

증착 조건이 KLN 박막의 형상에 미치는 영향

박성근 · 전병역* · 김진수* · 김지현** · 최병진*** · 남기홍**** · 류기홍***** · 김기완*****

현대전자산업 System IC SMS BU

*부산대학교 물리학과

**University of Texas

***경운대학교 정보통신공학과

****경일대학교 전자공학과

*****경북대학교 전자공학과

The Effect of Deposition Parameters on the Morphology of KLN Thin Films

Sung-Kun PARK, Byeong-Eok JUN*, Jin-Soo KIM*, Jee-Hyun Kim**,

Byung-Jin CHOI***, Ki-Hong NAM**** Ki-Hong RUE***** and Ki-Wan KIM*****

System IC BU, Hyundai Electronics Industries

*Department of Physics, Pusan National University

**Department of Electrical and computer Engineering, University of Texas

***Department of Information and Communication, Kyungwoon University

****Department of Electronic Engineering, Kyungil University, Taegu, Korea

*****Department of Electronic Engineering, Kyungpook National University

(2000년 9월 9일 받음, 2000년 11월 22일 최종수정본 받음)

초 특 본 실험에서는 Pt/Ti/SiO₂/Si(100) 기판 위에 KLN 박막을 형성할 때 나타나는 4-fold 그래인의 성장 특성을 조사하기 위하여 공정 변수를 변화시키면서 박막을 제작하였다. 공정 변수는 기판 온도, 스퍼터링 압력, 고주파 전력을 선택하여 최적의 증착 조건 근방에서 공정 변수를 변화시키면서 실험하였다. K와 Li가 과량된 타겟을 사용하여 KLN 박막을 제조할 때 최적의 성장 조건은 고주파 전력 100 W, 공정압력 150 mTorr, 기판온도 600°C이며 공정변수의 작은 변화에도 박막의 표면 형상은 매우 민감하게 변화하였다. KLN은 화합물을 구성하는 원소 사이의 증기화 온도의 차이가 많이나는 물질로서 고온 고진공의 환경에서 박막을 제조할 때 어려움이 있으며, 녹는점과 기판 온도와의 관계를 설명한 Thornton의 모델로 설명하기 어려운 현상이 나타났다. 이러한 것은 박막 물질을 이루는 구성 원소의 증기화 온도를 이용하여 이 현상을 간단하게 설명할 수 있었다.

Abstract The growth characteristics of 4-fold grain which was appeared in KLN deposition on Pt/Ti/SiO₂/Si(100) substrate was studied by varying process variables. Substrate temperature, sputtering pressure, rf power were selected as process variables, and experiment was carried out near optimum fabrication condition. When using K and Li enriched target, the optimum fabrication conditions were substrate temperature of 600°C, sputtering pressure of 150 mTorr, rf power of 100 W and its surface morphology is sensitively varied by small deposition condition changes. KLN is composed of elements which have large difference of boiling point. And it is difficult to fabricate thin film at high temperature and high vacuum deposition condition. Furthermore the phenomenon during deposition process can not be explained by using Thornton's model which explains the relation between thin film structure and melting point of thin film materials. These phenomenon can be explained using boiling point of elements which consist of thin film material.

Key words: Thin film, ferroelectric, K₃Li₂Nb₅O₁₅(KLN), Boiling Point, Tungsten-Bronze

1. 서 론

텅스텐 브론즈(tungsten-bronze) 형 강유전체는 복잡한 구조로 인하여 페로브스카이트(perovskite) 구조를 가지는 강유전체 보다 제조가 어렵지만 박막으로 제조할 때 페로브스카이트 구조의 물질과는 다른 특성을 나타내어 최근 박막화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻³⁾ 텅스텐 브론즈 형 강유전체 중에서도 KLN(potassium lithium niobate ; K₃Li₂Nb₅O₁₅)은 완전히 찬 구조를 가지며 큰 초

전, 압전 특성 이외에도 SHG(second harmonic generation) 특성 등 광학적으로도 우수한 특성을 가진다.⁴⁾ 하지만 단결정 성장중에 특정한 원소의 손실이 발생하여 성장된 단결정의 부위별로 조성이 달라지기 때문에 대구경의 단결정을 제조하기 어려운 상황이다.⁵⁾ 대면적의 KLN을 얻기 위한 방법으로 박막화에 관한 연구가 시작되었다.⁶⁾

KLN 박막의 연구는 EGM(epitaxial growth of melt), MOCVD(metalorganic chemical vapor epitaxy), rf-sputtering 등 여러 가지 방법으로 시도되어지고 있다.

KLN은 (111) 방향으로 배향된 Pt 기판 위에서 성장될 때 4-fold 그래인을 형성하는데 4-fold 그래인은 *c*-축으로 배향된 작은 단결정으로 구성되어 있다.⁷⁾ 격자 정합이 이루어지지 않은 기판에 수백 nm 크기의 단결정 그래인이 형성되는 것은 그리 흔하지 않은 결과이다. 하지만 이러한 단결정 그래인이 형성된 KLN 박막이라도 수백 nm 크기의 KLN 단결정들이 서로 독립적으로 존재하며 *a*-축으로는 무질서하게 배열되기 때문에 소자로의 적용은 어려운 실정이다. 만약 이것을 더욱 개선하여 4-fold 그래인이 넓은 면적에 걸쳐서 서로 이어져 완전한 단결정 박막을 형성한다면 박막 공정에 있어서 획기적인 발전이 이루어질 수 있을 것이다. 하지만 이러한 4-fold 그래인은 약간의 증착 조건 변화에도 형상이 크게 변화하여 제어가 어려운 단점이 있다.

본 실험에서는 증착 조건을 달리했을 때 박막의 표면 형상의 변화 및 이의 원인에 관하여 연구하였다. 넓은 증착 조건에서 유사한 결과가 나온다면 제조된 박막의 응용이 유리해진다. 하지만 증착 조건 변화에 따라 박막의 표면 형상이 크게 변화한다면 이 박막을 활용하기가 어려워진다. KLN은 공정 변수에 따라 박막의 특성이 크게 변화하여 증착 공정 변수가 박막의 특성에 미치는 영향을 연구하는 것은 매우 중요하다. 또한 뚜렷한 4-fold 그래인이 나타나는 경우 박막의 결정성은 4-fold 그래인의 유무 및 그 크기에 의존한다. 이와 같이 박막의 4-fold 그래인이 형성되는 경우 박막의 형상만으로 결정화도를 알 수 있기 때문에 일일이 XRD를 사용하지 않더라도 SEM 사진을 사용하여 박막의 결정성을 파악할 수 있었다. 증기화 온도를 이용하는 방법으로 박막 증착 범위를 설정하고, 최적의 증착 조건을 중심으로 기판 온도, 공정 압력, 고주파 전력을 변화시키면서 박막의 형상변화를 관찰하고 이의 원인을 분석하였다.

2. 실험 방법

일반적으로 박막을 형성하면서 공정 변수가 박막에 미치는 영향을 고려할 때 기판 온도와 박막 물질의 녹는점과의 관계를 고려한 Thornton에 의한 모델이 자주 사용된다.⁸⁾ 그러나 Thornton에 의한 모델은 금속에 대해서는 잘 적용되지만 증기화 온도가 낮은 원소를 포함하는 화합물에 적용하게 되면 특정 온도 이상에서 급격하게 박막의 형상이 달라지는 등의 문제가 발생하게 된다. 이러한 원인은 스퍼터링으로 박막을 제조할 때 박막은 원자 단위로 증착되며, 증착 직후 화합물로 결합되기 전까지 원자 단위로 존재하여 기판 온도 및 진공도에 따라 특정 원소의 재증발이 발생하기 때문이다. 그러므로 박막 물질을 구성하는 각 원자 단위의 증기화 온도를 고려할 필요가 있다. 특히 물질의 증기화 온도는 진공도에 따라서 변화하며 진공도가 증가할수록 물질의 증기화 온도는 낮아진다. 또한 박막은 고진공 영역에서 제작되며, 이때 박막 물질의 결정화를 위해서 기판온도를 가하는 방법으로 에너지를 공급하기 때문에 진공도에 따른 기판 온도 증가에 특별한 주의가 필요하게 된다. 본 실험에서는 KLN을 구성하고 있는 원소의 재증발을 고려하여 K와 Li가 과량된 타겟을 사용하였다. K의 증발점 이하로 기판

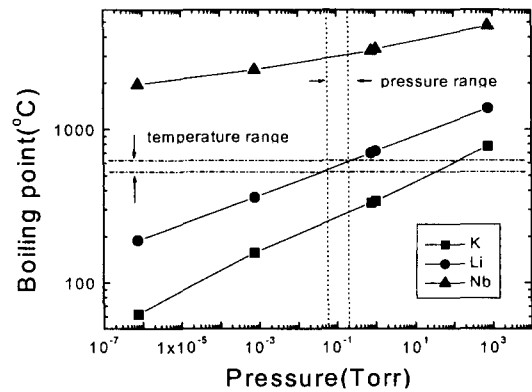


Fig. 1. Boiling temperature of element as a function of pressure.⁹⁾

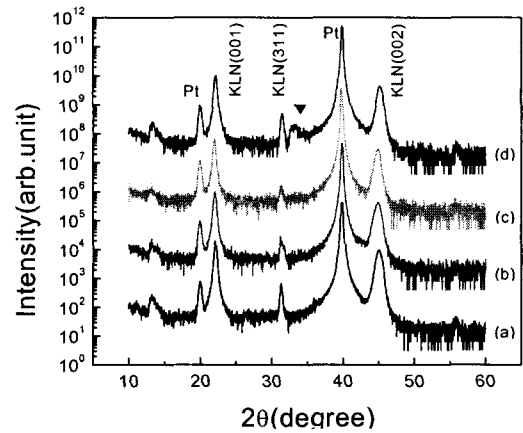


Fig. 2. XRD patterns of KLN thin films deposited at a sputtering pressure of 150 mTorr and 100 W of rf power. Substrate temperature of (a) 560°C, (b) 580°C, (c) 600°C, (d) 620°C.

온도를 낮춘다면 결정화가 불가능하기 때문에 K의 과량을 60%로 크게하여 예상되는 재증발을 보상하였다. 이러한 상황에서 Li이 기판 표면에서 재증발 하는지의 여부에 따라서 화합물로 결합하지 못한 K의 재증발이 영향을 받게 된다고 생각하여 Li의 증기화 온도 근방에서 실험하였다.

그림 1은 공정 변수의 변화에 따른 단위 원소의 증기화 온도를 나타낸 것이다.⁹⁾ 이 그림에서 가운데의 4각형 영역이 본 실험에서 사용한 기판 온도 범위와 공정 압력 범위를 나타내며 이 영역이 바로 KLN으로 결합하기 전에 Li이 재증발될 수 있는 경계 영역이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 기판 온도의 변화

그림 2는 기판 온도의 변화에 따른 KLN 박막의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 이때 박막의 두께는 (a), (b), (c), (d)의 순서대로 3500, 3200, 3000, 2900 Å였다. 이 그림은 Pt(111)의 피크가 너무 강하고 다른 피크들의 상대적인 세기 차이가 매우 크게 나타나므로 로그 단위로 나타내었다. 560에서 620°C까지의 모든 증착 온도에서 KLN 박막은 *c*-축 우선 배향되었음을 알 수 있다. 이러한 박막의 우선 배향성은 KLN 자체의 최소 표면 에너지면은 벽면면을 이루는 (001) 면이기 때문이며 1737 유리 기판에서 증착

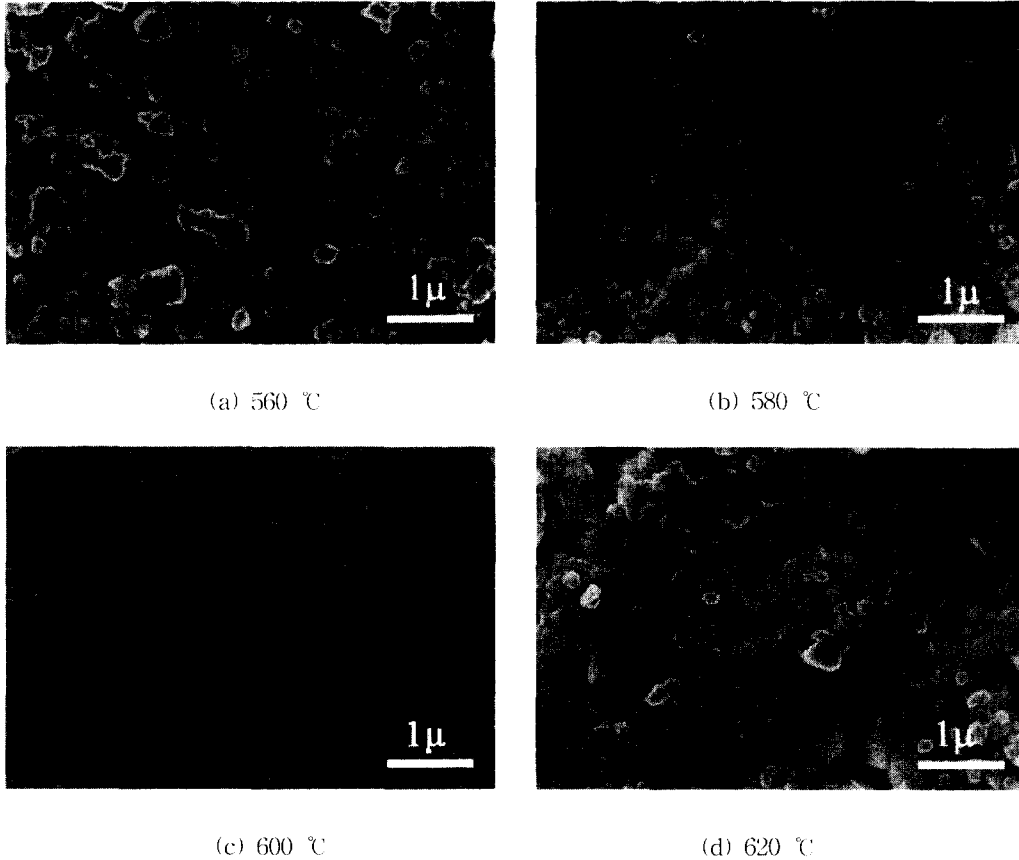


Fig. 3. SEM photography of (001) textured KLN films deposited at an rf power of 100 W, sputtering pressure of 150 mTorr. Substrate temperature of (a) 560 °C, (b) 580 °C, (c) 600 °C, (d) 620 °C.

한 것과 같은 (001) 방향 우선 배향성을 나타내었다.^{10,11)} 그러나 Pt 기판을 사용한 경우는 유리 기판을 사용할 때 나타나는 비정질에 의한 넓고 완만한 백그라운드 피크가 발생하지 않았으며, 모든 공정 조건에서 상대적인 피크의 크기는 작지만 뚜렷한 KLN (311) 피크가 발생하였다. 기판 온도가 620 °C로 높아지면 그림 2(d)에서 ▼로 표시된 피크와 같이 Si 기판에 의한 조화 피크(harmonics or ghost)로 생각되는 피크가 발생한다.

그림 3에 기판 온도를 560에서 620 °C로 변화시키면서 Pt/Ti/SiO₂/Si(100) 기판 위에 증착한 KLN 박막의 SEM 사진을 나타내었다. 기판 온도가 560 °C일 때는 박막은 거칠은 면을 나타내고 있으며 증착된 입자들의 크기가 다양하다. 그림 3(b)는 580 °C에서 증착한 박막의 SEM 사진이다. 사진의 좌측 상단 및 우측 상단 부분에 4-fold 그래인들이 관측되기 시작했으며 나머지 영역도 4각형의 모양을 형성하려는 경향을 나타내었다. 그림 3(c)는 완전한 4-fold 그래인을 형성하였으며 그래인들 사이의 경계가 뚜렷하고 그래인들 사이에 깊은 골(valley)이 파여 있었다.⁷⁾ 그림 3(d)는 620 °C에서 증착한 박막으로 기판온도를 너무 가한 탓으로 생각되는 듚성듬성한 공간이 발생하였다. 기판 온도가 560에서 600 °C까지 기판온도의 증가에 따라 그래인의 크기가 점점 더 커지고 경계가 뚜렷해지며 4각형으로 변화해 가는 것을 알 수 있다. 일반적으로 기판 온도를 증가시키면 박막 물질이 기판에서 움직일 수 있는 활성화 에

너지를 공급하여 더 치밀한 박막을 형성할 수 있다. 그러나 KLN의 경우는 온도가 지나치게 올라가서 박막 물질 중 휘발성이 강한 특정 원소가 기판 표면에서 다른 원소들과 결합하지 못하고 휘발하면 그 원소 성분 뿐 아니라 화합물을 형성하지 못한 다른 원소의 휘발을 유발시켜서 박막의 표면이 거칠어지고 빈자리가 생기는 것을 알 수 있다.

박막을 형성할 때 특정 원소가 휘발되는 현상은 PbTiO₃ 계열의 강유전체에서 많이 연구되었다.¹²⁾ KLN이나 PbTiO₃ 모두 박막을 형성할 때 기판의 표면에서 재증발이 발생하지만 KLN의 경우에 기판온도의 증가에 따라 빈틈이 생기는 것은 Li나 K의 휘발만의 영향은 아닌 것으로 판단된다. 1737 유리 기판 위에 증착한 KLN 박막의 SEM 사진에서는 기판 온도 증가에도 빈틈이 발생하지는 않았으나¹⁰⁾, Pt 기판을 사용한 경우는 기판 온도 증가에 따라 빈틈이 발생하였으므로 그래인 간의 빈틈은 기판 온도에만 의존하는 것은 아니며 본 실험에서는 2가지의 가능성을 고려하였다. 첫째, 에너지 측면에서 안정한 4-fold 결정립을 형성하는 과정 중에 그래인들의 밀도가 높아지면서 그래인들이 수축하는 현상이 발생하여 빈틈이 나타난다. 둘째, 높은 배향성으로 증착된 Pt(111) 박막이 KLN 박막의 핵 형성에너지를 낮추게 되고, 이로 인해 실제로 핵 형성 및 성장에 필요한 에너지보다 더 많이 공급되어 여분의 에너지가 박막 물질의 재증발을 발생시킨다. 이 두가지 설명 중에서 기판 온도가 560 °C에서 600 °C까지의 실험 결과는 첫번째

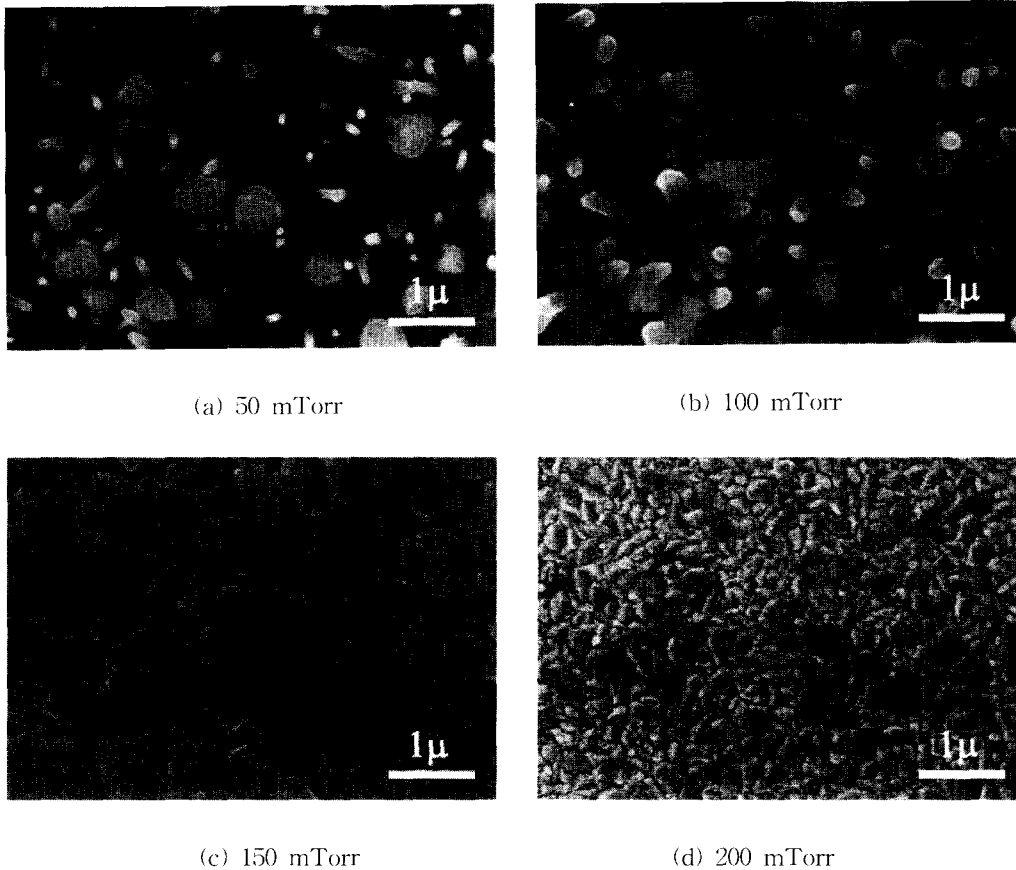


Fig. 4. SEM photography of (001) textured KLN films deposited at a substrate temperature of 600°C. Sputtering pressure of (a) 50 mTorr, (b) 100 mTorr, (c) 150 mTorr, (d) 200 mTorr.

의 설명이 가능하지만, 기판 온도가 620°C인 경우는 안정한 4-fold 그래인을 형성하면서 그래인 사이의 간격이 벌어진다기 보다는 녹아내린듯한 표면을 나타내며, 이러한 실험적 결과는 두번째 설명이 더 타당하다는 것을 나타낸다.

Park 등¹³⁾에 의하면 Li-Nb-K-O 타겟을 이용하여 스퍼터링 방법으로 박막을 제조할 때 박막은 LiNbO₃와 동일한 구조적, 전기적 특성을 나타내었으며, 이러한 이유는 고온, 고진공의 증착 조건에서 K가 기판 표면에서 재증발하였기 때문으로 설명하였다. 본 실험에서 사용하는 공정 조건은 Li의 휘발점 근방에 위치하여 Li이 휘발되지 않는 경우에도 일부분의 K은 휘발되고 나머지가 Li 및 Nb와 결합하게 된다. 만약 일부의 Li이 휘발하여 버린다면 증착 직후 휘발하지 않고 기판에서 움직이며 다른 원소와 결합하려고 하는 K마저 결합하려는 대상이 없어져서 같이 휘발해 버리는 결과를 초래하기 때문이다.

3-2. 스퍼터링 압력의 변화

다음은 기판 온도를 600°C로 고정하고 압력을 변화시키면서 박막을 증착시킬 때 증착 변수의 영향을 조사하였다. 스퍼터링 압력 변화에 따른 XRD는 앞에서 나타낸 것과 유사하며 특이한 변화를 나타내지 않았으므로 본 문헌에는 나타내지 않았다.

그림 4는 기판온도를 600°C로 고정하고 공정 압력을 50~200 mTorr로 변화시키면서 제조한 시료의 표면 SEM 사진을 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 박막은 모두 2시

간씩 증착한 것이며 박막의 두께는 (a), (b), (c), (d)의 순서대로 2300 Å, 2400 Å, 3000 Å, 2500 Å였다. 이 그림의 (a)는 50 mTorr에서 증착된 KLN 박막을 나타내며 박막의 표면에 작은 기둥 같은 그래인들이 솟아 있다. 그림 (b)는 증착 압력을 100 mTorr로 증가시킨 박막의 SEM 사진이며 앞의 사진에서 기둥 같이 솟아있는 그래인들의 두께가 두꺼워졌다. 그림 (c)는 150 mTorr에서 증착한 박막의 표면 SEM 사진으로 표면은 4각형의 작은 그래인들로 이루어져 있다. (d)는 200 mTorr에서 증착한 박막의 SEM 사진으로 그래인들은 150 mTorr에서 성장시킨 박막과 달리 일반적인 형태의 주름진 그래인을 나타내었다. 이러한 현상은 기판표면으로 도달하기 전에 너무 많은 스퀘터링(scattering)이 발생하며 이로 인하여 안정한 자리를 찾아가기 위해서 충분한 운동 에너지를 가지지 못하는 것으로 생각된다. 이와 같이 낮은 공정 압력에서는 얇은 기둥처럼 솟아나오던 그래인이 공정 압력이 증가하면서 굽어지다가, 150 mTorr의 공정 압력에서 4각형 모양의 그래인으로 성장하고 그 이상의 공정 압력에서는 다시 4-fold 그래인이 사라지는 경향을 나타내었다. KLN의 증착에는 K은 Li이 과량된 타겟을 사용하여 증착 과정 중에 발생하는 원소의 결핍을 보상하는데, 낮은 공정 압력에서는 보상되는 양보다 더 많은 양의 재증발이 발생하여 충분한 양의 박막 물질을 공급받지 못하기 때문에 그림 (a)의 얇은 기둥 같은 그래인이 발생하는 현상이 생긴다. 공정압력이 증가하면 기판

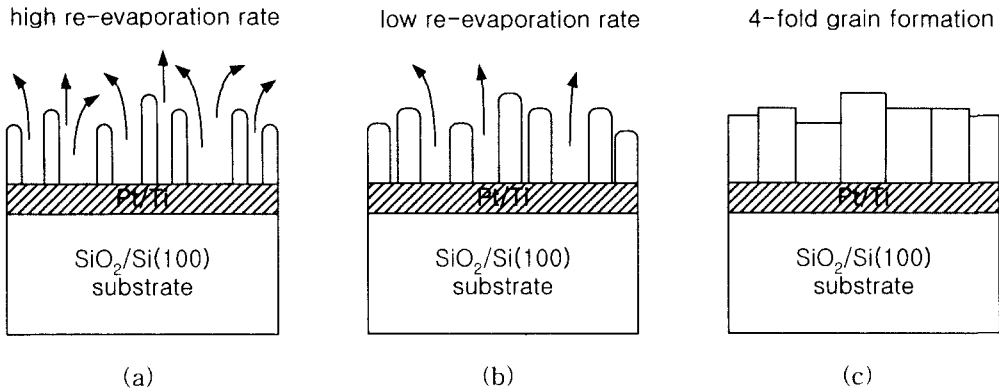


Fig. 5. Growth model of 4-fold grain with sputtering pressure.

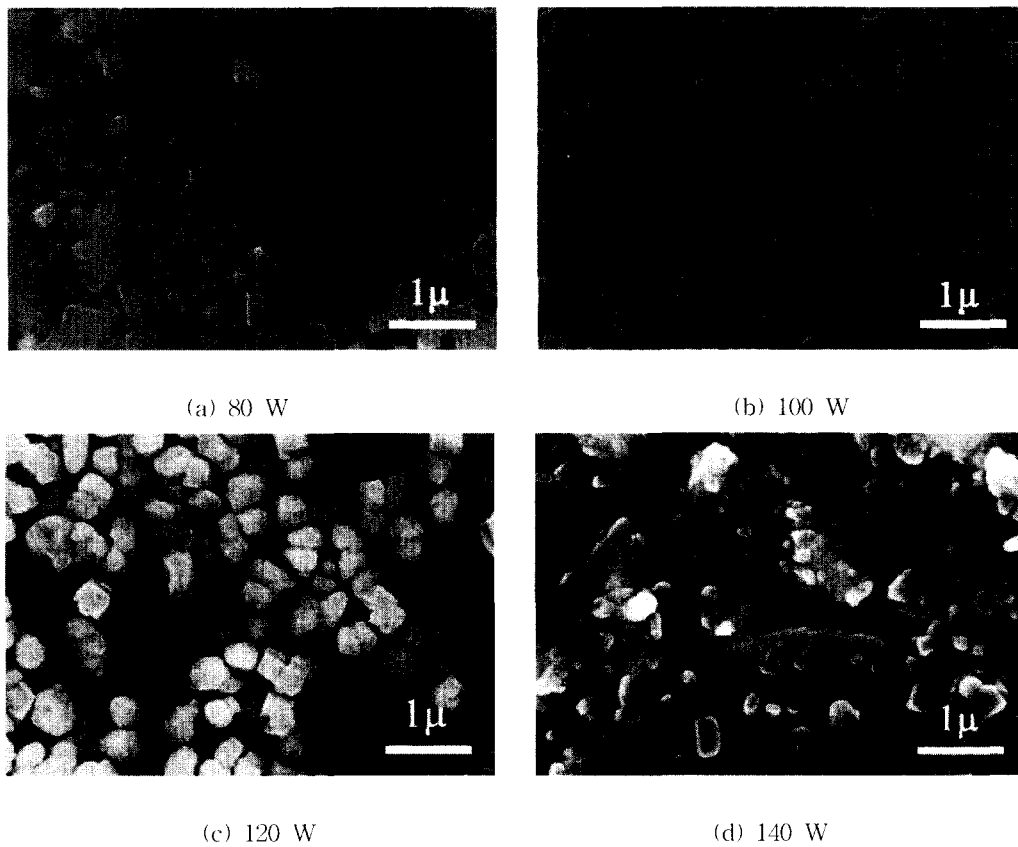


Fig. 6. SEM photography of (001) textured KLN films deposited at a substrate temperature of 600°C, sputtering pressure of 150 mTorr. rf power of (a) 80 W, (b) 100 W, (c) 120 W, (d) 140 W.

표면에서의 재증발이 억제되므로 재증발되는 양이 줄어들게 되어서 기둥이 굵어진다. 공정압력이 더 증가하여 충분한 양의 박막 물질을 공급받게 되면 기둥 모양의 그래인은 가장 안정한 형태인 4각형을 가진다.

그림 5에는 그림 4의 공정 압력에 따른 4-fold 그래인을 가진 박막의 형성 과정을 모델링하여 나타내었다. 이 그림에서 (a)는 그림 4의 (a)와 같이 공정 압력이 50 mTorr로 낮을 때 박막 증착 입자들의 재증발이 활발한 상태에서, 박막은 주상 구조라기보다는 얇은 기둥 형태로 성장되는 것을 나타낸다. (b)는 그림 4의 (b)의 경우로서 공정 압력이 100 mTorr로 높아져서 박막 입자의 재증발 비율이 더 낮아진 경우이다. 이때 마찬가지로 (c)는 그림 4의 (c)와 같

은 상황으로 공정 압력을 150 mTorr로 높여서 최적의 증착 조건을 만든 경우에 4-fold 그래인의 이상적인 성장 과정을 나타낸 것이다.

일반적으로 공정 압력이 어떤 한계 압력을 넘어서는 높은 압력이 되면 낮은 압력에서 보다 증착률이 감소하는데 이는 여러 가지 원인에 기인한다. 첫째, 높은 압력에서의 증착률 감소는 타겟에 가해지는 자기 바이어스(self-bias) 전압의 감소 때문에 Ar 이온이 타겟에 충분한 에너지를 공급하지 못하기 때문이고, 둘째, 입사한 Ar에 의해 스퍼터된 타겟 입자가 플라즈마 내의 다른 입자들과 산란하여 기판 표면에도달하지 못하기 때문이다. 하지만 본 실험에 의하면 K과 Li이 각각 60%, 30% 과량된 타겟으로 제작한 KLN 박막

은 150 mTorr라는 비교적 고압 영역에서 가장 높은 증착률을 나타내었다. 이것은 스퍼터링 압력 증가에 의하여 기판 표면에서의 재증발이 효과적으로 억제되기 때문이라고 생각한다. Pt 기판 위에서 측정된 증착율은 유리 기판 위에서 증착한 KLN 박막의 증착율과 유사한 수준이었다.

3-3. 고주파 전력의 변화

최적의 성장 특성을 나타낸 600°C 및 150 mTorr로 공정 변수를 고정하고 고주파 전력에 따른 KLN 박막의 성장 특성을 연구하였다. 고주파 전력의 변화는 박막에 입사되는 증착 입자의 운동에너지를 증가시키며 또한 박막의 증착 속도를 증가시키는 구실을 한다. 본 실험에서는 정확한 박막의 증착 속도를 알아볼 수 없었다. 일정 시간 동안 박막을 증착한 뒤 SEM 사진으로 박막의 두께를 관측하고 다시 증착한 시간으로 박막의 두께를 나누어 증착율을 조사하였다. 그러나 실제로는 박막의 증착 속도가 박막 성장 시간 또는 두께에 의존하는 특성을 나타내어 증착 시간을 변화시키면 증착율이 달라지게 되어 정확한 증착율을 조사할 수 없었다. 본 실험에서는 2시간동안 증착한 박막에 대한 증착율을 고려하였다.

그림 6은 고주파 80 W에서 140 W까지 고주파 전력을 변화시키면서 증착한 KLN 박막의 SEM 사진이다. 본 실험에 사용된 박막은 모두 2시간씩 증착한 것이며 박막의 두께는 (a), (b), (c), (d)의 순서대로 2800 Å, 3000 Å, 3500 Å, 4000 Å였다. 그림 6(a)에서 고주파 전력이 80 W일 때는 박막은 평탄하며 그레인의 경계가 뚜렷하지는 않으나 4각형의 그레인들이 녹아 내린 듯 겹쳐져 있음을 알 수 있다. 그림 6(b)는 100 W에서 증착된 박막으로 4-fold 그레인이 뚜렷하게 나타나 있다. 그림 (c)는 120 W로 증착한 박막으로 일부 4-fold 그레인이 나타나며 나머지는 뚜렷하지 않은 형태의 그레인으로 구성되어 있다. 20 W 차이의 작은 고주파 전력의 변화에도 박막의 표면 형상은 큰 변화를 나타내었는데, 이것은 고주파 전력의 증가에 따라서 박막의 증착률이 증가하며 이로 인하여 증착 입자들이 안정한 자리로 찾아갈 수 있는 충분한 시간을 가지지 못하여 4-fold 그레인의 성장이 제한을 받았기 때문이다. 그림 (d)는 고주파 전력이 140 W일 때로서 표면 형상은 4-fold 그레인을 나타내지 않았고 불규칙한 형상을 나타내었다. 고주파 전력이 80~120 W일 때는 4-fold 그레인이 관측되었고 전력을 140 W로 더 올리게 되면 거칠고 불규칙한 형상을 나타내었다.

4. 결 론

본 실험에서는 Pt/Ti/SiO₂/Si(100) 기판 위에 KLN 박막을 형성할 때 나타나는 4-fold 그레인의 성장 특성을 조사하기 위하여 공정 변수를 변화시키면서 박막을 제작하였다. 본 실험에서 선택한 공정 변수는 기판 온도, 스퍼터링 압력, 고주파 전력이다.

KLN 박막을 제조하기 위한 조건은 우선 K의 과포화 분위기 속에서 Li를 증착시켜야 한다는 것이다. 이러한 조건은 As의 과포화 분위기에서 Ga를 용융시켜 GaAs를 합성

하는 것과 유사한 맥락을 가지는데 KLN은 경우는 K가 60% 과량되고 Li가 30% 과량된 타겟을 사용하여 이러한 조건을 만족시켰다.

K가 60% 과량되고 Li가 30% 과량된 타겟을 사용하여 KLN 박막을 제조할 때 최적의 성장 조건은 고주파 전력 100 W, 공정 압력 150 mTorr, 기판 온도 600°C이며 공정 변수의 작은 변화에도 박막의 특성은 매우 민감하게 변화하였다.

KLN은 화합물을 구성하는 원소 간의 증기화 온도의 차이가 많이 나는 물질로서 고온 고진공의 환경에서 박막을 제조할 때 어려움이 있으며, 녹는점과 기판 온도와의 관계를 설명한 Thornton의 모델로 설명하기 어려운 현상이 나타났다. 이러한 것은 박막 물질을 이루는 구성 원소의 증기화 온도를 고려함으로써 현상을 간단하게 설명할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. T. Yogo, W. Sakamoto, T. Isaji, M. Ichida, A. Nakamura and S. Hirano, "Synthesis of oriented Ba₂NaNb₅O₁₅(BNN) thin films from an alkoxy-derived precursor", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. **82**, No. 10, pp. 2672-2676, 1999.
2. S. Ando, K. Konakahara, S. Okamura and T. Tsukamoto, "Growth of Ba₂NaNb₅O₁₅ thin films on MgO(100) by the PLD method", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **37**, pp. 5211-5214, 1998.
3. S.B. Desu, H.S. Cho and P.C. Joshi, "Highly oriented ferroelectric CaBi₂Nb₂O₉ thin films deposited on Si(100) by pulsed laser deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. **70**, No. 11, pp. 1393-1395, 1997.
4. Q. Jiang, T.P.J. Han, H.G. Gallagher, "Recent developments in the growth and characterization of potassium lithium niobate crystals for direct doubling of semiconductor laser", *Journal of materials science: Materials in electronics*, Vol. **9**, pp. 193-197, 1998.
5. T. Fukuda, "Growth and crystallographic characteristics of KLN single crystals", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **8**, pp. 122-123, 1969.
6. M. Adachi, A. Kawabata and F. Takeda, "Ferroelectric thin films of tungsten-bronzes", *Ceramic Transactions*, Vol. 25, *Ferroelectric Films*, edited by A.S. Bhalla and K.M. Nair, pp. 303-312, 1992.
7. Sung-Kun Park, Min-Soo Baek, Seung-Choon Bae, Sung-Yul Kwon, Jee-Hyun Kim, Ki-Wan Kim, "Growth of four-fold grained K₃Li₂Nb₅O₁₅ thin film using rf-magnetron sputtering", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **38**, No. 11, pp. 6483-6486, 1999.
8. Thin film processes, Ed. John L. Vossen, Werner Kern, Academic press, New York, pp. 105-107, 1978.

9. CRC Handbook of Chemistry and Physics, eds. R.C. Weast (CRC Press, Ohio, 1974) 55th ed. p. D-152-153, 162.
10. Sung-Kun Park, Seung-Choon Bae, Byung-Jin Choi, Ki-Hong Nam, Young-Jin Kim, Ki-Wan Kim, "Fabrication and annealing effect of c-axis orientated potassium lithium niobate thin film on glass substrate," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **39**, No. 3 pp. 1303-1308, 2000.
11. M. Adachi, A. Kawabata and F. Takeda, "Preperation of Tungsten-Bronze thin films", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **30**, No. 9B, pp. 2208-2211, 1991.
12. K. Komaki, T. Kamada, S. Hayashi, M. Kitagawa, R. Takayama and T. Hirano, "Preparation of Pyroelectric $Pb_{1-x}La_xTi_{1-x/4}O_3$ thin films from ceramic target by rf magnetron sputtering", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **33**, No. 3B, pp. L443-L446, 1994.
13. S.K. Park, M.S. Baek, S.C. Bae, S.Y. Kwun, K.T. Kim, K.W. Kim, "Propertied of $LiNbO_3$ thin film prepared from ceramic Li-Nb-K-O target", Solid State Communications, Vol. **111**, pp. 347-352, 1999.