



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0097161
(43) 공개일자 2020년08월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01J 37/32 (2006.01) H03H 7/38 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01J 37/32183 (2013.01)
H03H 7/38 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0014594
(22) 출원일자 2019년02월07일
심사청구일자 2020년04월22일

(71) 출원인
엠케이에스코리아 유한회사
경기도 용인시 기흥구 원고매로 12 (고매동, 넥 사이언스공장비동6층)
(72) 발명자
이창희
대전광역시 유성구 배울2로 24, 307-903
김하남
대전광역시 유성구 관들4길 65, 401
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인 누리

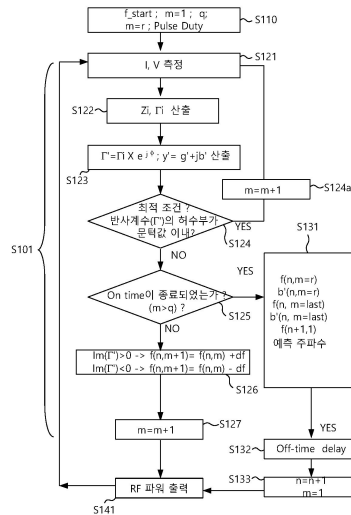
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법

(57) 요약

본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 튜닝 임피던스 매칭 방법은 사용자가 설정한 시작 구동 주파수(Start Driving Frequency)와 RF 출력신호를 분석하여 구동 주파수를 변경한다. 구체적으로, n 번째 펄스 내에서 측정된 어디미턴스의 허수부인 서셉턴스를 이용하여 다음 주파수를 예측할 수 있다. 이에 따라, 임피던스 매칭이 고속으로 수행되거나, 고속으로 최적 주파수에 도달할 수 있다.

대표도 - 도7



(72) 발명자

김종민

세종특별자치시 시청대로 236, 306-704

허진

대전광역시 유성구 배울2로 61, 1015-1501

룽켈빈

중국 선전시 바오안구 시샹현 베이바로 허저우 개
발구 홍상공업단지

명세서

청구범위

청구항 1

교번하는 온타임 구간(T_ON)과 오프 타임 구간(T_OFF)의 펄스로 RF 전력을 부하에 제공하고, 상기 온타임 구간(T_ON) 내에서 구동 주파수를 변경하는 제어 루프를 포함하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 임피던스 매칭 방법에 있어서,

n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 구동 주파수(f(n,m))를 변경하는 단계;

상기 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))의 어드미턴스를 이용하여 n+1 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n+1))의 구동 주파수를 예측하는 단계; 및

n+1 번째 펄스의 온타임(T_ON(n+1))에서 상기 예측된 구동 주파수(f(n+1,1))로 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 RF 출력을 제공하는 단계를 포함하고,

여기서,

f(n,m)은 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n)) 내에서 m 번째 처리 회수에서 구동 주파수이고,

n은 펄스의 순번을 나타내고,

m은 1 내지 q 사이의 양의 정수이고,

m은 온타임 구간(T_ON) 내에서 구동 주파수의 변경을 위한 상기 제어 루프의 처리 회수를 나타내는 인덱스를 나타내는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 2

제1 항에 있어서,

n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 구동 주파수(f(n,m))를 변경하는 단계는:

n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 측정하는 제1 단계;

n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서에서 상기 RF 전류 신호(I) 및 상기 RF 전압 신호(V)를 이용하여 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 임피던스(Z_i), 반사계수(Γ_i), 및 전송선에 의한 위상을 반영한 위상 이동된 반사계수(Γ'), 위상 이동된 어드미턴스(y')를 산출하는 제2 단계; 및

n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부(Im(Γ'))의 부호에 따라 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수의 증감 방향을 선택하여 상기 구동 주파수를 변경하는 제3 단계를 포함하고,

n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))이 종료시 까지 상기 제1 단계, 상기 제2 단계, 및 상기 제3 단계는 반복되는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 3

제2 항에 있어서,

상기 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))의 어드미턴스를 이용하여 n+1 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n+1))의 구동 주파수를 예측하는 단계는:

n 번째 온타임 구간(T_ON(n))에서 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부를 구동 주파수에 따라 직선 피팅하는 단계; 및

상기 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부가 영인 지점에 대응하는 주파수를 n+1 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n+1))의 예측된 구동 주파수(f(n+1,1))로 설정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주

파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 4

제3 항에 있어서,

상기 n+1 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n+1))의 상기 예측 구동 주파수(f(n+1,m=1))는

$$f(n+1,m=1) = f(n,m=r) - b'(n,m=r) [df(n,m=r)/db'(n,m=r)]$$

$$df(n,m=r)/db'(n,m=r) = [f(n,m=q)-f(n,m=r)]/[b'(n,m=q)-b'(n,m=r)]$$

으로 주어지고,

여기서,

f(n,m=r)는 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 소정의 r 번째 처리 회수에서 구동 주파수이고,

b'(n,m=r)은 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))의 소정의 r 번째 처리 회수에서 상기 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부인 서셉턴스이고,

f(n,m=q)는 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 마지막 처리 회수에서 구동 주파수이고,

b'(n,m=q)은 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))의 마지막 처리 회수의 어드미턴스(y')의 허수부인 서셉턴스인 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 5

제4 항에 있어서,

r은 3 내지 q-1의 양의 정수인 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 6

제2 항에 있어서,

상기 위상 이동된 반사계수(Γ')를 이용하여 임피던스 매칭을 위한 최적 조건을 판단하는 단계를 더 포함하고,

상기 최적 조건은 상기 위상 이동된 반사계수의 절대값(|Γ'|) 또는 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')의 허수부(Im(Γ'))의 크기로 판단하고,

상기 최적 조건인 경우, 구동 주파수의 변경을 위한 처리 회수를 나타내는 인덱스(m)을 증가시킨 후 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 측정하는 제1 단계를 수행하고,

상기 최적 조건이 아닌 경우, 상기 구동 주파수를 변경하는 제3 단계를 수행하는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 7

제2 항에 있어서,

n 번째 온타임 구간(T_ON(n))에서 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부(Im(Γ'))의 부호에 따라 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수의 증감 방향을 선택하고 상기 구동 주파수를 변경하는 제3 단계는,

상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부(Im(Γ'))가 양의 값을 가지는 경우 구동 주파수를 증가시키고,

상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부(Im(Γ'))가 음의 값을 가지는 경우 구동 주파수를 감소시키는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 8

제7 항에 있어서,

n 번째 온타임 구간(T_ON(n)) 내에서 상기 구동 주파수의 변화량은 상기 위상 이동된 반사 계수의 절대값 또는 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부의 절대값에 의존하는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기

의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 9

제1 항에 있어서,

상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기와 상기 부하 사이에 배치되고 적어도 2 개의 가변 리액턴스 소자를 포함하는 임피던스 매칭 네트워크의 가변 리액턴스 소자의 리액턴스값을 변경하여 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 상기 부하 방향의 상기 임피던스의 실수부($Re(Z_i)$)를 전송선의 특성 임피던스로 설정하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 10

제1 항에 있어서,

상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수를 변경하지 않으면서 교번하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})을 포함하는 플라즈마 안정화시키는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법.

청구항 11

교번하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})으로 RF 전력을 부하에 제공하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기를 포함하는 펄스형 가변 주파수 RF 전원 장치에 있어서,

상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기는:

n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에 배치되어 RF 전류 신호 및 RF 전압 신호를 감지하는 임피던스 감지부;

n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 RF 전류 신호 및 상기 RF 전압 신호를 이용하여 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서의 임피던스(Z_i) 및 반사계수(Γ_i), 상기 부하와 펄스형 가변 주파수 RF 발생기 사이의 전송선에 의한 위상 이동된 반사계수(Γ'), 그리고 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')에서 변환된 위상 이동된 어드미턴스(y')를 산출하는 임피던스 처리부;

구동 주파수에 따른 상기 위상 이동된 어드미턴스(y')를 이용하여 다음 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 구동 주파수를 예측하는 구동 주파수 예측부;

상기 예측된 구동 주파수를 제공받아 다음 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 시작 구동 주파수로 설정하고 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')를 이용하여 구동 주파수를 제어하는 구동 주파수 제어부;

펄스 신호를 생성하여 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})을 구분하고 상기 펄스 신호를 상기 구동 주파수 예측부 및 상기 구동 주파수 제어부에 제공하는 펄스 발생기; 및

상기 구동 주파수 제어부의 구동 주파수의 정현파를 증폭시키는 RF 증폭기를 포함하는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 전원 시스템.

청구항 12

제11 항에 있어서,

상기 구동 주파수 예측부는 n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 구동 주파수에 따른 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부를 직선 피팅하여 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부가 영인 지점에 대응하는 주파수를 예측 구동 주파수로 설정하는 것을 특징으로 하는 펄스형 가변 주파수 RF 전원 시스템.

발명의 설명

기술 분야

본 발명은 펄스형 가변 주파수 RF 발생기에 관한 것으로, 더 구체적으로 고속으로 주파수 튜닝 임피던스 매칭을 위한 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 주파수 제어 방법에 관한 것이다.

[0001]

배경 기술

- [0002] 플라즈마는 식각 공정 또는 증착 공정과 같은 반도체 제조 공정에 사용된다. RF 전원(RF Generator)은 고출력 RF신호를 챔버의 부하에 인가하여 플라즈마를 생성한다. 이렇게 생성된 플라즈마는 기판 표면을 원하는 형태로 가공하거나 기판에 박막을 증착한다.
- [0003] 이때 플라즈마를 생성하기 위하여 높은 출력의 RF 신호는 챔버의 부하에 전달된다. 이를 위해서는 RF 전원(RF Generator)과 챔버의 부하 사이에 임피던스가 같아야 신호의 전력이 반사 없이 전달된다. 임피던스를 빠르게 매칭시키는 기술로써 RF 전원(RF Generator)에서 RF 신호의 구동 주파수를 조정함으로써 임피던스를 매칭시키는 방법이 있다. 주파수 가변 임피던스 매칭 방법은 통상적으로 수 msec 수준에서 임피던스 매칭을 수행할 수 있다.
- [0004] 반도체 제조 공정이 진화함에 따라, 챔버의 부하에 인가하는 RF 신호는 일정한 주기로 강도 변조하는 펄스형 RF 신호(pulsed RF signal)일 수 있다. 펄스형 RF 신호는 통상적으로 수 MHz 내지 수십 MHz의 구동 주파수보다 낮은 수백 Hz 내지 수 kHz 의 펄스 주파수로 온/오프 된다. 펄스 주파수가 증가하여, 온 타임 구간이 수 msec 이하로 짧아짐에 따라, 펄스 임피던스 매칭을 위하여 빠른 RF 신호의 구동 주파수의 제어 가 요구된다. 결국 펄스 주파수가 수 kHz 이상으로 높아진 경우, 온 타임 구간은 1 msec 이하로 감소하여, RF 신호의 구동 주파수를 조정하는 시간이 부족하여 임피던스 매칭이 어렵다. 이에 따라, 플라즈마는 불안정하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0005] 본 발명의 해결하고자 하는 일 기술적 과제는 펄스형 RF 발생기의 구동 주파수 조절 방법 또는 임피던스 매칭 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0006] 본 발명의 일 실시예에 따른 펄스형 가변 주파수 RF 발생기는 교번하는 온타임 구간(T_ON)과 오프 타임 구간(T_OFF)의 펄스로 RF 전력을 부하에 제공하고, 상기 온타임 구간(T_ON) 내에서 구동 주파수를 변경하는 제어 루프를 포함한다. 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법은, n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 구동 주파수(f(n,m))를 변경하는 단계; 상기 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))의 어드미턴스를 이용하여 n+1 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n+1))의 구동 주파수를 예측하는 단계; 및 n+1 번째 펄스의 온타임(T_ON(n+1))에서 상기 예측된 구동 주파수(f(n+1,1))로 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 RF 출력을 제공하는 단계를 포함한다. 여기서, f(n,m)은 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n)) 내에서 m 번째 처리 회수에서 구동 주파수이고, n은 펄스의 순번을 나타내고, m은 1 내지 q 사이의 양의 정수이고, m은 온타임 구간(T_ON) 내에서 구동 주파수의 변경을 위한 상기 제어 루프의 처리 회수를 나타내는 인덱스를 나타낸다.
- [0007] 본 발명의 일 실시예에 있어서, n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 구동 주파수(f(n,m))를 변경하는 단계는, n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 측정하는 제1 단계; n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서에서 상기 RF 전류 신호(I) 및 상기 RF 전압 신호(V)를 이용하여 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 임피던스(Zi), 반사 계수(Γi), 및 전송선에 의한 위상을 반영한 위상 이동된 반사 계수(Γ'), 위상 이동된 어드미턴스(y')를 산출하는 제2 단계; 및 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))에서 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부(Im(Γ'))의 부호에 따라 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수의 증감 방향을 선택하여 상기 구동 주파수를 변경하는 제3 단계;를 포함한다. n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))이 종료시 까지 상기 제1 단계, 상기 제2 단계, 및 상기 제3 단계는 반복된다.
- [0008] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n))의 어드미턴스를 이용하여 n+1 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n+1))의 구동 주파수를 예측하는 단계는, n 번째 온타임 구간(T_ON(n))에서 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부를 구동 주파수에 따라 직선 피팅하는 단계; 및 상기 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부가 영인 지점에 대응하는 주파수를 n+1 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n+1))의 예측된 구동 주파수(f(n+1,1))로 설정하는 단계를 포함한다.
- [0009] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 n+1 번째 펄스의 온타임 구간(T_ON(n+1))의 상기 예측 구동 주파수

$(f(n+1,m=1))$ 는

[0010] $f(n+1,m=1) = f(n,m=r) - b'(n,m=r) [df(n,m=r)/db'(n,m=r)]$

[0011] $df(n,m=r)/db'(n,m=r) = [f(n,m=q)-f(n,m=r)]/[b'(n,m=q)-b'(n,m=r)]$

[0012] 으로 주어진다. 여기서, $f(n,m=r)$ 는 n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 소정의 r 번째 처리 회수에서 구동 주파수이고, $b'(n,m=r)$ 은 n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)의 소정의 r 번째 처리 회수에서 상기 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부인 서셉턴스이고, $f(n,m=q)$ 는 n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 마지막 처리 회수에서 구동 주파수이고, $b'(n,m=q)$ 은 n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)의 마지막 처리 회수의 어드미턴스(y')의 허수부인 서셉턴스이다.

[0013] 본 발명의 일 실시예에 있어서, r 은 3 내지 $q-1$ 의 양의 정수이다.

[0014] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')를 이용하여 임피던스 매칭을 위한 최적 조건을 판단하는 단계를 더 포함한다. 상기 최적 조건은 상기 위상 이동된 반사계수의 절대값($|\Gamma'|$) 또는 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)의 크기로 판단한다. 상기 최적 조건인 경우, 구동 주파수의 변경을 위한 처리 회수를 나타내는 인덱스(m)을 증가시킨 후 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 측정하는 제1 단계를 수행한다. 상기 최적 조건이 아닌 경우, 상기 구동 주파수를 변경하는 제3 단계를 수행한다.

[0015] 본 발명의 일 실시예에 있어서, n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)의 부호에 따라 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수의 증감 방향을 선택하고 상기 구동 주파수를 변경하는 제3 단계는, 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)가 양의 값을 가지는 경우 구동 주파수를 증가시키고, 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)가 음의 값을 가지는 경우 구동 주파수는 감소시킨다.

[0016] 본 발명의 일 실시예에 있어서, n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$) 내에서 상기 구동 주파수의 변화량은 상기 위상 이동된 반사 계수의 절대값 또는 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부의 절대값에 의존한다.

[0017] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기와 상기 부하 사이에 배치되고 적어도 2 개의 가변 리액턴스 소자를 포함하는 임피던스 매칭 네트워크의 가변 리액턴스 소자의 리액턴스값을 변경하여 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 상기 부하 방향의 상기 임피던스의 실수부($\text{Re}(Z_i)$)를 전송선의 특성 임피던스로 설정하는 단계를 더 포함한다.

[0018] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수를 변경하지 않으면서 교변하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})을 포함하는 플라즈마 안정화시키는 단계를 더 포함한다.

[0019] 본 발명의 일 실시예에 따른 펄스형 가변 주파수 RF 전원 장치는, 교변하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})으로 RF 전력을 부하에 제공하는 펄스형 가변 주파수 RF 발생기를 포함한다. 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기는, n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에 배치되어 RF 전류 신호 및 RF 전압 신호를 감지하는 임피던스 감지부; n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 RF 전류 신호 및 상기 RF 전압 신호를 이용하여 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서의 임피던스(Z_i) 및 반사계수(Γ_i), 상기 부하와 펄스형 가변 주파수 RF 발생기 사이의 전송선에 의한 위상 이동된 반사계수(Γ'), 그리고 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')에서 변환된 위상 이동된 어드미턴스(y')를 산출하는 임피던스 처리부; 구동 주파수에 따른 상기 위상 이동된 어드미턴스(y')를 이용하여 다음 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 구동 주파수를 예측하는 구동 주파수 예측부; 상기 예측된 구동 주파수를 제공받아 다음 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 시작 구동 주파수로 설정하고 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')를 이용하여 구동 주파수를 제어하는 구동 주파수 제어부; 펄스 신호를 생성하여 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})을 구분하고 상기 펄스 신호를 상기 구동 주파수 예측부 및 상기 구동 주파수 제어부에 제공하는 펄스 발생기; 및 상기 구동 주파수 제어부의 구동 주파수의 정현파를 증폭시키는 RF 증폭기를 포함한다.

[0020] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 구동 주파수 예측부는 n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 구동 주파수에 따른 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부를 직선 피팅하여 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부가 영인 지점에 대응하는 주파수를 예측 구동 주파수로 설정한다.

발명의 효과

[0021] 본 발명의 일 실시예에 따른 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수 제어 방법은 종래의 주파수 제어 방법보다 빠른 시간에 임피던스 매칭을 수행하고, 임피던스 매칭이 안된 상황에서도 반사파를 최소화하는 최적 주파수로 동작할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0022] 도 1은 통상적인 주파수 튜닝(frequency tuning)하여 또는 주파수 가변하여 임피던스 매칭을 수행하는 예를 나타낸다.

도 2는 통상적인 주파수 튜닝(frequency tuning)하여 또는 주파수 가변하여 임피던스 매칭을 수행하는 예를 나타낸다.

도 3은 통상적인 주파수 튜닝(frequency tuning)하여 또는 주파수 가변하여 임피던스 매칭을 수행하는 예를 나타낸다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 펄스형 가변 주파수 RF 발생기 및 부하를 나타내는 회로도이다.

도 5는 도 4에서 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 부하를 바라본 임피던스를 표시하는 스미스 차트(Smith Chart)이다.

도 6은 본 발명의 다른 실시예에 따른 펄스형 가변 주파수 RF 발생기 및 부하를 나타내는 회로도이다.

도 7은 도 6의 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 동작을 나타내는 흐름도이다.

도 8은 도 6의 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 펄스형 RF 신호, 펄스 발생기 펄스 상태 신호, 및 구동 주파수를 나타낸다.

도 9는 스미스 차트 상에서 구동 주파수에 따른 어드미턴스를 나타낸다.

도 10은 구동 주파수에 따른 어드미턴스의 허수부를 나타낸다.

도 11은 제어 루프의 동작 시간에 따른 구동 주파수의 변화를 나타낸다.

도 12는 본 발명의 다른 실시예에 따른 구동 주파수에 따른 어드미턴스의 허수부를 나타낸다.

도 13은 도 12의 제어 루프의 동작 시간에 따른 구동 주파수의 변화를 나타낸다.

도 14는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 부하 및 임피던스 매칭 네트워크의 임피던스(Z') 변화를 스미스 차트에 표시한 그림이다.

도 15는 도 14의 스미스 차트에 표시된 서셉턴스를 구동 주파수에 따라 표시한 그래프이다.

도 16은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 펄스 시퀀스를 나타내는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 도 1은 통상적인 주파수 튜닝(frequency tuning)하여 또는 주파수 가변하여 임피던스 매칭을 수행하는 예를 나타낸다.

[0024] 도 1을 참조하면, 가변 주파수 RF 전원은 교번하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})으로 RF 전력을 부하에 전달한다. 온타임 구간(T_{ON})이 수 msec 이상으로 충분한 경우, 상기 가변 주파수 RF 전원의 구동 주파수는 온타임 구간(T_{ON}) 마다 시작 구동 주파수(f_{start})에서 시작하여 소정의 시간 내에서 매칭 주파수(f_{match})에서 임피던스 매칭을 수행한다. 하나의 펄스의 온타임 구간 내에서 주파수 튜닝(Frequency Tuning)이 정상적으로 수행된다.

[0025] 도 2는 통상적인 주파수 튜닝(frequency tuning)하여 또는 주파수 가변하여 임피던스 매칭을 수행하는 예를 나타낸다.

[0026] 도 2를 참조하면, 가변 주파수 RF 전원은 교번하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})으로 RF 전력을 부하에 전달한다. 온타임 구간(T_{ON})이 1 msec 이하로 시간이 충분하지 못한 경우, 상기 가변 주파수 RF 전원의 구동 주파수는 온타임 구간(T_{ON}) 마다 시작 구동 주파수(f_{start})에서 시작하여 온타임 구간(T_{ON}) 내에서 매칭 주파수(f_{match})에 도달하지 못하여 임피던스 매칭을 수행하지 못한다.

- [0027] 도 3은 통상적인 주파수 튜닝(frequency tuning)하여 또는 주파수 가변하여 임피던스 매칭을 수행하는 예를 나타낸다.
- [0028] 도 3을 참조하면, 가변 주파수 RF 전원은 교변하는 온타임 구간(T_ON)과 오프 타임 구간(T_OFF)으로 RF 전력을 부하에 전달한다. 온타임 구간(T_ON)이 1 msec 이하로 충분하지 못한 경우, 상기 가변 주파수 RF 전원의 구동 주파수는 제1 온타임 구간(T_ON)에서 제1 시작 구동 주파수(f_start)에서 시작하여 온타임 구간(T_ON) 내에서 매칭 주파수(f_match)에 도달하지 못하여 임피던스 매칭을 수행하지 못한다. 하지만, 제2 온타임 구간에서 제1 온타임 구간의 최종 주파수를 제2 시작 구동 주파수로 설정하여, 제2 온타임 구간에서 연속적으로 구동 주파수를 가변하면서 임피던스를 매칭한다. 결국, 제i 온타임 구간에서 주파수를 가변하여 매칭 주파수(f_match)에 도달하여 임피던스 매칭을 수행한다.
- [0029] 그러나, 이와 같은 방식의 임피던스 매칭 방법은 주파수 가변 임피던스 매칭을 수행하기 위하여 복수의 펄스를 요구한다. 따라서, 고속의 효율적인 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 임피던스 매칭 방법이 요구된다.
- [0030] 본 발명의 일 실시예에 따른 주파수 튜닝 임피던스 매칭 방법은 사용자가 설정한 시작 구동 주파수(Start Driving Frequency)와 RF 출력신호를 분석하여 구동 주파수를 변경한다. 구체적으로, n 번째 펄스 내에서 측정된 어드미턴스의 허수부인 서셉턴스를 이용하여 다음 주파수를 예측할 수 있다. 이에 따라, 임피던스 매칭이 고속으로 수행되거나, 고속으로 최적 주파수에 도달할 수 있다.
- [0031] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예들을 상세히 설명하기로 한다. 그러나, 본 발명은 여기서 설명되어지는 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되어지는 것이다. 도면들에 있어서, 구성요소는 명확성을 기하기 위하여 과장되어진 것이다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호로 표시된 부분들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.
- [0032] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 펄스형 가변 주파수 RF 발생기 및 부하를 나타내는 회로도이다.
- [0033] 도 5는 도 4에서 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 부하를 바라본 임피던스를 표시하는 스미스 차트(Smith Chart)이다.
- [0034] 도 4 및 도 5를 참조하면, 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)는 전송선(120)을 통하여 임피던스 매칭 네트워크(130)와 부하(140)에 RF 전력을 부하(140)에 전달한다. 임피던스 매칭 네트워크(130)와 부하(140)를 바라본 임피던스는 Z' 이다. 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 출력단(N1)에서 전송선(120), 임피던스 매칭 네트워크(130)와 부하(140)를 바라본 임피던스는 Z_i 이다. 제1 임피던스(Z_i)는 제1 어드미턴스($Y_i=1/Z_i$)로 변환되고, 제2 임피던스(Z')는 제2 어드미턴스(Y')로 변환될 수 있다. 또한, 제2 어드미턴스(Y')는 규격화된 어드미턴스($y'=Z_0 Y'$)로 표시될 수 있다. 여기서 Z_0 는 전송선(120)의 특성 임피던스이다. 여기서 g' 는 컨덕턴스이고, b' 은 서셉턴스이다.
- [0035] 임피던스 매칭 지점은 스미스 차트의 원점으로 반사계수(Γ)가 영인 지점이다. 임피던스 매칭 네트워크(130)의 입력단(N1)에 바라본 제2 임피던스(Z')의 실수부가 50 옴으로 고정된 경우, $g'=1$ 인 컨덕턴스 서클(conductance circle)은 원점과 P_{sc} 를 지름으로 하는 원이다. 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 구동 주파수가 증가하는 경우, 스미스 차트의 P3 지점은 $g'=1$ 인 컨덕턴스 서클(conductance circle)을 따라 시계 방향으로 회전한다. 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 구동 주파수가 감소하는 경우, 스미스 차트의 P2 지점은 $g=1$ 인 컨덕턴스 서클(conductance circle)을 따라 시계 방향으로 회전한다.
- [0036] 한편, 제1 임피던스(Z_i)는 제2 임피던스(Z')에 비하여 전송선(130)에 의한 위상 차이(ϕ)를 추가적으로 가진다. 제2 임피던스(Z')에 대하여, $g'=1$ 인 컨덕턴스 서클(conductance circle)은 스미스 차트 상에 시계 방향으로 회전한다. 위상 차이(ϕ)는 구동 각주파수(ω) 및 전송선(120)의 길이(d)에 비례하고, 전자파의 속도(c)에 반비례한다. 상기 전송선의 특성 임피던스는 Z_0 이다.
- [0037] 제2 반사계수(Γ')의 허수부가 양의 값을 가지는 경우, 구동 주파수를 증가시키면, 최소 경로를 따라 스미스 차트의 원점으로 이동하여 임피던스 매칭을 수행한다. 한편, 제2 반사계수(Γ')의 허수부가 음의 값을 가지는 경우, 구동 주파수를 감소시켜 최소 경로를 따라 스미스 차트의 원점으로 이동하여 임피던스 매칭을 수행한다.
- [0038] 제1 임피던스(Z_i)에 대하여, $g=1$ 인 컨덕턴스 서클(conductance circle) 상에 있는 P1 지점은 구동 주파수가 증가하면 시계 방향으로 회전하고, 구동 주파수가 감소하면 반시계 방향으로 회전한다.

- [0039] 따라서, 주파수 튜닝 임피던스 매칭을 위하여 구동 주파수의 증가 또는 감소를 용이하게 판단하기 위하여, 반사계수(Γ_i)는 위상 차이(ϕ) 만큼 회전할 수 있다. 구체적으로, A 지점은 위상 변환에 의하여 B 지점으로 변환될 수 있다. 이에 따라, 반사계수(Γ')의 허수부의 부호에 따라 구동 주파수의 증가 또는 감소를 결정할 수 있다.
- [0040] 제1 임피던스(Z_i)에 대응하는 P1 위치에서 구동 주파수를 증가시키면 임피던스 특성에 따라 P1을 관통하는 원을 따라 시계방향으로 움직인다. 구동 주파수를 감소시키면 반시계방향으로 움직인다. 이러한 원리로 구동 주파수를 튜닝하여 스미스 차트 상의 원점에 제일 가까운 곳까지 이동하면, 임피던스 매칭이 수행된다.
- [0041] P1 위치에서 최단 거리로 임피던스를 매칭하기 위해서는 스미스 차트 상의 원점과 P1의 특성원의 중심을 지나는 선을 기준으로 위쪽에 있으면, 주파수를 감소시키고, 아래쪽에 있으면 주파수를 증가시키는 것이 유리하다.
- [0042] 최단 궤적을 쉽게 찾기 위해서는 $g=1$ 인 컨덕턴스 서클(conductance circle)에 ϕ 만큼 각도를 제공하면, 원의 중심과 스미스 차트의 중심을 지나는 선이 X축(반사계수의 실수부 축)과 일치된다. 이에 따라, 반사계수(Γ')의 허수 성분이 양이나 음이나에 따라 최적의 궤적 방향을 결정할 수 있다. P1 지점의 반사계수에 위상은 ϕ 이고, 크기는 1인 복소수를 곱한다. 따라서, 반사계수(Γ')의 허수 성분이 양인 P3 위치는 구동 주파수를 증가시키는 것이 유리하다. 또한, 반사계수(Γ')의 허수 성분이 음인 P2 위치는 구동 주파수를 감소시키는 것이 유리하다.
- [0043] 도 6은 본 발명의 다른 실시예에 따른 펄스형 가변 주파수 RF 발생기 및 부하를 나타내는 회로도이다.
- [0044] 도 7은 도 6의 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 동작을 나타내는 흐름도이다.
- [0045] 도 8은 도 6의 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 펄스형 RF 신호, 펄스 발생기 펄스 상태 신호, 및 구동 주파수를 나타낸다.
- [0046] 도 9는 스미스 차트 상에서 구동 주파수에 따른 어드미턴스를 나타낸다.
- [0047] 도 10은 구동 주파수에 따른 어드미턴스의 허수부를 나타낸다.
- [0048] 도 11은 제어 루프의 동작 시간에 따른 구동 주파수의 변화를 나타낸다.
- [0049] 도 6 내지 도 11을 참조하면, 펄스형 가변 주파수 RF 전원 시스템(100)은 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110), 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)와 부하(140) 사이에 배치된 임피던스 매칭 네트워크(130)를 포함한다. 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)는 교번하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})으로 RF 전력을 부하(140)에 제공한다. 상기 임피던스 매칭 네트워크(130)는 적어도 2 개의 가변 리액턴스 소자($C1, C2$)를 포함한다. 상기 임피던스 매칭 네트워크(130)의 가변 리액턴스 소자의 리액턴스 값을 변경하여 상기 부하 방향의 임피던스를 조절한다.
- [0050] 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)는 임피던스 감지부(115), 임피던스 처리부(111), 구동 주파수 예측부(117), 구동 주파수 제어부(113), 펄스 발생기(116), 및 RF 증폭기(114)를 포함할 수 있다. 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)는 구동 주파수를 변경하여 고속으로 임피던스 매칭 또는 최적의 주파수에서 동작한다.
- [0051] 임피던스 감지부(115)는 n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 출력단($N1$)에 배치되어 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 감지한다. n 은 펄스의 순번이다.
- [0052] 임피던스 처리부(111)는 n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 RF 전류 신호(I) 및 상기 RF 전압 신호(V)를 이용하여 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 출력단($N1$)에서의 임피던스(Z_i) 및 반사계수(Γ_i), 상기 부하(140)와 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110) 사이의 전송선(120)에 의한 위상 이동된 반사계수(Γ'), 그리고 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')에서 변환된 위상 이동된 어드미턴스(y')를 산출한다.
- [0053] 구동 주파수 예측부(117)는 n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 측정된 구동 주파수에 따른 상기 위상 이동된 어드미턴스(y')를 이용하여 다음 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 구동 주파수를 예측한다.
- [0054] 구동 주파수 제어부(113)는 상기 예측된 구동 주파수를 다음 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 시작 구동 주파수로 설정하고 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')를 이용하여 구동 주파수를 제어한다.
- [0055] 펄스 발생기(116)는 펄스 신호를 생성하여 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})을 구분하고 상기 펄스 신호를 상기 구동 주파수 예측부(117) 및 상기 구동 주파수 제어부(113)에 제공한다.
- [0056] RF 증폭기(114)는 상기 구동 주파수 제어부의 구동 주파수에서 정현파를 증폭시켜 RF 신호를 출력한다.
- [0057] 부하(140)는 축전 결합 플라즈마를 형성하는 전극 또는 유도 결합 플라즈마를 형성하는 안테나일 수 있다. 상기

부하(140)는 반도체 공정을 처리하는 챔버 내부 또는 외부에 장착될 수 있다. 상기 부하(140)는 상기 펄스 신호에 동기화되어 펄스 플라즈마를 형성할 수 있다. 구동 주파수는 수 MHz 내지 수십 MHz일 수 있다. 펄스 주파수는 수 kHz 내지 수십 kHz일 수 있다. RF 펄스의 온 듀티 비(On Duty Ratio)는 수 퍼센트 내지 수십 퍼센트일 수 있다. 온타임 구간(T_ON)은 500 usec 이하일 수 있다. 바람직하게는, 온타임 구간(T_ON)은 100 usec 이하일 수 있다.

[0058] 임피던스 매칭 네트워크(130)는 가변 리액티브 소자의 연결 방식에 따라 다양한 유형으로 분류될 수 있다. 예시적으로, 임피던스 매칭 네트워크(130)는 부하에 직렬 연결된 제1 가변 축전기(C1)와 상기 직렬 연결된 제1 가변 축전기(C1)와 부하(140)에 병렬 연결된 제2 가변 축전기(C2)를 포함할 수 있다. 상기 임피던스 매칭 네트워크(130)는 L-형, 역 L-형(inverted L-type), T-형, 또는 π -형일 수 있다. 상기 임피던스 매칭 네트워크(130)는 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 구동 주파수의 튜닝에 의한 임피던스 매칭에 실패한 경우 동작하여 임피던스 매칭을 수행할 수 있다.

[0059] 임피던스 감지부(115)는 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 출력단(N1)에서 부하 방향의 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 측정한다. 상기 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)는 상기 구동 주파수의 주기 이상의 샘플링 시간 동안 상기 구동 주파수보다 높은 샘플링 레이트(sampling rate)로 샘플링되어 디지털 신호로 변환되어 상기 임피던스 처리부(111)에 제공될 수 있다.

[0060] 임피던스 처리부(111)는 상기 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 이용하여 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 출력단(N1)에서의 임피던스(Z_i) 및/또는 반사계수(Γ_i)를 산출할 수 있다. 또한, 상기 임피던스 처리부(111)는 전송선(120)의 길이(d)에 의한 위상 차이(ϕ)를 보상할 수 있다. 구체적으로, 반사계수(Γ_i)는 임피던스 매칭 네트워크(130)의 입력단(N2)에서 부하(140)를 바라본 위상 이동된 반사계수(Γ')로 다음과 같이 변환될 수 있다.

[0061] [수학식 1]

$$[0062] \Gamma' = \Gamma_i e^{j\phi}$$

$$[0063] \phi = \omega d/c$$

[0064] 여기서, ϕ 는 위상 차이이고, d는 전송선의 길이이고, ω 는 구동 각주파수이고, c는 전송선에서 전자파의 속도이다. 상기 전송선(120)은 동축 케이블일 수 있다. 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')는 상기 임피던스 매칭 네트워크(130)의 입력단(N2)에서 부하를 바라본 반사계수이다.

[0065] 임피던스 처리부(111)는 위상 이동된 반사계수(Γ')를 위상 이동된 어드미턴스(y')로 변환할 수 있다. 위상 이동된 어드미턴스(y')는 다음과 같이 주어질 수 있다.

[0066] [수학식 2]

$$[0067] y' = g' + jb'$$

[0068] 여기서, g' 은 컨덕턴스이고, b' 은 서셉턴스이다.

[0069] 상기 구동 주파수 제어부(117)는 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')를 제공받을 수 있다. 상기 구동 주파수 제어부(117)는 온타임 구간(T_ON)을 복수의 단위 시간 (Δt)으로 분할하여, 단위 시간(Δt) 마다 구동 주파수를 변경할 수 있다. 단위 시간(Δt)은 제어 루프의 동작 시간으로 약 1 usec 수준일 수 있다. 따라서, 제어루프의 총 개수(q)는 $T_{ON}/\Delta t$ 이다. 여기서, q는 3 이상의 양의 정수이다.

[0070] 상기 구동 주파수 제어부(117)는 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)의 부호에 따라 구동 주파수의 증감 방향을 선택할 수 있다. 구체적으로, 반사 계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)가 양의 값을 가지는 경우, 상기 구동 주파수를 주파수 변화량(df) 만큼 증가시킬 수 있다. 또한, 상기 반사 계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)가 음의 값을 가지는 경우, 상기 구동 주파수를 주파수 변화량(df) 만큼 감소시킬 수 있다. 주파수 변화량(df)은 반사계수의 절댓값($|\Gamma'|$) 또는 반사계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)의 크기에 의존할 수 있다. 예를 들어, 상기 주파수 변화량(df)은 반사계수의 절댓값($|\Gamma'|$) 또는 반사계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)의 크기에 비례할 수 있다. 예를 들어, 상기 구동 주파수 제어부(117)는 상기 반사 계수의 절댓값($|\Gamma'|$)이 문턱값 이하로 임피던스 매칭이 수행된 경우에는 구동 주파수를 변경하지 않을 수 있다. 상기 구동 주파수 제어부(117)는 임피던스 매칭 정도에 따라 주파수 변화량(df)을 조절할 수 있다.

[0071] 상기 구동 주파수 제어부(117)는 비례-적분-미분 제어 방식을 사용할 수 있다. 상기 구동 주파수 제어부(117)는

온타임 구간(T_{ON})에 구동 주파수를 출력하고, 오프 타임 구간(T_{OFF})에 구동 주파수를 출력하지 않을 수 있다.

- [0072] 상기 RF 증폭기(114)는 상기 구동 주파수로 RF 출력을 제공할 수 있다. RF 증폭기(114)는 RF 전력 증폭기일 수 있다. 상기 RF 증폭기(114)의 출력은 수백 와트 내지 수십 킬로와트일 수 있다.
- [0073] 펄스 발생기(116)는 상기 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})을 식별하기 위한 펄스 신호를 상기 구동 주파수 제어부(113) 및 구동 주파수 예측부(117)에 제공할 수 있다. 상기 펄스 발생기(116)의 주파수는 수 kHz 내지 수십 kHz일 수 있다. 상기 구동 주파수가 13.56 MHz의 범위에 있는 경우, 상기 온타임 구간(T_{ON}) 및 상기 오프 타임 구간(T_{OFF})은 각각 100 usec 수준일 수 있다. 제어 루프의 동작 시간 또는 단위 시간(Δt)은 약 1 usec 수준일 수 있다.
- [0074] 구동 주파수 예측부(117)는 첫 번째 펄스의 시작 주파수(f_{start})를 제공받을 수 있다. 또한, 최적 조건을 판단하기 위한 문턱값을 제공받을 수 있다. 또한, 주파수 예측을 수행하는 제어루프의 특정 회수(m=r) 또는 홀드-오프 타임을 제공받을 수 있다. 구동 주파수 예측부(117)는 위상 이동된 어드미턴스(y') 또는 서셉턴스(b')를 제공받을 수 있다. 상기 구동 주파수 예측부(117)는 n 번째 온타임 구간(T_{ON}(n))에서 구동 주파수에 따른 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부(b')를 직선 피팅하여 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부(b')가 영인 지점에 대응하는 주파수를 예측 구동 주파수로 설정할 수 있다.
- [0075] 상기 다음 온타임 구간(T_{ON}(n+1))의 상기 예측된 구동 주파수(f(n+1,1))는 다음과 같이 주어질 수 있다.
- [0076] [수학식 3]
- [0077]
$$f(n+1,m=1) = f(n,m=r) - b'(n,m=r) [df(n,m=r)/db'(n,m=r)]$$
- [0078]
$$df(n,m=r)/db'(n,m=r) = [f(n,m=q)-f(n,m=r)]/[b'(n,m=q)-b'(n,m=r)]$$
- [0079] 으로 주어지고,
- [0080] 여기서, f(n,m=r)는 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_{ON}(n))에서 소정의 r 번째 처리 회수에서 구동 주파수이다. b'(n,m=r)은 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_{ON}(n))의 소정의 r 번째 처리 회수에서 상기 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부인 서셉턴스이다. f(n,m=q)는 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_{ON}(n))에서 마지막 처리 회수에서 구동 주파수이다. b'(n,m=q)은 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_{ON}(n))의 마지막 처리 회수의 어드미턴스(y')의 허수부인 서셉턴스이다. r은 3 내지 q-1의 양의 정수일 수 있다. 제어 루프의 총 개수(q)는 T_{ON}/Δt 이다. q는 3 이상의 양의 정수이다.
- [0081] 구동 주파수 예측부(117)는 예측된 구동 주파수(f(n+1,m=1))를 상기 구동 주파수 제어부(113)에 제공하여, n+1 번째 온타임 구간(T_{ON}(n))의 시작 구동 주파수로 동작할 수 있다. 이에 따라, 고속 주파수 튜닝 임피던스 매칭이 수행될 수 있다.
- [0082] 이하, 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 임피던스 매칭 방법이 설명된다.
- [0083] 다시, 도 7을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)는 교번하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})의 펄스로 RF 전력을 부하(140)에 제공하고, 상기 온타임 구간(T_{ON}) 내에서 구동 주파수를 변경하는 제어 루프를 포함한다.
- [0084] 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 임피던스 매칭 방법은, n 번째 펄스의 온타임 구간(T_{ON}(n))에서 구동 주파수(f(n,m))를 변경하는 단계(S101); 상기 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_{ON}(n))의 어드미턴스를 이용하여 n+1 번째 펄스의 온타임 구간(T_{ON}(n+1))의 구동 주파수를 예측하는 단계(S301); 및 n+1 번째 펄스의 온타임(T_{ON}(n+1))에서 상기 예측된 구동 주파수(f(n+1,1))로 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 RF 출력을 제공하는 단계(S141)를 포함한다. 여기서, f(n,m)은 n 번째 펄스의 온타임 구간(T_{ON}(n)) 내에서 m 번째 처리 회수(또는 제어 루프)에서 구동 주파수이다. n은 펄스의 순번을 나타낸다. m은 1 내지 q 사이의 양의 정수이다. 제어루프의 총 개수(q)는 T_{ON}/Δt 이다. 여기서, q는 3 이상의 양의 정수이다. m은 온타임 구간(T_{ON}) 내에서 구동 주파수의 변경을 위한 상기 제어 루프의 처리 회수를 나타내는 인덱스를 나타낸다.
- [0085] 우선, 첫 번째 펄스의 시작 구동 주파수(f_{start}), 펄스의 튜터 비, 펄스의 주기, 하나의 펄스 내에서 제어 루프의 총개수(q), 제어루프의 동작 시간(Δt) 및 제어 루프의 처리 회수를 나타내는 인덱스(m)의 초기값이 설정된다(S110).
- [0086] n 번째 펄스의 온타임 구간(T_{ON}(n))에서 구동 주파수(f(n,m))를 변경하는 단계(S101)는, 제1 단계(S121), 제2

단계(S122, S123), 그리고 제3 단계(S126)을 포함한다.

- [0087] S121 단계에서, n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 출력단에서 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 측정한다. 상기 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)는 임피던스 감지부(115)에 감지될 수 있다.
- [0088] S122 및 S123 단계에서, n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서에서 상기 RF 전류 신호(I) 및 상기 RF 전압 신호(V)를 이용하여 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 임피던스(Z_i), 반사계수(Γ_i), 및 전송선에 의한 위상을 반영한 위상 이동된 반사계수(Γ'), 위상 이동된 어드미턴스(y')를 산출한다. 위상 이동된 반사계수(Γ')는 수학식 1에 의하여 연산될 수 있다. 임피던스 처리부(111)는 임피던스(Z_i), 반사계수(Γ_i), 및 전송선에 의한 위상을 반영한 위상 이동된 반사계수(Γ'), 위상 이동된 어드미턴스(y')를 산출할 수 있다.
- [0089] S124 단계에서, 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')를 이용하여 임피던스 매칭을 위한 최적 조건을 판단할 수 있다. 상기 구동 주파수 제어부는 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')를 이용하여 임피던스 매칭을 위한 최적 조건을 판단할 수 있다. 상기 최적 조건은 상기 위상 이동된 반사계수의 절대값($|\Gamma'|$) 또는 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')의 허수부($Im(\Gamma')$)의 크기로 판단될 수 있다. 상기 최적 조건인 경우, 구동 주파수의 변경을 위한 처리 회수를 나타내는 인덱스(m)을 증가시킨 후 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 측정하는 제1 단계(S121)를 수행할 수 있다. 상기 최적 조건이 아닌 경우, 상기 구동 주파수를 변경하는 제3 단계(S126)를 수행할 수 있다.
- [0090] 구체적으로, 상기 위상 이동된 반사계수의 허수부($Im(\Gamma')$)가 문턱값 이내인 경우 (또는 임피던스 매칭이 완료된 경우), 구동 주파수의 변경을 위한 처리 회수를 나타내는 인덱스(m)을 증가시킨(S124a) 후 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 출력단에서 RF 전류 신호(I) 및 RF 전압 신호(V)를 측정하는 제1 단계(S121)를 수행할 수 있다. 상기 위상 이동된 반사계수의 허수부($Im(\Gamma')$)가 문턱값 이외에 있는 경우, 상기 구동 주파수를 변경하는 제3 단계(S126)를 수행할 수 있다.
- [0091] 제3 단계(S126)에서, n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부($Im(\Gamma')$)의 부호에 따라 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수의 증감 방향을 선택하고 상기 구동 주파수를 변경한다. 구체적으로, 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부($Im(\Gamma')$)가 양의 값을 가지는 경우 구동 주파수는 증가하고, 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부($Im(\Gamma')$)가 음의 값을 가지는 경우 구동 주파수는 감소시킨다. 상기 구동 주파수의 변화량(df)는 반사계수의 절대값($|\Gamma'|$) 또는 반사계수의 허수부($Im(\Gamma')$)의 크기에 의존할 수 있다.
- [0092] S125 단계에서, n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)의 종료여부를 판단할 수 있다. 즉, $m > q$ 인 경우, 온타임 구간($T_{ON}(n)$)이 종료된다. 온타임 구간($T_{ON}(n)$)이 종료되지 않은 경우, S126 단계에서, n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부($Im(\Gamma')$)의 부호에 따라 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수의 증감 방향을 선택하여 상기 구동 주파수를 변경할 수 있다.
- [0093] n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)이 종료시 까지 상기 제1 단계(S121), 상기 제2 단계(S122, S123), 및 상기 제3 단계(S126)는 반복될 수 있다.
- [0094] 온타임 구간($T_{ON}(n)$)이 종료된 경우($m > q$), S131 단계에서, 상기 n 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)의 어드미턴스(y')를 이용하여 n+1 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 구동 주파수를 예측할 수 있다. S131 단계는, n 번째 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부를 구동 주파수에 따라 직선 피팅하는 단계; 및 상기 위상 이동된 어드미턴스(y')의 허수부가 영인 지점에 대응하는 주파수를 n+1 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 예측된 구동 주파수($f(n+1,1)$)로 설정하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0095] 상기 n+1 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 상기 예측 구동 주파수($f(n+1,m=1)$)는 [수학식 3]으로 주어질 수 있다. $m=1$ 인 경우, 펄스의 시작 시간으로 부하인 플라즈마의 안정성이 감소하여 불안정한 임피던스가 측정될 수 있다. 따라서, n+1 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)에서 사용할 예측된 구동 주파수는 소정의 r 번째 처리 회수에서 측정된 데이터와 마지막 q 번째 처리 회수에서 측정된 데이터를 처리하여 사용할 수 있다. 즉, r은 3 내지 q-1의 양의 정수일 수 있다.
- [0096] n+1 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 구동 주파수를 예측한 후, 오프 타임 구간(T_{OFF})을 위하여 시간 지연이 수행될 수 있다(S132).
- [0097] 이어서, 다음 펄스를 위하여, $n=n+1$ 으로 설정하고, 제어회로의 처리 회수 인덱스는 $m=1$ 로 설정한다(S133).

- [0098] 이어서, n+1 번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n+1)$)의 예측 구동 주파수($f(n+1,1)$)로 RF 전력을 출력한다(S141).
- [0099] 이어서, n+2 번째 펄스가 시작하기 전 까지, n+1 번째 펄스에서 제어 루프가 q회 반복된다.
- [0100] 도 8을 참조하면, 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)는 교번하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})의 펄스로 RF 전력을 부하(140)에 제공한다. 펄스 발생기(110)는 교번하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})의 펄스 신호를 생성한다. 상기 펄스 신호의 주기는 약 100 usec 수준일 수 있다.
- [0101] 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 구동 주파수는 첫 번째 펄스의 시작 구동 주파수(f_{start})에서 시작하여, n번째 펄스의 m=1의 제어 루프에서, $f(n,m=1)$ 의 구동 주파수를 가진다. 시간에 따라, 상기 위상 이동된 반사 계수의 허수부($Im(\Gamma')$)가 음의 값을 가지는 경우, 구동 주파수는 감소된다. m=r의 제어 루프 및 m=q의 제어 루프에서, 구동 주파수와 서셉턴스(b')를 사용하여, n+1 번째 펄스의 m=1의 제어 루프에서 사용할 구동 주파수($f(n+1,m=1)$)가 예측된다. 즉, 다음 펄스의 시작 구동 주파수는 이전 펄스의 구동 주파수와 서셉턴스(b')를 사용하여 예측된다. 이에 따라, 고속의 주파수 튜닝 임피던스 매칭 또는 최적 주파수 설정이 가능하다. 본 발명에 따르면, 1- 3 개의 펄스 내에서 임피던스 매칭이 완료된다.
- [0102] 도 9를 참조하면, 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)의 구동 주파수의 가변 범위는 12.88 MHz ~ 14.24 MHz일 수 있다. 매칭된 주파수는 13.56 MHz이고, 임피던스 매칭 네트워크(130)와 부하(140)를 포함하는 임피던스의 실수부(Z')는 50 옴으로 설정되었다. 위상 이동된 반사계수(Γ') 또는 위상 이동된 어드미턴스(y')는 스미스 차트에 표시된다. 최적의 임피던스 매칭 위치는 반사계수(Γ')의 허수성분이 "0" 인 주파수이다. 스미스 차트 상에서, 12.88 MHz로부터 구동 주파수가 증가함에 서셉턴스(b')가 음의 값에서 영으로 증가한다. 한편, 14.24 MHz로부터 구동 주파수가 감소함에 따라 서셉턴스(b')가 양의 값에서 영으로 감소한다.
- [0103] $g'=1$ 인 컨덕턴스 서클에서, 구동 주파수가 증가함에 따라 서클을 따라 시계 방향으로 회전하고, 서셉턴스(b')의 절대값이 점진적으로 영에 접근한다. 서셉턴스(b')의 절대값이 영에 도달하면, 임피던스가 매칭된다.
- [0104] 도 10 및 도 11을 참조하면, 실선은, 부하(140) 및 임피던스 매칭 네트워크(130)의 임피던스(Z')의 실수부가 50 ohm인 경우, 구동 주파수에 따른 서셉턴스(b')를 표시한다. 12.88 MHz로부터 구동 주파수가 증가함에 서셉턴스(b')가 음의 값에서 영으로 증가한다. $f(n,m=r)$ 은 n번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서의 m=r 번째의 제어 루프의 구동 주파수를 나타낸다. f_{match} 는 임피던스가 매칭된 구동 주파수이다. 점선은 $f(n,m=r)$ 에서의 서셉턴스와 $f(n,m=q)$ 에서 서셉턴스를 연결하는 직선이다. 상기 직선이 영인 지점의 주파수가 n+1번째 펄스의 온타임 구간에서 예상되는 예측 매칭 주파수이다. 상기 점선의 서셉턴스(b')가 "0"이 되는 주파수 $f(n+1,m=1)$ 가 예측 매칭 주파수이며, 다음 펄스의 시작 구동 주파수가 된다.
- [0105] n번째 펄스의 온타임 구간의 데이터(또는 서셉턴스)를 사용하여 얻어진 예측 구동 주파수를 n+1 번째 펄스의 온타임 구간의 시작 구동 주파수로 사용하면, 고속으로 주파수 튜닝 임피던스 매칭이 수행된다.
- [0106] 도 12는 본 발명의 다른 실시예에 따른 구동 주파수에 따른 어드미턴스의 허수부를 나타낸다.
- [0107] 도 13은 도 12의 제어 루프의 동작 시간에 따른 구동 주파수의 변화를 나타낸다.
- [0108] 도 12 및 도 13을 참조하면, 실선은, 부하 및 임피던스 매칭 네트워크의 임피던스(Z')의 실수부가 50 ohm인 경우, 구동 주파수에 따른 서셉턴스(b')가 표시된다. 12.88 MHz로부터 구동 주파수가 증가함에 서셉턴스(b')가 음의 값에서 영으로 증가한다. $f(n,m=r)$ 은 n번째 펄스의 온타임 구간($T_{ON}(n)$)에서의 m=r 번째의 제어 루프의 구동 주파수를 나타낸다. f_{match} 는 임피던스가 매칭된 구동 주파수이다. 점선은 $f(n,m=r)$ 에서의 서셉턴스와 $f(n,m=q)$ 에서 서셉턴스를 연결하는 직선이다. 상기 직선이 영인 지점의 구동 주파수가 n+1번째 펄스의 온타임 구간에서 예상되는 예측 구동 주파수이다. 상기 점선의 서셉턴스(b')가 "0"이 되는 구동 주파수가 $f(n+1,1)$ 이다. $f(n+1,1)$ 는 f_{match} (13.56MHz)보다 크다.
- [0109] n+1 번째 펄스의 온타임 구간의 상기 예측 구동 주파수에서 반사계수의 허수부($Im(\Gamma')$)가 양의 값을 가진다. 따라서, n+1 번째 펄스의 온타임 구간에서, 구동 주파수는 제어 루프가 동작함에 따라 감소한다.
- [0110] n번째 펄스의 온타임 구간의 데이터(또는 서셉턴스)를 사용하여 얻어진 예측 구동 주파수를 n+1 번째 펄스의 온타임 구간의 시작 구동 주파수로 사용하면, 고속으로 주파수 튜닝 임피던스 매칭이 수행된다.
- [0111] 도 14는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 부하 및 임피던스 매칭 네트워크의 임피던스(Z') 변화를 스미스 차트에 표시한 그림이다.

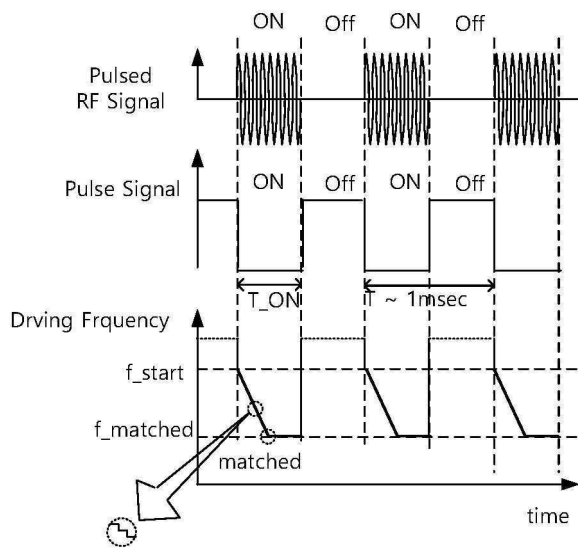
- [0112] 도 15는 도 14의 스미스 차트에 표시된 서셉턴스를 구동 주파수에 따라 표시한 그래프이다.
- [0113] 도 14 및 도 15을 참조하면, $g'=1$ 인 컨덕턴스 서클은 임피던스(Z')의 실수부($\text{Re}(Z')$)가 50 오옴인 경우이다. $g'=0.5$ 인 서클은 임피던스의 실수부($\text{Re}(Z')$)가 100 오옴인 경우이다. $g'=2$ 인 서클은 임피던스의 실수부($\text{Re}(Z')$)가 25 오옴인 경우이다.
- [0114] 임피던스의 실수부($\text{Re}(Z')$)가 50 오옴이 아닌 경우에도, 펄스형 가변 주파수 RF 발생기는 동작할 수 있다. 즉, 임피던스 매칭은 수행되지 않지만, 반사계수의 절대값($|\Gamma'|$)을 최소화시키는 구동 주파수가 존재한다. $g'=0.5$ 인 서클에서, K 위치는 반사계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)가 영이 되는 지점으로, 임피던스 매칭 조건 대신에 최적 주파수 위치로 사용될 수 있다. $g'=2$ 인 서클에서, L 위치는 반사계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)가 영이 되는 지점으로, 임피던스 매칭 조건 대신에 최적 주파수 위치로 사용될 수 있다.
- [0115] 다시 도 7을 참조하면, S124 단계에서, 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')를 이용하여 임피던스 매칭을 위한 최적 조건을 판단할 수 있다. 상기 최적 조건은 상기 위상 이동된 반사계수의 절대값($|\Gamma'|$) 또는 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)의 크기로 판단한다. 예를 들어, 상기 위상 이동된 반사계수(Γ')의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)의 절대값이 문턱값 이하인 경우 최적 조건을 판단한다. 임피던스의 매칭은 반사계수의 절대값($|\Gamma'|$)으로 판단될 수 있으나, 임피던스 매칭이 수행되지 않은 경우에는, 반사계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)가 영인지 여부 (또는 임계값이하 인지 여부)로 최적 조건을 판단할 수 있다.
- [0116] 따라서, 반사계수의 허수부($\text{Im}(\Gamma')$)가 영인 경우, 현재 상황에서 최적 구동 주파수이다. 따라서, 구동 주파수는 최적 구동 주파수로 유지될 수 있다.
- [0117] 한편, 임피던스의 실수부가 50 오옴보다 큰 값을 가지는 경우 예측 구동 주파수의 오차는 증가할 수 있다. 하지만, 이 오차는 하나의 펄스 내에서 제어 루프 알고리즘에 의하여 도달할 수 있다. $n+1$ 번째 펄스에서도 f_{match} 에 이르지 못할 경우에, 구동 주파수를 예측하는 알고리즘이 매 펄스마다 수행되어, $n+2$ 번째 펄스내에서 최적의 구동 주파수에 도달한다.
- [0118] 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기는 구동 주파수를 변경하여 최적 구동 주파수에서 동작할 수 있다. 임피던스 매칭 네트워크(130)는 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기(110)와 상기 부하(140) 사이에 배치되고 적어도 2 개의 가변 리액턴스 소자를 포함한다. 상기 임피던스 매칭 네트워크(130)는 완벽한 임피던스 매칭을 위하여 가변 리액턴스 소자의 리액턴스 값을 변경한다. 이에 따라, 임피던스 매칭 네트워크의 입력단(N2)에서 상기 부하 방향의 상기 임피던스의 실수부($\text{Re}(Z')$)는 전송선의 특성 임피던스(Z_0)로 변경될 수 있다. 이에 따라, $g'=1$ 인 컨덕턴스 서클 상에 임피던스(Z')가 존재하여, 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기는 임피던스 매칭을 수행할 수 있다.
- [0119] 도 16은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 펄스 시퀀스를 나타내는 도면이다.
- [0120] 도 16을 참조하면, 본 발명의 구동 주파수를 예측하는 알고리즘이 수행되기 전에, 적어도 하나의 구동 주파수를 예측하는 알고리즘이 수행되지 않는 펄스가 부하에 전달될 수 있다. 이러한 펄스는 플라즈마를 초기 방전하여 안정화시킬 수 있다. 플라즈마 안정화 구간 동안, 구동 주파수는 이미 설정된 시작 구동 주파수(f_{start})로 동작할 수 있다. 상기 펄스형 가변 주파수 RF 발생기의 구동 주파수를 변경하지 않으면서 교번하는 온타임 구간(T_{ON})과 오프 타임 구간(T_{OFF})을 포함하는 플라즈마 안정화시키는 단계를 포함할 수 있다.
- [0121] 이상에서는 본 발명을 특정의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 이러한 실시예에 한정되지 않으며, 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 실시할 수 있는 다양한 형태의 실시예들을 모두 포함한다.

부호의 설명

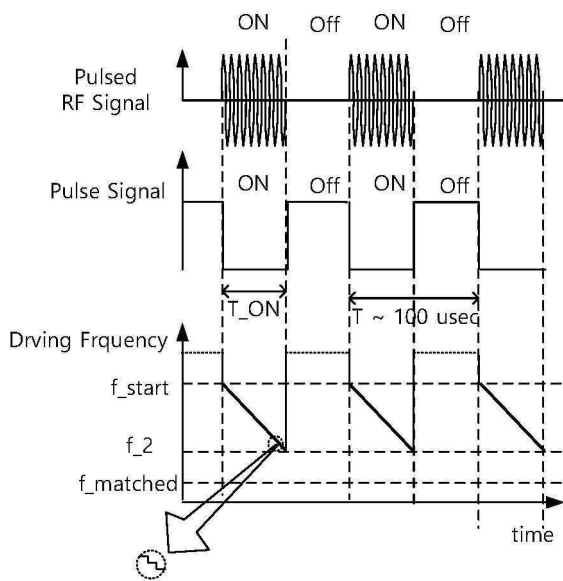
- [0122] 100: 펄스형 가변 주파수 RF 전원 시스템
- 110: 펄스형 가변 주파수 RF 발생기
- 120: 전송선
- 130: 임피던스 매칭 네트워크
- 140: 부하

도면

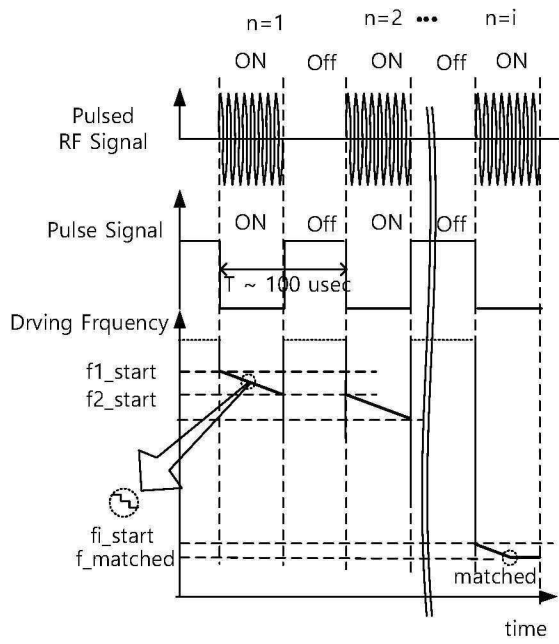
도면1



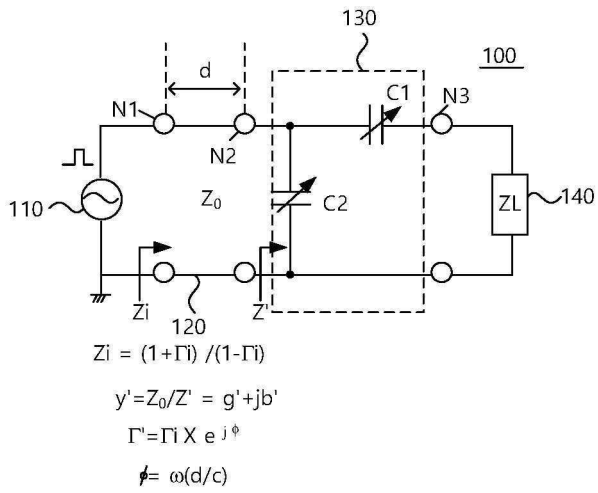
도면2



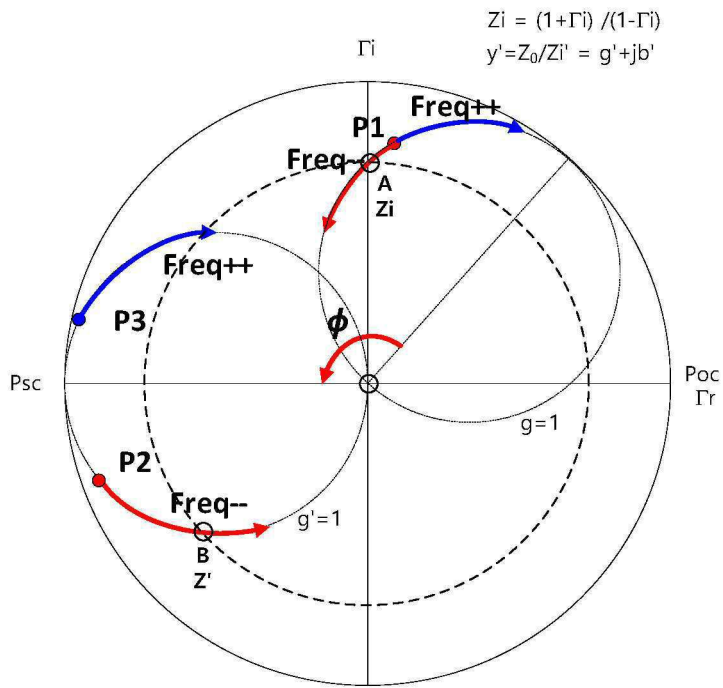
도면3



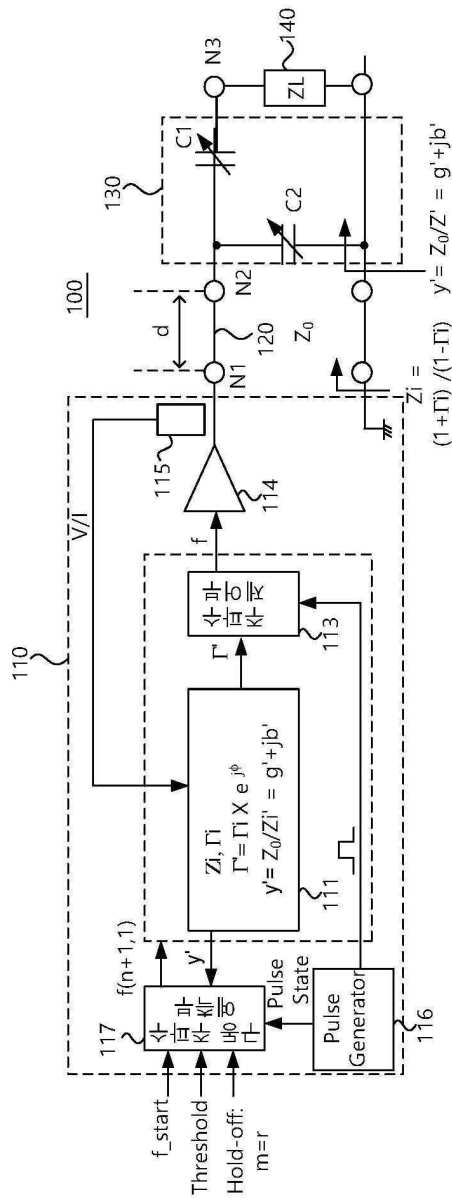
도면4



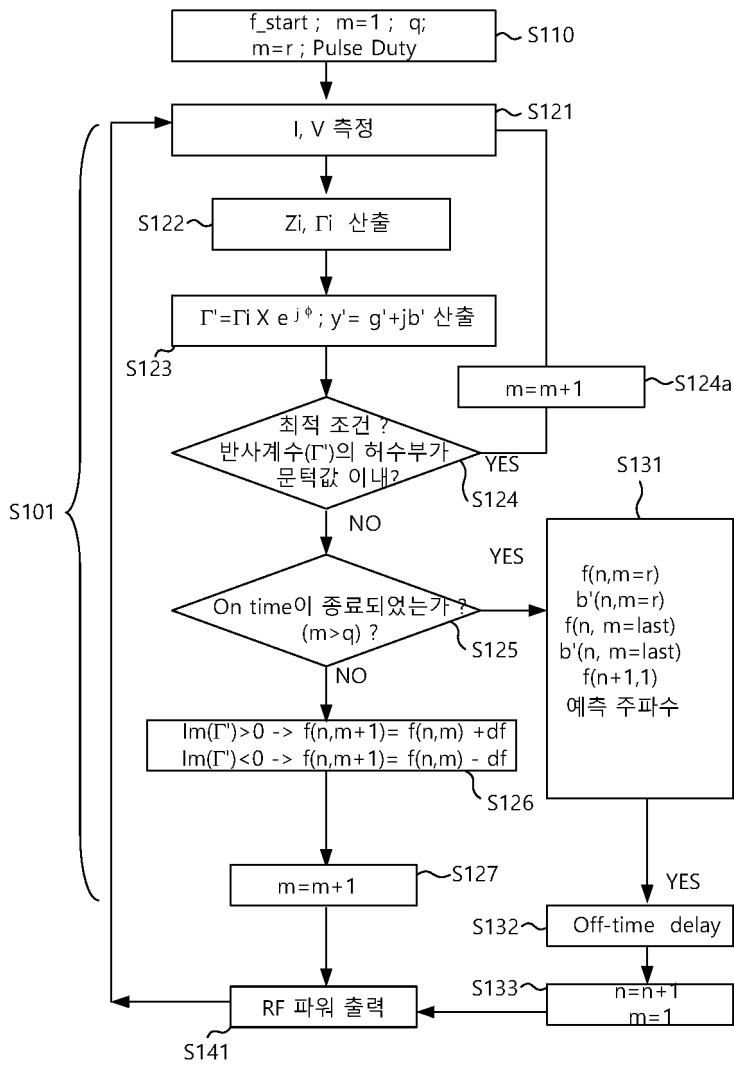
도면5



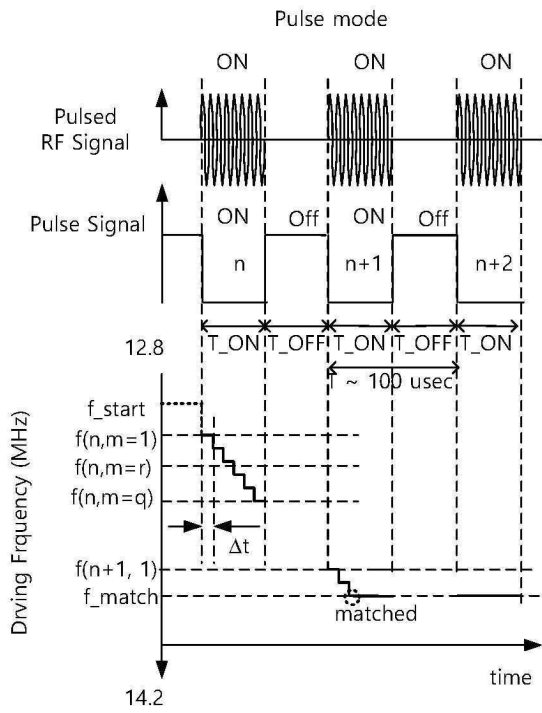
도면6



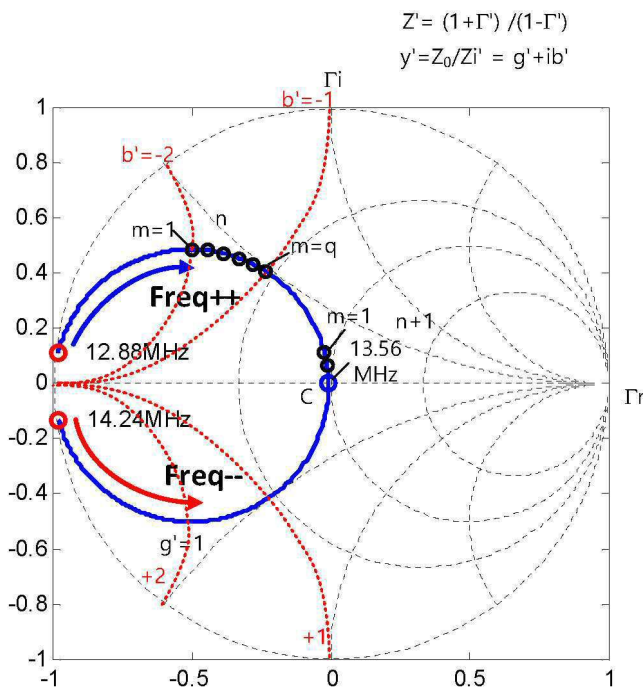
도면7



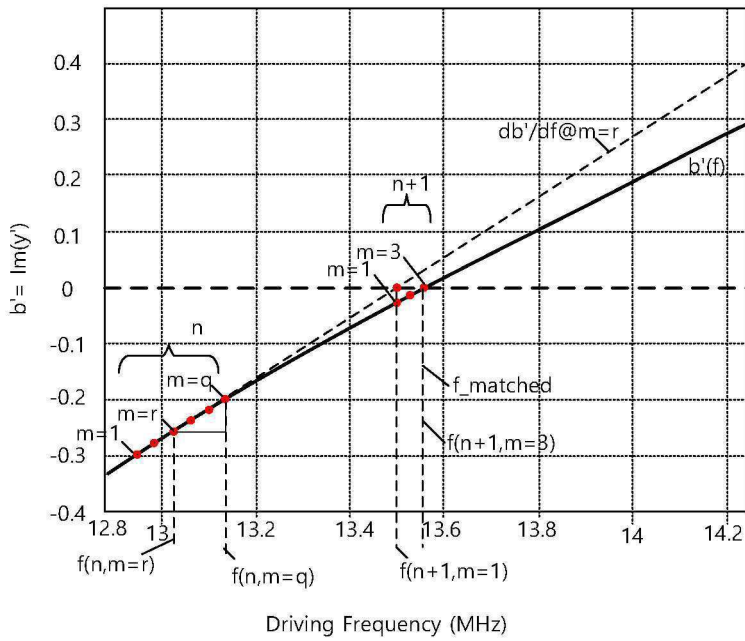
도면8



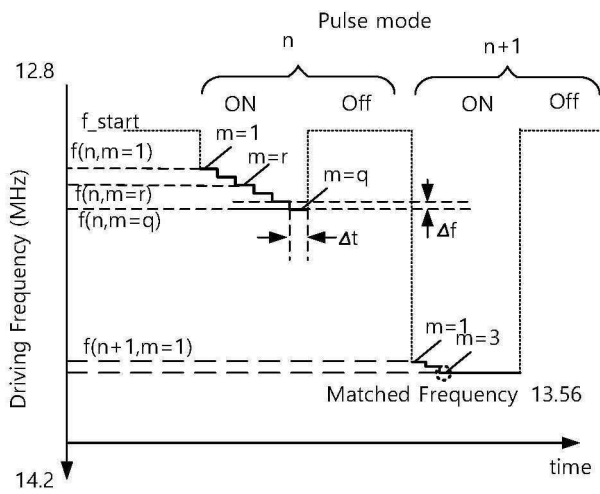
도면9



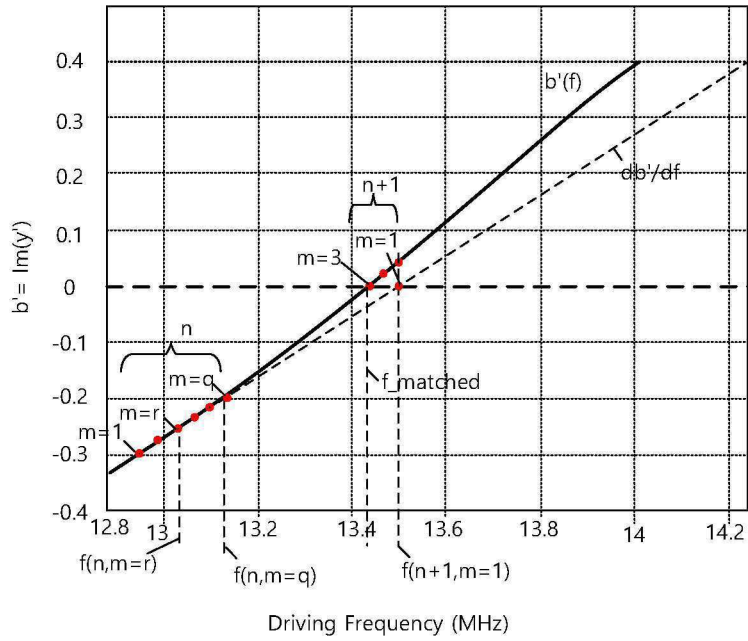
도면10



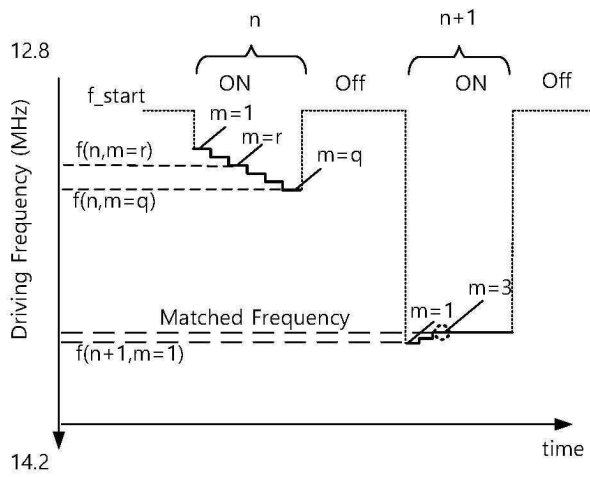
도면11



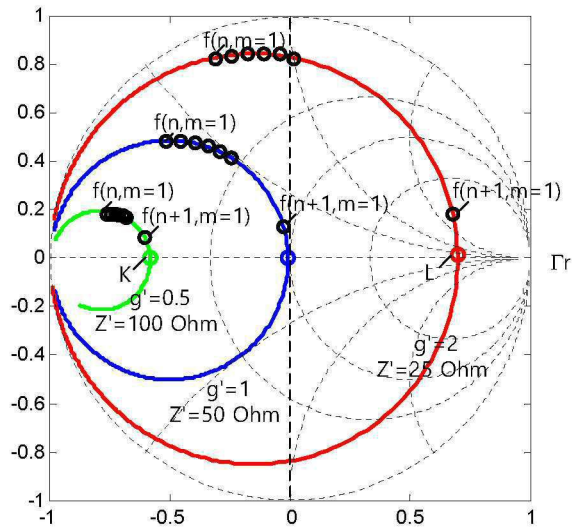
도면12



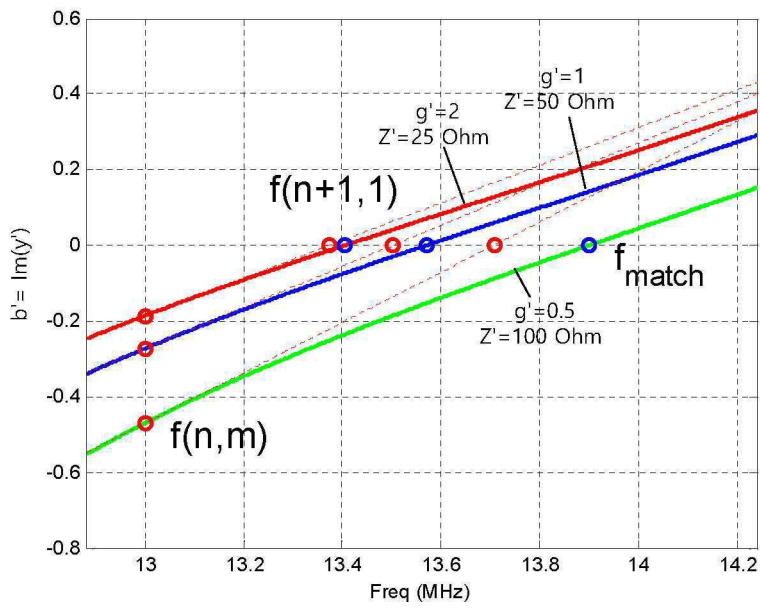
도면13



도면14



도면15



도면16

