

# 다중양자우물 QCSE Microwave Photonic Tunable FM 레이저: 설계와 구현

정희원 송주빈\*, X. Huang\*\*, A. J. Seeds\*

## MQW QCSE Microwave Photonic Tunable FM Laser: Design and Fabrication

Ju Bin Song\*, X. Huang\*\*, and A. J. Seeds\* *Regular Members*

### 요약

본 논문은 DWDM 또는 OFDM에서 요구되는 레이저 소스의 균일한 마이크로웨이브 주파수 응답 특성을 얻기 위하여 단일 웨이브가이드 상에서 리지 가이드 구조를 갖는 이득 단과 튜닝 단이 직접 된 구조를 가지며 QCSE를 이용한 튜너블 FM 레이저에 관하여 기술한다. 단일 직접 구조의 레이저에서 다중양자우물 QCSE를 이용하기 위하여 역 전압 비어스 튜닝 방법이 적용되었다. 이를 위해 이온 주입에 의한 두 단의 전기적 분리를 실현하였고 흡수 이식분포의 밴드 측 단에서 동작을 위하여 IFVD 밴드갭 intermixing 기술을 적용하였다. 마이크로웨이브 변조를 위하여 요구되는 낮은 parasitic 캐패시턴스를 성취하기 위하여 air-bridge 와 Polyimide 컨택 구조로 구현하였다. 본 레이저는 ~850nm에서 동작하며 최대 6GHz까지  $\pm 3$ dB 균일한 주파수 응답 특성을 가지며 최대 20nm의 파장 튜닝 특성을 갖는다. 본 편에서는 다중양자우물 QCSE 튜너블 FM 레이저의 설계 및 구현 기술에 관하여 소개하고자 한다.

### ABSTRACT

We report on a monolithically integrated two-section ridge-guide MQW QCSE tunable FM laser for DWDM or OFDM, which required uniform FM response. To realize MQW QCSE tuning mechanism using monolithically integrated two-section, reverse bias tuning of tuning section is required. Separation between tuning section and gain section is realized using ion implantation. To operate tuning section at absorption band-edge, band-gap of tuning section is shifted using IFVD MQW intermixing. As laser parasitic parameters limit achievable laser modulation bandwidth, low parasitic laser structures have been designed. An air-bridge laser built on a semi-insulating substrate and a Polyimide planarised laser built on an  $n^+$  substrate are fabricated successfully. Good CW single mode operation at ~850nm, 20nm tuning and FM response uniformity within  $\pm 3$ dB over the bandwidth 6GHz have been achieved. This report will be concentrated on design and fabrication of the MQW QCSE FM laser.

### I. 서론

초고속 통신망의 요구에 의하여 THz 통신 소자 및 시스템 기술의 연구는 필수적이다. EDFA와 같은 광섬유 증폭기의 대역을 효과적으로 사용하기 위하여 파장분할다중 (WDM) 기술 및 솔리톤

(Soliton)에 의한 시분할다중 (TDM) 기술의 연구가 진행 중이다<sup>[1][2]</sup>. 다른 한 편으로, 현재의 전류강도 변조 직접 검파(Current-Intensity-Modulation Direct Detection: IMDD) 방식은 FM 코히어런트 검파 (FM Coherent Detection: FMCD) 방식에 비하여 어려움이 현저히 높다<sup>[3]</sup>. 아날로그 광전송 링크를 통한 마이크로웨이브 전송시스템에서도 FMCD방식

\* Dept. of Electronic and Electrical Engineering, University College London,  
논문번호: 00127-0414, 접수일자: 2000년 4월 14일

\*\* E-TEK Dynamics, U.S.A

은 망의 전송 능력의 향상이 가능하다<sup>[4][5]</sup>. WDM 기술보다 고밀도의 채널이 요구되는 광주파수분할다중 (OFDM) 방식에서는 캐리어가 좁은 선폭 (linewidth)을 가져야 하고 파장의 튜닝이 가능하며 변조대역에서 균일한 FM 응답이 요구된다. 현재 모든 튜어블 레이저는 캐리어유도 효과 (Carrier Induced Effects: CIE)를 이용하므로 열 효과, band-gap filling 효과, band-gap shrinkage 효과 및 free carrier 플라즈마 효과 등에 의하여 변조 대역에서 주파수 응답 특성이 매우 균일하지 않다. 뿐만 아니라 전류주입변조 (current injection modulation)는 출력 전력의 변화에 의하여 원치 않는 강도변조 (Intensity Modulation: IM)를 초래한다. 다중 단 DFB 레이저 구조를 이용한 균일 주파수 응답 결과들이 보고되었지만 이들은 기본적으로 CIE 효과를 이용한 것으로서 균일한 주파수 응답을 얻기 위하여 전류 바이어스 조건과 출력 전력과 그 균일도 간의 보상에 있어서 극히 정교한 동작 조건이 요구된다<sup>[6][7]</sup>.

본 논문은 DWDM (Dense WDM) 또는 OFDM에서 요구되는 균일한 주파수 응답 특성을 얻기 위하여 최초로 단일 웨이브가이드 상에서 이득 단 (gain section)과 튜닝 단 (tuning section)이 직접된 구조를 가지며 QCSE (Quantum Confined Stark Effect)를 사용하여 제작된 튜어블 FM 레이저의 설계와 구현에 관하여 기술한다. 단일직접 구조의 레이저에서 다중양자우물 (MQW) QCSE를 이용하기 위하여 역 전압 바이어스 튜닝 방법을 적용하였으며 두 단의 전기적 분리와 밴드 갭 intermixing 기술이 적용되었다. 마이크로웨이브 변조를 위하여 요구되는 낮은 parasitic 캐패시턴스를 성취하기 위하여 air-bridge 와 Polyimide 컨택 (contact) 구조로 구현하였다. 본 레이저는 ~850nm에서 동작하며 최대 6GHz까지 ±3dB 균일한 주파수 응답 특성을 가지며 최대 20nm의 파장 튜닝 특성을 갖는다. 본 논문에서는 GaAs/AlGaAs 다중양자우물 QCSE 튜어블 FM 레이저의 설계 및 구현 기술에 관하여 소개하고자 한다.

## II. QCSE 튜닝 레이저의 설계

다중양자우물에서 광흡수 계수는 흡수 엑시톤피크 (absorptive exciton peak)  $\alpha_{hh}$ 와 line-shape함수로 정의된다. 흡수 측 단 (absorption edge)의 장파장 대역에서 실험 결과가 Lorentzian line-shape으로

잘 일치된다<sup>[8]</sup>. \*

$$\alpha(E, hv, L_z) = \alpha_{hh} \left\{ 1 + \left[ \frac{(E_0 - hv)}{\Gamma_{hh}} \right]^2 \right\}^{-1} \quad (1)$$

여기서  $E_0$ 는 e1-hh1 엑시톤 에너지이고  $\Gamma_{hh}$ 는 그 에너지의 HWHM (Half Width at Half Maximum)이다.  $\alpha_{hh}$ 는 인가된 전기장과 양자우물의 넓이  $L_z$ 에 의한 흡수 엑시톤의 피크 값이다.  $E_0$ 와  $\Gamma_{hh}$ 는 역시  $L_z$ 와  $E$ 의 함수이므로  $\alpha_{hh}$ 의 피크 값은 다음과 같다. \*

$$\alpha(L_z, E) = \frac{C}{L_z} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi_c(z, E) \cdot \psi_v^*(z, E) dz \right|^2 + \alpha_{bulk} \quad (2)$$

여기서  $C$ 는 상수로서 실험적으로 결정되고  $\alpha_{bulk}$ 는 벌크 (bulk) 재료의 background 흡수이다. 광흡수는 전자와 정공의 웨이브함수 (wavefunction) 간에 중첩 비례하고 웨이브함수의 장 의존성으로 인해 전기장에 따라 변화한다. 이는 우물 넓이가 5nm 이상인 경우  $C=16,000/\text{cm}$ 인 실험 결과와 일치한다<sup>[9]</sup>.  $\alpha_{bulk}$ 는 양자우물과 장벽간의 상호작용에 의한 결과가 되어야 하지만 밴드 갭의 차이 때문에 그 값은 e1-hh1 흡수 엑시톤피크 보다 장파장에서는 주로 양자우물에 의존한다. 더욱, 식(2)의 제 1항의 전기장하에서 강엑시톤 흡수로 인하여  $\alpha_{bulk}$ 는 무시될 수 있다<sup>[8]</sup>. 본 논문에서는 Steven의  $\Gamma_{hh}$ 모델과 UCL모델을 사용하여 광흡수 계수 스펙트럼을 계산하였고 Kramers-Kronig 방법으로 굴절계수 스펙트럼을 계산하였다<sup>[10]</sup>. 표1은 광흡수 계수 스펙트럼의 계산을 위해 사용된 703 레이저 웨이퍼의 구조적 파라미터이다. 상온에서 바이어스를 인가하지 않을 때 측정된 e1-hh1 엑시톤피크는 838nm이고 i영역 background p-도핑은  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 이다.

표 1. 703 레이저 웨이퍼의 구조적 파라미터

p-GaAs	0.5m, n=3.648
p-AlGaAs	1m, Al=0.58, n=3.238
AlGaAs	0.1m, Al=0.31, n=3.4
GaAs wells	5 wells, 7nm,
GaAs barriers	4 barriers, 10nm, Al=0.31
AlGaAs	0.1m, Al=0.31, n=3.4
n-AlGaAs	1m, Al=0.58, n=3.238
GaAs substrate	
MQW active layer	$n = 3.518$

그림1은 703 레이저 웨이퍼의 QCSE에 의하여 측정된 광흡수 스펙트럼으로부터 Kramers-Kronig식에 의하여 계산된 굴절계수 변화를 보인 것이다. QCSE에 의한 굴절계수 변화는 파장에 의존된다. ~70kV/cm(~2V)의 전기장 변화에서 최대 굴절계수 변화는  $\Delta n_{max}/n \approx 1.8\%$  이다. PIN 구조에서 최대 ~200kV/cm 전기장을 인가할 때 ~5%의 굴절계수 변화를 얻을 수 있다. e1-hh1 익시톤피크에서 흡수 계수의 변화가 크지만 흡수변화의 장파장 측 대역에서는 흡수계수의 변화가 매우 낮고 비교적 선형의 굴절계수 변화를 성취할 수 있으므로 703 레이저 웨이퍼의 경우 846nm 대역이 튜닝 동작파장으로 적당하다.

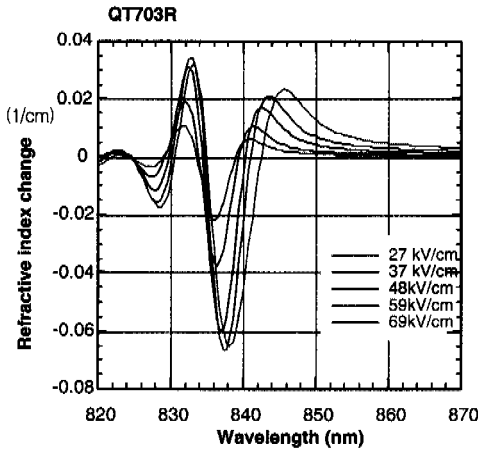


Fig. 1 The refractive index change(1cm) spectra obtained by Kramers-Kronig integration for laser wafer 703.

리지 웨이브가이드 (ridge waveguide)에서의 레이징 모드 (lasing mode)의 전파 특성과 다중양자우물에서 구속요소 (confinement factor)의 계산 후에 튜닝 단의 삽입손실은 다음과 같이 계산된다. \*

$$A_{\alpha} = 10 \cdot \log \frac{P_{out}}{P_{in}} = -10 \cdot \Gamma_{MQW} \cdot \alpha \cdot L_t \cdot \log e = -4.343 \cdot \Gamma_{MQW} \cdot \alpha \cdot L_t \quad (3)$$

여기서 P는 광전력,  $\Gamma_{MQW}$ 는 다중양자우물의 구속요소,  $\alpha$ 는 흡수 계수이고  $L_t$ 는 튜닝 단의 길이이다. 변조된 전기장이 인가된 경우 삽입손실은 \*

$$A_{\Delta\alpha} = -10 \cdot \Gamma_{MQW} \cdot \Delta\alpha \cdot L_t \cdot \log e = -4.343 \cdot \Gamma_{MQW} \cdot \Delta\alpha \cdot L_t \quad (4)$$

이다. Fabry-Perot 튜너블 레이저의 경우 최대 연속

튜닝 범위는 \*

$$\Delta\lambda_{max} = \frac{\lambda_0^2}{2n_g(L_g + L_t)} \quad (5)$$

이다. 여기서  $\lambda_0$ 는 오실레이션 파장이고  $n_g$ 는 mode group index,  $L_g + L_t$ 는 이득 단과 튜닝 단을 포함한 전체 캐비티 길이이다. 2단 튜너블 레이저인 경우 연속튜닝을 위한 파장의 변화는

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \Gamma_{MQW} \frac{\Delta n}{n_g} \frac{L_t}{L_g + L_t} \quad (6)$$

이다. 만약 계수가 다중양자우물에 의해서만 변화된다면  $\Delta\lambda = \Delta\lambda_{max}$ 가 되며 \*

$$\Gamma_{MQW} \cdot \Delta n \cdot L_t = \frac{n_g(L_g + L_t)}{\lambda_0} \frac{\lambda_0^2}{2n_g(L_g + L_t)} = \frac{\lambda_0}{2} \quad (7)$$

이다. 이는 optical path의 반 파장 변화를 의미한다.  $\pi$  위상 편이를 위하여 요구된 튜닝 단의 길이는

$$L_{p,\pi} = \frac{\lambda_0}{2\Gamma_{MQW} \Delta n} \quad (8)$$

이다. 그림2는 703 웨이퍼 ( $\Gamma_{MQW} = 24.4\%$ )의 파장 디튜닝 (wavelength detuning)의 함수로서의  $\pi$  위상 편이를 위하여 요구된 튜닝 단의 길이와 삽입손실을 보인다.

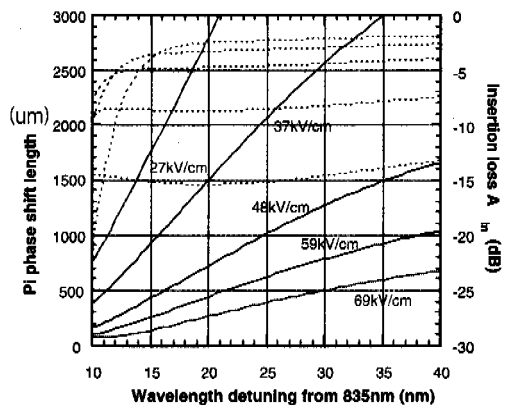


Fig. 2 Tuning section length(um) required for p phase shift (solid lines) and the corresponding insertion loss (dashed lined) as a function of wavelength detuning for wafer QT703R, with electric field change as the parameter.

1-hh1으로부터 10nm 파장 디튜닝의 경우 삽입 손실은 매우 높다. 디튜닝을 증가할 때 삽입손실이 감소하고 15~20nm의 디튜닝의 경우에는 포화상태에 이른다.  $\pi$  위상 편이를 얻기 위하여 전기장이 작은 경우 큰 튜닝단 길이가 요구되고 전기장이 큰 경우 삽입손실이 낮을 뿐만 아니라 작은 튜닝 단의 길이가 요구된다. 60kV/cm의 장이 인가되고 15nm의 파장을 디튜닝할 경우 튜닝 단의 길이는  $\sim 250\mu\text{m}$ 가 요구된다. 이때 삽입손실은  $\sim 3\text{dB}$ 이다. 튜닝단과 전체 캐비티의 길이가 결정된 후 광주파수 편이는 파장 디튜닝과 전기장 변화에 의존된다. 그림3은  $L_t / (L_t + L_g) = 1/2$ 인 경우 703 위이퍼의 주파수 변조도 (FM sensitivity)이다.

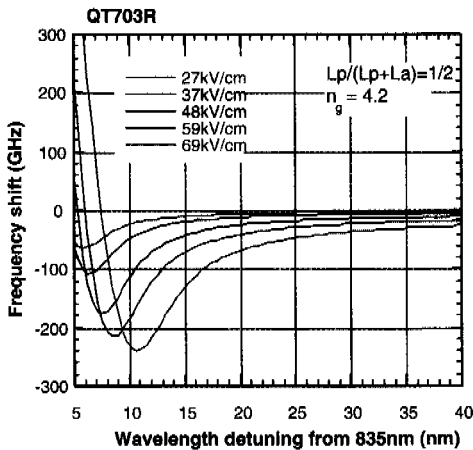


Fig. 3 Frequency shift as a function of wavelength detuning for wafer QT703R, with tuning section fractional length 1/2. The electric field change is used as a parameter.

주파수 편이는 파장에 의존되고 인가 전기장에 따라 주파수 편이의 피크는 적 파장 방향으로 즉, 파장 디튜닝이  $\sim 10\text{nm}$ 으로 증가된다. 역시 높은 전기장에서 주파수 편이가 높음을 볼 수 있다. QCSE가 갖는 큰 굴절계수의 변화와 전기장에 의한 변조를 성취하므로 캐리어 주입에 의하여 발생하는 불균일 응답을 피하여 균일한 주파수 응답을 얻을 수 있으므로 QCSE를 이용하여 단일직접 구조로 본 레이저를 구현하였다. 본 레이저는 이득단과 튜닝 단이 직접 된 2단 구조의 리지 가이드 레이저 형태로 구현되었다. 주파수 응답도와 잔류강도변조 계수는 튜닝단과 이득 단의 파장 디튜닝과 튜닝 단의 길이의 적절한 변화로서 제어된다. 그러나 튜닝 속도는 기본적으로 레이저 다이오드의 parasitic 캐패시턴스

에 의하여 제한된다. QCSE 튜너블 FM 레이저의 제작을 위하여 다음과 같은 새로운 기술이 요구된다. \*

- 1) 이득 단에 순방향 전류 주입과 튜닝 단의 역방향 전기장을 인가하는 형태의 동작 특성을 구현하기 위하여 이득단과 튜닝 단의 전기적 분리가 요구된다. \*
- 2) 굴절계수의 선형 변화를 얻으며 광흡수 계수의 변화가 낮은 파장 대역에서 튜닝 동작을 실현하기 위하여 이득단과 튜닝 단의 밴드 갭 디튜닝이 요구된다. \*
- 3) 마이크로웨이브 변조를 실현하기 위하여 낮은 parasitic 캐패시턴스 레이저의 구현이 요구된다. \*

현재 GaAs/AlGaAs 물질 시스템은 우수하고 안정된 웨이퍼를 얻을 수 있으며 대부분의 레이저는 재성장과 같은 복잡한 제작과정이 요구되지만 Al을 함유한 반도체의 경우 재성장은 적용하기 매우 어렵다. 본 레이저는 2단 구조의 리지 가이드 구조로서 이득단과 튜닝 단이 같은 광캐비티를 공유하지만 전기적으로는 분리된 특성을 갖는다. 스톱밴드(threshold) 전류밀도를 감소하기 위하여 SCH (Separate Confinement Heterostructure) 구조가 사용되었다. QCSE 튜닝과 작은 선폴과 낮은 트랜스패런트 (transparent) 캐리어밀도의 장점으로 인해 양자우물구조가 사용되었다. 양자우물의 수는 스톱밴드 전류밀도, 굴절계수의 변화 및 웨이퍼 성장의 기술적 한계 등에 따라 결정된다. 각 양자우물은 같은 트랜스패런시 (transparency) 캐리어밀도,  $N_{th}$  (GaAs 양자우물의 경우,  $\sim 2.6 \times 10^{18}$ ),를 가지므로 스톱밴드 전류밀도는 \*

$$J_{th} = q \cdot N_w \cdot d_w \cdot B \cdot N_{th}^2 \cdot e^{2(\alpha_i + \alpha_m) / N_w \Gamma_w g_0} \quad (9)$$

이다. 여기서  $N_w$ 는 양자우물의 수,  $d_w$ 는 각 우물의 넓이, B는 bimolecular recombination coefficient ( $\sim 10^{10} \text{cm}^3/\text{s}$ ),  $\alpha_i$  및  $\alpha_m$ 는 내부손실 및 반사면 (mirror) 손실,  $\Gamma_w$ 는 양자 우물 당 구속 요소이고  $g_0$ 는 GaAs 양자우물의 이득계수 ( $\sim 2400 \text{cm}^{-1}$ )이다. 그림4는 구속요소, 캐비티손실 및 양자우물 수의 함수로서  $J_{th}$ 를 보인 것이다.

최소  $J_{th}$ 를 갖는 양자우물의 수는  $\Gamma_w$ 와 캐비티 손실에 의존한다. 보통  $\Gamma_w = 1 \sim 2\%$ 이고 최적 양자우물의 수는 3~8이 된다. 양자우물의 수가 많으면 큰 굴절계수의 변화를 얻을 수 있으나 실제 MOVPE에 의한 웨이퍼 성장의 경우 양자우물과 장벽의 불균일 성장을 피할 수 없으며 이는 큰 변화를 갖는 익

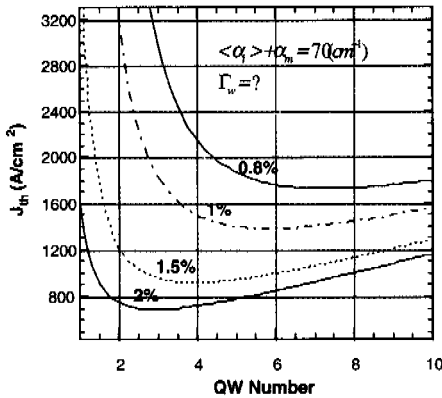


Fig. 4 Threshold current density as a function of confinement factor per QW, if the total cavity loss is fixed to 70cm<sup>-1</sup>.

시톤피크를 얻는데 장애가 된다. 이러한 요소들을 고려할 때 목적하는 레이저의 다중양자우물의 동작층의 설계를 위하여 4~5개의 양자우물의 수가 최적일 수 있다. 장벽에서 직접 밴드 갭을 위하여 Al < 0.45되어야 하고 non-coupled 다중양자우물 구조를 얻기 위한 장벽의 넓이는 ~10nm가 되어야 한다. 양자우물의 넓이는 요구된 동작파장과 웨이퍼 성장의 정확도에 따라 결정된다. 830~850nm의 동작파장을 얻기 위하여 양자우물의 넓이는 5~7nm가 적당하다. GaAs 층에서 p 콘택 도핑은 Zn를 사용하였으며 본 레이저 웨이퍼는 쉐필드대학의 EPSRC III-V Semiconductor Facility에서 제작되었다.

### III. 이득 단과 튜닝 단의 전기적 분리

본 레이저에서 다중양자우물의 웨이브가이드는 이득단과 튜닝 단이 공유되 이득 단에 순방향 전류를 인가하고 튜닝 단에 역 방향 전압을 인가하기 위하여 두단 간에 전기적 분리가 요구된다. 두 단간의 전압과 전류밀도의 차이로 인해 다음과 같은 잔류전류밀도 (lateral leakage current density)가 존재한다. \*

$$J_{p,n} = q(pn)\mu_{p,n}E\mu qD_{p,n} \frac{\partial(pn)}{\partial x} \quad (10)$$

여기서 q는 elementary charge, (pn) 은 정공 (hole) 또는 전자밀도, E는 포텐셜 차이로 인한 이득 단에서 튜닝 단으로의 전기장이고  $\mu_{p,n}$ 은 정공 또는 전자의 mobility이고  $D_{p,n}$ 은 정공 또는 전자의 확산 계수 (diffusion coefficient)이다. 식(10)의 제

1항은 포텐셜 차이로 인한 유동 (drift) 전류이고 제 2항은 이득 단에서 튜닝 단으로 캐리어밀도의 차이에 의한 확산 전류이다. 잔류전류의 성분은 p, i 및 n 영역에서 각각 고려되어야 한다. 두 단의 분리 갭이 10 $\mu$ m이고 리지의 넓이가 5 $\mu$ m이고 p-AlGaAs 클래딩의 resistivity가 p-GaAs와 같은 경우 콘택 층과 클래딩 층의 resistivity는 각각 0.005  $\Omega$ cm 및 0.05  $\Omega$ cm이다<sup>[11]</sup>. 이득 단에서 1.3V의 순방향 전압과 튜닝 단에서 1V의 역 방향 전압이 인가된 경우 p-층에서 최대 포텐셜 2.3V 차, 즉 잔류전류 8mA를 발생한다. i-영역에서 이득 단으로부터 튜닝 단으로의 잔류전류는 0.62mA이다. 그러므로 전체 잔류전류는 ~9mA이고 대부분은 p-콘택과 클래딩 영역에 의하며 CIE 튜닝을 피하기 위하여 0.4V p-p 변조 전압 (1.6mA 잔류전류 변화)이 사용될 수 있다.

본 논문에서는 잔류전류가 대부분 p-콘택 층과 클래딩 층에 의하므로 두 단간에 웨이브가이드는 공유되 분리 단의 에칭 (etching)에 의한 전기적 분리 방법과 이온 이식 (ion implantation)에 의하여 분리 단을 고 저항으로 변화하는 방법을 적용하였다. 클래딩 층까지 wet-에칭을 이용하여 ~0.2 $\mu$ m 에칭하고 10 $\mu$ m 길이의 분리 단을 형성한 경우 두 단간의 저항은 ~300  $\Omega$ 이었다.  $CCl_2F_2$ 를 이용한 드라이에칭에 의하여 분리 단을 형성한 경우 ~400  $\Omega$ 의 단간 저항을 얻을 수 있었다. 리지 가이드에서 클래딩 층까지 wet-에칭에 의하여 분리 단을 선택적으로 정교하게 에칭한 경우 10~40k  $\Omega$ 의 단간 저항을 보였다. 프로톤 주입 (proton bombardment)은 carrier trapping defects에 의한 높은 저항을 생성하므로 photonic 직접소자의 구현을 위하여 주로 사용된다<sup>[12]</sup>. 수소 ( $H^+$ )의 경우 원자의 지름이 작으므로 비교적 깊이 이식하는데 적은 에너지가 요구되는 장점이 있다. 산소 ( $O^+$ )와는 다르게 수소는 이식 결합으로 인해 고 저항을 수반하지만 화학적 도핑 효과가 없으며 프로세스 과정에서 낮은 온도 (200~500  $^{\circ}$ C)가 요구된다. 수소 이식의 경우 5k  $\Omega$ ~5M  $\Omega$ 까지 성취될 수 있지만 수소가 i-영역까지 침투하여 결국 광 손실을 초래한다. 즉, 레이저의 높은 스레쉬홀드 전류가 필요하다. 수소의 통과 깊이는 ~1.9 $\mu$ m였다. 뿐만 아니라 시간에 따라 레이저의 성능이 저하되는 결과를 갖는다. 고온에서 산소와 GaAs 및 AlGaAs와의 화학반응으로 인해 이온이식 결합 뿐만 아니라 화학적 도핑 효과를 가지므로 산소의 이식은 가장 높은 단 분리 저항을 갖는 특성을 보였다<sup>[12]</sup>. 역시, 이식된 이온이 열처리되어 산소 도핑

효과를 가지므로 고 저항을 지속하되 레이저의 성능이 저하되지 않는 특성을 보였다. 고 저항을 이루는 최저 열처리 온도는 500~700°C였다. 분리 저항은 10MΩ~1GΩ까지 성취되었다. 그림 5는 단 분리 방법에 의한 잔류전류를 비교한 것이다. 산소 이식의 경우 에칭분리 방법이나 수소이식 방법에 비하여 현저히 낮은 잔류전류 성능을 보였다.

#### IV. 다중양자우물 Intermixing

본 논문에서는 웨이퍼의 재성장 방법이 아닌 웨이퍼의 후처리 방법에 의한 양자우물 disordering을 수행하였다. 양자우물 intermixing 방법에는 impurity induced disordering (IDD), photo-absorption induced disordering (PAID) 및 impurity-free vacancy diffusion (IFVD)등의 기술이 있다<sup>[13]</sup>. IID 기술은 높은 도핑레벨 때문에 많은 결함이 형성되는 단점이 있으며 PAID는 좋지 않은 resolution 특성 때문에 본 레이저 제작에 있어서 적용하기 어렵다.

IFVD는 SiO<sub>2</sub>와 SrO<sub>2</sub>같은 유전체 필름이 사용된다. 고온 열처리 과정에서 Ga이 SiO<sub>2</sub> 층으로 확산되고 장벽 부근에 있는 Al은 Ga 빈 공간을 점유하기 위하여 양자우물로 확산되므로 우물 층이 감소되어 밴드 갭이 증가하며 이는 익시톤피크가 고 에너지 방향으로 편이 되는 결과를 낳는다. 그림 6은 ~200nm의 SrO<sub>2</sub> 또는 ~200nm의 SiO<sub>2</sub>를 사용하고 940°C에서 30초 동안 RTA(Rapid Thermal Annealing)에 의한 IFVD 프로세스 결과 703 레이저 웨이퍼의 PL (Photo-Luminescence) 특성을 보인 것이다.

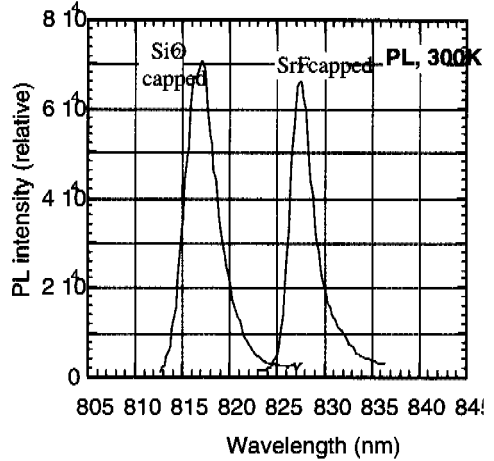


Fig. 6 The measured PL peaks of using IFVD technique for band-gap de-tuning. Sample is from 703 wafer. RTA is at 940C for 30 seconds. ~10nm wavelength de-tuning is obtained.

본 실험에서 IFVD 기술은 ~10nm 파장의 디튜닝 특성을 보였다. 본 논문에서는 이득 단을 보호하는 SrO<sub>2</sub> 코팅 영역에서 약간의 양자우물 intermixing이 발생하는 단점을 Ar<sup>+</sup> 처리 기술을 사용하여 보상하였다.

#### V. 낮은 Parasitic 캐패시턴스 컨택

Microwave photonic FM 레이저는 PIN 구조에 의한 시리즈 저항, 캐패시턴스 및 인덕턴스 등의 parasitic 파라미터의 제한 때문에 변조 주파수가 제한된다. 역 전압 PIN 접합의 높은 Shunt 저항으로 인해 RF 소스와 임피던스 정합을 위한 종단 저항은

레이저와 병렬 연결이 필요하다. 이때 마이크로 웨이브의 변조에 가장 큰 장애 요소는 parasitic 캐패시턴스가 된다. 3dB 주파수는 다음과 같이 정의 된다. \*

$$f_{-3dB} = \frac{1}{\pi R_s C} \quad (11)$$

여기서 R<sub>s</sub>는 종단 저항이고 parasitic 캐패시턴스 C는 \*

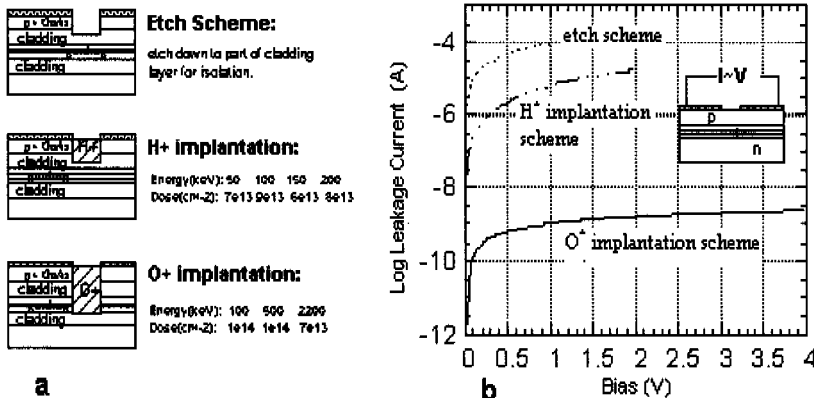


Fig. 5 Three isolation schemes a and their corresponding measured leakage current characteristics b.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (12)$$

이다. 여기서  $d$ 는  $i$ 영역 두께,  $A$ 는 접합의 넓이이며  $\epsilon_r = 13.1$ ,  $\epsilon_0$ 는 유전체 상수이다.  $i$ 영역이  $0.3\mu\text{m}$ 이고 튜닝 단의 접합의 넓이가  $10\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 인 경우의 캐패시턴스는  $0.4\text{pF}$ 이고  $-3\text{dB}$  주파수는  $\sim 16\text{GHz}$ 가 된다. 대부분의 리지 웨이브가이드 레이저는 넓은 접합 영역을 가지므로  $20\sim 60\text{pF}$ 의 높은 parasitic 캐패시턴스 때문에  $-3\text{dB}$  변조주파수는  $50\Omega$  임피던스 정합 시스템에서  $\sim 200\text{MHz}$ 로 제한된다.

본 논문에서는 낮은 parasitic 캐패시턴스를 성취하기 위하여 air-bridge 구조와 Polyimide 코팅 구조의 p 컨택을 구현하였다. 양자우물의 intermixing을 위한 IFVD 프로세스 후에 리지 및 분리 꺾을 정의한다. 에칭프로세스 후에  $\text{SiO}_2$  층을 증착하고 n 컨택을 만든다. p 컨택을 만든 후에 air-bridge 컨택을 만들고 마지막으로 웨이퍼를  $\sim 100\mu\text{m}$  두께로 만든다. 그림7은 제작된 air-bridge 레이저의 SEM 사진이다. 리지의 넓이는  $4\mu\text{m}$ 이고 분리 단의 길이는  $30\mu\text{m}$ 이다.

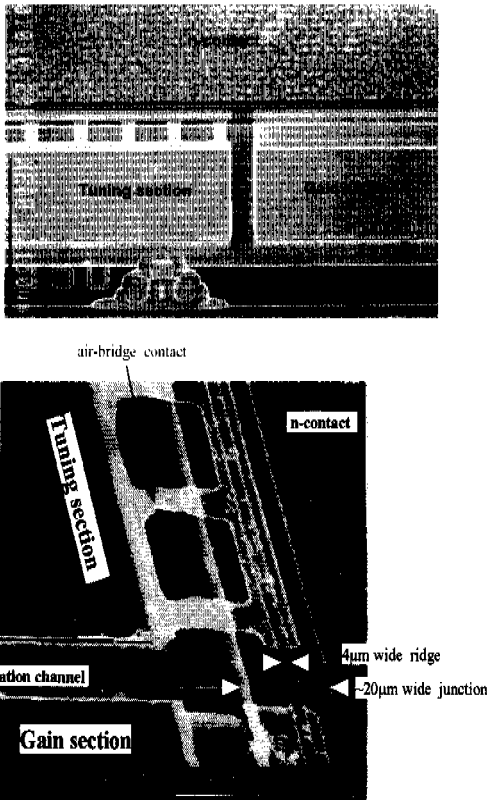


Fig. 7 SEM picture of air-bridge connected two-section laser.

제작이 완료된 레이저는 상온에서 CW 동작하며  $7\text{nm}$  밴드 갭 blue-shift 특성을 갖는 튜닝 단을 갖는다. Air-bridge 레이저의 스레쉬홀드 전류는  $20\text{mA}\sim 40\text{mA}$ 이고 인가 전류에 따른 광스펙트럼은 그림8에 보였다. 튜닝 단의 길이가  $90\mu\text{m}\sim 400\mu\text{m}$  일 때 측정된 캐패시턴스는  $1\sim 3\text{pF}$ 이었다.

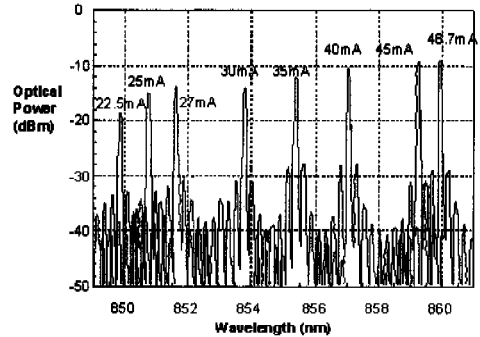


Fig. 8 The optical spectra of two-section air-bridged laser.

그림9는  $N^+$  기판 위에 제작된 Polyimide 코팅 레이저의 단면도이다.

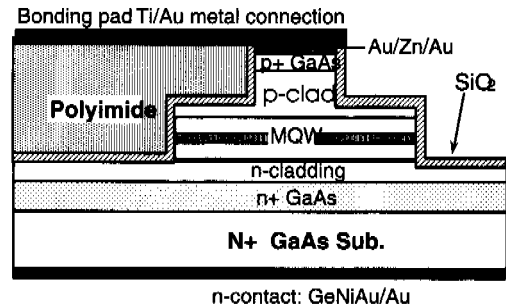


Fig. 9 Schematic diagram of Polyimide coating planarised laser fabricated on a normal  $N^+$  substrate.

양자우물 intermixing 후에 리지의 정의 및 분리 단을 에칭하고 Polyimide 프로세스를 진행한다.  $\text{SiO}_2$ 의 증착 후에 약  $4\mu\text{m}$  Polyimide를 사용한 photolithography에 의하여 컨택을 만든다. Polyimide 코팅 레이저의 광스펙트럼은 그림10과 같다. 스레쉬홀드 전류가 air-bridge 레이저 보다 약간 높은 특성을 갖는다. 튜닝 단의 길이가  $100\mu\text{m}\sim 400\mu\text{m}$ 인 경우  $2\sim 5\text{pF}$ 의 캐패시턴스가 측정되었다.

## VI. 결론

본 논문은 DWDM 또는 OFDM에서 요구되는

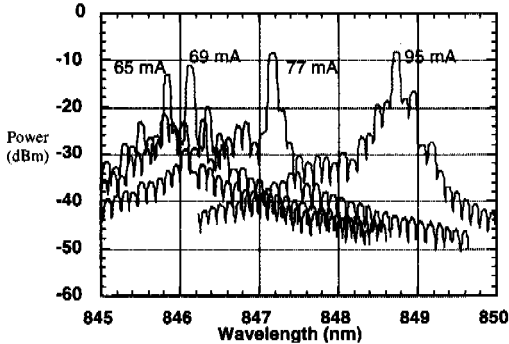


Fig. 10 Optical spectra of Polyimide coated laser.

균일한 주파수변조 응답 특성을 얻기 위한 microwave photonic 튜어블 FM 레이저의 설계와 제작에 관하여 소개 하였다. 이득 단과 튜닝 단이 단일 웨이브가이드 상에 직접 된 구조를 가진 리지 웨이브가이드 레이저로 구현하였으며 다중양자우물 QCSE를 실현하기 위하여 역 전압 바이어스 튜닝 방법을 적용하였다. 이온 이식에 의한 두 단의 전기적 분리 저항은 최대 1ΩG이었다. 밴드 갭 intermixing 기술을 사용하여 튜닝 단의 밴드 갭이 흡수 익시톤피크로부터 장파장 측 대역 ~10nm로 편이 되어 IM이 없는 선형의 튜닝 특성을 얻었다. 마이크로웨이브 변조를 위한 air-bridge 와 Polyimide 컨택 구조의 구현으로 본 레이저는 최대 6GHz까지 ±3dB 균일한 주파수 응답 특성을 가지며 최대 20nm의 파장 튜닝 특성을 갖는다.

감사의 글

본 논문을 발표하는데 도움을 준 Dr. Huang과 웨이퍼를 제작한 웨필드대학의 J. S. Roberts에게 감사하고 본 저자들은 미국국방기초과학연구기금의 후원에 감사한다.

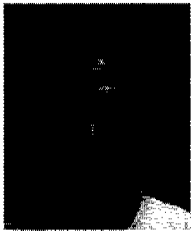
참고 문헌

[1] Spacial issue on All-optical Networks, Journal of Lightwave Technology, Vol.11, May, 1993.  
 [2] T. Li, "Advances in optical fibre communications: an historical perspective", IEEE Journal of Selective Areas on Communications, Vol.SAC-1, pp.356-372, 1983.  
 [3] T. Okaoshi and K. Kikichi, Coherent Optical Fibre Communications, Boston: Kluwer

Academic, 1988.  
 [4] A. J. Seeds, "Microwave opto-electronics", Optical and Quantum Electronics, Vol.25, pp.219-229, 1993.  
 [5] B. Cai and A. J. Seeds, "Optical frequency modulation links: theory and experiments", IEEE Transaction on Microwave Theory and Technology, Vol.45, pp.505-511, 1997.  
 [6] S. Ogita, Y. Kotaki, M. Matsuda, Y. Kuwahara, H. Onaka, H. Miyata and H. Oshikawa, "FM response of narrow linewidth, multielectrode /4 shifted DFB lasers", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.2, pp.165-166, 1990.  
 [7] M. Okai, M. Suzuki and M Aoki, "Complex-coupled /4 shifted DFB lasers with flat FM response", Electronics Letters, Vol.25, pp.145-146, 1989.  
 [8] G. Lengyel, K. W. Jelley and R. W. H. Engelmann, "A semi-empirical model fro electroabsorption in GaAs/AlGaAs multiple quantum well modulator structures", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.QE-26, pp.296-304, 1990.  
 [9] K. W. Jelley, R. W. H. Engelmann, K. Alavi, and H. Lee, "Well size related limitations on maximum electro-absorption in GaAs/AlGaAs MQW structures", Applied Physics Letters, Vol.54, pp.70-72, 1989.  
 [10] P. J. Stevens, M. Whitehead, G. Parry and K. Woodbridge, "Computer modeling of electric field dependent absorption spectrum of MQW material", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.QE-24, pp.2007-2016, 1988.  
 [11] S. M. Sze and J. C. Irvin, Solid State Eelectronics, Vol.11, pp.599, 1968.  
 [12] S. J. Pearton, "Ion implantation in III-V semiconductor technology", International Journal of Modern Physics B, Vol.2, pp.4687-4761, 1993.  
 [13] J. H. Marsh, "Quantum well intermixing", Semiconductor Science and Technology, Vol.8, pp.1136-1155, 1993.



### 송 주 빈(Ju-Bin Song)



He received the BSc degree in Electronics and MSc degree in Telecommunications and DSP from Kyung Hee University in 1987 and 1989 respectively. He is currently completing a Ph.D. in the Department of Electronic

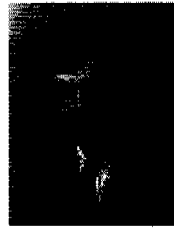
and Electrical Engineering, University College London (UCL), University of London. His current work is InGaAsP/InP MQW semiconductor FM laser comb generators for Dense WDM networks in EPSRC PHOTON project.

He studied microwave frequency synthesis, channel coding, satellite modem, wide-band and high-speed phased array antenna systems for satellite-mobile receiver, telecommunication system performance evaluation and LEO/GEO satellite communication systems in Electronics and Telecommunications Research Institute as a senior researcher from 1992 to 1997. His current research interests include applications of MQW FM lasers, high-speed optical modulators, THz optical frequency synthesis, ultra high-speed Dense WDM systems, multi-media service based high-speed fibre-radio systems and high-speed optical Dense WDM networks. He is a member of IEEE, LEOS, MTT, IEEK, KICS, and OSK.

### X. Huang

He received the BSc and MSc degrees in Physics. He received Ph.D. degree from UCL in 1998. He was a research staff in University of Nottingham for two years before UCL, where he worked on semiconductors. In 1998 he was a research fellow in UCL and moved to E-TEK Dynamics, USA. He is currently a senior member in E-TEK Dynamics, JDS Uniphase. His current interest include optical communications and active and passive optical components.

### A. J. Seeds



He received the B.Sc. degree in Electronics in 1976 and the Ph.D. Degree in Electronic Engineering in 1980, both from the University of London. From 1980 to 1983 he was a Staff Member at Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute

of Technology, where he worked on monolithic millimetre-wave integrated circuits for use in phased-array radar. He was appointed Lecturer in Telecommunications at Queen Mary College, University of London in 1983, In 1986 he moved to University College London where he in currently Professor of Opto-electronics and Leader of the Opto-electronics and Optical Networks Group.

Professor Seeds in author of over 100 papers on microwave and opto-electronic devices and their systems applications and presenter of the video "Microwave Opto-electronics" in the IEEE Emerging Technologies series. His current research interests include microwave bandwidth tunable lasers, optical control of microwave devices, mode-locked lasers, optical phase-lock loops, optical frequency synthesis, dense WDM networks, optical soliton transmission and the application of optical techniques to microwave systems, He is an IEEE Fellow and Vice Chairman of Commission D(Electronics & Photonics the International Union for Radio Science(URSI)