

이온빔 보조 증착 Nb₂O₅ 박막의 광학적 특성

우석훈[†] · 남성림 · 정부영 · 황보창권

인하대학교 이과대학 물리학과

Ⓣ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

문일춘 · 강건모

삼성테크윈 (주)

Ⓣ 641-716 경상남도 창원시 성주동 42번지

(2001년 12월 27일 받음, 2002년 3월 28일 수정본 받음)

전자총을 사용하여 증착한 보통(conventional) Nb₂O₅ 박막과 Ar 이온빔 보조 증착(ion beam assisted deposition, IBAD)한 Nb₂O₅ 박막의 광학적, 물리적 특성을 조사하여 IBAD의 효과에 대해 연구하였다. IBAD Nb₂O₅ 박막과 보통 Nb₂O₅ 박막의 진공-공기 반사 스펙트럼과 박막 단면의 SEM 측정 결과, IBAD Nb₂O₅ 박막은 보통 박막에 비해 조밀한 박막으로 증착되었으며, 분광 광도계를 이용하여 포락선 방법으로 구한 IBAD Nb₂O₅ 박막의 평균 굴절률은 보통 Nb₂O₅ 박막 보다 증가하고, 소멸계수는 감소하였다. 이는 IBAD에 의한 이온빔 충격으로 Nb₂O₅ 박막의 미세구조가 변화하여 조밀도가 증가하였기 때문으로 판단된다. 주입 산소 양이 증가함에 따라 IBAD Nb₂O₅ 박막과 보통 Nb₂O₅ 박막의 평균 굴절률과 소멸계수는 모두 감소하는 경향을 보였으며, IBAD Nb₂O₅ 박막은 이온빔 전류 밀도가 증가함에 따라 평균 굴절률이 증가하였다. 보통 Nb₂O₅ 박막과 IBAD Nb₂O₅ 박막은 모두 불균일 굴절률을 나타냈으며, IBAD Nb₂O₅ 박막은 이온빔 전류 밀도가 증가할수록 굴절률의 불균일도는 증가하였다. 증착된 Nb₂O₅ 박막은 XRD 측정 결과 모두 비정질이었으며, IBAD에 의해 박막의 결정 구조는 변하지 않았다.

주제어 : Thin film.

I. 서 론

광학 박막은 광·전자 산업의 성장과 함께 레이저 반사경, 간섭 필터, 광학 기기, 의료 기기, 디스플레이 기기 등에 폭넓게 이용되고 있다. 보트나 전자총을 이용한 물리적 증기 증착법으로 증착된 박막은 증착 조건에 크게 영향을 받으며, 증착 입자의 에너지가 0.01~0.1 eV 정도로 매우 작기 때문에 기판 위에서 증착 입자의 이동도가 낮아 자유롭게 이동하지 못하고 빈 공간을 포함하는 다공성의 기둥 미세구조를 형성한다.^[1-3] 이러한 기둥 미세구조의 영향으로 덩어리 물질에 비해 박막의 조밀도는 낮아지게 되고 굴절률이 작아진다. 박막의 기둥 미세구조는 수분, 열 등에 의해 부착력을 감소시키고, 균열의 원인이 되어 외부 환경에 대한 내구성을 약화시켜 수명이 단축되는 결과 등을 초래한다. 따라서 온도, 수분 등의 환경 변화에 대한 광학적, 기계적 특성의 안정화와 내구성이 요구되고 있으며, 이와 같은 문제를 해결하기 위해 기판의 온도를 높이는 방법과 이온빔 보조 증착법(ion beam assisted deposition, IBAD) 등이 사용되고 있다.^[1-8]

조밀한 유전체 박막을 증착하기 위한 기판 온도는 증착 물질 용점의 약 1/3 이상이다.^[3] 하지만 광학 박막은 대부분 변형 온도가 낮은 광학 유리, 플라스틱 등을 기판으로 사용하기 때문에 기판을 높은 온도로 가열하는 것은 적당하지 못하다.

따라서 기판을 가열하지 않고도 높은 기판 온도 효과를 얻을 수 있는 IBAD가 연구되어 왔다.^[3-6] IBAD는 박막이 성장하는 동안 낮은 에너지의 증착 입자에 높은 에너지를 갖는 이온빔 충격을 줌으로써 입자의 이동도를 증가시켜 기둥 구조를 억제하고 기판과의 부착력을 강화시키기 위한 방법으로 사용되고 있으며, 굴절률의 증가, 응력의 조절, 구조 변화, 외부 환경에 대한 내구성 강화 등을 기대할 수 있다.^[1-8]

Nb₂O₅ 박막은 가시광선 영역과 근적외선 영역에서 고굴절률을 가지며, 저굴절률 물질인 SiO₂와 함께 다층 광학 박막에 주로 사용된다.^[10] 또한 전기색 변조(electrochromic material) 물질에 응용되며, 태양광 조절(solar control film) 박막, 산소 센서 등에도 응용된다.^[8-11] 이러한 Nb₂O₅ 박막은 전자총 또는 스퍼터링 등의 방법으로 증착이 가능하다.^[11] 본 연구에서는 전자총을 이용하여 증착한 보통 Nb₂O₅ 박막과 IBAD Nb₂O₅ 박막의 광학적, 물리적 특성을 비교하여 이온빔 보조 증착에 의한 효과를 조사하였다. 또한 이온빔 전류 밀도와 반응 산소의 양을 변화시키면서 증착 조건의 변화에 따른 IBAD Nb₂O₅ 박막의 광학적 특성을 조사하였다.

II. 실험

저진공용 회전 펌프와 고진공용 cryo 펌프로 구성된 그림 1과 같은 구조의 진공 챔버를 사용하여 박막을 증착하였다. 크기 3~12 mm, 순도 99.95%의 Nb₂O₅를 전자총으로 증착하였으

[†]E-mail: g2011538@inhavision.inha.ac.kr

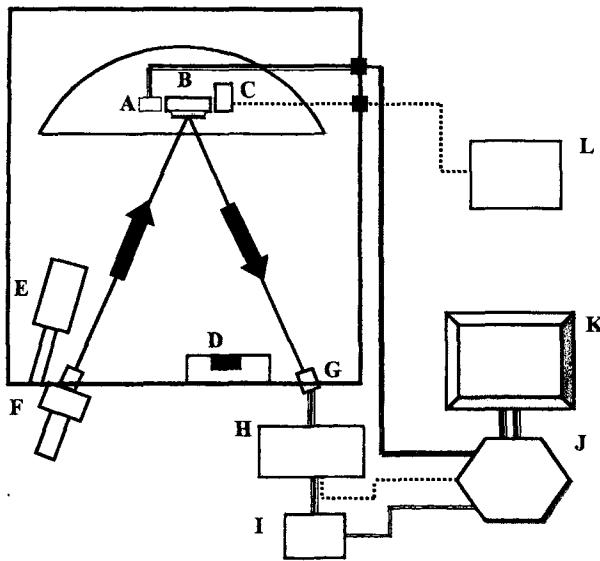


그림 1. 진공 증착기 내부 구성도.

A: crystal thickness monitor, B: optical thickness monitor, C: Faraday probe, D: e-beam gun, E: ion-beam gun, F: light source, G: lens, H: monochromator, I: detector, J: A/D converter, K: computer, L: electrometer.

며, 할로겐 램프를 이용하여 기판의 온도를 200°C로 유지하였다. 박막의 두께 및 증착률은 수정 진동자형 두께 측정기(quartz crystal thickness monitor)를 사용하여 측정하였다. 챔버 중앙에 설치된 시료에서 반사된 빔의 세기를 단색화장치(monochromator)를 사용하여 파장별로 측정할 수 있도록 그림 1과 같이 광학적 두께 측정기(optical thickness monitor)를 설치하였다. 수정 진동자의 두께와 증착률 그리고 광학적 두께는 LabVIEW 프로그램을 사용하여 실시간으로 측정할 수 있도록 구성하였다. 분위기 가스로는 산소를 주입하였으며, 질량 유량 조절기(mass flow controller)를 사용하여 조절하였다. 이온빔 보조 증착에는 이온빔의 조사 영역이 넓고, 조작이 용이한 직경 6 cm의 end-Hall 이온총을 사용하였다. 이온빔 생성에 사용된 가스는 Ar을 이용하였으며, 20 sccm을 일정하게 주입하였다. 각 박막의 증착 조건은 표 1과 표 2에 나타내었다.

표 1. 박막의 증착 조건

(a) 보통 Nb ₂ O ₅ 박막		(b) IBAD Nb ₂ O ₅ 박막	
Base vacuum	≤4.0×10 ⁻⁶ torr	Base vacuum	≤4.0×10 ⁻⁶ torr
Working pressure	3.0×10 ⁻⁵ torr	Working pressure	1.2~1.6×10 ⁻⁴ torr
Deposition rate	1 Å/s	Ion source	end-Hall Type
Substrate temperature	200°C	Ion current density	450 μA/cm ²
O ₂ flow	20 sccm	Anode voltage	80 V
		Deposition rate	1 Å/s
		Substrate temperature	200°C
		Bombarding ions	Ar
		Ar flow	20 sccm
		O ₂ flow	20 sccm

표 2. IBAD Nb₂O₅ 박막의 증착 조건

증착 조건	(a) 방법 I	(b) 방법 II
Base vacuum		≤4.0×10 ⁻⁶ torr
Ion source		end-Hall Type
Anode voltage		80 V
Deposition rate		1 Å/s
Substrate temperature		200°C
Bombarding ions		Ar
Ar flow		20 sccm
O ₂ flow	20~52.5 sccm	20 sccm
Ion current density	250 μA/cm ²	100~450 μA/cm ²

본 연구에서는 IBAD하지 않은 보통 Nb₂O₅ 박막과 IBAD Nb₂O₅ 박막을 증착, 비교하였다. 공기 중에 노출되었을 때 수분에 의한 영향을 조사하기 위해 진공-공기 중에서의 파장에 따른 반사 스펙트럼 변화를 관측하였다. 증착한 박막은 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 박막 단면을 조사하였다. IBAD 조건에 따른 박막의 광학적 특성을 조사하기 위하여 두 가지 방법으로 박막을 증착하였다. 방법 I은 이온빔 전류 밀도를 250 μA/cm²로 일정하게 하고, 주입 산소의 양을 20~52.5 sccm으로 변화시키는 방법이고, 방법 II는 산소의 주입을 20 sccm으로 일정하게 하고, 이온빔 전류 밀도를 100~450 μA/cm²로 변화시키며 증착하는 방법이다. 이때, 양극 전압은 모두 80 V로 일정하게 유지하였다. 기판으로는 BK-7 유리와 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 증착된 Nb₂O₅ 박막은 분광 광도계(Cary 500, Varian)를 사용하여 기판과 박막의 반사율 및 투과율을 측정하고, 포락선 방법을 이용하여 박막의 굴절률과 소멸계수를 결정하였다. BK-7 유리는 포락선 방법을 이용한 광학 상수 측정과 XRD를 이용한 박막의 결정성 분석에 사용하였으며, 실리콘 웨이퍼는 SEM 측정에 사용하였다.

III. 실험 결과 및 논의

3.1. 이온빔 보조의 효과

IBAD에 의한 광학적 특성 변화를 조사하기 위하여 표 1과 같은 방법으로 보통 Nb₂O₅ 박막과 IBAD Nb₂O₅ 박막을 증착하였다. 주입 산소의 양은 20 sccm으로 일정하게 하였으며, 증착률은 1 Å/s를 유지하였다. IBAD Nb₂O₅ 박막은 이온빔

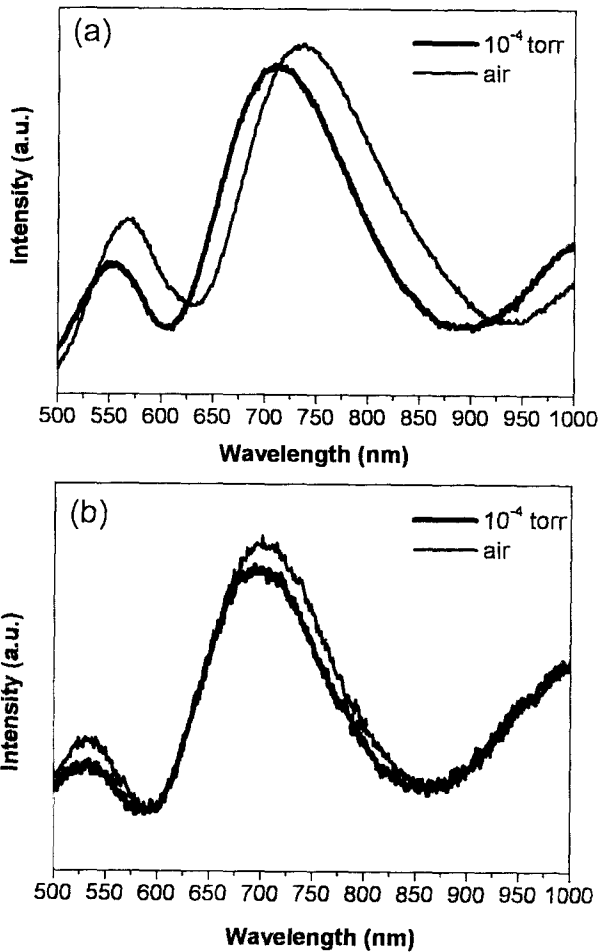


그림 2. 진공과 대기 중의 반사 스펙트럼 변화. (a) 보통 Nb₂O₅ 박막 (b) IBAD Nb₂O₅ 박막.

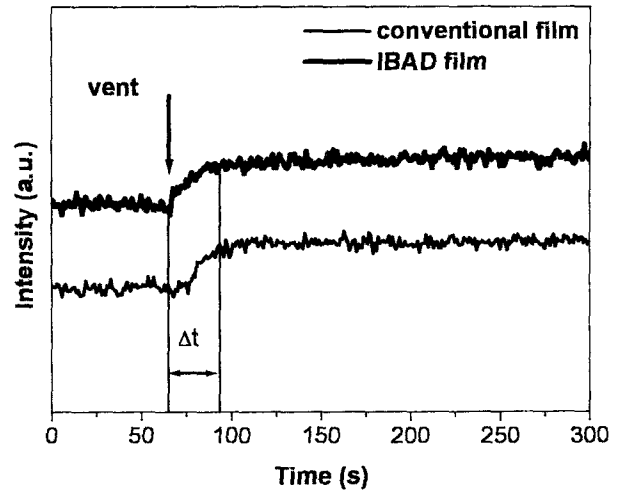


그림 3. Nb₂O₅ 박막의 대기 중 노출 시간에 따른 반사 스펙트럼의 변화.

때 반사 스펙트럼의 피크가 710 nm에서 738 nm로 28 nm 장파장으로 이동하였으며, IBAD Nb₂O₅ 박막의 경우 694 nm에서 701 nm로 7 nm 이동하여 보통 박막에 비해 파장의 이동이 작았다. 파장의 상대적 이동량을 $\Delta\lambda/\lambda_{vac}$ 으로 나타낼 경우, 보통 박막은 3.8% 이동하였으며, IBAD 박막은 1.0%의 작은 이동을 보였다. 보통 Nb₂O₅ 박막에 비해 상대 파장 이동량이 작은 것으로 보아 IBAD Nb₂O₅ 박막은 빈 공간이 적고 조밀한 박막이 증착되었음을 알 수 있다.

박막이 공기 중에 노출된 시간에 따른 750 nm에서의 반사 스펙트럼의 변화를 그림 3에 나타내었다. Nb₂O₅ 박막을 $\sim 10^{-4}$ torr에서 공기를 주입하는 동안 반사 스펙트럼은 보통 박막과 IBAD 박막 모두 공기 중에 노출된 후, 약 30초 정도의 시간 동안 가장 많은 변화를 가졌다. 이는 공기 중의 수분이 공기 중에 노출된 시간의 경과에 따라 모세관 현상에 의해 박막 속으로 스며들어가게 되며 유효 굴절률이 증가하게 되고, 반사율이 변화하는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 반사율의 변화가 일어나는 시간은 $\Delta t \approx 30$ 초 정도이며, 이때 가장 많은 굴절률의 변화를 가져오는 것을 알 수 있다.

증착률 1 Å/s로 일정하게 증착하였을 때 보통 Nb₂O₅ 박막과 IBAD Nb₂O₅ 박막의 증착 시간에 따른 박막의 광학적 두께를 그림 4(a)에 나타내었다. 증착률을 일정하게 유지하며 기준 파장 $\lambda = 700$ nm에서 광학적 두께 $5\lambda/4$ 가 되도록 증착하였을 때, IBAD 박막의 물리적 두께가 보통 박막의 물리적 두께 보다 작다는 것을 알 수 있으며, 이는 IBAD 박막의 굴절률이 보통 박막에 비해 크다는 것을 의미한다. 그림 4(b)는 IBAD Nb₂O₅ 박막과 기판 그리고 보통 Nb₂O₅ 박막의 투과율이다. $\lambda/4$ 광학적 두께의 흡수배 파장에서의 투과율은 IBAD Nb₂O₅ 박막의 경우 보통 박막의 투과율 보다 작다. 이 역시 IBAD 박막의 굴절률이 보통 박막의 굴절률보다 크다는 것을 보여준다.

포락선 방법으로부터 구한 IBAD Nb₂O₅ 박막과 보통 Nb₂O₅ 박막의 평균 굴절률과 소멸계수를 그림 5에 나타내었다. IBAD에 의해 Nb₂O₅ 박막의 평균 굴절률은 550 nm에서

전류 밀도 450 mA/cm², 양극 전압 80 V의 조건으로 하였으며, 이온빔 형성을 위해 Ar을 20 sccm 주입하였다. 보통 Nb₂O₅ 박막과 IBAD Nb₂O₅ 박막은 기준 파장 700 nm에서 광학적 두께 $5\lambda/4$ 로 일정하게 증착하였다.

일반적으로 열 증발 광학 박막의 경우 증착 입자의 이동도가 낮아 박막이 성장하면서 기둥이 형성되며 조밀하지 않은 박막으로 성장하게 된다.¹¹⁻¹³ 이러한 미세구조에 의해 흔히 나타나는 광학적 현상은 박막을 공기 중에 노출시켰을 때 스펙트럼이 장파장으로 이동하게 된다. 진공 중에서는 박막 내에 존재하는 빈 공간의 굴절률이 $n_{vac} = 1$ 이다. 그러나 공기 중에서는 수분이 모세관 현상에 의해 기둥을 따라 박막 속으로 스며들어가 빈 공간이 물로 차게 되면 $n_{water} = 1.33$ 이 되어 박막의 유효 굴절률이 증가하게 된다. 따라서 박막의 광학적 두께가 증가하게 되고 투과 파장이 장파장으로 이동하게 된다.¹¹⁻¹³ 반면 조밀한 박막이 증착되면 박막 내의 빈 공간이 줄어들어 수분에 의한 영향이 작으므로 공기 중에 노출되었을 때 투과 파장의 변화는 거의 없게 된다.

그림 1의 단색화 장치를 사용하여 측정된 Nb₂O₅ 박막의 진공-공기간 반사 스펙트럼을 그림 2에 나타내었다. 보통 Nb₂O₅ 박막의 경우 진공 상태($\sim 10^{-4}$ torr)에서 공기 중에 노출되었을

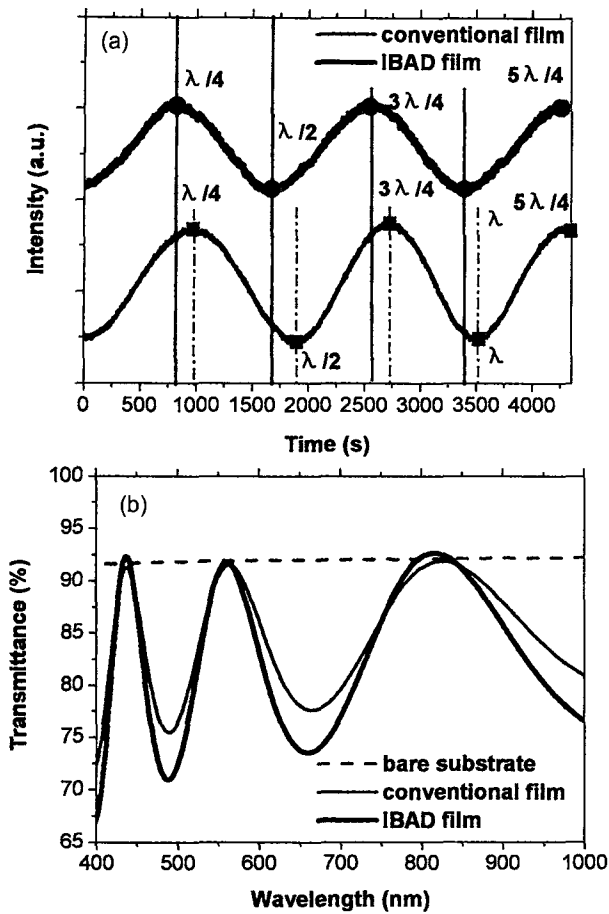


그림 4. IBAD Nb₂O₅ 박막과 보통 Nb₂O₅ 박막의 광학적 특성. (a) 기준 파장 700 nm에서의 증착 시간에 따른 광학적 두께(평균 증착률 1 Å/s), (b) IBAD Nb₂O₅ 박막과 보통 Nb₂O₅ 박막의 투과율.

2.30으로 보통 Nb₂O₅ 박막의 2.19보다 0.11 증가하였다. 이는 IBAD 박막이 $\lambda/4$ 광학적 두께의 홀수배 파장에서의 투과율이 보통 박막 보다 작으며, IBAD 박막의 진공-공기-공간 반사 스펙트럼의 상대 파장 이동량이 보통 박막 보다 작은 결과와 잘 일치한다. IBAD에 의해 Nb₂O₅ 박막의 굴절률이 증가한 것은 증착과정에서 이온빔 충격에 의해 입자의 이동도가 증가하여 기둥 구조를 억제하고 보통 박막에 비해 조밀하게 성장하였기 때문으로 판단된다. 박막의 총 광학적 두께(nd)가 $5\lambda/4$ 로 같으므로, IBAD 박막의 굴절률이 보통 박막 보다 크면, IBAD 박막의 물리적 두께는 보통 박막보다 작음을 알 수 있다. 포락선 방법으로 얻은 Nb₂O₅ 박막의 물리적 두께는 보통 박막은 505.5 nm였으며, IBAD 박막은 457.6 nm로 IBAD 박막의 물리적 두께가 보통 박막에 비해 47.9 nm 작아 굴절률 증가와 잘 일치하고 있다. 보통 Nb₂O₅ 박막과 IBAD Nb₂O₅ 박막의 소멸계수는 그림 5(b)에 나타내었다. IBAD Nb₂O₅ 박막의 소멸계수는 550 nm에서 3.0×10^{-4} 이며, 보통 박막은 4.2×10^{-3} 으로 IBAD Nb₂O₅ 박막의 소멸계수가 약 1/10 작다. 이러한 소멸계수의 감소는 이온빔 보조 증착시 산소의 화학적 반응이 촉진되어 산소 원소의 조성비가 증가하였기 때문으로

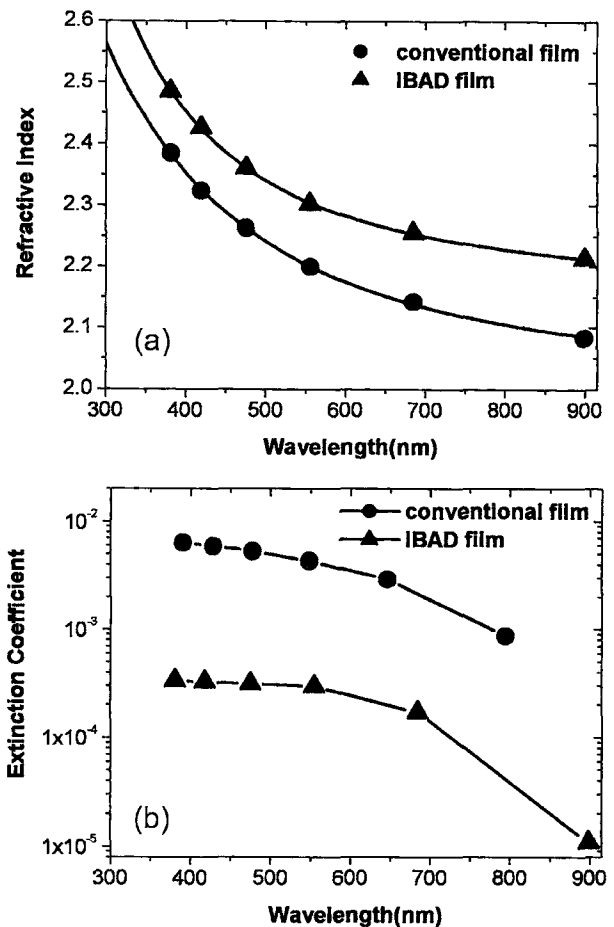


그림 5. IBAD Nb₂O₅ 박막과 보통 Nb₂O₅ 박막의 광학 상수. (a) 굴절률, (b) 소멸계수.

판단된다.

실리콘웨이퍼 위에 증착한 Nb₂O₅ 박막의 단면 사진을 그림 6에 나타내었다. 보통 Nb₂O₅ 박막 (a)는 기둥 구조의 형태를 가지며 빈 공간이 존재하는 것을 보여주는 반면, IBAD Nb₂O₅ 박막 (b)는 기둥 구조 없이 조밀함을 알 수 있다. 이는 IBAD Nb₂O₅ 박막이 조밀하게 증착되고, 보통 Nb₂O₅ 박막에 비해 굴절률이 증가한 결과와 일치한다. 증착 입자의 에너지가 전자빔 증착법 보다 높은 이온빔 스퍼터링(ion beam sputter deposition, IBSD)으로 증착한 Nb₂O₅ 박막은 633 nm에서 굴절률이 2.33이며, 소멸계수가 3.0×10^{-4} 으로 보고 되었다.^[10,11] 한편 본 연구의 IBAD Nb₂O₅ 박막은 550 nm에서 굴절률이 2.3이고 소멸계수가 3.0×10^{-4} 으로 IBSD Nb₂O₅ 박막의 광학 상수와 거의 유사하였다. 즉 전자총을 이용한 이온빔 보조 증착법으로 이온빔 스퍼터링과 같이 높은 에너지로 증착한 Nb₂O₅ 박막에 가까운 광학적 특성을 얻을 수 있었다.

3.2. 주입 산소량에 따른 광학 상수 변화

증착 조건에 따른 박막의 광학적 특성 변화를 조사하기 위하여 주입 산소의 양을 변화시키며 표 2의 조건으로 보통 박막과 IBAD 박막을 증착하였다.

그림 7(a)에는 주입 산소의 양을 20 sccm에서 36 sccm으로



그림 6. Nb₂O₅ 박막의 단면 SEM 사진. (a) 보통 Nb₂O₅ 박막 (b) IBAD Nb₂O₅ 박막.

증가시키면서 증착한 보통 Nb₂O₅ 박막의 광학 상수를 나타내었으며, 이 때의 압력은 $3.0\sim 5.2 \times 10^{-5}$ torr이었다. 그림 7(b)는 이온빔 전류 밀도 $250 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 양극 전압 80 V로 일정하게 하고, 주입 산소의 양을 20 sccm에서 52.5 sccm으로 증가시키면서 증착하였으며, 이 때의 압력은 $1.2\sim 1.6 \times 10^{-4}$ torr이었다. 보통 Nb₂O₅ 박막은 주입한 산소의 양이 증가함에 따라 550 nm에서 굴절률은 2.19에서 2.12로 감소하였으며, IBAD Nb₂O₅ 박막의 굴절률도 2.26에서 2.10으로 감소하였다. 한편 소멸계수는 주입 산소의 양이 증가함에 따라 550 nm에서 보통 박막은 4.2×10^{-3} 에서 3.0×10^{-3} 으로, IBAD Nb₂O₅ 박막은 8.2×10^{-4} 에서 3.9×10^{-4} 으로 모두 감소하였다. Lee 등¹¹⁾은 Al₂O₃, Nb₂O₅, SiO₂, Ta₂O₅, ZrO₂ 등의 산화 박막을 이온빔 스퍼터링 방법으로 증착 할 경우, 주입하는 산소의 양이 작을 때는 흡수가 큰 반면 산소의 양이 증가함에 따라 굴절률과 소멸계수가 작아지는 것을 보고하였는데, 본 실험의 결과도 그 경향과 일치한다. 이는 주입 산소의 양이 증가하면서 낮은 에너지의 증착 입자들이 기판으로 날아가는 도중 주입 가스와의 충돌에 의해 에너지를 잃고 조밀하지 않은 박막이 형성되어 굴절률이 낮아지는 것으로 판단된다.

3.3. 이온빔 전류 밀도의 변화에 의한 광학 상수 변화

방법 II에서는 산소와 Ar의 주입을 각각 20 sccm으로 일정하게 유지하며, 이온빔 전류 밀도를 $100\sim 450 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 변화시키며 증착하였다. 이때 양극 전압은 80 V로 일정하게 유지하였다. 이온빔 전류 밀도에 따른 박막의 광학 상수를 그림 8

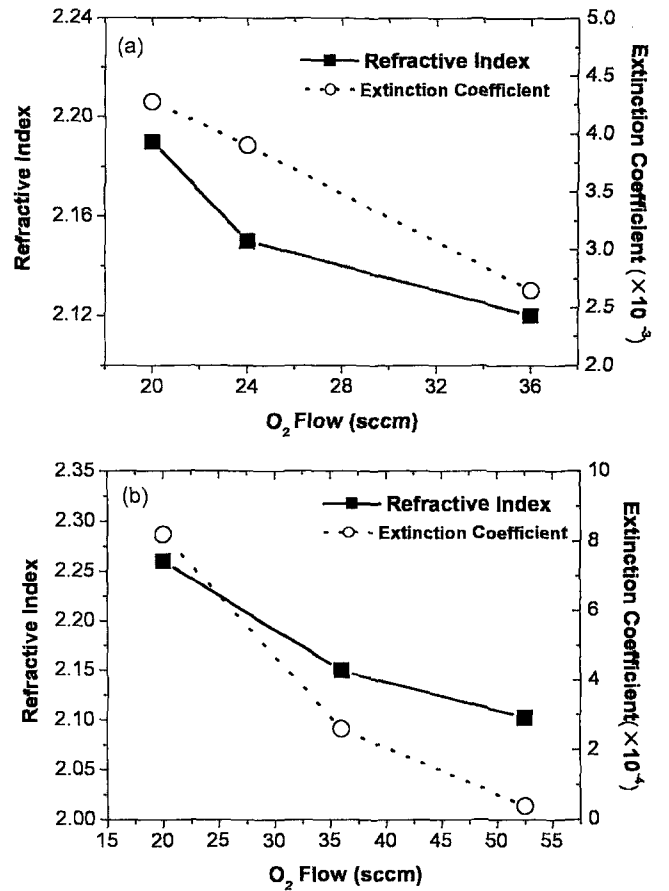


그림 7. 산소 주입량에 따른 550 nm에서의 박막의 광학 상수. (a) 보통 Nb₂O₅ 박막, (b) IBAD Nb₂O₅ 박막.

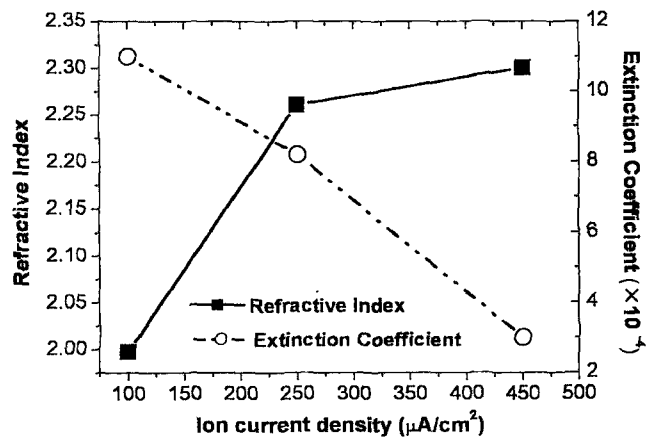


그림 8. 이온빔 전류 밀도에 따른 IBAD Nb₂O₅ 박막의 550 nm에서의 광학 상수.

에 나타내었다. 이온빔 전류 밀도가 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때 550 nm에서의 굴절률은 1.99이며, 이온빔 전류 밀도가 $450 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 증가하였을 때 굴절률은 2.30까지 증가하였다. 또한 550 nm에서의 소멸계수는 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 일 때 1.1×10^{-3} 이었으며, 이온빔 전류 밀도가 증가함에 따라 소멸계수는 3.0×10^{-4} 으로 감소하였다.

이온빔의 운동량 P 는 $P = \gamma\sqrt{2mW}$ 로 나타낼 수 있으며,^[1] 이때 W 는 이온 에너지이며 m 은 원자의 질량이다. 또한 γ 는 한 개의 원자와 충돌하는 이온의 수로 $\gamma = S_i/S_a$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 S_i 는 단위 면적당, 단위 시간당 이온의 수이며, S_a 는 단위 면적당, 단위 시간당 증착 물질의 수이다. S_i 는 이온빔 전류 밀도를 나타내며, S_a 는 증착률을 나타낸다. 따라서 이온 에너지 W 와 증착률 S_a 가 일정할 때 이온빔 전류 밀도 S_i 가 증가하게 되면, γ 가 증가하게 된다. 즉 한 개의 원자와 충돌하는 이온의 수가 증가하게 된다. 따라서 이온빔 전류 밀도가 증가함에 따라 충돌하는 이온의 수가 증가하게 되고, 이온빔의 충격에 의한 효과가 증대되어 더욱 조밀한 박막이 형성되고 굴절률이 증가하는 것으로 판단된다.

Song 등은 SiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 박막을 스퍼터링 방법으로 증착하고, 압력에 따라 박막의 광학 상수를 조사하였으며,^[12] 압력이 낮을 경우에는 굴절률이 높고, 압력이 높을수록 굴절률이 작아진다고 보고하였다. 본 실험에서 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 이온빔 전류 밀도일 때 박막의 굴절률이 보통 박막의 굴절을 보다 작다. 이온빔 보조 증착 하지 않았을 때에는 산소만이 주입되어 압력이 3.0×10^{-5} torr로 낮았는데 반하여, 이온빔 보조 증착 시에는 Ar과 산소가 함께 주입되어 압력이 $1.2 \sim 1.6 \times 10^{-4}$ torr로 높아지게 된다. 따라서 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 이온빔 전류 밀도에서 증착한 IBAD 박막의 경우 보통 박막에 비해 압력이 높고 굴절률이 낮으며, 이온빔 전류 밀도가 $450 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 증가함에 따라 충돌하는 이온의 수가 점차 증가하게 되고 이온빔의 충격에 의한 효과가 증대되어 다시 굴절률이 증가한 것으로 판단된다. 압력이 낮을 경우에는 굴절률이 높고, 압력이 높을수록 굴절률이 작아지는 현상은 공기 분자의 평균 자유 거리 l 이 압력에 따라 다르기 때문인 것으로 여겨지며, $l[\text{m}] \approx 5 \times 10^{-5}/P[\text{torr}]$ 로 주어지므로 이온빔 보조 증착 하지 않은 경우 평균 자유 거리는 약 1.6 m가 되며, IBAD에서는 약 0.4 m로 평균 자유 거리가 1/4로 감소하게 되어 증착되는 입자들이 보통 박막에 비해 가스와의 충돌이 많아지게 된다. 따라서 오히려 이온빔 보조 증착 하지 않았을 때 보다 증착 입자들이 주입된 가스와 충돌에 의해 운동량을 잃게 되어 증착 입자의 에너지와 이동도가 감소함으로써 조밀하지 않은 박막이 증착되고, 굴절률이 낮아지는 것으로 판단된다. 이와 유사한 결과로 Kennedy 등^[13]은 Ar을 사용하여 전자총으로 MgF_2 박막을 IBAD로 증착하였을 때, 보통 박막에 비해 IBAD 박막의 굴절률이 더 낮아짐을 보고하였다. Kennedy 등^[13]은 IBAD에 의한 굴절률의 변화를 이온빔의 분자당 평균 에너지(energy per molecule, EPM)의 함수로 나타내었으며, 굴절률이 낮아지는 효과를 임계 에너지의 존재로 설명하기도 하였다.

3.4 이온빔 전류 밀도와 불균일 굴절률

일반적으로 박막의 굴절률이 두께 증가 방향에 따라 불균일한 경우 $\lambda/2$ 파장에서의 투과율이 기판의 투과율과 차이가 생기게 된다.^[3] 그림 4(b)에서 IBAD Nb_2O_5 박막의 투과율은 $\lambda/2$ 파장의 정수배 파장에서 기판의 투과율보다 높고, 보통 Nb_2O_5 박막의 투과율은 기판의 투과율보다 약간 낮다. 따라서 불균일 굴절률 박막으로 증착되었음을 알 수 있다.

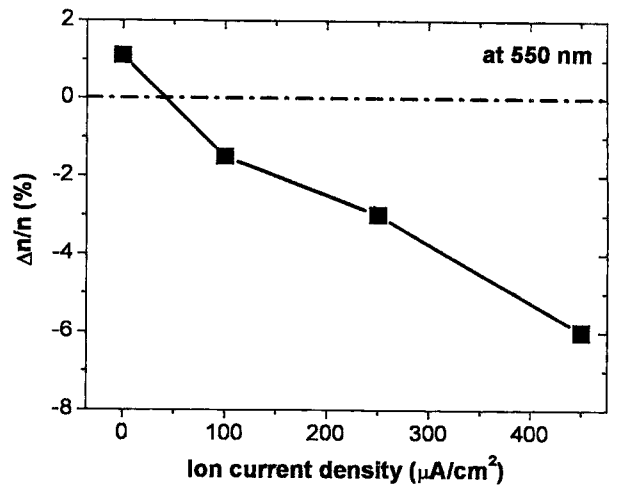


그림 9. 이온빔 전류 밀도에 따른 IBAD Nb_2O_5 박막의 불균일도.

불균일 굴절률을 가진 박막의 안쪽 굴절률을 n_{in} , 공기 쪽의 바깥 굴절률을 n_{out} 이라고 하면, 불균일 굴절률의 차(Δn)는 $\Delta n = n_{out} - n_{in}$ 로 정의할 수 있다.^[1,3,10] 이온빔 보조 증착 하지 않은 박막은 양($n_{out} > n_{in}$)의 불균일 굴절률 차를 보였으며, IBAD 박막은 모두 음($n_{out} < n_{in}$)의 불균일 굴절률차를 보였다. 보통 박막의 경우 기동 미세구조에 의해 박막의 바깥쪽은 수분이 침투하여 굴절률이 증가하고 굴절률이 증가하여 양의 값을 가지는 것으로 판단된다. 반면 IBAD 박막은 이온빔 충격에 의해 조밀한 구조를 가지기 때문에 수분에 의한 영향이 작은 것으로 판단된다. 박막의 불균일도를 $\Delta n/n$ 으로 나타낼 때,^[3,10] 이온빔 전류 밀도 변화에 따른 굴절률의 불균일도를 그림 9에 나타내었다. 보통 Nb_2O_5 박막의 불균일도는 1.1%인데 비해 이온빔 전류 밀도가 $450 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 경우 -6.0%로 이온빔 전류 밀도가 증가할수록 불균일도는 증가하였다. Kennedy 등^[13]은 YbF_3 박막을 Ar과 Xe를 사용하여 이온빔 보조 증착 하였을 때 불균일 굴절률을 나타냈으며, 박막 안쪽의 굴절률이 바깥쪽 보다 큰 음(-)의 불균일도가 나타남을 보고하였다. 이러한 불균일도는 EPM이 낮을 경우에 나타나며, EPM이 중간값을 가질 때 불균일도가 증가하여 가장 크며, EPM이 더 크게 되면 불균일도가 줄어든다고 보고하였다.^[13] 본 실험에서는 이온빔 전류 밀도가 증가함에 따라 불균일도가 증가한 것으로 보아 EPM이 낮은 영역과 중간 영역에 속하는 것으로 판단된다. Cho 등^[14]은 Kaufman 이온총을 사용하여 ZrO_2 박막을 이온 보조 증착법으로 증착하였을 때, 운동량이 0.6 MeV/c 보다 큰 경우 굴절률의 불균일도가 음(-)에서 양(+)으로 변화함을 보였으며, Lee 등^[10]은 IBSD Nb_2O_5 박막을 증착하였을 때 양의 불균일 굴절률을 가짐을 보고하였다. 또한 이러한 불균일도는 열처리를 통해 줄일 수 있음을 보였다. 따라서 굴절률의 불균일도를 제거하기 위해서는 증착 온도를 높이고, 양극 전압을 증가시켜 EPM을 크게 하면 이온빔 충격에 의해 증착 입자의 이동도가 증가하여 균일한 Nb_2O_5 박막을 증착할 수 있을 것으로 판단된다.

이온빔 충격에 의한 박막의 결정 구조를 조사하기 위한 XRD 측정 결과 보통 Nb_2O_5 박막과 IBAD Nb_2O_5 박막 모

두 비정질이었으며, 이온빔 충격이 결정 구조 변화에 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 전자총을 사용하여 보통 Nb₂O₅ 박막과 IBAD Nb₂O₅ 박막을 증착하였으며, Ar 이온빔 보조 증착은 end-Hall 형 이온총을 이용하였다. IBAD Nb₂O₅ 박막과 보통 Nb₂O₅ 박막의 광학 상수와 진공-공기간 반사 스펙트럼, 박막 단면의 SEM 측정 등으로부터 이온빔 보조 증착에 의한 박막의 내부 구조 변화와 광학 특성 변화를 조사하였다. 또한 이온빔 전류 밀도와 반응 산소의 양을 변화시키면서 증착 조건 변화에 따른 Nb₂O₅ 박막의 광학적 특성 변화를 연구하였다.

IBAD Nb₂O₅ 박막은 이온빔의 충격으로 진공-공기간 스펙트럼의 이동이 작으며, 보통 Nb₂O₅ 박막에 비해 조밀하며 굴절률이 큰 박막이 증착되었다. 이온빔 보조 증착 시 산소와의 반응이 촉진되어 IBAD Nb₂O₅ 박막은 보통 Nb₂O₅ 박막 보다 소멸계수가 작은 박막을 증착할 수 있었다. 증착 입자의 에너지가 높은 이온빔 스퍼터링 방법으로 증착한 Nb₂O₅ 박막이 633 nm에서 굴절률이 2.33이고 소멸계수가 3.0×10^{-4} 인 것과 비교하여 볼 때 IBAD Nb₂O₅ 박막은 550 nm에서 굴절률이 2.3이고 소멸계수가 3.0×10^{-4} 으로 거의 유사한 광학 상수를 나타냈다. 따라서 전자총을 이용한 이온빔 보조 증착법을 통해서 이온빔 스퍼터링과 같은 높은 에너지로 증착한 Nb₂O₅ 박막의 광학적 특성을 갖는 효과를 얻을 수 있었다. 보통 Nb₂O₅ 박막과 IBAD Nb₂O₅ 박막 모두 비정질로 이온빔 충격에 의해 결정 구조는 변화지 않았다. 이온빔 전류 밀도가 증가함에 따라 IBAD Nb₂O₅ 박막은 굴절률의 불균일도가 증가하였으며, 이러한 굴절률의 불균일도를 제거하기 위해서는 IBAD의 조건(양극 전압, 증착률, 증착 온도, 이온 생성 가스 등)을 더 변화시킬 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 인하대학교 교수연구진흥비(인하-20383) 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters*, 3rd Ed, (Institute

of Physics Publishing, Bristol, UK, 2001), pp. 410-478.

- [2] B. G. Bovard, "Ion-assisted deposition" in *Thin Films For Optical Systems*, F. R. Flory, Ed. (Marcel Dekker, 1995), pp. 117-132.
- [3] 황보창권, 박막광학(다성출판사, 2001), pp. 151-272.
- [4] 김형근, 반승일, 김석원, 한성홍, "이온 보조 증착에 의한 ZnS 광학 박막의 광학적, 구조적 특성과 환경적 안정성 개선에 관한 연구," 한국광학회지 제8권 1호, pp. 37-41, 1997.
- [5] 조현주, 이홍순, 황보창권, 이민희, 박대윤, "이온빔 보조 증착법에 의해 제작된 TiO₂ 박막의 광학적 특성," 한국광학회지 제5권 1호, pp. 9-17, 1994.
- [6] 이필주, 황보창권, "이온빔 보조 증착으로 제작한 저굴절률 SiO_xF_y 광학 박막의 특성 연구," 한국광학회지 제9권 3호, pp. 162-167, 1998.
- [7] 류태욱, 김동진, 김석원, 한성홍, "이온 보조 증착한 Ta₂O₅ 광학박막의 광학적 및 기계적 특성 분석," 한국광학회지 제 11권 3호, pp. 147-151, 2000.
- [8] F. Richter, H. Kupfer, P. Schlott, T. Gessner, and C. Kaufmann, "Optical properties and mechanical stress in SiO₂/Nb₂O₅ multilayers," *Thin Solid Films*, vol. 389, pp. 278-283, 2001.
- [9] M. G. Krishna and A. K. Bhattacharta, "Thickness and oxygen pressure dependent optical properties of niobium oxide thin films," *International J. Mod. Phys.*, vol. 13, no. 4, pp. 411-418, 1999.
- [10] C.-C. Lee, J.-C. Hsu, and D.-H. Wong, "Low loss niobium oxides film deposited by ion beam sputter deposition," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 32, pp. 327-337, 2000.
- [11] C.-C. Lee, J.-C. Hsu, and D.-H. Wong, "The characteristics of some metallic oxides prepared in high vacuum by ion beam sputtering," *Appl. Sur. Sci.*, vol. 171, pp. 151-156, 2001.
- [12] Y. Song, T. Sakurai, K. Maruta, A. Matusita, S. Matsu-moto, S. Saisho, and K. Kikuchi, "Optical and structural properties of dense SiO₂, Ta₂O₅ and Nb₂O₅ thin-films deposited by indirectly reactive sputtering technique," *Vacuum.*, vol. 59, pp. 755-763, 2000.
- [13] M. Kennedy, D. Ristau, and H. S. Niederwald, "Ion beam-assisted deposition of MgF₂ and YbF₃ films," *Thin Solid Films*, vol. 333, pp. 191-195, 1998.
- [14] H. J. Cho and C. K. Hwangbo, "Optical inhomogeneity and microstructure of ZrO₂ thin films prepared by ion-assisted deposition," *Appl. Opt.*, vol. 35, pp. 5545-5552, 1996.

Optical properties of Nb₂O₅ thin films prepared by ion beam assisted deposition

Seouk-Hoon Woo[†], Sung-Lim Nam, Boo Young Jung, and Chang Kwon Hwangbo

Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, KOREA

[†]*E-mail: g2011538@inhavision.inha.ac.kr*

Il-Choon Moon and Geon-Mo Kang

Samsung Techwin Co., Ltd. Kyungnam 641-716, KOREA

(Received December 27, 2001 ; revised manuscript received March 28, 2002)

We studied the optical and structural properties of conventional and ion-beam-assisted-deposition (IBAD) Nb₂O₅ films which were evaporated by an electron beam gun. The vacuum-to-air spectral shift and the cross sectional SEM images of the Nb₂O₅ films were investigated. The results show that the IBAD Nb₂O₅ films have a higher packing density than the conventional Nb₂O₅ films. The average refractive index of IBAD Nb₂O₅ films was increased, while the extinction coefficient was decreased compared with the conventional films. As the oxygen flow was increased, the average refractive index and extinction coefficient of the conventional and IBAD films decreased. Both the conventional and IBAD Nb₂O₅ films showed inhomogeneity in refractive index, and the degree of inhomogeneity of the IBAD Nb₂O₅ films became larger as the ion current density was increased. All Nb₂O₅ films were found to be amorphous by x-ray diffraction (XRD) analysis, and hence the crystal structure of Nb₂O₅ films was not changed by IBAD.

Classification code : OM.020.