

**특집 : 펄스전원의 기술동향**

# 플라즈마 이온주입장치(PSII)용 펄스 모듈레이터

이 승 윤\*, 유 효 열\*\*  
 (다원시스 기술연구소 \*차장, \*\*연구소장)

## 1. 개 요

이온주입기술은 재료의 표면에 첨가하고 싶은 성분을 원하는 깊이로 주입하여 재료표면의 내마모성, 내식성, 피로특성, 마찰특성을 향상시키는 첨단기술이다. 또한 재료의 전기적 특성이나 광학적 특성을 변화시키는 분야에도 활용되고 있다.

이온의 주입은 전기장을 이용하여 주입하고자 하는 이온들을 높은 운동에너지를 갖도록 가속시켜서 고체 상태인 재료의 표면에 충돌시켜 주입시키고, 열역학적으로 성립되지 않는 새로운 성분의 표면층을 형성할 수도 있으며, 따라서 용도에 따른 표면 맞춤이 가능한 특징을 갖는다.

이온주입기술 중 새로 활발히 연구되고 있는 플라즈마 이온주입(Plasma Source Ion Implantation)은 플라즈마 반응기에 주입하고자 하는 물질을 기체 상태로 도입하고, 플라즈마

를 형성시키고 모재에 고전압의 바이어스를 인가함으로써 플라즈마 중의 양이온들이 소재의 표면에 충돌, 주입되도록 하는 것이다. 소재 주위에는 Plasma sheath가 형성되며, 이온들은 소재의 모든 표면에 입사, 충돌을 일으키게 된다.

플라즈마의 형성은 전자 충돌을 이용하는 방법으로 필라멘트를 가열해서 발생하는 열전자 방출을 이용하여 반응가스를 이온화시켜서 플라즈마를 발생시키는 방법과 글로우방전 플라즈마를 이용하는 방법 고주파 발생장치를 이용하여 플라즈마를 이용하는 방법등이 있다. 현재 직류전원장치를 이용하여 필라멘트를 가열하는 첫째 방식과 13.56MHz의 RF 전원을 이용하는 방식이 주로 사용된다.

플라즈마 이온주입기술은 Plasma sheath의 크기만 제어하여 소재 표면에 균일한 이온주입층을 형성시킬 수 있는 특징이 있다. 또한 단순한 형태를 갖는 소재의 표면개질에서 벗어나, 복잡한 형상을 갖는 대규모 시편의 표면개질에까지 그 응용범위를 넓힐 수 있다. 작은 소재를 처리하는 경우에도 동시에 여러 개의 소재를 처리할 수 있으므로 그 생산성이 혁신적으로 향상된다. 이는 기존의 이온빔을 이용한 이온주입기술이 가지지 못하는 장점이다.

현재 플라즈마 이온주입은 각종 기계 부품 처리, 공구제조 및 표면 처리, DLC(Diamond-Like Carbon) 처리, 내 부식성 처리, 볼 베어링의 마찰계수 저하 및 내마모 처리, 폴리머의 친수 또는 반친수 처리, 폴리머 표면의 전기저항 제어처리, 신소재개발 등의 분야에서 활발히 연구되고 있으며 양산 적용되고 있기도 하다.

플라즈마 이온주입 장치는 플라즈마를 형성하기 위한 전원, 진공분위기에서 이온을 주입하기 위한 플라즈마 반응기, 고전압 펄스 모듈레이터 및 공정제어기로 구성된다. 이중 고려할 고전압 펄스 모듈레이터는 Plasma sheath의 형성 결정 및 이온 주입량, 주입 깊이, 주입 속도에 따른 이온 충돌 효과를

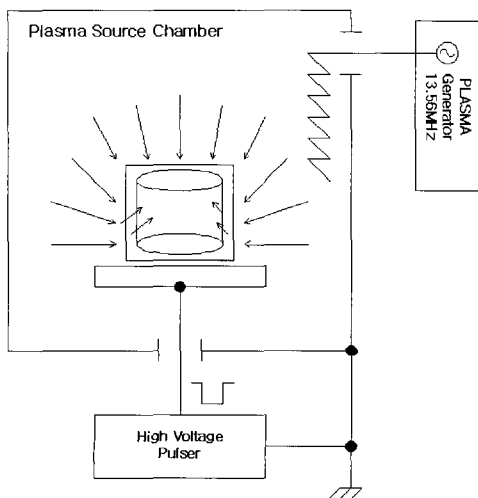


그림 1 전형적인 Plasma Source Ion Implantation (PSII) 원리도

결정하는 등의 주요한 요소이다. 펄스 모듈레이터는 고전압 펄스 전압의 가변제어, 고속의 펄스상승 및 하강시간, 가변적인 펄스 유지시간, 펄스 형태, 출력펄스전류 및 전류 형태, 빈번히 발생하는 아크 전류의 고속 제거, 고속보호동작 기능 등에 대한 기술을 요구 한다.

### 2. 플라즈마 이온주입기용 펄스모듈레이터의 특성

펄스모듈레이터는 플라즈마중의 양이온을 가속하여 소재로 주입하는 것이 주요한 역할이지만 Plasma sheath의 크기를 결정하는 요인이기도 하다. Plasma sheath의 크기는 플라즈마 밀도, 압력, 펄스폭, 침투전류, 펄스전압에 의해 좌우된다. 즉, 인가전압이 높아지고, 인가시간이 길고, 플라즈마 밀도가 낮아지면 Plasma sheath는 팽창한다.

펄스 모듈레이터와 바로 연관되는 요인은 펄스전압, 침투전류, 펄스폭이다. 플라즈마 이온주입에 필요한 가속전압은 처리분야에 따라 각기 다르나 약 20~60kV 정도를 사용하고 있고, 펄스폭은 4~20 $\mu$ s 정도이다. 침투전류는 펄스전압, 반응기의 크기에 좌우되므로 일정하지 않으나 현재 적용된 것은 50~250A 정도이다.

### 3. 펄스 모듈레이터의 종류

플라즈마 이온주입용의 펄스모듈레이터는 그림 2의 Thyatron & PFN(Pulse Forming Network) 방식과 펄스 변압기 방식 그리고 고전압 반도체 스위치를 이용한 직접스위칭 방식이 있다.

#### 3.1 Thyatron & PFN 방식

Thyatron & PFN 방식은 수십 kV의 고전압으로 펄스 정형화 회로를 충전시킨 후, Thyatron을 도통시켜, 펄스출력을 발생시키는 방법이다. 이 방법은 펄스 정형회로의 파라미터에 의하여 펄스형태 및 펄스폭이 고정되므로, 펄스폭의 가변이 한계가 있고, 공정에 투입된 장비를 튜닝할수 없다는 큰 단점을 갖는다. Thyatron의 사용 역시 발열, 구동의 어려움이 큰 단점이 있다.

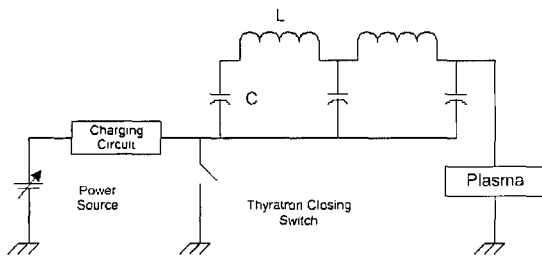


그림 2 Thyatron & PFN(Pulse Forming Network) 방식

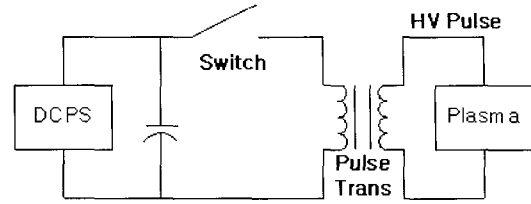


그림 3 Pulse Trans 방식

#### 3.2 Pulse Transformer 방식

Pulse Transformer 방식은 수 kV대의 직류고전압 전원장치로 펄스출력형 캐패시터를 충전시킨 후 대용량 고전압 IGBT Switch를 ON/OFF 시킴으로써 펄스를 생성시키고, 이를 펄스 변압기로 수십 kV까지 승압시키는 형태이다. 이 방식은 펄스변압기의 특수성으로 인하여 매우 고가이고, 대형일 수밖에 없으며, 자기 포화로 인하여 펄스폭의 증대에 한계를 가지며, 펄스 변압기의 표유(Stray) 파라미터들로 인하여 펄스가 왜곡되며, 펄스 상승 및 하강시간이 증대되는 많은 단점을 갖는다. 더불어 이 방식은 장치의 동작중 소음이 심하여 공정에 적용시 작업환경의 악화를 초래한다.

#### 3.3 반도체 스위치를 이용한 펄스모듈레이터의 최신기술

다윈시스에서 개발한 고전압스위치를 이용하여 플라즈마 이온주입기용 펄스 모듈레이터를 그림 3과 같은 Hard Tube 방식으로 의 펄스 모듈레이터를 적용하였다. 이 방식은 구조가 간단하고 펄스의 형성이 쉬우며 펄스폭의 가변이 자유롭고 부하 임피던스 정합이 필요없는 장점이 있으며, 동작중 발생소음이 무시할 수 있을 정도이다. 단점으로는 입력부의 직류전원의 전압이 상대적으로 높게 제작하여야 하고, 고전압부의 스위치가 ON/OFF 가능하여야 한다. 이 고전압스위치는 특히 아크시 높은 아크전류를 차단하여야 하므로 고차단능력이 필요하며 이를 위해 추가되어야 하는 인덕터로 인하여 수 $\mu$ sec의 짧은 펄스를 형성하기 어렵다. 더불어 고전압스위치의 차단능력의 한계로 인하여 대용량으로 제작할 때는 상대적으로 제작비용이 상승한다.

입력부의 고전압 캐패시터의 충전을 위한 전원장치는 전원의 대용량화 및 펄스반복률등을 고려하여 직렬공진충전용 인

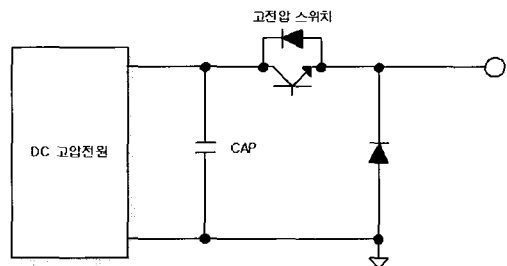


그림 4 Hard Tube 방식

버터(Capacitor Charging Power Supply, 이하 CCPS)를 이용하였다. CCPS를 적용하면 장치의 대용량화가 쉽고 펄스 반복률을 CCPS의 용량까지 높은 상태에서도 안정적으로 운전할 수 있다.

적용하고 있는 CCPS의 사양은 다음과 같다.

Average Output Power	10[kW]
Peak Charging Rate	10[kJ/s]
Maximum Output Voltage	50[kV]
Average Output Current	0.4[A]
AC Input Voltage	380[V]
Switching Frequency	40[kHz]
Air Cooling	

그림 5는 CCPS의 블록도이다.

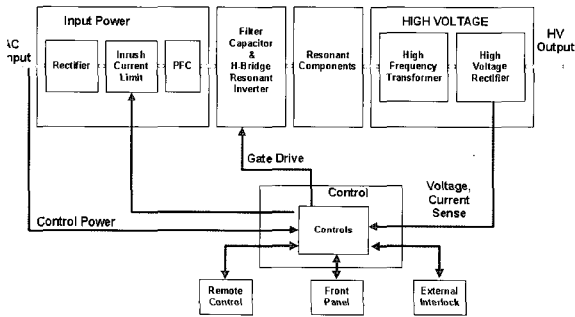


그림 5 캐패시터 충전장치의 블록도

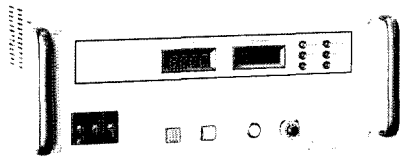


그림 6 Capacitor Charging Power Supply(-50kV 10kJ/s)

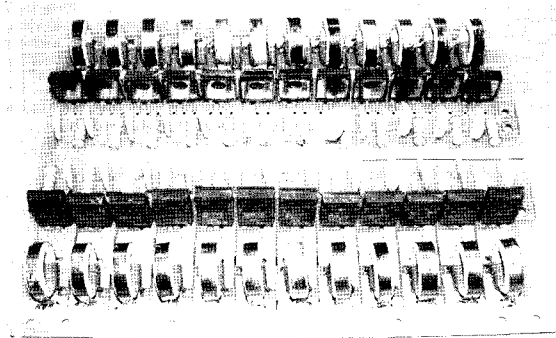


그림 7 고전압 스위치

PFN 방식에서 CCPS를 사용하는 방식과는 달리 이 방식에서는 모듈레이터의 운전에 따라 빠진 에너지(펄스의 Droop분)만 CCPS로 충전하는 방식으로 운전하게 된다. 따라서 출력펄스반복률은 CCPS의 용량에 의존하게 된다.

펄스모듈레이터 부는 에너지 저장용 고전압캐패시터, 고전압 스위치, 아크시 보호회로 그리고 펄스전압 및 전류관측회로로 구성하고 철제함에 절연유로 절연을 하여 수납하였다.

에너지 저장용 캐패시터는 출력펄스의 Droop과 관계가 있다. 용량이 크면 Droop이 작은 장점이 있으나 용량이 커지면 HV-tank의 크기가 커지고 제작비용이 높아지는 단점이 있다. 따라서 플라즈마 반응기의 용량 및 펄스폭등을 고려하여 Droop을 약 5%정도로 설계하였다.

고전압 스위치는 기존에 사용되고 있는 싸이라트론, 이그니트론, 스파크갭등의 가스방전을 이용한 스위치는 제한된 수명과 복잡한 구동부등의 단점이 있다. 또한 OFF가 되지 않으므로 HARD TUBE 방식에서는 사용할 수 없으나, 반도체 스위치들은 오랜 수명과 간단한 구동회로, 높은 스위칭 주파수 등의 장점이 있다.

모듈레이터용의 스위치는 고전압에서 고속의 ON/OFF를 하여야 하고, 아크시 발생하는 순간적인 전류의 증가에 대한 차단능력을 보유하여야 한다. 적용한 것은 MOSFET을 직렬로 연결하여 전압내량을 확보하고 병렬개수를 증대하여 전류내량을 확보하여 고전압스위치를 구현한다.

스위치의 게이트는 변압기의 원리를 이용하여 게이트 회로의 전원과 게이트신호를 동시에 인가한다. 스위치 드라이브 보드에서 변압기의 1차측에 해당하는 코일에 전류를 흘려주면 이 전류가 고전압 스위치 보드의 트로이달 코아에 1턴으로 관통하고 코아의 2차측에 전압이 유기된다. 이 전압은 MOSFET의 게이트를 충전시키고 게이트전압이 형성되면 그 전압에 의해 MOSFET이 Turn On이 된다. 전류의 방향을 반대로 흘리면 게이트전압이 방전되고 이어 역으로 충전되므로 MOSFET는 Turn Off 된다. 드라이브에서 흘려주는 전류는 고전압 스위치 보드의 직렬연결된 소자에 동일하게 관통하는 방식이므로 드라이브로 인한 소자간의 게이트 인가 시간 불일치는 존재하지 않으므로 안정적으로 동작한다.

정격전압	50 [kV]
최대차단전류	100 [A]
상승시간	0.5 [us]
하강시간	1 [usec]

플라즈마 이온주입시 반응기내에서 순간적인 단락(이하 '아크' 라함)이 수시로 일어난다. 아크가 발생하면 펄스 모듈레이터에는 과전류가 발생하고, 이에 대한 적절한 대책이 이루어지지 않으면, 처리하고자 하는 소재에 장애를 입히며, 소재의 품질을 떨어뜨리고 심지어 못쓰게 된다. 때문에 아크시에는

신속히 고전압스위치를 Off시켜야 한다. 적용한 고전압 스위치는 전류차단 능력이 100A가 최대이다. 즉 100A 이하의 전류가 흐르고 있는 상태에서는 턴오프 신호에 의해 안전하게 스위치가 오프된다. 그러나 흐르는 전류가 100A를 초과하면 턴오프시 스위칭 손실에 의해 반도체 소자의 파괴를 가져온다. 따라서 전류가 100A를 초과하기 전에 턴오프 동작이 이루어져야 한다.

아크시 빠른 턴오프가 이루어지기 위해 전류검출용 센서로는 고주파 펄스CT를 사용한다. 검출된 전류는 제어기를 거치지 않고 바로 게이트 드라이브로 입력하여 스위치를 OFF시킨다. 이렇게 하여 아크시 보호동작이 이루어지는 시간이 약 2μs 이내에서 이루어 지도록 한다. 아크시 보호동작 지연시간 동안 전류의 상승이 이루어지는데 전류상승을 제한하기 위해 출력에 리액터를 직렬로 삽입한다. 이 리액터를 출력에 직렬로 연결하면 아크시 전류상승을 고전압 스위치의 최대차단전류정격 이하로 제한한다. 이 리액터는 출력펄스전압의 상승시간에도 영향을 미친다. 상승시간은 리액터의 인덕턴스와 플라즈마 반응기내의 저항성분의 시정수에 의해 정해지고, 이로 인하여 운전가능한 최소펄스폭이 정해진다. 앞에서 기술한 것처럼 펄스전압이 Plasma sheath의 크기에 큰 영향을 미치므로 너무 짧은 펄스는 펄스의 상승시간에 따라 처리시간을 길게 하는 요인이 될 수 있다. 더불어 상대적으로 긴 펄스는 반응기내에서 아크로 발전하는 요인이기도 하다. 따라서 플라즈마 이온주입시 펄스 모듈레이터의 관점에서는 적절한 펄스전압과 펄스폭을 찾는 것이 처리속도를 결정하는 주요인이고, 펄스반복률을 높이는 것이 부차적인 요인이다.

### 5. 폴리머 전기적 특성 개질 적용에

고분자 폴리머를 이온주입 처리하여 전도성을 갖게하여 IC TRAY나 LCD TRAY를 생산하는 공정에 적용된 펄스 모듈레이터의 예이다.

적용된 펄스 모듈레이터의 설계사양은

최대펄스전압	50[kV]
최대펄스전류	50[Apeak]
펄스폭	5 ~ 20[usec]
PRF	1 ~ 1000[Hz]
Droop	5[%]
평균전력	20[kW]

이다.

직류전원은 50kV 10kJ/s의 CCPS를 2 set를 병렬운전하여 20kW로 구성하였다. 입력 캐패시터는 펄스폭을 15usec 정도에서 Droop이 5% 정도로 하여

$$C = \frac{dt}{dv} i = \frac{1.5\mu s}{2.5kV} \times 50A = 0.3\mu F$$

이므로 0.3 μF으로 선정하였다.

고전압스위치는 MOSFET 1600V 40A를 48직렬 2병렬로 구성하였다. 직렬인덕터는 아크 전류검출 및 차단시간을 1.6usec으로

$$L = \left\langle \frac{dt}{di} \right\rangle V = \frac{1.6\mu s}{50A} 50kV = 1.6mH$$

이므로 1.6mH로 선정하였다. 이를 철제함에 수납하고 절연유(40kV/2.5mm)로 절연 및 냉각을 도모하였다.

그림 9는 모의 저항부하로 펄스 모듈레이터를 운전하였을 때이다.

그림 10은 펄스 모듈레이터로 플라즈마 반응기에 적용하여 이온주입 공정중에 관측한 것이다.

그림 11은 펄스 모듈레이터로 플라즈마 반응기에 적용하여 이온주입 공정중 아크가 발생한 여러 경우를 관측한 것이다.

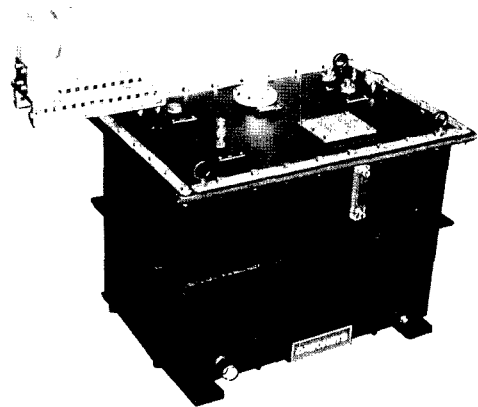


그림 8 펄스 모듈레이터의 HV-tank 외관

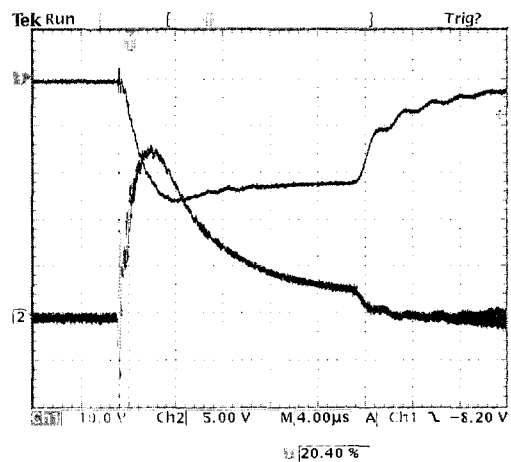


그림 9 CH1 펄스전압 10kV/div, CH2 펄스전류 10A/div

3 Dec 2002 11:30:02

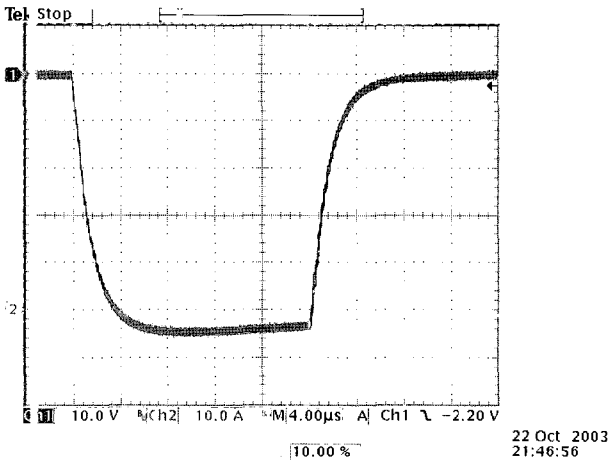


그림 10 CH1 펄스전압 10kV/div, CH2 펄스전류 5A/div

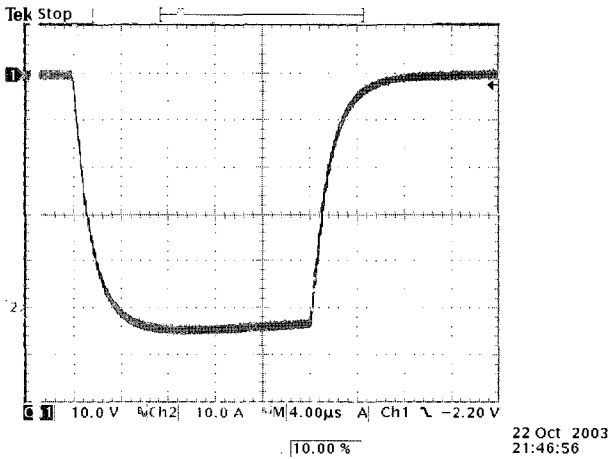


그림 11 CH1 펄스전압 5kV/div, CH2 펄스전류 20A/div

### 6. 결 론

펄스 모듈레이터의 정격전압과 정격전류는 플라즈마 시스템의 크기 및 이온 주입 깊이를 추정하여 결정한다. 이렇게 정격이 결정되어 플라즈마 반응기와 조합하여 운전을 하면 설계값보다 아크로 전이되는 전압이 낮게 되어 있는 경우가 많다. 이는 반응기 설계시 아크로 전이되는 점을 추정하기가 어렵기 때문이며, 이 전압은 반응기내의 Grid의 크기, 안테나의 위치, 플라즈마 상태 등에 따라 영향을 받기 때문이다.

아크발생전 전압의 저하는 결국 펄스폭을 짧게하고 운전주파수를 높여야 처리속도를 높일 수 있다. 운전주파수를 높이는 것은 결국 입력부의 직류전원장치의 용량에 의하므로 아크 발생전압의 추정에 따른 펄스 모듈레이터의 정격전압의

결정이 필요하다. 종종 아크발생전압과 펄스정격전압의 차이가 너무 커서 전류정격의 제한값에 이르러 운전주파수를 높이지 못하는 경우가 발생한다. 아크 발생전압의 추정은 반응기 설계시 반드시 고려되어야 한다.

플라즈마 이온주입장치를 설치하여 운전할 때 장치의 접지는 안전과 각종 노이즈로 인한 장애문제와 밀접히 연관되어 있다. 때문에 펄스 모듈레이터의 설계 및 설치시 장비의 접지를 충분히 고려하지 않고 설계하면 안정적인 운전이 불가능해지므로 반드시 고려하여야 한다.

금속성 소재를 처리하는 플라즈마 주입장치는 상대적으로 고전압의 대전류를 필요로 한다. 이 경우는 HARD TUBE 방식으로 설계하면 고전압스위치의 용량을 더욱 증대시키거나, 스위치 자체를 병렬로 사용하여야 한다. 이 경우 PFN 방식으로 하였을 때와 비교하여 경제성을 고려하여야 한다. 또, CCPS의 경우 상품화 되어 있는 것은 최고 전압이 50kV 이다. 따라서 이보다 높은 전압은 PFN과 펄스 변압기를 같이 사용하여 검토함이 필요하다. 이 경우도 펄스의 상승시간은 약 1~2usec 정도까지 줄일 수 있으나 더욱 줄이는 것은 어렵다.

### 참 고 문 헌

- [1] 포항산업과학연구원(RIST) 전중환 "플라즈마 물리증착 및 화학증착"
- [2] Dr. Marcel P.J. Diverified Technologies, Inc "Solid State Modulators For PIII Applications"

### 〈 저 자 소 개 〉



#### 이승운(李承潤)

1966년 10월 31일생. 1992년 한양대 전기공학과 졸업. 1992년~2001년 코오롱건설 과장. 2001년~현재 (주)다원시스 기술연구소 연구2팀장.



#### 유효열

1966년생. 1989년 한양대 전자공학과 졸업. 1991년 KAIST 전기및 전자공학과 졸업(석사). 1995년 KAIST 전기및 전자공학과 졸업(박사). 1995년~1998년 대우중공업 선임연구원. 1998년~현재 다원시스 연구소장.