

마그네트론 스퍼터용 모듈형 20kW 플라즈마 전원장치에 대한 연구

한희민*, 서광덕**, 조용규*, 김준석*
 인천대학교*, 이엔테크놀로지(주)**

The Study of Module Type 20kW Plasma Power Supply for Magnetron Sputter

Hee-Min Han*, Kwang-Duk Seo**, Yong-Kyu Cho*, Joohn-Sheok Kim*
 University of Incheon*, EN Technologies Inc**

ABSTRACT

본 논문은 PVD(Physical Vapor Deposition)의 마그네트론 스퍼터(Magnetron sputter) 박막코팅(Thin film coating) 공정에서 플라즈마(Plasma)를 발생시키고 제어하는 DC 전원공급 장치에 관한 것이다. 이 논문에서는 임피던스의 변화가 심하고 아크(Arc)가 빈번히 발생하는 플라즈마 부하의 특성에 대해, 과도상태(Transient state)의 출력제어 성능을 향상시키고 아크 발생 시 부하로 전가되는 아크에너지를 저감시키기 위한 직류 전원 공급 장치에 대해 소개한다.

전원장치는 수하특성을 가지며 플라즈마 부하에 적합한 출력 제어성을 확보하고 아크 에너지를 최소화하기 위해 고주파 L-C 직렬공진회로 기법을 적용한다. 개발된 DC 20kW급 전원 장치는 인버터와 고주파 절연변압기, 정류기로 구성된다. 인버터는 100~200kHz의 제어주파수로 PFM 및 PWM 제어를 하며, 단위용량 5kW급 컨버터 4개를 직, 병렬 연결하여 출력리플을 최소화 하였다.

개발된 장치의 우수한 제어성능은 실제 플라즈마 공정에서 시험 평가한 결과를 통해 검증할 수 있었다.

플라즈마를 이용한 박막공정에 사용되는 전원장치는 아크가 발생시 부하로 전가되는 아크 에너지가 매우 적어야 한다. 과도한 아크 에너지는 타겟에 손상을 주며 파티클(Particle)을 발생시키고 이러한 파티클이 피코팅물(Substrate)에 증착됨으로써 박막제품의 불량률 발생시킴과 손상을 입은 타겟은 연속적인 아크발생의 원인이 된다. 따라서 아크 제어성능을 향상시키고 아크 에너지를 저감시키는 고성능의 특성을 요구하고 있다. 스퍼터링 공정에 사용되는 전원장치는 플라즈마 이그니션을 위한 고전압이 필요하며 전류, 전압, 전력제어가 모두 가능해야 한다. 또한 출력제어 동작영역이 일반적인 전원장치와는 달리 그림 2와 같이 정격전압, 정격전류의 동작은 물론 정격전압의 1/2전압과 정격전류의 2배에 해당하는 동작영역도 보장할 수 있어야 한다. 이러한 전원장치는 박막 제조장비 시스템 구성에 용이하도록 설계되어야 하며 다양한 인터페이스와 소형화가 필요하고 외부로부터의 왜란(Disturbance)과 노이즈(Noise)에 대한 대책 있어야 한다.

본 연구에서 개발된 전원장치는 정격출력은 20kW이고 출력 전압/전류는 800V/25A, 400V/50A의 용량이며, 0.5mJ/kW이하의 극히 낮은 아크에너지 제어성을 가진다.

1. 서론

마그네트론 스퍼터를 이용한 박막 코팅 기술은 반도체 제조의 도체 배선 박막 공정, LCD 평판 디스플레이 패널(FPD)의 투명 전도막 코팅 공정, 그리고 가전기기의 하프미러, 건축용 유리, 장식코팅, 공구코팅 등의 다양한 박막제조 공정에 사용되고 있으며 최근 신공정 기술개발과 제조장비의 고성능, 고기능화로 인해 전원장치의 고품질화가 요구되고 있다.

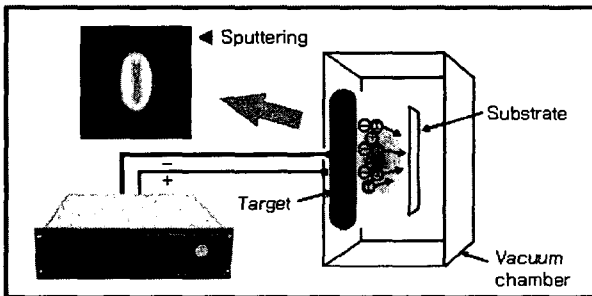


그림 1 마그네트론 스퍼터링 시스템
 Fig. 1 Magnetron Sputtering System

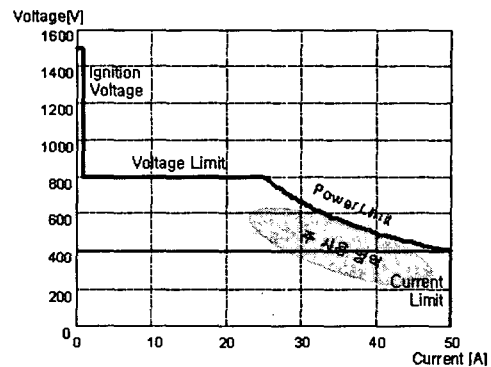


그림 2 동작 영역
 Fig. 2 Operating Range

2. DC 전원장치 개발

2.1 회로구성 및 동작원리

본 연구에서는 DC전원장치의 구현을 위해서 그림 3과 같이 L-C 직렬공진 방식의 단상 고주파 인버터와 정류부로 구성된 5W급의 DC/DC 컨버터 4개를 직, 병렬로 연결하는 전력회로를

구성하였으며 주 제어회로는 32bit DSP인 TMS320C31을 사용한다. 인버터의 주 스위칭 소자로는 MOSFET을 사용하고 L-C직렬공진 회로를 이용한 소프트 스위칭 기법을 적용하여 최대 200kHz까지 동작하도록 하였다. 수하특성을 갖는 부하에 최적의 안정된 출력을 공급하기 위해 변압기 자체의 누설 인덕턴스 성분을 이용하여 공진회로를 구현하였다. 이것은 외부에 공진용 인덕턴스를 제거한 효과가 있어 인버터 스택의 크기와 무게를 최소화 하였다.

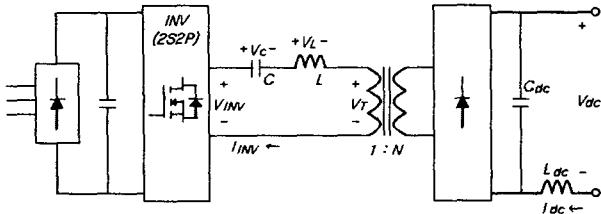


그림 3 전력회로 구성도
Fig. 3 Configuration of Power Circuit

이렇게 구성된 단상 공진형 인버터는 100~200kHz의 제어주파수로 PFM과 PWM 제어방식을 병행하여 동작시킨다. 그리고 이들 인버터를 한주기내에서 4개의 제어 위상각으로 나누어 제어하는 방식으로 최종 출력리플을 제어주파수의 8배가 되도록 하였다. 그리고 각 상의 전류를 검출하고 위상을 제어함으로써 컨버터의 Unbalance를 방지하였다.

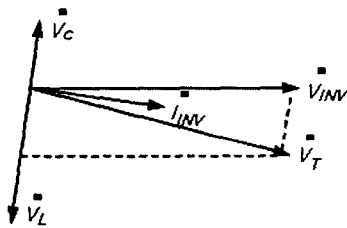


그림 4 인버터부의 전압모델 벡터
Fig. 4 Voltage Model Vector of Inverter Section

$$V_{INV} = V_C + V_L + V_T \quad (1)$$

$$V_T = V_{INV} - V_C - V_L \quad (2)$$

단상 직렬공진회로에서 인버터 출력전압 V_{INV} 는 (1)식과 같으며, (2)식의 V_T 전압을 제어함으로써 출력을 제어할 수 있다. V_T 는 인버터의 PWM제어를 이용하여 V_{INV} 를 제어하거나, 인버터 주파수를 변경하여 직렬로 구성되어있는 L과 C의 주파수에 따른 임피던스의 강하분인 V_L 과 V_C 의 크기를 제어함으로써 V_T 전압을 제어할 수 있다.

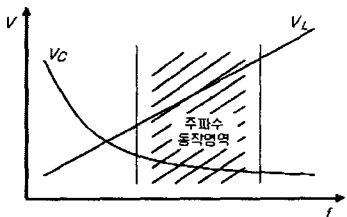


그림 5 주파수에 따른 전압특성곡선
Fig. 5 Voltage Characteristic Curve by Frequency

$$V_C = \frac{I_{INV}}{2\pi f C}, \quad V_L = I_{INV} \times 2\pi f L \quad (3)$$

그림 5의 곡선은 (3)식과 같이 일정 전류에서 주파수에 따른 L과 C의 양단 전압 변화이다. V_L 과 V_C 전압 벡터의 합과 PWM에 의한 인버터 출력전압 V_{INV} 전압 벡터의 합에 의해 변압기 입력전압 V_T 가 형성되므로 PWM과 PFM을 적절히 제어함으로써 전원장치의 수하특성과 고속정밀 제어를 구현하였다.

2.2 전원장치의 제어기 구성

플라즈마용 전원장치에서는 정전류, 정전압, 정전력 제어특성이 모두 요구된다. 제어기는 그림 6과 같이 구성되며 각 모드별로 제어 기준신호와 전압, 전류 검출신호를 가지고 주 제어성분에 대해 PI제어를 수행하고 출력으로 Phase Shift 기법에 의한 PWM 제어를 한다. 그리고 스위칭 효율 향상을 위해 제어 통유율은 65%~85%사이에서 정상상태 동작을 갖도록 하기 위한 주파수 제어부분을 부수적으로 가진다. 이 부분은 식(2)의 조건에서 본 것처럼 제어 통유율이 낮으면 인버터의 제어주파수를 증가시켜 인덕턴스(L)의 임피던스 강하분을 증가시킴으로써 제어 통유율이 증가될 수 있도록 작용한다.

또한 부하의 아크발생시 검지신호를 입력받아 고속의 아크제어를 통해 차단, 재기동하는 루틴을 수행한다. 그리고 출력리플을 줄이기 위한 피드포워드 방식의 보상제어를 수행하며 병렬운전 제어가 가능한 부하공유 제어기술을 적용하였다.

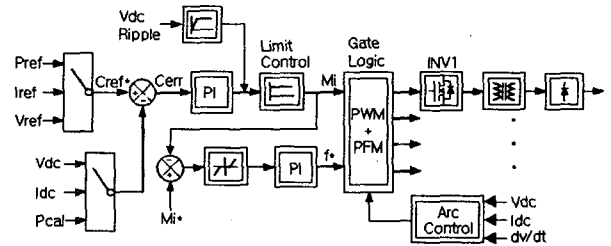


그림 6 DC/DC 컨버터의 제어기
Fig. 6 DC/DC Converter controller

또 전원장치는 아크에 대해 고속으로 검지, 차단하고 재기동하는 제어 시퀀스가 필요하다. 출력의 전압, 전류, dv/dt 검지 기법과 L-C 직렬공진회로에 의한 수하특성을 이용하여 극소화된 아크에너지와 고속의 아크 제어성능을 구현하였다.

3. 전원장치의 특성 및 실험결과

3.1 전원장치의 구성 및 제작

전원장치는 19" 표준 Rack Type의 높이 3U, Depth 600mm의 Size로 제작되었으며 10kW Module을 2병렬로 구성하였다.

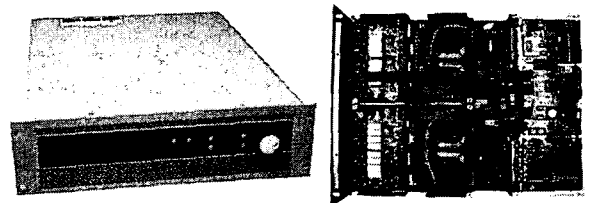


그림 7 전원장치 사진
Fig. 7 Photograph of power supply

3.2 출력제어 특성

플라즈마는 부하는 급격한 임피던스의 변화와 아크발생이 빈번히 발생한다. 이와 같은 상태에서 정전류, 정전압, 정전력 특성이 우수해야 한다. 그림 8과 같이 정전류 및 정전력 제어시 동작되는 파형이다.

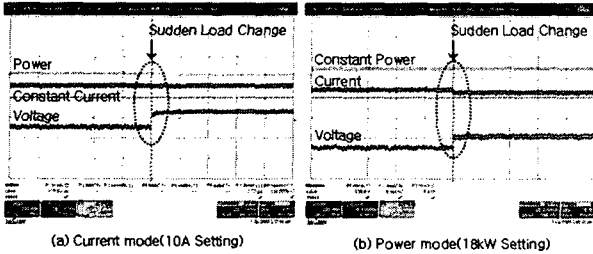


그림 8 정전류 및 정전력 제어특성
Fig. 8 Characteristic of Constant Current and Power Control

플라즈마용 전원장치는 반도체 제조장비에 주로 사용되는데 최근에는 전기설비고장 등의 원인으로 인하여 순간전압저하(Sag)가 자주 발생한다. 이로 인하여 장비가 멈추거나 오동작을 일으켜 제품생산이 중단되거나 감소하여 많은 손실이 발생한다. 그래서 반도체 설비제조사 협회(SEMI)에서는 SEMI F47과 같은 반도체 공정장비의 Sag 내성에 대한 규격을 정의하고 있으며 이 규정에 따르면 입력전압의 80%에서 1초, 70%에서 0.5초, 50%에서는 0.2초간 정상동작 할 것을 요구하고 있다. 그림 9는 20%와 30% 전압 감소에 대한 개발된 전원장치의 동작 파형을 보인다.

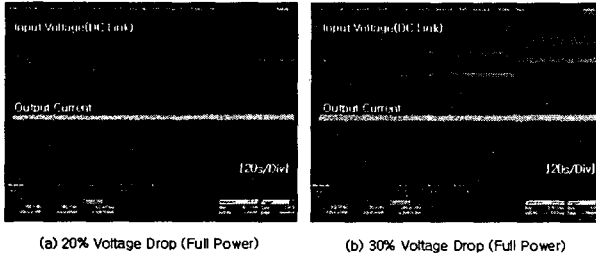


그림 9 순간 전압저하 실험파형
Fig. 9 Test Waveforms of Sag

3.3 아크제어 성능

플라즈마를 이용한 박막공정에서 박막품질에 영향을 주는 가장 큰 요인은 바로 아크 에너지이다. 아크는 출력 쇼트와 같은 경우인데 전원장치는 아크를 빨리 검지하여 출력을 차단함으로써 아크에너지를 극소화 시킬 필요가 있다.

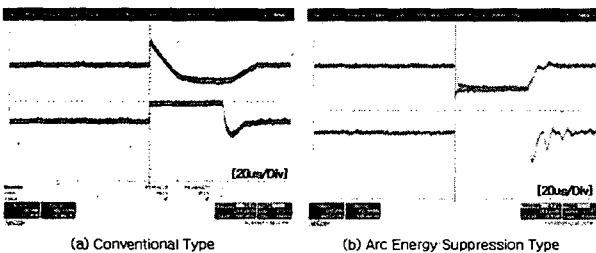


그림 10 아크 제어 특성
Fig. 10 Characteristic of Arc Interruption

그림 10은 알루미늄 타겟을 사용한 마그네트론 스퍼터링 공정에서 측정된 아크제어 파형이며, 기존의 아크 제어성능과 고속제어기법을 적용한 새로 개발한 장치의 아크 제어성능을 비교한 것으로 출력전압, 전류파형을 보인다. 새로 개발한 아크에너지 저감 기법을 적용한 제품은 전류가 매우 빠르게 리셋되고 있으며 아크에너지는 0.5mJ/kW이하로 매우 적게 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 최근 다양한 어플리케이션에 이용되고 있는 플라즈마 공정용 전원장치에 관한 것이다. 플라즈마를 이용한 여러 종류의 박막처리 및 증착공정이 있으며 이에 따른 전원장치의 사양과 출력제어 특성도 다양하다. 여기서는 마그네트론 스퍼터용으로 사용되는 DC전원장치에 관한 것으로 수하특성이 우수한 L-C 직렬공진 컨버터를 개발하였으며 출력리플을 최소화하기 위한 고주파 직, 병렬 제어기술 그리고, 아크 에너지를 최소화 하기위한 아크제어기 개발하였다. 또 대용량화를 위해 Unit간의 병렬운전 제어기법에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서 개발된 전원장치는 실제 플라즈마 박막코팅 공정에 사용하여 고속의 아크제어 성능과 각 모드에 따른 출력제어 특성, 그리고 형성된 박막의 품질비교를 통해 제품의 우수성을 평가받았다. 향후 이 연구결과를 바탕으로 50kW급 이상의 대용량화 제품과 MF 펄스전원 및 RF전원에 대한 연구 계획을 가지고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Fred Barlow, Aicha Elshabini-Riad(2000), "Film Deposition Techniques and Processes", Thin Film Technology Handbook, Mcgrowhill.
- [2] Seong-Jeub Jeon and Kyu-Hyeong Cho, "A Zero-Voltage and Zero-Current Switching Full Bridge DC-DC Converter With Transformer Isolation," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 16, PP. 573-580, 2001.
- [3] Christian Hattrup, Heinz W. van der Broeck and Martin Ossmann, "Fast Estimation Techniques for Digital Control of Resonant Converters" IEEE Trans. Power Electron., Vol. 18, PP. 365-372, 2003.