

칩상호 광집속용 GaAs 광전집적회로의 기본 공정 II  
(LD 구조 ; 집적화 연구)

GaAs OEIC Unit Processes for chip-to-chip Interconnection II  
(LD structure ; Integration)

김창남, 조성대, 조현룡, 조규석, 정기용\*, 유배경, 정용, 권영세  
한국과학기술원 전기 및 전자공학과

ABSTRACT

It is shown that GaAs/AlGaAs stripe Roof-Top-Reflector LD is better than cleaved mirror LD by numerical analysis. And surface light emitting device is developed by LPE melt-back growth, which is of good controllability for OEIC.

OEIC transmitter using RTR LD structured device and FET has been made and modulated, expected to show good modulation characteristics after solving process problem.

Beam-Lead LD mounted on Si carrier has been made and shows low heat-resistance and so long life and good characteristics of LD.

I. 서론

고속 단거리 다기능 통신의 요구로 AlGaAs/GaAs 재료를 이용한 시스템 개발이 필요하게 되었으며, 그 중에서도 광전집적회로(OEIC)는 핵심기술로 레이저 빔 프린터, 기기기간이나 보오드간 또는 IC 칩간의 신호전송계의 접속등 그 응용범위가 매우 넓으며 이로 인한 상승 효과는 매우 크다고 하겠다. 그리하여 세계적으로 개별 광전소자의 개발이 이루어 졌으며 이제 광전소자의 집적화 방법 및 공정연구에 박차를 가하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 이 OEIC의 제작을 위한 기본공정(unit process)으로 LD의 구조 연구와 표면 방출형 발광소자 제작 그리고 집적화 연구로 광소자와 FET의 수평집적 및 Si carrier를 이용한 Beam-Lead LD의 제작에 관하여 언급하였다.

II. LD 구조 연구[1-3]

1. LD 해석

본 장에서는 stripe 형 GaAs/AlGaAs RTR(Roof-Top Reflector) laser 및 단면공진형 laser의 수치해석에 관해 기술하였다. RTR 레이저와 단면 벽개형 레이저의 차이점은, 그림 1과 같이 벽개형 레이저의 한쪽 단면이 지붕형으로 되었다는 점이다. RTR은 한계각도 내의 입사각을 가지는 빔을 입사경로에 관계없이 RTR 고유의 방향으로 반사시킨다. RTR 레이저의 분석은 벽개형 레이저를 분석하는 것과 유사한 방법으로 할수있다. Cavity 내에서의 전장은 Maxwell 방정식을 만족시킨다. 세로축으로의 전자장의 세기의 변화는 작아서 무시할수 있다고 가정한다. 이때 활성영역내의 carrier 농도는 확산 방정식으로 부터 알수있다. 또 carrier 농도는 전자장의 세기와 서로 영향을 미치는 관계에 있다.[4,5] 여기서는 반도체 레이저의 특성을 조사하기 위하여 beam 전파방법에 의한 반도체 레이저의 모델을 적용한다. 소자를 모델링하고 Maxwell 방정식을 이용한 수식화한 과정은 참고문헌에 자세히 기술하였다.[6]

표 1과 2에 paraxial 파동 방정식과 전하확산 방정식을 풀기위한 변수들이 나와있다. 그림 2에는 한계전류밀도 이하 및 이상에서의 계산효율도가 그려져있다. 처음 node 1에서 전장이 주어졌다 가정하여 전파 및 반사를 계산한다. 그림 3에 RTR 레이저와 단면형 레이저의 빛의 강도-전류곡선이 그려져 있다. 그림으로 부터 한계전류와 양자효율을 볼수있으며, RTR 레이저가 훨씬 우수함을 알수있다.

이 발표 논문은 과학 기술처 특정 연구 과제와 관련입니다

그림 4에 전하밀도 분포가 그려져 있다. 그림 5에는 전장의 분포가 수치해석 결과로 나타나있다. 이상의 결과로 부터 RTR 레이저는 단면형 레이저의 한쪽이 반사율 1.0 인것과 같이 동작하는 것으로 볼수있다. 다른 기본적인 특성들이 같으므로 더 개선된 동작을 나타낸다.

위의 모델에서 GaAs/AlGaAs RTR 레이저를 수치해석적인 방법으로 분석해본 결과 RTR 레이저는 한쪽 단면의 반사율이 1.0 인 단면형 레이저와 같은 동작을 하며 이것은 집속 레이저의 큰 장점이다. RTR 의 다른 효과들이 강력한 특성들을 나타낼 것으로 기대된다.

## 2. 표면방출형 발광소자 (LED)

LED 나 LD 등의 발광소자들은 측면방출형 (edge emitting)의 경우 단일소자나 1차원적인 배열을 통한 배열형 소자가 가능하였다. 최근 5년동안에 이런 측면방출형 소자들로 부터 표면방출형 소자들로의 연구방향이 훨씬 증가되었다. 이는 2차원 신호처리, 고출력, 공정중 테스트 가능성에 큰 장점이 있기 /etc/dmesg lbin 를 이용하는 LD[9] 의 세가지가 개발되어 있다. 결국, far-field pattern 을 개선시키고, 광출력을 증대 시키되 공정이 간단한 구조를 선택하는 연구가 계속되고 있다.

본 연구에서는 집합의 수직부분에서 광출력을 뽑아내되 lens 가 집적된 구조를 제안하였다. 이를 제작하기 위한 공정으로 용액식각 (melt back)과 선택적 LPE 를 이용하였다.

집합과 수직한 방향으로 부분적으로 parabolic 한 lens 를 제작하기 위한 공정으로써 용액식각의 방법을 사용하였다. 주어진 평형온도( $T_0$ ) 에서 불포화된 갈륨(Ga) 용액에 GaAs 단결정기판을 집속시키면 Ga 용액내의 불포화가 As 를 녹여내게 되는데 이를 용액식각(melt back) 이라 한다. 일부분만을 불포화 갈륨 용액에 접촉시킬때 그 용액식각의 형태가 등방성을 갖는것을 확인하였다. 용액식각의 변수로는 용액식각의 시간, 불포화의 정도( $\Delta T$ ), 첨가된 aluminium 의 조성등이 된다. 이러한 변수들로 결국 LED 에 집적되는 렌즈의 numerical aperture(N.A) 나 초점거리들을 조절할수 있게 된다. 그림 6은 용액식각 시간과 그에따른 용액식각 깊이와의 관계를 보인것이다. 이때 용액식각 부분의 창(window) 크기는  $60\mu\text{m}$  로 일정하고 갈륨내의 aluminium 조성도 일정하였다. 그림 7은 이런 용액식각후 AlGaAs ( $x=0.4$  정도)를

성장시킨뒤 뒷면을 부분적으로 화학식각한 경우의 렌즈 표면이다. 이 전자현미경 사진으로 부터 광학적 평탄성을 갖는 것을 알수있고, 따라서 렌즈의 효과를 가질수 있다.

LED 의 DH 구조를 포함하고 lens 를 갖는 LED 의 측면구조가 그림 8에 나타나있다. 또한 이런 LED 의 제작과정의 흐름이 그림 9에 나타나있다. 제작된 LED 의 광출력은  $10\text{mW}$  정도로 보통의 측면 방출형 또는 표면 방출형 소자보다 훨씬 큰 광출력을 보여준다.

## III. 집적화 연구

### 1. 광소자와 MESFET 의 수평집적

수평형 OEIC 를 제작하기 위해 광소자로는 RTR LD 를, 전자소자로는 MESFET 을 선택하여 집적을 시도하였다. MESFET 의 전류용량은 개별 LD 의 stripe 폭을  $7\mu\text{m}$  길이를  $150\mu\text{m}$  로 했을때 문턱전류( $I_{th}$ )가  $100\text{mA}$  정도인 점을 고려하여 MESFET 의 포화전류 ( $I_{d,sat}$ )을  $200\text{mA}$  가 되도록 설계하였다. 또 이때  $I_{d,sat}$  및  $g_m$  을 고려하여 활성층의 두께와 gate 폭이 결정되는데, gate 폭을 너무길게 할 경우 고주파 특성이 나빠지므로 interdigitation 을 하여 한 finger 가  $150\mu\text{m}$  짜리인 것을 6개 사용하여 결국  $900\mu\text{m}$  폭이 되도록 하였다. 이 OEIC 를 제작하는 공정순서는 그림 10과 같고 완성된 후의 모습은 그림 11과 같다.

제작한 수평형 OEIC 의 광소자특성중 I-V, L-I 곡선이 그림 12(a),(b) 에 있다. 이것은 spontaneous emission 과 stimulated emission 의 합인 특성을 보이는데, 수평형이기 때문에 광케환 측과 주입전류에 의한 광 발생측이 어긋났기 때문으로 생각된다. MESFET 의 I-V,  $g_m$  곡선이 그림 13 (a),(b) 에 있는데  $g_m$  이 불규칙한 것은 channel 이 평탄하지 못하고 Al Schottky gate 는 표면이 매끈하지 못하여 잘 형성되지 못한것 때문으로 생각된다. 모든 epi 성장을 MOCVD 로 하면 위와같은 표면 morphology 에 의한 문제점은 발생하지 않을 것이다. 제작한 transmitter OEIC 를  $20\text{kHz}$  정현파 변조한 것이 그림 14에 나타나 있다. 변조지수 ( $\Delta I/I_B$ ) 는 약 3.3% 였다. 그림 15는 이 OEIC 의 L-V 곡선이다.

### 2. 실리콘 캐리어를 이용한 Beam-Lead 레이저 다이오드

보홀리식 광전집적회로는 기생 인덕턴스 기생 캐패시턴스 성분을 줄일 수 있으나 제작상의 많은

어려움과 노력이 필요하다. Si carrier 위에서 하이브리드형 광전집적회로의 구현은 제작은 용이하나 고주파에서의 소자간 연결에 Au wire 를 사용할때 인덕턴스 성분의 영향이 심각하게 나타나고 실리콘의 열전도도가 작으므로 레이저 다이오드의 성능을 저하시킨다. 그러나 Beam-Lead 를 레이저 다이오드의 전류공급 통로로 사용하면 이들의 영향을 줄일 수 있다.

Beam-Lead 는 1960년대 중반 M.P. Lepselter 라는 사람의 의하여 제안되어 실리콘 소자에 사용되다가 고주파를 요하는 GaAs 소자와 LED 등의 광소자에 응용되었다.

Beam-Lead 의 구조는 외부회로와의 연결을 위하여 많이 사용되고 있는 wire bonding 이 필요없이 그림 16과 같은 외팔보로써 연결한다. 이 외팔보는 소자를 외부와 구조적인 지지를 하고 전류의 공급통로가 된다. Beam Lead 는 온도나 습도등 소자가 처해있는 상황에 따라서 재료가 선택되는데 Gold 가 부식저항이 크고 bonding 이 쉬우며 알맞은 전기분해능을 갖고 있기 때문에 선택되었다.

Beam-Lead 레이저 다이오드의 구조는 그림 17와 같다. 하이브리드형 광전집적회로를 위하여 그림 16과 같이 실리콘 캐리어 위에 레이저 다이오드를 얹을때 heat sink 로 부터 열이 주로 방출되는 활성 영역과의 거리가 멀기 때문에 불량한 열소비로 인한 레이저 다이오드의 성능이 저하된다. 그러나 열 전도도가 큰 ( $K=3.19W/cm^{\circ}K$ ) Au Beam-Lead 는 좋은 heat sink 로 작용 할 수 있다.  $SiO_2$  의 열전도도가  $0.014(W/cm^{\circ}K)$  로 매우 작기 때문에 좋은 열 장벽이 되고 Beam-Lead 가 heat sink 로 작용 할 수 있다면 그림 18처럼 두개의 열 전달 통로가 형성된다. 열이 옆으로의 퍼짐이 없는 경우에는 식 (1)로, 방사형태로 퍼질 경우에는 식 (2)로 열 저항을 근사화 시킬 수 있다.

$$R_{th} = d_i / K_i A \quad (1)$$

$$R_{th} = \ln(4L/W) / \pi K_i L \quad (2)$$

$d_i$  : 각 층의 두께

$K_i$  : 열 전도도

L : 레이저 공진 길이

W : 레이저 다이오드의 폭

A : L·W

Beam-lead 만을 heat sink 로 가정한 열전달 통로 1의 열저항은  $71^{\circ}C/W$  이고 Cu 만을 Head-sink 로 가정한 경우의 열저항은  $217^{\circ}C/W$  이므로 열이 대부분 Beam-Lead 로 전달되고 전체 열저항은  $53^{\circ}C/W$  으로 상대적으로 작은 열저항을 갖게 된다.

열저항은 입력의 변화에 따른 온도 변화로 정의되는데 온도에 따라 문턱전류가 변화하므로 이를 매개체로 하여 열저항을 구할수있다.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Delta P_{in}} = \frac{\frac{\Delta T}{\Delta(I_{th})}}{\frac{\Delta P_{in}}{\Delta(I_{th})}}$$

Beam-Lead 가 레이저 다이오드 활성영역 위를 모두 덮지 못할 경우도 있기 때문에 이론적 계산치 보다는 측정치는 크게 나타난다. 또 Beam-Lead 의 열용량은 Beam-Lead 의 두께에 비례한다. 이 두 요소에 따른 열저항을 그림 19에 보이고 있다.

결론적으로 하이브리드형 광전집적회로의 제작과 새로운 레이저 다이오드 packaging 방법으로 Beam-lead 레이저 다이오드를 제안했다. GaAs 소자를 실리콘 캐리어 위에서 집적시킬때 불량한 열전달로 인하여 레이저 다이오드의 성능이 저하되지만 열 전달율이 큰 Au Beam-lead 를 사용하면 Beam-lead 가 heat sink 로 작용할 수 있어 레이저 다이오드의 성능저하를 막을 수 있다.

#### IV. 결론

Stripe 형 GaAs/AlGaAs RTR LD 와 단면공진 LD 의 수치해석으로 RTR LD 가 보다 우수한 특성이 나타남을 보였으며 표면방출 구조의 제어성이 좋아 집적에 유용한 광소자를 LPE melt-back 을 이용 개발하였다. 광소자와 FET 를 이용 수평집적 transmitter 를 제작하여 변조특성을 보였는데 공정상의 문제점 개선에 의한 좋은 변조특성을 보일것으로 기대된다. Si carrier 를 이용한 Beam-lead LD 를 제작하여 낮은 열저항에 의해 열전달이 잘되어 LD 의 수명과 특성을 향상시켰다.

참고 문헌

1. G.P. Agrawal, "Fast-fourier-transform based beam propagation model for stripe-geometry semiconductor laser : inclusion of axial effects," J. Appl. Phys., vol.56, pp.3100-3109, 1984.
2. J.V. Roey, J. Donk, and P.E. Lagasse, "Beam-propagation method analysis and assessment," I Opt. Soc. Am., vol.71, pp.803-810, 1981.
3. J. buus, "Principles of semiconductor laser modeling," IEE proc., vol.132, pp.42-51, 1985.
4. G. Lengyel, P. Meissner, E. Patzak, and K.H. Zchauer, "Calculation of lateral current spreading and series resistance effects in oxide stripe geometry GaAs-GaAlAs DH Lasers," Electron Lett., vol.17, pp.174-175, 1981.
5. W.B. Joyce, "Current-crowded carrier confinement in double-heterostructure lasers," J. Appl. Phys., vol.51, pp.2394-2401, 1980.
6. 채창준, 박사학위논문, KAIST, 1989.
7. Haruhisa Soda et.al., Jpn. J. Appl. Phys., vol.18, no.12, p.2329, 1979.
8. J.P. Donnelly et.al., Appl. Phys. Lett. 51(15), 23, p.1138, Oct., 1987.
9. Mutsuo Ogura et.al., Jap. J. Appl. Phys. vol.23, no.7, p.L512-L514, July, 1984.

본 연구는 '88 특정연구 과제인 "레이저 및 광기술 분야"의 위탁과제에서 수행한 것이며 지원해주신 과학기술처에 심심한 사의를 표하며 주관연구기관인 전자통신연구소에 감사를 드린다.

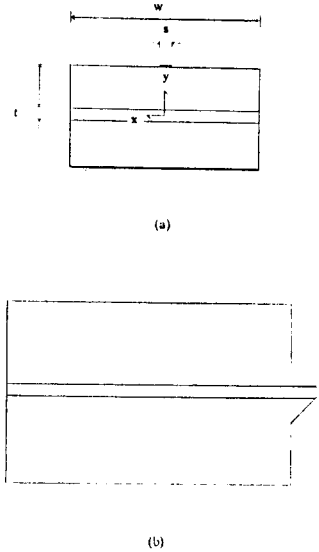


그림 1 (a) Schematic cross-section, and (b) top view of GaAs/AlGaAs RTR laser

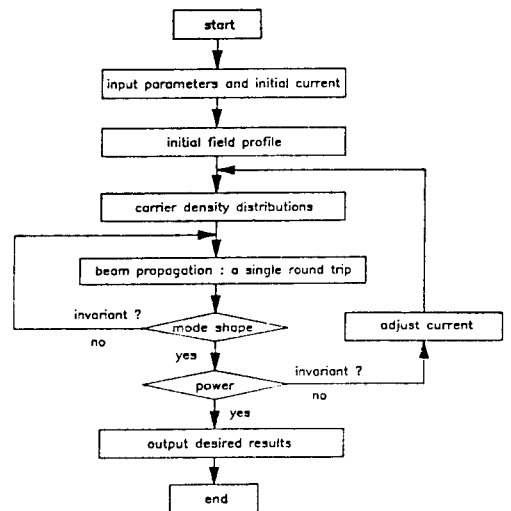


그림 2(a) Over-all flow chart for below-threshold calculation

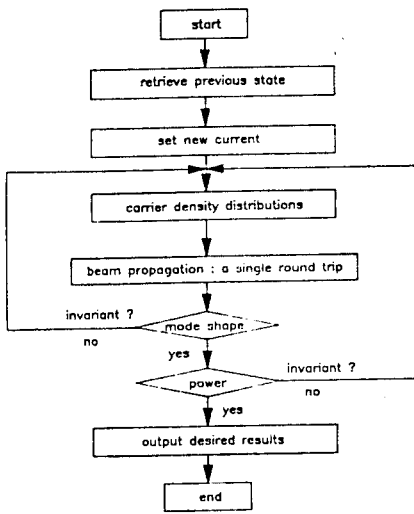


그림 2 (b) Over-all flow chart for above-threshold calculation

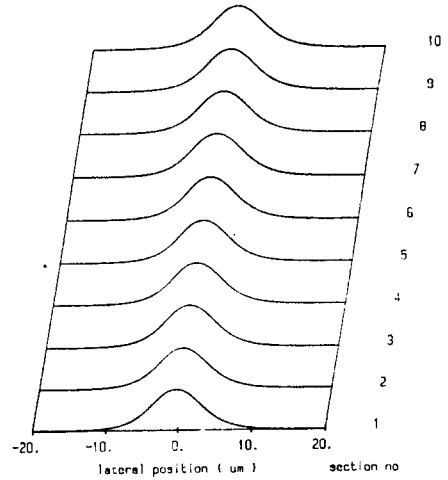


그림 4 Carrier density distributions in all sections are assumed to be form at threshold

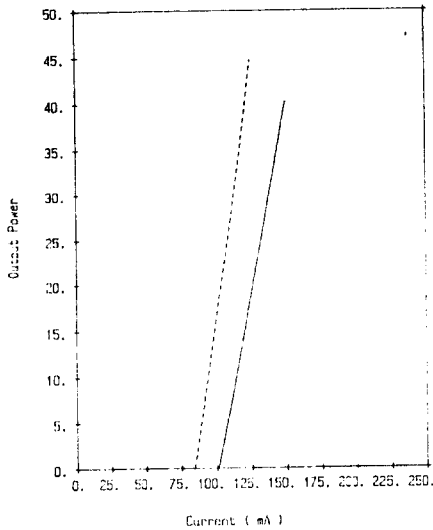


그림 3 Light-current curves of RTR laser (dashed) and cleaved laser (solid)

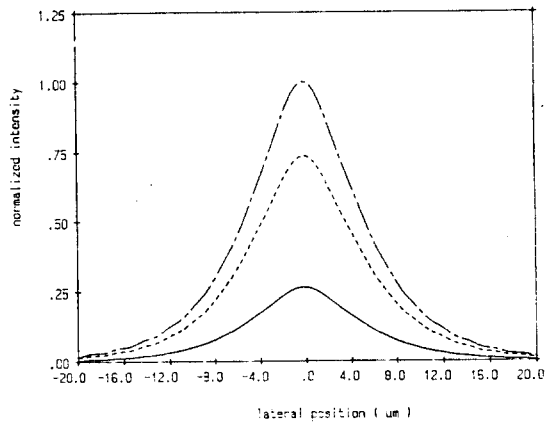


그림 5 Field intensity distribution at the cleaved facet : (—) forward wave, (- - -) backward wave, (- · - ·) envelope of total field intensity

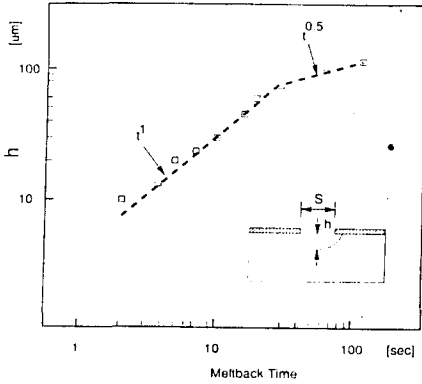


그림 6 용해 시간과 직각길이 h 의 관계



그림 7 용해 시간에 의한 표면의 표면

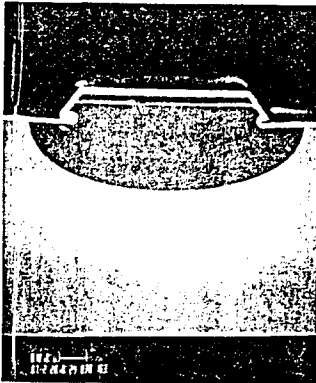


그림 8 표면 광출형 LED 의 5 μm 구조

### SE LED Process

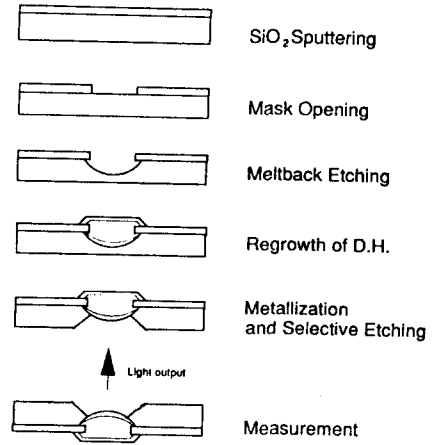


그림 9 표면 광출형 LED 의 제작 과정

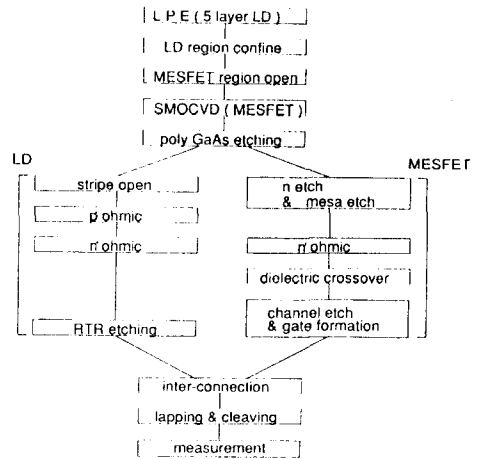


그림 10 (a) SMOCVD법을 이용한 정선 접점 피복 공정

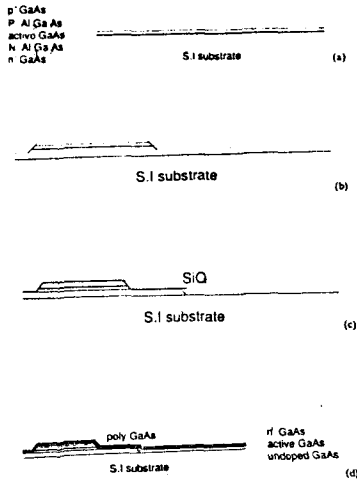


그림 10 (a) SMOCVD법을 이용한 성장 과정

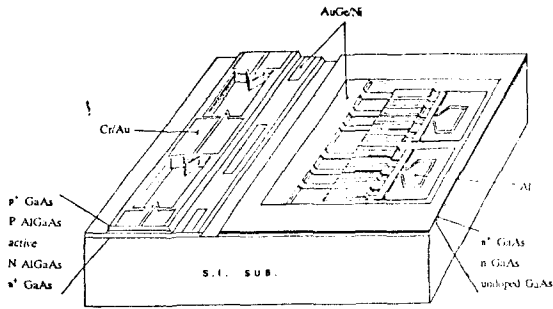


그림 11 SMOCVD법을 이용한 OEIC transmitter

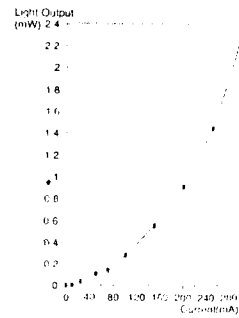
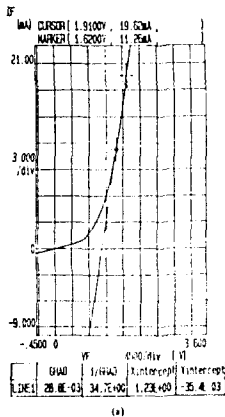


그림 12 광전 집적 회로 소자의 (a) I-V 곡선 (b) L-I 곡선

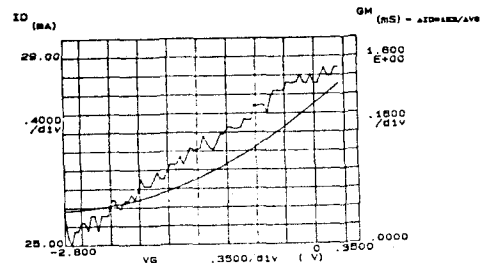
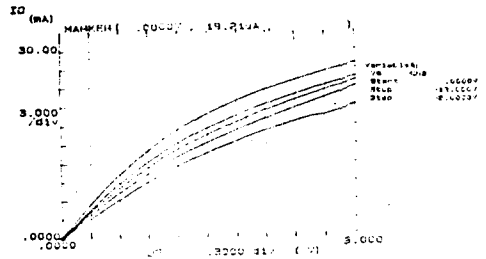


그림 13 광전 집적 회로 전자 소자의 (a) I-V 곡선 (b)  $I_m$  곡선

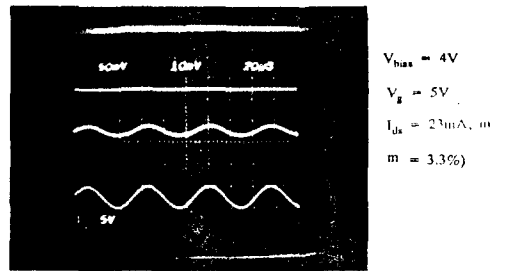


그림 14 광전 집적 회로 transmitter의 번조

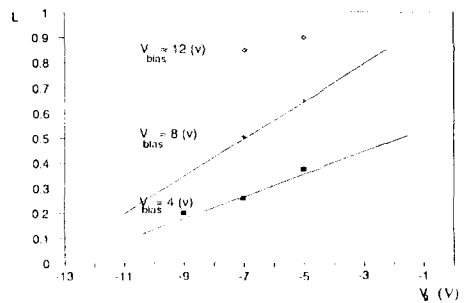


그림 15 광전 집적 회로 L-V 곡선

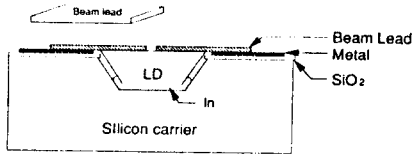


그림 16 Silicon carrier 위에 없어진 Beam-Lead 레이저 다이오드

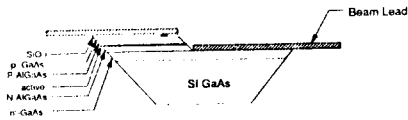


그림 17 Stripe Laser Diode 의 구조

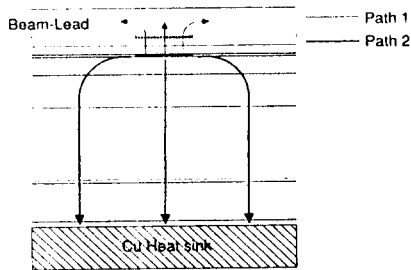


그림 18 Beam-Lead LD 의 두 열전달 경로

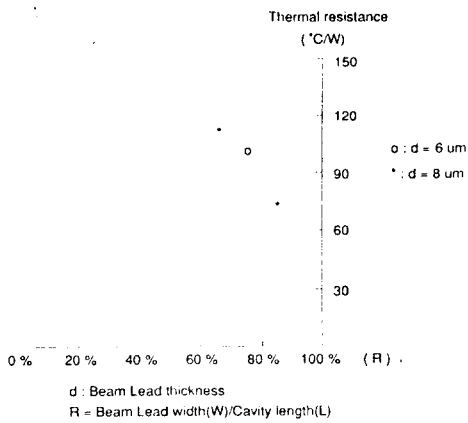


그림 19 Beam-Lead의 두께와 폭에 따른 Thermal resistance의 변화

표 1 parameters used to solve paraxial wave equation

parameter	symbol	value
wavelength	$\lambda$	0.84 $\mu\text{m}$
cavity length	L	250. $\mu\text{m}$
stripe width	s	6. $\mu\text{m}$
active layer thickness	d	0.2 $\mu\text{m}$
cladding layer thickness	t	2. $\mu\text{m}$
active layer index ( $x = 0$ )	$n_a$	3.59000
cladding layer index ( $x = 0.3$ )	$n_p$	3.38500
effective index	$\eta$	3.46950
confinement factor	$\Gamma$	0.62789
gain parameter	a	$1.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$
gain parameter	b	$1.5 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$
antiguinding parameter	R	3.
free carrier absorption coefficient	$\alpha_{fc}$	$6.0 \times 10^{22} \text{ m}^2$
cladding layer absorption coefficient	$\alpha_p$	$10^3 \text{ m}^{-1}$
facet reflectivity	$R_m$	0.76
phase shift by two TIRs	$2\theta$	$2 \times 0.95 \pi$

표 2 parameters used to solve carrier diffusion equation

parameter	symbol	value
nonradiative recombination time	$\tau_{nr}$	5. ns
spontaneous recombination coefficient	B	$1.4 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Auger coefficient	C	$1.0 \times 10^{-42} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$
effective diffusion coefficient	D	$3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
plank constant	h	$6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$
energy gap of the active layer	$E_g$	1.43 eV
wavelength	$\lambda$	0.84 $\mu\text{m}$
cavity length	L	250. $\mu\text{m}$
stripe width	s	6. $\mu\text{m}$
active layer thickness	d	0.2 $\mu\text{m}$
cladding layer thickness	t	2. $\mu\text{m}$
confinement factor	$\Gamma$	0.62089
gain parameter	a	$1.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$
gain parameter	b	$1.5 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$