

Spectroscopic Ellipsometer를 이용한 삼원 SiO 박막의 증착조건에 따른 유전율특성

논문
8-2-1

The Dielectric Properties of Triple SiO Thin Film using Spectroscopic Ellipsometer

김창석*, 황석영**
(Chang-Suk Kim, Suck-Young Hwang)

Abstract

SiO thin films are deposited by evaporator the refractive index of wave length, photon energy and the absorptive rate of these films are measured by spectroscopic ellipsometer. It is derived the absorptive rate and permittivity of SiO thin films from the equations that calculating the refractive index. And the result show good agreement with the calculated values and experimental values. As a result, the wave length of light is increased in the condition that the angle of incidence is fixed on SiO thin film, the basic absorption and the absorption impurities are found in the low wave length (below 450 nm in this study) and the reflective absorption and conductive absorption is increased by the form of exponential function over the low wavelength. The absorptive rate is increased by increased the angle of incidence and thickness of SiO film for the insulating layer. As the thickness of SiO film is increased, the value of complex permittivity is decreasing and as wave length of incidence is increased., the value of dielectric is linearly increasing..

Key Words(중요용어) : Refractive index(반사율), SiO(산화규소), Absorption rate(흡수율).

1. 서 론

70년대 초반부터 반도체의 전기공학적인 효과를 이용한 광집적소자 재료로 SiO 박막이 널리 사용되고 있는데, Brodeky 등에 의해 이 분야에 관하여 광범위하게 연구되어 왔다. Si MOS LSI의 고집적화 및 초미세화가 진행됨에 따라 게이트 산화막이나 캐패시터 절연막의 두께는 대단히 얇게 되어가고 있다. 또 IC 크기의 대형화에 따라 산화막이 점유하는 면적도 증대되고 있다. SiO 박막에 전계를 인가 할때 발생하는 전기분극은 반도체 결정의 광학적 이방체에 대한 굴절율의 텐서가 되고 전기분극과 관계되는 유전율은 굴절율로 표시할 수 있으므로 광에너지에 의한 SiO 박막의 물리적 반응에 따른 굴절, 흡수, 유전율에 대해 많은 관심

을 가지게 되었다. SiO 반도체에 광을 투과하면 광이 흡수되면서 감쇠하며 진행하는데 흡수된 광 에너지는 다시 다른 에너지를 갖는 광으로서 복사되거나 무복사 과정을 거쳐 열로서 소실되어간다.¹⁾ 이 열은 SiO 박막 내부 온도를 올리고 더욱이 전자와 정공의 운동을 활발하게 하는데, 이 열 팽창은 입사 단속광의 주파수 성분을 갖고 있기 때문에 신호를 발생한다. 특히 순수한 비정질 규소를 절연층으로 하는 반도체는 박막제조시 증착조건에 따라 전기적인 특성 연구는 많이 진행되고 있는데 비해 광학적 특성 변화와 그 원인에 대해 체계적으로 정립이 미비한 실정이다. 박막의 굴절율 분포를 측정하는 방법으로는 간접계를 이용하는 방법²⁾과 가속전자로 시료의 X선 복사를 측정하여 시료의 농도를 구해 시편의 굴절과 비교하는 방법^{3,4)}, 평면도파로의 모드선을 측정하여 굴절율 분포를 구하는 방법이 있다. 따라서 본 연구에서는 진공증착기에 의해서 SiO를 절연층으로 하는 삼원(M-I-M) 박막의 시편을 제작하여, 크세논광(Xe-Arc)을 이용한 Spectroscopic Ellipsometer를

* : 조선대학교 공대 전기공학과

** : 단국대학교 공대 전기공학과

접수일자 : 1994년 9월 25일

심사완료 : 1995년 2월 10일

사용, SiO 증착 박막의 변적과 두께에 따른 증착 조건과 파장 및 광에너지에 대한 굴절율, 흡수율 및 유전율을 실험적으로 구하였다. 그리고 계산식에 의한 값과 실험 값을 비교하여 상호간의 타당성을 입증하므로써 광학적 시료 제작 및 광반도체의 응용 분야에 도움을 주고자 한다.

2. 분광해석 방정식 이론

직선편광이 시료 표면에 경사입사한 경우 반사광은 일반적으로 타원편광이 되는데 이때 시료의 전자기 특성을 알아내는 분광해석법(Spectroscopic Ellipsometer)은 Maxwell 방정식으로부터 매질의 투자율(μ) 및 유전율(ϵ)을 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\nabla^2 u + \mu \epsilon (\omega/C)^2 u = 0 \quad (1)$$

여기서 각진동수가 ω 인 광파가 c/n 의 속도로 매질을 전파하고 있음을 나타낸다. 또한, n 을 그 물질의 굴절율이라 하고 비자성체의 경우 ($\mu=1$)는 아래와 같이 정의된다.

$$n = \epsilon^{1/2} \quad (2)$$

반도체와 금속 같이 매질이 투명한 경우는 복소유전율로 나타내고, 이 경우는 실수이다.

$$n^* = \frac{c}{\nu} = c \left\{ \mu_0 \mu_s (\epsilon_0 \epsilon_s - \frac{i\sigma}{\omega}) \right\}^{1/2} \quad (3)$$

여기서 σ 는 도전율이며, 반도체에서 이 광파에 대한 굴절율을 n , 흡수계수를 k (extinction coefficient)로 하면 (3)식은

$$n + ik = (\epsilon_1 + i\epsilon_2)^{1/2} \quad (4)$$

로 표현된다.⁽⁵⁾

굴절율이 n_0, n_1 인 매질과 기저층 2가 $X=0$ 에 θ_0 각으로 입사할때 그 경계면에서 입사각과 반사각 그리고 입사각과 굴절각 관계에서 광의 에너지 밀도는 IE, IH Vector의 진폭의 곱에 비례한다.

$H=nE$ 이므로 광의 강도는 진행과 동시에 $\exp[-(2\omega R/C)x]$ 형의 감쇠를 받는다.

여기서 감쇠계수 $k \equiv 2\omega R/C$ 를 흡수계수라 한다. 또한 유전매질중에서 전속밀도 D 는 전기장 E 와 유전분극 P 와의 관계는 다음과 같이 정의된 유전율 ϵ 로 나타내진다.

$$D = \epsilon_0 E + P \\ = \epsilon_0 \epsilon_s E \quad (5)$$

그리고 식 (3)에서 복소유전율 ϵ_1 과 ϵ_2 는 흡수계수(k)와 도전율 (σ)에 의해 다음과 같이 서로 관계되어진다.

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (6)$$

$$\epsilon_2 = 2nk = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (7)$$

$$\text{또 } n = (1/\sqrt{2}) \sqrt{\epsilon_1 \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} + \epsilon_2^2} \quad (8)$$

$$k = (1/\sqrt{2}) \sqrt{-\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}} \quad (9)$$

로 표시된다.

여기서 ϵ_1 은 입사광의 전기장과 같은 위상에서 진동하는 유전응답성분의 크기를 의미하며, ϵ_2 는 ϵ_1 과 위상이 90° 만큼 벗어난 성분 크기로 나타나고 또, Joule열의 발생에 의한 유전에너지 손실에 관계한다.

밴드내 자유전자의 유효질량이 m_e^* , 이동도 μ_e 를 가질때 각주파수 ω 의 진동 전기장에서 받은 운동 방정식은

$$m_e^* \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{e}{\mu_e} \frac{dx}{dt} = -eE \exp(i\omega t) \quad (10)$$

여기서 x 는 밴드내 자유전자의 위치를 나타내고 진동하는 전자의 복소진동 X_0 는

$$X_0 = \frac{eE_x/m_e^*}{\omega^2 - i\omega e/\mu_e m_e^*} \quad (11)$$

복소유전율 ϵ 은

$$\epsilon = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} = 1 - \frac{n_e X_0}{\epsilon_0 E} \quad (12)$$

자유전자의 흡수계수를 구하면

$$\alpha_{fr} = \frac{e^3 \lambda^2}{4\pi^2 c^3 n \epsilon_0} \left(\frac{n}{m_e^* \mu_e} + \frac{P}{m_h^* \mu_h} \right)$$

여기서 e 및 h 는 전자 및 정공을 의미한다. 그림 1과 같이 X,Y 평면상에서 $X=0$ 에 θ_0 의 각으로 입사한 평면파를 고려하면 다음과 같은 관계식이 성립한다.⁽⁶⁾

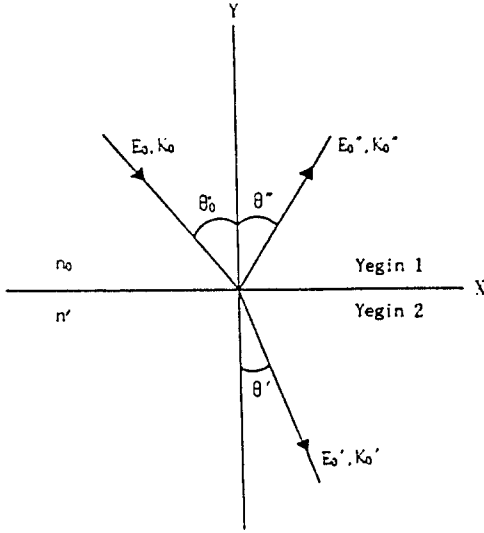


그림 1. 2상계에서 입사광 반사광 및 굴절광의 경로

Fig. 1. Route of incidence light, reflection and refractive lights on two-phase system.

$$\theta_0 = \theta'' \quad (13)$$

$$n_0 \sin \theta_0 = n' \sin \theta' \quad (14)$$

또한 자기유도 벡터 B 와 변위벡터 D 의 수직 성분이 연속이며, 자기의 세기 벡터 H 와 전기장 벡터 E 의 접선 성분이 연속이어야 하는 경계 조건에서 전기장이 입사면과 나란하게 진동하는 경우 (P파)와 입사면에 수직으로 진동하는 경우 (S파)를 각각 적용하면 Fresnel 반사계수는 입사각 θ_0 굴절각 θ' 으로 표시 하여 다음과 같이 얻을 수 있다.^{5,7,8)}

$$r_p = \frac{E_0 P'}{E_0 P} = \frac{n_0 \cos \theta' - n_1' \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta' + n_1' \cos \theta_0} = |\gamma_p| e^{i\delta_p} \quad (15)$$

$$\gamma_s = \frac{E_0 S'}{E_0 S} = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_0} = |\gamma_s| e^{i\delta_s} \quad (16)$$

$$t_p = \frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta' + n_1 \cos \theta_0} \quad (17)$$

$$t_s = \frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta'} \quad (18)$$

윗 식중 (15)과 (16)은 P파와 S파 각각의 Fresnel 반사계수이고 (17), (18)은 각각 P파와 S파의 Fresnel 투과계수이다. 윗 식에서 굴절각 θ' 는 Snell 법칙에 따라 식 (14)를 만족한다.

3. 실험방법 및 결과

1) 실험방법

본 실험에 사용된 기관 재료는 알카리 원소가 함유되지 않는 Corning 7059 borosilicate Glass(미국 corning사, 두께 0.5mm)로서 광학적 특성 조사를 편리하게 7.5cm × 2.5cm 크기의 기관을 사용하였으며 유리 표면에 존재할 수 있는 유기물질과 불순물을 제거하기 위해 초음파 세척기 (일본 BRANSON사, Model 1200)를 이용하여 간접세척 (아세톤 : 증류수 = 1 : 10, 온도 50°C)을 30분간 실시 한 후 아세톤과 증류수로 각각 20분씩 세척하였다. 그리고 기관에 남아 있는 수분을 제거하기 위해 전열기로 건조시킨후 시편통에 보관하고 실험시 꺼내 사용하였다.

시료는 그림 2에 나타낸바와 같이 Slide Glass 위에 Al-SiO-Al Sandwich구조로 M-I-M순으로 3회의 진공증착(통상 10⁻⁶Torr)에 의해 제작되었다. 실험에 사용한 시료 Al과 SiO는 모두 순도 99.9% Powder를 사용하였는데 상, 하부 전극용 Al은 삼금속약공업(주) 제품을, 중간 절연층인 SiO는 VENTRON사 제품을 각각 사용하였다. 그리고 증착용 boat는 고융점 금속인 텅스텐(W)을 전극으로 하여 저항가열 증착 하였으며, 기관과 boat와의 거리는 8cm로 일정하게 유지하였다.

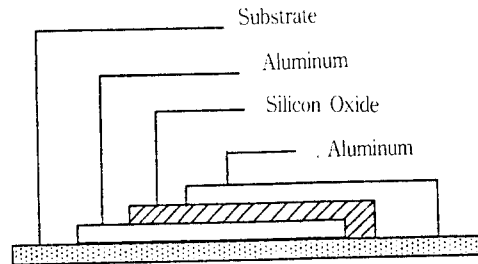


그림 2. 제작한 시편의 구조

Fig. 2. Fabricated sample structure.

증착된 시료는 그림 3과 같이 분광타원해석기 (Spectroscopic Ellipsometer)를 사용하여 측정했

다. 여기서 시료에 입사되는 크세논 램프(Xe-Arc)의 입사각을 70° 로 고정 시키고 파장(λ)을 250nm~850nm 대역에서 변화 시키면서 정상파(s)와 이상파(p)의 간섭효과를 이용하여 박막의 두께(d), 굴절율(n), 흡수율(k) 그리고 유전율(ϵ_1, ϵ_2)를 각각 측정하였으며, 이때 공기의 굴절율을 1로 가정하였다.

2) 실험결과

그림 2의 증착구조에서 보인 바와 같이 상, 하부 전극의 Al증착은 기판 온도를 80℃로 유지한 상태에서 50A 전류로 boat를 저항가열 하여 통상 30sec 동안 증착하였으며, 중간 절연층(SiO)은 기판 온도를 80℃로 유지하고 용융점이 Al보다 높기 때문에 전류를 60A로 증가시켜 3.33Å/s 증착 조건하에서 시간을 조정하여 시료 #1은 1100Å, #2는 1000Å, #3은 1050Å의 두께로 각각 증착하였다. 그리고 SiO 박막(M-I-M)의 겹침(Al-SiO-Al)면적은 각각 #1은 180mm², #2는 150mm², #3은 120mm²로 증착되었으며, 또 박막 전체(Al-SiO-Al) 두께는 SiO층 증착시간에 따른 증착 두께에 의해 #1은 2650Å, #2는 2620Å, #3은 2690Å을 각각 표 1과 같이 증착하였다.

표 1. 증착두께 및 면적

Table 1. Deposition thickness and Area.

Division	Sample		
Thin Film thickness(Å)	# 1	# 2	# 3
Overlap layer region(mm ²)	180	150	120
SiO layer thickness(Å)	1100	1000	1050

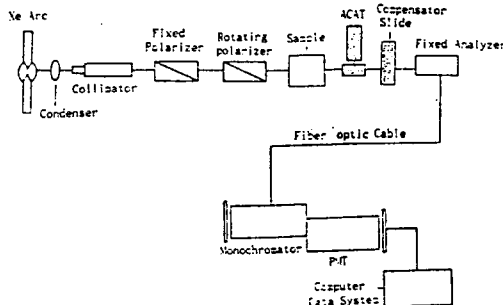


그림 3. 측정장치

Fig. 3. Measurement equipment.

그림 4는 시료 #1에 크세논 광(Xe-Arc)의 입사각을 70° 로 고정하고 파장을 400nm에서 700nm로 증가시키면서 굴절율과 흡수율을 비교하여 측

정한 것으로 시료에 입사된 빛의 파장이 455nm 이하에서는 반도체의 Energy band 구조에서 해석되어진 바와 같이 굴절과 흡수가 일어나지 않고, 단지 기초흡수 및 불순물에 의한 불안정한 굴절과 흡수가 일어났으며, 455nm 파장에서는 자유전자가 속해 있는 Energy band 내의 전자 거동에 기인된 굴절 및 전도흡수가 시작됨을 알 수 있다. 파장을 455nm에서 증가 시켜 가면 650nm에서 n은 0.5941, k는 1.9665로 되어 파장이 증가함에 따라 선형적인 증가를 보였다. 또한, 굴절율과 흡수율 관계에서 $n < k$ 이므로 SiO 박막의 광학적 성질이 절연체나 반도체의 비슷한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

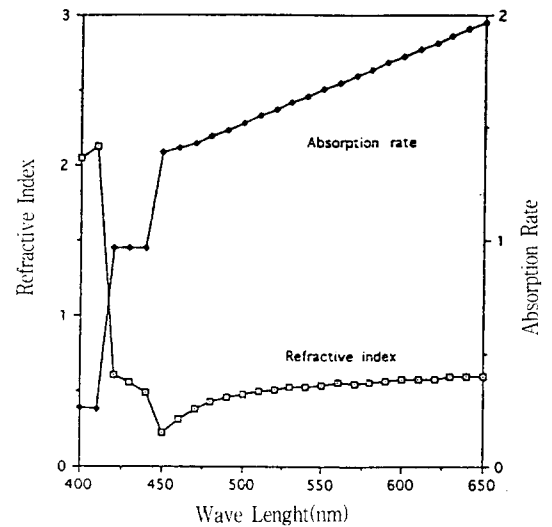


그림 4. 파장의 증가에 따른 굴절율, 흡수율 관계
Fig. 4.. Relationship of refractive index and absorption rate according to the increase of wavelength.

그림 5는 제작된 SiO 박막에 입사파장의 증가에 따른 굴절율 변화 특성을 나타내고 있는데 시료 각각 #1, #2, #3에 450nm 파장의 Xe-Arc를 가하여 파장을 증가시키면 굴절율은 각각 #1은 0.2381, #2는 0.2659, #3은 0.4030이고 파장이 증가하여 650nm에서는 각각 0.5941, 0.4641, 0.5950으로 나타나 증착 두께가 두꺼울 수록 굴절율 값은 크게 나타나고 파장의 증가에 따라 지수함수적으로 증가됨을 보였다. 그 이유는 SiO 박막이 Amorphous상태에서는 광흡수가 크고 광학적띠 간격이 큰 특징을 갖고 있기에 빛이 입사하므로써 반도체내의 에너지 장벽이 높아짐에 따라 반도체의 내부에너지

가 증가하기 때문이며 Bahl⁹⁾도 이와 비슷한 변화를 보고한 바 있다.

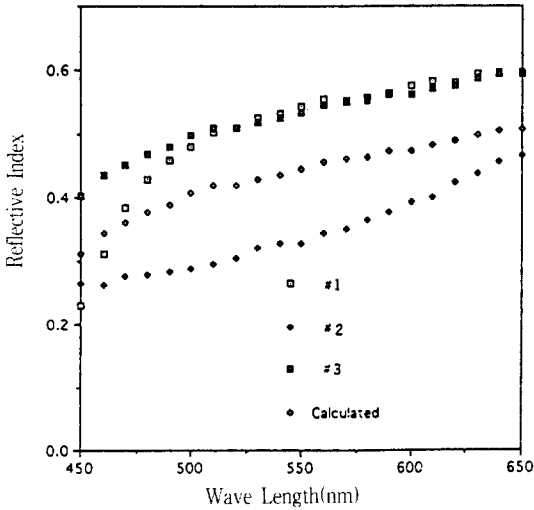


그림 5. 파장의 증가에 따른 굴절율 관계
 Fig. 5. Relationship of refractive index according to the increase of wavelength.

그림 6은 M-I-M의 시료 #1, #2, #3 각각에 450~650nm의 광파장을 입사시켰을때의 흡수율을 나타낸 것으로 이 광흡수는 박막의 중간층인 SiO₂(절연층)막이 #1은 1100Å, #2는 1000Å, #3은 1050Å와 같이 두께가 얇을 수록 흡수율이 큰 값을 나타내고 있는데 이것은 Amorphous 상태에서 광흡수는 투과성을 갖기 때문에 SiO 층이 열평형 상태에서 빛을 받으면 전위장벽이 높아지므로 투과성으로 설명된 광흡수가 크게 나타남을 알 수 있다. 이 광흡수는 유전율 허수부 ϵ_2 와 관계가 있다. 그리고 전도율이 높고 광파장이 증가함에 따라서 금속과 마찬가지로 반사율이 높아지고, 동시에 자유 carrier 흡수로 인해서 파장의 영역의 흡수가 증가되는데 그것을 잘 나타내고 있다.

그림 7은 시료 #1, #2, #3에 입사광 파장을 450nm에서 650nm로 증가 하였을때 복소 유전율을 측정 한 것으로 복소유전율 ϵ_1 과 ϵ_2 는 SiO 증착막 두께가 증가함에 따라 복소유전율 값이 적게 되었고 파장이 증가함에 따라 비례적으로 증가함을 나타내고 있다. 여기서 파장 650nm에서 유전율 실수부 ϵ_1 의 값 #2는 2.8이고 #1은 2.3으로 각각 나타나 그 편차가 0.5 값을 나타내고 있으며 허수부 ϵ_2 값 역시 같은 광파장 650nm에서 #2가 9.3이고 #1은 3.5로 각각 나타나 그 편차가 5.8로 나타나고 있는데 그 이유는 SiO 박막에 빛이 통과

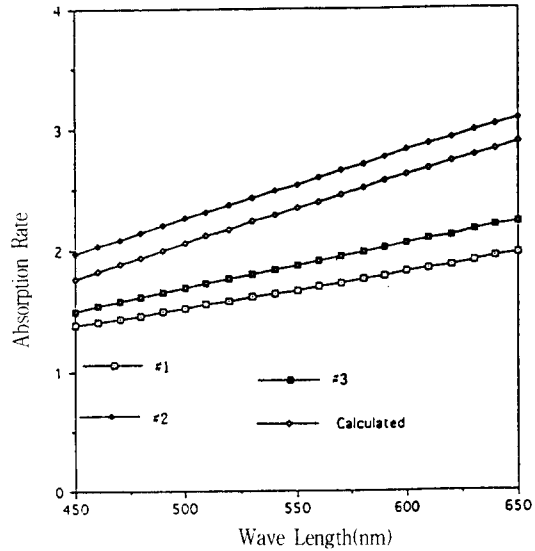


그림 6. 파장의 증가에 따른 흡수율 관계
 Fig. 6. Relationship of absorption rate according to the increase of wavelength.

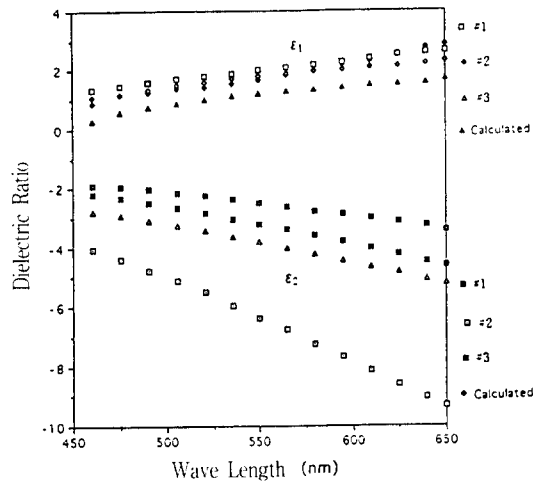


그림 7. 파장의 증가에 따른 유전율 실수부(ϵ_1)와 실수부(ϵ_2) 관계
 Fig. 7. Relationship of ϵ_1 and ϵ_2 of dielectric

되면 빛은 박막의 물질과의 상호작용에 의해 흡수되어 파장의 증가에 따라 점차 증가 되는데 이것은 박막내를 진행한 후의 빛의 강도 $I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$ 식을 만족한다. 그리고 같은 파장에서 복소 유전율의 크기를 조사 해 보면 허수부 ϵ_2 가 큰 값을 갖고 박막 두께에 따라 편차도 크게 나타나는데 그 이유는 시료에 입사된 빛 에너지에 의해 전도대의 전자와 가전자대의 정공사이에 작용하는

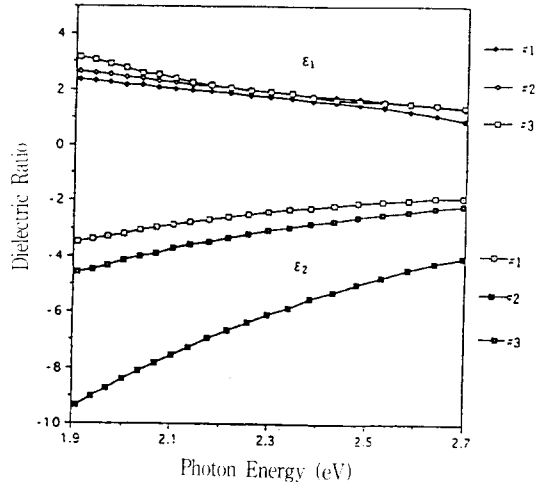
활용력의 작용에 의해 금지대의 밀도는 SiO층 두께가 두꺼울 수록 단위밀도가 낮기 때문에 광흡수가 증가한다. SiO 박막의 기초적인 지함수단에서 복소유전율의 허수부 ϵ_2 에 대한 전개효과를 고려하면 ϵ_2 는 기초 흡수대에서는 직접 흡수계수인 $\alpha(\omega)$ 에 관계함을 알 수 있다.

그림 8은 Photon Energy(eV) 변화에 따른 유전율의 ϵ_1 과 ϵ_2 를 실험적으로 측정된 것으로 SiO 증착막 두께가 얇을 수록 유전율 ϵ_1 과 ϵ_2 는 큰값을 나타내고 Photon Energy 증가에 따라 점차 유전율이 감소하는 현상을 보이고 있는데 이것은 SiO 박막에 입사된 Photon Energy가 증가하면 흡수된 빛이 박막내에서 일부는 재복사 하고 일부는 복사되지 않고 열로 소실 되는데 이 열이 밴드내 전자와 정공의 운동을 활발하게 하여 직접전자의 상태밀도가 높게 되므로 인해 흡수계수에 비례한 유전율이 감소되고 있음을 알 수 있으며 이것은 응답성분 크기로 나타난다. 그리고 ϵ_2 는 유전손실과 관계되며 ϵ_1 과 ϵ_2 는 90°의 위상차를 갖는것을 알 수 있다. 또한 복소유전율중 흡수율과 관계되는 허수부 ϵ_2 값은 절연막인 SiO층의 증착 두께가 얇은 것일수록 초기에는 큰 값을 나타냈으나 Photon Energy증가에 따라 점차 감소 되면서 반대로 작은 값이 나타났다. 이것은 SiO층 박막이 광에너지 증가에 따라 박막내의 전도대와 가전자대의 전자, 정공의 운동이 활발하게 되어 막이 얇을 수록 밴드 갭이 더 적어 지므로 인해 작은 값이 나타나고 있는것을 알 수 있다.

5. 결 론

알루미늄 전극을 사용한 SiO 박막의 두께와 면적을 다르게 3개의 시편을 제작하여 파장과 Photon Energy의 변화에 따른 굴절율, 흡수율 및 유전율 특성을 Spectroscopic Ellipsometer를 이용하여 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SiO 박막에 빛의 파장을 증가 시키면 저파장(본 연구의 경우 450nm 이하)에서는 기초흡수 및 불순물 흡수가 일어나고 그 이상 파장에서는 굴절 및 전도흡수가 선형적으로 증가하였다.
2. SiO 박막에 입사파장의 증가에 따른 굴절율 변화특성은 증착두께가 두꺼울수록 크게 나타나고 또 지수함수적인 증가를 나타내었다.
3. 증착박막의 흡수율은 절연층인 SiO막 두께가 얇으면 흡수율이 크게 나타나고 입사파장의 증가에 따라 증가 하였다.



according to the increase of wavelength
그림 8. Photon 증가에 따른 유전율 실수부(ϵ_1)와 실수부(ϵ_2) 관계

Fig. 8. Relationship of ϵ_1 and ϵ_2 of dielectric according to the increase of photon energy.

4. 절연층인 SiO막의 두께가 증가함에 따라 복소 유전율 값은 적게 나타나고 입사파장의 증가에 따라 그 값은 선형적으로 증가 되었다.
5. Photon Energy 증가에 따른 유전율 ϵ_1 과 ϵ_2 은 절연층인 SiO막의 두께가 얇을 수록 초기에는 큰값이 나타 내었으나 점차 지수함수적인 감소를 나타냈다. 그리고 얇은 박막 일수록 광 에너지 증가에 따라 밴드 갭이 적어지므로 유전율 ϵ_2 는 적은 값을 나타내었다.
6. SiO 증착막의 굴절율, 흡수율, 유전율에 대한 실험값과 계산값은 잘 일치됨을 보였다.

이상과 같은 결론으로 보아 본 연구는 SiO 박막 시료 제작시 조건을 제시하고 더 나아가 반도체 응용분야의 패시블리, 사진전송 등 광학적 응용에 많은 영향을 미칠 것으로 사료된다.

※ 본 연구는 1994년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의해서 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 洪 鳳植 外 2人 共譯, “半導體評價技術,” 機電研 究社, pp. 167, 1994.

2. J. M. White and P. F. Heidrich, "Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices a simple analysis", Appl. optics, vol. 15, pp. 151-155, 1976.
3. Makoto Minakata, shoichi stito, Masashi shibata, and shintaro Miyazawa "precise determination of refractive-index changes in Ti- diffused LiNbO₃ optical waveguides", Jour, of Appl. phys. vol. 49, pp. 4677, 1978.
4. Makoto Minakata, shoichi stito and, Masashi shibata, "Two-dimensional distribution of refractive-index changes in Ti-diffused LiNb₃ strip waveguides" Jour, of Appl. phys. vol. 50, pp. 3063-3067, 1979.
5. Rolf H. Muller, "Definitions and Conventions in Ellipsometry", surface science, vol. 16, pp. 14-33, 1969.
- 6.李大聲 外 1人 共著, "結晶光學", 教學研究社, pp. 20-23, 1989.
- 7.李 相洙 "波動光學" 教學研究社, pp. 78-93, 1994.
- 8.李 亨植 外 2人 共譯 "박막프로세스의 기초" 牛島出版社, pp. 132-136, 1992.
9. S. K. Bahl and M. Bhagat, J. Non-Crystalline Solids, Vol. 17, pp. 409, 1975.

저자소개



김창석

1936년 9월 12일생. 1968년 조선대학교 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991-1992년 미국 SIUE대학 객원교수. 현재 조선대학교 공대 전기공학과 교수.



황석영

1938년 5월 29일생. 1963년 3월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1973년 3월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1987-1988년 Penn. State Univ. 객원교수. 현재 단국대학교 공대 전기공학과

교수.