

# 펄스레이저를 이용한 박막 증착

김 호 성\*

(\*중앙대학교 공과대학 전기공학과 조교수)

## 1. 서 론

펄스레이저 증착방법(Pulsed Laser Deposition, 이하 PLD)은 1987년 T.Venkatesan(1)등이 고온 초전도체( $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ )의 박막증착에 성공함으로써 그 이후 크게 각광을 받고있는 박막증착방법이며 그림 1에 그 개념도가 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 PLD는 개념적으로나 또 실제 운용상으로도 간단한 증착 방법이며 현재 사용되고 있는 여러가지 증착방법중 가장 간단한 방법중의 하나이다. 반응가스(주로 산소)가 채워진 chamber 안에 박막의 화학적 조성비와 같은 조성비를 가진 타겟을 장치하고 펄스(펄스폭 10~30ns) 레이저(주로 자외선 레이저)빛을 고체상태의 타겟 표면에 렌즈로 집속시키면 타겟의 표면온도가 급격히 올라가 표면에서 폭발적인 기화가 일어나게 된다. 기화된 물질들이 이 폭발력때문에 기판을 향하여 플라즈마(주로 plume이라 불리운다)상태로 chamber 속의 가스와 반응하며 날아가게 된다. 이 물질들은 결정화에 알맞은 온도로 가열된 기판에 도착하여 결정 구조를 가진 박막을 이루게 된다.

설명한 바와 같이 개념및 운용이 간단하며 증착 시간이 짧고 복잡한 화학적 조성과 결정구조를 가진 물질을 쉽게 박막으로 증착할 수 있다는 장점때문에 최근들에 활발한 연구가 PLD에 관해 진행되고 있다. 최초의 PLD실험은 최초의 레이저가 개발된지 5년후, 즉 증착에 필요한 충분히 큰 에너지를

발생할 수 있는 고출력레이저가 제작된 1965년에 루비레이저를 사용하여 이루어졌고(2) 그후  $CO_2$ 레이저, Nd:YAG 레이저를 이용한 실험이 이루어졌다. 또한 짧은 시간에 높은 순간 출력( $>10^8W$ )을 발생시키는 Q-Switching 방법이 개발됨에 따라 반도체박막 유전체박막, 자성체박막 등 복합물질박막의 증착이 가능해졌고 80년대 말에는 MBE에 의해 증착된 박막의 특성에 버금갈 정도의 고품질 박막의 증착이 가능해졌으며, 다층박막의 증착도 가능해졌다(3). 80년대 말 고출력 자외선레이저가 개발되면서 PLD는 비약적인 발전을 이루게 되는데 그 이유는 열에너지에 의한 기화뿐만 아니라 광자에너지에 의한 화학적 분해까지 기화에 작용하기 때문이다. 현재 PLD는 4~5가지 원소들이 복잡한 결정구조를 이루는 고온초전도체, 강유전체, 자성체 등의 박막 증착에 이용되며 한 층 더 응용범위를 넓혀가고 있다.

본 특집에서는 PLD의 장치및 증착 방법을 2장에서 소개하고 3장에서는 증착원리및 특징을 4장에서는 PLD의 응용분야를 그리고 5장에서는 결론및 향후 연구 방향에 대하여 기술하겠다.

## 2. PLD장치와 증착방법

PLD에 사용되는 chamber는 스테인레스 스틸 또는 pyrex Belljar로 만들어진다. chamber에는 레이저빛이 들어가는 window및 다른 장치들이 부

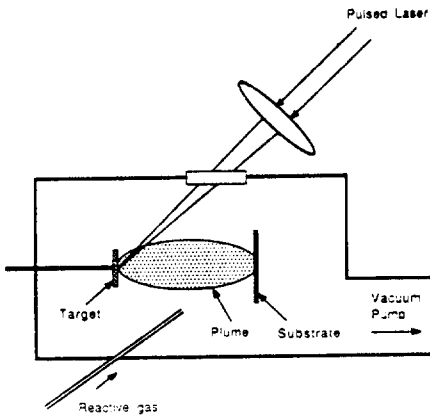


그림 1. PLD 장치의 개념도

착된다(그림 1 참조). 타겟은 주로 고상반응법(Solid state reaction)에 의하여 만들어진다. 예를들면 고온초전도체의 하나인  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  타겟을 만들기 위해  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $CuO$  분말을 1/2:2:3의 몰비로 잘 섞은 후 4000psi 정도의 압력으로 압축시켜 원통형의 시편을 만든다. 이 시편을 소량의 산소를 불어넣으면서 수시간동안 소결시켜 고온초전도체인 타겟을 만들 수 있다. 그러나 고순도의 분말을 사용하고 섞는 과정과 압축과정을 3~4회 반복하면 소결 과정이 생략된 압축분말 타겟을 사용할 수도 있다. (4) 증착과정동안 작은 직류전동기를 이용하여 타겟을 회전시켜서 타겟의 국부적 손상을 방지하고 타겟의 전면적을 사용할 수 있도록한다. 증착에 사용되는 기판에는 여러가지 유전체가 있는데 격자상수와 열팽창계수가 증착될 박막과 비슷해야 한다. 주로 사용되는 기판은  $SrTiO_3$ ,  $LaAlO_3$ ,  $YSZ$ ,  $MgO$  등이며 광학적, 기계적, 화학적, 전자기 특성이 그 응용분야에 적합한 것을 골라서 쓴다. (5, 6, 7) 이 기판을 열전도성이 좋은 접착제를 사용하여 전기적으로 가열되는 가열대위에 고정시키고 600~800°C 정도로 가열한다. 증착전에 chamber를  $10^{-7}$  torr 정도의 진공으로 만들거나 반응가스( $O_2$ ,  $N_2O$ ,  $NO_2$  등)로 여러번 flushing시켜서 불순물을 제거한다. 증착과정동안에 이 반응가스를 노즐을 사용하여 기판을 향해 계속 주입하면서 10~200mtorr의 압력을 유지시킨다(그림 1 참조). 증착에 사용되는 레이저는 자외선영역의 빛을 내는 레이저이며 주로 엑시머 레이저(Excimer Laser)

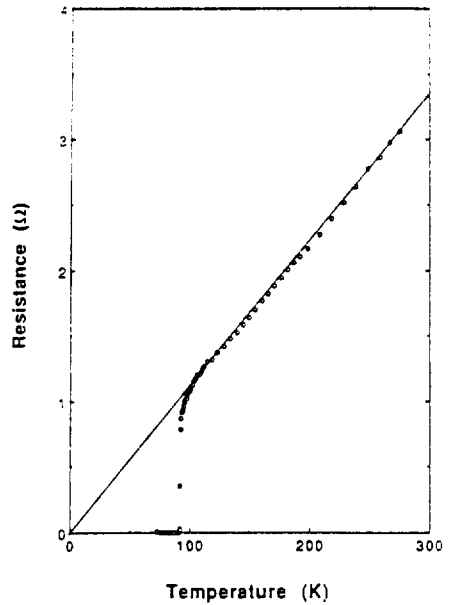


그림 2. PLD로 증착된 YBCO 박막의 저항-온도 특성

가 사용되는데 레이저빛의 파장은 193nm(ArF), 248nm(KrF), 308nm(XeCl)등이다. 또한 Nd:YAG의 third harmonics(355nm)를 이용하기로 한다. 기판과 타겟을 3~9cm 정도의 거리로 마주 보게 위치시키고 레이저빛을 렌즈를 이용하여 타겟표면에서의 에너지밀도가 1~3 J/cm<sup>2</sup> 정도 되도록 집중시킨다. 기판과 타겟사이의 최적거리는 타겟표면에서의 레이저 에너지밀도와 반응가스의 압력에 의해 결정되며 이 조건에서 10~20분동안 10Hz의 레이저 펄스를 이용하면 2000~4000Å 두께의 박막이 증착되고 증착속도는 150Å/min 정도이다(2~3Å/pulse). 증착이 끝나면 chamber를 반응가스로 1기압까지 채우고 기판온도를 상온까지 낮춘 후 기판을 떼어내면 아무런 사후열처리과정 없이도 결정화된 박막을 얻을 수 있다. 그림 2는 PLD를 이용해 증착된  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  고온초전도체 박막의 저항-온도 특성이다.(8).

### 3. PLD의 원리와 특징

PLD 과정은 레이저빛과 물질간의 상호작용에 의한 플라즈마 생성과정, 반응가스속에서의 플라즈마 확산과정, 기판 위에서의 박막형성과정등 크게 세

가지로 나눌 수 있다. 특히 앞의 두 과정은 레이저 빛의 파장 및 에너지 밀도, 물질의 온도의 함수인 물질의 광특성과 상태특성에 따라 온도 상승, 용융, 폭발적 기화 과정, 그리고 원소간의 충돌 및 화학적 반응을 포함한 확산 과정을 거치게 되므로 이들의 해석을 위해서는 재료공학, 열역학, 화학, 운동역학, 유체역학 등 다양한 학문적 지식이 필요하여 현재까지 정량적인 해석이 거의 이루어지지 않았다 해도 과언이 아니다. 3장에서는 이 두 과정에 대해 간략히 그 이론을 정성적으로 설명하겠다.

고에너지의 레이저 빛이 물질에 집중되면 레이저 빛에 의한 높은 전기장 때문에 dielectric breakdown이 일어나고 대부분의 광양자가 물질에 흡수된다. 흡수된 광양자의 에너지는 고체상태의 물질에서는 전자와 격자의 진동자(phonon)에 의해 흡수되고, 녹아서 액체상태가 된 경우에는 free carrier에 의해 흡수되어 물질의 온도가 급격히 올라가 기화온도에 이르게 되고 물질은 기화되게 된다. 이러한 과정은 높은 에너지 밀도와 순간출력(peak power) 때문에 짧은 시간(<레이저 펄스폭>)에 폭발적으로 일어나고 이 폭발력(recoil pressure) 때문에 물질은 기체와 액체상태도 물질표면으로부터 분리되어 공간으로 확산된다(9). 이 물질들은 레이저 빛을 계속 흡수하여 온도가 더욱 올라가며 광양자 에너지가 충분히 클 경우 분자 또는 원자상태로 분해된다.

그러므로 파장이 긴 적외선 레이저를 사용하게 되면 빛이 물질 깊숙히까지 침투하고 결과적으로 방출되는 입자의 크기가 커지게 된다. 또한 광양자 에너지가 작기 때문에 모든 과정이 열에 의해 진행되고 따라서 용융점 및 기화온도가 다른 물질이 섞여 있을 경우 기화되는 양이 달라지고 분자 및 원자의 결합을 깨뜨릴 수 없게 되어 증착된 박막의 표면특성이 나빠지고 화학적 조성비가 타겟의 조성비와 달라진다. 이러한 이유로 하여 적외선 레이저는 PLD에 거의 사용되지 않는다. 그러나 자외선 레이저를 사용할 경우 짧은 파장 때문에 침투깊이가 짧아져서(<500Å> (10) 작은 부피의 입자가 방출되며 또한 높은 광양자 에너지에 의해 단순한 열에 의한 기화뿐만 아니라 전기장에 의한 이온화, multiphoton에 의한 이온화, 광전자 방출 효과에 의한 이온들의 Coulomb explosion, 결정 및 분자 결합의

파괴 등의 효과로 인해 원자 및 단순한 분자상태로 방출된다(11). PLD의 가장 중요한 장점, 즉 타겟의 화학적 조성비와 같은 조성비의 박막을 증착할 수 있다는 장점은 위에서 설명한 바와 같이 파장이 짧은 자외선 레이저 빛에 의한 효과이다.

폭발력에 의해 높은 운동에너지(>100ev)를 갖고 타겟 표면에서 방출된 입자들은 chamber 내부의 반응가스와 충돌과정 중에서 복잡한 화학반응을 거치며 또한 운동에너지를 상실하게 된다. 이러한 비평형상태의 플라즈마 특성은 박막특성에 지대한 영향을 미치므로 PLD에 대한 이론적 해석뿐만 아니라 PLD 운용의 최적화를 위해서도 많은 연구가 이루어져왔다. 이러한 연구에는 optical emission(12, 13, 14), optical absorption(15, 16, 17), laser-induced fluorescence(18, 19), mass spectrometry(20, 21), ion probe(22, 23) 등 다양한 방법들이 사용되며 대부분 time of flight(TOF) 측정방법에 기초하여 플라즈마의 시간, 거리에 따른 특성변화를 연구하고 있다. 이들 연구를 통하여 알려진 사실은 다음과 같다.

타겟 표면에서 수직방향을 기준으로 하여 레이저 빛의 입사각이 60° 이내일 때 표면에서 발생된 플라즈마는 기판을 향해 깔때기모양으로 확산되며 그 분포는  $\text{COS}^n\theta$  ( $8 \leq \theta \leq 12$ )로 표현할 수 있고 순수한 열에 의한 기화(thermal evaporation)의 경우( $n=1$ )와 비교할 때 PLD는 그 물리적 현상이 크게 다를 수 있다. 타겟 표면 근처에서 플라즈마는 대부분 원자(양이온 또는 중성)들로 이루어져 있고 깔대기의 중심 부분에서는 플라즈마의 화학적 조성비가 타겟의 조성비와 같다. 그러므로 타겟이 박막의 결정구조를 갖출 필요는 없고 오직 화학적 조성비만 맞으면 결정구조를 갖춘 박막이 증착된다. 즉 고온 초전도체 박막 증착을 위한 타겟은 고온 초전도가 아니라도 되며 화학적 조성비만 같으면 되고 그렇기 때문에 앞서 말한대로 고온 소결 과정을 생략할 수 있다.

타겟 표면에서 플라즈마는 고속으로 팽창하는데 그 속도는  $10^5 \sim 10^6 \text{ cm/s}$  정도이며 원자의 무게에 따라 다르지만 그 분포는 충돌에 의해 변형된 Maxwell-Boltzman 분포를 따른다. 이 속도에서의 운동에너지는 ~100ev에 이르지만 확산되면서 반응가스와 충돌을 통해 그 에너지를 잃어버리고

증착하면서 이온화, 여기, 재결합, 분해, 산화, 분자 형성등 많은 화학적반응이 일어나게 된다. PLD에 사용되는 반응가스의 압력이 10 ~ 200mtorr 이므로 증착의 mean free path가 ~0.1cm정도가 되고 반응에 충분한 빛수의 증착이 기판에 도착할 때까지 일어난다. 화학적 반응의 정도는 화학적 반응의 성격(흡열반응, 발열반응)과 반응에 주어지는 에너지에 따라 다른데 PLD에서는 운동에너지가 공급에너지로 되므로 레이저빛의 에너지밀도와 반응가스의 압력, 그리고 타겟과 기판사이의 거리가 중요 요소가 된다. 박막의 중요 구성요소인 산화물은 이러한 화학반응의 결과이며 특히  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  박막에 필수적인 CuO는 Cu와  $O_2$ 의 화학적 결합에 의해 생성되는데 이 반응은 흡열반응이므로 Cu와  $O_2$ 의 운동에너지 즉 속도에 민감하다. 이 속도는 압력, 에너지, 거리의 함수이므로 생성되는 CuO의 양이 압력및 에너지밀도와 깊은 관계를 가지고 있음이 Ref. 18, 19에서 실험적으로 증명되었다. 또한 에너지밀도를 고정했을 때 고품질의  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  박막을 증착하기 위한 산소압력과 거리는 함수관계가 있음이 Ref. 24에서 실험적으로 증명되었고 그 결과는 그림 3과 같다.

기판에 도착할 때 입자들의 운동에너지는 1 ~ 10ev 정도로 줄어들게되지만 이 정도의 에너지는 입자와 기판과의 결합력을 높이는데 충분한 에너지

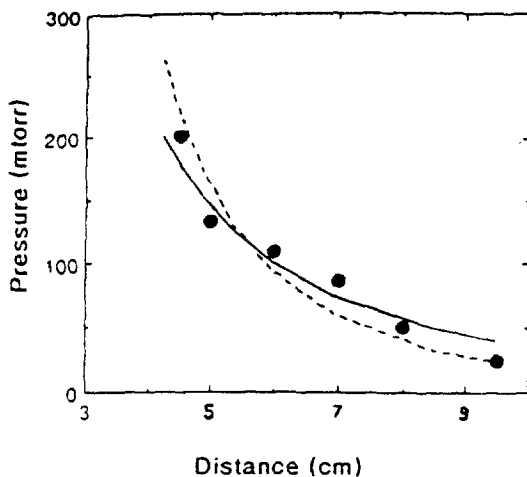


그림 3. YBCO 박막 증착을 위한 산소 압력과 거리의 최적 조건. (실선:  $PD^2=C$  점선:  $PD^3=C$ , 점: 실험).

이며 결정구조를 이룩하는데 필요한 충분한 activation 에너지를 공급하게 된다.

위와 같은 연구및 실험결과로부터 다른 증착방법과 비교하여 PLD가 가진 특징및 장점을 다음과 같이 요약할 수 있다. 1. 여러가지 원소로 이루어져 있고 복잡한 결정구조를 가진 박막을 비교적 쉽게 증착할 수 있다. 2. 증착에 필요한 에너지를 레이저 빛이 공급하므로 chamber의 설계를 다양하게 변화시킬 수 있고 집속된 레이저빛을 사용하므로 작은 면적의 타겟으로 넓은 면적의 박막을 증착할 수 있다. 3. 증착 속도가 빠르므로 ( $>150\text{\AA}/\text{min}$ ) 두꺼운 박막, 넓은 면적을 박막을 비교적 짧은 시간에 증착할 수 있다. 4. 타겟제작이 용이하다. 5. chamber내에 여러개의 타겟을 장치하고 레이저빛의 집속점에 외부의 조작으로 각 타겟을 교대로 위치시키면 다층박막도 쉽게 증착할 수 있다.

#### 4. PLD의 응용분야

현재까지 128가지의 물질들이 PLD를 이용하여 박막으로 증착되었으며(25) 그 종류및 응용분야는 다음과 같다.

아주 작은 자기를 측정할 수 있는 초전도 양자간첩계(SQUIDS)(26), filter, resonator 등 microwave 부품(27), 반도체 소자(28)에 사용되는 고온 및 저온초전도체 박막의 증착이 가능하다. 광도파관 광집적소자에 사용되는 유전체 박막( $LiNbO_3$ )의 증착이 가능하다. 메모리 또는 압전소자로 쓰이는 강유전체박막( $BaTiO_3$ , PZT)의 증착이 가능하다(29). Circulator, isolator 등 초고주파 부품에 사용되는 자성체박막( $Zn_xFe_{3-x}O_4$ )의 증착이 가능하다(30). 내마모성박막(diamond-like thin film)의 증착이 가능하다(31). 광학코팅에 사용되는 산화물박막( $MgO$ )의 증착이 가능하며 태양전지에 사용되는 반도체박막도 증착이 가능한 등 거의 모든 물질의 박막증착이 가능하다.

#### 5. 결론및 향후 연구방향

고온 초전도체 박막을 성공적으로 증착함으로써 각광을 받기 시작한 PLD는 고출력 레이저빛에 의해 발생된 비평형 상태의 플라즈마를 이용한 증착

방법이며 그렇기때문에 그 해석이 몹시 어렵다. 최근 5~6년 동안 그 응용에는 많은 발전이 있는데 비해 증착과정에 대한 정량적인 물리, 화학적 이해는 상대적으로 이루어지지 않았으므로 이것에 대한 연구가 필요하며 성공적인 연구를 위해서는 전공이 다른 여러 학자들의 협동연구가 바람직하다 하겠다.

PLD가 좀더 유용해지거나 양산에까지 사용되기 에 해결해야만 하는 문제점들은 다음과 같다. 첫째 600~800°C에 이르는 기판온도를 낮추어야 한다. 이 온도는 현재 반도체 공정에 사용되는 Si와 Al을 사용하기에는 너무 높은 온도이므로 이온화된 입자나 고에너지 전자의 도움을 얻는등 다양한 방법을 사용하면 가능성이 있을지도 모른다. 둘째 박막위에 형성되는 덩어리를 제거하여 다층박막형성이 신뢰성 높게 가능해지도록 해야한다. 이 문제는 타겟의 회전속도를 주의깊게 조절하거나 무겁고 속도가 느린 덩어리를 제거하는 방법을 사용하여 상당히 많은 진척을 이루었다. 셋째 현재 반도체 공정에 사용되고 있는 대면적 기판에 균일한 두께와 균일한 특성을 가진 박막을 증착하는 문제이다. 이 문제는 타겟을 넓은 면적의 기판위로 훑으며 지나가게 하면 쉽게 해결될 듯 보이지만 그럴 경우 균일성이 문제가 되며 또한 대면적을 조사할 경우 시간이 오래걸릴 것이라는 문제가 발생된다. 그러나 이 문제는 빛의 면적이 충분히 크고 초당 많은 펄스를 발생시킬 수 있는 고출력 레이저가 개발되면 해결될 수 있으리라 믿어진다. 이제 마지막으로 남은 질문은, 만일에 위에 열거한 모든 문제가 해결된다면, PLD가 기존의 증착방법을 대신하여 연구및 상업적 양산공정에 사용될 것인가 하는 질문이다. 그 대답은 다음과 같다. 현재 양산에 사용되고 있는 다른 증착방법이 충분히 개발되어져 왔고 또한 잘 작동되고 있기 때문에 PLD로 대체되어야할 필요성은 없다. 그러나 고온초전도체박막의 성공에서 알 수 있듯이 전혀 새로운 물질을 박막으로 증착할 경우 그 가능성을 가늠하는데 탁월한 영향을 미칠것이라 기대된다. 스퍼터링이나 MBE또는 CUD등에 의해 증착된 고온초전도체박막의 특성이 PLD에 의해 증착된 박막의 특성에 상응하기까지에 수 년의 기간이 필요했다는 사실이 PLD의 유용성을 말하여 주고 있으며 새로운 물질을 탐구하는 새 장을 여는

데에는 가장 훌륭한 증착방법임을 증명하고 있다. 이런 의미에서 PLD의 향후 연구과제는 무한하다 하겠다. 이런 이유때문에 일본 미국 독일등 선진국에서는 전기재료분야의 선두가 되기위해 PLD의 연구개발에 박차를 가하고 있으며 국내의 대학, 연구소에서도 연구를 계속하고 있다.

끝으로 더 넓고 자세한 자료가 필요하다면 MRS Bulletin(1992년 2월호) PLD특집을 참조하기 바라며 본 특집을 집필할 수 있는 기회를 주신 전기학회 관계자에게 감사사를 드린다.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] D. Dijkkanp, T. Venkafesan, X. D. Wu, S. A. Shaheen, N. Jisrawi, Appl. phys. Lett. 51(1987) p.619
- [ 2 ] H. M. Smith and A. F. Turner, Appl. Opt. 4(1965) p.147
- [ 3 ] N. P. Ong, J. K. Moyle, J. Bajaj, and J. T. Cheung, J. Vac. Sci. Technol. A5(1987) 3079.
- [ 4 ] H. S. Kim, Ph. D Dissertation, 1992
- [ 5 ] D. H. Blank, D. J. Adelehof, J. Floksfra and H. Rogalla, Physica C. 167, (1990) p. 423
- [ 6 ] G. Koren, A. Gupta, E. A. Giess, A. Segmüller, and R. B. Laibowitz, Appl. Phys. Lett. 54(1989) p.1054
- [ 7 ] B. Roas, L. Schultg and G. Endres, Appl. Phys. Lett. 53(1988) p.1557
- [ 8 ] D. B. Chrisey and A. Inam, MRS Bulletin, V17, No2, (1992) p.37
- [ 9 ] R. Singh and J. Narayam, Phys. Rev. B 41 (1990) p.8843
- [10] A. Inam, X. A. Wu, T. Venkafesan, S. B. Ogale, C. C. Chang and D. Dijkkanp, Appl. phys. Lett. 51(1987) p.112
- [11] L. Weidman and H. Helvajian, J. Appl. phys. 70(1991) p.233
- [12] K. L. Saenger, J. Appl. Phys. 66, (1989) 4435
- [13] J. P. Zheng, Q. Huang, T. Shaw, and H. S.

- Kwok, Appl. Phys. Lett. 54(1989) p.280
- [14] C. H. Chen, M. P. McCann, and R. C. Phillips, Appl. Phys. Lett. 53(1988) p.2701
- [15] D. B. Geohegan, and D. N. Mashburn, Appl. Phys. Lett. 55(1989) p. 2345
- [16] H. S. Kwok, D. T. Shaw, Q. Y. Ying, Z. P. Zheng, S. Witanachchi, E. Petrou, and H. S. Kim, Proc. SPIE 1187(1989) p.161.
- [17] N. H. Cheng, Q. Y. Ying, J. P. Sheng, and H. S. Kwok, J. Appl. Phys. 69(1991) p. 6349
- [18] C. E. Otis and R. W. Dreyfus, Phys. Rev. Lett. 67(1991), p.1654
- [19] C. E. Otis, A. Gupta, and B. Braren, Appl. Phys. Lett. 62(1993) p. 102
- [20] H. Izumi, K. Ohta, T. Sawada, T. Morishita, and S. Tanaka, Appl. Phys. Lett. 59(1991) p. 597.
- [21] C. H. Chen, T. M. Murphy, and R. C. Phillips, Appl. Phys. Lett. 57(1990) p.937.
- [22] R. A. Neifled. E. Ptenziani, W. R. Sinclair, W. T. Hill, B. Turner, and A. Pinkas, Appl. Phys. Lett. 59(1991) P.1107
- [23] S. H. Brongersman, J. C. S. Kools, T. S. Baller, H. C. Beijerinck, and j. Dieleman, Appl. Phys. Lett. 59(1991) p.1311
- [24] H. S. Kim and H. S. Kwok, Appl. Phys. Lett. 61(1992) p.2234
- [25] F. Beech and I. W. Boyd in Photochemical Processing of Electronic Materials, edited by I. W. Boyd and R. B. Jackman (Academic Press, New York, 1991) p.387 - 429
- [26] L. P. Lee, K. Lhar, M. S. Clclough, and G. Zaharchuk, Appl. Phys. Lett. 59(1991) 3051
- [27] H. S. Newman, D. B. Chrisey, J. S. Horwitz, B. D. Weaver, and M. E. Reeves, IEEE Trans, Magn. 27(2)(1991) p.2540
- [28] R. Simon, Physics Today 44(1991) p.64
- [29] M. G. Norton, C. Scarfone, J. Li, C. B. Carter, and J. W. Mayer, J. Mater. Res. 6 (1991) p.2022
- [30] C. A. Carosella, D. B. Chrisey P. Lubitg, J. S. Horwitz, P. Dorsey, R. Seed, and C. Vittoria, J. Appl. Phys. (submitted)
- [31] C. B. Collins, F. Davanloo, E. M. Jue-ngergerman, D. R. Jander, and J. J. Lee, Surf. Coat. Technol. 47(1991) p.244



**김호성(金鎬成)**

1957년 10월 11일생, 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 졸업(석사). 1983~1986년 금성전기기술연구소 연구원. 1992년 미국 뉴욕주립대(비팔로) 전기및 전산공학과 졸업(공학) 현재 중앙대 공대전기공학과 조교수.