

플라즈마 포커스를 이용한 크롬 산화물 박막 성장의 분위기 기체 압력 의존성 연구

정규호*** · 이재갑 · 임현식* · L. Karpinski** · M. Scholz** · 이진국†

한국과학기술연구원 박막재료연구센터, *동국대학교 반도체 과학과
**Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion (IPPLM)

Dependence of Gas Pressure on Cr Oxide Thin Film Growth Using a Plasma Focus Device

Kyoocho Jung***, Jae-kap Lee, Hyunsik Im*, L. Karpinski**, M. Scholz** and Jeon-Kook Lee†

Thin Film Materials Research Center, KIST, Seoul, Korea 136-791

*The Department of Semiconductor Science, Dongguk University, Seoul, Korea 100-715

**Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion (IPPLM) Hery Str.23, P.O.Box 49, 00-908Warsaw, Poland

(2007년 5월 9일 받음, 2007년 6월 13일 최종수정본 받음)

Abstract Chromium oxide thin films have been deposited on silicon substrates using a tabletop 9kJ mather-typed plasma focus (PF) device. Before deposition, pinch behavior with gas pressure was observed. Strength of pinches was increased with increasing working pressure. Deposition was performed at room temperature as a function of working pressure between 50 and 1000 mTorr. Composition and surface morphology of the films were analyzed by Auger Electron Spectroscopy and Scanning Electron Microscope, respectively. Growth rates of the films were decreased with pressure. The oxide films were polycrystalline containing some impurities, Cu, Fe, C and revealed finer grain structure at lower pressure.

Key words Plasma focus, ion emission, deposition, Cr oxide thin film, working pressure.

1. 서 론

산화 박막 성장은 고주파 발생 장치(RF generator)에 의해 형성된 플라즈마를 이용한 sputtering과 레이저 광(Laser light) 에너지를 이용한 Pulsed Laser Deposition (PLD) 기법에 의해 주로 이루어진다. 이 두 가지 대표적인 기법은 모두 에너지를 target에 전달하여 target을 형성하는 물질을 진공의 공간으로 방출시키는 원리를 가진다. 그중에 PLD 기법은 국소적인 부분에 일정한 주기의 레이저 광 에너지를 조사하여 물질을 방출시킨다. 하지만 PLD 기법의 단점은 고가의 레이저 광원과 까다로운 장비 운용에 있다. 또한, 박막 성장 이외에 미량의 도핑 및 이온 주입과 같은 특수한 박막 형성 기법은 PLD 장비를 통해 제작하기 어렵다.

이와 같이 국소적 에너지 전달 방법을 이용하여 물질을 방출시키는 장치로는 플라즈마 포커스가 있다. 플라즈마 포커스의 경우, 실제로 박막 성장에 대한 연구는 매우 미흡한 편이지만 이온 주입 및 박막 성장의 가능성이 보

고되고 있다. 플라즈마 포커스 장치란 절연된 두 전극 사이에 고 전압을 가해 순간적으로 고 전류를 방출시키고, 이때 형성된 높은 전기적 에너지를 이용하는 장치로써 이온 빔 방출(ion beam emission), x-선 방출(x-ray emission), 중성자 방출(neutron emission), 이온 주입(ion implantation), 이온 방출(ion emission) 등 여러 방면에 걸쳐 연구되고 있다.¹⁻⁵⁾ 특히, Fig. 1과 같이 두 전극이 돌출되어있는 마더형(Mather type) 플라즈마 포커스는 펄스 타입 에너지 주사 방법(Pulsed Dense Plasma Focus system)으로 PLD와 매우 유사한 원리를 가지고 있다.^{6,7)} 또한, 전압의 변화를 통한 방출 에너지의 조절이 매우 용이하여 미량의 도핑 및 이온 주입이 가능할 것으로 예상된다.

플라즈마 포커스 장치의 물리적 동작 원리는 순차적으로 Fig. 1a와 같이 순간적인 고전압 방출로 인해 두 전극 사이의 절연파괴가 일어나게 되어 고 밀도($\approx 10^{25-26} \text{ m}^{-3}$), 고 전압($\approx 1\sim 2 \text{ keV}$)의 플라즈마 sheath(플라즈마의 일종)가 형성되며, 이를 절연 파괴현상이라고 한다. 절연 파괴 현상에 의해 형성된 플라즈마 sheath는 Fig. 1b와 같이 전자기학적 힘, ($J \times B$)에 의해서 가속이 되어 전극 끝으로 이동하는 현상이 일어나며 이를 snowplow 현상 또

†Corresponding author

E-Mail : jkleemc@kist.re.kr (J. - K. Lee)

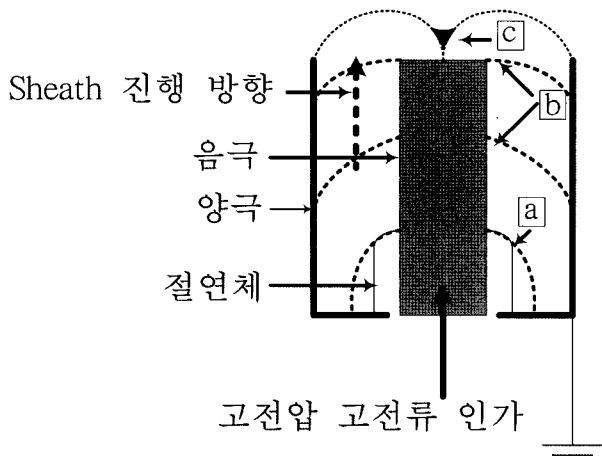


Fig. 1. A schematic of the fundamental principles of pinch phenomenon in Mather type Plasma Focus System.

는 너가래 효과라 한다.⁸⁾

이 후, 전극의 끝에 도달한 플라즈마 sheath가 그 경로가 끝남에 따라 고밀도로 집약된다. 이때 플라즈마는 급격히 높은 자기장을 형성하며 음극 끝의 극소부분에 높은 에너지를 전달하게 된다. 이를 pinch 현상이라고 하며 Fig. 1c에 나타내었다.

pinch 현상은 이온 빔 발생장치에서 이온 빔 증폭 또는 집속시키는 원리와 동일하지만 외부에서 임의로 가해주는 자기장이 아닌 플라즈마 sheath에 의해 자체 발생한 자기장을 이용한다는 점에서 차이를 보인다.

한편, 최근 저항 변화 물질이나 투명전극 물질과 같이 금속 물질을 미량 도핑 시킨 산화막에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 산화막 성장은 도핑된 target을 이용하고 있는데 이 방법은 도핑 물질의 양을 조절하는 것이 어렵다. 그러나 플라즈마 포커스 장치를 이용한 금속 방출과 동시에 도핑 되지 않은 target을 이용한 다른 증착 방법을 함께 사용한다면(co-deposition) 도핑량을 조절하면서 도핑된 박막 성장이 가능할 것으로 예상하고 있다.

본 연구에서는 플라즈마 포커스 장치의 이온 주입 현상과 이온 방출 특성을 분위기 기체 압력에 따라 관찰하여 박막성장 특성을 분석하였다. 이를 위해 소형 플라즈마 포커스 장치를 사용하여 Cr 산화막을 Si 기판 위에 분위기 기체 압력에 따라 성장하고 산화막의 성장 특성을 표면 분석 및 성분 분석을 통해 논의하였다. pinch 효과의 관찰은 플라즈마 생성 시 실시간 관측된 방전 전류의 변화 및 순간적인 전류 변화 파형 ($I(t)$, di/dt)을 통해 분위기 기체 압력에 따라 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

플라즈마 포커스 장치는 9 kJ급 마더형 장치로 Fig. 2

처럼 전하를 충전시키는 19.3 μ F, 40 kV급 고용량 커패시터 탱크와 최대 30 kV, 20 mA 고전압 발생장치가 슈도 스파크 갭(pseudo spark gap)스위치로 연결되어 있다. 슈도 스파크 갭의 스위칭 원리는 양 끝을 전극과 고용량 커패시터와 연결하고 양 극 상에서 형성되는 전압을 이용한 것이다. 이 스위치는 스파크 간격 사이의 전압이 절연 파괴 점까지 도달하기 전까지는 충전이 일어나고 그

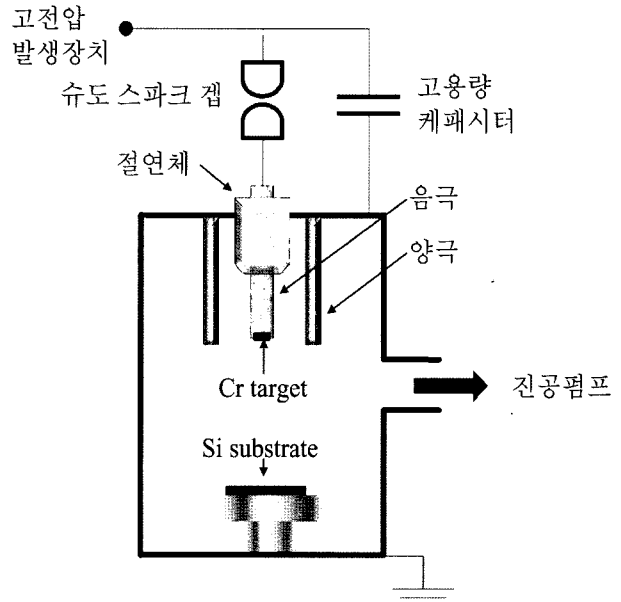


Fig. 2. A schematic diagram of experimental set-up for this study.

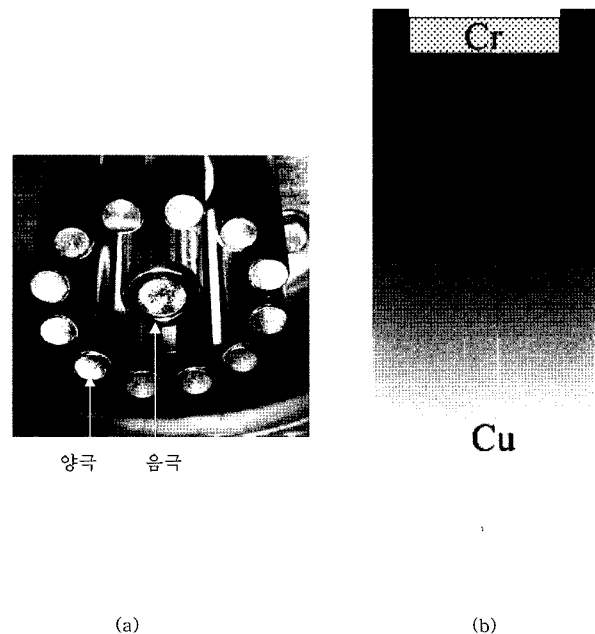


Fig. 3. Configuration of Plasma focus electrodes. (a) An anode and cathodes in vacuum chamber. (b) Cr target inserted electrode structure (anode).

이상에서 전극 방향으로 전류의 흐름이 발생하도록 하는 전압 스위치의 일종으로 이로 인해 주기적인 펄스 방식으로 충-방전을 하게 된다.¹⁰⁾

플라즈마 포커스 전극은 일정한 분위기 기체 압력을 유지하기 위해 진공 장치 내에 설치하였으며, Fig. 3a와 같이 양극이 음극을 중심으로 하여 동일한 거리에 원형으로 분포하는 구조이다. 양극은 12 mm의 직경과 85 mm의 길이를 가지는 12개의 스테인레스강으로 설계되었으며 음극은 Fig. 3b와 같은 구조를 가지고 25 mm 직경과 80mm의 Cu로 제작하여, 음극의 끝 부분에 Cr을 삽입하였다. 양극간의 절연은 산화 알루미늄 절연체를 관형으로 제작 설치하였고 음극에서 양극의 거리는 약 35 mm이다.

플라즈마 포커스 방전 시 일어나는 전기적 변화 ($I(t)$, di/dt)의 관측은 로고스키 코일과 Tektronix TPS 2024 오실로 스코프를 사용하였다.¹¹⁾ 로고스키 코일은 전송선에 생성되는 자기장의 유도 기전력을 이용하여 선로에 흐르는 전류를 간접적으로 측정하는 장치이다.

박막 성장 조건은 Ar과 O₂을 1:1 비율로 섞은 기체를 사용하고 진공 장치 내의 압력을 25 mTorr에서 1000 mTorr 까지 변화시켜 성장하였다. 성장 온도는 상온, 전극과 Si 기판 간 거리는 15 cm, pinch 횟수는 10회 그리고 방출 전압은 10 kV이다.

3. 결과 및 고찰

Pinch 효과의 유무는 50 mTorr를 기점으로 해서 나타나며 800 mTorr에서 매우 안정적인 pinch가 나타난다. 그리고 1000 mTorr에서는 매우 큰 pinch가 나타남을 확인하였다. 이에 따라, 박막의 특성은 위의 조건에서 성장된 시료를 사용하여 측정 및 분석을 실시하였다. Fig. 4는 분위기 기체 압력이 50, 800 그리고 1000 mTorr일 때 관측된 $I(t)$, di/dt 곡선이다. Figure 내의 점선 화살표는 pinch가 일어난 지점으로 분위기 기체 압력의 증가에 따라 pinch가 늦게 발생하였다. 오실로 스코프를 이

용한 $I(t)$ 및 di/dt 측정 원리는 pinch 현상이 순간적인 자기장의 증가를 동반함에 따라 나타나는 순간적인 전압 상승 효과를 이용한 것이다. 또한 세기가 큰 pinch는 높은 플라즈마 sheath 밀도와 자기장이 동반되며 이는 di/dt 변화를 크게 만들게 된다. 그러므로 pinch 지점에서의 di/dt 변화 폭이 클수록 pinch의 세기가 크다고 할 수 있다. 이러한 원리를 통해 측정된 di/dt 곡선은 50보다 1000 mTorr에서의 pinch가 크게 나타나는 것을 보여주고 있다. Fig. 5는 위 결과를 토대로 하여 분위기 기체 압력에 따른 pinch 발생 시간과 pinch 크기를 나타낸 그래프이다. pinch의 크기는 Fig. 4의 di/dt 파형에서 급격한 파형 변화(화살표 시점)의 크기인 $\Delta di/dt$ 를 3단계(without pinch○, pinch□, big pinch▲)로 나누어 표시하였다.

이에 대한 물리적인 해석은 다음과 같이 할 수 있다. 50 mTorr에서와 같이 pinch 현상이 작은 경우, pinch 효과가 나타난 시점이 전류의 최대값보다 앞서는 것으로 보아 최초의 절연 파괴 현상으로부터 발생한 플라즈마 sheath가 낮은 분위기 기체 밀도 때문에 쉽게 전극의 끝 부분으로 진행하게 되고, pinch현상이 일어날 때의 전류 값이 낮아 자기장 형성이 되지 않았기 때문으로 풀이할 수 있다. 즉, pinch 효과가 크게 나타나기 위해서는 전

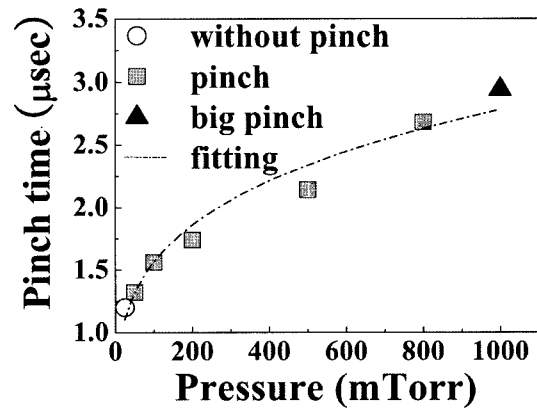


Fig. 5. Pinch time vs. working pressure.

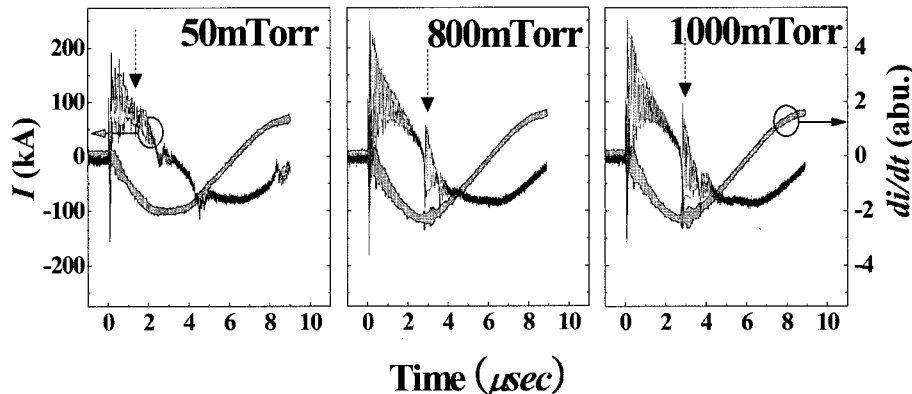


Fig. 4. di/dt and $I(t)$ curves of pinch effect at 50, 800 and, 1000 m Torr. The pinch point was marked by dashed arrow.

극 부분에 플라즈마 sheath가 모였을 때 최대값의 전류를 가져야 한다는 것을 의미한다. 이러한 분석은 분위기 기체의 밀도를 높인 1000 mTorr에서 확인할 수 있는데, 이 경우 전류의 최대값에서 pinch 현상이 일어났으며 이때 di/dt 변화 폭이 매우 커지는 것을 관찰하였다.

그러므로 pinch 현상이 나타나는 시간은 pinch 효과의 크기를 결정 짓게 되며 이는 궁극적으로 분위기 기체의 압력에 의존하는 것을 알 수 있다. 동일한 길이에서 속도는 시간의 역수로 나타나므로 분위기 기체 밀도에 따른 플라즈마 sheath 속도의 그래프는 압력과 시간 그래프로 나타낼 수 있다. 그러므로 pinch 시간은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$t_{\text{pinch}} = B \cdot P^{\alpha} \quad (1)$$

이때 B 는 기체와 방출전압에 따른 상수이며 P 는 압력에 해당한다. Fig. 5의 점선은 위 수식을 이용한 피팅 곡선으로 압력에 대한 증가 비율 변수인 α 는 1/4의 값을 가진다.⁶⁾

Fig. 6은 플라즈마 포커스 장치를 이용하여 성장된 박막의 표면 미세 구조이다. 표면의 상태를 보면 분위기 기체 압력이 50 mTorr에서 1000 mTorr로 갈수록 입자의 농도가 점차 낮아지고 입자의 크기가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이를 통해 높은 에너지 보다 낮은 에너지에서의 방출 입자가 더 작은 크기를 가지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 pinch 효과가 발생 한 순간의 에너지에 비례하여 물질 방출이 일어나고 그 입자의 크기도 변화됨을 알 수 있다. 1000 mTorr의 표면에서 관찰되는 원형 물질은 일반적인 입자의 형태가 아닌 높은 에너지에 의해 표면 밑으로 침투한 것으로 보이며, 이온 주입의 흔적으로 예상된다. 이에 따라 이온 주입 현상을 관찰하기 위해 Auger Electron Spectroscopy (AES)를 이용하여 depth profile을 분석하였다.

Fig. 7은 AES를 이용한 시료의 depth profile 분석 결과이다. 압력이 증가할수록 성장된 박막의 두께가 얇은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 미세 표면 분석을 통한 결과와 일치하는 것이며, 각 물질이 가지는 특성은 다음과 같이 분석하였다.

전체적으로 Cr 산화막이 성장된 것을 볼 수 있는데 이

것은 분위기 기체가 1:1 비율의 Ar과 O₂로 이루어져 있으므로 산화도가 높은 Cr과 O₂가 쉽게 결합하여 성장하기 때문이다. 또한, Si 기판 내부에 Cr이 발견되는데 이러한 경향의 분포 특성은 이온 주입 (implantation)의 분포 경향과 일치하는 것으로 플라즈마 포커스 장치에 의해 가속된 입자가 물질 방출 현상과 함께 이온 주입 현상을 동반한다는 것을 보여준다.¹²⁾

Cu의 경우, Fig. 3의 음극 구조에서 보는 바와 같이 전극의 끝 부분에 Cr을 감싸고 있는 물질이 Cu로 구성되었으며 pinch 현상이 일어나기 전 플라즈마 sheath가 모아지기 시작할 때 비교적 높은 에너지를 받아 방출하는 것으로 예상된다. C, Cu와 같은 오염 물질은 박막 성장에 있어서 좋지 못한 방출 현상으로 전극 구조 개선과 진공 장치 내의 청정도 개선 실험을 통해 제거되는 것을 확인하였다. 이에 대한 결과는 본 논문에서는 나타

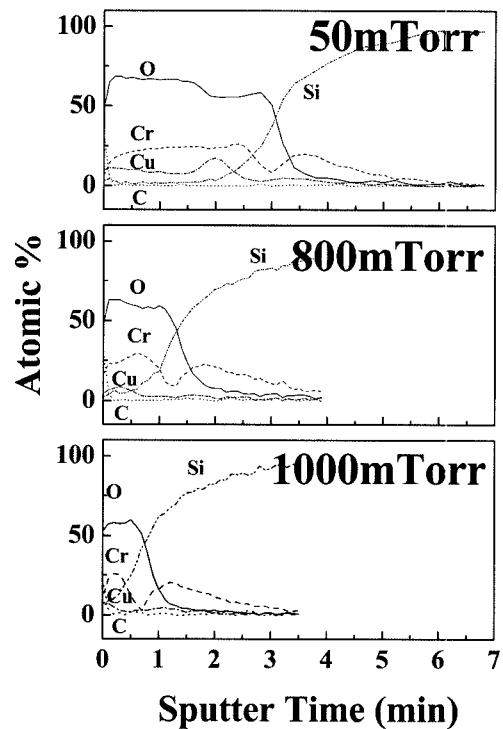


Fig. 7. Auger Electron Spectroscopy (AES) depth profile for samples grown at 50, 800 and 1000 mTorr.

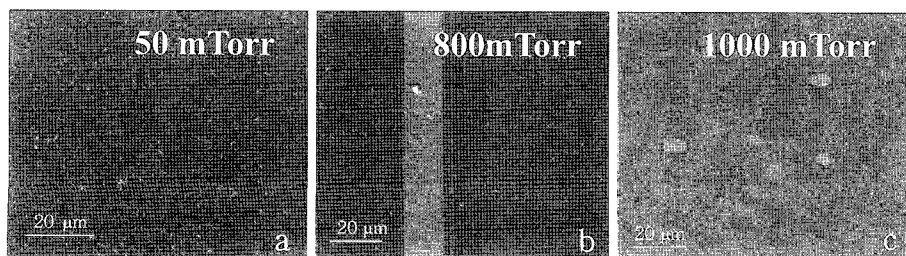


Fig. 6. Scanning Electron Microscope images for samples grown at a working pressure of 50, 800 and 1000 mTorr.

Table 1. The magnitudes of pinch peaks, pinch times and oxide thickness (sputter time) in terms of working pressure.

	50 mTorr	800 mTorr	1000 mTorr
Pinch 크기 ($\Delta di/dt$)	1.0	2.9	4.5
Pinch time (μsec)	1.2	2.6	3
산화막 두께 (AES sputtering time: min)	3.1	1.3	0.7

내지 않았다.

본연구에 대한 결과는 Table 1에 정리 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 플라즈마 포커스 이용해서 Cr 산화물 박막을 성장하고 분위기 기체 압력에 따른 산화막 성장률을 50, 800 그리고 1000 mTorr에서 성장된 시료를 사용하여 비교하였다.

Cr 산화막 성장은 비교적 낮은 압력에서 입자의 크기가 작아지며 증착된 산화막의 성장률이 높아지는 것을 실험적으로 확인하였으며, 이에 따른 물리적 현상을 다음과 같이 해석하였다. 분위기 기체의 농도가 플라즈마 sheath의 속력을 결정 짓게 되며 pinch 현상이 일어나는 시간과 방전 전류가 최대값까지 도달하는 시간이 일치할수록 pinch의 크기가 커진다. 또한 pinch의 세기는 이온 방출 시 생성되는 입자의 크기를 결정 짓게 되는데 pinch의 세기가 작을수록 입자의 크기도 작아지는 것을 확인하였다.

pinch의 시간과 세기는 분위기 기체 압력의 변화를 통해 조절가능하며 pinch 시간은 분위기 기체 압력의 1/4 승에 비례함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. H. Kelly and A. Marquez, Plasma Phys. Control. Fusion, **38**, 942 (1996).
2. J. Pouzo, H. Acuna, M. Milanese and R. Moroso, Eur. Phys. J. D 21, 97-100 (2002).
3. S. P. Moo, C. K. Chakrabarty and S Lee, IEEE Trans. Plasma Sci., **19**, 3 (1991).
4. J. N. Feugeas, E. C. Lionch, C. O. de Gonzalez and G. Galambos, J Appl. Phys, **64** (5), 1(1988).
5. M. Sadowski, J. Zebrowski, D. Rydygier and J. Kucinski, Plasma Phys. Control. Fusion, **30**(6), 763-769 (1988).
6. J. W. Mather, Methods of Experimental Physics, 9B, H. R. Griem and R. H. Lovberg, 194-214, Academic, New York (1971).
7. Leopoldo Soto, Patricio silva, Jose Moreno etc., Braz. J. Phys., **34**(4B), 1814-1821 (2004).
8. S. K. H. Auluck, IEEE Trans. Plasma Sci., 25(1), (1997).
9. D. Wong, A. Patran, T. L. Tan, R. S. Rawat, and P. Lee, IEEE Trans. Plasma Sci., **32**(6), 2227-2235(2004).
10. M. Rombeld et. Al., 12th IEEE Int. Conf. Pulsed power, 2, 1167-1170 (1999).
11. W. F. Ray and R. Hewson, Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE, **5**, 3083-3090 (2000).
12. Alan Y. Chow, Mabelle T. Pardue, Vincent Y. Chow, Gholam A. Peyman, hanping Liang, Jay I. Perlman and Neal S. Peachey, IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., **9**(1), (2001).