신호들을 사용하여 이루어질 수 있다. 이는 도 1의 트랩이 200 ms 내에서 300 amu 범위 스캔 또는 70 ms 미만에서 100 amu 범위 스캔을 완료하는 것을 가능하게 한다. 이 스캔 유통은 사중극자 질량 분석에 기반하는 일반적인 잔류 기체 분석기들(RGA)과 연관된 일반적인 1 내지 2 초 100 amu 스캔 속도보다 훨씬 더 빠르다. 이 속도의 이점은 2개의 방식으로 사용될 수 있다: (1) 폐쇄 루프 제어 시스템에서의 초고속 측정 기로서, (2) 미량 수준 오염 제어를 위한 신호 대 잡음비를 개선하기 위한 추가적인 측정 평균 산출을 위해. 높은 민감도와 높은 속도들의 조합은 ART MS 장치들을 성분 분석에 기초하는 고속 폐쇄 루프 공정 제어에 이상적으로 적합하게 만든다. ART MS와 상당하는 스캔 속도들이 가능한 몇 개의 상업적으로 사용가능한 사중극자 질량 분석 계들이 정말로 존재한다. 그러나, 이러한 고성능 시스템들은 매우 크고, 부피가 큰 전자기기들을 요구하고, 구입하고 유지하는데 매우 비용이 많이 듈다. 전압력 측정 능력들(즉, 도 1의 실시예로서)을 포함하는 ART MS 센서들의 쉽게 인식되는 이점은 전통적인 이온화 케이지보다 진공 포트에서 더 많은 공간을 차지하지 않는 단순하고 작은 패키지로부터 전압력과 분압 정보를 실시간으로 전달하는 능력이다.

[0261] 진동 범위에서의 이온들 사이의 정전기적 반발은 ART MS 장치에 저장될 수 있는 전하 밀도를 궁극적으로 고정하는 공간 전하에 제한을 가져올 수 있으며, 길이(L)과 직경(D)에 관련된다 - 더 큰 트랩은 더 많은 이온들을 저장할 수 있으며, 더 작은 트랩은 더 적은 이온들을 저장할 수 있다. 이 성질은 주로 압력에 무관하고, 트랩 내에 저장된 전하들의 양은 그의 가용 범위에 걸쳐 상대적으로 일정하며, 그러므로, 트랩의 성능은 그의 가용 범위에 걸쳐 더 일관성이 있다. 그러므로, 사중극자 MS가 질량 필터를 통해 추가적인 전하를 통과시키기 위해 추가적인 스캔 시간을 요구하기 때문에, 사중극자 MS에 관련된 ART MS의 속도 및 민감도 이점은 압력이 감소함에 따라 증가한다. 일반적인 ART MS 장치의 추가적인 이점은 작은 크기가 진공 표면과 프로세스 메모리 효과들을 최소화하는 가장 완전한 범위의 사중극자 장치들보다 진공에 노출되는 더 작은 표면적을 가진다는 것이다.

[0262] ART MS의 빠른 스캐닝 속도의 다른 특징은 기체 성분들이 빠르게 변하면 샘플링된 데이터가 측정 시에 기체 성분들을 더 잘 나타낸다는 것이다. 빠른 스캔 유통은 특히 UHV 압력 범위들에서 ART MS가 과도 이벤트들을 더 잘 포착하도록 하는 샘플 기체의 더 정확한 "지점 측정"을 제공한다. 표면 과학 실험들과 오류가 있는 진공 밸브 작동으로 인한 압력 폭발의 검출은 ART MS 장치의 "지점 측정" 능력을 사용할 수 있는 적용들의 예이다.

[0263] ART MS 장치들은 고정된 양의 전하를 저장하기 때문에, 센서는 본질적으로 비율 측정 장치이며, 여기서 최대 이온 전하는 고정된 100%이고 기체 성분 분압들은 100%의 일부를 나타낸다. 농도들이 트래킹되고 보고될 필요가 있는 많은 적용들에 있어서, 비율 측정 정보는 절대 분압 정보에 비교해 선호되며, ART MS 장치의 원 출력이다. 절대 분압 정보가 요구되는 경우, ART MS 트랩의 출력이 분압 출력들을 제공하기 위해 전압력 정보를 사용하여 용이하게 스케일링될 수 있다.

[0264] ART MS 장치의 낮은 구동 및 작동 파워 요건들은 센서 헤드가 케이블의 단부에서 작동하거나 모듈 형태로 통합되는 것(통합된 전자 기기 및 센서)을 허용한다. 대부분의 사중극자 기반 기기들은 사중극자 센서와 RF 구동 전자 기기들의 긴밀한 물리적 및 전기적 결합을 요구하며, 모듈 형태로만 사용 가능하다(즉, 케이지와 제어기 사이에 케이블이 존재하지 않음). ART MS 장치에 대해서, 케이블은 구동 전자 기기들에 연결되도록 사용될 수 있다. 원격 케이블 작동 능력, ART MS 장치의 작은 크기, 및 ART MS 기반 시스템의 더 작은 전자 기기 패키징 능력의 조합은 밀집한 진공 툴들 상에 설치를 위한 추가적인 유연성을 제공한다.

[0265] ART MS 장치의 질량 특정 진동 주파수는 주로 이온 트랩의 물리적 치수와 트랩핑 포텐셜의 진폭에 의존하며, 구동 전자 기기들에는 의존하지 않는다. 따라서, 일단 단일 m/q 에 대한 추출 조건들이 알려지면, 모든 다른 m/q 는 단일 기체로 교정될 수 있다. 이는 케이지 제조 치수 제어에 근거하고 단일 기체 교정을 통해 빠르고 용이한 단일 지점 교정을 허용한다. 예를 들어, ART MS 장치에서의 물의 피크(18 amu)의 검출은 1 내지 300 amu 범위 전체의 완전 교정을 허용한다. 이는 새롭게 제조되고 현장에서 보전되는 기기에 대한 중요한 사용 용이성의 이점이다.

[0266] 많은 사중극자 질량 분석 장치들은 영(0) 블라스트 한계로 인해 2 내지 4 amu 미만을 정확히 측정할 수 없다. 따라서, 사중극자의 1 내지 300 amu 범위는 더 정확히는 2 내지 300 amu이거나, 일부의 경우에는 4 내지 300 amu 범위이기도 하다. 설계에 의해, ART MS는 영 블라스트 효과들을 가지지 않으며, 완전한 센서 분해능으로 모든 더 낮은 amu 피크들을 완전히 분해할 수 있다. 따라서, 영구히 설치된 ART MS 장치는 휴대용 누출 검출 적용들에서 현장의 헬륨 누출 검출기로서 그리고 효율적인 동위 원소비 질량 분석계로서 용이하게 사용될 수 있을

것이다. ART MS 트랩들에 의해 제공되는 매우 흥미로운 기회는 1과 2 amu의 질량들에서 각각 원자 수소 및 분자 수소를 모니터링하는 능력이다.

[0267] ART MS 센서들은 종종 일정 질량 분해능 모드로 일반적으로 작동하는 사중극자 질량 분석기들에 기반하는 RFA에 대하여 비교된다. 사중극자 질량 필터들의 처리량은 질량 의존적이다. 이온들의 질량이 증가함에 따라, 그의 반경방향 진동 진폭들이 증가하고 더 많은 이온들이 로드들(rods)과의 충돌로 상실된다. 그 결과로, 이온들의 질량이 증가하므로, 사중극자 질량 분석계들은 민감도를 상실한다. ART MS는 트랩 내에 모든 이온들을 저장하고, 샘플 기체의 기체 농도를 더 정확히 나타내면서, 방출 중에 이온들의 상대적 농도를 보존한다. ART MS 센서들은 초고진공 또는 극히 높은 진공 실험들에서 수소 수준들을 훨씬 더 정확히 나타낼 것으로 기대된다. ART MS 센서들은 극저온에서 냉각되는 표면들로부터 나오는 잔류 기체들의 기체 조성에서의 미묘한 변화에 기초하는 저온 어레이들을 재생시킬 필요성을 지시하는 극저온 펌프들을 위한 완전성 검출기(fullness detector)들로서 적용들을 발견할 것으로 기대된다.

[0268] ART MS 센서들은 상부 질량 한계 또는 질량 범위를 기술적으로 갖지 않는다. 사실은, ART MS 트랩들은 600 amu 범위 위에서 질량 정보를 잘 제공하는 것으로 보여진다. 그러나, 대부분의 휘발성 화학적 성분들은 350 amu 미만의 분자량을 가지며, 전자 기기들 및 데이터 획득 소프트웨어는 일반적으로 가장 일반적인 기체 샘플링 적용들을 지원하기 위해서 300 amu의 질량 범위로 한정된다. 더 높은 분자량 범위들을 가지는 ART MS 장치들은 특별한 이온 소스들 또는 텐덤 질량 분석계를 포함하는 더 정교한 적용들에서 용도를 발견할 것으로 기대된다.

[0269] ART MS 기술은 매우 다양한 연구 및 산업적 처리 적용들을 위한 엄청난 잠재력을 입증했다. (1) 저전력 요구사항들, (2) 작은 크기, (3) 조립의 용이함, (4) 사용의 용이함, 및 (5) 고분해능의 조합은 ART MS 기술을 배터리, 태양 및 기타의 대체 전원들에 의존하는 현장 적용들을 위해 이상적인 것으로 만든다. 독립적이고, 현장에서 사용 가능한 기체 샘플링 유닛들(즉, 저전력 고진공 펌프 시스템들을 통합함)에 패키징되는 ART MS 장치들은 대기, 항공우주, 수중, 혹독한 환경, 및 가정 안전 기체 샘플링 적용들에서 사용될 수 있다. ART MS 트랩 설계들의 소형화는 배터리 충전들 사이의 전례가 없는 작동 시간들을 특징으로 하는, 군사적인 그리고 법의학적인 적용들을 위해 첫 번째의 진정으로 손에 휴대 가능하고 빠른 기체 분석 장치들을 제공하는 잠재력을 가진다. 더 높은 상위 질량 범위 한계들을 갖는 큰 ART MS 트랩들은 DART, DESI, MALDI, ESI, FARPA, SIMS 등과 같은 특화된 이온화 스킵들과 조합한 생물학적인 샘플링 적용들로의 그들의 길을 발견할 것으로 기대된다. ART MS 트랩들은 (비행 시간 시스템들, 사중극자들, 자기 섲터들, 및 심지어 오비트랩들과 같은) 경쟁력 있는 질량 분석 기술들 및 이온 이동도 분광기들뿐만 아니라 (기체 및 액체 크로마토그래피와 같은) 분리 기술들과 조합된 적용들을 발견할 가능성이 크다. ART MS 트랩뿐만 아니라 다수의 압력 측정기들을 포함하는 조합 센서들은 고진공 (HV) 및 초고진공(UHV) 시스템들에서의 기체 분석 및 진공 품질 측정을 위한, 그리고 반도체 처리, 태양전지판 제조, 박막 코팅, 및 에칭을 포함하는 산업적 적용들을 위한 새로운 표준이 될 것으로 예상된다. ART MS 트랩들은 또한 튜닝 가능한 이온 소스들, 이온 저장 장치들, 이온 스티어링 장치들, 이온 화학반응기들, 및 이온 필터들로서 적용들을 발견할 것이다. 여기에서 설명되는 파워 흡수 스킵들과 같은 대체 검출 스킵들의 추가적인 개발은 또한 전례가 없는 신뢰도 및 낮은 유지 보수 성능을 제공하면서 실시간으로 단일 기체들의 분석에 전용되는 새로운 세대의 특정 기체 샘플링 시스템들을 개발하기 위한 새로운 방법론들을 제공할 것으로 예상된다. 외부 이온 도입 스킵들과 조합된 펠스식 작동은 초미량 기체 분석 필요조건들과 양립하는 예비집중화 스킵들의 개발을 가능하게 할 뿐만 아니라, 훨씬 더 크고 복잡한 텐덤 질량 분석 시스템들로 가는 도중의 이온들을 조작하는 능력을 제공할 것이다. 예를 들면, 관심 있는 생물학적인 이온들로부터 매트릭스 이온들을 분리하기 위하여/위하거나 비행 시간 스스로의 전달에 앞서 생물학적인 분자들을 예비집중하기 위하여 ART MS 트랩을 MALDI 소스로 추가하는 것을 상상하는 것이 가능하다. 낮은 질량들(즉, 10 amu 보다 작은)에서의 ART MS 트랩들의 높은 분해능은 저질량 동위원소 비율 질량 분석기뿐만 아니라 누설 검출기들에 대한 기술의 적용을 초래할 것으로 예상된다. 민감한 전하 검출기들과 조합된 ART MS 트랩들은 현장에서 사용 가능한 동위원소 비율 질량 분석을 위한 새로운 표준이 될 것으로 예상된다. 관심의 지점에서 측정들을 실행하는 그들의 능력과 조합된 ART MS 장치들의 빠른 속도는 표면 과학 및 촉매 작용을 위한 질량 분석의 분야에 혁신을 일으킬 것으로 예상된다. 전자 발생기 어레이들, 스펀트와 같은 방출기 어레이들 및 탄소 나노튜브 방출기들과 같은 냉온 전자 방출기들을 포함하는 대체 광이온화 및 전자 충격 이온화 스킵들의 발전은 ART MS 센서들의 전력 필요조건들을 더 줄여서 그들의 저전력 필요조건들과의 양립 가능성을 향상시킬 것으로 예상된다.

[0270] 표준 고진공 시스템 모니터링 적용들을 위해, 유례없는 샘플링 속도에서 상당한 공간 요건들이 없이 기저 압력 조건들을 모니터링하기 위해 ART MS 센서들을 사용할 수 있다. ART MS 장치들은 기저 압력 조건들의 모니터링, 냉매 회수 문제들의 진단, 누설 검출 절차들의 실행 및 냉매 회수 속도의 특징화에 사용될 수 있다. ART MS 장

치들의 상대적 저비용은 높은 또는 극히 높은 전공 시스템에 현재 설치된 각각의 그리고 모든 이온화 케이지를 전체 및 ART MS 분압 용량을 포함하는 조합 케이지로 대체하는 것을 정당화할 것으로 기대된다. 우리의 실험실에서 사용하는 ART MS 장치들을 위한 표준 케이지/ECU 구성은 케이블을 사용하여 제어기(ECU)에 연결된 케이지(변환기)를 포함한다. ECU는 진공 챔버에 부착된 다른 부품들과의 간섭 없이 시스템 내의 어떤 장소에 위치되지만, 변환기는 표준 진공 포트에 연결된다. 다른 바람직한 실행은 작은 물리적 치수들 및 단순한 작동의 일체형/모듈 장치를 제공하기 위해 변환기의 엔벨로프에 영구적으로 부착된 ECU를 갖는 감소된 치수의 ART MS 센서를 포함한다. 질량 분석 시스템에 의해 제공되는 정보는 미가공 질량 분석 데이터로서 원격 컴퓨터 디스플레이에 표시될 수 있거나, 만일 사용 가능하다면, 필요한 정보는 스펙트럼들로부터 추출되고, 사용자 명령에 따라 처리되고, ECU 내에 직접적으로 포함되는 그래픽 전방 패널 디스플레이 상에 표시될 수 있다. 분압 정보는 또한 실시간 처리 제어를 제공하기 위해 제어기의 후방 면 상에 위치하는 하나 또는 많은 상이한 아날로그, 디지털 및 릴레이-폐쇄 I/O 포트들과 링크될 수 있다.

[0271] 공정 적용들을 위해, ART MS 센서들은 적절한 탑재 구성들과 사용 지점 능력들과 조합된 전례가 없는 샘플링 속도를 제공한다. ART MS와 양립 가능한 사용의 경우는 다음을 포함한다. (1) 고정된 체적 샘플링, (2) 패키지/밀폐 테스팅, (3) 과도 응답 검출, (4) 집중도 제어, 및 (5) 과정 평거프린팅. ART MS 센서들은 기체 조성의 주의 깊은 제어가 웨이퍼의 청결성을 확보하는데 중요할 뿐만 아니라 적절한 용량 전달을 보장하는데 중요한 현대의 반도체 이온 임플란테이션 툴들의 모든 영역에서 즉각적인 적용을 발견할 것으로 기대된다. ART MS 장치들은 사후 보전(post-PM) 시스템 준비성 분석뿐만 아니라 기체 조성에 있어서의 변화들에 기반을 둔 예방 보전에 대한 실시간의 신속성을 제공할 것으로 기대된다. ART MS 트랩들은 전달 전에 불안정한 부모 클러스터 이온을 그의 파편들로부터 분리하는 능력을 제공하는 현대의 주입 클러스터 소스들에서 적용들을 발견할 것이다. ART MS 장치들은 또한 기체 조성 분석이 웨이퍼 공정 단계들 사이에서 이용 가능하면 인터웨이퍼 시간들이 현저히 줄어들 수 있으며 검출되지 않으면 포토레지스트 오염이 큰 문제가 될 수 있는 반도체 PVD 공정들에서 적용을 발견할 것이다. ART MS 트랩들은 또한 자기 매체 디스크 제조용으로 사용되는 빠른 사이클링 공정들에서 적용을 발견할 것으로 기대된다. 디스크 제조 단계들에 대한 일반적인 사이클 시간들은 3초로 짧으며, 챔버들의 압력이 각 사이클 동안에 중간 내지 높은 진공 상태에서 진동한다. ART MS 장치들은 (1) 냉매 회수율들, (2) 기체 혼합 비율들, 및 (3) 챔버 사이의 오염을 동시에 제어하는 기체 조합의 실시간 분석을 실행하는 첫번째 기회를 제공한다. 공정 적용들은 종종 분압 정보에 기반을 둔 제어 루프를 폐쇄하기 위해 실시간, 디지털 및/또는 아날로그 출력 신호들을 요구한다. ART MS ECU 제어기들은 일반적으로 (1) 디지털 I/O, (2) 아날로그 I/O 및 (3) 릴레이 클로저 I/O뿐 아니라 (4) USB, 이더넷, 디바이스 넷 및 RS485와 같은 표준 통신 포트들을 포함하는 다중 I/O 옵션들을 포함할 것이다.

[0272] 일 실시예에서, 테스트 기기는 멀티 클라이언트 연결 계층을 테스트 기기 (즉, 이더넷 전송 제어 프로토콜/인터넷 프로토콜 ([TCP/IP]) 네트워크, 직접 시리얼, 유니버설 시리얼 버스, 및/또는 그 밖에 테스트 기기 대 호스트 데이터 연결들)에 포함함으로써 다수의 정보 세트들을 다수의 독립 컴퓨터 호스트 애플리케이션들에 제공한다. 이러한 방식으로, 별도의 애플리케이션(즉, 진보된 공정 제어 소프트웨어)이 동일 또는 상이한 세트의 데이터를 수집할 수 있고 제 3의 애플리케이션(즉, 유지 애플리케이션 소프트웨어)은 동일 또는 상이한 세트의 데이터 또는 기기 상황을 수집할 수 있는 동안, 테스트 기기는 주 호스트에 의해 요청된 기능들을 실행하는 주 호스트 연결(즉, 프로세스 툴)에 연결될 수 있다.

[0273] 이는 강력한 개념이며, 여기서 테스트 기기는 주 호스트 애플리케이션을 사용하여 재료 처리의 주 목적을 위해 사용될 수 있고, 두 번째 애플리케이션(첫 번째 애플리케이션과 별개인)은 테스트 기기에 연결되어, 특정 오염 또는 진공 누설의 검출을 허용하는 데이터를 수집할 수 있다.

[0274] 도 38은 3개(또는 그 이상의) 호스트/클라이언트 연결부들로의 이더넷 TCP/IP 연결을 통해 네트워크에 연결된 ART MS 트랩의 개념을 보여 준다. ART MS는 진공 시스템 또는 챔버에 연결된 (도 38의 우측의) ART MS 센서에 의해 만들어진 전압력 및 분압 측정 정보/데이터를 제공하는 고성능 테스트 기기이다. ART MS 테스트 기기는 제어기, 센서 및 케이블을 가진다. 제어기에는, 전방 패널 사용자 인터페이스(디스플레이와 버튼들, 도시하지 않음)가 있으며, 후방 패널에는 다양한 입력/출력 전기 신호 연결부들, 셋포인트 릴레이들, 유니버설 시리얼 버스(USB) 데이터 연결부 및 이더넷 데이터 연결부가 있다. ART MS는 컴퓨터 기능들의 애플리케이션 프로그래머 인터페이스(API) 세트를 사용하여 전기 신호 연결부들, 셋포인트 릴레이들을 통하거나 USB 및/또는 이더넷 데이터 인터페이스들로의 외부 호스트 연결들에 의해서 접근되는 다수의 측정 출력 포맷들로 센서의 진공 측정을 처리하는 능력을 갖는다.

[0275] ART MS는 이더넷 커넥터와 하나의 USB-2 커넥터를 포함할 것이다. 이러한 커넥터들 중 임의의 커넥터에 연결된

장치들은 기기 특정 명령들과 응답들을 거쳐 ART MS의 데이터를 (마스터로서) 제어하거나 (모니터로서) 이에 접근할 것이다. 데이터 통신은 이더넷 프레임 또는 USB 데이터 패킷들의 페이로드가 될 것이다. 이더넷과 하나의 USB-2 커넥터는 ART MS 후방 패널 상에 위치한다. ART MS는 데이터 모니터들로서 다수의 클라이언트 연결부들을 지원할 것이나, 오직 하나의 장치가 ART MS 마스터가 될 수 있다.

[0276] ART MS는 사용자 수준 계층을 가지고 있다:

관리자: (만약 관리자가 마스터로서 등록을 하면) 이는 어떠한 마스터에 대해 우선권을 가질 수 있으며, 표준화된 API를 통해서 ART MS 장치의 모든 기능을 제어할 수 있고, 저장된 정보에 접근할 수 있는 특별한 수준의 사용자(아래를 참조)이다. 관리 마스터 또는 관리 모니터로서 등록할 수 있음에 주목하라. 오직 관리 마스터 등록만이 현존하는 마스터에 대해 우선권을 가지게 할 것이다. 관리 모니터들은 제한된 데이터에 접근할 수 있으나, 게이지를 제어할 수는 없다.

마스터: 이 수준의 사용자는 센서 드라이버와 데이터 수집 매개변수들을 구성할 수 있고, 전방 패널 버튼들과 디스플레이를 허용하거나 잠글 수 있다. 일 시점에는 오직 하나의 마스터만 존재한다. 클라이언트가 마스터로서 등록을 시도하고 하나의 마스터가 이미 존재하는 경우, 등록이 실패하거나 (현존하는 모니터에 모니터 등록을 강제하면서) 등록은 현존하는 마스터에 대해 우선한다.

모니터: 이 수준의 사용자는 API를 거쳐 수집된 데이터를 검색할 수 있으나, 데이터가 수집되는 방식이나 ART MS의 구성을 변경할 수 없다.

[0279] 이 사용자 수준들은 하나의 마스터가 ART MS와 많은 데이터 및/또는 유지 모니터들을 구동하도록 허용한다. 관리자는 종래의 호스트 연결부들과 독립적으로 ART MS 기능들에 대한 유지 및 지원 접근을 허용한다.

[0280] [0281] ART MS 전방 패널 어셈블리(FPA)는 그래픽 디스플레이와 버튼들로 구성되어 있으며, 전용 전방 패널 커넥터를 통해 ART MS에 연결되어 있다. 전방 패널은 ART MS에 기계적으로 부착될 수 있다. 이 연결 스팟에 있어서, FPA는 호스트 연결부이고, ART MS 파워 업 또는 포스트 리셋 상태에서 마스터이다. ART MS가 후방 패널 USB 또는 이더넷 연결부들을 통해 다른 호스트 연결부들과 함께 사용될 때, FPA는 마스터 또는 모니터가 될 수 있다. 유일한 예외는 마스터와 모니터 호스트 연결부들에 대해 우선권을 갖는 IG OFF 버튼이다.

[0282] 도 39에 도시된 독립형 적용에 있어서, 전방 패널 어셈블리(FPA)는 모든 기능들, 스캐닝 매개변수들 및 ART MS 상의 입력/출력 할당을 제어한다. FPA는 2개의 디스플레이 모드들을 가지고 있다.

[0283] 1. 선택 매개변수들(예를 들어, 선택된 상대 분압들 및/또는 분압들)을 모니터링하기 위해서.

[0284] 2. 선택 매개변수(예를 들어, RPP, PP, 또는 전압력)의 경향을 모니터링하기 위해서.

[0285] FPA는 또한 사용자가 메뉴 스크린을 통해 모든 데이터 수집 매개변수들과 입력/출력 할당들을 구성하는 것을 허용한다. 도 39는 전용 FPA 인터페이스 연결부를 통해 ART MS 주 제어기에 부착된 FPA를 보여 준다.

[0286] 도 40은 외부로 연결된 단일 호스트를 갖는 ART MS를 보여 준다. 일반적인 구성은 호스트/클라이언트로서의 PC 일 것이며 USB를 거쳐 연결되고, PC는 마스터이고 FPA는 모니터 기능을 실행한다. 여기에는 3개의 옵션이 있다.

[0287] 1. PC/호스트 마스터는 ART MS와 전방 패널 상에 표시되는 정보를 제어하고 구성한다(이는 가장 일반적인 구성으로 기대됨).

[0288] 2. PC/호스트 마스터는 ART MS를 제어하고 구성한다. FPA 디스플레이는 PC/호스트 마스터에 의해 또는 전방 패널 "모니터링" 기능으로부터의 선택에 의해서 제어된다. FPA 디스플레이가 전방 패널 버튼(들)에 의해 제어되면, 타임아웃은 다음 마스터 디스플레이 업데이트에 따라 자동적으로 FPA 디스플레이 제어를 마스터로 돌려 보낸다.

[0289] 3. PC/호스트는 오직 데이터를 수집하거나 ART MS의 성능을 모니터링하기 위한 모니터이다.

표 2

단일 호스트 연결 예에 대한 마스터 및 모니터 기능들

전방 패널	호스트/클라이언트	버튼들	디스플레이	입력들/출력들
모니터	마스터	필라멘트만	마스터를 따름	마스터를 따름

모니터	마스터	디스플레이 모드 및 필라멘트만	마스터 또는 모니터 (마스터는 타임아웃을 프로그래밍할 수 있음)	마스터를 따름
마스터	모니터	인에이블됨	마스터를 따름	마스터를 따름

[0291]

도 41은 외부로 연결된 호스트 적용들의 네트워크를 갖는 ART MS를 보여 준다. 일반적인 구성은 제조 과정 중에 정보를 수집하는 적용 특정 PC/서버들의 그룹일 것이다. 이 구성에 있어서, PC/서버들 중의 오직 하나가 마스터가 될 것이고, 이는 많은 경우에 있어, 프로세스 툴 또는 툴 제어기가 될 것이며, 다른 PC/서버들은 진보된 공정 제어 및/또는 처방 관리를 위한 정보를 수집한다. 마스터는 ART MS를 구성하고 제어한다. 다른 PC/서버들은 API 폴링 또는 게시/가입(publish/subscribe)을 통해서 ART MS로부터 정보를 수집한다. 이에는 2개의 옵션이 있다.

[0292]

1. PC/서버 마스터는 ART MS 및 FPA 디스플레이 정보를 제어하고 구성한다(이는 가장 일반적인 구성이 될 것으로 기대된다).

[0293]

2. PC 마스터는 ART MS를 제어하고 구성한다. FPA 디스플레이 정보는 마스터에 의해 또는 전방 패널 "모니터링" 기능으로부터의 선택에 의해서 제어된다. 만약 FPA 디스플레이가 전방 패널 버튼(들)에 의해 제어되면, 타임아웃은 다음의 마스터 디스플레이 업데이트에 따라 FPA 디스플레이가 마스터에 의해 제어되도록 자동적으로 되돌린다.

[0294]

도 42는 ART MS를 위한 마스터 및 모니터 제어에 대한 로컬(FPA) 및 원격(호스트) 제어로부터의 상태 전환을 보여 준다. 전력 공급(리셋 상태)(0)에서는 제어기의 초기화가 일어난다. 다른 마스터가 등록할 때까지, 내부 저장 프로그램은 제어기이다. (1) FPA가 "로컬 마스터"이고, 원격 연결이 확립되어 있지 않거나 원격 연결부가 모니터들이고, FPA 디스플레이는 FPA의 제어 하에 있고, 모든 FPA 버튼들은 인에이블된다. 여기서, FPA 제어 기능은 내용을 표시하고 ART MS 주 제어기로 API 호들을 통해 필요한 FPA 데이터를 끌어 오기 위해서 작은 애플리케이션을 가동한다. (2) 원격 클라이언트가 마스터가 된다. 로컬 마스터는 우선권을 가지게 되고 모니터 상태로 강제될 수 있다. FPA 디스플레이는 원격 마스터의 제어 하에 있으며, FPA 버튼들은 디스에이블된다(필라멘트 온/오프 버튼은 안전 상의 이유로 인에이블 상태를 유지한다).

[0295]

다중 연결 개념은 ART MS에 대해서 독특한 것은 아니며, 다른 기기가 이 다중 호스트/클라이언트 연결 접근 방법으로부터 이익을 얻을 수 있다. ART MS는 상이한 적용들에서 매우 다양한 방식으로 사용될 수 있는 다수의 태입의 측정들(전압력, 분압, 상대 분압)의 풍부한 데이터 세트를 제공한다. 그러나, (전압력과 같이) 더 단순한 데이터 태입 출력을 제공하는 다른 기기들은 주 호스트 연결부가 프로세스 툴이고 부 호스트 연결부가 서비스 요건들을 예견하거나 데이터베이스로 데이터를 저장하기 위해서 기기의 매개변수들을 모니터링하는 공급자 제공 서비스 애플리케이션인 경우 동일한 접근 방법을 사용할 수 있다.

[0296]

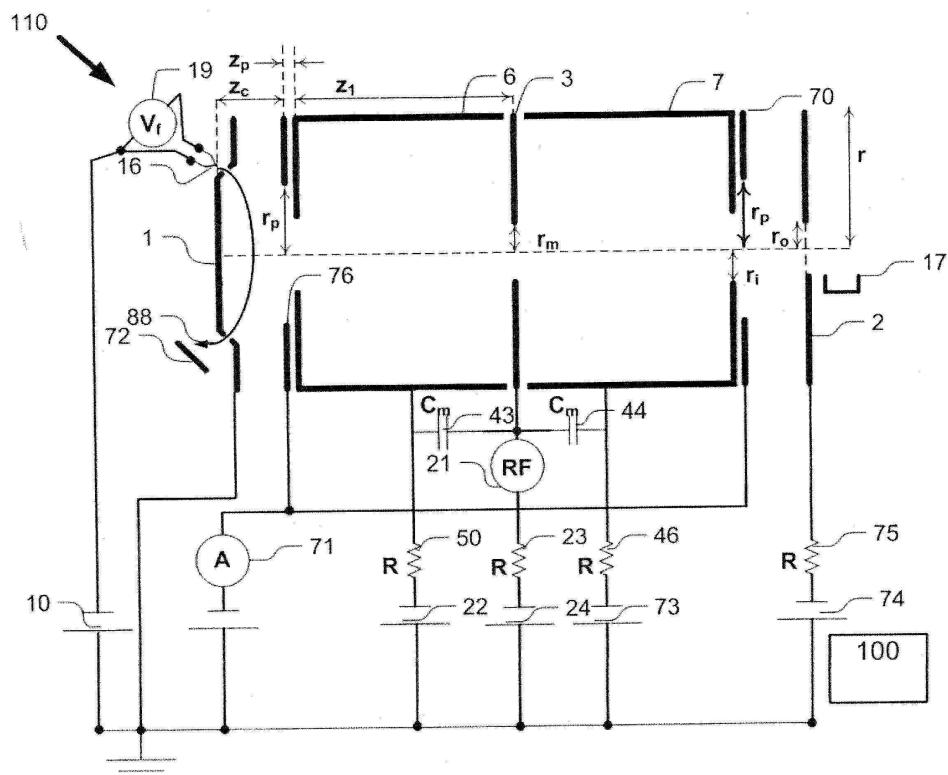
여기에서 인용되는 모든 특허들, 공개된 출원들 및 참고자료들의 교시들은 그 전체가 참고로서 포함된다.

[0297]

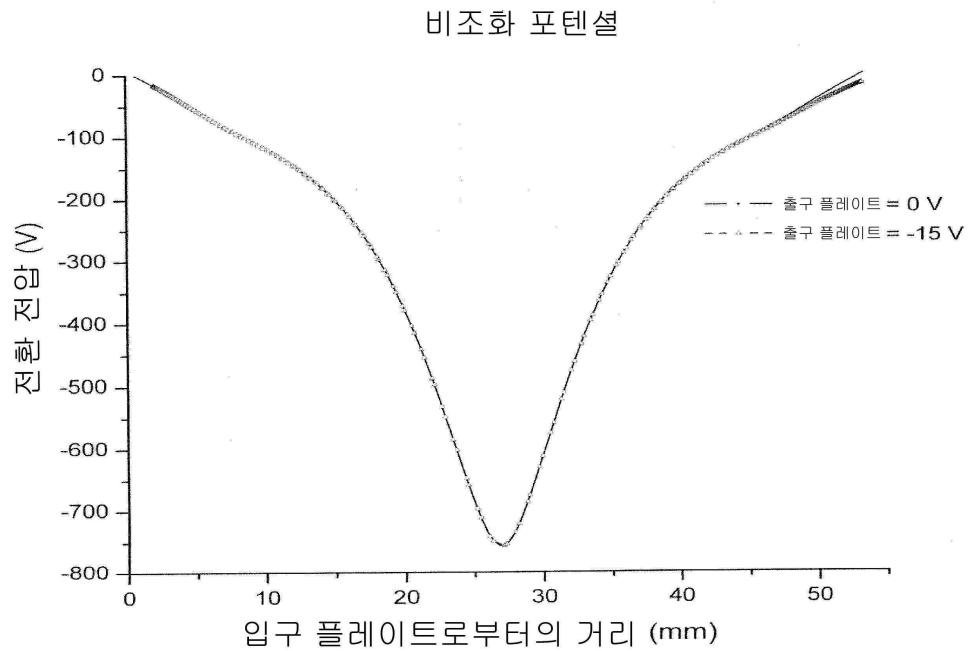
본 발명이 예시적인 실시예들을 참조하여 특히 도시되고 설명되었으나, 본 기술분야의 기술자는 첨부된 청구항들에 의해 한정되는 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 형태와 상세한 사항들의 다양한 변화가 이루어질 수 있음을 이해할 것이다.

도면

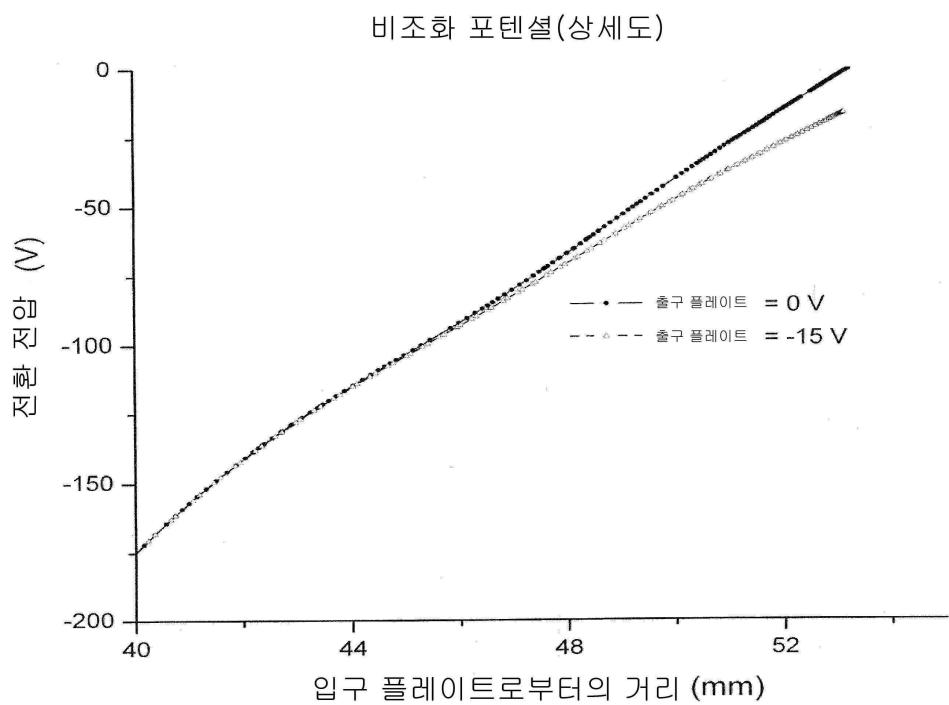
도면1



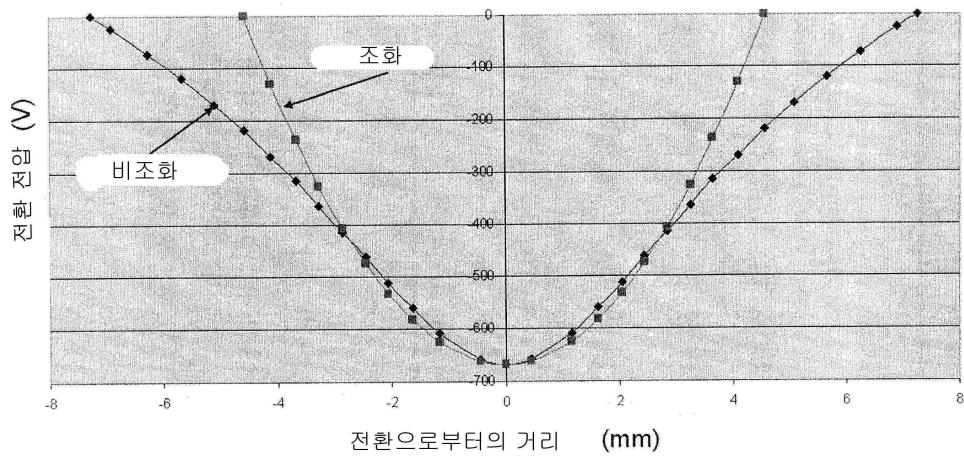
도면2a



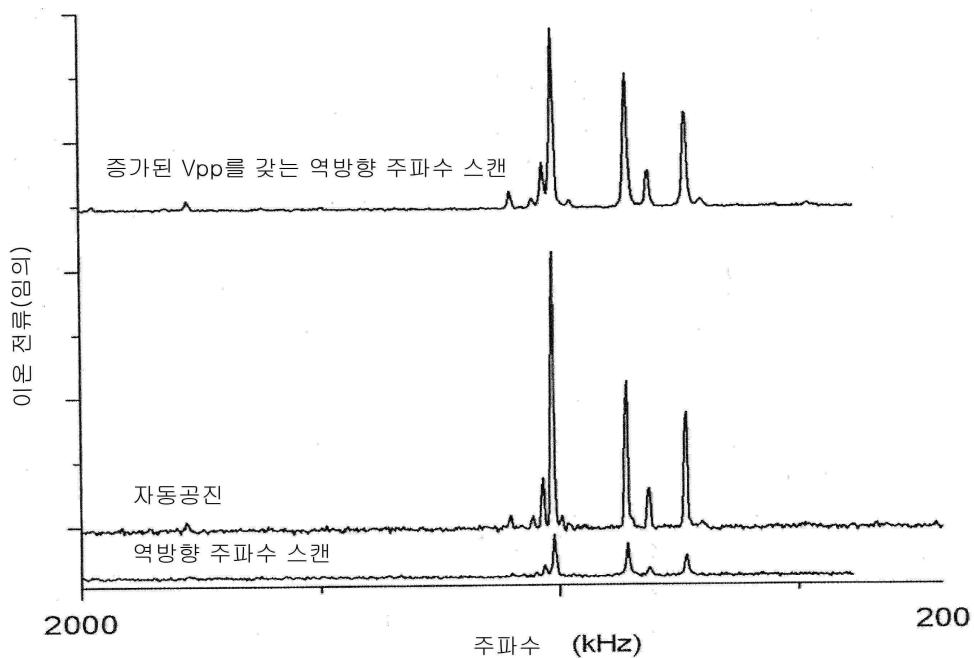
도면2b



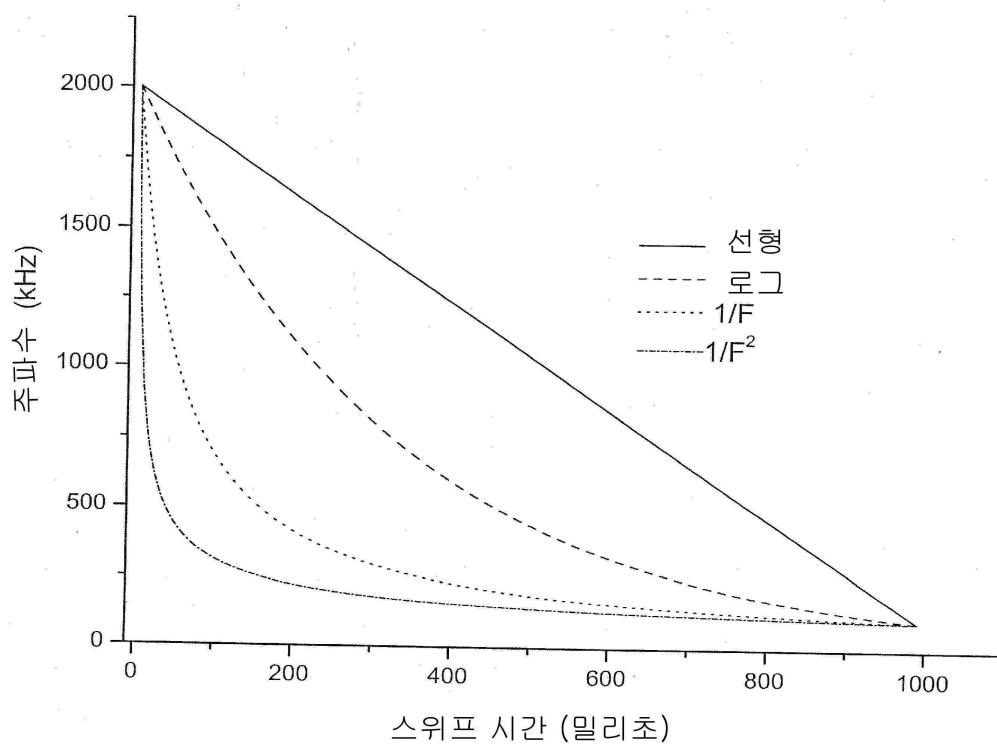
도면2c



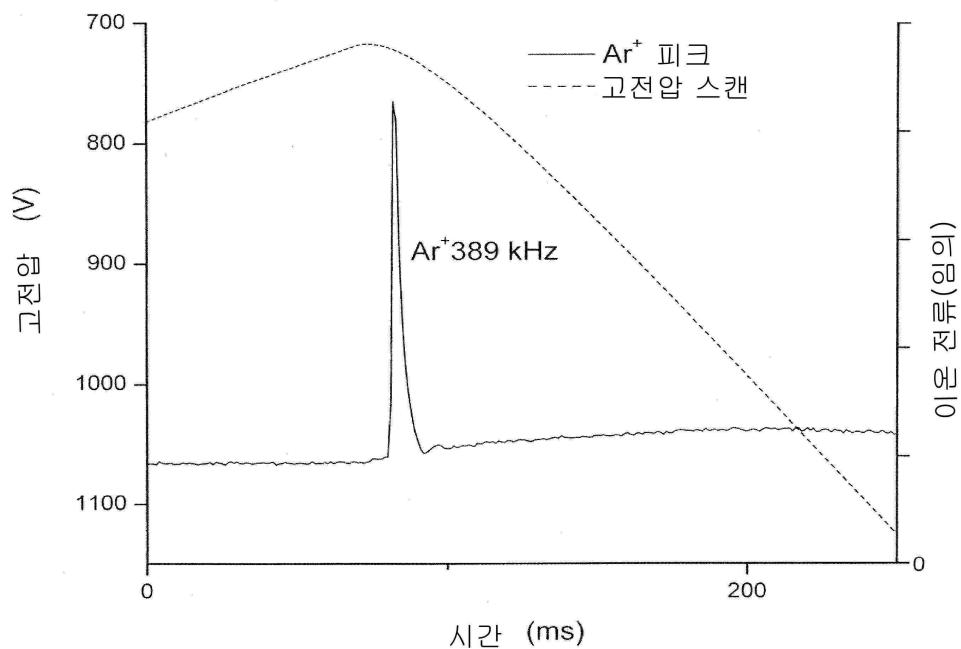
도면3



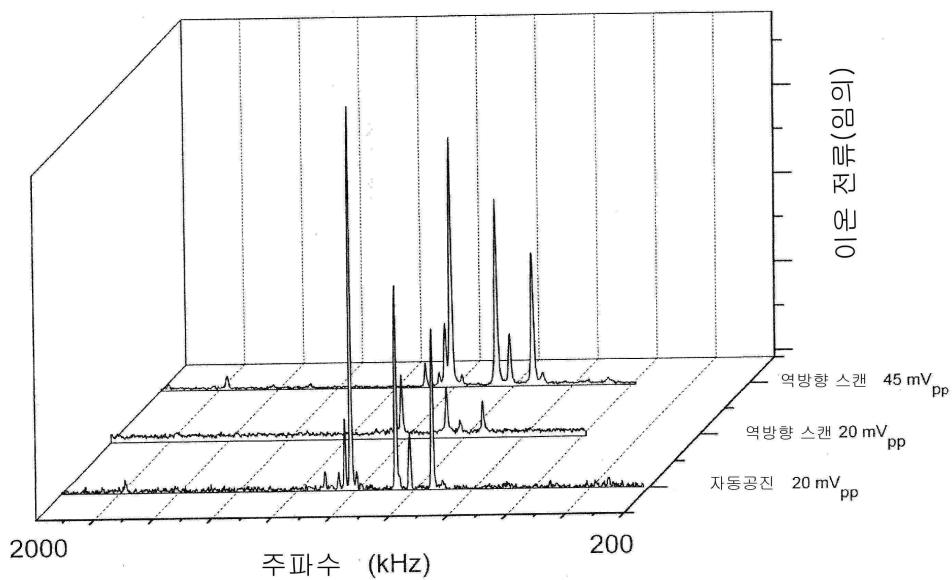
도면4



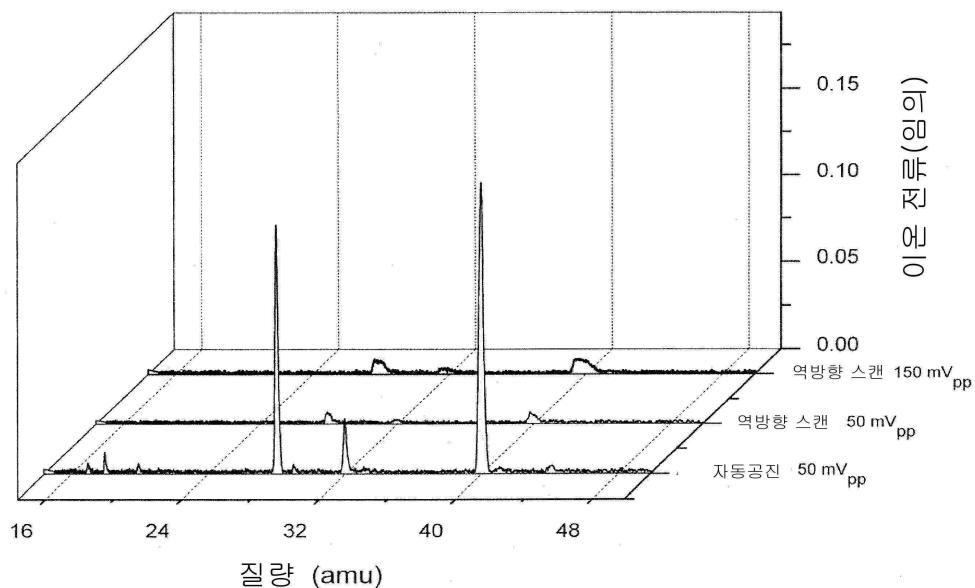
도면5a



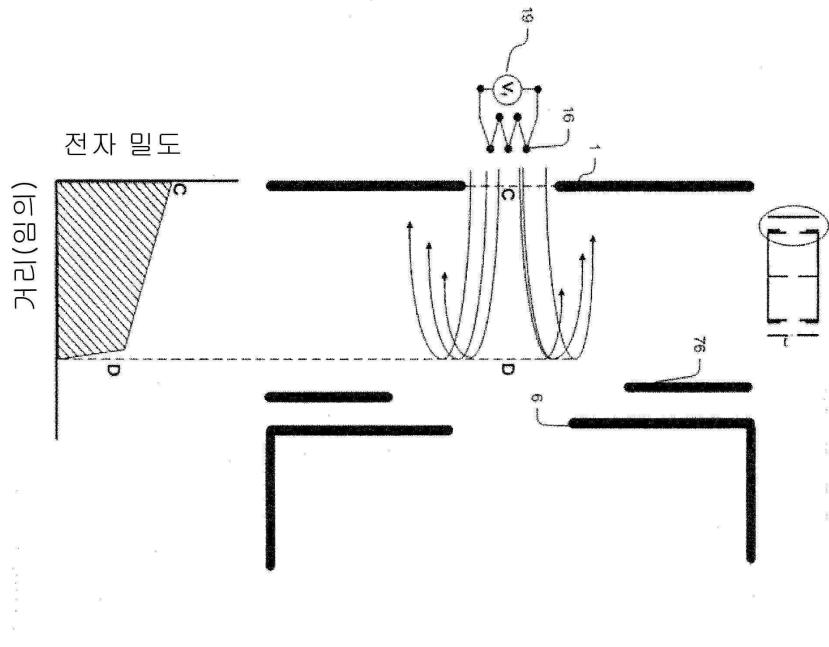
도면5b



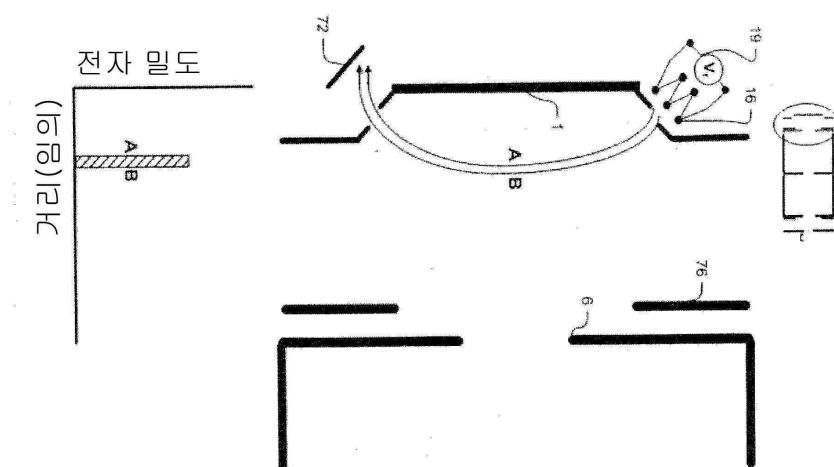
도면5c



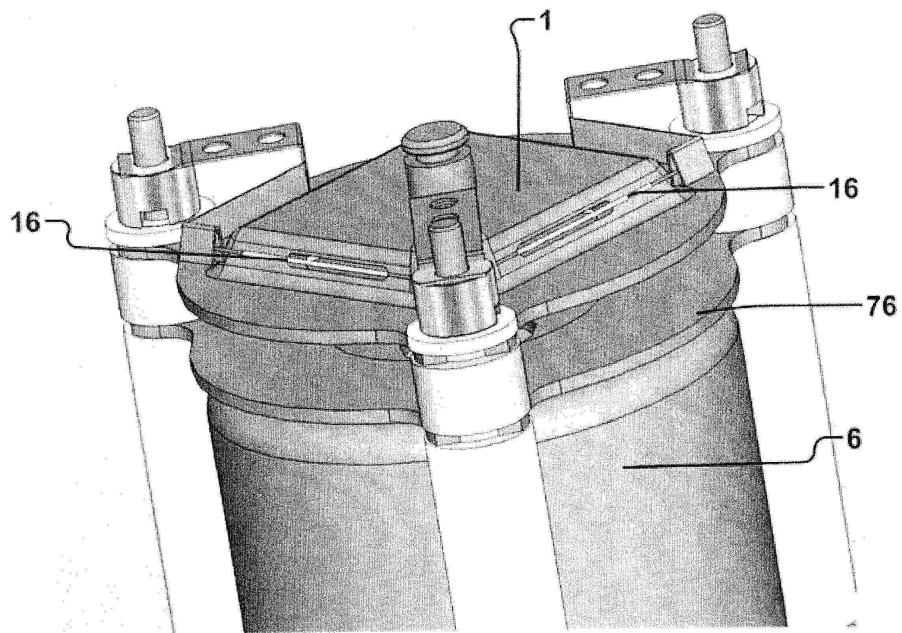
도면6a



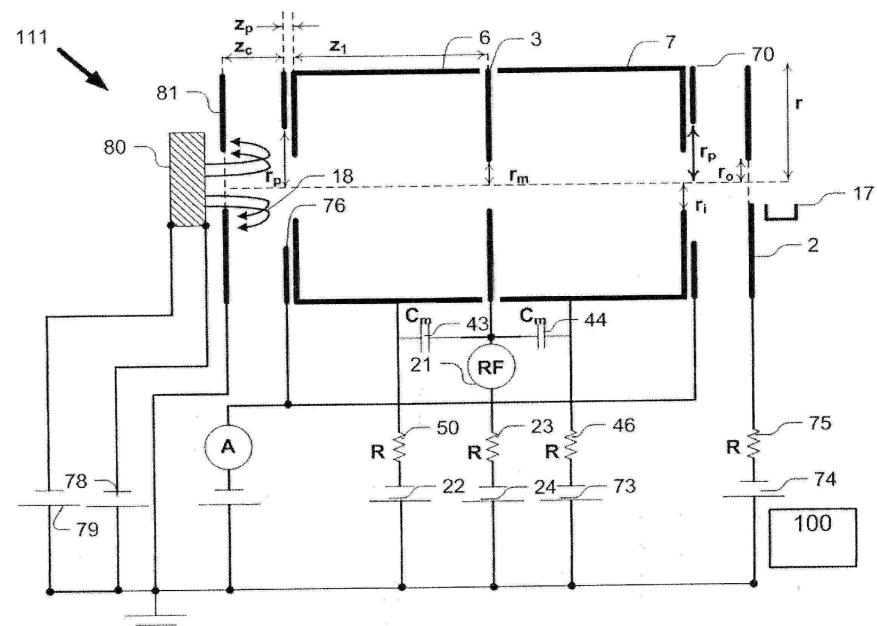
도면6b



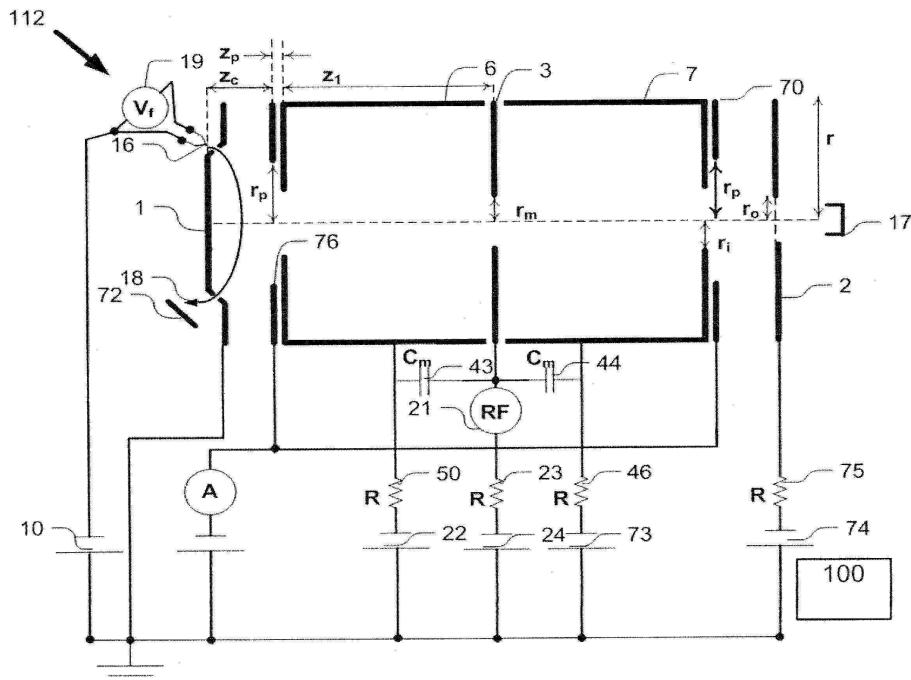
도면7



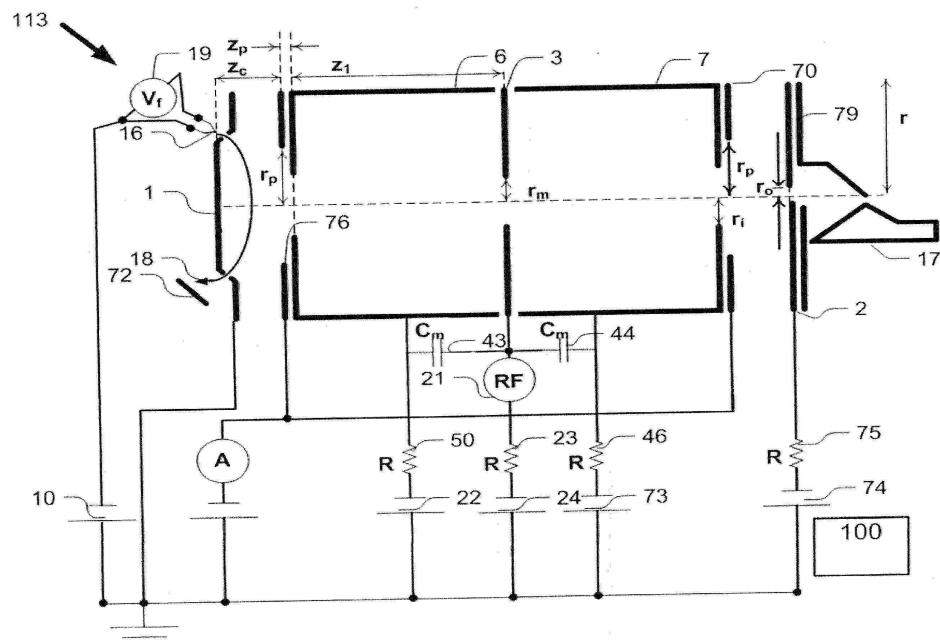
도면8



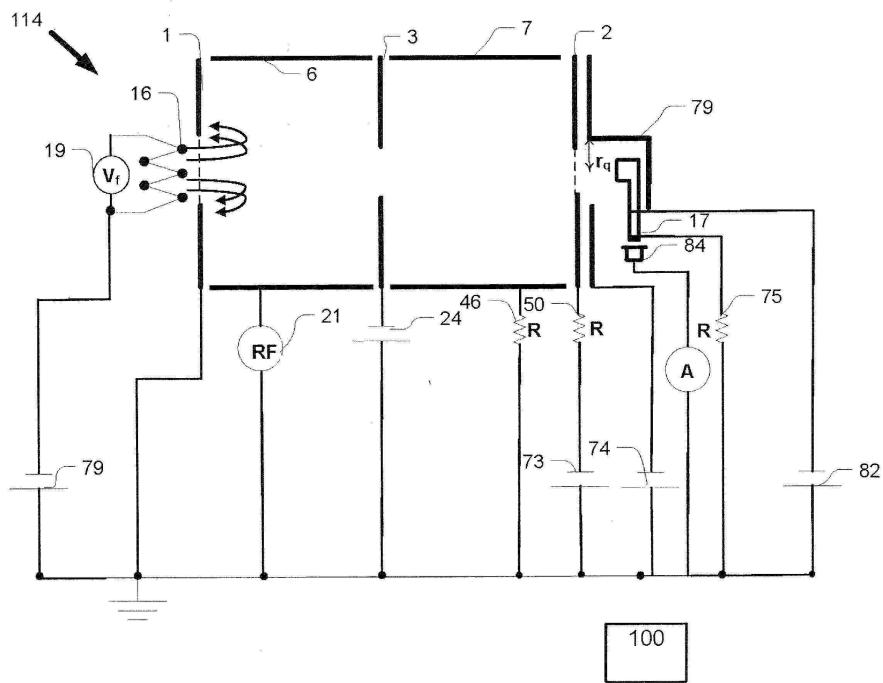
도면9



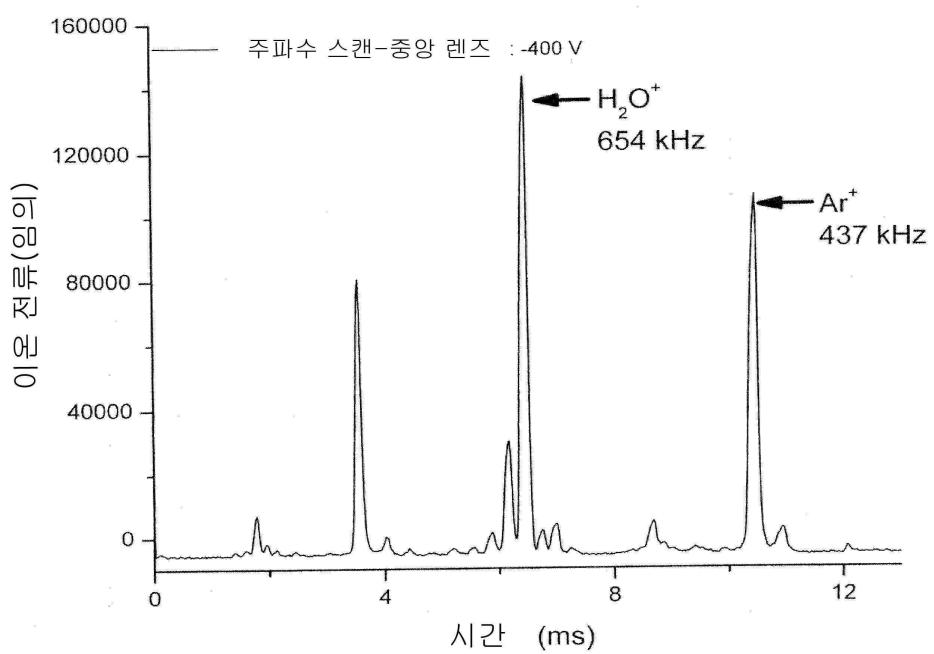
도면10



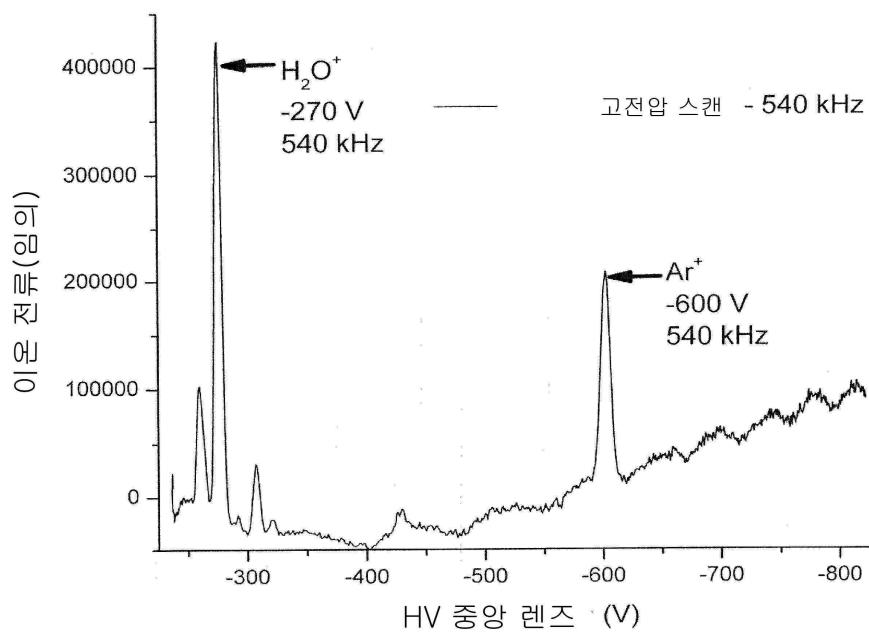
도면11



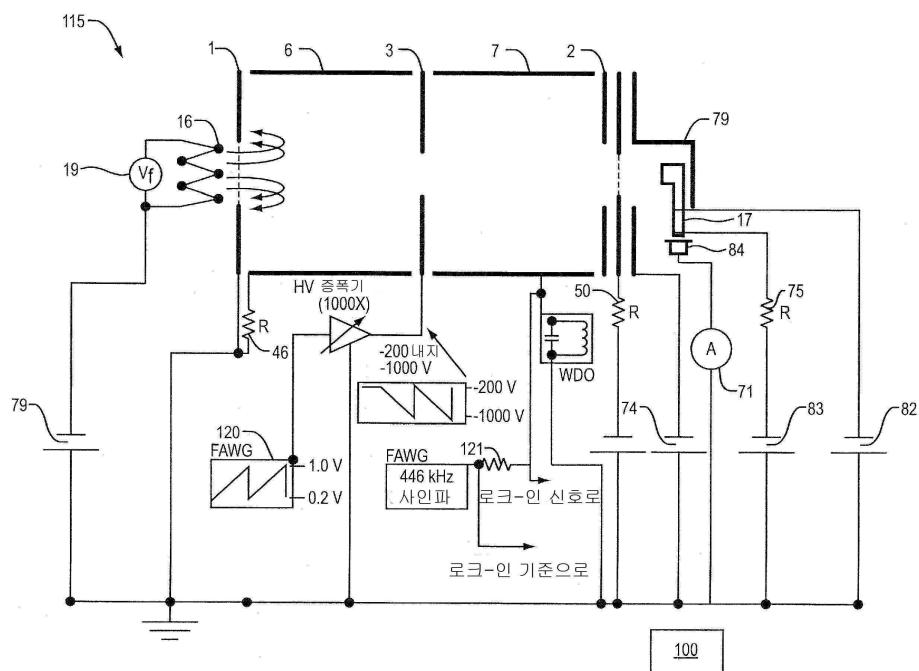
도면12



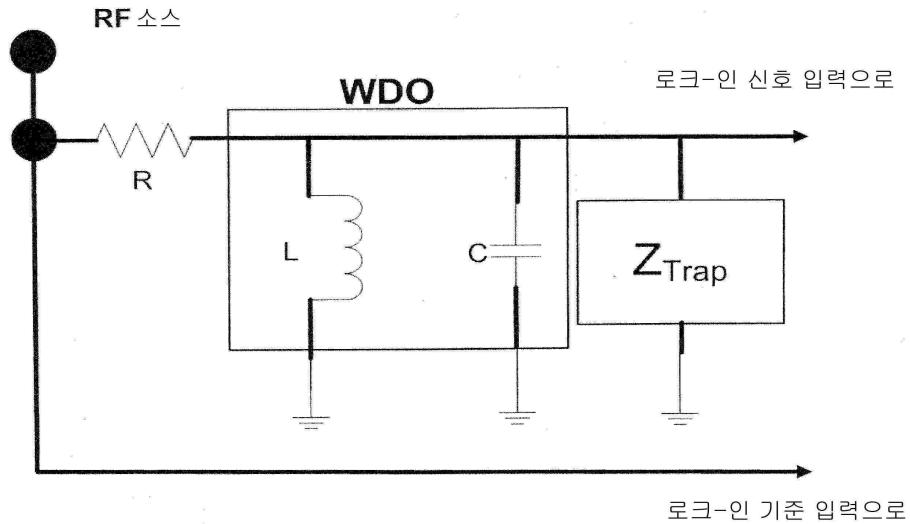
도면13



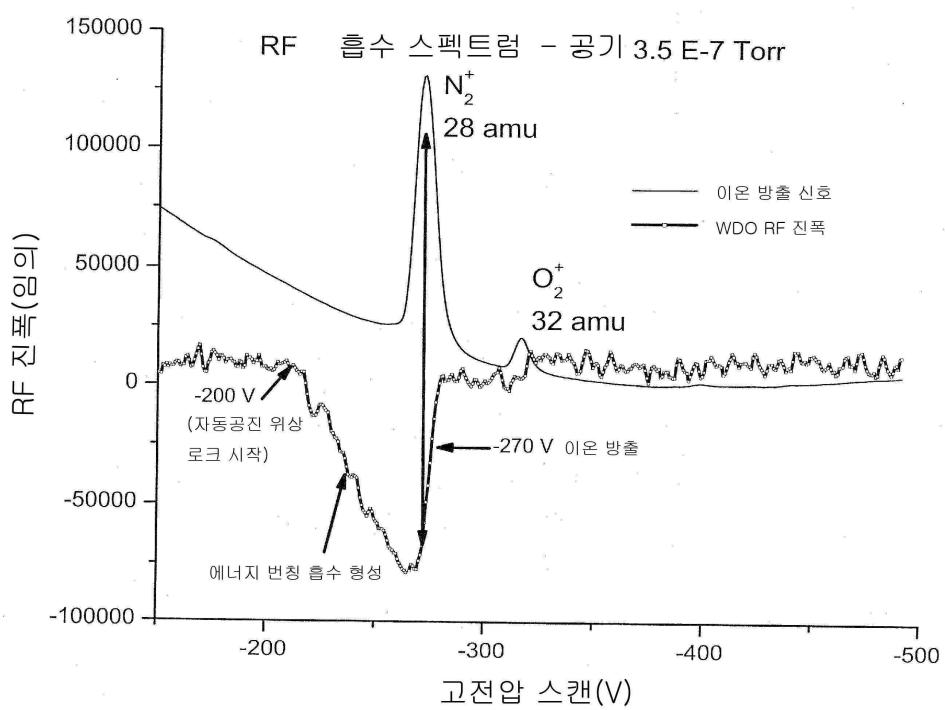
도면14



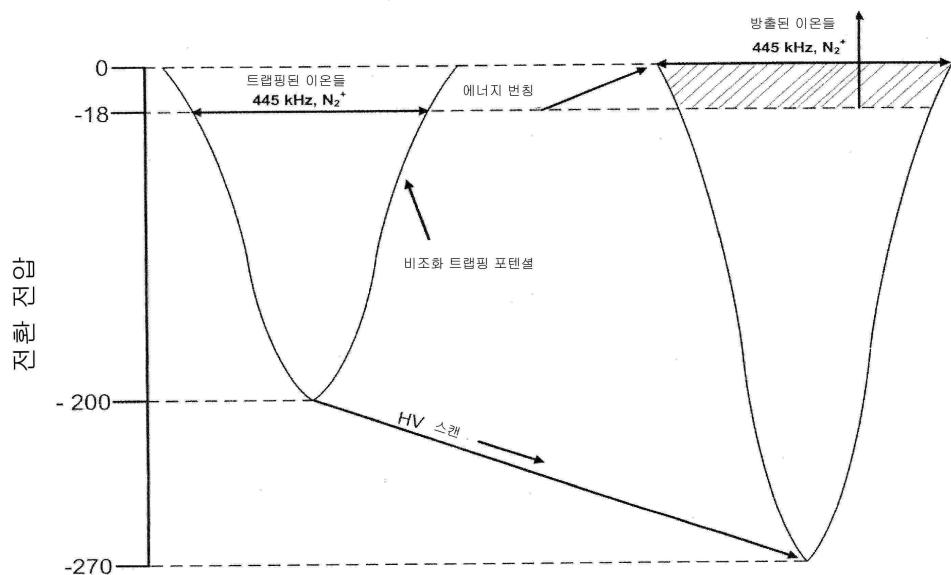
도면15



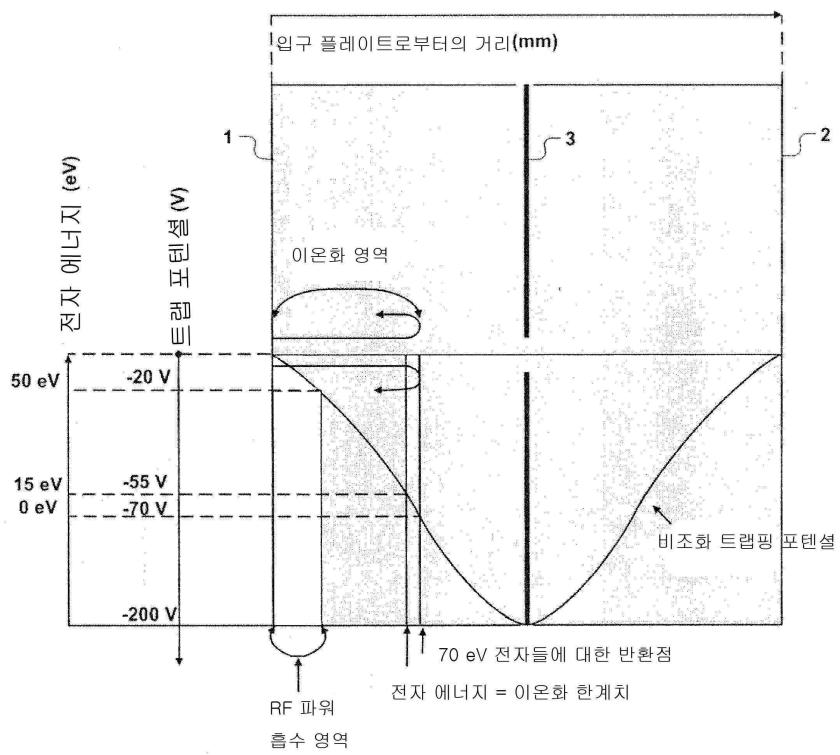
도면16



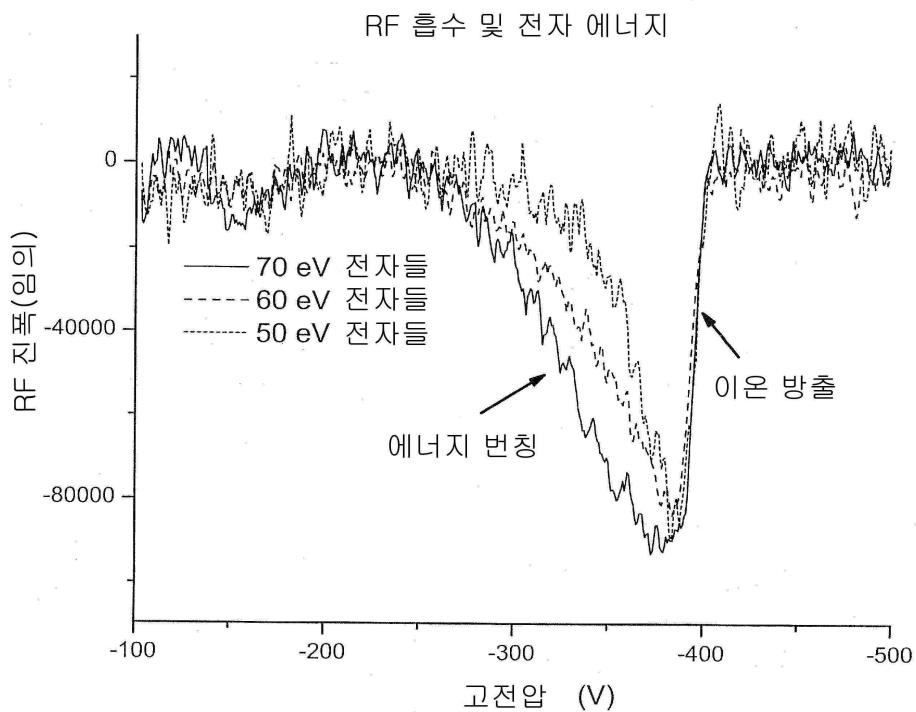
도면17



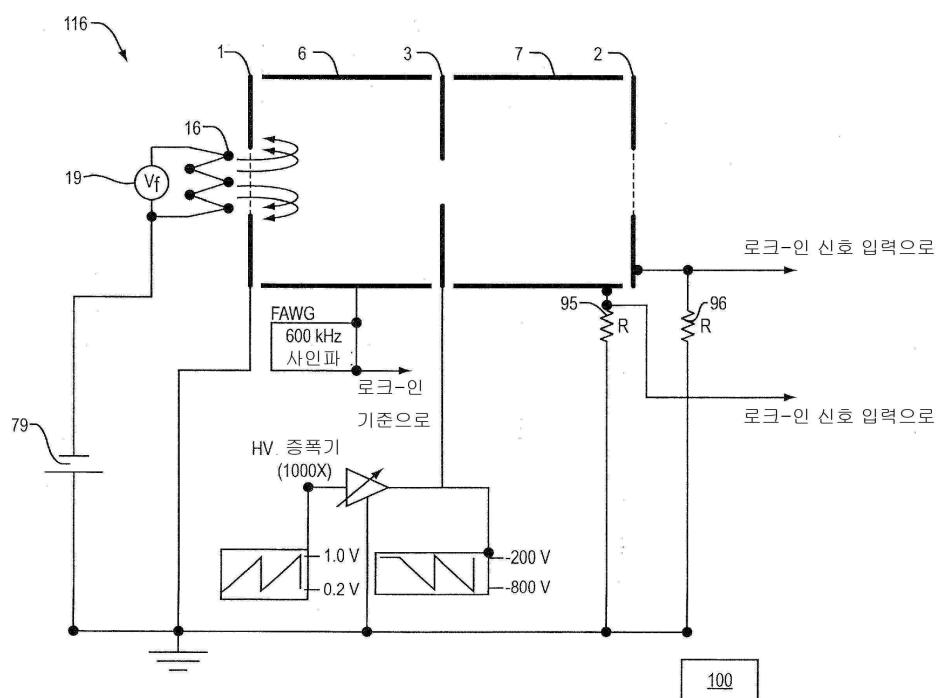
도면18



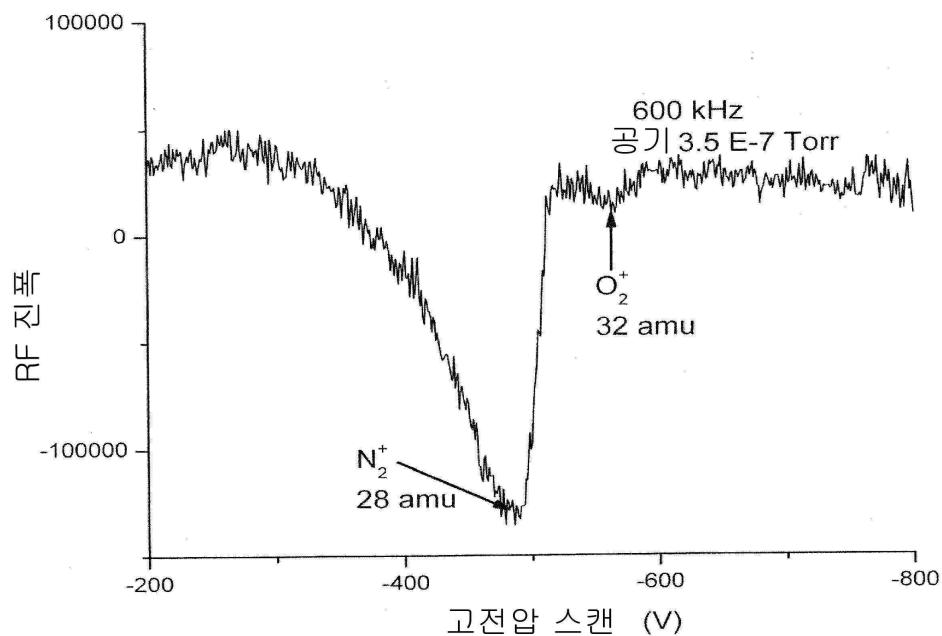
도면19



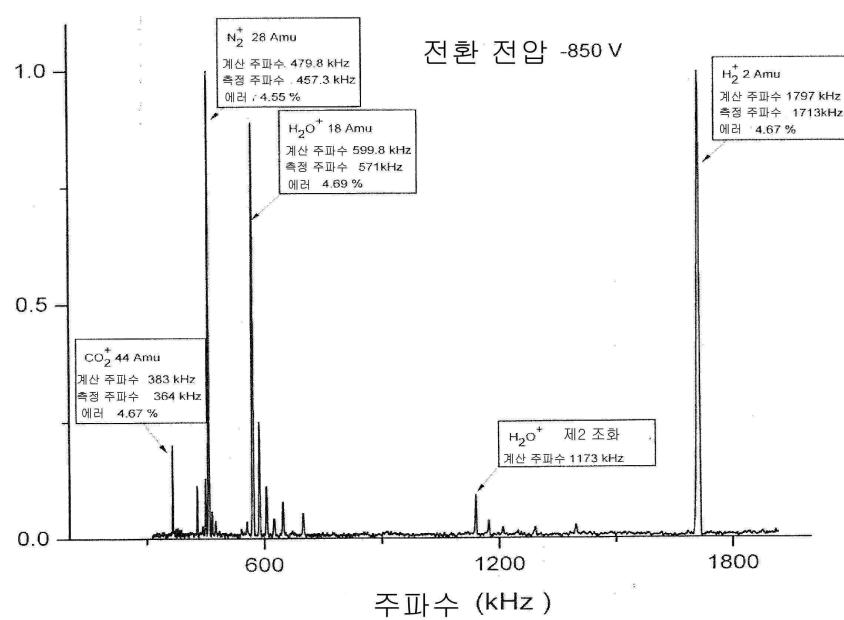
도면20



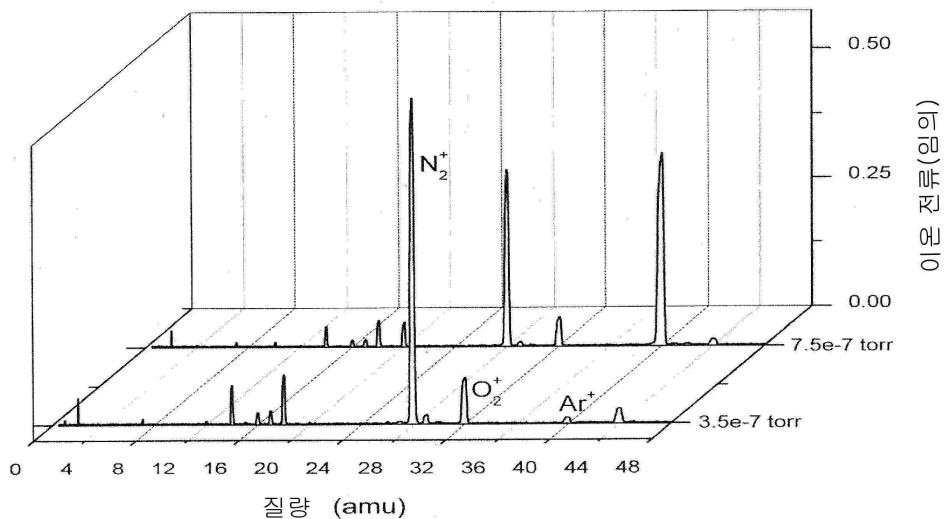
도면21



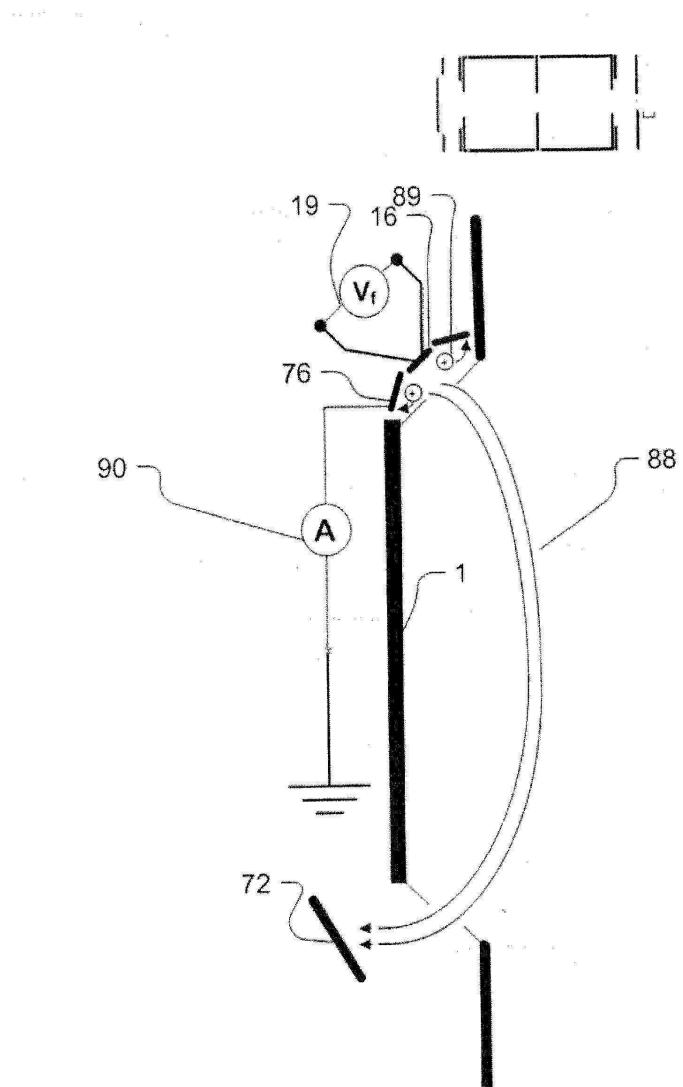
도면22



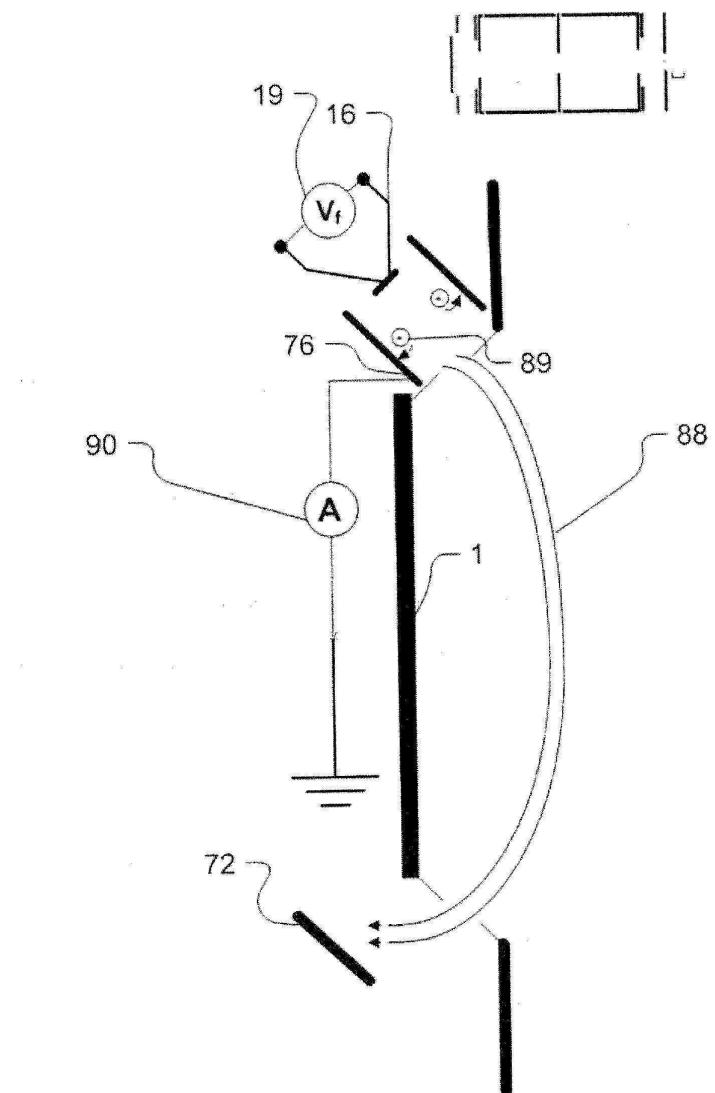
도면23



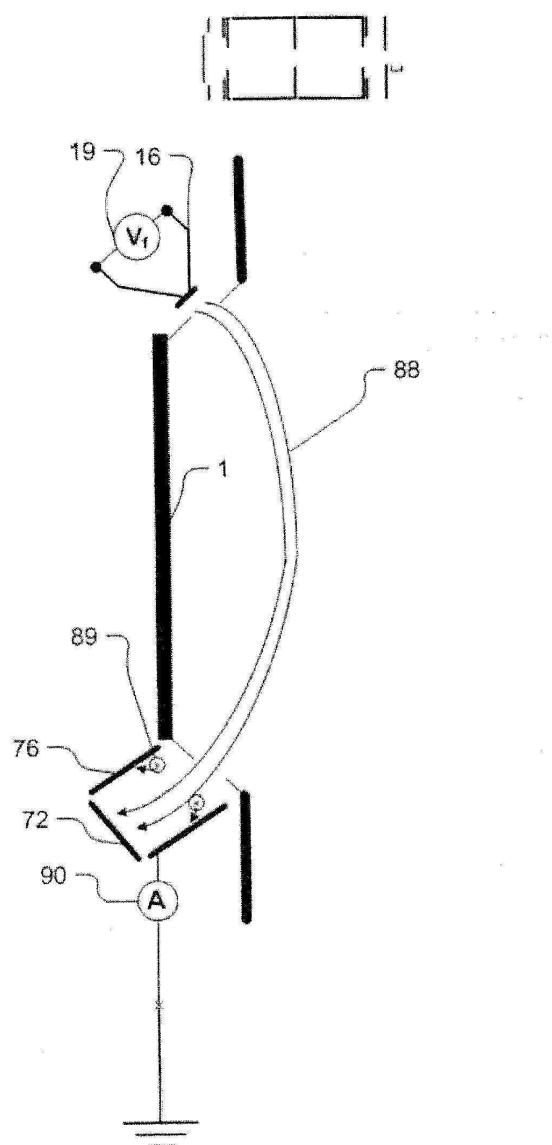
도면24



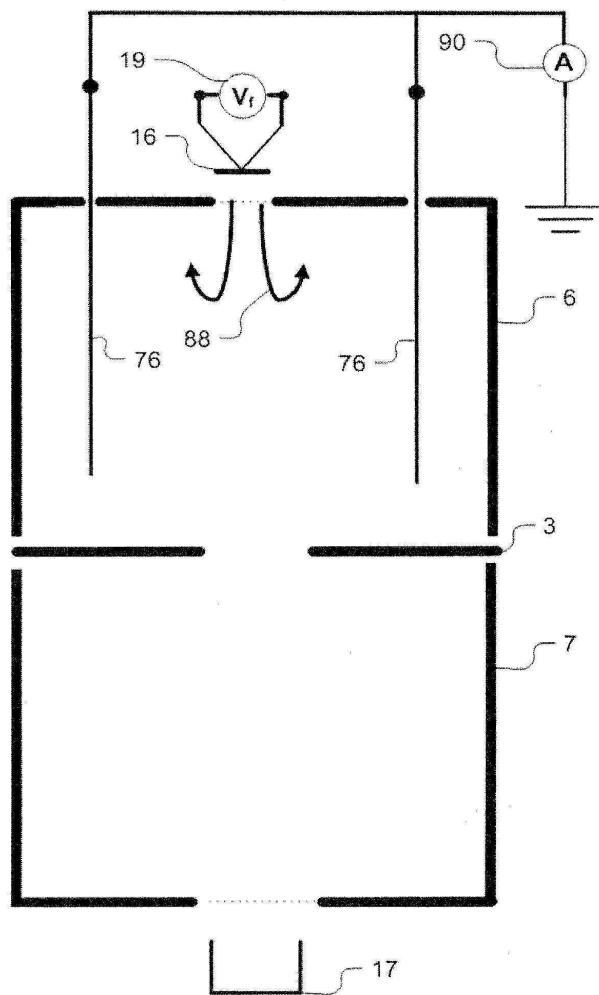
도면25



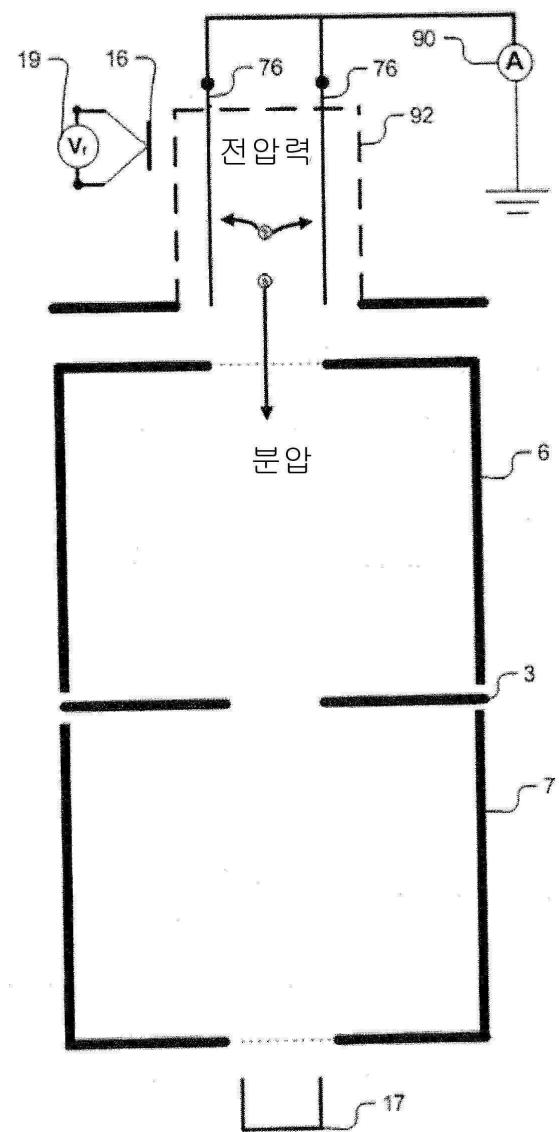
도면26



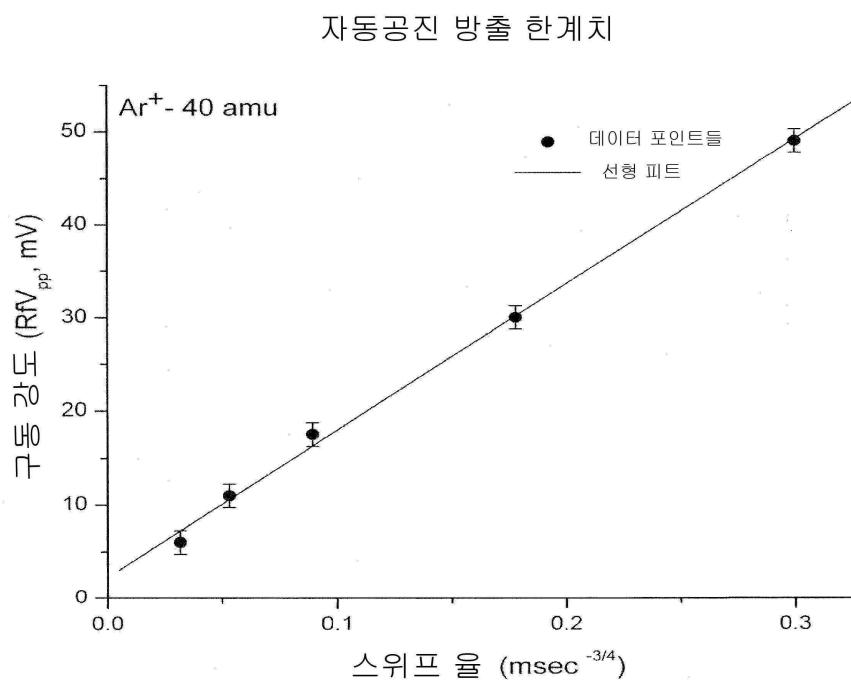
도면27



도면28

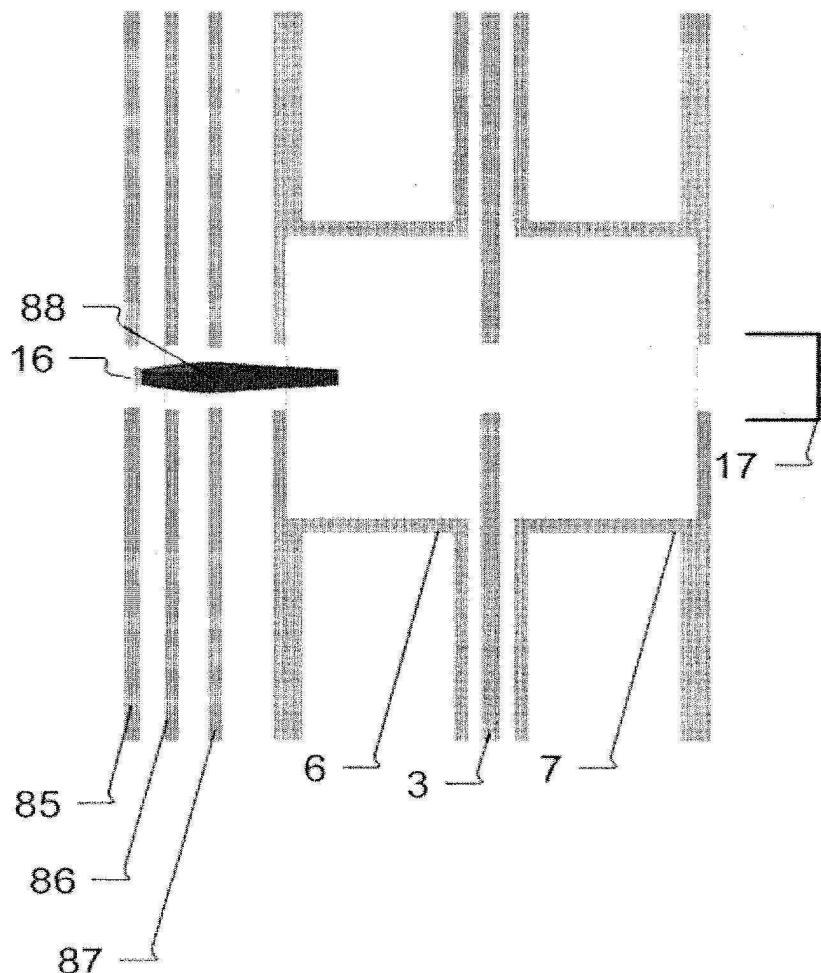


도면29



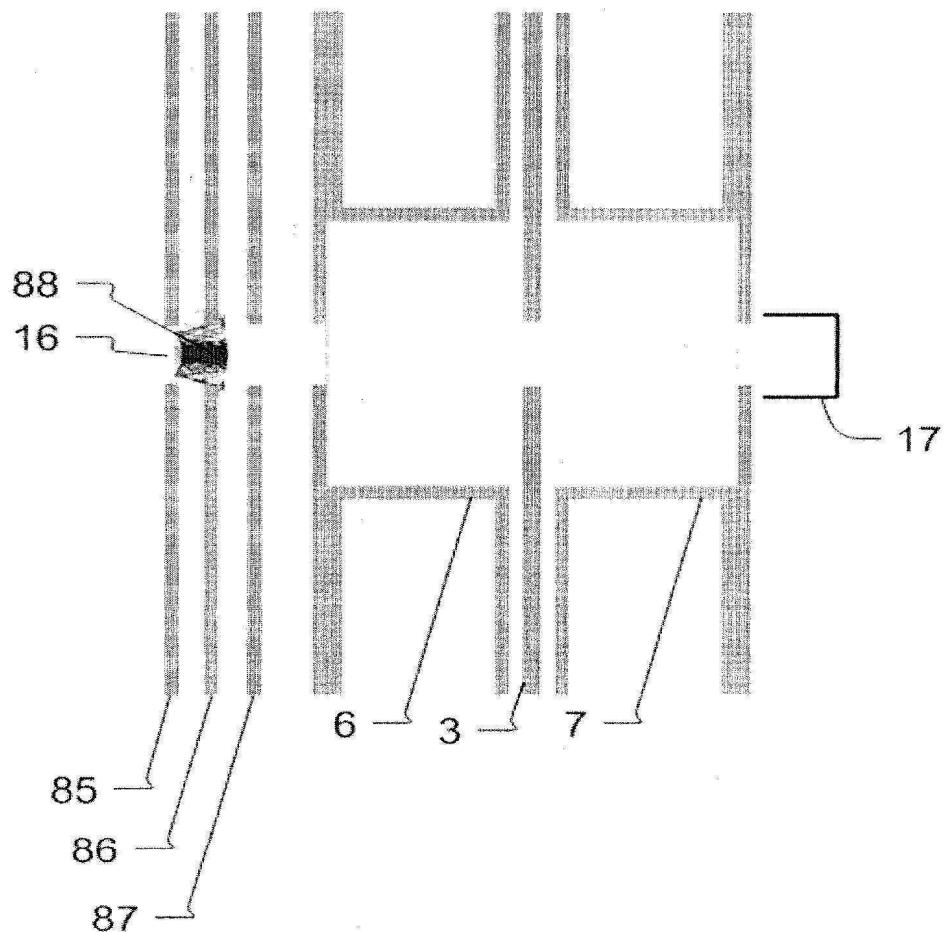
도면30a

개방된 게이트

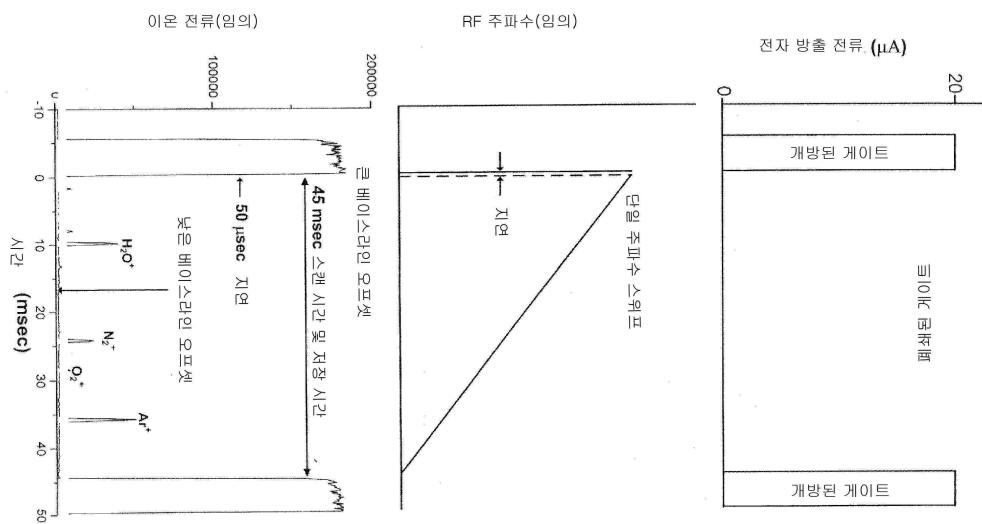


도면30b

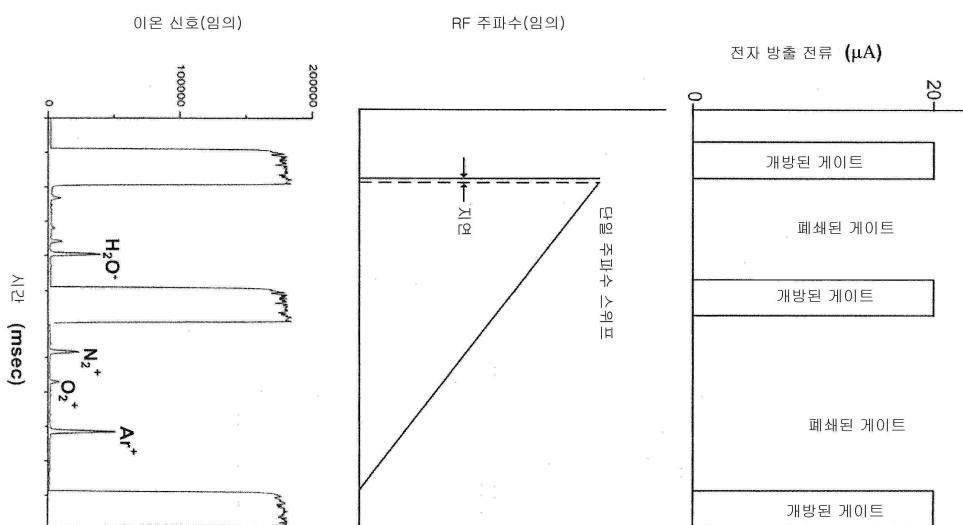
폐쇄된 게이트



도면31

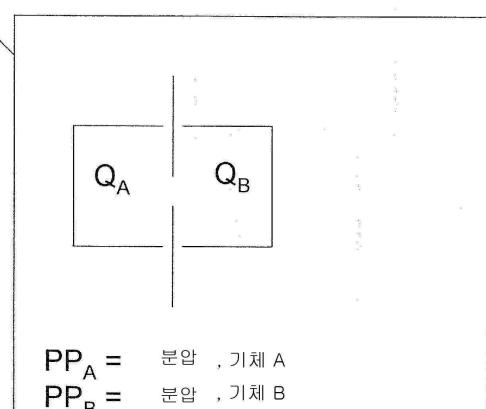


도면32



도면33

챔버



$$Q_A = \text{기체 A에 대한 전하}$$

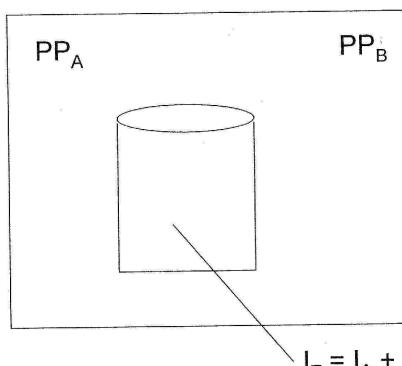
$$Q_B = \text{기체 B에 대한 전하}$$

$$X_{AB} = \text{가중 인자}$$

$$\frac{Q_B}{Q_A} = \frac{PP_B \cdot X_{AB}}{PP_A}$$

$$X_{AB} = \frac{\text{이온화 효율 기체 B}}{\text{이온화 효율 기체 A}}$$

도면34



$$P_T = \text{이온화 게이지에 의해 보고된 전압력}$$

$$\alpha = \text{Amp/Torr의 민감도 인자}$$

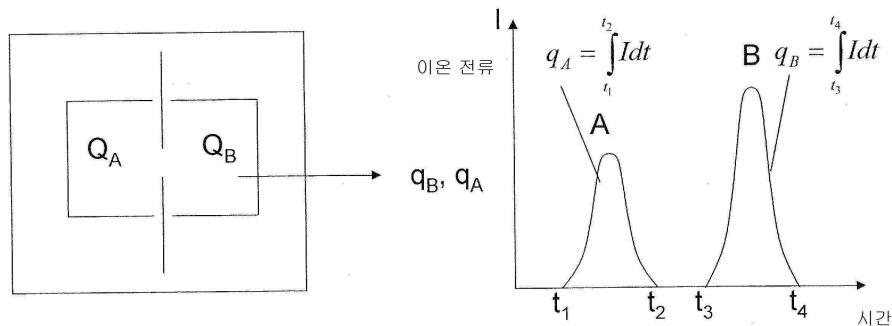
$$P_T = PP_A + X_{AB} PP_B$$

$$X_{AB} = \frac{\text{이온화 효율 기체 B}}{\text{이온화 효율 기체 A}}$$

$$I_T = \alpha [PP_A + X_{AB} PP_B]$$

$$P_T = I_T / \alpha = PP_A + X_{AB} PP_B$$

도면35



$$\frac{Q_B}{Q_A} = \frac{q_B}{q_A} = \frac{PP_B \cdot X_{AB}}{PP_A}$$

Q_A = 기체 A의 농도에 상응하여 저장된 전하

q_A = 기체 A에 상응하여 방출된 전하

$Q_T =$ 트랩의 총 전하 $= Q_A + Q_B =$ 상수

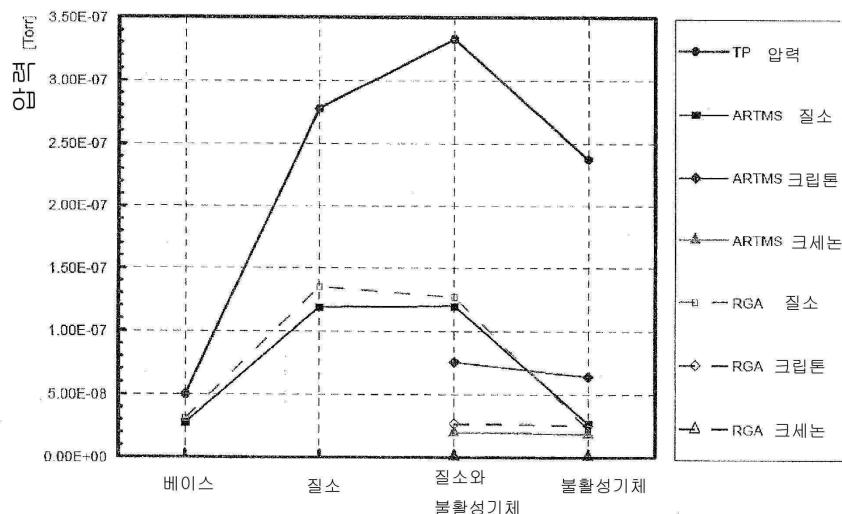
$q_T =$ 트랩에서 방출된 총 전하 $= q_A + q_B$

도면36

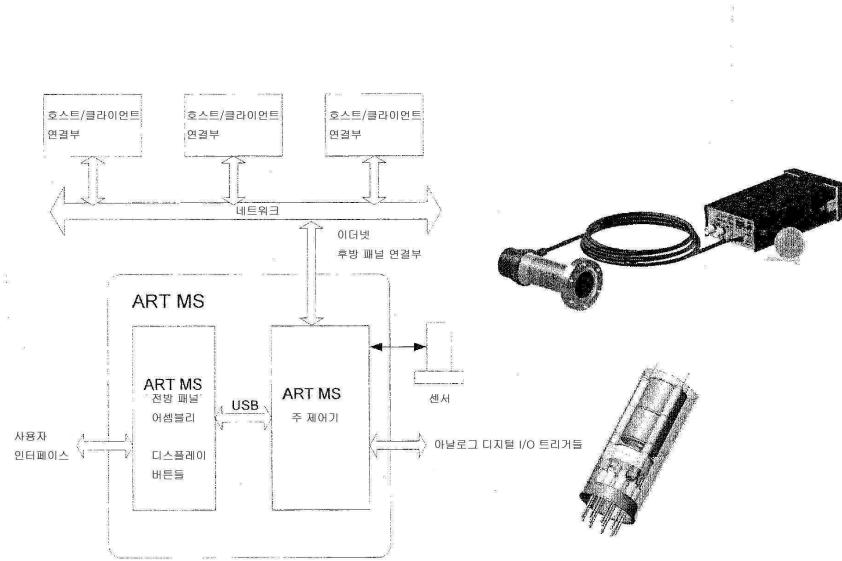
$$P_T \cdot \frac{q_A}{q_T} = (PP_A + X_{AB} PP_B) \cdot \frac{q_A}{q_A + q_B} = (PP_A + X_{AB} PP_B) \cdot \frac{1}{1 + \frac{q_B}{q_A}} = (PP_A + X_{AB} PP_B) \cdot \frac{1}{1 + \frac{PP_B X_{AB}}{PP_A}} = (PP_A + X_{AB} PP_B) \cdot \frac{PP_A}{PP_A + PP_B X_{AB}} = PP_A$$

도면37

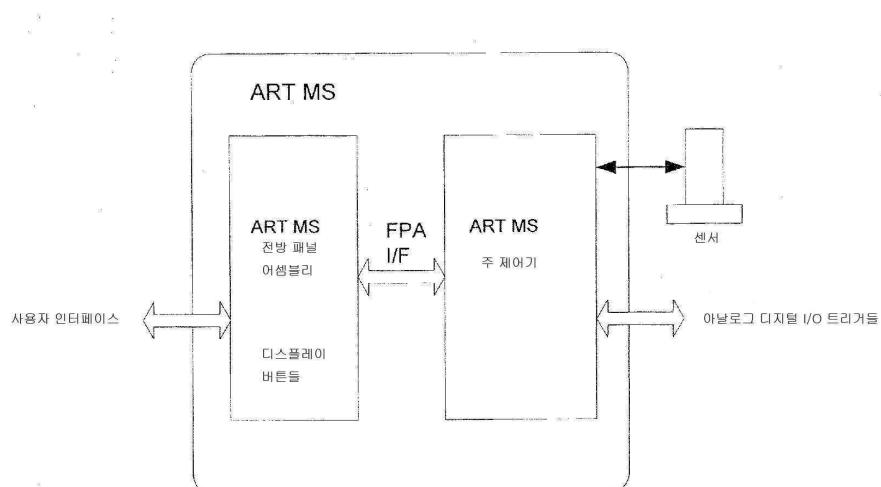
ART MS 대 RGA의 분압



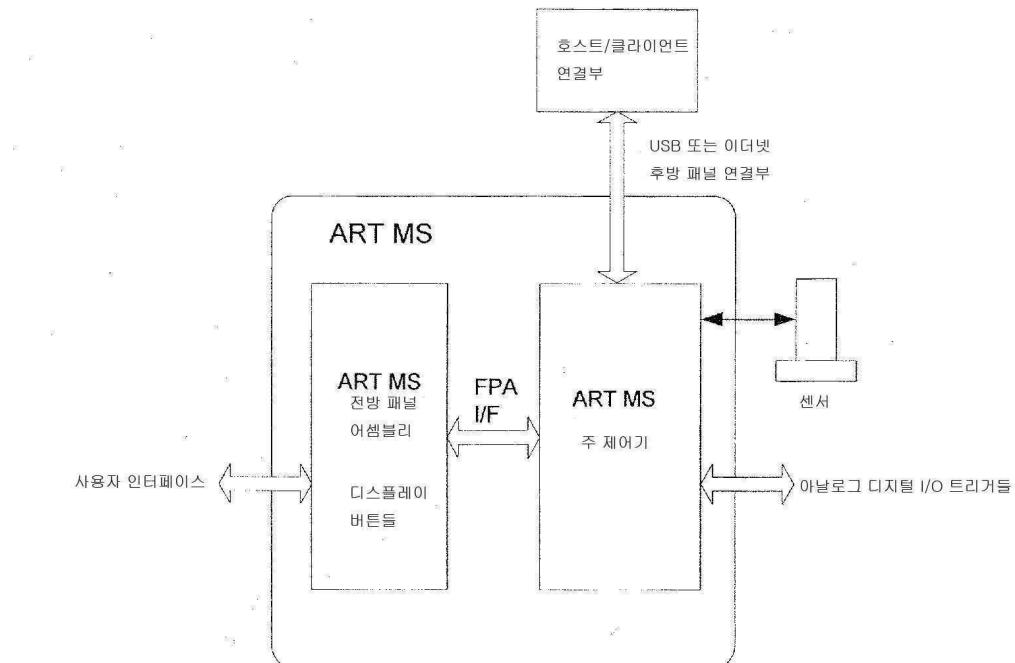
도면38



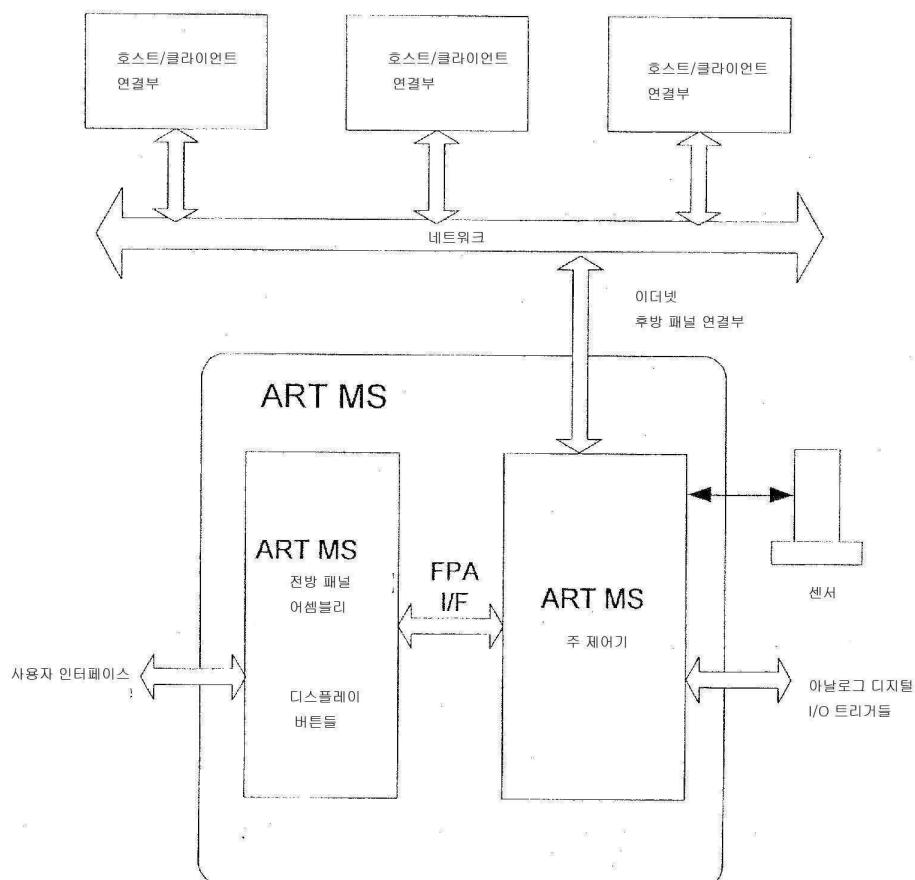
도면39



도면40



도면41



도면42

전력 공급