

음이온 빔을 이용한 박막합성 기술 현황



변응선

(KIMM 재료공정연구부)

- '81 - '88 강원대학교 재료공학과(학사)
- '88 - '90 강원대학교 대학원 재료공학과(석사)
- '91 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이성훈

(KIMM 재료공정연구부)

- '90 - '94 창원대학교 재료공학과(학사)
- '94 - '96 창원대학교 대학원 재료공학과(석사)
- '96 - 현재 한국기계연구원 연구원



이상로

(KIMM 재료공정연구부)

- '73 - '79 서울대학교 금속학과(학사)
- '78 - '81 (주) 삼미사
- '81 - '83 한국기계연구원 제조아금실
- '83 - '85 Stevens Institute of Technology 재료공학(석사)
- '85 - '89 Stevens Institute of Technology 재료공학(박사)
- '89 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서론

이온빔(ion beam)기술은 열적 비평형 상태하에서 재료를 합성하거나 개질하는 기술을 일컫는 것으로서 여기에는 양이온빔과 음이온빔을 이용하는 두가지 방법이 있다. 그러나 음이온의 경우 빔 발생이 어렵고 또 재료의 합성이나 개질에 미치는 영향이 양이온빔과 같다고 생각되었기 때문에 지금까지 주로 양이온빔에 의한 연구들이 수행되어 왔다.①

그러나 1980년대 중반부터 음이온 빔의 발생과 이 빔과 재료 표면사이의 상호반응에 대한 상당한 이해와 발전이 이루어 졌다. 일례로 접지된 상태의 도전성 물질에 음이온을 주입(implantation)하는 경우 표면에서의 음이온과 양이온의 분포는 같지만 절연체에 이온주입을 할 경우 음이온과 양이온은 서로 다른 현상을 보이게 된다.② 음이온의 음전하극성(negative charge polarizing) 때문에 음이온 주입의 경우에는 표면 전하축적(charge-up)은 거의 일어나지 않으나 양이온 주입시는 심한 표면 전하축적 때문에 양이온의 가속전압을 계속 증가시켜 주어야만 한다.③

또다른 차이점을 예로 들면 이온주입보다 낮은 에너지 범위인 이온빔 증착시(즉 낮은 운동에너지범위)에서 양이온의 내부포텐셜 에너지 즉 이온화 포텐셜은 운동에너지와 유사하다. 따라서 이 두 에너지가 혼합되어 증착과정에 기여하는 반면 음이온의 내부포텐셜 에너지 즉 전자친화도(electron affinity)는 매우 낮아 곧바로 재료에 흡수되어 버리기 때문에 운동에너지 효과만을 독립적으로 추출할 수 있게 된다.② 이를 그림 1에

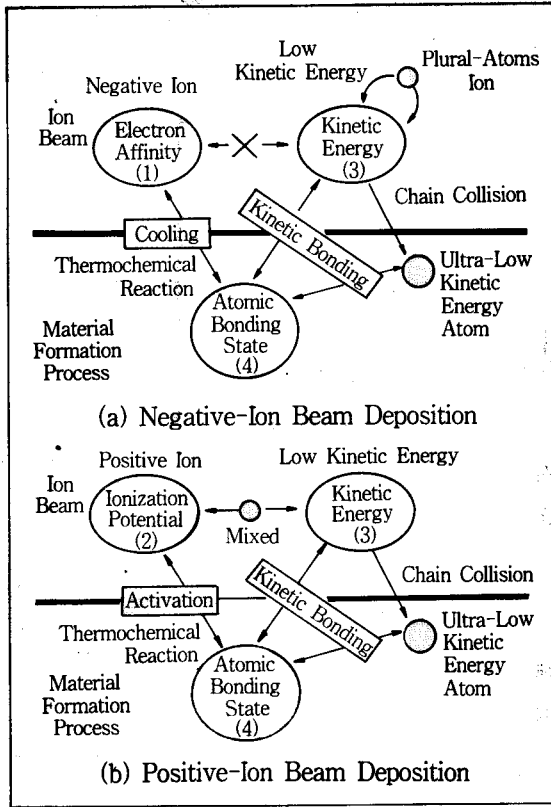


그림1. 음이온 및 양이온 빔 증착에서 원자 결합 상태, 이온의 운동에너지와 내부포텐셜 간의 관계

도식적으로 나타내었다.

이 운동에너지(kinetic energy) 효과는 열적 비평형상태하에서 합성기구를 이해하는데 중요한 인자가 되기 때문에 최근 주목받고 있는데 본고에서는 음이온빔 합성기술을 중심으로 간략히 기술적 내용과 연구현황을 살펴보았다.

2. 음이온 빔(negative ion beam)의 특징

음이온의 특징을 양이온과 비교하여 간략히 살펴보기로 하겠다. 서론에서 언급하였듯이 음이온은 음전하극성을 가지고 있으며 이온화에너지(즉

전자친화력)가 약 1eV 근방으로 매우낮으며 이 에너지는 이온이 중성화 될 때 재료에 흡수되어 버린다. 반면 양이온은 중성화될 때 이 에너지가 방출되는 특성이 있다. 위에서 말한 음이온이 가지고 있는 특유한 장점인 음전하극성, 낮은 전자친화력, 그리고 중성화 될 때의 에너지 흡수에 대해 좀더 자세히 알아보면 다음과 같다.

2.1 음전하 극성

음전하 극성은 음전하를 가진 이온이 재료표면에 입사하게되면 2차 전자를 방출시켜 쉽게 전기적인 균형을 유지하는 성질로서 이에 의해 절연체 표면의 이온주입시 표면에서의 전하축적을 감소시켜 준다. 이 경우 절연체 표면에 전하축적된 전압의 크기는 수 V크기정도 밖에 되지 않기 때문에 절연성질의 파괴는 일어나지 않게 된다.③ 음이온빔 감속의 경우 음이온은 양이온 가속없이 감속되기 때문에 음이온의 운동에너지를 정밀하게 제어할 수 있게 된다.④

2.2 낮은 전자친화력

낮은 전자친화력은 스퍼터링에 의한 이차전자 방출, 넓은 전자분리 단면적(large electron detachment cross-section)과 비교적 높은 이차전자 방출 계수 등에 의해 효과적으로 음이온을 발생할 수 있도록 해준다. 즉 스퍼터링시 금속표면의 페르미준위와 스퍼터된 원자의 전자친화준위 사이의 터널효과에 의한 전자기동에 의해 약한 음이온이 생성되며 진공중의 가스입자와의 충돌에 의해 쉽게 전자를 분리시킨다.

이때 전자분리 단면적은 양이온의 전하교환 단면적보다 1차원 더 넓기 때문에 또한 이차전자 방출계수는 다음식과 같이 음이온이 양이온보다 크기 때문에 약한 음이온은 쉽게 여분의 전자를 방출하게 된다.

$$f_{neg} \approx f_{pos} + 1.$$

2.3 에너지 흡수

음이온이 중성화될 때 이온빔증착 과정에서 에너지 흡수는 앞서 설명하였듯이 운동에너지의 효과만을 분리해 낼 수 있게 해준다. 이 이온빔의 운동에너지는 증착된 박막의 결정성 또는 결합상태에 주된 영향을 주기 때문에 매우 중요한 공정 인자이다. 그러나 일반적인 PVD공정에서 증착중인 입사이온의 에너지 즉 운동에너지를 독립적으로 조절할만한 편리한 방법이 없기 때문에 증착물질 이온의 운동에너지를 직접 그리고 정밀하게 조절할 수 있는 이 음이온빔 합성기술은 물질의 핵생성, 성장 등의 연구에 매우 적합한 수단이다.

⑤

3. 음이온빔 증착기술 현황

음이온빔 합성기술의 응용분야는 앞서 개략적으로 살펴보았듯이 크게 전하축적현상이 없는 음이온주입과 소위 "동적결합(kinetic bonding)"이라 불리워지는 음이온빔 증착분야로 나눌 수 있는데 본고에서는 후자에 초점을 맞추어 이의 기술현황 및 응용 예에 대해 설명하고자 한다.

3.1 이온빔 증착을 위한 음이온 발생원

그림 1에서 설명하였듯이 입사이온의 운동에너지가 원자들의 결합상태에 결정적인 기여를 하는 즉 동적결합 과정은 기타 열화학적 반응과 매우 다르다.

열화학적 반응에서는 원자의 열에너지가 반응의 에너지 장벽보다 클 경우 원자간거리가 좁아져 가장 낮은 에너지 상태에 도달하게 된다. 그러므로 원자결합상태 즉 재료의 결정구조는 무조건적으로 결정된다.

그러나 동적결합 반응에서는 그림 2에서와 같이 높은 운동에너지를 가지고 있으므로 쉽게 에너지 장벽을 넘을 수 있고 원자간에너지 준위도

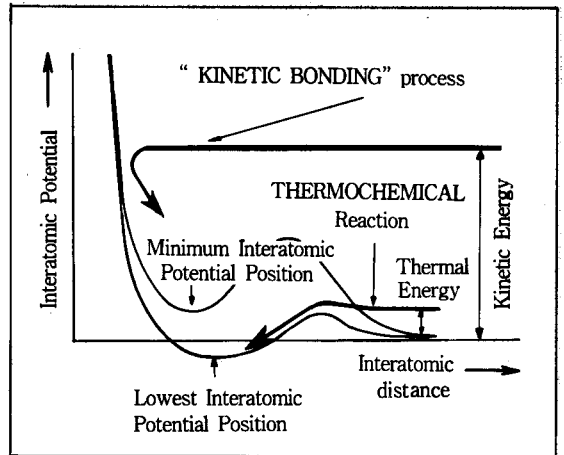


그림2. 2가지 원자간 결합형성기구 : 동적결합기구와 열화학적 반응.⑥

이온이 가지고 있는 운동에너지와 같은 크기의 준위에 근접할 수 있게된다. 이 위치로부터 원자결합이 형성되기 시작하여 에너지 준위가 낮은 곳에 위치하게 된다. 따라서 그림 2에서 원자간 결합력 곡선이 더 많이 존재한다면 최종 원자결합상태는 열화학적반응과는 달리 항상 일정한 장소가 되지 않는다. 이것은 새로운 재료를 합성할 수 있음을 의미하는 것이다.

이온빔합성을 위한 음이온빔 장치는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

① 낮은 에너지 분산, ② dc 모드에서 높은 이온전류, ③ 다양한 음이온빔의 발생이 가능할 것, ④ 장치로부터의 가스방출이 적을 것, ⑤ 수명이 길고, ⑥ 안정된 작업이 가능해야 한다. 이와같은 요구조건들은 이온주입용 장치들의 요구조건보다 더 엄격한 것으로서 지금까지 이러한 까다로운 조건을 만족시키는 장치들이 개발된 예는 극히 적다⑦

Ishikawa등은 그림 3과 같은 스퍼터 형태의 NIABNIS을 개발하였으며 C_2 빔을 이용한 비정질 다이아몬드 합성 결과 열전도도가 다이아몬드 II_b 와 유사하였다고 발표하였다.⑦

또 Ishikawa등은 콤팩트 마이크로웨이브 세슘 이온원(compact microwave cesium ion source)를 이용하여 dc 모드에서 비교적 높은 음이온 전

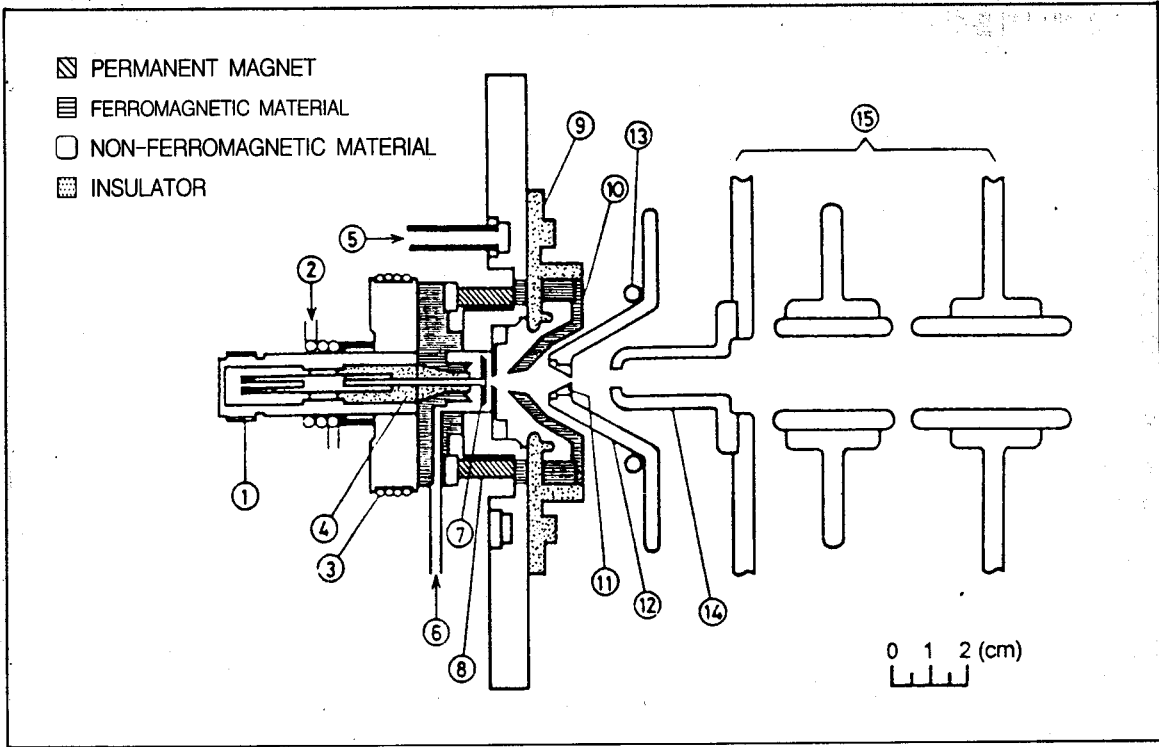


그림3. 음이온 빔증착을 위해 콤팩트 마이크로웨이브(compact microwave)세슘 이온원이 사용된 NIABNIS 장치

류를 얻었다고 보고하였는데 대략 C^- ($735\mu A$), C_2^- ($200\mu A$), Cu^- ($320\mu A$) 그리고 Si^- ($170\mu A$) 정도였다. 이때 음이온빔의 산란범위는 약 15eV로 매우 작았으며 C_s^+ 이온빔에 의한 스퍼터 형태이므로 즉 가스를 사용하지 않는 특징을 가지고 있다.

최근에 Skion corp.에서 그림 4와 같은 새로운 스퍼터 형태의 음이온빔 증착장치를 개발하였다. ⑧⑨⑩⑬ 이 장치는 다공성 텅스텐 이온화기(ionizer)에 의해 세슘 이온을 이온화시켜 C_s^+ 이온빔을 형성하며, 이 빔에 의해 스퍼터링 타겟을 스퍼터시켜 원하는 음이온빔을 생성한다. 따라서 가스를 사용하지 않으므로 고진공에서 작업이 가능할 뿐만 아니라 스퍼터된 원자들이 에너지 손실이 매우 적어 기판에 도달하는 이온의 에너지를 10~300eV범위로 제어 가능한 특징이 있다.⑫

S.Kim의 보고에 의하면 발생원 모델 NMIBS-CSO₂의 경우 약 2cm 직경의 C, Au, Ag, Cr, Pt,

Al, W, Ta, Mo 등의 음이온빔을 0.1~0.5mA범위로 생성시킬 수 있으며 또한 15~50GPa의 고경도 DLC박막의 핵생성과 성장에 관한 연구결과를 보고하였다.⑪

3.2 음이온직접증착(DMIBD) 증착기술 현황

음이온 직접 증착법(DMIBD, Direct Metal Ion Beam Deposition)이란 3.1절에서 설명한 이온빔 source를 이용하여 합성하고자 하는 물질을 음이온상태에서 "동적결합(kinetic bonding)"에 의해 모재위에 증착시키는 새로운 박막기술이다.

이 음이온 직접증착법은 종래의 이온빔 보조증착법(IBAD, Ion Beam Assisted Deposition)과 큰 차이가 있는데 여기에서는 3.1절의 Skion식 이온빔 source를 기준으로 비교 설명하겠다. 먼저 IBAD공정에서는 이온빔의 에너지 전달이 보조이

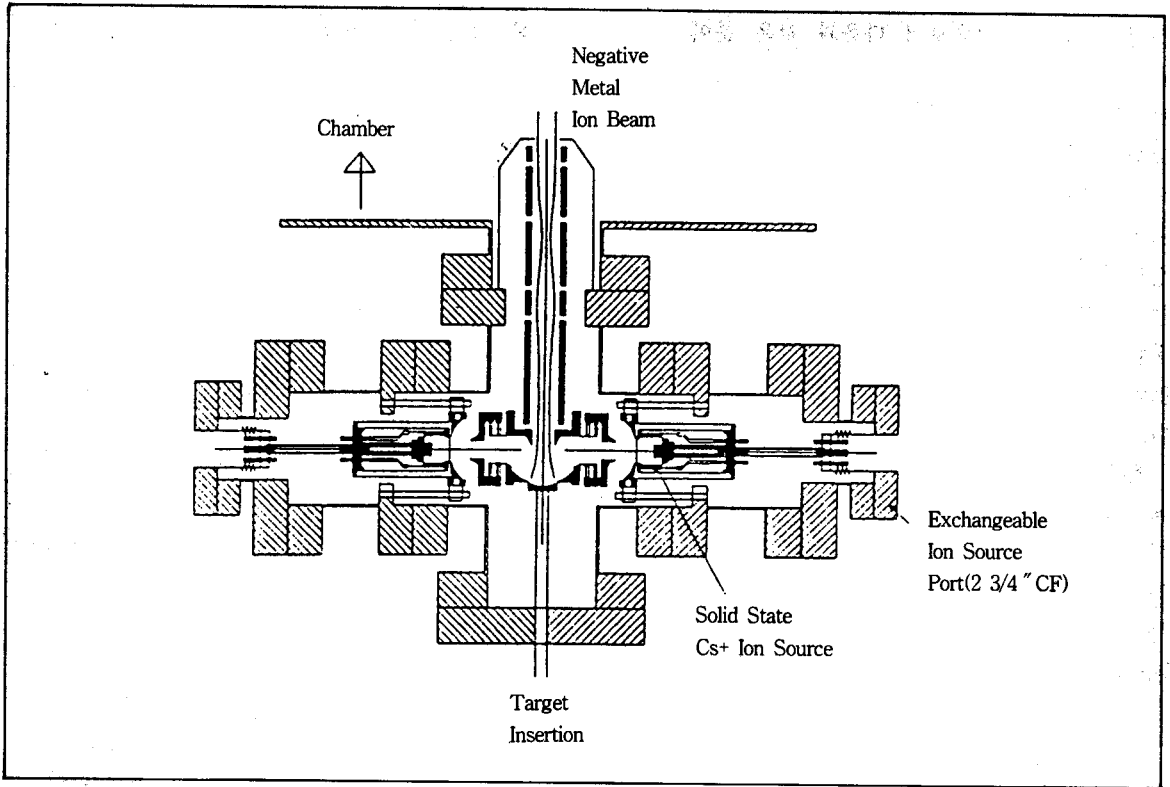


그림4. Skion corp.에 의해 개발된 음이온 빔 증착을 위한 스퍼터형태의 음이온 발생원의 개략도.

온빔과 증착되는 입자 사이에 기하학적, 시간적인 일치가 일어날 경우에만 일어난다. 즉, 그림 5에서와 같이 에너지 전달과정이 비효율적임을 알수 있다. 그러나 DMIBD 공정에서는 증착되는 물질이 이온빔을 구성하고 있는 물질 그 자체이다. 따라서 각각의 증착되는 이온빔은 자기 스스로

자기자신의 운동에너지를 운반하게 되므로 에너지 효율이 매우 높게 된다.(100% 에너지 전달) 또한 모든 금속물질에 대해 음이온빔을 형성할 수 있으며 빔에너지 자체도 10~300eV로 정밀하게 조절할 수 있을 뿐아니라 증착속도도 매우 높고 수 m의 대면적 코팅이 가능한 매우 경제적이고

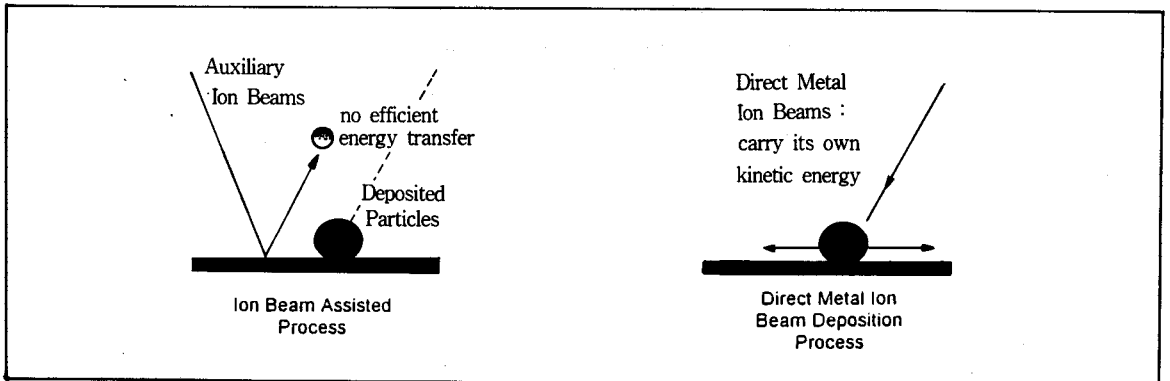


그림5. 전형적인 IBAD 프로세스와 DMIBD 프로세스의 차이점.

신뢰성 있는 신기술로서 다음과 같은 분야에 응용이 적극 추진되고 있다. 컴퓨터 하드디스크의 보호코팅, 먼도날의 내마모코팅, 광학기기의 보호코팅 등등.

이 기술은 현재 Skion corp.에 의해 실용화되어 미국내 다수의 연구소와 대학에서 새로운 재료합성연구에 사용되고 있으며 향후 10여개 대학 또는 연구기관에 보급될 예정이다. 물론 DMIBD에 대한 기초연구 및 성능향상연구도 S.I.T (Stevens Institute of Technology)에서 계속 진행중에 있다.

한편 국내에서는 한국기계연구원 박막기술그룹에서 NMIBS-CSO₂를 이용하여 초경질 B-N 박막의 결정성에 미치는 이온빔에너지의 영향을 연구하고 있으며 이외에도 연세대학교 금속과와 S사 등에서 NMIBD 법을 이용하여 CN박막합성, 반도체공정 등에서의 적용을 시도하고 있다.

4. 맺음말

열화학적으로 평형상태가 아닌 비평형상태하에서 재료를 합성하거나 새로운 표면물성을 부여하는 표면기술이 최근 큰 주목을 받고 있다. 이러한 것은 비평형 또는 준 안정상들이 기존의 평형상들이 가지지 못했던 독특하고 우수한 물성을 나타내기 때문이다.

본고에서는 이러한 기술적 경향에 부합하는 새로운 기술인 음이온빔 합성법에 대해 양이온과 음이온빔의 차이점, 음이온빔의 특징, 음이온빔을 이용한 장치 및 응용현황에 대해 알아보았다.

음이온빔을 이용한 증착은 음이온의 음전하극성 때문에 절연체 표면에서 쉽게 전하 균형이 이

루어 되며 낮은 전자 친화도(electron affinity)에 기인된 동적 효과 때문에 열적비평형 상태에서의 재료의 합성은 물론 핵생성, 성장기구 등의 연구에 획기적인 발전이 기대되고 있다.

참고문헌

1. J.Ishikawa, Surface and Coatings Tech., 65(1994)64-70
2. J.Ishikawa, Rev. Sci. Instrum., 63(1992)2368
3. S.Sakai, M.Tanjyo, K.Tsuji, Nucl. Instrum, Methods B.74(1993)118
4. J.Khikawa, Y.Takeiri and T.Takagi, Rev. Sci. Instrum., 57(1986)1512
5. J.Ishikawa, Proc. 1st Int. Symp. on Sputtering and Plasma Processes, Tokyo, 1991. p85
6. J.Ishikawa, Rev. Sci. Instrum., 67(3)p1410
7. J.Ishikawa, T.Takeiri, H.Tsuji, T.Taya and T.Takagi, Nucl. Instrum, Methods B232, 1, 186(1984)
8. S.I. Kim and Seidl J.Vac. Sci Technol A7(3) 1989 p1806
9. S.I. Kim, us patent No 5, 466, 941, Nov. 14. 1995
10. S.I. Kim, us patent No 5, 521, 389, May 28. 1996
11. S.I. Kim, Proc. Int. Dia. Sym., Seoul, Nov. 5~7(1996) p159
12. S.I. Kim, Y.O. Ahn and M.Seidl, Rev. Sci. Instrum., 63(12) 1992 p5671
13. S.I. Kim and M.Sei이, J.Vac. Sci. Technol. A7(3) 1989. p1806