

반절연 InP를 이용한 초고속 DFB 레이저 다이오드의 제작 및 특성 연구

주홍로, 김형문, 김정수, 오대곤, 박종대, 김홍만, 편광의
한국전자통신 연구소 화합물 반도체 연구부
305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 106호

반절연 InP를 전류 차단층으로 사용하는 초고속 변조 Distributed Feedback (DFB) 레이저 다이오드를 제작 하였다. Grating이 형성된 InP 기판에 유기금속 증착법 (MOVPE)을 사용하여 다중 양자 우물 구조를 성장시켜 메사구조를 형성 한후, 전류 차단층으로 반절연 InP를 성장 하였다. 제작된 레이저 다이오드는 평균 문턱전류 10 mA, 기율기효율 14%이며, 30mA 구동 전류에서 10GHz 이상의 3dB 대역폭 특성을 보였다.

I. 서론

현대는 정보화 시대이다. 최근의 정보통신은 단순한 음성의 전달뿐 아니라, 고속 data 전송, 고음질 음 및 고화질 비디오전송을 통하여 화상회의, 영상전화 및 고화질 TV분배와 같은 다양한 서비스가 각 개인, 각 가정별로 제공 되기를 요구하므로, 새로운 대용량의 전송 시스템을 필요로 한다. 이와같은 전송 시스템의 다기능, 대용량 추세에 따라, 이미 2.5 Gbps급 광통신 시스템이 상용화 되었고, 10Gbps급 광통신 시스템도 머지않아 실용화될 전망이다^[1]. 10Gbps급 광전송 시스템의 실현을 위해서는 10Gbps이상으로 변조시킬수 있는 광원의 개발이 필수적이며, 현재 10Gbps급 광원으로는 직접 변조형 반도체 레이저 다이오드와 외부변조형 광변조기가 사용되고있다. 직접 변조형 반도체 레이저 다이오드는 광변조기에 비해 변조선폭(chirping)은 크지만 전송 시스템구성이 간단해지는 장점이있으므로 비교적 짧은 거리의 초고속 전송 시스템구성에 유리하며, 분산이 천이된 광섬유를 사용할 경우에는 중 장거리 전송에도 사용할 수 있다^[2].

초고속 레이저 다이오드의 제작을 위해서는 물리적인면과 소자적인 측면이 함께 고려 되어야 한다. 초고속 레이저 다이오드로서 동작 하기 위해서는 여러가지의 변수가 서로 최적화되어야 한다. 여러가지 변수들은 서로 의존성을 가지며, 어느 한 변수만을 최대화할 경우에는 다른 변수는 그특성이 최적 값으로 부터 벗어나는결과를 생기게하므로 이들 변수들의 값을 서로 조화시켜야 한다.

초고속 레이저 다이오드로 동작하기 위해서는 미분 이득치, 활성층으로 부터 구속 이중 구조로의 탈출 시간, 광자 밀도는 크게하여야 하며, 전하의 구속 이중구조 통과시간, 이득 억압인자, 소자크기, 소자 기생용량은 작게 하여야 한다. 본 연구에서는 위와같은 사항들을 고려하여 레이저 다이오드를 설계, 제작하였으며, 활성층으로는 압축 응력 다중 양자 우물구조(compressive strained multiple quantum well)를 사용하였고, 소자의 기생 용량을 최소화 하기 위하여, 반절연 InP층을 전류 차단층으로 사용하여 초고속 레이저 다이오드를 제작 하였다.

II. 다중 양자우물구조 성장

본 연구에서는 동적 단일 모드 레이저 다이오드를 제작하기위하여 InP 기판위에 grating을 형성한후 에피층을 성장 하였다. 먼저 n-InP 기판위에 $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ 방향으로 2380Å의 주기를 갖는 회절 격자를 He-Cd (325nm) 레이저를 이용한 간섭노광법과 습식 식각을 사용하여 grating을 제작한후, 이러한 회절 격자를 갖는 웨이퍼를 이용하여 OMVPE 법으로 압축 응력 다중 양자 우물 구조의 에피층 성장하였다. 본 연구에서 사용된 OMVPE 장비는 스테인레스 스틸 반응기(reactor)를 채택하고 있으며 저항성 발열체와 고속 회전형 (~ 1,000 RPM)의 susceptor로 이루어져 있으며, 양질의 다중 양자 우물 구조 에피층 얻기 위해 이송 기체의 급준한 교체가 가능하도록 linear manifold를 채택하고 있다^[3]. 성장에 사용된 원료 물질로는 3

족의 경우 TMI_n (Trimethyl Indium), TEGa (Triethyl Gallium) 을 사용하였으며 5족 원소의 원료 물질로는 AsH₃과 PH₃을 사용하였다. p 및 n 형의 도핑을 위해서 p형 도펀트로는 DEZn (Diethyl Zinc)를 사용하였으며 n형 도펀트로는 SiH₄을 사용하였다. 레이저 다이오드를 위한 1st 에피 성장 순서는 다음과 같다. 먼저 간섭노광법으로 제작된 회절 격자를 갖는 웨이퍼를 loadlock chamber를 통하여 reactor chamber에 장입 시킨후 susceptor를 가열 한 후 630 °C에서 에피 성장을 시작하였다. 성장된 1차 에피 구조는 그림 1과 같다. 다중 양자 우물 구조의 well 층으로는 30Å 두께의 In_{0.7}Ga_{0.3}As를 사용하였으며 barrier 층으로는 InP에 격자정합된 100Å 두께의 1.24µm InGaAsP를 사용하였다. 이러한 구조로 성장된 압축 응력 다중 양자 우물구조층의 결정성장 특성을 확인하기 위하여 DXRD (Double Crystal X-ray Diffractometer) 법을 사용하여 측정된 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 다중 양자 우물구조층에 의한 강한 satellite peak 으로부터 다중 양자 우물구조의 결정성이 매우 우수함을 알 수 있으며 응력 이완(strain relaxation)은 일어나고 있지 않음을 알 수 있다. 이러한 구조의 다중 양자 우물구조층의 광학적특성을 조사하기 위하여 FTPL (Fourier Transformed Photo-Luminescence)법을 이용하여 조사한 결과, 그림 3에서 보인바와 같이 상온에서의 반치폭이 37meV인 매우 좁은 선폭의 PL (Photo Luminescence) 특성을 얻었다. DXRD 결과와 PL 결과로부터 성장된 압축 응력 다중 양자 우물구조 층은 매우 우수한 결정 특성을 갖는 양질의 에피임을 확인하였다.

III. 제작 공정

1차로 성장된 다중 양자 우물 구조 에피를 사용하여 2차 및 3차 재성장을 위한 photo-lithography 공정을 수행하였다. 먼저 1차 에피 성장된 시료를 표준 유기세척 방법으로 세척한 다음 식각 마스크용으로 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 을 이용하여 nitride 박막 (SiN_x)을 형성시켰으며, 이때 SiN_x 두께 모니터링으로 Si 웨이퍼를 사용하였다. Stripe 형성을 위하여 photo-lithography 는 AZ5214E photoresist (PR) 을 이용하여 수행하였고, BOE (Buffered Oxide Ethant) 용액으로 SiN_x 박막을 제거한 후 PR 제거용액을 이용하여 PR 을 제거하였다. PR 을 제거한 후 표준 유기세척 방법으로 시료의 표면을 세척하였다. 그리고나서, 2 단계 식각 (RIE (Reactive Ion Etching) + HBr 계 습식 식각)

공정을 수행하였다. 2 단계 식각 공정에서는 RIE 를 이용하여 1 시간 식각한 후, HBr 계 (HBr : H₂O₂ : H₂O) 식각용액으로 시료를 식각하였다. 2 단계 식각 공정후, 2차로 철이 도핑된 반절연 (Fe-doped semi-insulating) InP를 성장하였고, 그리고 3차 p-InP cladding 층을 성장하였다. 이와같이 준비된 시료에 전자빔 증착기(Electron Beam Evaporator) 를 이용하여 Ti/Pt/Au 의 p-InP ohmic metal을 증착하였고, n-InP 기판을 ~ 100 µm 까지 lapping 한 후 Cr/Au 의 n-InP ohmic metal을 증착하였다. Ohmic 특성의 향상을 위하여 ohmic metal 증착 후 RTA (Rapid Thermal Annealing) 을 이용하여 열처리하였다. 제작 완료된 레이저 다이오드는 scribe 로 chip-bar 를 절단한 후 chip-bar tester로 I-L 및 I-V 특성을 측정하였다. 파장 및 정적 특성을 측정한 chip-bar 를 개개의 chip 으로 절단한 후 chip 을 소형 chip 지지용 구조물에 올려놓고 주파수 응답 특성 (frequency response)를 측정하였다.

IV. 반절연 InP층 성장

반절연성 반도체의 경우 고속변조시 적은 정전용량의 잇점으로 초고속 변조를 요구하는 소자 구현에 적합하다. 반절연성 InP를 구현하기 위해 Fe나 Cr과 같은 깊은준위 불순물을 도핑하게 되는데 E_c-0.41 eV 의 Cr에^[4] 비해 Fe는^[5] 밴드갭의 중간위치에 해당하는 E_c-0.63 eV의 깊은준위를 가지므로서 반절연 InP 성장에 가장 적합한 불순물로 대두되고 있다.

에피성장에 사용된 반응기는 pan-cake 모양의 SiC 코팅된 흑연 썬셋터와 이중 재킷형의 bell jar 모양을 한 석영관으로 구성 되어있다. 가열원은 RF 유도방식이며 성장온도는 650 °C 로 고정시켰다. 성장 압력은 76 Torr 의 저압을 유지시켰으며 5족(PH₃) 대비 3족(TMI_n)의 비는 130이었다. Fe 도판트의 원료로서는 ferrocene (Fe(C₂H₅)₂) 을 사용하였으며 최적화된 ferrocene의 유량은 100 sccm으로 불분율은 5.9 x 10⁻⁵ 이었다.

InP에 도핑된 Fe 양은 SIMS(secondary ion mass spectrometry) 분석을 통해 결정하였으며 사용된 분석장비는 Cameca ims 4f ion micro analyzer 로서 duoplasmatron ³²O₂⁺ 일차 이온빔을 source로 이용하였다. Ferrocene 유량이 100 sccm 이상에서 도핑된 Fe 양이 포화되어지는 현상을 볼 수 있었으며 이때의 도핑농도는 4 x 10¹⁷ cm⁻³ 의 수치를 보였다. 투과전자현미경 (TEM)을 이용하여 ferrocene 유량이 200 sccm인 Fe도핑된 InP (SIMS에 의한 도핑농도는 6 x 10¹⁷ cm⁻³)의 고해상 영상을 분석하였다. 분석결

과 뚜렷한 격자배열을 보이므로써 Fe-P 침전상과 같은 결정 결합이 없음을 알 수 있다.

Fe 도핑된 반절연 InP의 저항특성을 평가하기 위해 n^+ -InP기판 위에 2.6 μm 의 Fe 도핑된 InP, 그위에 n^+ -InP를 차례로 성장하였다. 일정한 면적의 금속전극을 뒷쪽면에 형성한 후 전류-전압 특성곡선을 얻었다. 그림 4의 특성 곡선에서 보이는 바와 같이 3V까지는 직선적인 전류-전압 관계식을 보이고 있음을 알 수 있는데 이는 단일 반송자에 의한 반절연체의 저항 특성으로서 기울기로 부터 저항치를 알 수 있으며 두께 및 전극 면적으로 부터 반절연 InP의 비저항을 계산할 수 있다. 반절연층의 Fe 도핑농도를 변화시키면서 전류-전압 특성을 측정한 결과 그림 4에서 보이는 바와 같이 ferrocene 유량을 100 sccm (ferrocene 물분율은 5.9×10^{-5})으로 흘렸을 때의 비저항치가 $2.2 \times 10^9 \Omega\text{cm}$ 로서 가장 큰 값을 보였다. 이수치는 이제껏 보고된 바^[6] 중에서는 가장 높은 수치로서 이때의 항복전압은 24.4 volts 였다.

Fe 도판트는 일반적으로 확산계수가 매우 큰 원자로서 치환이 아닌 격자간(interstitial) 메카니즘을 통해 확산되어지는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 도판트를 소자구조에 적용하기 위해서는 접합되는 에피층과의 상호 확산효과를 사전에 고려해야 하는 바, 여기서는 InP계 광소자를 대상으로 하여 Zn 도핑된 p형 InP 와 Si 도핑된 n형 InP로의 상호확산 현상을 SIMS 분석을 통해 관찰하였다. n^+ -InP 기판위에 Fe 도핑된 InP를 1 μm 성장하고 이웃해서 Zn 도핑된 InP를 성장한 경우, 반절연층의 Fe 원자가 Zn 도핑된 InP층으로 심하게 확산되어 나음을 볼 수 있으며 Zn 또한 Fe 도핑된 층으로 확산되었음을 알 수 있다. 반면에 Fe 도핑된층 옆에 0.2 μm 두께의 Si 도핑된 InP가 위치하였을 경우는 Fe 원자의 확산이 무시할 수 있을 정도로 적었으며 또한 Si 원자의 확산도 발견 할 수 없었다. 따라서 Si 도핑된 InP층은 반절연층의 Fe 원자의 확산을 효과적으로 방지 할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 Fe 도핑된 반절연 InP를 BH-LD 구조의 전류차단층으로 이용할 경우에는 첫째, 반절연층이 p형 전극쪽의 p형 클래드층과 접촉하는 넓은 부위를 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 로 Si 도핑된 InP를 0.2 -0.5 μm 두께로 삼입하여 p형 클래드층의 Zn 원자와 Fe원자간 상호확산을 방지해야 한다. 둘째, 전류차단층 측면의 활성층 바로위의 p형 클래드층과의 확산을 최소화하기 위해 가급적 Zn도핑을 높게 하지 말고 p형 클래드층과의 측면 접촉부위도 가능한 0.2 μm 를 넘지 않도록 설계하는 것이 바람직하다.

V. 측정 및 결과

그림 6은 제작된 DFB 레이저 다이오드의 일반적인 정적(static) 동작특성 측정의 결과를 보여준다. 왼쪽의 그림은 I-V, I-L, 기울기 효율 및 동작 저항(Dynamic Resistance (R_d))을 나타내며, 오른쪽의 그림은 광 스펙트럼을 보여 준다. 먼저 전류-전압 특성곡선(I-V curve)으로부터 측정된 R_d 는 약 5 Ohms이었으며, -0.5 V에서 측정된 역방향 누설 전류(reverse bias leakage current(I_r))는 약 54 μA 으로 각각 측정되었다. 전류-레이저 출력의 관계(I-L curve)에서 문턱전류는(I_{th}) 약 12 mA임을 보이고 있다. 또한 기울기 효율 그래프에서 볼 수 있듯이 출력효율(slope efficiency)은 0.15 W/A의 값을 가지며, 그 값은 전류증가에 따라 거의 변화가 없는 안정된 값을 보여주고 있다. 이 결과는 인가되는 전류가 효과적인 SI/n 전류차단층 형성에 의하여 최소화된 leakage를 유지하면서 활성층으로 공급되어 레이저 발진에 기여하는 것을 보인다. 이 레이저의 출력은 40mA 구동 전류에서 약 4mW, 80mA 구동 전류에서 약 10mW임을 보이고 있다. 광 스펙트럼의 측정 결과로부터 중심파장은(λ_p) 1.541 μm 이며 측모드 억압비(side mode suppression ration)가 30dB 이상인 횡단일 모드(longitudinal single mode)로 동작 하고 있음을 보이고 있다. 이러한 측정을 반복하여 문턱 전류는 10 mA 내외이며, 출력 효율은 0.10 ~ 0.18임을 확인 하였다. 레이저 다이오드의 단면에 무반사 및 고반사 박막을 증착 할 경우 더 높은 출력 효율을 얻을 수 있으리라 예상 된다.

레이저 다이오드의 동작 동특성을 측정하기 위하여 Hewlett Packard사 제품인 Lightwave Component Analyzer (HP8703A)를 사용하였다. 전체적인 구성은 Lightwave component analyzer, submount에 올려진 LD chip, ultra precision xyz positioner 와 레이저 빛의 정렬에 사용되는 광 coupling에 필요한 lens block, 그리고 레이저구동을 위한 CW current driver로 되어 있다. DC current는 bias tee를 통하여 lightwave component analyzer에서 공급되는 고주파신호와 합성되어 LD에 공급되어진다. 이외에 고주파 전류에 의한 레이저 동작 발진시 발생하는 온도변화를 조절하기 위하여 LD chip submount는 Thermo-Electric Cooler(TEC)에 올려져 항상 일정한 온도를 전 측정 전류구간에서 유지하도록 하였다. 이때 측정에 사용한 온도는 22 $^{\circ}\text{C}$ 였다. 레이저 빛은 optical fiber에 coupling 되어 Lightwave component analyzer에 입력되어 주파수변화에 따른 소신호 변조 대역폭측정을 하게 된다. 10 GHz영역의 주파수 반응 측정을 위해서는

레이저 다이오드 칩을 올려놓는 submount의 고주파 특성이 10GHz 이상 되어야 한다. 레이저 다이오드 submount는 알루미늄 기판위에 Au 패턴을 형성하여 effective co-planar 형으로 구성하였다. 레이저 다이오드칩은 submount에 silver 에폭시를 이용하여 Die-Bonding 하였으며 이때 LD chip의 n-전극이 submount에 전기적인 접착을 하도록 고안하였다. p-전극은 wire bonding으로 LD chip 양쪽에 있는 Ground에 연결된다. 이 Chip의 길이는 약 300 μm 이었다. 양쪽의 두 wire의 wire inductance 는 약 1 nH로 예상된다. 레이저 다이오드에 입력되는 고주파 변조 전류는 SMA connector와 50 Ω strip line을 통하여 45 Ω 의 impedance matching용 박막 저항을 거쳐 레이저 다이오드에 전달되며 Ground pad가 이 strip line과 평행하게 양쪽에 배치되었다. Submount의 밑면은 전면전극으로 Ground이며, 윗면의 Au plate와는 다수의 via hole을통하여 전기적인 접촉을 이루도록 하였다. 전산시뮬(device simulation)에 의하면 LD chip의 끝단과 via hole 사이에서 발생하는 effective microwave radiation은 구멍전류신호의 상실을 유발하여 변조 곡선에서 큰 dip들을 발생시키므로 via hole 위치의 선정이 중요하다

그림 7은 측정된 주파수가 20 GHz 까지 변할때의 소신호 반응을 보여주고 있다. 이 측정시 레이저 다이오드는 22 $^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다. 인가되는 구동전류가 20 mA에서 35 mA 까지 변하게 될 때, -3dB 대역폭은 8.8 GHz에서 10.8 GHz 까지 변화 되었으며 30 mA의 적은 구동전류에서 이미 대역폭이 10 GHz에 도달 했음을 보여 주고 있다. 이는 앞에서 설명하였듯이 본 레이저 다이오드에서 채택한 효과적인 Fe-doped SI/n 전류차단층과 결합된 BH (Buried Heterostructure) 구조가 소자의 기생 축전 용량을 줄이는데 매우 효과적임을 보여 주고 있다. 이 레이저 다이오드는 구동 전류 35 mA에서 -3dB 대역폭 10.8 GHz임을 보이고 있으며, 구동 전류를 증가 시켜도 대역폭은 더이상 증가 하지 않음을 보이고 있다. 측정에 사용된 submount의 전기 입력 신호 반사 계수 S11을 측정한 결과 10GHz 이상의 대역에서 -3 dB이하의 비교적 높은 값을 나타내었다. 이는 10GHz 이상의 신호가 레이저 다이오드에 충분히 전달되지 않음을 나타내며, 이로부터 실제 레이저 다이오드의 대역폭은 10.8 GHz 이상임을 알 수 있다.

VI. 결론

본 연구에서는 1.0%의 압축응력 (compressive strain)을 갖는 InGaAs/InGaAsP 다중양자우물 구조

를 활성층으로 갖고 반절연 InP를 전류 차단층으로 하는 PBH (Planar Buried Heterostructure) 구조의 DFB 레이저 다이오드를 제작하였다. DXRD와 PL 측정을 통하여 양질의 압축 양자 우물 구조가 성장 되었음을 확인하였으며, Fe를 InP에 도핑하여 비저항치가 $2.2 \times 10^9 \Omega\text{cm}$, 항복전압은 24.4 volt인 반절연 InP를 성장하여 DFB 레이저 다이오드의 전류 차단층으로 사용하였다. 제작된 레이저 다이오드의 측정 결과 문턱전류 10mA 내외, 출력 효율 0.10 - 0.18 W/A 을 얻었으며, 주파수 응답 측정을 통하여 인가전류 30 mA에서 10 GHz이상의 대역폭을 얻었다. 활성층 및 소자 구조의 최적화를 통하여 보다 넓은 대역폭의 변조 특성을 갖는 레이저 다이오드의 제작이 가능하며, 또한 반절연 InP 재성장 기술은 10 Gbps급 광변조기와 다른 고속 광소자 제작에도 활용되리라 예상된다.

본연구는 정보통신부, 과학기술처가 주관하고 총괄 사업 책임 기관인 한국전기통신공사의 관리하에 수행한 B-ISDN 공동연구개발사업으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Y. Takahashi, Fiber and Integrated Optics 11, 91-103(1992).
2. D. Mathoorasing et. al., Electron. Lett. 30, 507-508(1994).
3. Jeong Soo Kim et. al., J. Elect. Mater., to be published (1995).
4. G. Bremond et. al., J. Appl. Phys. 59, 2038-43(1986).
5. G. Bremond et. al., Electron. Lett. 17, 55-56(1981).
6. P. Speier, Microelectronic Engineering 18, 1-31(1992).

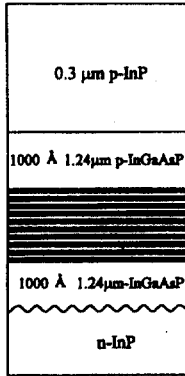


그림 1. Grating 위에 1차 성장된 다중 양자 우물 구조의 그림.

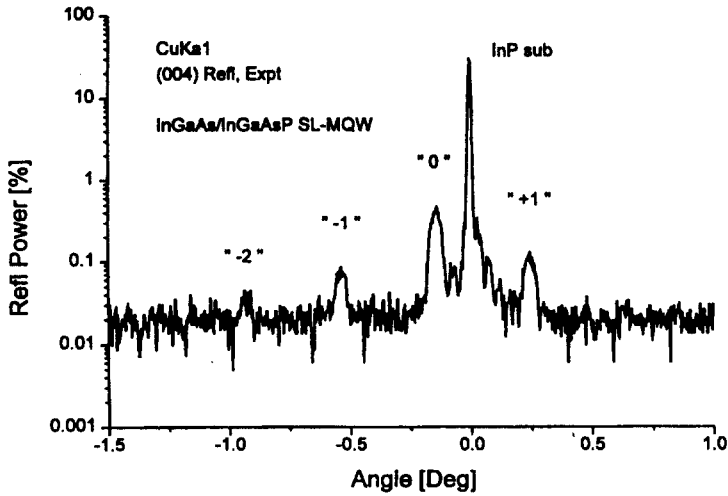


그림 2. InGaAs/InGaAsP 압축 응력된 다중 양자 우물 구조의 쌍결정 엑스선 rocking curve.

주홍로, 김형문, 김정수, 오대곤, 박종대, 김홍만, 편광의

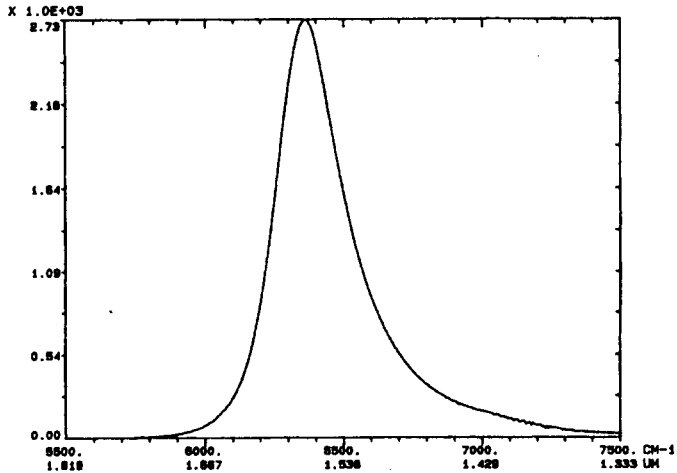


그림 3. InGaAs/InGaAsP 압축 응력된 다중 양자 우물 구조의 Photo-Luminescence curve.

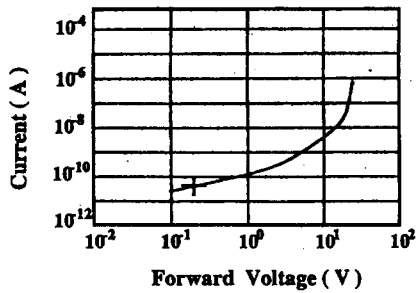


그림 4. Fe 도핑된 반질연 InP 층의 전류 전압 특성 곡선.

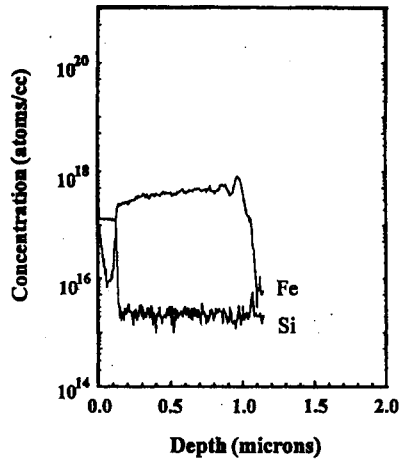


그림 5. InP에서의 Fe/Si 원자간 상호 확산 현상.

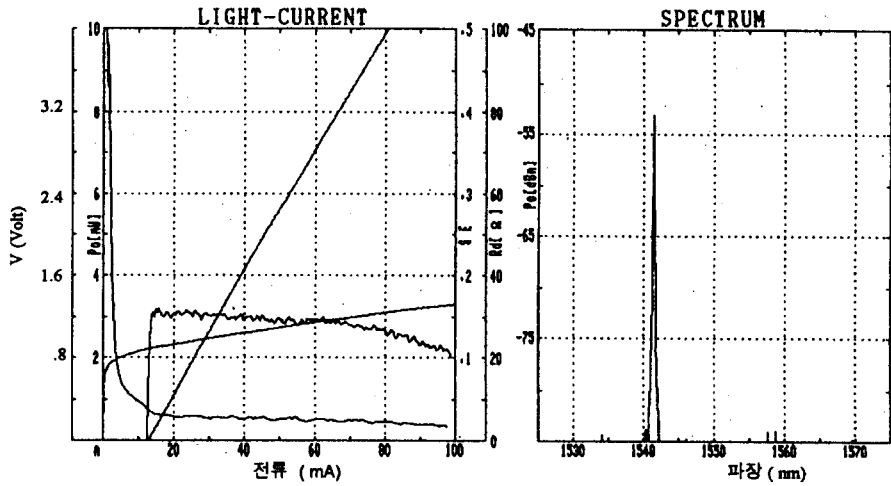


그림 6. 레이저 다이오드의 I-V, I-L, 기울기 효율, 동작 저항 및 광 스펙트럼 특성.

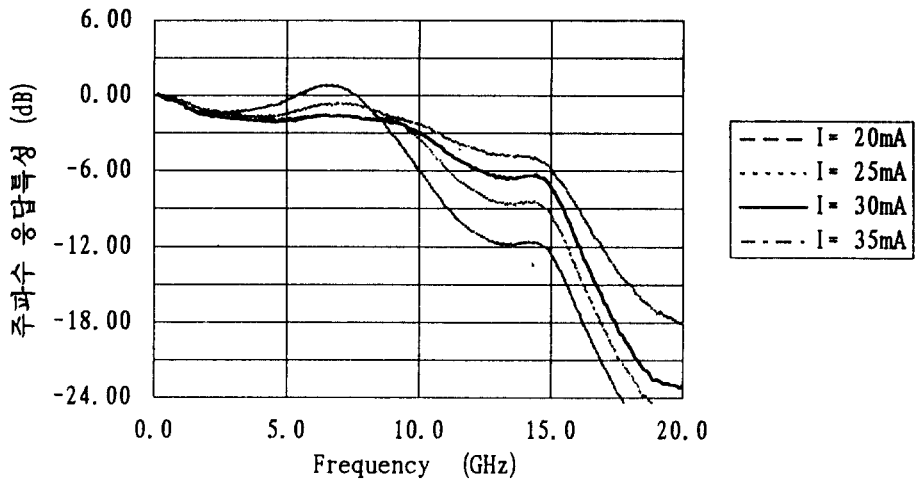


그림 7. 레이저 다이오드의 주파수 응답 특성.