

<연구논문>

TFT LCD 제조용 대면적 Magnetron Sputtering 장치 설계와 Al 성장막 특성 조사

유운중 · 현광수 · 이재선 · 최원성 · 민병희 · 연충규* · 표재확* · 황기웅*

한국베리안(주) 연구소, *서울대학교 전기공학과
(1993년 10월 22일 접수)

Design of a Large Magnetron Sputtering System for TFT LCD and Investigation of Sputtered Al Film Properties

W. J. Yoo, K. S. Hyun, J. S. Lee, W. S. Choi, B. H. Min,
C. K. Yon*, J. H. Pyo*, and K. W. Whang*

R & D Center, Varian Korea Ltd.

*Department of Electric, Seoul National University, Seoul

(Received October 22, 1993)

요 약 - TFT LCD(thin film transistor liquid crystal display) 금속화 박막제조를 위한 sputtering 장치 구성시에 대면적 기판에 박막의 균일도와 온도균일도, 진공용기내부에서의 sputtering 기체의 압력구배, 최저도달진공도, 기판 운송계의 이송의 안정성을 고려한다. 기판크기를 400×400 mm로 하여 sputtering source가 장착된 증착챔버, 기판을 증착전 RF 세척을 하고 온도를 200°C 이상 상승을 위한 히팅챔버, 기판을 운송하는 운송계, (un)load lock 챔버로 구성하였다. 히터를 설계·제조하여 유리기판 위에서 온도균일도를 측정된 결과 $250^\circ\text{C} \pm 5\%$ 이내였고, 증착챔버의 최저도달진공도는 cryo 펌프로 24시간 배기 후 1.8×10^{-7} torr였다. Sputtering source에 알루미늄 target를 장착시켜 알루미늄박막의 균일도, reflectivity, sheet resistance를 각각 측정하였다.

Abstract - Factors considered building the magnetron sputtering system for TFT LCD (thin film transistor liquid crystal display) metallization were thin film thickness uniformity, temperature uniformity and the pressure gradient of sputtering gas flow in vacuum chamber, base pressure, and the stability of the carrier moving. The system was consisted of a deposition chamber, a pre-heating chamber, a RF-precleaning chamber and a load/unload lock chamber. The system was designed to handle a substrate with dimension of 400×400 mm. The temperature uniformity of a heater table developed showed $250^\circ\text{C} \pm 5\%$ accuracy on the substrate glass. A base pressure of 1.8×10^{-7} torr was obtained after 24 hours pumping with a cryo pump. After an aluminum target was installed in a sputtering source and the film was deposited on the glass, the uniformity, reflectivity and sheet resistance of the deposited film were measured.

1. 서 론

최근 전자 관련산업이 급격히 발전함에 따라 정보화 매체인 FPD(flat panel display) 산업도 70년대 이후 활발하게 연구·개발되고 있다[1]. FPD 산업 중 LCD (liquid crystal display)는 박형·경량이 가능하고 저

가·저소비전력구동으로 반도체의 집적회로기술과 연계성이 있어 그 용도가 크게 확대되고 있다.

LCD 구동방식은 단순매트릭스(passive matrix)와 액티브 매트릭스(active matrix)로 분류되며[2, 3], 이 중 액티브 매트릭스는 액정 디바이스(device)의 각 화소(pixel)에 switch element가 장착되어 액정을 구

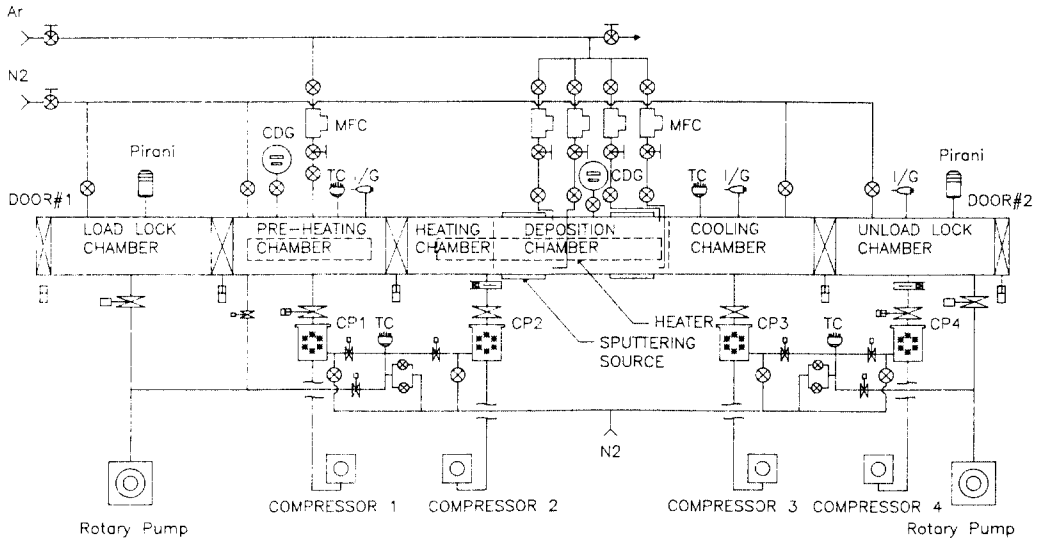


Fig. 1. Schematic diagram of a large magnetron sputtering system for TFT LCD metallization.

동하고 표시기능을 향상시키며, 그 종류로는 박막다이오드, 박막트랜지스터가 있다. 특히 TFT(thin film transistor) 액티브 매트릭스는 구동회로가 동일기판에 일체화시킬 수 있게 되어 박형·경량화가 이룰 수 있고 향후 CRT(cathod ray tube) 대체화가 가능하다 [3].

TFT-LCD 제조를 위해 여러 공정단계가 있으며 이중 gate, source, drain의 금속전극을 성장시키기 위해 사용되는 장치로 sputtering 장치를 사용한다.

Sputtering 장치는 크게 다이오드(diode) sputtering 방법과 magnetron sputtering 방법이 있으며[4, 5], 이중 magnetron sputtering를 많이 사용하는데 이는 높은 증착율과 여러종류의 재료를 증착가능하고, 낮은 압력에서도 증착시킬 수 있어 박막의 quality가 향상되고, step coverage가 우수하기 때문에 양산용 장비에 널리 적용하고 있다. TFT-LCD의 금속화(metallization) 박막 제조용 sputtering 장치는 반도체 공정과 달리 현재까지 기판크기가 표준화가 되어 있지 않아 관련장치도 규격화가 되어 있지 않다.

본 연구에서는 기판 크기를 LCD 제조에 범용으로 적용할 수 있도록 400×400 mm로 하여 TFT LCD의 금속막 성장을 위한 DC(direct current) 마크네트론 sputtering 장치를 구성하였으며, 구성된 sputtering 장치를 이용 유리기판에 알루미늄을 증착시켜 성장

막의 균일도, reflectivity, sheet resistance를 측정하였다.

2. 대면적 Sputtering 장치 구성

TFT LCD 제조를 위한 대면적 sputtering 장치는 Fig. 1에서와 같이 금속막을 성장시킬 박막성장 챔버, 성장시킬 재료인 target를 장착 DC 전압을 인가시켜 target 재료의 원자들을 방출시키는 sputtering source, 성장시킬 박막의 접착성(adhesion)과 surface mobility를 향상시키기 위한 히터로 구성하며, 그밖에 성장시킬 유리기판을 장착하고 이송시킬 운송계(carrier system), 박막성장 챔버에 vent에 의한 contamination free와 throughput 향상을 위한 (un)load 챔버, sputtering 기체를 조절하는 주입기체 조절기 및 시스템제어 장치로 구성되어 있다.

2.1. 박막성장 챔버

박막성장 챔버의 요구하는 최저도달진공도를 얻기 위해서는 진공상태에서의 기체흐름의 양인 유량(throughput) 관계식에서 나타내며, 이때 유량 Q 는

$$Q = SP - \left[\frac{d(-PV)}{dt} + Qi \right] = 0 \quad (1)$$

이다. 여기서 S 는 구성펌프의 배기속도, P 는 진공도, V 는 진공용기의 체적, SP 는 펌프에 의한 배기량, $\frac{d(-PV)}{dt}$ 는 박막성장 챔버의 잔류기체량, Q_i 는 방출기체량을 의미한다. 식 (1)에서 $Q_i=0$ 인 경우는 주로 저진공(10^{-3} torr 이상 압력) 이하의 진공도를 얻을 때 고려하는 factor들로 여러 문헌에 잘 기술하였다[6-8]. $Q_i \neq 0$ 인 경우 즉 방출기체량을 고려한 경우로 고진공 이상의 진공을 얻을 때 고려하는 factor로 이를 정량적으로 기술하기 어려우나, 실험치를 이용하여 근사적으로 박막성장 챔버를 구성 후 요구하는 진공도를 얻기 위한 펌프의 용량을 계산할 수 있다. 상기 식 (1)에서 $t=\infty$ 일 때, 즉 장시간 배기할 때 S 은

$$S = \frac{Q_i}{Pu} \quad (2)$$

이다. 여기서 Pu 는 장시간(실험적으로 12시간 이상) 배기할 경우 박막성장 챔버의 요구하는 최저도달진공도(base pressure), Q_i 는 고진공 이하의 압력을 얻을 때 고려하는 factor들로, 구성하는 박막성장 챔버재질의 단위면적당 방출기체량(outgassing)인 실험결과치 [9]를 적용하여 산출할 수 있다. 이때 방출기체량은 펌프의 배기시간에 따라 나타나 있다. 본 연구에서는 챔버재질이 stainless steel, 알루미늄, viton O-ring를 구성하며, 이들의 단면적은 각각 98115, 20433, 3364 cm^2 이고, 박막증착챔버의 요구하는 최저도달진공도가 5×10^{-7} torr일 때 식 (2)에서 5시간 배기시의 단위면적당 방출기체량을 기준으로 하여 계산하면 펌프의 배기속도는 6083 l/sec이다. 따라서 본 연구에서는 질소기체에 대하여 3000 l/sec인 cryo 펌프를 2개를 장착하였으며 그 결과 5시간 배기시 8.5×10^{-7} torr이고, 24시간 배기 후 최저도달진공도는 1.8×10^{-7} torr였다. 이때 진공도 측정은 B-A ion gauge(Varian, 563)를 이용하였다.

2.2. Sputtering Source 구성

스퍼터링 장치에서 중요한 부분인 sputtering source는 박막성장에 결정적인 역할을 하며, 본 연구에서는 기관의 크기가 직각 형태이므로 직각 마그네트론 sputtering source를 사용하였다. 일반적으로 마그네트론 sputtering source는 Fig. 2와 같이 target, 전력공급부, 자기장발생부, backing plate, cooling line,

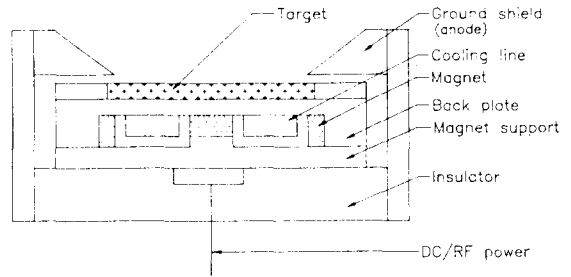


Fig. 2. Schematic diagram of the sputtering source.

ground shield와 절연부로 구성되어 있다.

진공 중의 플라즈마 상태에서 구성하는 하전입자인 전자와 이온의 전류밀도는 질량(m)^{1/2}에 비례하고, $m_e \ll m_i$ 이므로 진공 중의 플라즈마 상태에서의 외부장(external field)에 의한 최초 운동원은 전자임을 알 수 있다. 이때 sputtering source에서 전자의 운동궤도 χ'' 는

$$\chi'' = q/m(1E + 1V \times 1B) \quad (3)$$

이다[10]. 여기서 $1E$ 는 전기장, $1B$ 는 자기장이며, 전자의 운동은 전기장과 자기장에 의존함을 알 수 있다. 마그네트론 sputtering source에서 전기장은 플라즈마와 target 사이 electric sheath에 의해 형성되고 자기장은 target 뒷면에 설치된 영구자석이나 전자석에 의해 발생된다. 전기장과 자기장에 의해 전자를 $1E \times 1B$ 의 방향으로 폐회로가 형성하며, helical 운동을 함으로써 전자의 운동길이 즉 평균자유행로(mean free path)가 길어져 전자와 sputtering 기체와 충돌할 확률이 커지므로 sputtering시 낮은 압력, 낮은 전압에서도 방전이 형성한다.

또한 마그네트론 sputtering source 구성에서 자석은 최소한 dipole 이상의 pole이 형성되며 dipole인 경우 자기장은 r^3 에 반비례함을 알 수 있다[11]. Sputtering source에서 이를 고려해야 하며 target 표면에서 강한 자기장을 형성하기 위해서는 pole과 pole 사이 간격을 적게 해야한다. 일반적으로 sputtering source의 자기장은 영구자석을 사용시 target 표면에서 200에서 700 gauss이며[10], 자석재료에 따라 target 두께와 backing plate의 두께에 따라 다르다. 본 연구에서는 target 표면에서 중앙부위는 500 gauss, 가장자리 부위는 200 gauss인 source를 구성하였다. Target과 ground shield와의 간격은 ground shield

(anode)에서 스퍼터링이 일어나지 않기 위해서 dark space thickness 이내이어야 한다. 여러 실험에 의하면 진공도 10 mtorr에서 dark space thickness는 1 cm 정도이다[12]. Backing plate는 자성체가 아니어야 하고, cooling 효과를 고려하여 열전도도가 좋아야 하고 대기압 및 수압과 진공에 의한 압력차(3기압 이상)에 극복할 수 있는 두께이어야 한다. 일반적으로 backing plate로 copper나 stainless steel를 사용하나, 본 연구에서는 copper를 사용하였다. 냉각수공급은 공급되는 전력에 따라 다르며, 이때 공급전력에 따라 발생하는 열량을 계산하면 1 kwatt에 1 liter의 냉각수를 공급하면 된다. 이때 냉각수의 온도는 25°C 하였으며, 냉각수압도 5기압이 되도록 하였다. 본 연구에서는 상기 factor들을 고려하여 5×25인치의 sputtering source를 구성하였으며 공급되는 전원은 DC 10 kW power supply를 사용하였다.

2.3. 히터 구성

LCD 제조용 sputtering 장치의 박막성장 공정에서 중요한 변수가 기판온도(substrate temperature)이다. 기판의 온도는 박막의 결정성, 전기적, 광학적 성질에 영향을 미치며, 히터구성을 위해서는 피가열물체인 기판과 기판 holder의 형태와 재질, 히터와 기판 사이의 분위기에 따라 히터의 형태와 용량이 결정된다. TFT LCD에서는 기판 크기가 대면적이므로 온도균일도가 크게 고려되며 유리기판을 사용하므로 유리 표면에서 300°C 이상 상승이 불가능하다 본 연구에서는 기판 holder가 6 mm이고, 기판과 열원 사이 간격을 20 mm로 하고, 기판의 온도가 상온에서 200°C 이상 도달하기 위한 히터의 구성은 다음 관계식들에서 유도한다[13]. 임의의 물체에 온도를 상승시키는데 필요한 흡수에너지 즉 열 Q 는

$$Q = \frac{W \cdot C_p \cdot \Delta T}{3.412} \quad (4)$$

이다. 여기서 W 는 피가열물체인 유리기판과 기판 holder의 무게, C_p 는 피가열물체인 유리와 기판 holder의 비열, ΔT 는 유리기판의 상승온도이다. 한편 열전달 방법에는 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)가 있으며, 진공상태에서의 열전달은 주로 복사이다. 본 연구에 적용가능한 무한 평면에서의 복

사 열전달은 Stefan boltzman 방정식에서

$$P = \frac{P_R(\text{Watts})}{A(\text{in}^2)} = \frac{S(T_1^4 - T_2^4) \left(\frac{1}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} \right)}{(144 \text{ in}^2/\text{ft}^2)(3.142 \text{ BTU/Watt} \cdot \text{hr})} \quad (5)$$

이다. 여기서 S 는 Stefan boltzman 상수로 $0.1714 \times 10^{-8}(\text{BTU/hr. Sp. Ft. R}^4)$ 이고, T_1 은 열원인 히터의 온도, T_2 는 피가열 물체인 유리기판의 온도로, T_1 과 T_2 는 Rankine 온도($^{\circ}\text{F} + 460$)로 표시한다, e_1 는 열원의 emissivity, e_2 는 피가열물체의 emissivity, F 는 shape factor로 열원과 피가열물체 사이의 공간구조에 의존하는 상수이다[13]. 또한 열원의 열 방출시간 t 는

$$t = \frac{Q}{P} \quad (6)$$

이다. 상기식 (4)~(6)에서 피가열물체인 유리기판의 요구온도 T_2 에 따른 열원 즉 히터의 온도 T_1 를 산출할 수 있으며 본 연구에서 T_2 은 20분 동안 상온에서 200°C 이상 상승하는 것으로 하였으며 계산결과 히터의 표면온도는 373°C가 되어야 한다. 상기 계산결과를 고찰할 때 throughput은 기판의 온도상승 시간에 크게 의존함을 알 수 있으며, 차후 양산용 장비에 적용할 경우에는 온도상승 시간을 충분히 단축하도록 load lock 챔버에 lamp 히터 등을 장착해야 한다. 상기 계산결과를 적용하여 ceramic molding 히터를 설계·제작하여 유리기판 위에서의 시간에 따라 온도상승도를 측정하였다. 그 결과 히터의 표면온도가 357°C일 때 피가열물체 이송 후 20분 경과시 165°C, 41분 후에는 200°C, 1시간 후에는 231°C였다. 이론적 계산결과와 실험치와 차이가 나는 것을 분석해 보면 첫째 사용된 thermocouple이 피가열물체인 유리표면에 tension에 의한 접촉으로 측정함에 따른 측정오차와 사용된 thermocouple은 K-type 3.15 mm인 tube로 외부는 stainless steel 304, 내부는 MgO와 junction thermocouple line로 구성되어 있어 junction thermocouple line까지 열전달에 따른 온도상승 오차가 발생한다. 차후 상기 문제점을 극복하기 위해 junction thermocouple line를 직접 유리기판 위에 접촉하여 측정할 예정이다. 온도균일도는 $250 \pm 5\%$ 였고, 운송 계가 정지한 상태에서 thermocouple를 직접 접촉시켜

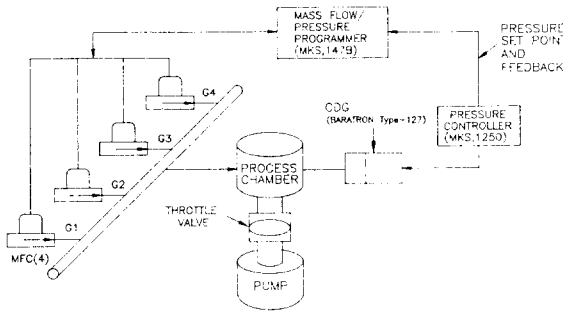


Fig. 3. Diagram of the up stream gas flow.

측정하였다.

3. 실험 및 측정

앞 절에서 sputtering 장치에 고려할 여러 요소들을 분석하고, 구성하여 개발하였다. 개발한 sputtering 장치의 source에 Al-target(5"×25")를 장착시켜 400×400 mm 유리기판 위에 증착시켰다. 증착시 roughing 펌프와 cryo 펌프를 이용하여 process 챔버를 1×10⁻⁶ torr까지 배기한 후 sputtering 기체인 아르곤을 MFC (mass flow controller)를 통하여 증착챔버에 유입되게 하였다. 여기서 유입되는 기체는 Fig.3에서와 같이 cryo 펌프 입구에 throttle 밸브를 장착시켜 conductance를 일정하게 하고, MFC에 의해 증착챔버의 진공도를 일정하게 유지시키는 upstream 방법으로 구성하였으며, MFC를 통해 유입된 sputtering 기체는 sputtering source의 길이방향으로 기체흐름이 균일하도록 즉 증착챔버내부에 압력구배(pressure gradient)가 생성하지 않도록 conductance 관계식[8]을 적용하여 gas line를 구성하였다. 구성한 sputtering 장치를 이용 알루미늄을 성장시켰고, 성장시킨 Al박막의 uniformity와 reflectivity, sheet resistance를 측정하였다. 이때 기판의 온도는 상온으로 하였다.

3.1. Uniformity

마그네트론 스퍼터링장치에서 thin film uniformity는 sputtering source의 자석배열에 크게 영향이 미치며 그외 substrate 운동과 substrate와 target 사이 거리를 가변시켜 향상시킬 수 있다[13]. Uniformity 측정은 target의 길이와 폭방향으로 측정하였으며 target의 길이방향은 sputtering source의 구성도 즉 ma-

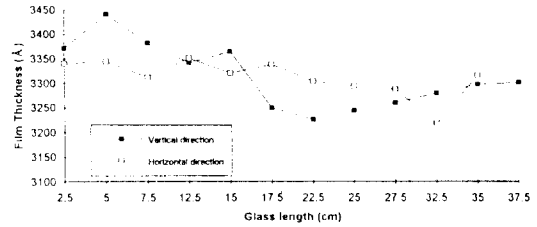


Fig. 4. Film uniformity on the substrate glass.

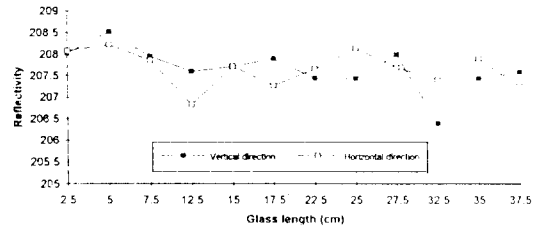


Fig. 5. Reflectivity of aluminum film.

gnet의 형태에, 폭방향은 운송계의 안정성에 크게 의존한다. 균일도 측정시에 PR(photo resist) 용해를 코팅한 후에 Al과 PR 사이의 부착력을 향상시키기 위해 90°C에서 40분 정도 예열한 후 알루미늄 etchant(인산 80%, 아세트산 5%, 질산 5%, Di-water 10% 비율의 solution)로 etching한 후 PR를 제거하여 step를 형성시켜 thickness monitor(Tancor, Alpha-step 200)를 이용하여 thickness를 측정하였다. 측정결과 Fig.4에서와 같이 가로방향(target의 길이방향)의 균일도는 3.43%이고, 세로방향(target의 폭방향)으로는 4.08%, 400×400 mm 전면에 대한 균일도는 6.63%였다. 이때 operation Ar pressure는 5×10⁻³ torr였고 공급된 전력밀도는 3.73 watt/cm²로 하였다.

3.2. Reflectivity

증착막의 grain size를 간접적으로 알 수 있는 방법으로는 reflectivity를 측정하는 것으로 grain이 거칠수록 reflectivity가 낮다. Reflectivity는 증착하는 동안의 기판온도, 증착속도, 기판의 표면형태, 증착챔버의 잔류기체량에 의존한다. 기판온도가 높을수록 증착속도가 클수록 reflectivity가 크고, 전자이동(electromigration)이 증가하나 지나치게 크면 에칭과정에 서 등방(isotropy) 형태로 step이 형성한다.

본 연구에서는 증착시킨 Al 박막의 반사율을 nano-

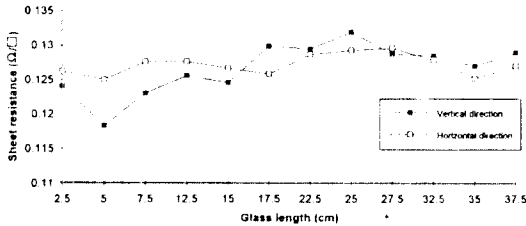


Fig. 6. Sheet resistance of aluminum film.

spec 장치를 이용하였으며, 이때 측정조건은 450 nm의 파장에서 bare Si을 기준으로 하여 측정하였다. 측정결과 Fig. 5에서와 같이 가로 및 세로 방향으로 동일하게 207.66였으며, 균일도는 1% 이내이다.

3.3. Sheet Resistance

증착시킨 박막의 sheet resistance R_s 는

$$R_s = \frac{l}{t}$$

이다. 여기서 l 는 박막의 저항률, t 는 박막두께이다. 본 연구에서는 four point probe(Omni map)을 이용하여 Al 박막의 sheet resistance를 data point에 대하여 3~5 point를 지정하여 측정하였다. 측정결과는 평균 126.6 mΩ/□이고, 그 결과 Fig. 6에서와 같이 도식하였다.

4. 결 론

TFT LCD 금속화 박막제조를 위한 sputtering 장치 설계를 위한 제반 factor들을 고려하여 제작하였다. 개발한 sputtering 장치의 최저도달진공도와 운송계에 장착된 기판온도를 측정한 결과 각각 1.8×10^{-7} torr, $250^\circ\text{C} \pm 5\%$ 였다. 400×400 mm인 유리기판 위에 알루미늄을 성장시켜 균일도, reflectivity, sheet resistance를 측정하였으며, 그결과 각각 6.63%, 207.66, 126.6 mΩ/□였다. 차후 양산용 장비에 있어서 throughput

향상을 위해서는 유리기판의 온도상승 시간을 충분히 단축해야하며 이를 위해서는 load lock 챔버에 lamp 히터장착 등을 고려해야한다.

감사의 글

본 연구를 위해 여러가지로 도와주신 한국베리안 연구소의 경현수씨, 신중호씨, 광호석씨, 정재학씨분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. M. Ishii, *Technical proceeding in SEMICON* (Sharp Cor., Japan 1991), pp. 12.
2. J. Kanicki, *Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices* (Artech house, Boston and London 1991), Chap. 3.
3. A. H. Firester, *International Flat Panel Display Conference* (SEMI, CA, 1992), Section 1.
4. S. Swann, *Printed in the UK, Phys. Technol* 26 (1988).
5. B. Chapman, *Glow Discharge Process*, Printed U.S.A, Chap. 5 (1980).
6. G. S. Weissler, R. W. Carloson, *Method of Experimental Physics*, Vol.14 (Academic Press, New York, 1979), Chap. 4.
7. J. F. O'Hanlon, *A user's guide to vacuum technology* (John Wiley & Sons Inc, 1989).
8. A. Roth, *Vacuum technology* (North-Holland Publishing Company 1976), Chap. 38.
9. S. Halliday, *Vacuum* 37, 583 (1987).
10. J. L. Vossen, W. Kern, *Thin Film Process* (Academic Press, Inc. 1978), Chap. 2.
11. J. R. Reitz, F. J. Milfold, R. W. Christy, *Foundations of Electromagnetic theory* (Addison-Wesley Publishing Comp, 1979), p. 177.
12. F. A. Green, B. N. Chapman, *J. Vac. Sci. Technol* 13, 165 (1976).
13. *Electric Heating Technology Catalogue & Technical Report* (Watlow Cop Pub 1992). p. 332.