

고출력 반도체 레이저 다이오드 어레이

박병훈*, 권오대**

(*포항공대 전기전자공학과 박사과정, **포항공대 전기전자공학과 교수)

1. 서론

반도체 레이저 다이오드(LD)의 개발은 70년대 초의 DH(Double Heterostructure) 구조의 LD, 70년대 말 이후의 QW(Quantum Well) 구조의 LD 개발 기술이 개발되어 상용화까지 성공하였고, 80년대 후반의 QWR(Quantum Wire) 구조 및 90년대 이후의 QD(Quantum Dot) 구조의 LD 기술 개발은 장래에 상용화까지 성숙할지 아직은 미지수이다.

기능적인 분류로 볼 때 주목할 만한 LD 개발을 소개한다면, 장거리 광통신을 위한 Distributed Feedback(DFB) LD 개발, 근거리 gigabit 네트워크 및 자유공간 광교환 기술용 Vertical Cavity Surface Emitting Laser(VCSEL) 개발, 그리고 고체 레이저 광펌핑 등을 위한 2D-stacked laser diode array(LDA) 등 소형화, 경량화되고, 저가의 광원을 공급하기 위한 연구들이 활발하다.

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저 펌핑용 고출력 LDA(Laser Diode Array)의 기술현황과 본 연구실이 수행한 50W급까지의 고출력 LDA의 제작과 특성에 대해 고찰할 것이다.

2. 본론

2.1 해외의 고출력 LDA 기술현황

고출력 LDA 개발 초기 본 연구실이 벤치마크한 미국의 SDL(Spectra Diode Laboratories) 회사의 기술을 우선 간략히 소개하면 다음과 같다.

90년대 초까지의 SDL사의 LDA 개발은 1cm 길이의 바(bar)를 20%의 duty factor를 갖는 QCW(Quasi Continuous Wave)방식으로 구동하여 한개의 LDA 바에서 100W까지의 최대출력, 펄스 당 40mJ을 얻고, 좋은 특성을 가진 바를 골라 10개, 20개, 50개 등으로 stacking 시킴으로써, 50KW급

까지의 LDA를 개발하여 상용화한 상태이다[1,10]. 최근에는 스탠포드 대학과 협력으로 Mega Watt급 고출력 LDA 기술을 개발 중인 것으로 판단된다.

또한, McDonnell Douglas[1]사에서는 군사적인 목적으로 거리측정기(laser range finder) 개발을 위한 고출력 LDA를 개발하였으며, 이의 상용화를 시도하였다.

2.2 국내의 고출력 LDA 기술

국내에서는 90년대 초부터 유일하게 본 연구진이 시도해 왔으며, 현재까지 50~100W급 LDA를 개발한 상태이며, 특히 양자효율에 있어서 국외의 결과와 대등한 성능을 얻었다. 본 논문에서는 Nd:YAG 레이저 펌핑을 위해 개발한 50W급까지의 고출력 LDA의 제작과 특성에 대해 고찰할 것이다.

다이오드 레이저를 통한 광펌핑은 고체 레이저의 흡수 밴드에 집중적으로 분포한 스펙트럼을 가지므로, 불필요한 에너지의 손실을 막고, 열발생을 줄일 수 있으며 따라서, 적외선 램프 펌핑(~8%)보다 효율이 뛰어나다(>25%)[2]. 또한, 액체질소 냉각이 필요한 램프 방식에 비해 공랭식이 가능하므로 그 구조가 간단해 질 수 있다. 일반적으로 레이저 다이오드를 펌핑 광원으로 사용한 고체 레이저는 반도체 레이저의 넓은 선폭보다 아주 좁은 ~1Hz[3]를 가지며, 상위 레벨에서의 수명이 길기 때문에 다이오드 레이저 자체보다 10⁴정도 큰 최대 출력을 얻을 수 있다[3]. 한편, Yb:YAG 붕을 상온이 아닌 77K의 액체질소 온도에서 다이오드 펌핑시켰을 때, 이론적으로 54~64kW의 최대 출력을 얻을 수 있다.[4] 이러한 고체 레이저들 중 잘 알려진 것으로는 808nm에 흡수대역을 가지고, 1064nm 발진을 하는 Nd:YAG 레이저[5]와 940nm에서 3배의 넓은 대역폭을 가진 1030nm의 Yb:YAG 레이저[6], 980nm 대역과 발진파장 1.55 μ m인 Erbium Doped Fiber amplifier(EDFA) 광원등이 있다. 이들은 거리 측정기, 레이저 레이다, 중력파의 측정[7], 항공기의 도색 제거 등에 응용되고 있다.

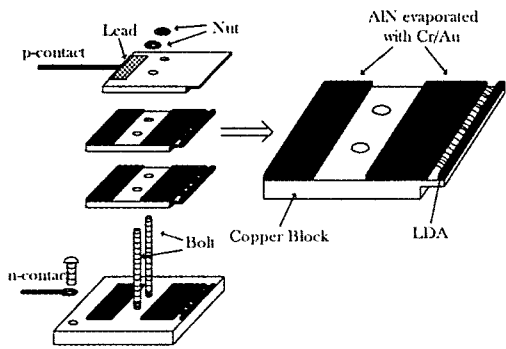
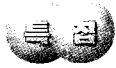


그림 1. 2-D stacked LDA의 구조

본 연구진이 개발한 LDA는 20-채널을 가진 1cm 정도의 LDA 바를 제작하고[8], 특성이 좋은 바를 골라서 2차원적으로 적층시킨 구조로 이루어졌다. 기본적인 작동원리는 p-전극을 통해 들어간 전류는 p-i-n LDA를 통과하여 Au wire와 금이 증착된 AlN 기판을 지나서 새로운 submount로 들어가게 되어, 다시 새로운 LDA의 p-전극으로 흐르게 되며, 이 과정이 맨 위 층의 n-전극까지 반복한다. 즉, 선형 LDA가 직렬로 연결되어 있는 형태를 이룬다. 그림 1에 제작한 2-D stacked LDA의 구조를 나타내었다.

한편, 2-D stacked 어레이의 제작과정에서 매우 중요한 요소가 각각의 선형 LDA를 전기적으로 절연시키고 열의 방출을 효과적으로 수행하는 물질이 필요하다. BeO, SiC, AlN등이 이런 특성을 만족하는 물질로 널리 사용되고 있다.

본 실험에서 사용한 AlN와 GaAs 및 Si의 특성을 표 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 AlN는 Si이나 GaAs에 비해서 뛰어난 열 전도도와 전기적 절연 특성을 가진다.

하지만 앞서 언급한 BeO나 SiC와 마찬가지로 AlN는 녹는점이 높고, 매우 단단한 물질이라서 일단 세라믹이 형성되면, 새로운 형태로 제작하기가 대단히 어렵기 때문에 AlN에 구멍을 내는 공정을 없애고 한 개의 submount(구리 블록)에 두 조각의 AlN를 구멍이 형성되지 않는 부분에 preform (AuSn)을 사용하여 본딩하였다. 이때 AlN 양쪽은 Cr/Au를 각각 300Å/10,000Å thermal evaporation하여 쉽게 preform과 본딩되도록 하였다.

고출력 선형 LDA의 제작은 먼저, 넓은 채널 영역에 대해 균일한 특성을 갖는 양질의 에피를 성장하기 위해서 수직형

저압 Metal Organic Chemical Vapor Deposition(MOCVD)를 이용하여 graded index-separate confinement (GRIN-SCH) 구조를 갖는 PIN 다이오드를 성장시켰다. Nd:YAG 펄핑용 광원으로 쓰이기 위해서는 Nd:YAG의 최대 흡수 파장인 808nm에 발진 파장을 맞추는 것이 중요한데 이를 위해 활성층의 Al 조성비는 0.07, 두께는 150Å으로 하였다. 성장에 사용된 Ga 소스는 TMG (trimethylgallium); Al은 TMA(trimethylaluminum), As은 AsH₃(arsine)을 사용하였으며, n-dopant와 p-dopant로는 각각 SiH₄(silane), DEZn (diethylzinc)를 사용하였다.

성장이 끝난 에피는 먼저 각 채널간의 절연과 전류 구속을 위해서 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 2000Å의 SiO₂ 절연막을 증착시켰다. 레이저는 다중 채널 broad-area 구조로서, 각 채널폭은 100μm이며 채널간 간격은 350μm로 조정하였다. 이것은 Spectra Diode Lab.의 100μm/200μm, 96μm/125μm 구조보다 packing density가 낮은데[9], 열방출이 비교적 원활하도록 고려하였기 때문이다.

채널 형성 작업이 끝난 에피는 cleaving이 용이하고 직렬 저항을 줄여주기 위해서 100μm 두께로 lapping을 하였으며, 전류 주입을 위해서 Cr/Au를 사용하여 p 전극을 형성하고, AuGe/Ni/Au를 n 전극으로 thermal evaporation 시켰다. Ohmic 접촉을 위해 급열처리를 마친 에피는 700μm의 공진기 길이와 1cm의 바 길이를 갖도록 cleaving하였다. 제작된 LDA 바의 구조를 그림 2에 나타내었다.

한편, 한쪽면으로의 광출력을 향상시키고 거울면의 Catastrophic Optical Damage(COD) 발생을 줄여주기 위한 작업으로 거울면 양단에 sputter를 이용하여 SiO₂ 층의 AR(5%) 코팅 및 SiO₂/Si 3쌍으로 이루어진 HR(95%) 코팅을 삼성중합기술원에 의뢰하여 수행하였다. 제작이 완성된 LDA 바는 전류주입과 원활한 열방출을 위해, 40mm(H)×20mm(V)×3mm(T) 크기의 도금된 구리블록위에 preform(AuSn)을 사용하여 p-side가 아래로 가도록 flip-chip 하여 die 본딩이 된다. 고출력 레이저의 수명과 최대 출력은 사용된 에피의 질도 중요하지만, 얼마나 열이 효과적으로 방출되느냐에 따라 빔의 균일성과 수명이 결정되므로 die 본딩의 성공은 양질의 LDA 바를 얻는데 직결된다. n-전극의 형성 및 2D-stack을 할 경우 열방출이 좋도록 열전도도가 뛰어난

표 1. AlN, Si, GaAs의 특성

Item	Material	AlN	Si	GaAs
Thermal conductivity(W/m · K)		250	148	46
Thermal expansion coeff.(10 ⁻⁶ /°C)		4.5	2.6	6.68
Dielectric constant		8.8	11.9	13.1
Volume resistivity(Ω · cm)		10 ¹²	2.3*10 ⁹	5.32

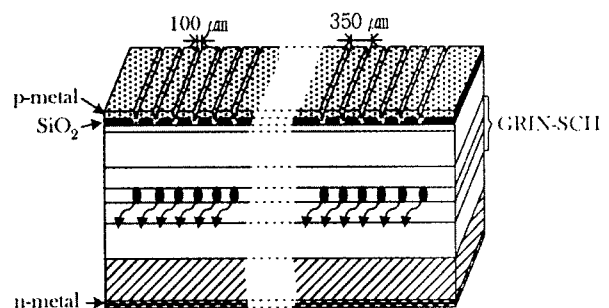


그림 2. 공정이 끝난 LDA 바의 모습

AlN(두께 400 μ m) 절연판을 구리블록 크기에 맞게 잘라서 LDA 바와 같이 die 본딩시키고, 1mil. Au wire를 이용하여 wire 본딩을 수행한다.

LDA 바의 구동은 그림 3에서와 같이 Thermo Electric Cooler(TEC)와 thermistor를 이용하여 온도 조절을 하고, 알루미늄 블록에 냉각수를 흘림으로써 원활한 열방출을 도모하였다. 본 연구에서 제작한 2-D stack LDA 바의 적층 갯수는 4개였으나, LDA 바가 기본적으로 직렬로 연결되어 있기 때문에 적은 전류로 구동은 가능하지만 본질적으로 LDA 바의 개수가 증가할수록 전압이 비례해서 증가하므로, 연구진이 보유한 전류 구동기로는 4개의 2D-stacked LDA는 구동시킬수가 없었다. 이것은 일반적인 전류 구동기는 안전장치의 일환으로 특정 전압이상에서는 전류 구동기 내부의 잠금장치가 작동하도록 설계되어 있기 때문이다.

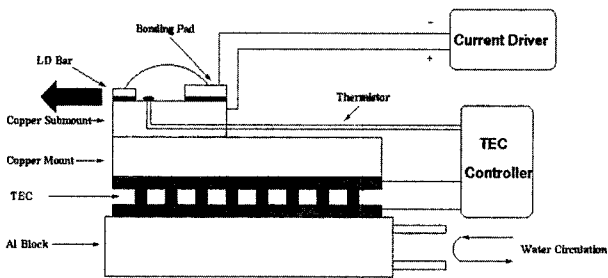


그림 3. LDA 바가 탑재된 냉각 시스템

따라서, 본 연구에서는 2개의 선형 LDA를 가지는 2D-stacked LDA에 관한 측정 결과치를 얻을 수 있었다. 레이저의 구동은 펄스폭 50 μ s, 반복율 100Hz로 20 $^{\circ}$ C에서 구동하였으며, CCD 카메라로 근접장을 관찰하였다. 그림 4에 40개의 발광영역과 2개의 선형 LDA 바로 구성된 2D-stacked 어레이의 근접장 사진을 나타내었다. 주입전류는 문턱전류인 11A이며, 각 채널간의 발진 분포가 균일하지는 않지만 40개의 채널 모두가 발진하고 있음을 보여준다. LDA 바와 바 사이의 간격(pitch)는 3mm로써 SDL의 그것(< 2mm)보다 다소 넓은데, 역시 열문제를 해결하기 위한 방법이었다. 2D-stack을 하기 전에 각 LDA 바의 근접장 사진과 출력 대 전류 곡선 등을 측정하여 우수한 LDA 바만을 선택하여 본딩을 하였다. 한 개의 LDA 바를 펄스폭 50 μ s, 반복율 10Hz로 20 $^{\circ}$ C에서 구동시켰을 때, 40A에서 21.18W의 광출력을 얻었고, 문턱 전류는 10A이며, 기울기 효율은 0.795W/A이었다. 그림 5에 그때의 출력 대 전류 곡선을 나타내었다. 2D-stack을 한 후 두 개의 LDA 바에서 나오는 출력을 측정한 결과 35A에서 40.3W의 광출력을 얻었으며, 이때의 문턱전류는 11A이고, 기울기 효율은 1.67W/A로 향상되었다. 그림 5에 그때의 출력 대 전류 곡선을 나타내었다.

이러한 결과를 바탕으로 본 연구실에서 제작한 4개의 LDA 바로 구성된 2D-stacked 어레이를 구동한다면, 열문제를 고려하더라도 최소한 100W급의 광출력을 얻을 수 있을

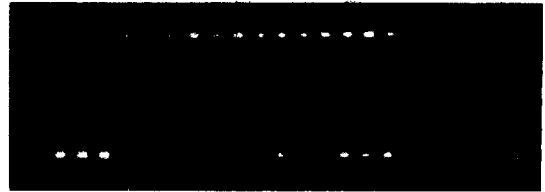


그림 4. 2D-stacked LDA 바의 근접장 사진

것으로 기대된다. 이런 결과는 고출력 반도체 레이저에 관한 기술이 전무한 우리나라의 연구상황에서 상당히 의미있는 연구결과이며, 앞으로 계속 연구가 진행된다면, 고출력을 요구하는 여러 응용분야의 국산화에 큰 도움이 될 수 있는 핵심 광소자를 개발할 수 있으리라 기대된다.

한편, Nd:YAG 레이저의 펄핑을 위해 LDA 바의 출력 파장 대역이 Nd:YAG의 최대 흡수 파장 대역인 805~810nm에 있어야 불필요한 에너지 손실을 막을 수 있으며 보다 효율적인 펄핑이 가능하다. 스펙트럼의 측정은 Optical Spectrum Analyzer(HP 70951A)로 측정하였으며 2D-stacked LDA 바는 30A의 전류로 문턱전류 이상에서 quasi-CW로 동작시켰다. 그림 6에서 보는 바와 같이 다중모드로 발진함을 알 수 있고, 최대 발진파장은 807~808nm에 존재한다. 그리고, 각 종방향간 모드 간격은 1.5A을 얻었는데 이것은 $\Delta\lambda \sim \lambda^2/2nL$ 공식을 써서 구한 모드간 간격 1.32A과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한, 온도를 변화시키면서 스펙트럼의 추이를 관찰하여 적색 편이의 양을 측정하였으며, 온도 특성 계수가 ~0.3nm/ $^{\circ}$ C로써 SDL사의 값과 일치한다.[10]

2.3 고찰

상기와 같이 미 SDL 사의 기술을 벤치마크하여 시도한 고출력 LDA 기술의 국산화 과정에서 기술적 돌파구를 시도

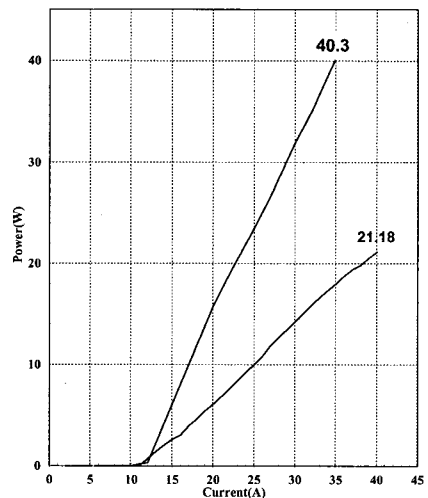


그림 5. LDA 바 및 2D-stacked 어레이의 L - I 그래프의 비교

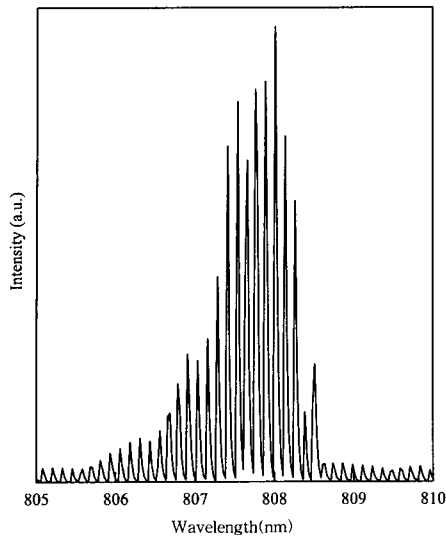


그림 6. LDA 바의 발진 스펙트럼

한 바를 언급하였다. 즉, 미 SDL 사의 고출력 LDA 전략은 선형적인 단면 방출형(Edge Emitting) LD 어레이를 기본으로 하여, 수직적인 stacking을 통하여 고출력을 얻어내는 개념이다. 이 과정에서 필연적으로 발생하는 열화문제를 극복하기 위해 복잡다단한 수냉식 냉각 방식을 도입하였다.

본 연구실에서는 선형 EELD 어레이의 기본 개념을 탈피하여, 2D 형식의 표면 방출형(Surface Emitting) LD 어레이의 개념을 고려하여 동심원형 그레이팅 표면 방출형 레이저에 관한 특허를 확보하였다.[11] 즉, 자발 방출에 의해 생성된 광자는 표면의 원형 그레이팅에 의해 second order diffraction을 일으켜 레이저 발진 모드가 결정되고, first order diffraction에 의해 그레이팅 표면에 수직하게 레이저 빔이 방사된다. 이때 방출되는 레이저는 원형 그레이팅의 2차원적인 간섭에 의해 발산각이 매우 작은 원형 레이저 빔이 나온다. 따라서, 이러한 CGSEL(D)를 기판위에 2차원적으로 배열하므로써 그림 7과 같이 기판에 수직인 지점 F에 focus가 가능하기 때문에 고출력 LD로 사용이 가능하다.

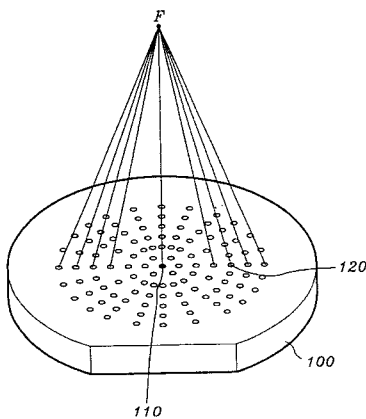


그림 7. CGSEL(D)의 개략도

이 경우에서 VCSEL을 이용한 2D 고출력 LDA도 활용이 가능하고, CCG(Concentric circle grating) 형태의 2D LDA도 가능하다. 이러한 구조에서는 SDL 방식에서 제작한 복잡하게 얽히는 열화문제에서 벗어날 수 있는 가능성이 있고, 더욱이 최근 본연구실이 발명한 광양자태(PQR; Photonic Quantum Ring) LD를 2차원으로 어레이화 하면, 종래의 LD들이 갖는 온도-파장의 선형적(T) 함수관계를 탈피, 제곱근식(\sqrt{T}) 함수관계의 포화영역에서 얻어지는 온도 안정성까지 활용할 수 있는 장점이 있으며[12,13], 2차원의 고집적LDA가 개발될 경우 광평평을 위한 복잡한 광집속 방식에도 큰 개선을 도모할 수 있을 것이다. 그림 8에 본 연구진이 제작한 8×8 PQR 어레이의 근접장 사진을 나타내었다.

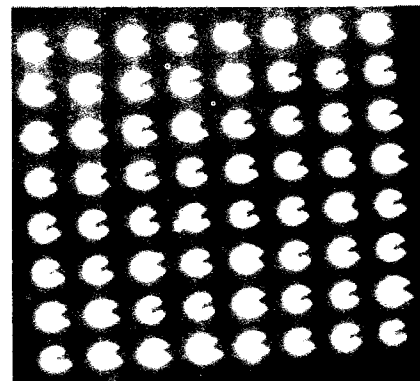


그림 8. 8×8 PQR 어레이의 근접장사진(문턱전류=1mA)

3. 결 론

해외에서는 1KW급 고출력 LDA는 이미 상용화가 된 상태이고, 1MW급 LDA는 시도중인 반면, 국내에서는 본 연구진에 의해 진행되어 온 고출력 LDA 개발 현황을 소개하였다. 즉, 20W 출력을 갖는 선형 LDA 바를 2D stacking을 이용하여 적층시키고, 이를 QCW로 구동시켜 50~100W급의 고출력 LDA를 개발하였다.

한편, 개발 과정 중에 부딪친 위상잠금 어레이(Phase locked array) 기술 개발에 필요한 이온주입 기술 능력 및 MOCVD 재성장 문제, 그리고 AlN 등과 같은 주변 기술 능력이 병행하여 발전하는 것도 필수적임을 체득하였다.

결론적으로, 국내의 고출력 LDA 개발 노력은 상당히 미미한 상태이고, 더이상 가시적인 개발 분위기가 성숙되지 못하고 있음은 장래의 활용전망을 볼 때 매우 아쉬움을 남기고 있다.

본 연구실의 독자적인 2D 고출력 LDA 개발 개념을 소개하는 것으로 이분야에 국내 개발 활동이 촉발되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 ADD(국방과학연구소)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] D.L. Begley, D.K. Wagner, D.S. Hill, Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 756, 19, 1987; R.S. Cross et al., Science 237, 1305, 1987

[2] D.R. Walker, C.J. Flood, and H.M. van Driel, "High power diode-pumped Nd:YAG regenerative amplifier for picosecond pulses", Appl. Phys. Lett., vol. 65, No. 16, pp. 1992-1994, 1994.

[3] T.Y. Fan, and R.L. Byer, "Diode Laser-Pumped Solid-State Lasers", IEEE J. Quantum Electron., vol. 24, No. 6, pp. 895-912, 1988.

[4] David C. Brown, "Ultrahigh-Average-Power Diode Pumped Nd:YAG and Yb:YAG Lasers", IEEE J. Quantum Electron., vol. 33, No. 5, pp. 861-873, 1997.

[5] Susumu Konno, Shuichi Fujikawa, and Koji Yasui, "80W cw TEM₀₀ 1064nm beam generation by use of a laser-diode-side-pumped Nd:YAG rod laser", Appl. Phys. Lett., vol. 70, No. 20, pp. 2650-2651, 1997.

[6] C. Bibeau, R.J. Beach, S.C. Mitchell, M.A. Emanuel, J. Skidmore, C.A. Ebberts, S.B. Sutton, and K.S. Jancaitis, "High-Average-Power 1- μ m Performance and Frequency Conversion of a Diode-End-Pumped Yb:YAG Laser", IEEE J. Quantum Electron., vol. 34, No. 10, pp. 2010-2019, 1998.

[7] D.J. Ottaway, P.J. Veitch, M.W. Hamilton, C. Hollitt, D. Mudge, and J. Munch, "A Compact Injection-Locked Nd:YAG Laser for Gravitational Wave Detection", IEEE J. Quantum Electron., vol. 34, No. 10, pp. 2006-2009, 1998

[8] B.H. Park, N.J. Son, J.H. Bae, O'Dae Kwon, "Fabrication of a AlGaAs High Power(\sim 20W) Laser Diode Array", J. IEEK, vol. 34, No. 11, pp. 20-24, 1997; N.J. Son, S. Park, J.C. Ahn, and O'Dae Kwon, "MOCVD grown AlGaAs high power laser diode array", Compound Semiconductors 1995: IOP, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 145, ch.8, pp.999-1002, 1996.

[9] M. Sakamoto, J.G. Endriz, and D.R. Scifres, "120W CW Output Power From Monolithic AlGaAs(800nm) Laser Diode Array Mounted on Diamond Heatsink", Elect. Lett., vol. 28, No. 2, pp. 197-199, 1992.

[10] Spectra Diode Laboratories' Catalog, pp. 71-79, 1995

[11] O'Dae Kwon, "Circular grating surface emitting laser diode", US patent, #5,561,683.

[12] J.C. Ahn, K.S. Kwak, B.H. Park, H.Y. Kang, J.Y. Kim, and O'Dae Kwon, "Photonic quantum ring", Phys. Rev. Lett., Vol. 82, pp.536-539, 1999

[13] M.S. Kim, K.S. Kwak, J.Y. Kim, M.J. Kim, O'Dae Kwon, "PQR 레이저의 1Km 광섬유 전송 및 자유공간 특성", 대한전자공학회 추계 종합 학술 대회, 11.27, 1999

저자 소개



박병운(朴炳勳)

1972년 10월 10일 생. 1995년 경북대 전자공학과 졸업. 1997년 포항공대 전자전기공학과 석사 졸업. 1997-현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정



권오대(權五大)

1969년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 Rice Univ. 전자공학 석사. 1978년 Rice Univ. 전자공학 박사. 1978-1979년 Cornell Univ. 레이저 분광 연구실 Postdoc Fellow. 1980-1982년 Cornell Univ. 통계 물리/응용물리 연구부 선임 연구원. 1982-1986년 Dow Corp. 중앙연구소 자성체/광전자 연구부 책임 연구원. 1993-1994년 AT&T 벨 연구소 객원 연구원. 1986-현재 포항공과대학교 전자전기공학과 교수. 주 관심분야는 양자 및 광전자 공학, 광교환 및 광컴퓨터 등임. 1988-1991년 MOCVD법에 의하여 SEED 광교환 소자 최초 개발. 1993-1998년 YAG 펄핑용 고출력 LDA 개발. 1996-1999년 μ A~mA급 광양자태(PQR) 레이저 발명 및 개발