

## 매립형 InGaAsP/InP 레이저 다이오드 제작을 위한 질량 이동 현상에 관한 연구

최인훈 · 이종민 · 신동석 · K.E. Singer\*

고려대학교 재료공학과

\*The Centre for Electronic Materials, UMIST

### A Study on Mass Transport for InGaAsP/InP Buried Heterostructure Laser Diode

In-Hoon Choi, Jong-Min Lee, Dong-Suk Shin and K.E. Singer\*

Department of Materials Science, Korea University, Seoul 136-701

\*The Centre for Electronic Materials, UMIST

(1996년 9월 20일 받음, 1998년 3월 10일 최종수정본 받음)

**초 록** 매립형 InGaAsP/InP 레이저 다이오드 제작을 위한 질량 이동 현상의 최적화에 대한 연구를 수행하였다. Double heterostructure 레이저 다이오드 구조의 1차 성장층은 액상 에피 성장 장치를 이용하였으며, 메사 에칭하였다. 활성층을 [110] 방향으로 선택적으로 에칭 한 후, 액상 에피 성장 장치를 이용하여 질량 이동 현상을 발생시켜 매립형 구조를 형성시켰다. 질량 이동 현상의 임계온도는 40분간 유지시켰을 때 670°C로 나타났으며 재현성 있게 질량 이동 현상이 발생하였다. 질량 이동 현상에 의해 성장된 층의 폭은 온도증가에 따라 약간 증가하였다.

**Abstract** The conditions for optimizing mass transport for making buried heterostructure (BH) InGaAsP/InP lasers are discussed. The double heterostructure InGaAsP/InP laser structures were grown by Liquid Phase Epitaxy (LPE) and etched into mesas. The active layer was selectively etched along [110] and the mass transport was carried out in the LPE reactor to cover the sides of the active layer and form a BH structure. The threshold temperature for the appreciable mass transport is measured to be 670°C when the holding time is set to 40 min. The width of the region re-filled by mass transport is observed to increase as the temperature increases.

### 1. 서 론

1980년대 들어와서 실리콘계 광섬유의 개발로 인하여 광통신용 반도체 레이저 다이오드는 발진파장이 0.85  $\mu\text{m}$ 인 단거리 통신용 AlGaAs/GaAs 계에서 1.3~1.6  $\mu\text{m}$  대에서 빛을 내는 장거리 통신용 InGaAsP/InP 계의 개발로 넘어가게 되었다. 선진국에서는 1.3  $\mu\text{m}$  장거리 통신용 레이저 다이오드가 중거리 40 km, 전송용량 2 Gb/s의 대용량 시스템용으로 개발되었고, 보다 장거리 광통신에 사용되는데는 1.55  $\mu\text{m}$  레이저 다이오드도 곧 상용화 될 100 km 이상의 광통신 시스템에 사용될 전망이다. 이에 국내에서도 21세기 정보화 사회를 대비한 광 전송망 구축을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. Buried heterostructure (BH) 레이저 다이오드 구조는 다른 구조의 레이저 다이오드에 비해 발진 문턱 전류가 낮고, 연속 발진이 가능하다. 또한, 전류에 대한 광 출력이 선형적이고 구조가 간단하며 다른 광소자 및 전자 소자와의 집적화가 용이하다는 장점이 있다. BH 레이저 다이오드 구조에는 다양한 형태가 있으며 또한 BH 레이저 다이오드 구조를 구현하기 위한 많은 방법이 연구되어 왔다. 본 실험에서는 InGaAsP/InP 계 레이저 다

이오드 제작에 질량 이동 현상을 응용할 목적으로 이의 최적의 조건에 관해 연구하였다. 질량 이동 현상을 이용해서 레이저 다이오드를 제작할 때는 정밀한 제어가 필요한 solution에 의한 2차, 3차 성장이 불필요하므로 성장 공정이 간단해진다는 장점이 있다. 또한, 보고된 바에 따르면 질량 이동 현상에 의한 BH 레이저 다이오드는 매우 낮은 임계 발진 전류 값을 가지며 매끄러운 far field pattern을 갖고, 성장된 질량 이동 층이 활성층(active layer)을 잘 보호해 주어 산란손실을 줄여 주는 장점이 있다.<sup>1,2)</sup> 특히, 이 방법에 의한 레이저 다이오드는 낮은 기생 캐패시턴스를 가져 고속 광전자 집적회로에 적합하다. 따라서, 적절한 열처리에 의해 질량 이동 현상을 발생시켜 집적화 되는 광소자에 응용하는 연구가 많은 관심을 얻고 있다.<sup>3)</sup> 질량 이동 현상에 의해 제작된 레이저 다이오드는 8.5 GHz의 고속특성이 보고된 바 있으며, InP 재성장의 정밀한 제어에 의해 임계 전류도 4.5 mA를 나타내었다.<sup>4,5)</sup> InP의 질량 이동 현상은 distributed-feedback (DFB) 레이저 다이오드에도 응용될 수 있다.<sup>6)</sup> 하지만, 국내에서는 InP의 질량 이동 현상에 관한 연구가 거의 보고된 바 없으므로 본 연구에서는 재현성 있는 질량 이동 현상을 얻을 수 있는 최적의 조건을 찾

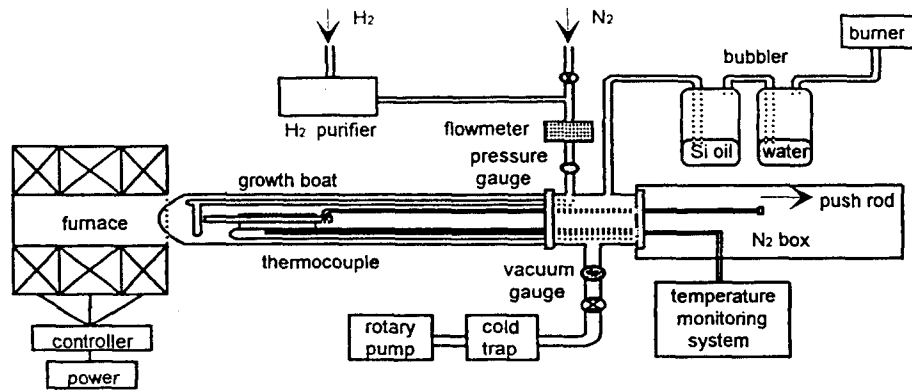


Fig. 1. The schematic diagram of InGaAsP/InP LPE system.

기 위한 연구를 수행하였다. 즉, 레이저 다이오드에의 응용을 위해 1차 성장과 활성층의 폭을 조절하기 위한 에칭 공정, 이후 질량 이동 현상을 이용한 레이저 다이오드 제작 시 고려해야 할 온도 변화와 질량 이동 현상의 관계를 살펴 보았다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서 사용한 레이저 다이오드 구조는 S-doped n-type (001) InP 기판 위에 double heterostructure (DH) 구조의 InP/InGaAsP/InP 층을 성장시켰다. 에피층은 액상 에피 성장법을 이용하여 성장시켰으며 사용한 액상 에피 성장장치의 개략도는 그림 1과 같다.

에피층의 구조는 기판 위에 도핑 농도가  $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  인 n-type InP 버퍼층(buffer layer)을 성장시키고  $1.3 \mu\text{m}$ 의 발진 파장을 갖는 undoped InGaAsP 활성층과 도핑 농도가  $3.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 인 클래드층(clad layer)을 성장한 후, 접촉 저항을 줄이기 위해서 도핑 농도가  $9.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 인 n+ InGaAsP 캡층(cap layer)을 성장시켰다. 액상 에피 성장법을 이용한 DH 레이저 다이오드 구조의 1차 성장에는 2상 과냉법(two phase supercooling method)을 사용하였다.<sup>7)</sup> 성장한 레이저 다이오드 구조는 double crystal X-ray diffractometer (DCXRD), photoluminescence (PL) 측정 결과를 이용해서 활성층과 InP 기판과의 격자 정합 조건과  $1.3 \mu\text{m}$ 의 발진 파장 영역을 확인하였다. BH 레이저 다이오드 구조를 만들기 위해서는 일반적인 광식각 방법을 사용하여  $[\bar{1}10]$  방향으로 패턴을 형성시켰다. 에칭 공정으로는 InGaAsP를 선택적으로 에칭하는  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6:\text{KOH}:\text{DI}$ 로 캡층을 에칭한 후 InP를 선택적으로 에칭하는  $\text{HCl}:\text{DI}$ 로 클래드층을 메사 에칭하여 활성층이 노출되도록 하였다. 그 후 InGaAsP 선택적 etchant인  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6:\text{KOH}:\text{DI}$ 로 활성층을 시간을 변화 시켜가며 에칭하면서 활성층의 폭을 조절하였다.<sup>8,9)</sup> 질량 이동 현상 공정은 액상 에피 성장장치를 사용하였다. 에칭된 wafer를 액상 에피 성장장치의 graphite boat 위에 장착하고, 그 위에 InP 기판을 cover로 놓고 graphite plate로 덮어 주었다.  $\text{H}_2$  분위기에서 40분간  $650 \sim 700^\circ\text{C}$ 로 온도를 유지시킨 후

급냉시켰다.<sup>10)</sup> 그림 2는 대표적인 실험 온도 과정을 나타낸 것이다.

Scanning electron microscopy (SEM)를 이용하여 시편의 단면을 관찰하여 질량 이동 현상에 의한 BH 레이저

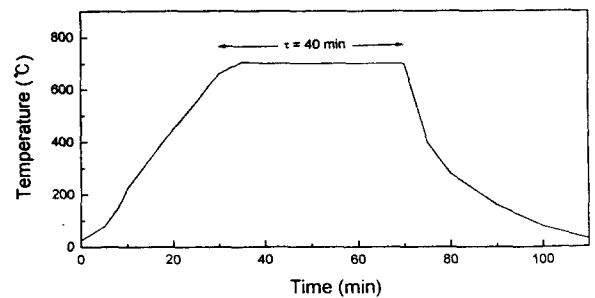


Fig. 2. Temperature cycle for a mass transport process performed at  $700^\circ\text{C}$ . Process time marked as  $\tau$ .

다이오드 구조를 확인하였고 온도에 따른 질량 이동 현상의 변화를 살펴보았다.

## 3. 실험 결과

일반적으로 기판과 에피층의 조성이 다른 이중 접합의 경우 조성 변화에 의한 격자 부정합으로 인해 격자의 뒤틀림, 불순물 등의 영향으로 에피층의 결정성이 떨어지게 된다. 그림 3은 액상 에피 성장법으로 1차 성장된 DH 레이저 다이오드 구조의 DCXRD 결과이다.

InP 기판에 대한 활성층과 캡층의 peak가 나타나 있다. 기판과 활성층과의  $\Delta\theta(\text{arcsec})$ 는  $-56$ , 캡층과의  $\Delta\theta(\text{arcsec})$ 는  $-82$ 이었다.  $\Delta\theta(\text{arcsec})$  값으로부터 격자 부정합 도를 구해보면 대략 0.3% 임을 알 수 있었으며 에칭과 질량 이동 현상을 발생시키는데 무리가 없는 에피층이 성장되었음을 확인하였다. 그림 4는 결정된 성장조건에 따라 1차 성장된 DH wafer의 stain etching한 후의 단면 SEM 사진이다.

활성층의 두께가 약  $0.2 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. 질량 이동 현상은 곡률의 반지름과 관계가 크므로 활성층의 두께는 질량 이동 현상과 큰 관계를 가진다. 즉, 질량 이동 현상을 일으키는 물질의 양은 온도 T에서 곡률 반경 R에 따라 다음

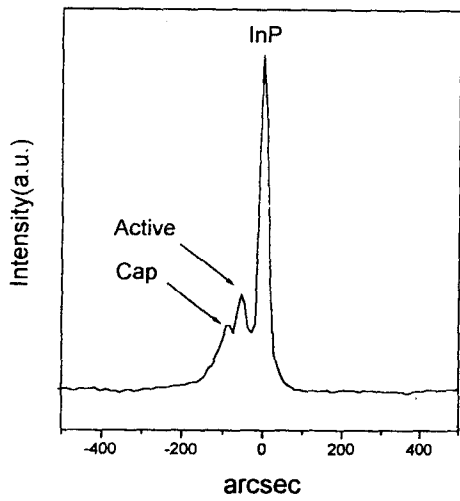


Fig. 3. X-ray rocking curve of 1.3 μm InGaAsP/InP DH wafer.

과 같은 관계로 결정된다고 알려져 있다.<sup>10)</sup>

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{C}{T} \frac{1}{R}$$

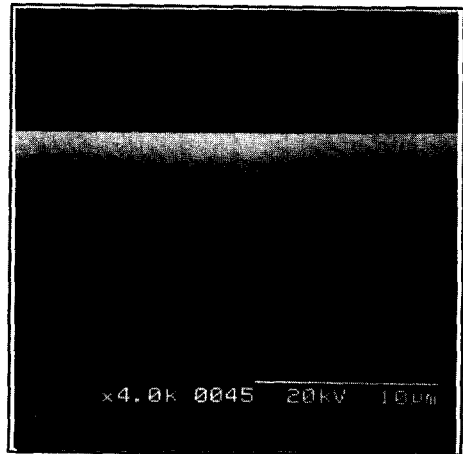
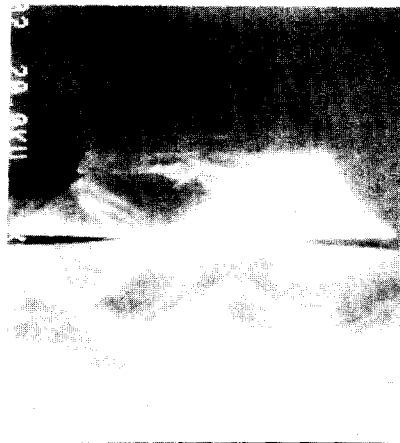


Fig. 4. The cross-sectional SEM photograph of the cleaved and stained-etched (100) plane of the DH wafer.

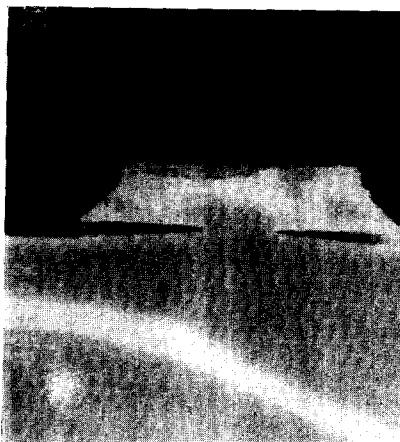
여기서  $\Delta P$ 는 굴곡이 있는 표면에서의 증기압의 변화,  $P$ 는 평평한 표면에서의 증기압,  $C$ 는 비례상수를 나타낸다. 따라서, 질량 이동 현상은 곡률의 반지름이 작을수록 빠른



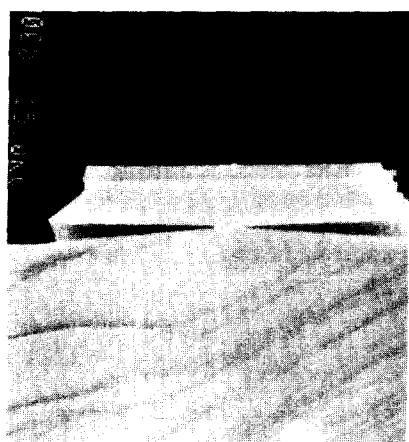
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. The cross-sectional SEM photographs of the InGaAsP/InP DH wafer with selectively etched active layer. (a) etching time = 5 min (b) etching time = 6 min (c) etching time = 7 min (d) etching time = 10 min

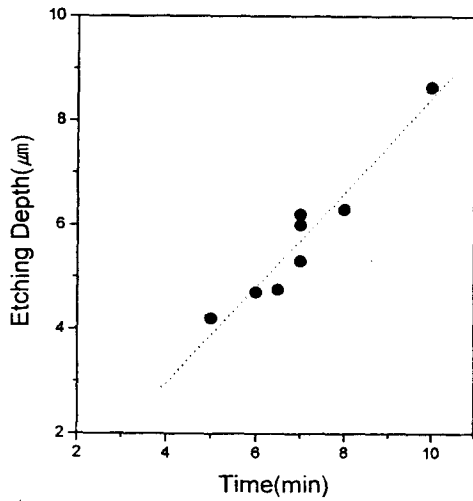


Fig. 6. The etching depth of active layer according to etching times.

속도로 일어나게 된다. 질량 이동 현상을 위해서는 활성층의 선택적 에칭이 필수적이다. 본 실험에서는 캡층과 클래드층을 메사 에칭한 후 활성층을  $K_3Fe(CN)_6:KOH:DI$ 를 이용해서 에칭하였다. 활성층인 InGaAsP 층을 선택적으로 에칭하기 위한 에칭액은  $K_3Fe(CN)_6:KOH:DI$  이외에도  $H_2SO_4:H_2O_2:DI$  등이 사용되는데,  $H_2SO_4:H_2O_2:DI$ 의 경우는 상당한 열이 발생하여 정확한 실험조건을 결정하기 어려우므로 배제하였다. 메사에칭을 위해서는 염산 계를 사용하였는데 에칭이 활성층에서 정지되어야 하므로 많이 희석된 에칭액을 사용하여 에칭이 너무 급격히 이루어지지 않도록 조절하였다. 그림 5은 캡층과 클래드층을 에칭한 후  $K_3Fe(CN)_6:KOH:DI$ 로 활성층을 에칭 시간을 변화시키며 선택적으로 에칭한 wafer의 단면 SEM 사진이다.

SEM 사진을 통해 활성층이 선택적으로 에칭되었음을 확인할 수 있었다.  $[110]$  방향으로 패턴을 형성시켰으므로 활성층의 선택적 에칭의 방향은  $[110]$ 되며, 활성층의 에칭 시간에 따른 에칭 깊이의 변화를 그림 6에서 나타내었다.

그림 6에서 구한 활성층의 에칭률은  $0.9 \mu m/min$ 이었다. 에칭 공정 후 질량 이동 현상을 발생시켰으며 그림 7은 온도를 변화시키며 40분간 질량 이동 현상에 의해 만들어진 BH 레이저 다이오드 구조의 stain etching한 후의 단면 사진이다.

질량 이동 현상은 시간과 온도의 함수인데 특히, 온도가 더 중요하다고 알려져 있으므로 시간은 40분으로 일정하게 하고 온도 변화를 주며 질량 이동 현상이 일어나게 하였다. 이때, 질량 이동 현상이 발생하는 임계온도 값을 구하려 했으며 질량 이동 현상에 의해 성장한 층의 폭이 너무 넓어지지 않도록 유의하였다. 질량 이동 현상을 이용해서 레이저 다이오드를 제작할 때 온도는 되도록 낮은 것이 바람직한데 이는 온도를 높이 올려 주게 되면 도펀트(dopant)들이 확산하게 되고, 활성층인 InGaAsP층이 파괴되어 레이저 다이오드 자체가 동작하지 않을 수 있기 때문이다. 또한, 질량 이동 현상에 의해 성장한 층의 폭이 너무 넓게 되면 높은 전류를 가했을 때 성장한 층으로 누설전류(leakage current)가 흐르게 되므로 전류에 대한 발진되는 빛의 선형성이 나빠지게 된다. 본 연구에서는  $670^\circ C$ 에서  $700^\circ C$ 까지의 온도에서는 질량 이동 현상이 재현성 있게 발생하였으며 따라서 질량 이동 현상의 임계 온도는  $670^\circ C$ 로 나타났다. (111)B InP 기판을 커버로 사용하여  $P_2(g)$ 를 보상해주는 방법을 사용하였다면 더 나은 결과를 얻을 것으로 기대된다.<sup>11)</sup> 질량 이동 현상에 의해 성장된 층의 폭은 온도가 증가함에 따라  $1.5\mu m \sim 1.7\mu m$ 로 약간 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 질량 이동 현상이 단순한 아레니우스 형의 온도 의존성을 나타내지 않음을 나타내는 것이다.<sup>12)</sup>

4. 결 론

매립형 InGaAsP/InP 레이저 다이오드 제작을 위한 질량 이동 현상의 최적화에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 질량 이동 현상을 위해 먼저 액상 에피성장법으로 1차 성장을 하였으며, 이때 DH 레이저 다이오

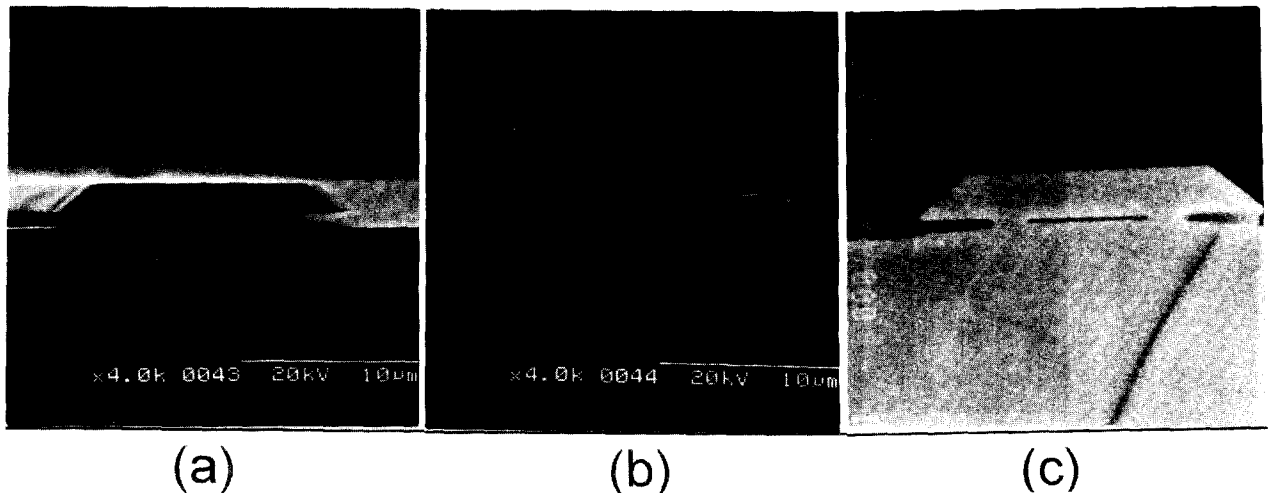


Fig. 7. The cross-sectional SEM photographs of the mass transported InGaAsP/InP BH wafer. (a) T=670°C (b) T=690°C (c) T=700°C

드 구조의 격자 부정합은 0.3% 정도로 양호한 편이었으며 활성층의 두께는 약 0.2  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 질량 이동 현상을 이용하여 BH 레이저 다이오드 구조를 제작하기 위해 DH wafer를 에칭하여 메사구조를 형성하고 활성층을 선택적으로 에칭하였다.  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6:\text{KOH}:\text{DI}$ 로 활성층을 [110] 방향으로 에칭하였을 때 에칭률은 0.9  $\mu\text{m}/\text{min}$  이었다. 액상 에피 성장장치를 이용하여 질량 이동 현상을 발생시켰으며 SEM으로 확인하였다. 질량 이동 현상의 임계온도는 670°C로 나타났으며 재현성 있게 질량 이동 현상이 발생하였다. 질량 이동 현상에 의해 성장된 층의 폭은 1.5 $\mu\text{m}$ ~1.7  $\mu\text{m}$ 로 온도증가에 따라 약간 증가하였다. 본 실험에서 얻은 결과는 광통신용 InGaAsP/InP 레이저 다이오드에 충분히 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 대학교수 해외 파견 연구지원에 의하여 연구되었으며 “III-V 화합물 반도체 재료의 에피 단결정 성장기술에 관한 연구”의 결과입니다. 본 연구가 이루어진데 대하여 영국 UMIST의 K. E. Singer 교수와 한국학술진흥재단에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Z. L. Liao, James N. Walpole and Dean Z. Tsang, IEEE J. QE-20, 855 (1984)

2. J. E. Bowers, B. R. Hemenway, A. H. Gnauck, T. I. Bridges and E. G. Burkundt, Appl. Phys. Lett. 47, 78 (1985)

3. Z. L. Liao and H. J. Zeiger, J. Appl. Phys. 67, 2434 (1990)

4. Y. Abe, T. Ohishi, H. Sugimoto, K. Ohtsuka, T. Matsui and H. Ogata, Electron Lett. 25, 1505 (1989)

5. Z. L. Liao, James N. Walpole, IEEE J. Quantum Electron. QE-23, 313 (1987)

6. B. Broberg, S. Koentjoro, K. Furuya and Y. Suematsu, Appl. Phys. Lett. 47, 4 (1985)

7. Shigehisa Arai and Masahiro Asada, J. J. Appl. Phys. 18, 2333 (1979)

8. Z. L. Liao and J. N. Walpole, Appl. Phys. Lett. 40, 568 (1982)

9. K. Imanaka, Appl. Phys. Lett. 44, 975 (1984)

10. T. R. Chen, L. C. Chin, A. Hasson, K. L. Yu, U. Koren, S. Margalit and A. Yariv, J. Appl. Phys. 54, 2407 (1983)

11. K. Hansen, E. Peiner, A. Schlachetzki and H. Burkhard, J. J. Appl. Phys. 31, (1992)

12. K. Hansen, E. Peiner, G. P. Tang and A. Schlachetzki, J. J. Appl. Phys. 32, 234 (1993)