

論文2003-40SD-8-6

반사 스펙트럼을 이용한 VCSEL 에피층의 두께 오차 평가

(Estimating the Thickness Errors in Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Structures from Optical Reflection Spectra)

金南吉*, 金相培**

(Nam Gil Kim and Sang Bae Kim)

요약

vertical-cavity surface-emitting laser(VCSEL) 웨이퍼에서 측정된 반사 스펙트럼을 전달 매트릭스 방법으로 계산한 반사스펙트럼과 비교함으로써비파괴적인 방법으로 구조적인 두께 오차가 발생한 층을 찾아 내고 오차의 크기를 추정하는 방법론을 제시하였다. DBR 층의 오차를 종합하여 나타낸 n-DBR 층의 두께 오차, 즉 유효 오차를 도입하면, 반사 스펙트럼의 모양은 유효 오차에만 의존한다는 사실에 이 방법의 근거를 두고 있다. 활성층 영역의 두께 오차는 Fabry-Perot 발진파장에만 영향을 주며, 랜덤 두께 오차의 표준 편차 값이 0.005 이하일 때 측정과 계산된 반사 스펙트럼의 비교는 신뢰성을 갖는다. 이 방법론은 VCSEL 웨이퍼 제작시 측정되는 반사 스펙트럼을 이용하므로 비파괴적이며, 0.5 nm의 두께 오차를 찾아 낼 수 있을 정도로 정밀도가 높다.

Abstract

By comparing the measured optical reflection spectra with calculated one by the transfer-matrix method (TMM) in epitaxial wafers for vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs), we have estimated the systematic thickness errors in a simple and nondestructive way. The experimentally confirmed technique is based on the finding that the shape of the reflection spectra depends mainly on a newly defined single parameter, the effective error in the n-mirror layers, and the thickness error in the active cavity simply shifts the Fabry-Perot resonance wavelength. Also shown is that the proposed method is reliable when the relative standard deviation of the random thickness errors is less than 0.005. Because reflection spectra are routinely measured, we can easily estimate the thickness errors nondestructively with high spatial resolution

Keyword : VCSEL, Semiconductor lasers, vapor deposition, reflectometry

I. 서론

VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)은 낮은 문턱전류, 높은 광변환 효율, 단일 축 방향 모드

동작, 낮은 온도 의존성 등의 우수한 특성에 저가격의 장점까지 갖추어 optical LAN, interconnection 등의 응용에 이상적인 광원으로 여겨지고 있다. 이러한 여러 가지 장점들은 VCSEL의 복잡한 에피 구조에서 비롯된 것들이다. 따라서 VCSEL의 대량생산에는 복잡한 구조의 정밀한 에피택시가 필수적이다. metal-organic

* 學生會員, ** 正會員, 亞洲大學校 電子工學部
(School of Electronics Engineering, Ajou University)
接受日字:2002年10月23日, 수정완료일:2003年8月6日

chemical vapor deposition (MOCVD)^[1, 2]와 같은 현재의 에피택시 기술이 놀랄 만큼 발전했다 하여도 VCSEL의 DBR mirror를 기를 때 나타나는 구조적인 두께 오차와 랜덤 두께 오차를 피할 수는 없다. DBR mirror의 두께 오차는 VCSEL의 성능과 생산수율에 큰 영향을 주기 때문에 두께 오차를 최소화하여야 한다. 특히 LAN 응용에 균일한 특성의 VCSEL array와 파장 다중화 방식용 VCSEL이 요구됨에 따라 두께 오차를 줄이는 문제는 더욱 중요하게 되었다. 이전의 여러 연구^[3, 5]에서는 DBR mirror 에피층이 정확히 길러졌는지를 판단하기 위해서 반사 스펙트럼의 발진파장, stopband 폭 등 반사 스펙트럼의 일부분만을 이용하였다. 그러나, DBR mirror층의 두께에 대한 정보를 지니고 있는 반사 스펙트럼의 sideband 부분을 포함한 전체적인 형태를 이용하여 VCSEL 에피층에 얼마 정도의 두께 오차가 생겼는지를 알아낼 수 있는 방법론에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 이 논문에서는 반사 스펙트럼 sideband의 전체적인 형태와 평행 이동 정도를 이용하여 비파괴적인 방법으로 광학적 두께 오차와 오차가 나타난 층을 찾아내는 방법론에 대하여 기술하고자 한다. 이 방법은 빠르고 비파괴적이며 spatial resolution이 좋아, 웨이퍼 전체의 평균적 두께 오차는 물론, 부분별 두께 오차까지 평가할 수 있어 VCSEL 에피층 평가에 유용한 방법이 된다.

II. 두께 오차가 반사 스펙트럼에 미치는 영향 : 계산 결과

연구에 사용된 DBR mirror의 구조는 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.95}Ga_{0.05}As$ 으로 구성된 21.5쌍의 p-DBR, 39쌍의 n-DBR 그리고 직렬저항을 줄이기 위한 grading층의 조합으로 이루어져 있다. 두께 오차가 나타날 때 VCSEL 구조의 이론적인 반사 스펙트럼을 구하기 위해서 복잡한 격자 구조를 쉽게 해석할 수 있는 전달 매트릭스 방법^[6]을 사용하였다. 전달 매트릭스 방법을 사용하여 반사 스펙트럼을 구하기 위해서는 굴절률과 흡수계수 값들이 필요하다. GaAs의 흡수계수는 Sturge^[7]의 값을 사용하였고, $Al_xGa_{1-x}As$ 의 굴절률은 Kokubo^[8]의 수식을 Casey^[9]의 측정값에 가깝게 수정하여 사용하였다. <그림 1>은 계산에 사용된 광자의 에너지와 Al mole fraction에 따른 굴절률이다. 반사율은 측정하고자 하는 파장의 빛을 웨이퍼에 쏘아서 되돌아 오는

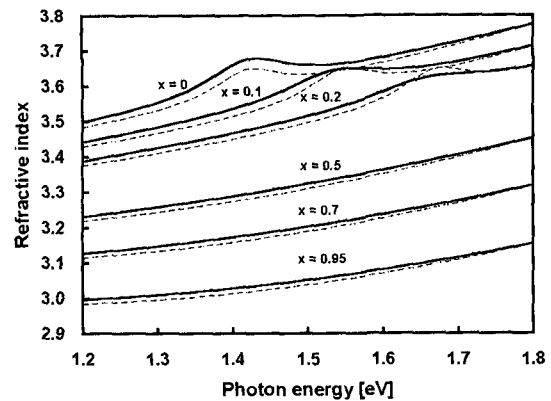


그림 1. Photon energy와 Al mole fraction에 따른 Kokubo^[8] 수식(점선)에 따른 굴절률과 수정된 굴절률(실선)

Fig. 1. Refractive index as a function of photon energy and Al mole fraction for AlGaAs. Dotted lines are taken from Kokubo's^[8] refractive index data while solid lines are corrected refractive index used in this work.

빛의 세기를 측정하여 구한다. 이때 되돌아 오는 빛은 광 필터를 통과하게 되며, 이 광 필터의 투과 특성에 따라 반사 스펙트럼의 모양이 조금 바뀌게 된다. 이 연구에서는 광 필터의 투과율이 중심파장에서 멀어질수록 감소하는 광 필터 특성을 가정하여 구한 값들을 최종 반사율로 하였다. 이 과정은 반사 스펙트럼의 극대점과 극소점 근처에서 파장에 따른 반사율 값의 변화를 완만하게 할 뿐, 반사 스펙트럼의 모양을 바꾸지는 않는다. 광 필터의 반치폭(half width)은 실험 결과와 계산 결과가 일치하도록 조절하였다.

VCSEL의 DBR mirror 구조는 Bragg파장의 빛을 발진시키기 위한 구조를 포함하고 있다. 따라서 DBR mirror 각 층의 광학적 두께는 발진 파장의 1/4이 되도록 성장시켜야 한다. 그러나 에피 성장 공정에서 광학적 두께가 1/4를 벗어나는 두께 오차가 발생하게 된다. 이 연구에서 고려한 두께 오차는 일반적인 에피 성장 공정에서 나타날 가능성이 높은 구조적인 두께 오차이다. 구조적인 두께 오차란 동일한 종류의 DBR층에는 동일한 두께 오차가 나타나는 것을 말한다. DBR mirror는 p-DBR low index(p-LI) 층, p-DBR high index(p-HI) 층, n-DBR low index(n-LI) 층, n-DBR high index(n-HI) 층으로 구분되어 각각 에피가 성장되므로 구조적인 두께 오차가 발생할 가능성이 가장 크다. 구조적인 두께 오차가 아닌 것들은 랜덤 오차에 포

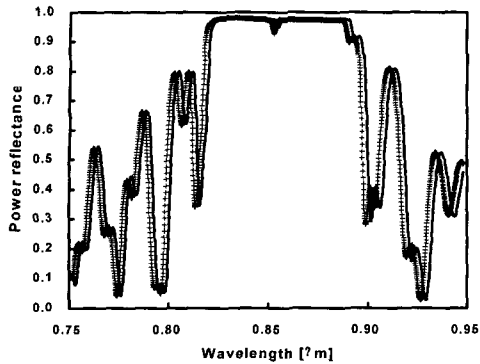


그림 2. n-LI와 n-HI에 각각 두께 오차가 -1%(십자선) p-LI와 p-HI에 각각 두께 오차가+1%(실선)인 경우의 반사 스펙트럼

Fig. 2. The reflection spectra when the thickness error is -1% (+ line) in every layer of n-LI and n-HI layers, and +1% error (solid line) in every layer of p-LI and p-HI layers, respectively.

함시켜 그 영향을 살펴보았다.

<그림 2>는 n-LI층에 -1%, n-HI층에 -1%, p-LI층에 +1%, p-HI층에 +1% 두께 오차가 발생한 경우의 반사 스펙트럼을 함께 그린 것이다. n-LI층에 -1% 두께 오차가 나타난 것과, n-HI층에 -1% 두께 오차가 나타난 반사 스펙트럼은구분이 불가능하다. 마찬가지로 p-LI층에 +1% 두께 오차가 나타난 것과 p-HI층에 +1% 두께 오차가 나타난 반사 스펙트럼도 구분이 불가능하다. 두께 오차가 나타난 DBR mirror층은 다르지만 n-LI층에 -1% 두께 오차가 발생한 반사 스펙트럼을 기준으로 하여 <그림 2>에 나타난 반사 스펙트럼을 비교하면 전체적인 모양은 같으면서 파장 축상에서 평행 이동만 하였음을 알 수 있다. 이에 기초하여 여러 가지 구조적인 두께 오차에 대해 반사 스펙트럼을 살펴보면, DBR 층에 나타난 구조적인 두께 오차 때문에 나타나는 모든 반사 스펙트럼의모양을 n-LI 층의 두께 오차 만으로도 만들어 낼 수 있음을 발견하게 된다. 즉 n-LI, n-HI, p-LI, p-HI 층 모두에 구조적인 두께 오차가 나타났다고 하더라도, 파장축상의 단순 평행이동을 제외한 반사 스펙트럼의 모양은 같은 종류의 DBR 한 층에만 두께 오차를 주어 복제할 수 있다는 것이다. 이에 따라 n-LI층의 두께 오차를 기준으로 반사 스펙트럼의 모양을 분류할 수 있다. 각각의 DBR mirror층에 생긴 두께 오차 때문에 나타난 변화된 반사 스펙트럼의 모양이 그대로 복제되도록 n-LI 층에 준 두께 오차

를 유효 오차로 정의하기로 한다. 그러면, 유효 오차 $\delta_{n,eff}$ 는 단순히 각 층에 나타난 오차의 덧셈, 뺄셈의 형태로 다음과 같이 주어진다.

$$\delta_{n,eff} = \delta_{n,LI} + \delta_{n,HI} - \delta_{p,LI} - \delta_{p,HI} \quad (2)$$

여기에서 δ 은 상대적인 두께 오차를, p, n, LI, HI는 각각 p-DBR, n-DBR, low index, high index 층을 나타낸다. 유효 오차 값이 같으면 각 층의 두께 오차가 서로 다르더라도 동일한 모양의 반사 스펙트럼을 얻게 된다. 이와 같이, 유효 오차 값이 반사 스펙트럼 모양을 결정하게 된다. 유효 오차 값은 동일하지만 각 층의 두

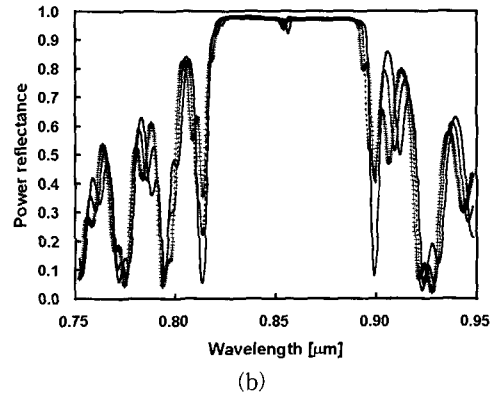
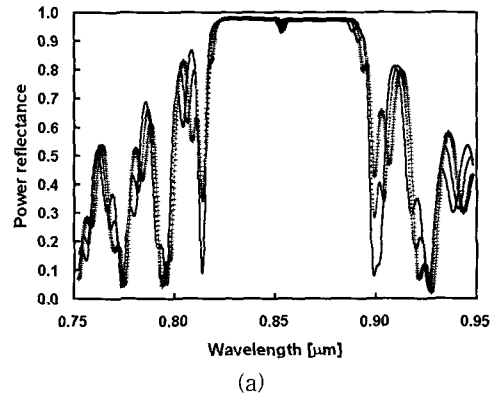


그림 3. n-LI층의 구조적인 두께 오차가 (a) -2%(실선), -1%(점선), 0%(십자선) (b) 0%(십자선), +1%(점선), +2%(실선)인 경우의 반사 스펙트럼의 규칙적인 변화

Fig. 3. Gradualchange of the reflection spectrum with the increase of the systematic thickness errors in the n-LI layers: (a)-2%(solid line), -1%(dot line), and 0%(+ line) (b) 0%(+ line), +1%(dot line), and +2% (solid line) errors.

계가 두꺼워지면 장파장 쪽으로 반사 스펙트럼이 이동함을 알 수 있다. 반대로 유효 오차 값은 동일하지만 각 층의 두께가 얇아지면 단파장 쪽으로 반사 스펙트럼이 이동하게 된다. 따라서 유효 오차를 알아내면 반사 스펙트럼의 이동 정도로부터 두께 오차가 n-DBR에서 발생했는지 아니면 p-DBR에서 발생했는지 알아낼 수 있다. <그림 2>의 경우를 예로 들면 네 가지 두께 오차의 경우에 유효 오차값은 모두 동일하다. 그러나 n-DBR에서 -1% 두께 오차가 발생한 때에는 그 층의 두께가 얇아져 단파장 쪽으로 반사 스펙트럼이 이동하였고, p-DBR에서 +1% 두께오차가 발생한 때에는 그 층의 두께가 두꺼워져 장파장 쪽으로 반사 스펙트럼이 이동하였다.

<그림 3>은 n-LI층 두께 오차 즉, 유효 오차가 -2% ~ +2%로 변해갈 때 전달 매트릭스 방법으로 계산한 반사 스펙트럼이다. 두께 오차에 따른 반사 스펙트럼 변화의 가장 큰 특징 중의 하나는 stopband 밖에 있는 극대점 또는 극소점의 변화와 이동이다. -2%부터 +2%로 두께 오차가 변해갈 때 반사 스펙트럼의 극대점과 극소점은 장파장 영역으로 이동하면서 반사율이 규칙적으로 작아지거나 커짐을 볼 수 있다. <그림 3(a)>를 살펴보면 유효 오차가 -2%에서 0%로 변해갈 때 820nm 근처의 두 극대점 반사율이 왼쪽 극대점에서는 커지고, 오른쪽 극대점에서는 작아지며, 약간씩 장파장으로 이동함을 알 수 있다. 이러한 변화의 경향을 가지고 <그림 3(b)>를 살펴보면 0%오차 계열에서 +2%오차 계열로 갈수록 <그림 3(a)>의 변화 경향을 이어받아 920 nm 영역에서 왼쪽 극대점에서는 커지고, 오른쪽 극대점에서는 작아지며, 약간씩 장파장으로 이동함을 알 수 있다. 이렇게 유효 오차 값에 따라 반사 스펙트럼의 형태가 규칙적으로 달라지므로, 극대점과 극소점의 위치와 반사율을 확인하면 유효 오차의 크기를 쉽게 판단 할 수 있다.

1-λ cavity의 두께 오차도 반사 스펙트럼을 통해서 알 수 있다. 1-λ cavity 두께 오차는 양자우물을 포함한 cavity 내부의 두께 오차를 말한다. DBR mirror의 두께 오차를 동일하게 두고 1-λ cavity 두께 오차를 변화시켜 가며 반사 스펙트럼을 비교하였다. <그림 4>는 DBR mirror의 두께 오차가 없을 때 1-λ cavity 두께 오차를 -1%, 0%, +1%로 변화시켜가며 구한 반사 스펙트럼이다. 전체적인 모양의 변화와 이동현상 없이 발진 파장(Fabry-Perot resonance dip)만이 변화함을 알 수

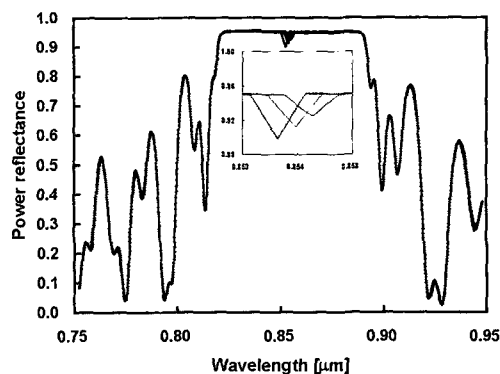


그림 4. 1-λ cavity 두께 오차가 -1%(점선), 0%(실선), +1%(십자선)인 경우의 반사 스펙트럼의 변화
Fig. 4. Change of the reflection spectrum with the thickness errors in the 1-λ cavity: -1%(dot line), 0%(solid line), and +1%(+ line) errors.

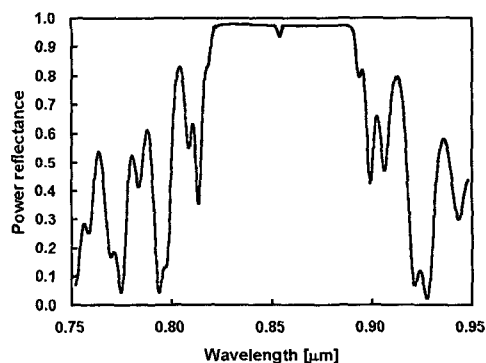


그림 5. 두께 오차가 없을 때의 반사 스펙트럼과 n-LI 층에 +1% 두께 오차와 n-HI층에 1% 두께 오차가 동시에 나타난 반사 스펙트럼의 비교. 두 반사 스펙트럼 사이에 차이가 없다.
Fig. 5. Comparison of reflection spectrum for 0% systematic thickness error with +1% thickness error in the n-LI layers and -1% thickness error in the n-HI layers. There is no difference between the two.

있다. 따라서 1-λ cavity의 두께 오차는 발진파장에만 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 850nm VCSEL 구조에서 1-λ cavity의 두께 오차가 1%이면 발진파장은 1.2nm 정도 이동한다.

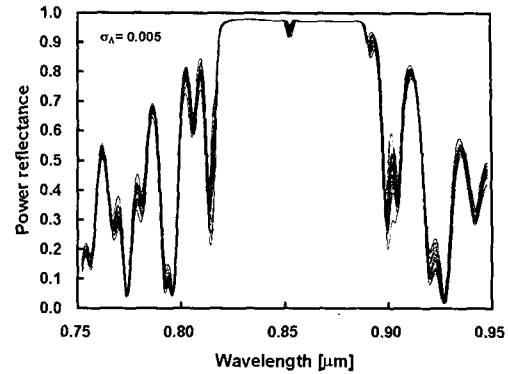
반사 스펙트럼을 이용하여 두께 오차가 발생한 층을 찾아내는 데에는 한계점이 있다. n-LI층에서 +1% 오차가 발생하고 동시에 n-HI층에서 -1% 오차가 발생했다면 (1)식으로부터 두께 오차가 상쇄되어 유효 오차가 0%가 되므로 두께 오차가 없는 반사 스펙트럼과 같게 된다. 즉 n-DBR 또는 p-DBR의 HI, LI 층 오차가 상

쇄되어 유효오차 값이 0이 된다면 두께 오차를 찾아 낼 수 없다. <그림 5>는 $\delta_{n,II} = +1\%$, $\delta_{n,III} = -1\%$ 로 유효 오차 값이 0이 되어 두께 오차를 찾아 낼 수 없는 경우를 보여준다. 이렇게 II 층의 두께 오차와 III층의 두께 오차는 반사 스펙트럼만으로 구분하기는 어렵다. 그러나 유효 오차가 0이어도 반사 스펙트럼의 이동 정도로부터 p-DBR에서 발생한 두께 오차와 n-DBR에서 발생한 두께 오차는 분별할 수 있다. 이처럼 반사 스펙트럼을 이용한 두께 오차 측정 방법에는 찾아 낼 수 없는 두께 오차가 존재한다는 한계점이 있다. 그러나 DBR에서 서로 상쇄되게 나타나는 구조적인 두께 오차는 VCSEL 특성에 영향을 주지 않는다. 위의 사실을 토대로 반사 스펙트럼을 이용하여 두께 오차를 알아내는 순서를 알아보면 다음과 같다. 첫째, 반사 스펙트럼의 전체적인 형태를 비교하여 유효 오차를 찾아낸다. 둘째, 전체적인 이동 정도를 알아내어 오차가 나타난 층이 n-DBR인지, p-DBR인지를 찾아낸다. 마지막으로 발진 파장의 위치를 판단하여 $1-\lambda$ cavity의 두께 오차를 알아낸다.

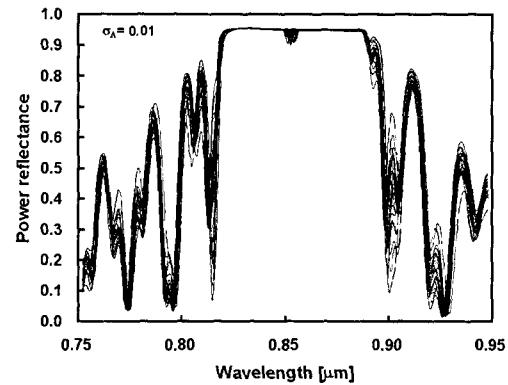
에피를 성장시킬 때, 각각의 DBR mirror 층에 구조적인 두께오차와 동시에 랜덤 오차가 발생한다. 따라서 이론적인 반사 스펙트럼을 측정 결과와 비교하기에 앞서 랜덤 오차의 영향을 고려해야 한다. 이를 위하여 각각의 에피층 두께의 랜덤 오차를 난수생성기로 만든 난수 집합을 이용하여 모델링하였다. 이 난수 집합의 난수들은 Gaussian 분포를 따르는 것으로 가정하였으며, 평균은 0, 표준편차는 1이다. 이 난수 집합을 이용하여 두께 오차의 랜덤 변이를 포함한 k 번째 DBR mirror 에피층의 두께를 나타내면 다음과 같다¹⁰⁾.

$$d_k = d_{k0}(1 + \sigma_A v_k) \quad (2)$$

여기에서, d_{k0} , σ_A 그리고 v_k 는 각각 k 번째 DBR mirror 에피층의 평균 두께, scaling factor, 그리고 k 번째 난수의 값을 나타낸다. (2)식으로부터 σ_A 는 d_{k0} 에 의해 정규화된 DBR mirror 에피층 두께 오차 랜덤 변이의 표준편차임을 알 수 있다. <그림 6>은 유효 오차가 -1% 일 때 랜덤 오차를 추가하여 구한 이론적인 반사 스펙트럼이다. <그림 6(a)>는 σ_A 값이 0.005일 때의 반사 스펙트럼이다. 극대점과 극소점 부근에서 랜덤 오차의 영향으로 약간씩 반사율이 차이가 나타나지만, 전체적인 형태는 랜덤 오차를 고려하지 않은 반사 스펙



(a)



(b)

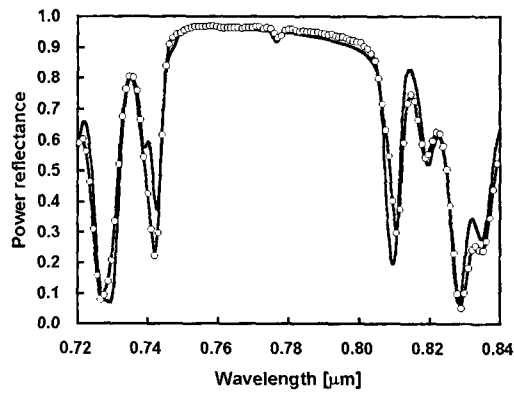
그림 6. n-II층에 -1% 의 구조적인 두께 오차가 있는 경우에 랜덤변이의 크기를 나타내는 σ_A 값이 (a) 0.005, (b) 0.01일 경우의 반사 스펙트럼의 변화

Fig. 6. Change in the reflection spectra by random thickness errors when the systematic thickness error is -1% in the n-II layers. The relative standard deviation σ_A is (a) 0.005, and (b) 0.

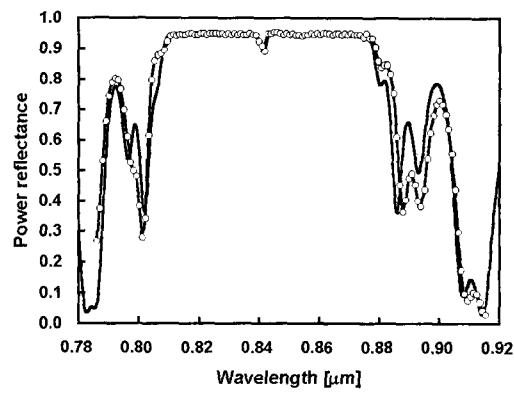
트럼과 크게 다르지 않아 유효 오차를 찾아내는 데에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 따라서 σ_A 값이 0.005 이하이면 랜덤 오차의 영향은 무시할 수 있다. <그림 6(b)>는 σ_A 값이 0.01일 때의 반사 스펙트럼이다. 전체적인 형태가 -1% 유효 오차 반사 스펙트럼과 큰 차이를 보인다. 따라서 σ_A 값이 0.005이하가 되도록 에피를 성장시킬 수 있어야 두께 오차 추정에 반사 스펙트럼을 이용할 수 있다. 이 σ_A 값은 현재의 MOCVD 기술로 충분히 얻을 수 있는 수준이다.

Ⅲ. 반사 스펙트럼 측정 결과 및 두께 오차의 평가

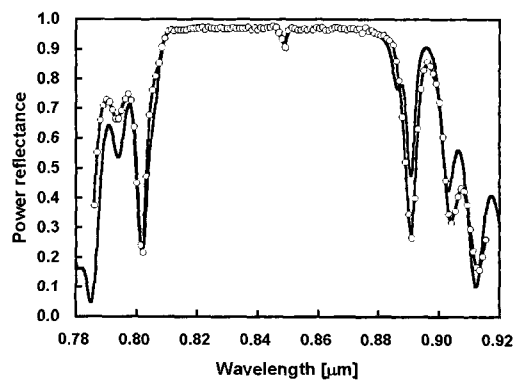
반사 스펙트럼 측정에 사용된 VCSEL 웨이퍼는 MOCVD 방법으로 성장되었다. DBR mirror의 구조는 시뮬레이션에 사용한 구조와 동일하다. 반사 스펙트럼



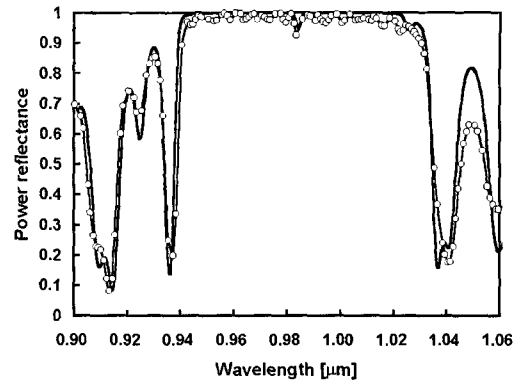
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 측정(원형선)과 이론(실선)으로 구한 반사 스펙트럼의 비교를 통한 두께 오차 추정의 예. (a) 780 nm VCSEL 웨이퍼의 중심에서 측정된 반사 스펙트럼은 n-LI층에 1% 두께 오차가 있는 이론적인 반사 스펙트럼과 가장 잘 일치한다. (b) 850 nm VCSEL 웨이퍼의 중심에서 측정된 반사 스펙트럼과 오차가 없는 이론적인 반사 스펙트럼과 가장 잘 일치하며, (c) 850 nm VCSEL 웨이퍼의 가장자리에서 측정된 반사 스펙트럼과 n-LI층에 +4% 두께 오차와 1-λ cavity에 +3% 두께 오차가 동시에 발생한 이론적인 반사 스펙트럼과 가장 잘 일치한다. 그리고 (d) 980nm VCSEL 웨이퍼의 중심에서 측정된 반사 스펙트럼과 p-LI층에 +1.5% 오차가 있는 이론적인 반사 스펙트럼과 가장 잘 일치한다.

Fig. 7. Measured (circled line) and simulated (solid line) reflection spectra are superposed as examples of estimating the error. (a) The spectrum measured at the center of a 780 nm VCSEL wafer is best matched to the calculated one with -1% systematic error in the n-LI layers. (b) The spectrum measured at the center of an 850 nm VCSEL wafer is best matched to the calculated one with zero systematic error. (c) While the one measured at the edge of an 850 nm VCSEL wafer is best matched with +4% systematic errors in the n-LI layers and +3% errors in the 1-λ cavity (d) The spectrum measured at the center of a 980 nm VCSEL wafer is best matched to the calculated one with +1.5% systematic errors in the p-LI layers.

의 측정에는 BIO-RAD RPM2000 Rapid Photoluminescence Mapper를 사용하였다. <그림 7(a)>는 780 nm VCSEL 웨이퍼의 중심에서 측정된 반사 스펙트럼이다.

n-LI 층에 -1%의 구조적인 두께 오차가 있는 경우의 이론적인 반사 스펙트럼과 전체적으로 가장 잘 일치한다. 측정된 반사 스펙트럼과 계산 결과 사이에 극대점과 극소점에서 약간의 차이가 나타나는 이유는 앞에서 언급한 랜덤 오차의 영향이다. σ_A 값이 0.005 이하라 하여도 극대점과 극소점에서는 약간의 반사율 차이가 나타나게 된다. 이에 비추어 측정에 사용된 780 nm VCSEL 웨이퍼의 중심부분에서는 n-LI 층에 -1%의 구조적인 두께 오차가 발생했다고 판단할 수 있다.

<그림 7(b)>, <그림 7(c)>는 동일한 850nm VCSEL 웨이퍼 상에서 측정된 반사 스펙트럼 중에서 가장 작은 두께 오차와 가장 큰 두께 오차를 보이는 것을 이론적인 반사 스펙트럼과 비교한 것이다. <그림 7(b)>를 살펴보면 웨이퍼 중심 부분에서 측정된 반사 스펙트럼은 유효 오차가 0%일 때의 이론적인 반사 스펙트럼과 잘 일치함을 알 수 있다. 측정 결과와 이론적인 반사 스펙트럼이 전체적인 모양과 정지밴드 폭 등에서 잘 일치한다. <그림 7(c)>는 n-LI 층에 +4%, 1- λ cavity에 +3% 두께 오차가 발생하였다고 가정하고 계산한 반사 스펙트럼과 웨이퍼 가장자리에서 측정한 결과를 비교한 것이다. 마찬가지로 전체적인 모양과 정지밴드 폭이 잘 일치한다. <그림 7(b)>에서 나타나지 않은 1- λ cavity에서의 두께 오차가 나타났음을 볼 수 있다. 1- λ cavity에 +1% 두께 오차가 발생하면 발진파장이 +1.2nm 정도 이동한다. 발진파장이 장파장 방향으로 3.6nm 정도 이동한 것으로부터 +3% 두께 오차가 있음을 추정할 수 있다. 동일한 웨이퍼의 여러 지점에서 반사 스펙트럼을 측정하여 두께 오차를 추정하면 자연스럽게 on-wafer uniformity를 판단할 수 있는 자료가 된다. VCSEL은 웨이퍼 상태에서 곧 바로 반사 스펙트럼을 측정할 수 있으므로 비파괴적인 방법으로 on-wafer uniformity를 평가할 수 있다.

<그림 7(d)>는 980 nm VCSEL의 웨이퍼 중심에서 측정된 반사 스펙트럼이다. p-LI 층에 +1.5% 두께 오차가 있는 계산된 반사 스펙트럼과 가장 잘 일치한다. 앞에서 살펴본 것처럼 780, 850, 980 nm VCSEL 구조 모두에서 측정된 반사 스펙트럼을 계산 결과와 비교함으로써 두께 오차의 크기와 오차가 발생한 층을 알아낼 수 있었다. 이 방법은 비파괴적인 방법으로 빠르고 간편하며, spatial resolution 또한 좋기 때문에 VCSEL 에피 웨이퍼는 물론 다른 AlGaAs 다층 구조 분석에도 유용하게 사용될 수 있다.

IV. 결 론

측정된 반사 스펙트럼과 전달 매트릭스 방법을 사용하여 계산한 반사 스펙트럼의 전체적인 모양과 평행이동 정도의 비교를 통하여 비파괴적인 방법으로 DER mirror 층 및 1- λ cavity 층 두께 오차를 평가할 수 있는 방법론을 제시하였다. 유효 오차 개념을 도입하여 여러가지 경우의 구조적인 두께오차를 단순화하여, 비교적 쉽게 두께 오차를 찾아내었다. 이 방법론은 랜덤 오차의 σ_A 값이 0.005 이하일 때 사용할 수 있고, 유효 오차가 0이 될 경우에는 두께 오차를 찾아 낼 수 없는 한계점을 가지고 있다. 그러나 한 층에 나타난 구조적인 두께 오차를 0.5 nm 이하의 정밀도로 측정할 수 있을만큼 높은 정밀도를 갖고 있다. 또한 두께 오차를 찾아내는 과정을 웨이퍼 전체에서 반복하면 에피 웨이퍼의 균일도를 평가할 수 있다. 그러므로 이 방법은 VCSEL의 생산수율을 향상시키는 데에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] M. K. Hibbs-Brenner, R. A. Morgan, R. A. Walterson, J. A. Lehman, E. L. Kalweit, S. Bounnak, T. Marta, and R. Gieske, "Performance, uniformity, and yield of 850-nm VCSEL's deposited by MOVPE," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 1, pp. 7-9, Jan. 1996.
- [2] H. Q. Hou, H. C. Chui, K. D. Choquette, B. E. Hammons, W. G. Breiland, and K. M. Geib, "Highly uniform and reproducible vertical-cavity surface-emitting lasers grown by metalorganic vapor phase epitaxy with in situ reflectometry," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 10, pp. 1285-1287, Oct. 1996.
- [3] J. L. Jewell, Y. H. Lee, S. L. McCall, J.P. Harbison, and L. T. Florez "High-finesse (Al,Ga)As interference filters grown by molecular beam epitaxy," J. Appl. Phys., vol. 53, no. 8, pp. 640-642, Aug. 1988.
- [4] J. D. Walker, K. Malloy, S. Wang, and J. S. Smith, "Precision AlGaAs Bragg reflectors

- fabricated by phase-locked epitaxy," Appl. Phys. Lett., Vol. 56. no. 18, pp. 2493~2495, June 1990.
- [5] C. Lei, T. J. Rogers, D. G. Deppe, and B. G. Streetman "InGaAs-GaAs quantum well vertical-cavity surface-emitting lasers using molecular beam epitaxial regrowth," J. Appl. Phys., vol. 58., no. 11, pp. 1122~1124, Mar. 1991.
- [6] 김상배, "집적형 1/4 위상천이 회절격자 필터의 제작성 연구" 전자공학회 논문지 제 36권 D편, 제 6호, pp. 52~60, 1999년 6월
- [7] M. D. Sturge, "Optical absorption of Gallium Arsenide between 0.6 and 2.75eV," Phys. Rev., vol. 127, no. 3, pp. 768~773, Aug. 1962.
- [8] Y. Kokubo and I. Ohta, "Refractive index as a function of photon energy for AlGaAs between 1.2 and 1.8eV," J. Appl. Phys., vol. 81, no. 4, pp. 2042~2043, Feb. 1997.
- [9] H. C. Casey, Jr., D. D. Sell, and M. B. Panish, "Refractive index of Al_xGa_{1-x}As between 1.2 and 1.8eV," Appl. Phys. Lett., vol. 24. no. 2, pp. 63~65, Jan. 1974.[10] J. W. Han, J. H. Cha, and S. B. Kim, "Effects of the random fluctuation in grating period on the characteristics of quarter-wavelength-shifted DFB Lasers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 11, no. 12, pp. 1569~1571, Dec. 1999.

저 자 소 개



金 南 吉(正會員)
 2002년 2월 : 아주대학교 전자공학
 부 졸업(공학사). 2002년 2월~현
 재 : 아주대학교 대학원 전자공학
 부 재학생

金 相 培(正會員) 第37卷 SD編 第8號 參照
 현재 : 아주대학교 전자공학부 교수