

집적 거울 Etalon의 선폭과 피크 투과율

정종술 · 윤태훈 · 김재창

부산대학교 전자공학과

(1991년 11월 8일 받음)

본 연구에서는 집적 거울 etalon에서 spacer 층에서의 흡수율과 다층박막의 경계에서 발생하는 산란 손실 그리고 입사빔의 focusing 등에 의한 효과를 해석한다.

I. 서 론

광학에서는 유전체로 구성된 다층박막 구조를 고반사율 거울과 대역 여과기 등에 널리 이용하여 왔다.^[1] 최근, 단일층의 두께를 정확히 제어할 수 있는 MBE(molecular beam epitaxy)와 MOCVD(metalorganic chemical vapor deposition)같은 성장 장치가 개발됨에 따라 Fabry-Perot etalon에서 반도체를 성장하여 다층박막 거울을 제작하는데 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 다층박막 거울로 구성된 집적 거울 etalon(integrated-mirror etalon)은 광스위칭(photonic switching)과 표면 발진 레이저(vertical cavity surface emitting laser) 등에 응용되고 있다.^[2-10]

Etalon의 동작 특성에서 선폭(linewidth)은 신호 펄스의 전송율과 밀접한 관계를 가진다. 즉, 선폭의 증가는 단위 시간당 신호 펄스의 전송율을 떨어뜨리는 결정적 요인으로 작용한다. 그래서, 투과율의 선폭에 영향을 주는 요인들을 조사하여 선폭 변화 특성을 연구하는 것은 중요하다. 본 논문에서는 피크 투과율과 피크 투과율의 1/2되는 파장의 폭으로 정의하는 선폭^[2]에 영향을 주는 요인들을 세가지로 나누어 기술한다. 첫째는 spacer 층의 흡수율, 둘째는 각 층의 경계에서 발생하는 산란(scattering)에 의한 손실, 그리고 세째는 렌즈로 focusing하여 빔을 입사하는 경우에 선폭의 변화 특성등의 etalon 동작 특성을 기술한다.

II. 집적 거울 Etalon의 기본 이론과 동작 원리

다층박막의 광학적 성질은 각 층의 굴절율에 의하여 결정된다. 각 층의 굴절율 N 을 일반적으로

$$N = n - ik \quad (1)$$

의 복소수로 표현하며 복소굴절율이라 한다. 여기서 n 은 물질에서의 흡수를 무시하고 사용되는 보통 통용되는 굴절율로 실수이고, 허수항의 계수 k 는 흡수 계수 α 와

$$\alpha = 4\pi k / \lambda \quad (2)$$

의 관계를 가진다. 여기서 λ 는 자유 공간에서의 입사빔 파장이다. 복소굴절율 N 은 파장의 함수이므로 파장에 따른 다층박막의 광학적 성질을 파악하는 데 중요한 매개변수이다.

다층박막의 광학적 특성을 알기 위하여 먼저 단일 박막층(thin-film layer)의 특성 행렬을 구해야 한다. 특성 행렬에 의하여 경계에서의 light field 관계를 알 수 있다.

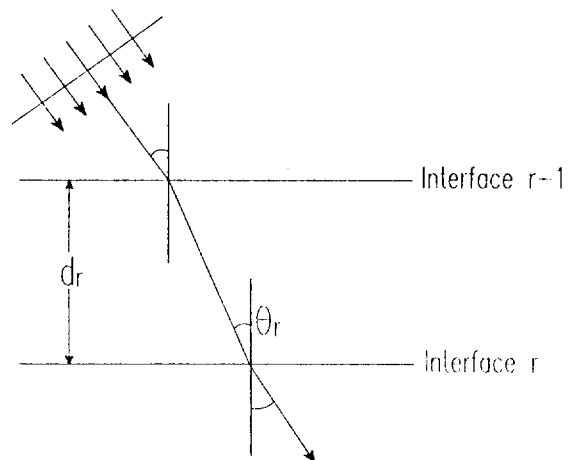


그림 1. 단일 박막층의 특성 행렬을 구하는 데 사용되는 구조.

그림 1은 단일 박막층(thin film layer)의 특성 행렬을 구하는 데 사용되는 기본 구조이다. 위의 그림에서 경계 $r-1$ 과 r 에서의 light field를 경계 조건에 맞추어 연관짓는다.^[11]

$$\begin{bmatrix} E_{r-1} \\ H_{r-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta r & i \sin \delta / Y_r \\ i Y_r \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ H_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

의 형태로 표현된다. 여기서, E_r, E_{r-1}, H_r 와 H_{r-1} 는 경계 r 과 $r-1$ 에서 입사 빔과 반사 빔의 전장과 자장의 접선 성분이다. δ 은

$$\delta = \frac{2\pi N_r d_r \cos \theta_r}{\lambda} \quad (4)$$

층 r 의 두께 d_r 을 진행함으로써 발생하는 위상 변화이다. 식 (4)에서 N_r 과 θ_r 은 각각 층 r 의 복소 굴절률과 경계 r 에서의 입사각이다. 매질 r 의 어드미턴스 $Y_r (= \sqrt{\epsilon/\mu})$ 은 광학에서 복소 굴절률 N_r 과 $Y_r = \eta_0 N_r$ 의 관계를 가진다. 여기서, ϵ 과 μ 는 매질의 유전율과 투자율이고 $\eta_0 = 2.6544 \times 10^{-3}$ Siemens는 자유 공간의 특성 어드미턴스(characteristic admittance)이다. q 층의 다층박막에 대하여 첫 경계 0의 E_0, H_0 와 마지막 경계 q 의 E_q, H_q 와의 관계를 단일층의 특성 행렬 식 (3)을 이용하여 구하면

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \prod_{r=1}^q \begin{bmatrix} \cos \delta r & i \sin \delta / Y_r \\ i Y_r \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_q \\ H_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

으로 된다. 식 (5)에서 다층박막의 특성 벡터 $[B \ C]^T$ 를

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{r=1}^q \begin{bmatrix} \cos \delta & i \sin \delta / Y_r \\ i Y_r \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ Y_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서, Y_s 는 기판의 어드미턴스이다. 식 (6)의 특성 벡터를 이용하여 다층박막 거울의 투과율 T 를 구하면

$$T = \frac{4Y_0 \text{Re}(Y_s)}{(Y_0 B + C)(Y_0 B + C)^*} \quad (7)$$

와 같다. 여기서 a^* 는 a 의 공액 복소수이고, Y_0 는 공기의 어드미턴스이다.

Quarter-wave 구조는 높은 굴절율을 가진 매질과 낮은 굴절율을 가진 매질을 광학적 두께가 동작 파장의 4분의 1이 되도록 번갈아 성장한 다층박막 구조이다. Quarter-wave 다층박막의 거울 구조는 반사율이 같은 위상이

되어 일정한 수의 층에서 최대의 반사율을 가지므로 이러한 다층박막 구조를 선택한다. 이 때, 동작 파장에서 각 층에서의 위상 변화 δ 는 $\pi/2$ 가 되어 단일층의 특성 행렬은

$$\begin{bmatrix} 0 & i/Y_r \\ i Y_r & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

이 된다. 높은 굴절율 매질과 낮은 굴절율 매질을 번갈아 성장시킨 quarter-wave 다층박막의 층수가 $2q+1$ 일 때의 최대 반사율 R_{max} 를

$$R_{max} = \left[\frac{Y_a - (Y_H)^{2(q+1)} / (Y_L^{2q} Y_s)}{Y_a + (Y_H)^{2(q+1)} / (Y_L^{2q} Y_s)} \right]^2 \quad (9)$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기서, Y_H 와 Y_L 은 각각 높은 굴절율 매질과 낮은 굴절율 매질의 어드미턴스이다. 식 (9)는 흡수와 산란에 의한 손실이 없을 경우에 대하여 성립하고 일정한 어드미턴스에서 층수가 많을수록 반사율이 커짐을 알 수 있다. 또, 일정한 층수에서 어드미턴스 즉, 굴절율 차이가 클수록 반사율은 커짐을 알 수 있다. 실제 제작된 sample의 반사율은 흡수와 각 층의 경계에서 산란에 의한 손실에 의하여 많은 영향을 받는다.

III. 선평과 피크 투과율

1. 흡수 및 산란(scattering) 효과

Spacer 층의 흡수 계수 α 에 대한 etalon의 동작 특성은 spacer 매질의 굴절율을 복소 굴절율로 선택하여 알 수 있다. 왜냐하면 식 (1)의 복소 굴절율에서 허수항은 흡수 계수와 식 (2)의 관계가 있기 때문이다. 다층박막 거울에서의 흡수율은 일반적으로 매우 작게 설계하므로 무시한다.

다층박막 거울로 구성되어 있는 etalon은 각 층의 경계에서 산란에 의한 손실이 발생한다. 산란 손실^[3]을 ρ , 경계에서 positive로 진행되는 전계와 negative로 진행되는 전계를 각각 E^+, E^- 로 표시하면, 경계 $r, r-1$ 에서

$$E^+, = E^-, (1 - \rho) \exp(-i \delta) \quad (10a)$$

$$E^-, = E^+, (1 - \rho) \exp(i \delta) \quad (10b)$$

의 관계식으로 산란 손실을 정의한다. 단, 산란 손실 ρ 는 $0 < \rho < 1$ 로 가정한다. 경계 r 에서 전계 E_r 와 자계 H_r 는

$$E_r = E^+, + E^-, \quad (11a)$$

$$H_r = Y_r(E^+ - E^-) \quad (11b)$$

으로 표현할 수 있다. 식 (10a,b)를 식 (11a,b)에 대입하여 경계 $r=1$ 과 r 의 전계와 자계 관계식을 구하면 산란 손실이 있을 경우의 단일층의 특성 행렬은

$$\begin{bmatrix} \cos\delta + i\rho\sin\delta & (i\sin\delta + \rho\cos\delta)/Y_r \\ (i\sin\delta + \rho\cos\delta)Y_r & \cos\delta + i\rho\sin\delta \end{bmatrix} \quad (12)$$

으로 된다. 이와같은 특성 행렬을 이용하여 마찬가지로 방법으로 etalon의 투과율 특성을 구하여 산란 손실에 따르는 피크와 선평의 변화 특성을 알 수 있다.

2. Focusing에 의한 영향

신호 펄스를 focusing하여 입사하면 신호 펄스와 펄핑 펄스를 같은 것으로 사용하는 경우에 작은 파워로 큰 파워의 효과를 얻을 수 있다. 그림 2는 etalon에 빔을 focusing하여 입사할 때의 기본 구조를 그린 것이다. 여기서 입사빔의 세기가 가우시안 분포를 가지는 것으로 가정한다. d 는 입사빔의 반경이고 h 는 렌즈와 etalon 표면과의 떨어진 거리이다. 그리고, 각 θ_M 은 가우시안 빔의 spot size에 해당하는 빔이 렌즈에 의하여 굴절하는 각으로 focusing에 의한 최대 입사각(focusing angle)이라 한다. r_M 은 각 θ_M 에 대응하는 etalon 표면에서의 빔 반경이다. 또, h 는 etalon의 표면과 자유 공간에서의 초점까지의 거리이다. 위와 같이 매개변수를 설정하였을 때, etalon 표면에서의 빔 반경 r_M 은

$$r_M = d - (f-h) \tan\theta_M \quad (13)$$

으로 표현할 수 있다. 그리고, h 는

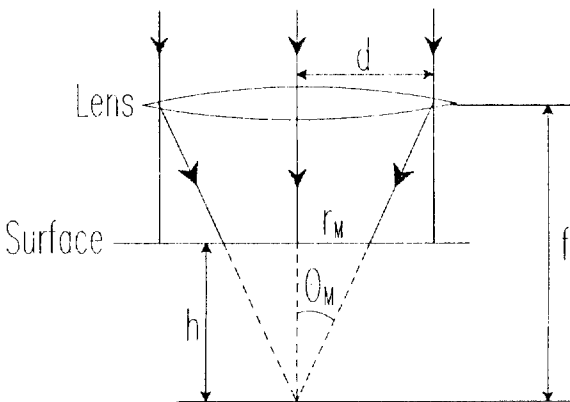


그림 2. focusing된 입사빔의 구조.

$$h = r_M / \tan\theta_M \quad (14)$$

으로 된다. 빔 중심과의 각 θ 에 대한 etalon 표면에서의 임의의 빔 반경 $r(\theta)$ 는

$$r(\theta) = h \tan\theta \quad (15)$$

로 된다. etalon 표면에서의 빔세기(Beam intensity) 분포 $G(r)$ 은 반경 r 에 대하여

$$G(r) = A \exp(-r^2/r_M^2) \quad (16)$$

의 가우시안 형태를 가진다. 여기서, A 는 정규화(normalization) 상수이다. 식 (16)을 적분하여 빔의 총 세기를 정규화하면 정규화 상수 A 는

$$A = 1/\pi r_M^2 \quad (17)$$

으로 된다. 한편, 비스듬한 입사에서의 투과율 특성 $T(\lambda, \theta)$ 를

$$T(\lambda, \theta) = T_0 \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda(\theta))^2}{\Delta\lambda^2}\right] \quad (18)$$

의 가우시안 형태로 간략화할 수 있다. 여기서, T_0 (단, $0 < T_0 \leq 1$)는 피크 투과율로서 집적 거울 etalon의 구조가 주어지면 참고문헌 [8]에서 유도된 피크 투과율 공식에 의하여 간단히 알 수 있다. $\Delta\lambda$ 는 주어진 θ 에서 피크 파장과 피크 투과율이 $1/e$ 이 되는 파장과의 거리이고 피크 파장 $\lambda(\theta)$ 는

$$\lambda(\theta) = \lambda(\cos\theta_M + \cos\theta_c)/2 \quad (19)$$

로 입사각에 대하여 이동한다. 여기서, 각 θ_M 과 θ_c 은 다층박막 거울을 구성하는 높은 굴절율 층과 낮은 굴절율 층에서의 굴절각이다. 2 차원 빔세기 분포 식 (16)을 반경 r 에 대응하는 입사각 θ 에 대한 1 차원 빔세기 분포 $W(\theta)$ 로 변환하면

$$W(\theta) = \frac{2r(\theta)}{r_M^2} \exp(-r(\theta)^2/r_M^2) \quad (20)$$

으로 정리할 수 있다. 투과율 특성 식 (18)과 1 차원 빔세기 분포 식(20)의 correlation으로 focused beam이 입사되는 경우에 etalon의 투과율 $F(\lambda)$ 를

$$\begin{aligned} F(\lambda) &= \int_0^\infty W(\theta) T(\lambda, \theta) dr(\theta) \\ &= \int_0^\infty \frac{2}{r_M^2} T_0 r(\theta) \exp(-r(\theta)^2/r_M^2) \\ &\quad \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda(\theta))^2}{\Delta\lambda^2}\right] dr(\theta) \end{aligned} \quad (21)$$

와 같이 구할 수 있다.

3. 전산 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 각 층의 매질은 참고문헌 [8]에서와 같은 것으로 한다. 동작 파장은 광섬유에서 분산이 최소로 되는 영역인 $1.3 \mu\text{m}$ 로 선택하고 동작 파장에서 투명한 InP 기판을 사용한다. Spacer 층을 $35\text{-}\text{\AA}$ well과 $58\text{-}\text{\AA}$ 의 barrier로 이루어진 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ multi-quantum well 구조로 하였다. Spacer의 광학적 두께는 반파장의 다섯 배로 하였고, 거울은 높은 굴절율 층을 $\text{Ga}_{0.33}\text{Al}_{0.15}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 로 하고 낮은 굴절율 층을 $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ 로 하는 quarter-wave stack 구조로 하였다. 동작 파장 $1.3 \mu\text{m}$ 에서 각 매질의 굴절율은 spacer 층 매질은 약 3.41, 높은 굴절율 층 매질은 약 3.56 그리고 낮은 굴절율 층 매질은 약 3.28 정도이다.^[12,13] 양 쪽 다층막 거울의 층 수는 최대 투과율 조건^[7]을 만족하기 위하여 상위 거울은 24 층, 하위 거울은 38 층으로 한다. 이와 같은 구조를 가진 etalon에서 상위 거울의 반사율은 0.842이고 하위 거울 반사율은 0.835로 되어 산란 손실과 흡수율이 없다고 가정하였을 때, 투과율 특성은 피크가 거의 1이고 선폭은 4 nm로 나타난다.^[8,9] 먼저, spacer 층의 흡수율에 대한 투과율 특성을 살펴본다. 흡수 계수 α 는 식 (2)에서와 같이 단위 길이당 흡수로 나타내며 단위는 cm^{-1} 이다. 그림 3은 spacer 층의 흡수 계수 α 에 대한 피크 투과율과 선폭의 변화 특성을 그린 것이다. 흡수 계수 α 에 대한 피크 투과율은 흡수율이 커짐에 따라 처음에는 급격히 감소하다가 점차 기울기가 완만해지는 지수 함수적인 특성을 가진다. 그래서, 900 cm^{-1} 의 흡수 계수에서 피크가 반으로 된다. 선폭은 흡수 계수의 증가에 대하여 거의 선형적으로 증가한다. 그래서, 100

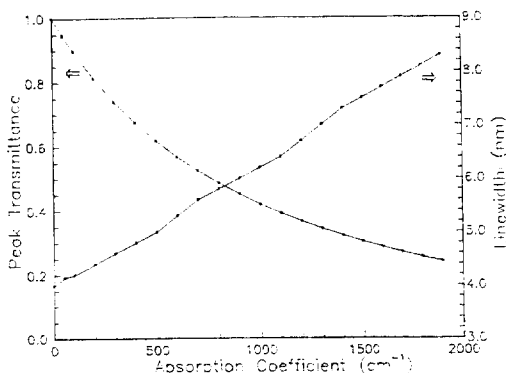


그림 3. 흡수 계수에 대한 피크 투과율과 선폭의 변화.

cm^{-1} 의 흡수율 증가에 대하여 거의 0.23 nm 가량의 선폭이 증가한다. 그리고, 흡수 계수 $\alpha=1800 \text{ cm}^{-1}$ 에서 선폭이 두 배로 증가되어 8 nm 로 된다.

둘째는 산란 손실 ρ 에 대한 투과율 특성을 산란 손실이 있는 경우의 단일층의 특성 행렬 식 (12)를 이용하여 분석한다. 그림 4는 산란 손실 ρ 에 대한 투과율의 피크와 선폭의 특성을 나타낸 것이다. 피크 투과율의 변화는 흡수율에서와 마찬가지로 지수 함수적으로 감소하여 0.0015의 산란 손실에서 피크의 반으로 된다. 그리고, 산란 손실이 0.001 증가할 때 0.9 nm 의 선폭이 증가하는 선형적인 변화 특성을 나타낸다.

세째는 입사빔을 focusing하였을 때의 etalon의 동작 특성을 살펴본다. 식 (18)의 투과율 특성에서 피크 T_p 가 1이고 4 nm 의 선폭을 가지도록 가우시안 분포를 설정한다. 그림 5는 렌즈에 의한 최대 입사각에 대한 투과율의 피크와 선폭의 특성이다. 8° 이하의 입사각에서는 피크 투과율과 선폭의 변화는 매우 작음을 알 수 있다. 그러나, 입사각이 8° 이상일 때 피크는 급격히 작아지고

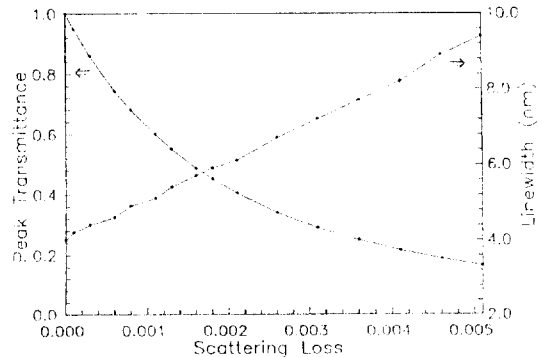


그림 4. 산란 손실에 대한 피크 투과율과 선폭의 변화.

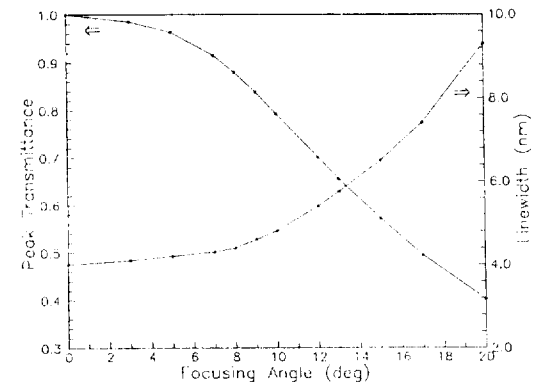


그림 5. 최대 focusing 입사각에 대한 피크 투과율과 선폭의 변화.

선폭은 크게 넓어져 17°의 입사각에서 피크 투과율이 반으로 되고 18°의 입사각에서는 선폭이 두 배로 증가한다. 그리고, 입사각(incident focusing angle)이 커짐에 따라 피크 파장은 단파장으로 이동한다. 여러 각도의 비스듬한 입사에서 spacer의 유효 두께(effective thickness)는 식 (4)에 의하여 알 수 있다. 식 (4)에서 입사각이 커지면 spacer의 유효 두께가 작아짐을 알 수 있습니다. 층의 두께가 줄어드는 효과에 의하여 식 (19)에서 알 수 있는 것과 같이 피크 파장이 단파장으로 이동한다. 이러한 피크 파장의 이동으로 인하여 입사빔을 focusing 하는 경우에 식 (21)에 의하여 피크 파장이 단파장으로 이동한다.

IV. 결 론

Spacer 층의 흡수율과 다층박막의 경계에서의 산란에 의한 손실, 그리고 입사빔을 focusing하였을 때 입사각의 변화에 따른 투과율 특성에서 피크와 선폭의 변화를 살펴본다. 흡수율과 산란 손실이 증가함에 따라 피크 투과율은 지수함수적으로 감소하고 선폭은 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, focusing된 빔 입사각에 대한 피크 투과율과 선폭의 특성은 8° 이하의 작은 각에서는 거의 변화가 없고 8° 이상의 큰 각에서는 변화가 큰 것으로 나타났다. 또, 피크 파장은 입사각이 증가함에 따라 단파장 영역으로 이동한다. 이상의 결과로 투과율의 피크와 선폭, 그리고 피크 파장에 영향을 주는 요인들과 각 요인에 대한 etalon의 동작 특성을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Melles Griot, Optics Guide 4, Melles Griot Co., 1990.
- [1] U. Kruger and K. Petermann, IEEE J. Quantum Electron. **26**, 2058(1990).
- [3] J. Faist, J.-D. Ganiere, Ph. Buffat, S. Sampson, and F.-K. Reinhart, J. Appl. Phys. **66**, 1023(1989).
- [4] P. L. Gourley, R. M. Biefeld, T.J. Drummond, and T. E. Zipperian, SPIE Quantum well and Superlattice Phys. **792**, 178(1987).
- [5] T. Sakaguchi, E. Koyama and K. Iga, Electron. Lett. **24**, 928(1988).
- [6] B. G. Sfez, J. L. Oudar, J. C. Michel, R. Kuszelewicz, and R. Azoulay, Appl. Phys. Lett. **57**, 1849 (1990).
- [7] G. Khitrova, T. Iwabuchi, C. L. Chuang, and T. Yoon, J. Appl. Phys. **69**, 6704(1991).
- [8] 정중술, 윤태훈, 김재창, 대한전자공학회 하계종합 학술발표대회논문집, 14권 1호, 523(1991).
- [9] 정중술, 윤태훈, 김재창, 대한전자공학회 추계종합 학술발표대회논문집, 14권 2호, 483(1991).
- [10] 정중술, 윤태훈, 김재창, 대한전자공학회 추계종합 학술발표대회논문집, 14권 2호, 486(1991).
- [11] H. A. Macleod, Thin-Film Optical Filters, 2nd ed., New York, Macmillan, 1986.
- [12] S. Nojima and H. Asahi, J. Appl. Phys. **63**, 479 (1988).
- [13] A. J. Moseley, J. Thompson, D. J. Robbins, and M. Q. Kearley, Electron. Lett. **25**, 1717(1989).

Linewidth and Peak Transmission of an Integrated-Mirror Etalon

Jong-Sool Jung, Tae-Hoon Yoon and Jae-Chang Kim
 Department of Electronics Engineering, Pusan National University

(Received: November 8, 1991)

In this work we analyze effects on the spectra of an integrated-mirror etalon by the absorption in a spacer layer, scattering loss at the interfaces between layers, and the focusing of incident beam.