

플라즈마 응용을 위한 선택적 감쇠기를 사용한 고안정 고효율 전력증폭기

High Stability and High Efficiency Power Amplifier with Switchable Damper for Plasma Applications

김지연 · 이동현 · 전상현 · 유호준 · 김종현

Ji Yeon Kim · Dong Heon Lee · Sang Hyun Chun · Ho Joon Yoo · Jong Heon Kim

요 약

본 논문에서는 플라즈마 응용을 위한 고효율 및 고안정성을 가지는 RF 발생기용 1 kW급 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 전력증폭기는 푸쉬풀 MOSFET 1개와 고전류 구동 IC로 구성하였으며, E급 증폭기의 구조를 사용함으로써 효율을 개선하였다. 플라즈마 응용에 적합하도록 전력증폭기에 선택적 감쇠기를 사용하여 3가지 모드로 동작하게 함으로써 효율과 안정성을 선택적으로 고려할 수 있도록 하였다. 초기 방전 구간의 불안정성을 개선하기 위하여 RF 발생기의 출력 안정영역을 선택적 감쇠기를 사용하여 전압정재파비(VSWR)를 3.8:1미만보다 개선된 4.5:1미만으로 확장하였다. 또한 기존에 적용되는 증폭기에 비하여 크기를 30 % 줄였으며, 주파수 13.56 MHz, 출력 1 kW에서 효율 80 %를 얻으므로 기존에 비하여 효율을 약 13 % 개선하였다.

Abstract

In this paper, a new 1 kW power amplifier with high efficiency and high stability in a RF generator is designed and fabricated for plasma applications. The efficiency of power amplifier is improved by using class-E amplifier that consists of one push-pull MOSFET and high current drive IC instead of class-C amplifier composed of several single ended MOSFET. Switchable damper that allows selecting three different modes of amplifiers for considering efficiency and stability is added into the amplifier for plasma applications. Stable region of an early electronic discharge section is extended to VSWR of 4.5:1 compared to conventional VSWR of 3.8:1 through using switchable damper. The dimension of the amplifier is also reduced to 30 % of conventional amplifier. The 80 % efficiency of power amplifier with switchable damper is obtained the output power of 1 kW in operating frequency of 13.56 MHz. In comparison of conventional power amplifier for plasma applications, 13 % efficiency is improved.

Key words : High Efficiency, Class E, High Stability, Switchable Damper, Plasma Application

I. 서 론

반도체의 집적도가 급속히 높아짐에 따라 집적 회로에서 더욱 얇은 IC 회로 선로가 요구되면서 기

존의 습식 식각(wet etching) 방식으로는 물리적 한계가 있기 때문에 비등방성 에칭이 가능한 플라즈마 공정 기술이 도입되었다^[1]. 플라즈마를 사용하는 공정 기술을 이용하면 반송 자동화가 가능하고 외부

「본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업 (IITA-2008-(C1090-0801-0041))에 의해 연구되었음.」
광운대학교 전파공학과(Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University)

· 논문 번호 : 20080908-117

· 수정완료일자 : 2008년 12월 1일

로부터의 오염을 억제할 수 있는 장점이 있기 때문에 이 기술은 반도체 제조 공정의 30 % 이상의 비중을 차지하고 있다.

웨이퍼 생산을 완료하기 위하여 약 10주의 기간이 필요하고 이 기간 동안 플라즈마가 계속적이고 안정적으로 공급되어야 불량률을 줄이면서 반도체 수율을 증가시킬 수 있다. 따라서 공정 챔버 내에 안정적인 플라즈마의 공급을 위해서는 챔버 내에 자체와 전계를 인가하는 고효율 고안정 RF 발생기가 요구된다.

플라즈마 챔버는 플라즈마의 초기 방전 구간과 방전 지속 구간에서 임피던스 차이가 존재한다. 따라서 플라즈마 챔버와 RF 발생기 사이의 임피던스 차이를 보정하는 자동 정합기가 사용된다. 그러나 임피던스 자동 정합기는 가변 캐패시터를 조정하는 방식으로 이루어지기 때문에 0.5초에서 10초에 이르는 구동시간이 요구된다. 이러한 문제로 인하여 RF 발생기는 자동 정합기 구동시간 동안 급격히 불안정한 구간을 갖게 된다. 자동 정합기 구동시간은 실제 플라즈마가 동작하는 시간을 전 구간으로 보았을 때 비교적 짧은 구간이지만 안정성 확보가 요구된다.

현재는 안정성을 확보하기 위해서 RF 발생기 내에 이득과 효율이 낮지만 고안정 특성을 갖는 C급 전력 증폭기를 사용한다. 그러나 이러한 C급 증폭기는 마지막 증폭단의 효율이 높지 않을 뿐 아니라 드라이브 증폭단을 필요로 하기 때문에 전체 효율을 더 저하시킨다. RF 발생기의 고효율과 고안정 특성은 서로 trade-off의 관계를 갖고 있기 때문에 고안정 특성 유지를 하게 되면 효율이 낮게 구동된다. 플라즈마의 사용범위가 넓어짐에 따라 동작 중 에너지 효율은 제품의 가격과 직결되기 때문에 이를 개선하는 것이 요구된다²⁾.

본 논문에서는 RF 발생기의 전력증폭기로 고효율 스위치 모드 E급 증폭기를 사용할 수 있는 구조를 제안하였다. 자동 정합기 구동시간은 실제 플라즈마가 유지되는 시간을 전 구간으로 보았을 때 비교적 짧은 구간이기 때문에 E급 증폭기를 이 구간 동안 C급 전력증폭기와 같이 안정적으로 동작할 수 있도록 이득을 낮추면서 출력을 감소시키고 플라즈마의 챔버의 임피던스가 안정적으로 유지되는 구간에서는 E급 증폭기의 본래 이득과 출력을 얻도록 하여 높은

효율을 유지하는 방법을 적용하였다. 자동 임피던스 정합기의 구동시간 동안에 나타날 수 있는 소자의 손상을 막아주어 고효율 E급 전력증폭기의 적용을 가능하게 하였다. 결과적으로 RF 발생기에 적용이 가능한 80 % 효율을 갖는 E급 전력증폭기를 얻으므로 효율을 기존의 RF 발생기용 증폭기보다 효율을 13.5 % 개선하였다.

II. RF 발생기용 전력증폭기

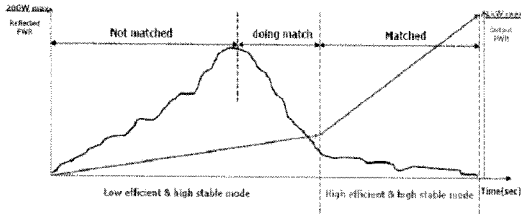
플라즈마 챔버는 초기 방전 구간과 방전 지속 구간에서 임피던스가 다르다^{3)~6)}. 따라서 자동 정합기를 사용하여 전 구간에서 반사 전력이 없도록 임피던스 정합을 이루지만 실제 자동 정합기도 가변 캐패시터를 사용한다. 따라서 임피던스 정합에 일정시간이 요구된다. 이러한 자동 정합이 완료되기 이전에 RF 발생기는 종단에 50 Ω이 아닌 값의 임피던스를 갖고 플라즈마 챔버로 전력이 전달되지 못하면서 RF 발생기의 전력증폭기가 건디기 어려울 정도로 큰 반사 전력이 전달된다. 결국 이 구간 동안 시스템이 손상을 입거나 불안정적으로 동작하게 된다. 따라서 초기 방전 구간에서 전력증폭기로 반사되는 전력을 줄여줌으로써 시스템의 안정성을 확보하기 위해서 선택적 감쇠기(switchable damper)가 포함되는 구조가 사용된다. 그림 1(a)는 플라즈마 챔버의 동작을 위한 기본 구성도를 보여준다. 플라즈마의 임피던스 변화를 해결하기 위해서 RF 발생기와 플라즈마 챔버 사이에 자동 임피던스 정합기가 들어가게 된다. 그림 1(b)는 반사 전력을 보여주는 그림이다. 그림 1(b)처럼 플라즈마 챔버와 RF 발생기가 임피던스 정합되기 이전에 일정 구간 동안 반사 전력이 커진다. 따라서 이 구간에서 반사 전력으로부터 보호하기 위한 선택적 정합 회로(switchable matching circuit)를 사용한다.

2-1 기존의 RF 발생기용 전력증폭기

기존의 RF 발생기용 전력 증폭기는 그림 2와 같이 여러 개의 단일구조(single-ended) MOSFET을 병렬로 연결하거나 푸시 풀(push-pull) 구조로 결합하여 고효율을 얻었다. 그리고 여러 개를 결합한 최종 증폭단을 드라이브 하기 위하여 단일구조(single-ended)



(a) 플라즈마 챔버의 동작을 위한 기본 구성도
(a) Basic schematic for operation of plasma chamber



(b) RF 발생기의 반사전력
(b) Reflected power of RF generator

그림 1. 임피던스 변화에 따른 RF 발생기의 동작 특성
Fig. 1. Operation characteristic of RF generator by impedance variation.

MOSFET 1개를 추가로 이용하였으며, 전체 증폭기의 이득을 조절하기 위해 증폭기의 입력단에 전압 가변 감쇠기와 손실을 보상하기 위한 보상용 증폭기 등이 사용되었다. 증폭기의 효율과 안정성을 높이기 위해서 출력이 낮은 드라이브 단에서는 AB급으로 증폭기의 바이어스를 설정하였고, 출력이 높은 최종 단은 C급으로 바이어스를 설정하였다. 그리고 임피던스가 변하는 부하와 임피던스 정합이 정확히 이루어지지 않아 발생할 수 있는 불안정성을 해소하기 위해 증폭기의 이득을 줄여주는 부궤환 회로를 사용하였다. 이와 같은 방식으로 1 kW RF 발생기용 전력 증폭기를 구성하게 되면 단일구조(single-ended) MOSFET 5개가 필요하게 된다. 따라서 사이즈가 커지는 단점을 가지고 있으며, 또한 부궤환으로 인한 전력 손실이 커 RF 발생기의 효율을 저하시키게 된다. 효율저하는 곧 많은 열을 발생하게 되고, 이는 증폭기의 수명을 단축시키는 중요한 요인이 된다.

2-2 새로운 RF 발생기용 전력증폭기

본 논문에서는 1 kW RF 발생기용 E급 전력증폭기를 구현하기 위해 푸쉬-풀(push-pull) 타입의 MOSFET과 토템폴(totempole) 구조의 고전류 게이트 드라이브 IC를 이용한 새로운 RF 발생기용 E급 전력증

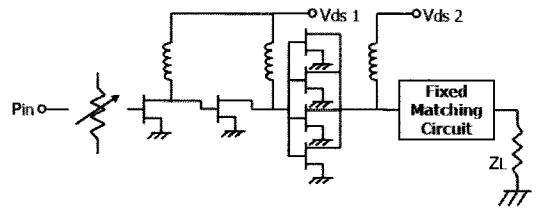


그림 2. 종래의 RF 발생기용 전력증폭기 구성도
Fig. 2. Conventional power amplifier schematic for RF generator.

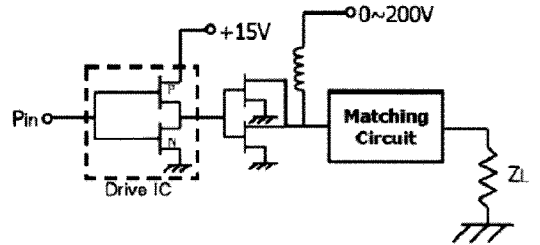


그림 3. 새로운 RF 발생기용 전력증폭기 구성도
Fig. 3. New power amplifier schematic for RF generator.

폭기를 사용하였다. E급 증폭기에서는 입력 신호가 펄스로 인가되면서 소자가 on-off 스위치 동작을 하기 때문에 펄스 신호를 생성하는 고전류 게이트 드라이브 IC를 사용할 수 있다. 따라서 기존의 구조와 달리 다른 드라이브 단이 요구되지 않는다.

그림 3은 1개의 패키지 안에 2개의 고효율 MOSFET이 들어있는 푸쉬-풀 타입의 MOSFET 소자를 이용한 새로운 RF 발생기용 전력증폭기의 구성도이다. 고효율 푸쉬-풀 타입 MOSFET 소자 1개를 마치 단일구조(single-ended) MOSFET처럼 이용하였다. 동작 주파수가 13.56 MHz로 자유공간에서 한 파장의 길이는 22.12 m이다. 따라서 푸쉬-풀 타입 소자 내부의 2개의 MOSFET를 병렬 연결하여 동작(parallel operation)시키기 위해서 발룬 트랜스포머를 사용하지 않고 직접 결합하여도 파장에 비해 결합선이 무시할 수 있을 만큼 짧음으로 본 연구에서는 회로의 단순화와 사이즈의 축소를 위해 직접 결합하였다. 또한, E급 증폭기는 스위칭 증폭기 중의 하나로 출력을 조정하기 위하여 드레인 소스 간 직류 전압을 조정하여 출력의 가변을 시도하였다. 아울러 고전류 고속 게이트 드라이브로 직접 최종 파워 트랜지스터를 스위칭하므로 드라이브 단의 파워 손실을 줄일

수 있는 장점이 있다.

2-3 E급 전력증폭기의 이론

RF 발생기의 고효율 특성을 얻기 위해서 스위치 모드 E급 전력증폭기를 사용하였다. 스위치 모드 전력증폭기에서 능동 소자는 드라이버에 의해서 적절하게 드라이브될 때 실질적으로 스위치로 동작한다. 스위치가 원하는 주파수에서 순환적으로 동작하면서 DC 전력이 RF 전력으로 변환된다. 이 때 종단 회로는 종단 임피던스를 변환하거나 리액턴스 값을 조정하도록 구성되며, 스위칭으로 형성되는 고조파 성분들을 억제하기 위해서 저주파 통과 필터나 대역 통과 필터를 포함한다. 소자가 이상적인 스위칭 동작을 한다면 드레인 전류와 드레인 전압이 겹치지 않게 되기 때문에 소자 내에서 손실되는 전력은 0이 된다. 따라서 이론적으로 효율 100 %를 갖는다. 그림 4는 이상적인 E급 전력 증폭기의 (a) 구성도와 (b) 등가회로 (c) 드레인 전압 및 전류와 출력전압의 파형을 나타낸 그림이다^[3]. 그림 4(a) 구성도는 스위치로 동작하는 소자(TR)와 병렬 커패시터 C_2 , RF choke RFC, 출력 회로의 직렬 조정회로를 위한 L_0 , C_0 그리고 종단 임피던스 R 로 이루어진다. C_1 은 스위치에 병렬로 존재하는 기생성분을 나타낸다. 이 구성도의 해석을 쉽게 하기 위해서 L_0 와 C_0 를 신호의 위상지연을 주는 리액턴스를 포함하면서 동작주파수를 조절하는 공진회로로 간주하기 위해서 그림 4(b) 등가회로와 같이 jX 구성요소가 부가된다. E급 증폭기에는 분명한 전류와 전압원이 존재하기 않기 때문에 해석이 어렵다. 따라서 먼저는 출력에서 안정된 전압 파형이 나타난다고 가정하고 해석된다. 그림 4(c)는 그림 4(b)의 등가회로로 해석하였을 때 출력이 이상적이라고 가정하고 구한 드레인 전압과 전류의 파형이다.

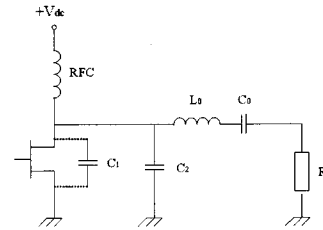
그러나 실제적인 소자의 스위칭 동작에서 적절한 드라이버가 설계된다고 할지라도 소자의 스위칭 시간이 RF 신호 주기에 일정 부분을 차지하게 된다. 따라서 스위칭 동안 소모되는 전력이 존재하게 된다. E급 전력증폭기는 스위치의 주기적인 동작에 따른 적합한 시간적 응답을 도출하여서 드레인 전압과 전류가 동시에 걸리는 것을 방지할 수 있도록 종단 회로를 설계해 준다. 주로 소자의 드레인 종단에 병

렬 커패시터를 부가함으로써 시간적인 지연을 주는 방법이 사용된다. 이때에 최대 효율을 얻기 위한 E급 증폭기의 적절한 동작 포인트는 duty cycle이 0.5이고 스위치가 개방되었을 때 일반화된 드레인 전압의 기울기가 0일 때 획득되고 이에 따른 각 부분의 값은 식 (1), 식 (2)와 같다^[6].

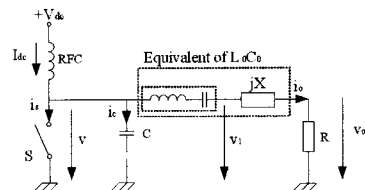
$$B = j\omega C = j2\pi f_0(C_1 + C_2) = 0.1836/R \quad (1)$$

$$X = 2\pi f_0 L_0 - 1/(2\pi f_0 C_0) = 1.1525R \quad (2)$$

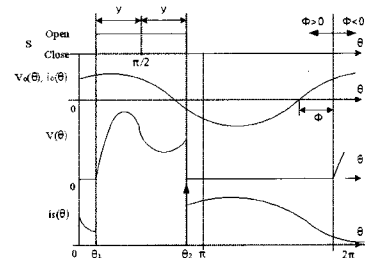
여기서 C_1 은 소자 내부의 커패시턴스, C_2 는 외부 정합회로의 병렬 커패시턴스이다. L_0 와 C_0 는 정합회로의 직렬 인덕턴스와 커패시턴스, R 은 종단 임피던스를 의미한다.



(a) E급 증폭기의 구성도
(a) Schematic of class-E amplifier



(b) E급 증폭기의 등가회로
(b) Equivalent circuit of class-E amplifier



(c) E급 증폭기 드레인 전압과 전류 및 출력 파형
(c) Drain voltage, current and output power waveform of class-E amplifier

그림 4. 이상적인 E급 전력증폭기^[6]

Fig. 4. Ideal class-E amplifier^[6].

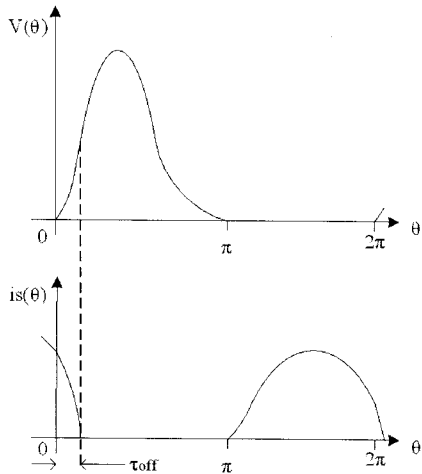


그림 5. Transition time으로 인한 E급 전력증폭기의 동작 특성^[7]
 Fig. 5. Operation characteristic of class-E amplifier by transition time^[7].

그러나 실제로 드레인 전압과 전류가 겹치는 구간을 완전히 제거할 수는 없다. E급 전력증폭기에서 전류와 전압의 겹치는 구간을 제거하는 것은 on되는 경우(rising time) 또는 off되는 경우(falling time) 중의 한 부분만을 만족시킬 수 있다. 대부분 소자들이 스위칭 동작 시 상승시간이 하강시간보다 크기 때문에 상승시간에서 드레인 전류와 전압이 겹치지 않도록 E급 증폭기의 종단을 설계해 준다. 그림 5에서처럼 동작 시간(transition time)에 의해서 소자가 off에서 on 되는 동안에 드레인 전류와 전압이 겹치지 않도록 하여준다. 소자가 on에서 off되는 동안 드레인 전류의 파형은 경사진 형태로 나타나고, 이때에 증폭기의 손실이 발생하게 된다. 이때에 E급 전력증폭기의 효율은 식 (3)과 같다^[7].

$$\eta = P_0 / (P_0 + (1/12)\tau_f^2 P_0) \quad (3)$$

여기서 τ_f 는 소자의 하강시간, P_0 은 출력을 의미한다.

III. 설계 및 시뮬레이션

그림 6은 1 kW E급 전력증폭기의 설계 순서를 나타낸 순서도이다. E급 전력증폭기를 플라즈마 응용에 사용되는 RF 발생기에 활용이 가능하도록 하기

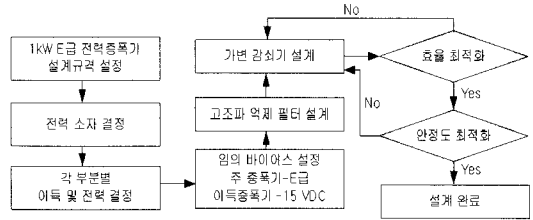


그림 6. 플라즈마용 1 kW E급 전력증폭기의 설계 순서
 Fig. 6. Design flow chart of 1 kW class-E power amplifier for plasma applications.

위해서 먼저는 푸쉬 풀(push-pull) 소자를 선택하여 증폭기의 크기를 줄이고 최대 효율을 얻기 위해서 드레인-소스 간 전압을 조정하여 이득을 조절한다. 그리고 최종 전력 소자를 최대 효율로 스위칭하기 위해서 고전류 고속 게이트 드라이브 회로를 사용하며, 고조파 성분을 억제하기 위해 2차 고조파 억제 필터를 정합회로의 일부로 설계하고 부하 상태에 따라 안정성과 효율성을 상대적으로 고려하기 위한 선택적 정합회로를 위해서 선택적 감쇠기를 사용한다.

그림 7은 E급 전력증폭기에 요구되는 선택적 감쇠기 특성을 나타낸다. E급 증폭기의 선택적 감쇠기 (switchable damper)에 사용되는 저항이 견딜 수 있는 전력은 400 W이기 때문에 사용 중에 발생하는 증폭기의 열을 감안하여 반사 전력 손실의 한계를 출력 전력의 20 %인 200 W로 정하였다. 선택적 감쇠기는 손실 1.02 dB를 갖는 모드 1과 손실 0.32 dB를 갖는 모드 2 그리고 손실이 없는 모드 3 이렇게 세 가지로 동작하게 된다. 앞서 보여준 그림 1(b)와 같이 반사되는 전력은 초기 방전 구간에서 점점 증가했다가 자동 정합기의 정합이 시작되면서 점점 감소하기 시작하고 방전 지속 구간에서 반사 전력이 최소가 된다. 따라서 선택적 감쇠기의 특성은 그림 7과 같이 초기 방전 구간에서는 전력증폭기의 선택적 감쇠기를 모드 2로 동작시키다가 반사 전력의 최대가 되는 구간인 자동 정합 시작 지점에서 안정성을 높이기 위해 모드 1로 동작시키고, 정합이 되면서 반사 전력이 줄어들면 다시 모드 2로 동작시키고, 완전히 정합이 이루어지면 방전 지속 구간에서 다시 모드 3으로 동작시켜서 전력 손실이 없도록 한다. 이러한 과정을 그림 7에 나타내었다.

그림 8은 RF 발생기에 사용하기 위한 E급 전력

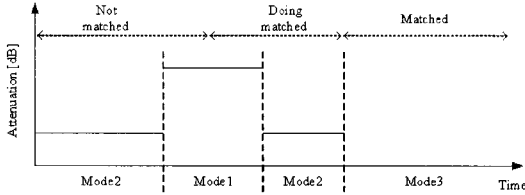


그림 7. RF 발생기 적용을 위해서 요구되는 E급 전력 증폭기의 선택적 감쇠기 특성
 Fig. 7. Switchable damper characteristic of class-E amplifier for RF generator application.

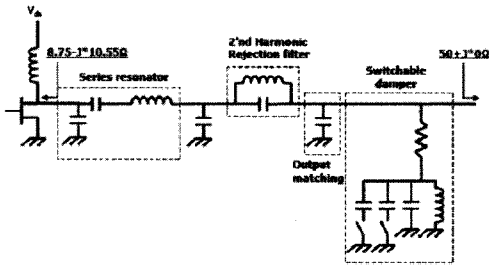
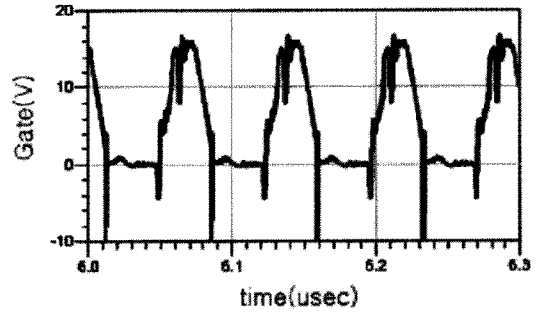


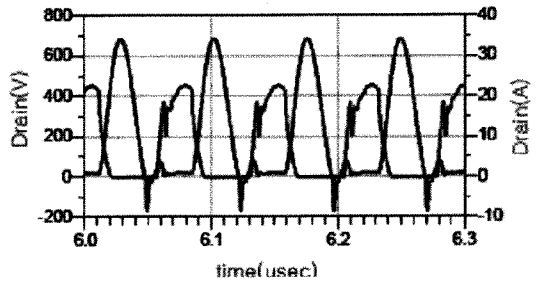
그림 8. 2차 고조파 억제 필터와 선택적 감쇠기를 포함한 E급 전력증폭기의 구성도
 Fig. 8. Schematic of class-E with 2nd harmonic rejection filter and switchable damper.

증폭기 설계 순서에 따라서 설계한 E급 전력증폭기의 구성도이다. 선택적 감쇠기는 모드별로 스위치를 동작시켜서 서로 다른 삽입 손실을 갖도록 설계된다. 손실이 없는 모드 3에서는 스위치 1과 스위치 2를 모드 폐쇄시키고 모드 2에서는 스위치 2를 개방시키고 삽입 손실이 가장 큰 모드 1에서 스위치 1과 스위치 2를 모두 개방시킨다.

E급 전력 증폭기는 최고 출력 1 kW를 가지는 푸쉬 풀 MOSFET를 이용하여 설계하였다. 동작주파수 13.56 MHz에서 MOSFET(IXY사의 DE275X2-102N06A)의 출력 임피던스는 8.75-j10.55 Ω으로 설계하였다. 그림 9는 E급 전력증폭기의 동작을 확인하기 위해서 MOSFET의 드레인 전류와 전압 특성 파형을 나타내었다. 본 논문에 사용된 소자는 스위치 폐쇄 시간(off-time)이 약 10 ns 이기 때문에 이 시간 동안 전압과 전류가 겹치는 구간이 나타나게 된다. 그러나 그림에서 보여주는 것과 같이 MOSFET가 개방(on) 상태에서 폐쇄(off) 상태로 스위치 되는 짧은 순간을 제외하면 MOSFET의 드레인 전압과 전류 파형이 겹치지 않음을 알 수 있다.



(a) 게이트 전압 파형
 (a) Gate voltage waveform



(b) 드레인 전압 전류 파형
 (b) Drain voltage and current waveform

그림 9. E급 전력 증폭기의 전압과 전류 파형 시뮬레이션 결과

Fig. 9. Simulation results of voltage and current waveform of class-E power amplifier.

E급 전력증폭기에 삽입된 선택적 감쇠기는 초기 방전 구간과 방전 지속 구간에서 각각 다르게 동작하도록 설계되었다. 그림 10은 이와 같은 감쇠기의 서로 다른 삽입 손실 특성을 나타낸다. 자동 임피던스 정합기에서 측정되는 반사 전력의 크기에 따라서 커패시터의 스위치를 차례로 동작시켜서 LC 공진회로의 공진주파수를 바꾸어줌으로써 손실에 변화를 준다. 초기 방전 구간 모드 2 동안에는 0.32 dB의 손실을 갖도록 하고 초기 방전 구간에서 공전 지속 구간으로 넘어가는 순간인 모드 1에서는 반사 전력이 매우 크기 때문에 저항이 전달 수 있는 200 W를 넘지 않도록 1.02 dB의 손실을 갖게 하고, 공전 지속 구간인 모드 3에서는 손실이 없도록 설계하였다.

그림 11에서는 선택적 감쇠기를 포함한 E급 전력 증폭기의 모드별 효율을 그래프로 나타내었다. 최고 출력인 1 kW에서의 드레인 효율을 보면 모드 1인 경우에 61 %, 모드 2인 경우에는 73 %, 모드 3인 경

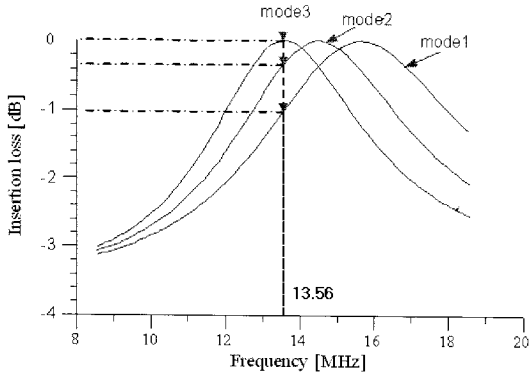


그림 10. 선택적 감쇠기의 모드별 삽입 손실 시뮬레이션 결과

Fig. 10. Simulation result of switchable damper at each mode.

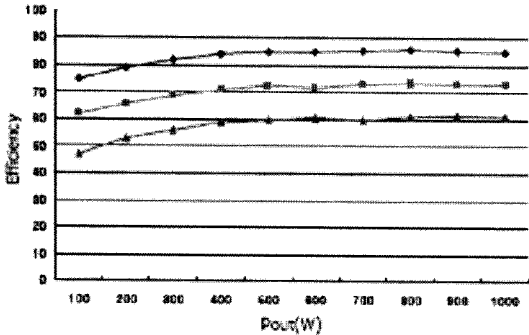


그림 11. 선택적 감쇠기를 포함한 전력 증폭기의 드레인 시뮬레이션 효율

Fig. 11. Simulation results of drain efficiency of amplifier with switchable damper.

우에는 85 %를 각각 얻었다. 실제로 RF 발생기가 동작할 때에 모드 1과 모드 2에서의 시간은 전체 동작 시간에 비해서 매우 짧기 때문에 실제 효율은 모드 3의 85 %라고 할 수 있다.

IV. 제작 및 측정결과

설계 및 시뮬레이션 결과를 기초로 플라즈마 응용을 위한 1 kW급 고효율 고안정 E급 전력증폭기를 제작하였다. 능동 부품들이 부착되는 부분은 비유전율 4.6, 기판 두께 1.016 mm인 FR-4를 사용하였고, 마이크로스트립 라인을 사용한 필터와 정합회로를 구성하는 부분은 비유전율 4.6, 기판 두께 1.524 mm의 FR-4 기판을 사용하였다. 필터와 정합회로를 구성하

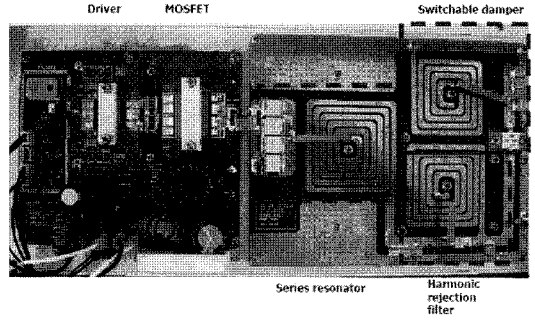


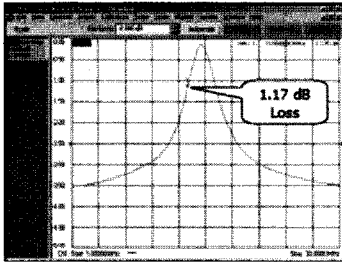
그림 12. 제작된 E급 전력 증폭기의 실물 사진

Fig. 12. Real photograph of 1 kW class-E amplifier.

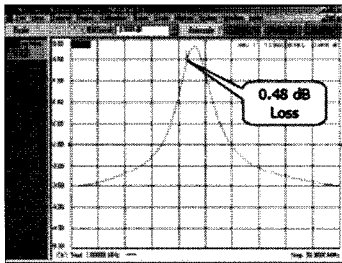
는 기판과 능동소자가 붙은 기판은 서로 다른 것을 사용하였는데, 전도체 손실을 줄이고 1 kW라는 고출력에서 흐르는 큰 전류의 양을 위해서 인덕터를 구성하는 마이크로스트립 라인의 폭을 넓히기 위해서 두꺼운 기판의 PCB를 사용하였다. 그러나 기판이 두꺼워지면 방열에 문제가 되기 때문에 정합회로와 필터에 서로 다른 기판을 적용하였다. 그림 12는 새로운 1 kW E급 전력 증폭기를 제작한 실물 사진이며, 전체 증폭기의 크기는 300×120 mm로 기존 C급 증폭기에 비해서 30 % 정도 크기를 축소하였다.

그림 13은 선택적 감쇠기의 모드별 삽입 손실 측정 결과 그래프이다. 각각의 감쇠기 특성을 위해서 모드별로 490 pF, 430 pF, 370 pF의 커패시터를 사용하였고, 마이크로스트립 인덕터는 280 nH의 값을 갖도록 제작하였다. 모드별로 커패시터를 변화하기 위해서 전력 핀 다이오드(power pin diode)를 스위치로 사용하였다. 스위치는 각각 모드별 동작 확인을 위해서 수동으로 동작시켰다. 이때 스위치의 동작속도는 2 usec 정도이다. RF 발생기의 자동정합속도는 일반적으로 최소 0.5 sec에서 최대 10 sec까지 걸리기 때문에 스위치의 동작속도가 문제가 되지 않는다. 또한, 스위치로 인한 커패시턴스 값이 변하는 것이기 때문에 핀 다이오드 스위치 동작이 전체 전력증폭기의 출력에 왜곡을 주지 않는다. 감쇠기에 사용된 부하 저항은 수급이 용이한 고출력용 50 Ω을 사용하였다. 측정 결과가 시뮬레이션 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

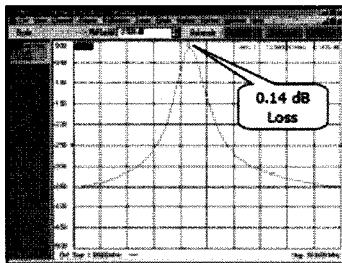
그림 14는 고조파 억제 필터를 포함한 E급 전력 증폭기의 출력 스펙트럼 결과이다. 2차 고조파 억제 필터로 100 pF의 커패시턴스와 340 nH의 인덕턴스



(a) 모드 1
(a) Mode1



(b) 모드 2
(b) Mode 2



(c) 모드 3
(c) Mode 3

그림 13. 선택적 감쇠기의 모드별 삽입 손실 측정 결과
Fig. 13. Measured results of loss characteristic of switchable damper.

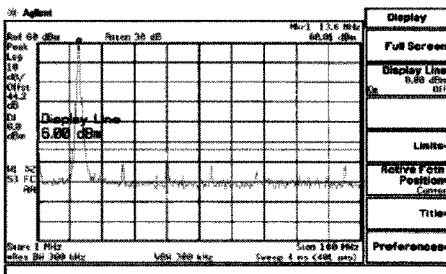


그림 14. 2차 고조파 억제 필터를 사용한 E급 전력증폭기의 출력 측정 결과
Fig. 14. Measured result of output spectrum of class-E amplifier with 2nd harmonic reaction filter.

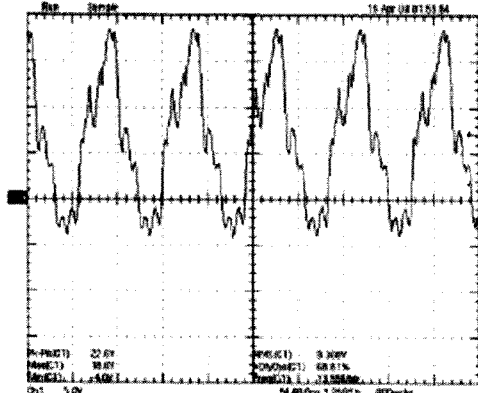
를 사용하였다. 구현된 필터의 2차 고조파 억제 특성은 41 dBc이다. 결과적으로 모든 고조파에서 고조파의 기준값인 -54 dBc보다 작은 값을 얻었다.

그림 15는 1 kW E급 전력 증폭기의 각 단에서 측정된 전압의 결과이다. MOSFET가 3,600 pF의 입력 캐패시턴스를 가지기 때문에 고속으로 충전하기 위해서 15 V로 구동하였다. 그림 15(a)는 MOSFET의 게이트 전압을 측정된 결과이다. 입력 커패시턴스가 3,600 pF으로 크기 때문에 입력 신호의 펄스 파형이 찌그러지고 올림현상이 발생한다. 그림 15(b)는 MOSFET의 드레인 소스간 전압을 측정된 결과이다. 증폭기 회로의 보호를 위해서 2:1 전압 분배를 통해서 측정하였다. 측정된 전압의 최대값은 736 V이다. Off 될 때보다 on 될 때에 파형이 찌그러지고 소자가 스위칭할 때 드레인 전압을 0 V로 유지하지 못하여 이상적인 경우와 다르게 전력 손실이 나타난다. 그림 15(c)는 출력 신호의 파형이다. 전압의 최대값이 324 V로 50 Ω 부하상에 1 kW의 출력이 나타난다.

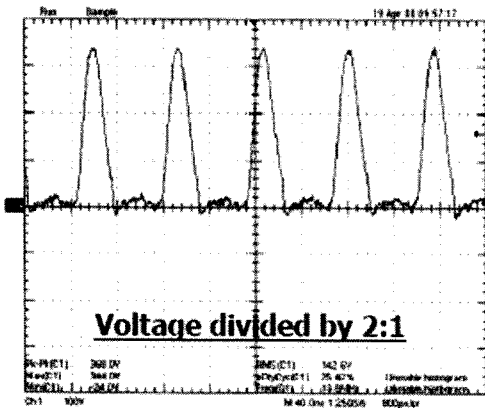
그림 16은 선택적 감쇠기로 인해 각각 다르게 동작하는 전력증폭기의 드레인 효율 측정 결과 그래프이다. 출력 1 kW에서 모드 2의 감쇠기를 적용하였을 경우 효율 67.8 %를 얻었고, 모드 1의 감쇠기를 적용하였을 때는 효율 55.6 %, 모드 3의 감쇠기를 적용하였을 때는 80 %의 효율을 얻었다.

그림 17은 선택적 감쇠기의 차이로 인한 구간별 증폭기의 효율을 나타내었다. 그림 17에서 보는 것과 같이 초기 방전 구간 및 발생 지속 구간 이전에는 스위칭 회로로 인한 손실 때문에 효율이 감소하게 된다. 따라서 각 시간적 구간별로 효율이 변하게 된다. 임피던스 정합이 되지 않는 구간에서 정합 준비 구간으로 넘어가는 시간에 반사 전력이 크게 나타나기 때문에 강압적 손실을 적용하므로 모드 1과 같이 그 구간에서 58 %의 최소효율을 갖는다. 그리고 정합된 구간에서는 감쇠기로 인한 효율을 최소화시키기 때문에 82 %의 최대 효율을 갖는다.

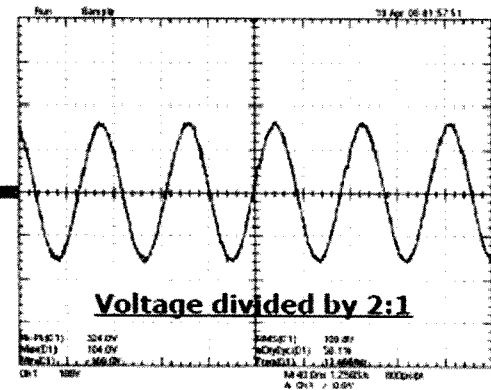
그림 18은 각각 선택적 감쇠기 별로 부하 임피던스에 따른 전력증폭기의 안정한 영역을 나타낸 그래프이다. 플라즈마 응용을 위한 RF 발생기에 사용되는 전력증폭기는 일반적인 경우와 다르게 증폭기의 출력 임피던스가 부하의 임피던스와 정확히 정합이 이루어지지 않은 상태에서도 안정적으로 정현파를



(a) 게이트 전압
(a) Gate voltage



(b) 드레인 전압
(b) Drain voltage



(c) 출력 전압
(c) Output voltage

그림 15. E급 전력증폭기의 각 단계에서 측정된 전압 결과

Fig. 15. Measured results of voltage of class-E power amplifier.

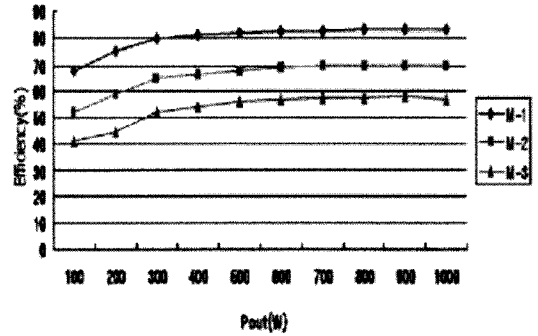


그림 16. 선택적 감쇠기를 포함한 전력 증폭기의 드레인 효율 측정 결과

Fig. 16. Measured result of drain efficiency of power amplifier.

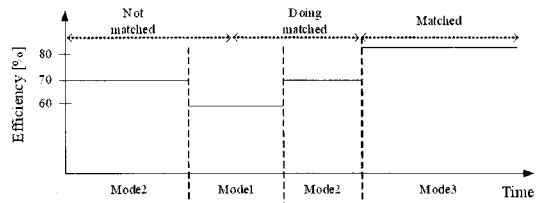


그림 17. 구간별 증폭기의 효율 그래프

Fig. 17. Drain efficiency graph of amplifier at each stage.

송출할 수 있어야 한다. 각 모드별로 부정합 정도에 따라 안정성을 유지하는 범위를 측정하였다. 실험용 부하로서 임피던스 정합기를 사용하여 원하는 임피던스를 구성하면서 그때마다 모드 별로 증폭기의 안정성 여부를 실험하였다. 부하 임피던스의 범위는 $5 \pm j35 \Omega \sim 30 \pm j35 \Omega$ 으로 하였다. 감쇠기의 특성에 따라서 안정성을 확보할 수 있는 출력 임피던스 구간이 각각 다르게 나타난다. 스미스차트 내의 실선은 실제 측정하였을 때 나타난 안정영역이고, 측정을 토대로 안정성을 확보할 수 있는 최소구간은 점선으로 나타내었다. 구간 감쇠기의 감쇠 특성이 제일 큰 모드 1의 경우 안정된 임피던스로 스미스 차트에서 VSWR이 4.5:1인 가장 바깥쪽 구간을 갖고, 모드 3의 경우에는 VSWR이 3.0:1인 가장 안쪽 구간에서 안정된 영역을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 임피던스 정합이 보장되지 않는 구간에서는 모드 1을 사용함으로써 안정영역을 확대하고 자동 임피던스 정합이 된 공전 지속 구간에서는 모드 3을 사용하여 효율을 확보한다.

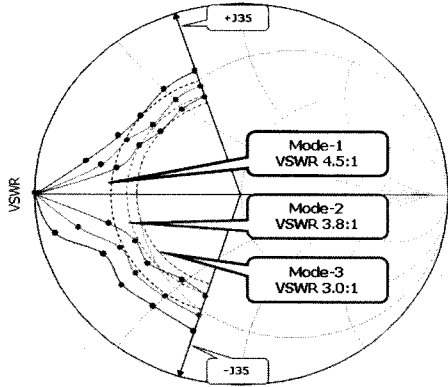


그림 18. 모드별 전력 증폭기의 안정영역
 Fig. 18. Stability region of power amplifier at each mode.

표 1. 시뮬레이션과 측정 결과 비교
 Table 1. Comparison between simulated and measured results.

		시뮬레이션 결과	측정결과
선택적 감쇠기 특성	모드 2	0.32 [dB]	0.48 [dB]
	모드 1	1.02 [dB]	1.17 [dB]
	모드 3	0.00 [dB]	0.14 [dB]
2차 고조파 억제 필터 특성		-44.2 [dBc]	-41 [dBc]
E급 증폭기 효율	모드 2	78 [%]	67.8 [%]
	모드 1	61 [%]	55.6 [%]
	모드 3	86 [%]	80.0 [%]
E급 증폭기 출력		1 [kW]	1 [kW]

표 1에서는 전력증폭기의 시뮬레이션과 측정 결과를 비교하였으며, 표에서 보이는 바와 같이 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 유사하다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 고효율 및 고안정성을 가지는 RF 발생기를 위해서 선택적 감쇠기를 포함한 고효율 E급 전력 증폭기를 제안하였다. E급 고효율 전력 증

폭기에 2차 고조파 필터를 삽입하여 모든 고조파 전력을 55 dBc 이하로 유지하였다. 그리고 선택적 감쇠기를 사용하여 플라즈마가 방전을 시작하는 불안정구간에서는 저효율 고안정 모드로 동작시키고 플라즈마가 안정적으로 유지되는 구간에서는 고효율 모드로 동작시키도록 하였다. 또한, 기존의 RF 발생기에 적용된 C급 전력 증폭기 대신에 E급 전력 증폭기를 RF 발생기에 적용하여 구동단의 전력 손실을 개선하여 기존의 RF 발생기의 전력증폭기에 비해서 약 13 % 개선된 효율을 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] Haruhiko Abe, Masahiro Yoneda, and Nobuo Fujiwara, "Developments of plasma etching technology for fabricating semiconductor devices", *Japanese J. Applied Physics*, vol. 47, no. 3, pp. 1435-1455, Mar. 2008.
- [2] V. Brouk, R. Heckman, "Stabilizing RF generator and plasma interactions", *2004 Society of Vacuum Coaters 47th Annual Technical Conference Proceedings*, pp. 24-29, Apr. 2004.
- [3] A. M. Marlton, A. C. M. Shade, and J. S. Medford, *Apparatus for Plasma Tools*, US Patent #5,654,679, Aug. 1997.
- [4] D. K. Coultas, J. H. Keller, *Stable Matching Networks for Plasma Tools*, US Patent # 5,866,985, Feb. 1999.
- [5] A. M. Howald, A. Kuthi, and A. D. Bailey III, *Apparatus and Methods for Improving the Stability of RF Power Delivery to a Plasma Load*, US Patent # 6,838,832, Jan. 2007.
- [6] M. Albur, *RF Power Amplifiers*, Noble House, 2001.
- [7] F. H. Raab, N. O. Sokal, "Transistor power losses in the Class E tuned power amplifier", *IEEE J. Solid State Circuits*, vol. 13, no. 6, pp. 912-914, Dec. 1978.

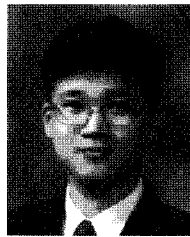
김 지 연



2002년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2004년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2008년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
 2008년 8월~현재: 광운대학교 연구교수

[주 관심분야] RF 고효율 전력 증폭기, 스마트 전력증폭기

유 호 준



1996년: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년: 광운대학교 전자공학과 대학원 (공학석사)
 2003년: University of Colorado at Boulder (공학박사)
 2007년~현재: 광운대학교 전파공학과 박사과정

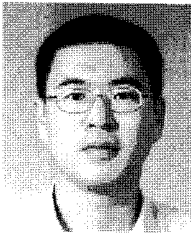
1998년~1999년: 광운대학교 RFIC 교육센터 연구원

2003년~2006년: ACE Technology 책임연구원

2006년~현재: Sewon Teletech 마케팅팀장(과장)

[주 관심분야] 주파수 양립성, DPD, Remote RF Head System

이 동 헌



1996년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)
 2004년~2008년: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)

[주 관심분야] 이동통신 시스템, 마이크로웨이브 시스템, 선형증폭기, 고효율증폭기, RFID

김 종 헌



1984년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)

1990년 6월: 독일 Ruhr Univ. Bochum 전자공학과 (공학석사)

1994년 8월: 독일 Dortmund Univ. 전자공학과 (공학박사)

1995년 4월~현재: 광운대학교 전자공학과 교수

2002년 1월~2007년 4월: 캐나다 SFU Research Associate

2005년 3월~현재: IT 국제 표준화 전문가

[주 관심분야] 고효율 전력증폭기, 선형화기, 스펙트럼공학, 마이크로파 센싱

전 상 현



2005년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)

2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

2007년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 박사과정

[주 관심분야] 스마트 전력증폭기, 선형화기, 스펙트럼공학