

## 반도체 스위치를 이용한 고압 펄스 파워 발생기

김중현, 류명효, 쉐드레이, 김종수, 임근희  
한국전기연구원

### High-voltage Pulse Power Generator Using Semiconductor switches

J. H. Kim, M. Y. Ryu, S. Shenderey, J. S. Kim, and G. H. Rim  
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

#### ABSTRACT

본 논문은 반도체 스위치를 이용한 고압 펄스 발생기에 관한 연구이다. PSII (Plasma Source Ion Implantation)의 전원 장치로 사용되었으며, 기존의 hard switch나 싸이로트론 등을 이용한 고압 펄스 파워 발생기에 비해 다음과 같은 장점을 가진다. 장수명, 고효율과 펄스 크기, 반복률, 펄스폭 등의 조정이 자유로운 높은 유연성 등의 장점이다. 또한 제안된 펄스 발생기에서 사용된 반도체 스위치는 12개의 IGBT가 직렬로 연결되어 있으며, 그 중 하나의 스위치만 능동 구동기 두개가 존재하고 나머지 스위치는 수동 구동기만으로 구성되어 있어, 구동기가 매우 간단한 장점을 가지고 있다.

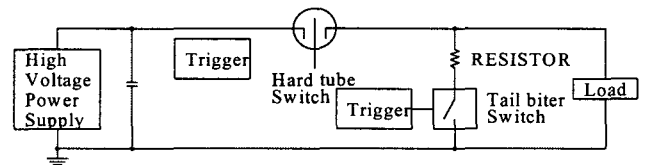
#### 1. 서 론

PSII (Plasma source ion implantation)는 금속과 폴리머 재질의 표면 처리를 위한 떠오르는 기술이다. 이 기술을 통해 금속, 플라스틱, 세라믹 등의 표면 성질을 개선할 수 있다<sup>[1-2]</sup>. 또한 이 기술은 이온 주입을 필요로 하는 반도체 제조에도 적용될 수 있다<sup>[3]</sup>.

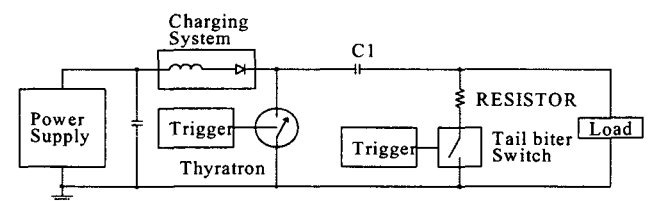
PSII에 고압 펄스를 공급하는 방법으로 여러 가지의 회로가 제안되어 왔다. 그림 1(a)의 hard-tube 타입의 펄스 파워 발생기도 그 중의 하나이다. 이것은 좋은 직각 펄스 모양, 넓은 임피던스 정합, 높은 듀티 사이클, 장수명 (10,000시간 이상) 등의 장점을 가지고 있다. 하지만 이것은 hard-tube 스위치의 높은 전압 강하로 인해 낮은 효율을 갖고, hard-tube 스위치가 floating되어 있어 독립 전원과 구동기를 필요로 하는 단점을 갖고 있다<sup>[4]</sup>. 싸이로트론 타입의 펄스 발생기가 그림 1(b)과 같이 제안되었다<sup>[5]</sup>. 이 타입은 싸이로트론 스위치가 접지되어 있어 쉽게 구동하고 제어할 수 있다. 또한 싸이로트론 스위치는 높은 최대 전류, 신뢰성 있는 동작, 넓은 상업적인 이용 가능 등의 장점을 가지고 있으나 낮은 듀티 사이클, 낮은 전압 정격 등의 단점을 가지고 있다. 따라서 이 타입은 고압 펄스 출력을 만들기 위해 PFL (Pulse Forming Line)과 함께 사용되어야 한다. 그림 1(c)과 같

은 싸이로트론 - PFL 타입의 펄스 파워 발생기가 제안되었다<sup>[6]</sup>. 이것은 높은 전압, 높은 효율 등의 장점을 가지나 나쁜 직각 펄스 모양, 좁은 임피던스 정합, 짧은 수명 (10<sup>9</sup> 펄스) 등의 단점을 가진다. Crossatron 스위치 타입의 펄스 발생기가 최근에 제안되었다<sup>[7]</sup>. Crossatron 스위치는 가스 방전 소자로 가장 강력한 펄스 발생 소자 중 하나이며 기존 hard-tube 스위치의 전류 한계를 극복하였으나, 프라즈마 부하에서의 아크 발생시 스위치를 끄기 어렵다는 단점을 갖고 있다.

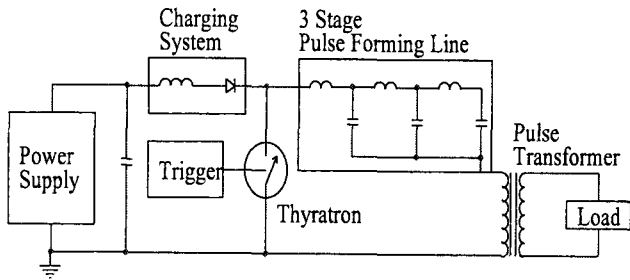
본 논문에서는 반도체 스위치를 이용한 고압 펄스 발생기가 제안되었다. 고압 펄스를 얻기 위해 12개의 IGBT가 하나의 IGBT 스택에 직렬로 사용되고 승압 펄스 변압기가 사용되었다. 12개의 IGBT로 구성되어 있는 IGBT 스택은 매우 간단한 게이트 구동기를 갖고 있다. 단지 2개의 능동 구동기와 수동 소자 (저항, 커패시터, 다이오드)로 구성된 11개의 수동 구동기를 갖고 있다. 또한 수동 구동기의 저항, 커패시터, 다이오드 회로는 게이트 구동기 역할 뿐만 아니라 각 IGBT 스위치의 스너버 역할을 한다. 제안된 시스템은 다이오드, 커패시터, IGBT 스택으로 구성된 작은 시스템 3개가 펄스의 전류 정격을 증가시키기 위해 병렬로 구성되어 있다. 따라서 제안된 시스템은 출력 증가 및 유지 보수가 쉽다. 프라즈마 부하의 특성상 아크가 종종 발생하므로 본 시스템에서는 빠른 과전류 검출 및 IGBT 스택 끄기, 이로 인한 과전압 보호 대책 등이 구현되어 있다. 제안된 시스템은 장수명, 고효율 그리고 펄스 크기, 반복률, 펄스 폭 등의 조정이 자유로운 높은 유연성 등의 장점을 갖고 있다.



(a) Hard-tube 타입



(b) 싸이로트론 타입



(c) 싸이로트론 - PFL (Pulse Forming Line) 타입  
 그림 1. 기존 펄스 파워 발생기의 구조  
 Fig. 1. Topology of the previous pulse power generator.

## 2. 본 론

### 2.1 제안된 시스템의 설명

제안된 펄스 파워 발생기의 개략도 및 전체 회로도  
 그림 2와 3과 같다. IGBT를 기반으로 하는 스위치 스택은 고전압 DC 전원장치 (0 ~ 10 [kV])로부터 펄스 전압을 발생한다. 전류 정격을 증가시키기 위해 다이오드, 커패시터, IGBT 스택 등의 작은 시스템이 병렬로 사용되었다. IGBT 스택이 꺼져 있을 때, DC 전원장치가 다이오드 (D1 ~ D3)를 통해 각각의 고압 커패시터들 (D1 ~ D3)을 충전한다. IGBT 스택이 켜지면 고압 커패시터들의 에너지가 승압 변압기를 통해 부하로 전달된다.

IGBT 스택들이 꺼져 있을 때, 유도성 역전압이 변압기에 가해진다. 이 역전압은 변압기 이차 측에 양의 전압을 발생한다. 만약 출력 다이오드 (Do)가 없으면, 이 양의 전압이 프라즈마 부하에 전자 흐름을 만들고 이것은 프라즈마 밀도 감소를 야기한다. 이는 곧 이온 주입감소를 의미하므로 양의 전압을 막아위해 출력 다이오드가 반드시 필요하다.

펄스 변압기의 비는 1:6.6이다. 따라서 최대 출력 전압 60 [kV]를 얻는 것이 가능하다. 펄스폭과 반복률 제어는 제안된 시스템의 유연성을 높인다. 출력 전류 및 전압이 각각 전류 센스와 전압 분압기를 통해 감지되고 제어기로 보내진다. 이 정보를 이용하여 시스템이 과전류로부터 보호될 수 있다. 일반적으로 변압기는 코어의 포화를 막기 위해 리셋 펄스를 필요로 하며, 본 시스템에서는 리셋트 전원장치 ("V<sub>reset</sub>")와 고압 변압기와 리셋트 전원장치의 분리를 위해 "L<sub>choke</sub>"를 사용하였다.

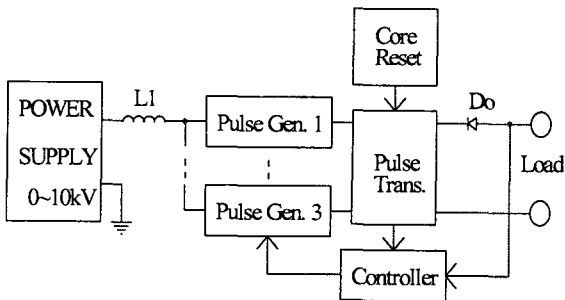


그림 2 제안된 시스템의 개략도  
 Fig. 2. Block diagram of the proposed system.

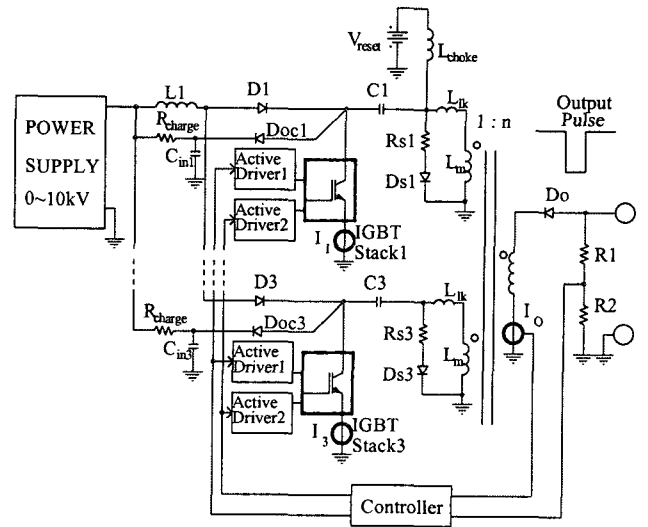


그림 3 제안된 시스템의 전체 회로도  
 Fig. 3. Overall circuit of the proposed system.

### 2.2 동작 원리

#### 2.2.1 IGBT스택

본 논문에 사용된 IGBT 스택을 자세히 살펴보면 다음과 같다. 3개의 IGBT 스택들이 사용되었다. 각 스택은 그림 4와 같이 12개의 IGBT와 단지 2개의 능동 구동기와 11개의 수동 구동기 (저항(R), 커패시터(C)와 다이오드(D) 등의 수동 부품들로만 구성 되어 있음)로 구성되어 있다. 이 RCD 회로는 각각의 IGBT 스위치의 게이트 구동기와 RCD 스너버의 역할을 동시에 한다. 먼저 IGBT 스택이 켜지는 과정을 살펴보면 이때에는 RCD 회로는 각각의 IGBT 스위치의 게이트 구동기로 동작한다. 만약, 제일 아래 쪽 IGBT<sub>1,1</sub>이 능동 구동기1에 의해 구동되면, IGBT<sub>1,1</sub>의 컬렉트-이미터 전압은 감소하기 시작한다. 이 감소된 컬렉트-이미터 전압이 위쪽 IGBT<sub>2,1</sub>의 게이트-이미터에 에너지를 제공한다. 그러면 IGBT<sub>2,1</sub>의 컬렉트-이미터 전압이 감소하기 시작한다. 이 감소된 컬렉트-이미터 전압이 위쪽 IGBT<sub>3,1</sub>의 게이트-이미터에 에너지를 제공하고 이러한 방법으로 12개의 IGBT가 켜진다. IGBT 스택이 꺼지는 과정을 살펴보면, 12개의 모든 IGBT가 켜져 있을 때, 능동 구동기2가 12개의 FET를 동시에 켜면, 12개의 IGBT의 게이트-이미터 전압은 동시에 방전되고 모든 IGBT는 꺼진다. 이러한 방법으로 단지 2개의 능동 구동기만을 이용하여 12개의 IGBT들을 거의 동시에 켜고 끄다. 또한 두개의 능동기의 위치가 제일 아래 접지 쪽에 위치하여 구동기의 절연이 필요 없어 간단하고 간단한 절연으로 인해 구동기 크기가 작은 장점도 가지고 있다.

대부분의 반도체 스위치들은 과전류에 조건에 대해서는 내력이 있으나 과전압에 조건에 대해서는 약하다. 따라서 스위치들 간의 전압 균형이 직렬연결에 있어서는 매우 중요하다. IGBT가 꺼진 상태에서 전압 균형은 IGBT와 병렬로 부착된 저항 R<sub>B</sub>로 얻을 수 있고, IGBT가 켜지거나 꺼질 때 (과도 상태)의 전압 균형은 RCD 회로로부터 얻어진다. 이때 RCD 회로는 RCD 스너버로 동작한다.

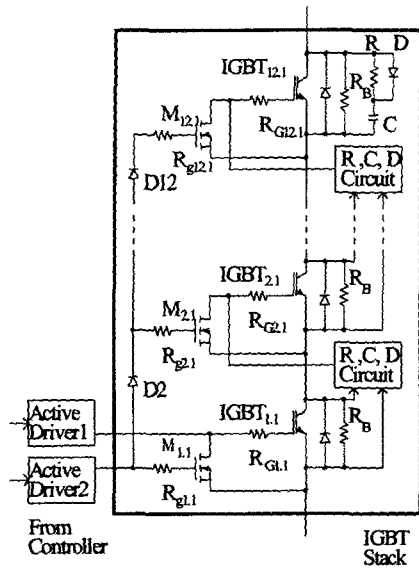


그림 4. 스택 구성  
Fig. 4. Stack configurations.

### 2.2.2 보호회로

Fault 검출과 빠른 보호는 펄스 파워 발생기에서 중요한 부분이다. 프라즈마 부하의 아크로 인해 단락 전류(과전류) 상황이 종종 발생한다. 일반적으로 과전류 상황은 IGBT 스택에 과전압을 야기한다. 따라서 반도체 스위치의 보호를 위해서는 빠른 과전류 검출 및 빠른 IGBT 스택 끄기와 과전압 보호 대책이 중요하다. 제안된 시스템에서는 IGBT 스택의 과전압 대책으로 다이오드 ( $D_{oc1}$ ,  $D_{oc2}$ ,  $D_{oc3}$ )와 커패시터 ( $C_{in1}$ ,  $C_{in2}$ ,  $C_{in3}$ )를 사용하였다.

### 2.2.3 펄스 변압기

펄스 변압기를 사용하는 목적은 낮은 전압에서 IGBT 스택을 동작시키고 출력 부하에 높은 전압을 전달하기 위해서이다. 펄스 변압기는 보수적으로 설계되고 냉각과 안정적인 동작을 위해 오일 탱크에 삽입되었다. 10개의 코어가 사용되어 있다. 펄스 변압기는 6개의 1차 권선과 4개의 2차 권선으로 구성되어 있다. 상세 명세서 및 변수는 표 1과 같다.

표 1 시스템 상세 명세서 및 변수  
Table 1. System specifications and parameters

펄스반복률	10~2000 [pps]	펄스폭	2~6 [ $\mu$ s]
상승시간	1 [ $\mu$ s]	하강시간	2 [ $\mu$ s]
전류	최대 100 [A]	전압	10~60 [kV]
$L_k$	10 [ $\mu$ H]	$L_m$	3.3 [mH]
$n$	6.6 (66/10)	$C1 \sim C3$	0.47 [ $\mu$ F]
$L1$	2.9 [mH]	$L_{choke}$	3 [mH]
$R_{change}$	200 [ $\Omega$ ]	$C_{in1} \sim C_{in3}$	0.47 [ $\mu$ F]
$R1$	1000 [k $\Omega$ ]	$R2$	1 [k $\Omega$ ]

### 2.3 실험 결과

제안된 펄스 발생기의 타당성을 입증하기 위해 그림 3의 시스템을 표 1의 변수와 같이 구성하였다. IGBT 스택에 사용된 스위치의 전압, 전류 정격은 각각 1200 [V]

와 200 [A]이다. 그림 5는 IGBT 스택의 사진이다. 아래쪽 IGBT만 두개의 능동 구동기를 갖고 다른 IGBT들은 어떠한 능동 구동기를 갖지 않아 매우 간단하고 가격 경쟁력이 있다. 그림 6은 저항부하에서의 IGBT 스택의 실험 결과인데 각 스위치의 고른 전압 균형을 보여준다. 12개의 모든 IGBT들이 거의 동시에 켜지고 꺼지며, IGBT가 꺼진 상태 뿐만 아니라 켜지거나 꺼지는 과도 상태에서도 전압 균형이 유지된다. 정상상태에서 각 IGBT에 걸리는 전압은 800 [V]이다. 그림 7(a), (b)는 프라즈마 부하에서의 스택 전류 분배와 출력 파형들이다. 스택 전류는 고르게 분포되어 있고, 출력 전압과 전류 파형은 변압기의 누설인덕턴스와 프라즈마 부하의 커패시턴스 사이의 공진으로 인해 오버슈트가 보인다. 출력 전압이 60 [kV] 일 때의 파형이고, 출력 전압의 상승시간과 하강시간은 각각 1 과 2 [ $\mu$ s] 이다. 그림 8은 프라즈마 부하에서 펄스폭이 변할 때 파형으로 펄스폭은 2에서 6 [ $\mu$ s] 까지 조정할 수 있다. 그림 9(a), (b)는 펄스 반복률이 변할 때 파형으로 각각 500 [pps]와 2000 [pps] 일 때의 파형이다. 그림 10은 출력 전압이 60 [kV] 일 때, 프라즈마 부하의 아크가 발생으로 인한 과전류 상황일 때의 파형이다. 아크로 인해 출력전류가 급격히 증가하고 과전류 보호회로가 IGBT 스택을 off한 파형이다. 과전류로 인해 스택에 발생한 과전압은 과전압 보호회로의 동작으로 작아 안전함을 알 수 있다. 실험 결과와 같이 제안된 펄스 파워 발생기는 펄스 전압의 크기, 폭, 반복률 등의 높은 유연성을 가진다.

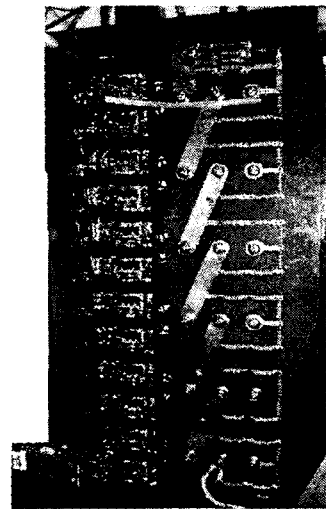


그림 5 IGBT 스택의 사진  
Fig. 5. Photograph of the IGBT stack.

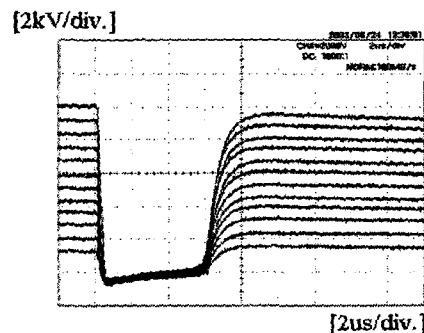
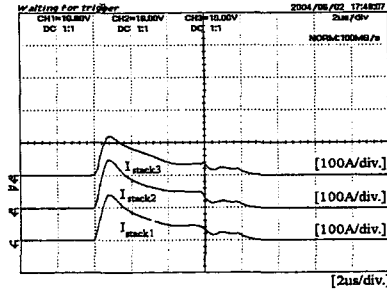
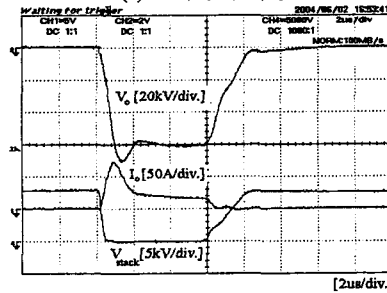


그림 6 전압 균형 확인을 위한 IGBT 스택의 실험 파형  
Fig. 6. Waveform of the IGBT stack for voltage balancing test.



(a) 스택 전류 파형



(b) 출력 파형과 스택 전압 파형

그림 7 플라즈마 부하일 때의 스택 전류 파형과 출력 펄스 파형  
Fig.7. Stack current sharing and output pulse waveform at plasma load.

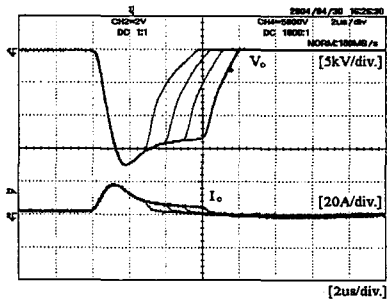
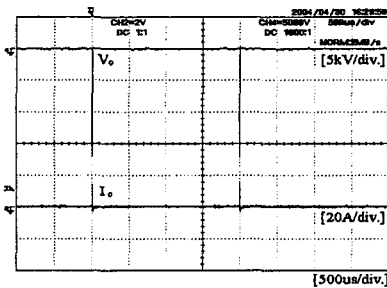
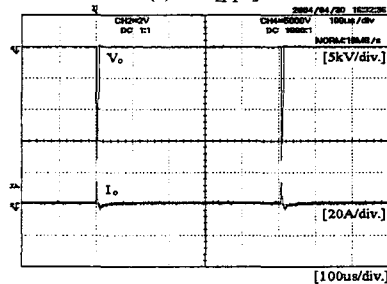


그림 8 출력 펄스 폭 변화 파형

Fig. 8. Waveform of pulse width variation.



(a) 500 [pps]



(b) 2000 [pps]

그림 9 다른 반복률에서의 파형  
Fig. 9. Waveform of different pulse repetition rate.

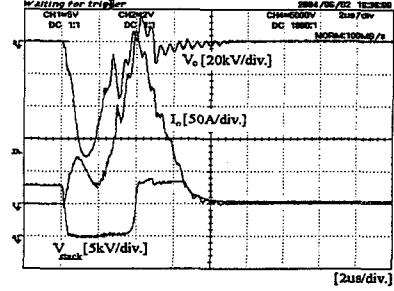


그림 10 아크로 인한 출력전압, 전류 및 스택 전압 파형  
Fig. 10. Output voltage, current, and stack voltage waveform due to the arc in the plasma load.

### 3. 결 론

PSII용 반도체 스위치를 이용한 고압 펄스 파워 발생기가 제안되고 구현되었다. 빠른 과전류 검출, 빠른 IGBT 스택 끄기, 과전압 대책 등이 펄스 발생기 보호를 위해 구현되었다. 제안된 시스템은 장수명, 고효율 그리고 펄스 크기, 반복률, 펄스폭 등의 조정이 자유로운 높은 유연성 등의 장점을 갖고 있다. 따라서 제안된 시스템이 PSII용 전원으로 사용될 수 있다.

이 논문은 과학기술부의 NRL사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### [참 고 문 헌]

- [1] J. Leon Shohet, "Plasma-Aided Manufacturing", *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 19, no. 12, Oct., 1991, pp. 725-733.
- [2] J. R. Conrad and J. L. Radke, "Plasma Source Ion-Implantation Technique for Surface Modification of Materials", *J. Appl. Phys.*, vol. 62, no. 11, Dec., 1997, pp. 459.
- [3] M. A. Kempkes, J.A. Casey, M. P. J. Gaudreau, T.A. Hawkey, and I.S. Roth, "Solid-state modulators for commercial pulsed power systems", *Power Modulator Symposium, 25th International and 2002 High-Voltage Workshop*, pp. 689-693.
- [4] D. Deb, J. Siambis, R. Symons, and G. Genovese, "Beam Switch Tube Modulator Technology For Plasma Ion Implantation Broad Industrial Application", *9th IEEE International Pulse Power Conf.*, 1993, pp. 333-336.
- [5] D. M. Goebel, R. J. Adler, D. F. Beals, and W. A. Reass, *Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition*, Andre Anders, New York: 2000, pp. 472-477.
- [6] R. J. Adler, J. Scheuer, and W. Horne, "Thyratron modulators in plasma source ion implantation", *10th IEEE International Pulse Power Conf.*, 1995, pp. 1243-1248.
- [7] Dan M. Goebel, "High Power Modulator For Plasma Ion Implantation", *J. Vac. Science Technology*, vol. 12, no. 2, Mar./Apr., 1994, pp. 838-842.