

초고속 반도체 레이저 (High-Speed Semiconductor Lasers)

李 用 卓

光州科學技術院 情報通信工學科

沈 鍾 賁

漢陽大學校 工學大學 電子工學科

I. 서 론

반도체 레이저의 응용분야는 통신, 신호입출력 단말장치, 신호처리 및 컴퓨팅, 광계측, 각종 표시용 장치 등 매우 다양하며 계속 새로운 응용분야 및 신기능들이 개발되고 있다.^{[1]-[3]} 이러한 반도체 레이저의 주요 기능중 고속변조특성은 통신 및 신호처리 분야에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있어, 많은 연구가 계속되고 있다. 반도체 레이저의 변조대역폭은 레이저의 종류별로 다르나, 대략 10~40GHz 정도를 기록하고 있으며, 분리된 변조기를 사용하면 이보다 변조대역폭을 향상시킬 수 있다. 본 해설에서는 광대역 종합정보통신망(B-ISDN) 구축을 위해 새로운 관심을 끌고 있는 초고속 통신용 반도체 레이저를 중심으로 기술적인 제약 요소와 해결방안, 앞으로의 전망 등에 대하여 살펴보고자 한다.

현재 표준화 되어 있는 SONET(Synchronous Optical Network) 전송 시스템의 계위는 155Mbps, 622Mbps, 2.5Gbps 등으로 이미 국간중계망 등에 상용화 되어 있으며, 10Gbps 시스템도 실용화 시험을 거쳐 상용화를 목전에 두고 있다. 2.5Gbps시스템까지는 DFB레이저를 이용한 직접 변조 시스템이고, 10Gbps시스템에서는 외부 변조기 또는 분리된 변조기를 이용하는 경우가 대부분이나, 직접변조 방식에 관한 연구도 병행되고 있다. 외부 변조기를 사용하는 주된 이유는 직접변조 방식에 의한 고속 변조시, 반도체 레이저의 발진 선풍이 커지는 현상(chirping) 때문에 전송거리에 제한을 받기 때문이다. 따라서 초고속 장거리 전송 시스템의 구현을 위해서는 광섬유 분산의 영향을 적게 받도록 고속변조시 광원의 발진 선풍을 충분히 적게 할 필요가 있다.

시분할 다중에 의한 초고속 전송 방식이 계속 각광을 받고 있는 주된 이유는 전송단가를 가장 싸게 할 수 있고 현재의 시분할 교환 방식과 쉽게 연계되기 때문이다. 이는 광섬유 증폭기의 출현과 반도체 레이저의 성능 향상, 1.55 μ m 대역 분산이동 광섬유의 실용화 추세 등에 힘입어 지속적으로 발전

되어 왔다. 이러한 반도체 레이저의 직접 변조에 의한 전송 성능 제한 요인은 크게 나누어 반도체 레이저의 직접변조 대역폭 제한에 의한 것과 고속 변조시 발생하는 발진광의 선폭퍼짐(chirping)에 의한 것으로 볼 수 있다. 본해석에서는 이들 제한 요인들의 분석과 이의 해결방안들을 논의하고 최근의 연구 동향에 대하여 검토하고자 한다.

II. 반도체 레이저의 변조대역폭

반도체 레이저의 변조주파수 특성은 광자(photon)와 전하(carrier)의 rate방정식을 사용한 소신호 해석으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.^[3]

$$H(f) = \frac{f_r^2}{(f^2 - f_r^2)^2 + f_r^2} \frac{1}{1 + (2\pi f RC)^2} \quad (1)$$

여기서, f_r 은 공진주파수(relaxation oscillation frequency), r 는 댐핑율(damping rate), C 는 기생용량(parasitic capacitance), R 은 저항값(resistance)이다. 또한 댐핑율 r 는 공진주파수 f_r 의 2승에 거의 비례하며 다음과 같은 관계를 갖고 있다.

$$r = K f_r^2 + \frac{1}{\tau_n} \quad (2)$$

여기서, K 는 댐핑인자(damping factor), τ_n 은 전하의 수명이다.

식(1)에서 알 수 있는 바와 같이 반도체 레이저의 고속화를 위해서는, 기생용량 C 의 저감, 공진주파수 f_r 의 증대, 댐핑율 r 의 저감이 중요하며, 이러한 요인에 의해 제한되는 최대변조주파수대역 f_{3dB} 는 각각 다음과 같이 표현된다.

(1) 기생용량 C 에 의한 변조대역의 제한

$$f_{3dB}(C) = 1/(2\pi RC) \quad (3)$$

(2) 공진주파수 f_r 에 의한 변조대역의 제한(댐핑 현상이 무시가능한 경우)

$$f_{3dB}(f_r) = \sqrt{1 + \sqrt{2}} f_r \cong 1.55 f_r \quad (4)$$

(3) 댐핑율 r (댐핑인자 K)에 의한 변조대역의 제한

$$f_{3dB}(K) = 2\sqrt{2\pi} / K \quad (5)$$

RC시정수에 의한 변조대역폭의 제한은 레이저의 구조에 크게 의존한다.^{[2]-[5]} 기생용량 C 를 줄이는 방법으로서, (a) BH(Buried Hetero-structure) 재성장층의 재료로 유전율이 적은 반절연재료의 사용, (b) Double Channel 등을 이용한 BH 재성장층의 면적의 감소, (c) 두꺼운 절연막의 도입, (d) 금속접합면적의 면적의 축소 등이 사용되고 있다. 이와 같은 방법을 사용해 현재 $C=1\sim 2pF$, $R=5\sim 10\Omega$ 정도로 제작가능하며, 이는 식(3)의 RC시정수에 의한 변조대역폭의 상한주파수가 약 30GHz에 상당한다. 이 값은 반도체 레이저에서 실제로 얻어지는 약 10~20GHz 정도의 변조 상한 주파수 보다도 충분히 높기 때문에, 반도체 레이저의 변조상한주파수는 식(4)의 공진현상과 식(5)의 댐핑현상에 의해 주로 결정된다고 말할 수 있다. 따라서 다음절에서는 반도체 레이저에서 공진주파수 f_r 과 댐핑율(또는 댐핑인자 K)가 무엇에 의해 결정되며, 변조대역폭의 확대를 위한 개선방안에 대해 고찰하고자 한다.

1. 공진주파수의 증대

공진주파수 f_r 은 전하와 광자의 공진관계를 나타내는 것으로 다음과 같이 표현된다.^[2]

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0 V_g (dg/dN)}{\tau_p}} \quad (6)$$

여기서 S 는 광자밀도, dg/dN 은 미분이득, τ_p 는 광자수명, V_g 는 군속도이다. f_r 을 증대시키기 위해서는

- (1) 광자수명 τ_p 의 저감
- (2) 광자밀도 S 의 증대
- (3) 미분이득 dg/dN 의 증대

등의 방법이 있다.

광자수명 τ_p 를 저감시키기 위해서는 공진기반사 단면을 낮추거나, 공진기내의 광손실 증가, 또는 공진기길이를 짧게하는 방법 등을 생각할 수 있다. 그러나 공진기내의 광손실을 증가시키는 것은 레이저의 발진문턱전류등의 특성을 저하시키므로 실제로 공진기 길이를 짧게하는 것이 가장 효과적이다.^[6] 두번째 광자밀도 S 의 증대방법으로는 공진기의 광구속계수(Oprical Confinement Factor)를 크게하고, 공진기반사단면의 파괴를 줄이기 위하여 반사면부위를 투명하게 하는 방안 등이 연구되어 왔다. 이상의 방법은 레이저 구조를 바꾸는 것으로 그 효과에 한계가 있는 반면 세번째의 레이저의 물질구조를 바꾸어 미분이득 dg/dN 을 크게하는 방법은 반도체 레이저의 공진주파수를 높히는 가장 효과적인 방법이라 말할 수 있다. 또한 이 방법은 3절에서 살펴보는 바와 같이 반도체 레이저의 고속직접변조시 발생하는 선폭퍼짐(Wavelength Chirp)을 줄이는 본질적인 방법이기도 하기 때문에, 고속직접변조로 사용되는 반도체 레이저의 설계에 있어서 가장 중요한 요소중의 하나이다. 이에 대해 다음절에서 자세히 다루고자 한다.

미분이득의 증대

반도체 레이저의 광학이득은 다음식으로 쓸 수 있다.^[3]

$$g \propto R_{cv}^2 \rho_{red}(f_c - f_v) \quad (7)$$

여기서 R_{cv}^2 는 쌍극자 모우멘트(Dipole Moment), ρ_{red} 는 전자와 정공의 상태밀도합수를 함께 표시한 환원상태밀도(Reduced Density of States), $(f_c - f_v)$ 는 반전분포를 나타내는 Fermi-Dirac분포항이다. 따라서 반도체 레이저의 미분이득을 증대하기 위해서는, 식(7)의 각항들이 적은 주입 전하수로도 큰 값을 갖도록 해주어야 한다. 현재까지 보고된 dg/dN 의 증대방법을 정리해 보면 다음과 같

다.

- (1) bulk활성층에 p형 불순물의 도핑^[7]
- (2) 활성층에 quantum-size효과의 도입
- (3) 변조도핑(Modulation-doped) QW구조의 도입^[8]
- (4) 발진파장과 이득피크파장의 분리^[9]

먼저 활성층이 bulk로 구성되어 있는 반도체 레이저인 경우에는 (1)의 활성층에 p형 불순물을 도핑함으로써 dg/dN 를 증대시킬 수 있다. (7)식에서 R_{cv}^2 와 ρ_{red} 값들은 활성층의 반도체 재료특성에 의해 거의 결정되는 상수이기 때문에, dg/dN 은 $(f_c - f_v)$ 항의 변화에 의해 결정된다. 활성층에 p형 불순물을 도핑하면 유효질량이 정공의 Quasi Fermi-level E_v 의 값이 적은주입전하수로도 가전자대에 가깝게 위치하게 된다. 따라서 적은 주입 전하수로도 빠른 반전분포 $(f_c - f_v)0$ 가 형성되고 미분이득의 증대가 가능하다.

한편 활성층에 양자우물(Quantum Well)구조를 도입한 경우에는 주입된 전하가 양자우물층내에 국재화되기 때문에 자유도가 2차원적으로 변한다. 이러한 양자우물구조에 있어서는 전자와 정공의 상태밀도합수가 계단상으로 변하여 적은주입 전하수로도 $(f_c - f_v)$ 의 증가가 현저하게 된다. 또한 Bulk활성층에 있어서 축퇴되어 있던 heavy-hole 에너지밴드와 light-hole 에너지밴드가 유효질량의 차이에 의해 분리되기 때문에, R_{cv}^2 의 값 역시 증대된다. GaAs/AlGaAs계 레이저에서는 활성층에 QW구조를 도입함으로써 bulk에서 보다도 dg/dN 이 약 4배, f_v 이 약 2배 증가된다는 것이 이론 및 실험으로 밝혀졌다.^[8] 그러나 일반적으로 기판이나 Barrier에 격자정합을 이루고 있는 QW구조에서는, heavy-hole 에너지밴드의 유효질량이 매우 무거워 양자화 에너지간격이 매우 좁아지게 되고, 따라서 정공의 Quasi Fermi-level E_v 의 변화는 bulk인 경우에 비해 그다지 빠른 변화를 보이지 못한다. 이는 격자정합을 이루고 있는 QW구조에서의 dg/dN 의 증대는 주로 전자의 양자화 효과에 개선되고 있음을 시사하고 있다.

이러한 경우에 QW에 p형 불순물을 도핑하면

앞서 설명한 이유로 빠른 반전분포와 dg/dN 의 증대가 기대된다. 그러나 양자우물 영역에 p형 불순물을 도핑하면 불순물준위와 전도대간 천이가 발생해 광손실이 증대하여 발진개시전류의 증대, 외부분비득의 감소등 발진특성에 영향이 있다. 이러한 문제는 밴드갭이 발진파장의 에너지보다 큰 barrier에 선택적으로 도핑하면 해결가능하다. 이와 같이 변조도핑된 GaAs/AlGaAs QW레이저에서, f_r 이 30GHz 이상인 것으로 보고되었으며, 이 값은 변조도핑되어 있지 않은 QW레이저의 f_r 보다 약 2.5배 개선된 값이다.^[8]

최근 들어 MOVPE(Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy)나 MBE(Molecular Beam Epitaxy) 등의 결정성장기술의 개발로 활성층에 기관과 격자상수가 다른, 소위 strained-QW 레이저의 연구가 활발히 진행되고 있다. 활성층에 기관보다 격자상수가 큰 compressive strain을 도입한 경우에는 주로 정공의 유효질량이 가벼워져 적은 주입전하수로도 빠른 반전분포 ($f_c - f_r > 0$)의 형성이 가능하여 미분이득이 증대된다. 반면에 활성층에 기관보다 격자상수가 작은 tensile strain을 도입한 경우에는 주로 heavy-hole 밴드와 light-hole 밴드분리가 커져 R_{sp}^0 와 ρ_{red} 의 증대에 의해 미분이득이 증대되는 것으로 밝혀져 있다.^{[10]-[11]}

한편 단일파장레이저로 가장 많이 쓰이는 DFB(Distributed Feedback) 레이저 구조에 있어서는 회절격자의 주기와 광도파로구조를 조절함으로써 광학이득의 피크파장과 발진파장을 독립적으로 제어할 수 있다. 이러한 경우 발진파장을 이득피크파장보다도 단파장측에 설정함으로써 미분이득을 증대시킬 수 있다.^[9] 이는 발진광 에너지가 커지면 일반적으로 반도체 레이저의 상태밀도 ρ_{red} 가 증대하고, 따라서 ($f_c - f_r$)의 포화가 잘 일어나지 않기 때문이다.

InGaAsP/InP계 반도체 레이저의 f_r

GaAs/AlGaAs계 반도체 레이저에서는, 공진기 길이를 약 $150\mu\text{m}$ 정도로 짧게하고 활성층에 MQW(Multiple Quantum Well) 구조를 도입함으로써, bulk활성층에 비해 약 3배 이상 향상된 30GHz이상의 공진주파수 f_r 값을 얻고 있다.^[8] 그

러나 광통신에 주로 사용되는 InGaAsP/InP계 반도체 레이저에서는 활성층에 MQW 구조를 도입함에도 불구하고 f_r 값이 약 10~15GHz 정도를 넘지 못하고 있다.^{[10]-[23]} InGaAsP/InP계 반도체 레이저에서 f_r 값이 GaAs계 레이저에 비해 작은 것은 다음과 같은 요인 때문인 것으로 생각되어지고 있다.

- (1) InP계 반도체 레이저의 내부광손실(α_i)은 가전자대간 흡수(IVBA)와 자유캐리어의 플라즈마손실(α_{pl})에 의해 결정되기 때문에, α_{pl} 만에 의해 결정되는 GaAs계 레이저의 α_i 에 비해 그 값이 크다. 따라서 InP계 반도체 레이저에서는 높은 발진캐리어수에 의해 미분이득이 쉽게 포화한다.
- (2) InGaAs(P)/InGaAsP MQW활성층을 도입한 InP계 반도체 레이저에서의 전도대불연속비 $\Delta E_c/E_g$ 가 약 0.3~0.4 정도(GaAs/AlGaAs계에서는 약 0.7)로 전자의 전위장벽이 낮고, 따라서 유효질량이 가벼운 전자는 쉽게 양자우물에서 벗어나 주입전하의 양자화효과가 줄어든다.
- (3) InGaAs(P)/InGaAsP MQW활성층의 미분이득을 높이기 위해서 양자우물수를 늘리면, 유효질량이 무겁고 깊은 전위장벽 때문에 정공의 불균일한 분포가 형성되어 미분이득이 감소한다.

이상의 이유로 인해 InGaAsP/InP계 반도체 레이저의 f_r 값을 높이기 위해서는 앞절에서 설명한 방법과 함께 좀더 심층적인 연구가 사료된다. 최근의 연구결과들로부터 필자들이 생각한 몇 가지 개선방향을 정리해 보면 다음과 같다.

- (a) 전자의 전위장벽을 높이기 위해 새로운 Barrier층 물질을 도입한다. 양자우물수를 많이 한 경우 심각한 정공의 불균일 분포가 예상되기 때문에 적절한 Barrier의 조성으로 활성층 구조를 최적화해야한다..
- (b) 전도대불연속비 $\Delta E_c/E_g$ 가 높은 물질을 사용한다. AlInGaAs/InGaAsP나 InAsP/InP MQW 구조에서는 $\Delta E_c/E_g$ 가 알려져 있다.^{[14]-[15]}

- (c) 정공의 불균일 분포를 개선하기 위하여 SCH(Separate Confinement Hetero-structure)영역의 길이를 짧게하고 Barrier에 정공의 유효질량이 작은 조성을 사용한다. 유효질량이 적은 compressive strain을 Barrier에 도입하고, 양자우물에는 Barrier에 의한 Strain을 보상할 수 있는 Tensile strain을 도입한다.^[10]
- (d) 양자우물내의 전위장벽을 다층화하여 정공이 쉽게 이동 가능토록 한다.

2. 댄핑율 r 의 저감

댄핑율 r 로 나타내어지는 반도체 레이저의 비선형 댄핑현상은 공진주파수 f_r 에서의 공진피크값을 줄일 뿐만 아니라 f_r 이상의 변조주파수에서 응답 특성을 결정하기 때문에 매우 중요하다. 또한 공진주파수 f_r 과 댄핑율은 서로 독립적으로 결정되는 것이 아니라 댄핑인자 K 에 의해 식(2)에서와 같은 상관관계를 갖고 있다. 특히 InGaAsP/InP계 반도체 레이저에 있어서 변조가능한 최고상한주파수는 주로 댄핑현상에 의해 지배된다고 밝혀져 있다.

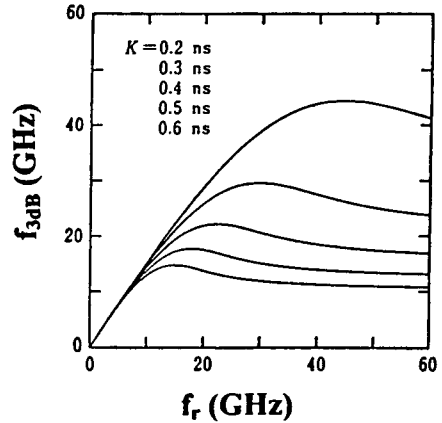
댄핑인자 K 는 다음식으로 주어진다.

$$K = \frac{(2\pi)^2}{V_g} \left[\frac{\epsilon}{dg/dN} + \frac{1}{\alpha_T} \right] \quad (7)$$

여기서 V_g 는 군속도, ϵ 은 이득억제계수(gain compression factor), α_T 는 공진기전체의 광손실이다. 일반적으로 식(7)의 2항은 1항에 비해 무시 가능하다.

그림 1에 반도체 레이저의 변조대역(3dB down 주파수)의 댄핑인자 K 의존성을 나타냈다. 댄핑인자 K 가 작은 경우에는 공진주파수 f_r 의 증가에 따라 변조대역 $f_{3dB}(K)$ 도 증가하지만, 댄핑인자 K 가 큰 경우에는 공진주파수 f_r 을 증가시켜도 변조대역 $f_{3dB}(K)$ 가 더 이상 증가하지 못하고 억제됨을 알 수 있다. 댄핑인자 K 의 저감을 위해서는 식(7)에서 알 수 있는 바와 같이 dg/dN 의 증가와 이득억제계수 ϵ 의 감소가 필요하다.

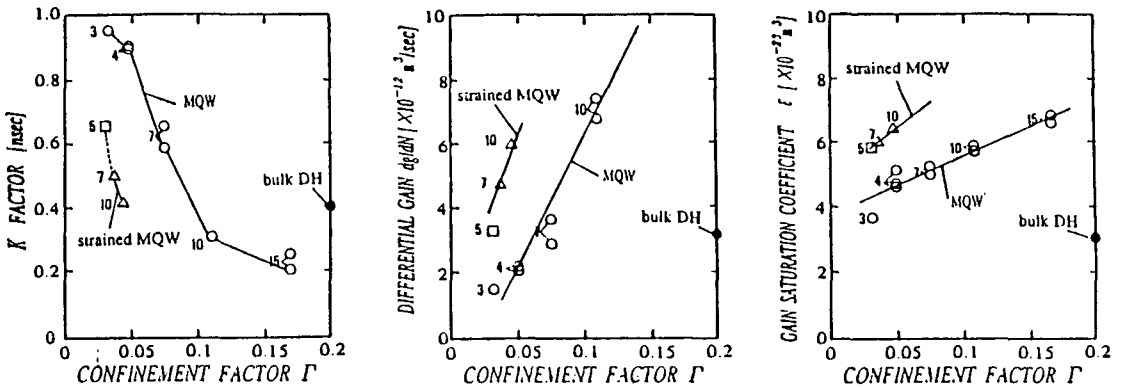
그림 2에 광섬유의 손실이 최소인 $1.55\mu\text{m}$ 에서



〈그림 1〉 댄핑인자 K 에 따른 공진주파수 f_r 과 변조상한주파수 $f_{3dB}(K)$ 와의 관계

발진하는 InGaAsP($\lambda_g=1.3\mu\text{m}$)/InP 반도체 레이저(FP-LD)의 댄핑인자 K , 이득억제계수 ϵ , 미분 이득 dg/dN 을 나타냈다.^{[16], [22]} 그림중의 숫자는 양자우물수이다. dg/dN 의 증가를 위해서는 앞에서 논의한 바와 같이 활성층에 다중양자우물구조를 도입하는 것이 매우 유효한 방법이다. 실제로 양자우물수를 10 정도의 MQW구조의 dg/dN 값은 bulk에서 보다 약 2배 정도 증가함을 알 수 있다. 그러나 이러한 경우에도 댄핑인자 K 값에는 큰 변화가 없는데, 이는 MQW구조에서의 이득억제계수 ϵ 값이 bulk에서보다 약 2배 증가하기 때문이다. ϵ 의 원인에 대해서는 spectral hole-burning, local carrier heating, DFB-LD에서의 spatial hole-burning 등이 거론되고 있으나 아직 명확한 해답이 밝혀지지 않고 있다.^{[17]-[18]} 현재까지 보고된 InGaAsP/InP계 반도체 레이저의 최대변조대역주파수는 활성층이 bulk인 경우에는 $\sim 25\text{GHz}$, MQW인 경우 $\sim 15\text{GHz}$ 정도로 활성층이 bulk인 경우가 오히려 높게 나타나 있는데, 이는 아직 MQW의 댄핑인자의 제어가 불충분한데 기인한 것으로 사료된다.^{[5], [13]}

활성층이 MQW구조인 반도체 레이저의 댄핑인자 K 값은 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 그 구조의존성이 매우 크다. 댄핑인자 K 값의 저감을 위한 가장 쉬운 방법은 양자우물수를 증가시키는 것



● Bulk, ○ I.M-MQW, □ In_{0.62}Ga_{0.38}As MQW, △ In_{0.71}Ga_{0.29}As MQW
 () : well Number

(그림 2) 1.55 μ m에서 발진하는 InGaAsP($\lambda_g=1.3\mu$ m)/InP 반도체 레이저(FP-LD)에서의 활성층 구조에 따른 댐핑인자 K , 비선형계수 ϵ , 미분이득 dg/dN 의 관계

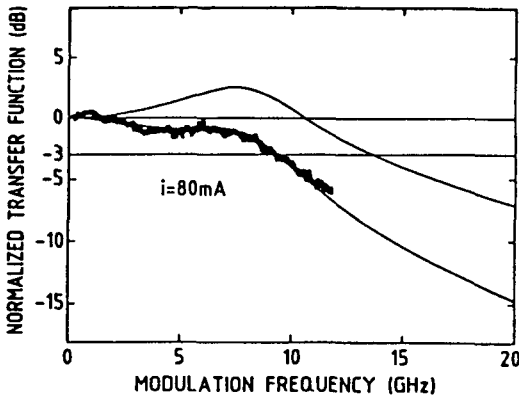
이다. 양자우물수가 증대할 수록 K 값이 줄어드는 이유는, 양자우물수가 많을 수록 발진개시에 필요한 이득이 감소하고 선형이득 dg/dN 이 증가하는 반면 이득억제계수 ϵ 은 MQW구조의존성이 거의 없기 때문이다. 그러나 양자우물수의 증가에 동시에 발진개시전류의 증대, 외부양자효율저감, stain 효과의 이완 등을 초래하기 때문에 실제로는 최대 양자우물수에는 제한이 따른다. 또한 양자우물수가 10 이상의 경우에는 미분이득 dg/dN 이 양자우물수에 비례하여 증가하지 못하는데, 이는 유효질량이 큰 정공의 수송현상이 관련되어 있는 것으로 추측되고 있다.^{[19]-[23]}

InGaAsP/InP계 이중접합에 있어서는 $\Delta E_c/E_g$ 가 약 0.3~0.4 정도로 정공의 전위장벽이 높고 유효질량이 무거워, 정공은 쉽게 양자우물에 포획될 뿐만 아니라 다른 양자우물로의 이동이 전자에 비해 어려워 진다. 이러한 InGaAsP/InP계 MQW 구조의 정공의 수송현상은 반도체 레이저의 실효 미분이득의 감소를 초래해 댐핑인자 K 의 저감을 방해하는 요인으로 작용하게 된다. InGaAs/InGaAsP MQW구조에서 정공의 수송현상을 개선하기 위해서는 유효질량이 가볍고 전위장벽이 낮은 1.3 μ m InGaAsP를 barrier로 이용하고, SCH

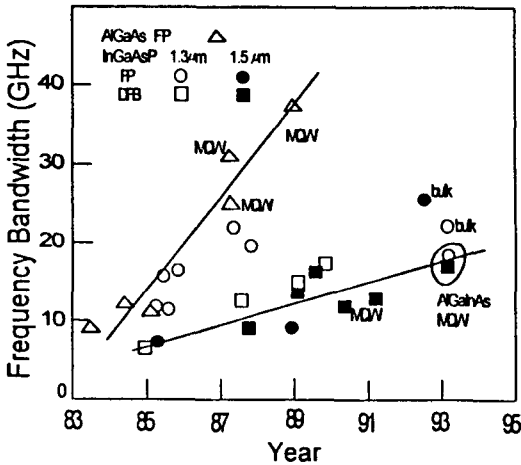
영역의 두께를 감소시키며, p형 변조도핑MQW 구조를 도입하는 방법들이 밝혀져 있다.^{[17]-[20]} 또한 앞절에서 논의한 바와 같이 InGaAs/InGaAsP MQW구조 대신 $\Delta E_c/E_g$ 가 큰 InGaAs/AlGaInAs MQW구조를 도입한 새로운 재료에 대한 연구도 최근들어 활발해지고 있다. InGaAs/AlGaInAs MQW을 도입한 경우 댐핑인자 K 와 이득억제계수 ϵ 값이 InGaAs/InGaAsP MQW구조에서 보다 줄어드는 것으로 알려져 있다.

그림 3에 InGaAs/AlGaInAs MQW DFB-BRS레이저의 주파수 응답특성을 나타냈다.^[15] 이 레이저는 최대변조상한주파수는 RC에 의해 제한되었으며, 이를 보상한 계산치가 그림 3의 위의 곡선이다. 또한 이 레이저는 10Gbps NRZ변조에서 chirping양이 0.11nm로 극저 chirping 특성을 보고하기도 하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 InGaAsP/InP MQW-LD의 변조대역폭을 확대하기 위해서는 MQW구조의 설계, 공기진기내부의 field분포, 활성층의 p-doping 등의 적극적인 연구가 사료된다. 또한 conduction band의 band offset이 큰 새로운 장파장용 반도체재료의 연구도 앞으로의 중요한 과제라 하겠다. 그림 4에 현재까지 보고된 반도체



(그림 3) 1.55μm InGaAs/AlGaInAs MQW DFB-BRS레이저의 주파수 응답특성의 계산치와 실험치. 이 레이저의 양자우물수는 6이고 공진기 길이는 270μm였다.



(그림 4) 각종의 반도체 레이저에 있어서 실험적으로 보고된 최대변조대역주파수

레이저의 최대변조 상한주파수를 정리해 놓았다.

V. Chirping의 축소

단일과장 반도체 레이저를 고속으로 직접변조하

면 발진광의 스펙트럼폭은 수 Å 정도로 DC발진 상태보다도 훨씬 넓어지게 된다. 이러한 선폭퍼짐 현상을 반도체 레이저의 chirping이라 부르며, 이는 광섬유를 이용한 광통신에서의 전송대역폭을 결정하는 요인이 된다. chirping현상은 직접변조시 발생하는 활성층의 내부의 캐리어변동에 의한 빛의 이득과 굴절을 변화에 기인되는 것으로 단일과장 반도체 레이저에서의 chirping은 다음관계식으로 주어진다.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\alpha_{eff}}{2I(t)} \frac{dI(t)}{dt} \tag{8}$$

여기서 $\phi(t)$ 는 빛의 위상, $I(t)$ 는 빛의 강도, α_{eff} 는 실효선폭증대계수(effective linewidth enhancement factor)이다. 식(8)에서 알 수 있는 바와 같이 단일과장 반도체 레이저의 chirping은 바이어스 전류값이 높을 수록, 변조전류양이 적을 수록, α_{eff} 값이 적을 수록, 변조 bit rate가 적을 수록 작게 얻어짐을 알 수 있다. chirping에 영향을 주는 이러한 요인 가운데, 동일한 광출력과 동일한 bit rate조건에서 chirping을 줄이기 위해서는 α_{eff} 값이 작아야 한다.

굴절율결합형 DFB(distributed feedback), DBR(distributed Bragg reflector), DR(distributed reflector)^[24], 또는 CC-DFB(complex-coupled distributed feedback) 레이저^[25] 등과 같은 Bragg 반사기를 이용한 단일과장 반도체 레이저의 실효선폭증대계수 α_{eff} 는, C.H.Henry에 의해 규정된 FP레이저의 선폭증대계수 α ($\alpha = -\frac{2\omega_0}{c} \frac{dn/dN}{dg/dN}$)와 Bragg 반사기의 손실곡선상내의 동작점의 위치에 의해 결정된다. 실효선폭증대계수 α_{eff} 의 저감을 위해서는 DR, DBR레이저 등과 같이 활성영역과 수동영역의 복합공진기로 구성되어 있는 레이저들이 유리하나, 외부환경변화에 대한 안정성, 고출력 동작, 제작 공정의 간편성의 이유로 DFB레이저가 가장 많이 실용화되어 있다. 따라서 본고에서는 DFB 레이저의 chirping의 축소에 주안점을 두어 기술하고자 한다.

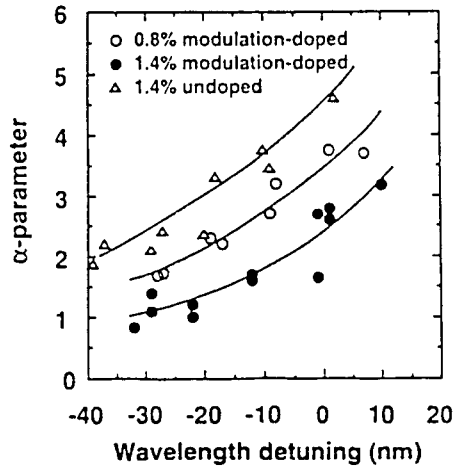
굴절율결합형 DFB레이저의 실효선폭증대계수

α_{eff} 는 원칙적으로 FP레이저의 선폭증대계수 α 와 동일하나 공진기내부의 광분포가 평탄하지 않기 때문에 발생하는 공간적인 Hole-Burning현상에 의해서 영향을 받는다.^[31] DFB레이저의 공간적인 Hole-Burning현상은 Bragg 반사기의 광결합계수 k 와 공진기길이 L 의 급인 kL 값에 의해 결정된다. kL 값이 2 이하인 경우에는 광펄스발생의 초기단계에 단파장측에 긴 꼬리가 발생하고, 또한 kL 값이 3 이상으로 커지면 발진파장이 단파장편으로 매우 낮은 시정수로 움직이기 때문에 변환시 발진 선폭이 커지게 된다. 또한 DFB레이저의 kL 값은 발진개시전류와 외부미분양자효율에 크게 영향을 주므로 최적화가 필요하다. 굴절율결합형 DFB 레이저에서는 $kL=2.0\sim 2.5$ 정도가 chirping양축소와 발진특성의 안정화라는 관점에서 최적의 값이라고 알려져 있다. 반도체 레이저의 chirping을 축소하기 위해서는 무엇보다도 다음과 같이 정의된 활성층의 선폭증대계수의 감소가 중요하다.

$$\alpha = \frac{2\omega_0}{c} \frac{dn/dN}{dg/dN} \quad (9)$$

여기서 ω_0 는 각주파수, 빛의 속도, dg/dN 은 미분 굴절율, dn/dN 은 미분이득이다. 식(9)에서 dg/dN 은 활성층의 구조에 따라 크게 변화하지 않음으로 선폭증대계수 α 의 감소를 위해서는 dn/dN 의 증대가 중요하다. dn/dN 의 증대를 위한 방법은 앞절에서 자세히 논의 하였으므로 이를 참조하기 바란다. 반도체 레이저 구조에 따른 미분이득의 영향으로 선폭증대계수는 활성층을 bulk→격자정합MQW→strained MQW→변조도평된 strained MQW로 함에 따라 감소하게 된다.

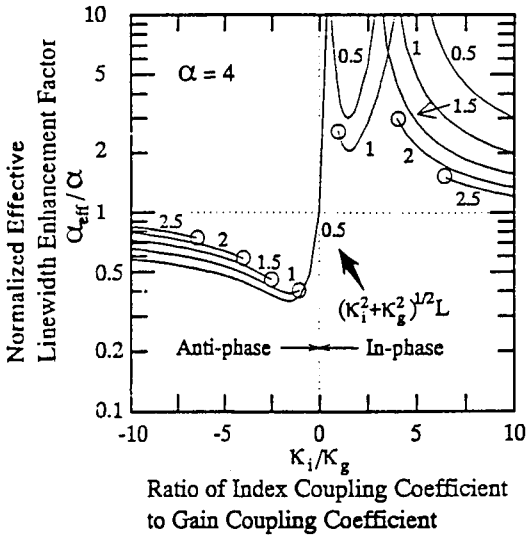
그림 5에 $1.55\mu\text{m}$ 에서 발진하는 굴절율형 InGaAsP계 DFB레이저의 선폭증대계수 α 를 나타냈다. 단일파장 반도체 레이저에서의 dn/dN 은 발진파장의 이득피크파장에 대한 상대적인 위치에 따라 크게 변한다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 α 값은 발진파장 λ_L 이 이득피크파장 λ_p 보다 단파장영역에 있으면 감소하나 장파장영역에 있으면 급격히 증대한다. 따라서 α 값의 저감을 위해 발진



(그림 5) InGaAs/InGaAsP DFB레이저의 MQW 활성층구조에 따른 선폭증대계수의 변화

파장 λ_L 을 이득피크파장 λ_p 보다 단파장영역에 설정해 줄 필요가 있다. 또한 발진파장에서의 이득의 값은 이득피크를 벗어남에 따라 감소하여 기타의 발진특성에 영향을 주기 때문에, 일반적으로 10~20nm 정도로 발진파장을 이득피크파장보다 단파장영역에 설정해 주는 것이 좋다.

굴절율결합형 DFB레이저의 chirping은 주로 활성층의 선폭증대계수 α 에 의해 결정되는데 반해, 이득 및 굴절율결합에 의한 회절격자로 구성된 CC-DFB레이저에서는 분포반사기의 구조에 의해 α 값의 저감이 가능하다. 그림 6에 CC-DFB레이저의 구조에 따른 실효선폭증대계수 α_{eff} 의 변화를 나타냈다. 그림에서 횡축은 굴절율 회절격자에 의한 광결합계수 κ_i 를 이득회절격자의 광결합계수 κ_g 규격화한 값이며, 종축은 CC-DFB레이저의 실효선폭증대계수 α_{eff} 를 선폭증대계 α 수로 규격화한 값으로 이는 곧 굴절율결합형 DFB 레이저에 비해 CC-DFB레이저의 chirping양의 감소를 의미한다. CC-DFB레이저에 있어서는 α_{eff} 의 저감을 위해서는 이득회절격자와 굴절율회절격자를 반전분포(Anti-phase)로 형성되어야 한다. κ_i 를 κ_g 보다 3배 정도 크게하고 반전분포의 회절격자를 갖고 있는 CC-DFB레이저의 chirping이 굴절율형 DFB 레이저의 chirping양보다 반정도 저감됨을 알 수 있다.



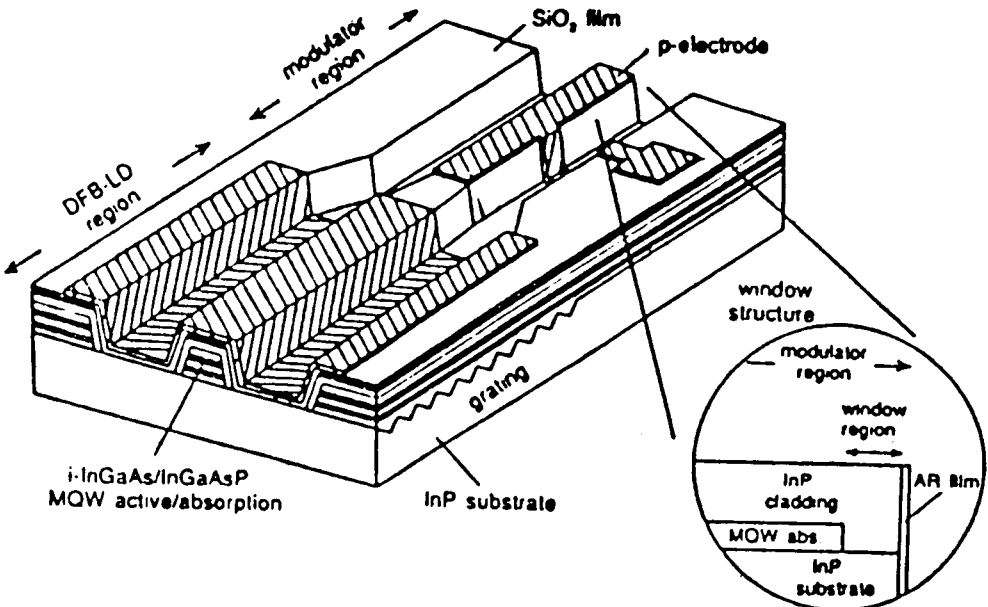
〈그림 6〉 CC-DFB레이저의 공진기구조에 따른 실효 선폭증대계수 α_{eff} 의 변화

IV. DFB레이저와 광변조기의 직접화

최근 광섬유 증폭기의 눈부신 발전에 힘입어 광

섬유의 손실에 의한 전송제한은 무시할 수 있게 됨에 따라, 분산이 없는 광변조기에의 요구가 커지고 있다. 또한 결정성장기술과 광소자제작기술의 발전에 힘입어 상당히 복잡한 구조의 소자로 제작가능해지게 되었다. 이러한 배경에 따라 최근 들어 단일파장 DFB레이저와 광변조기를 집적화하려는 움직임이 있다. 본 절에서는 삽입손실이 적고, 제작이 비교적 간단한 DFB레이저와 강도변조기(Electro-Absorption Modulator)를 직접화한 광원개발의 현황에 대해 기술하고자 한다.

DFB레이저와 광변조기를 직접화한 소자는 제작의 일관성, 소자의 소형화 등에 의한 제작 단가의 저렴화 뿐만 아니라 고신뢰성이 기대되어 일본의 NEC, KDD, NTT, Hitachi, OKI, 미국의 AT&T 등 여러 곳에서 개발 중에 있다. 강도변조기로서는 Franz-Keldysh, QCSE, Wannier-Stark효과 등 여러 방법 중에서 다중양자우물구조에서의 전계효과인 QCSE(Quantum-Confined Stark Effect)가 주로 이용되고 있다. 결정성장방법으로서는 주로 MOVPE방법, 사용재료로서는 InGaAsP/InP계가 주류를 이루고 있다. 소자의 제작방법으로서는 굴절율형 DFB레이저와 강도변조기를 BJB(Butt-

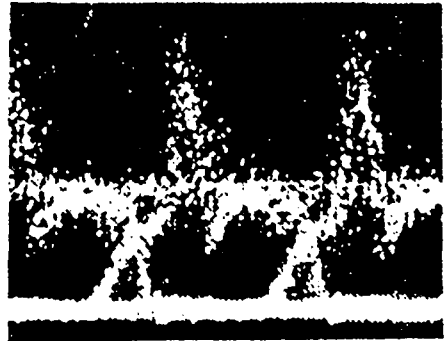


〈그림 7〉 MOVPE선택성장을 이용해 제작된 DFB레이저/강도변조기 직접화 된 소자의 구조도이다.

Joint-Built-In) 방법을 이용하는 경우(Fujitsu, OKI, NTT, KDD)와 MOVPE선택성장을 이용하는 경우(NEC, Hitachi, AT&T)가 있다. BJB방법을 이용하는 경우에는 DFB 레이저와 개별적인 최적화가 가능한 반면, 두소자간의 광결합손실이 크고 제작과정이 복잡하다는 단점이 있다.^[26] 이에 반해 한번의 성장으로 밴드갭 제어가 가능한 MOVPE선택성장을 이용한 경우에는 소자제작이 쉽고 두소자간의 광손실이 거의 무시가능한 반면, 두소자의 개별적인 최적화가 어려운 단점이 있다.^{[27]-[29]}

그림 7은 MOVPE선택성장을 이용해 제작된 DFB레이저/강도변조기 직접화한 소자의 구조도이다. DFB레이저/강도변조기의 chirping은 원리적으로는 (a)강도변조기의 흡수스펙트럼의 변화에 따른 굴절을 변화에 의한 것이나, 이외에도 (b)강도변조기출력단의 잔류반사율에 의한 DFB레이저에의 반사광, (c)DFB레이저와 강도변조기의 전기적인 결합에 의한 것 등이 있다. (c)에 의한 요인을 줄이기 위한 방법들로서는 DFB레이저와 강도변조기사이에 p형 클래드층을 사용하고 두 소자의 전극간격을 20~30m 이상 유지하거나, 두 전극사이의 p형 클래드층을 에칭하고, 에칭한 p형 클래드층을 반절연막으로 재성장하는 방법이 이용되고 있다. DFB레이저/강도변조기의 chirping에 가장 중요한 요인으로서는 (b)의 강도변조기의 잔류반사율에 의한 것으로 일반적으로는 강도변조기의 단면에 창구조를 도입하고 무반사코팅을 행하여 반사율을 10^{-4} 이하로 조절해 주어야 한다. 그림 7의 강도변조기의 단면에 무반사코팅만 한 경우와 무반사코팅과 창구조를 도입한 구조의 2.5Gb/s NRZ신호의 80km전송후의 Eye 패턴과 전송특성을 그림 8과 그림 9에 나타냈다. (a)에 의한 요인은 chirping양보다는 주로 인가전압에 따른 흡수율변화의 비선형성에 의한 신호의 왜곡에 더욱 큰 영향을 준다.

DFB레이저/강도변조기 직접화한 소자에 있어서 chirping이외의 중요 기술적인 사항으로서는 (1) 3dB대역폭, (2) 삽입손실, (3) 필요한 소광비를 얻기 위한 가해져야 하는 구동전압, (4) 입력의



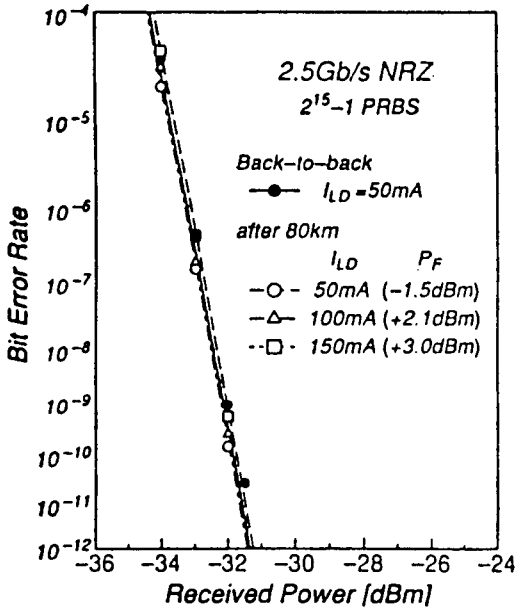
(a) AR only



(b) AR+window

〈그림 8〉 강도변조기의 단면의 무반사 처리에 대한 80km전송후의 Eye패턴의 변화. 전송실험은 분산이 17ps/nm/km인 광섬유와 2.5Gb/s NRZ변조로 행하였다.

존성 등이다. 일반적으로 구동전압과 대역폭은 서로 상관관계를 유지하고 있다. 소광비는 흡수계수의 인가전압에 의한 변화분, 강도변조기길이, 광속계수의 곱으로 나타내어 진다. 대역폭은 소자의 기생용량에 의해 제한되며, 시료길이에 비례하고 흡수층 두께에 반비례한다. 이에 반해 구동전압은 흡수층의 두께에 비례하기 때문에 3dB 대역폭과 구동전압의 비가 하나의 Figure of Merit가 된다. 삽입손실로서는 DFB 레이저의 발진과장과 강도변조기 흡수층의 흡수단과의 에너지차로 결정되는 물질고유의 기초흡수, 광도파로의 자유캐리어 흡수와 산란손실, 광섬유와의 결합손실 등이 있다. 기



(그림 9) 단면에 창구조와 무반사코팅을 가진 DFB레이저/강도변조기의 전송특성. 전송실험은 분산이 17ps/nm/km인 광섬유와 2.5Gb/s NRZ변조로 행하였다.

초흡수가 작고 적은 인가전압으로 큰 소광비를 얻기 위해서는 여기자(exiton) 흡수스펙트럼이 급격해야 하며, 이를 위해서는 매우 정밀한 이중접합의 MQW구조가 요구된다. 이외에 고출력시의 정공의 축적 등에 의한 강도변조기의 입력광전력 의존성, 온도 의존성 등의 해결 등도 주요 연구과제라 하겠다.

현재, +0.8% strain-MQW를 이용한 DFB레이저/강도변조기 직접화한 소자에 있어서 3dB 변조대역 12GHz, -3volt 구동전압에서의 소광비 -13dB, 10Gbps의 NRZ변조하에 0.1Å chirping, 120km 전송실험 등이 보고되고 있어 실용화 단계에 접어들어 있다고 말할 수 있겠다.^{[26], [29]}

V. 결 론

초고속 반도체 레이저의 구현을 위한 이론적 배

경 및 개선책, 최근의 연구동향에 대해서 살펴 보았다. 고속직접변조용 반도체 레이저에 있어서 가장 중요한 변조대역폭의 확대와 chirping의 문제 점들에 대해 논의하였고 이의 개선 방향에 대해 알아 보았다. InGaAsP/InP계 LD의 변조대역폭이 현재 15GHz 근방에서 제한되고 있으며, 이를 개선하기 위해서는 다중양자우물구조의 설계, 공진기 내부의 강도분포, 활성층의 p-doping 등의 적극적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. 또한 전도대의 band offset이 큰 새로운 광과장용 반도체재료의 연구도 앞으로의 연구과제라 하겠다. DFB 레이저의 chirping양을 개선하기 위해서는 활성층의 미분이득의 증대하거나 CC-DFB구조의 도입하는 방법이 유효함을 지적했다. 또한, 초고속, 저chirping광원으로서 최근에 각광받고 있는 DFB레이저/강도변조기의 직접화한 소자의 기술동향에 대해서 살펴보았다.

참 고 문 헌

- [1] N. Chinone, "High speed DFB lasers", OFC'90, 12B1-2, Makuhari, Japan.
- [2] K. Petermann, "Laser diode modulation and noise", *Kluwer Academic Publishers*, Tokyo, 1988.
- [3] 伊藤良一, 中村道治, "반도체 레이저", 培風館, 1989.
- [4] H. Lipsanen, D. L. Coblenz, R. A. Logan, R. D. Yadvis, P. A. Morton, and H. Temkin, "High-speed InGaAsP/InP Multiple-Quantum-Well laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 7, pp.673~675, July 1992.
- [5] D. A. Atlas and A. Rosiewicz, "A 20GHz bandwidth InGaAsP/InP MTBH laser module", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp.123~126, Feb. 1993.
- [6] T. Yuasa et. al., *Appl. Phys. Lett.*, 50, pp.

- 1122, 1987.
- [7] M. Sugano et.al., 7th IOOC'89, 20B1-2, 1989.
- [8] K. Uomi, et.al, Appl. Phys. Lett., 51, pp.78, 1987.
- [9] K. Kamite et. al., 10th IEEE Semicon. Laser Conf., M-4, 1986.
- [10] P. J. A. Thijs, L. F. Tiemeijer, J. J. M. Binsma, and T. van Dogan, "Progress in long-wavelength strained-layer InGaAs (P) Quantum-Well semiconductor lasers and amplifiers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 2, pp.477~499, Feb. 1994.
- [11] Y. Lam, J. P. Loehr, and J. Singh, "Effects of Strain on the high speed modulation of GaAs- and InP-nbased Quantum-Well lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 1, pp.42~50, Feb. 1993.
- [12] K. Uomi, T. Tsuchiya, M. Aoki, and N. Chinone, "Oscillation wavelength and laser structure dependence of nonlinear damping effect in semiconductor lasers", *Appl. Phys. Lett.*, 58(7), pp.675~677, Feb. 1991.
- [13] K. Uomi, M. Aoki, T. Tomonobu, and A. Takai, "Dependence of high-speed properties on the well number of quantum wells in 1.55 μm InGaAs-InGaAsP MQW $\lambda/4$ -shifted DFB lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 2, pp.355~360, Feb. 1993.
- [14] B. Stegmuller, B. Borchert, and R. Gessner, "1.57 μm strained-layer quantum-well GaInAlAs ridge-waveguide laser diode with high temperature (130 $^{\circ}\text{C}$) and ultrahigh-speed (17GHz) performances", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp.597~599, June 1993.
- [15] M. Blez, D. Mathoorasing, C. Kazmierski, M. Quillec, M. Gilleron, J. Landreau, and H. Nakajima, "Very low chirping InGaAs-InGaAlAs MQW DFB BRS laser under 10Gbit/s modulation", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp.1676~1681, June 1993.
- [16] J. Shimizu, H. Yamada, S. Murata, and A. Suzuki, "Measurement of K-factor in MQW lasers and strained MQW laser diodes using an optical modulation techniques", *IEICE Japan spring conf.*, C-151, 1991.
- [17] A. Uskov, J. Mork, and J. Mark, "Wave-mixing in semiconductor laser amplifiers due to carrier heating and spectral-hole burning", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 8, pp.1769~1781, Aug. 1994.
- [18] W. Riedeout, W. F. Sharfin, E. S. Koteles, M. O. Vassell, and B. Elman, "Well-barrier hole burning in quantum well lasers", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 3, no. 9, pp.784~786, Sept. 1991.
- [19] T. Fukushima, R. Nagarajan, M. Ishikawa, and J. E. Bowers, "High-speed dynamics in InP based multiple quantum well lasers", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32, pp.70~83, 1993.
- [20] R. Nagarajan, M. Ishikawa, T. Fukushima, R. S. Geels, and J. E. Bowers, "High speed quantum-well lasers and carrier transport effect", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 10, pp.1990~2008, Oct. 1992.
- [21] S. C. Kan, D. Vassilovski, T. C. Wu, and K. Y. Lau, "Quantum capture and escape in quantum well lasers - Implication on direct modulation bandwidth limitation", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 4, no. 5, pp.428~431, May 1992.
- [22] T.C. Wu, S. C. Kan, D. Vassilovski, K. Y.

- Lau, C. E. Zah, B. Pathak, R. Bhat, and T. P. Lee, "Cavity length dependence of K-limited bandwidth in $1.6\mu\text{m}$ compressive-strained quantum-well lasers", *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 5, pp.449~450, Mar. 1993.
- [23] R. Nagarajan, T. Fukushima, S. W. Corzine, and J. E. Bower, "Effects of carrier transport on high-speed quantum well lasers", *Appl. Phys. Lett.*, 59(15), pp.1835~1837, 1991.
- [24] J. I. Shim, K. Komori, S. Arai, I. Arima, Y. Suematsu, and R. Somchai, "Lasing characteristics of $1.5\mu\text{m}$ GaInAsP/InP SCH-BIG-DR lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 6, pp.1736~1745, June 1992.
- [25] K. Kudo, J. I. Shim, and S. Arai, "Spectral characteristics of dynamic single mode lasers with complex cavity", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp.1769~1781, June 1993.
- [26] K. Sato, Y. Kotaki, K. Morito, M. Tatsuya, and H. Soda, "10Gb/s Transmission experiment of low chirp MQW-MI-DFB-LD", *IEICE Japan spring conf.*, C-230, 1994.
- [27] T. Sasaki, Y. sakata, T. Kato, M. Yamaguchi, K. Komatsu, M. Kitamura, and I. Mito, "Novel structure photonic devices using selective MOVPE growth", *NEC Res. & Development*, vol, 33, no. 3, pp.372~382, July 1993.
- [28] J. E. Johnson, T. tanbuek, Y. K. Chen, D. A. Fishman, R. A. Logan, P. A. Morton, S. N. G. Chu, A. Tate, A. M. Sergent, P. F. Sciortino, Jr., and K. W. Wecht, "Low-chirp Integrated EA-modulator/DFB laser grown by selective epitaxy", *IEEE 14th semiconductor laser conf.*, M4.7, 1994.
- [29] T. Kato, T. Sasaki, M. Yamaguchi, K. Komatsu, Y. Inomoto, S. Takano, H. Shimizu, N. Watanabe, H. Hasumi, and K. Kitamura, "Low penalty transmission characteristics of packaged DFB-LD/modulator integrated source", *IEICE Japan spring conf.*, C-226, 1994.
- [30] A. Garbmaier, A. Hangleiter, G. Fuchs, J. E.A. Whiteway, and R.W.Glew, "Low nonlinear gain in InGaAs/InGaAlAs separate confinement multiquantum well lasers," *Appl. phys. Lett.*, Vol.59 pp.3024~3026, 1991.
- [31] C.H.Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.QE-18, no.2, pp.259~264, Feb. 1982.

저 자 소 개



沈 鍾 寅

1960年 12月 2日生

1982年 2月 서울대학교 전자공학과 졸업(B.S)

1983年 2月 서울대학교 전자공학과 졸업(M.S)

1985年 2月 동경공업대학 물리전자과 졸업(Ph.D)

1985年 2月~1988年 1月 전자통신연구소 광소자연구실

1992年 4月~1994年 2月 일본전기(NEC) 쓰꾸바 연구소

1992年 3月~현재 한양대학교 전자공학과 조교수

주관심 분야 : 광통신용 광소자

李 龍 卓

1975年 2月 서울대학교 응용물리학과 졸업

1990年 2月 한국과학기술원 물리학과 석사 및 박사

1979年~1994年 한국전자통신연구소 근무

동 광전자연구실장, 화합물반도체연구부장 역임

현재 광주과학기술원 정보통신공학과 부교수