반도체 레이저 다이오드

DOI: 10.3938/PhiT.19.016

심 중 인

Semiconductor Laser Diode

Jong-In SHIM

Diode laser is indispensable optoelectronic device in modern life. The attraction of diode lasers over all other types of laser is their compactness, high efficiency, stable operation, and long lifetime. Nowadays its applications are extremely wide such as optical communications, laser printers, laser pointers, spectroscopy, display, and medicine, etc. In this paper, diode lasers are reviewed in terms of technological history, performance realization, and applications.

들어가는 글

반도체 레이저 다이오드(laser diode: LD)는 반도체 내에서 전자의 광학천이에 의한 광자의 유도방출을 이용한 광파의 발진기 및 증폭기를 총칭한다.^[1] 반도체 레이저 다이오드는 각종 레이저들 중에서도 가장 소형·경량이며 반도체 공정을 통해 저가격으로 대량 생산이 가능한 장점이 있다. 오늘날의 인터넷 및 무선 휴대폰 기기로 대변되는 정보통신사회는 IC, 컴퓨터, 그리고 반도체 레이저를 광원으로 사용하는 광섬유 통신 기술이 개발되지 않았으면 아마 실현되지 않았을 것이다. 이와 같이 반도체 레이저는 정보화 사회를 지탱하는 기반 기술로 이미 자리를 잡고 있다. 이외에도 레이저 포인터, 프린터, 디스플레이, 디지털 오디오/비디오 기기, 의료용 기기, 계측기 등 우리 생활에 넓게 사용되어지고 있다.

반도체 레이저는 지난 50여 년 동안 반도체 재료, 구조, 제조 공정, 성능, 응용적 측면에서 꾸준한 연구 개발이 이어져 왔다.^[2] 발진파장 범위는 300 nm~20 μ m, 최대 광출력은

약 50 W, 최소 발진개시전류는 수 μ A, 최소 주파수 선폭은 50 kHz, 최대 파장가변 범위는 30 nm, 동작 수명 십만 시간 이상 등 괄목할 만한 성능을 얻고 있다.^[3] 이 글에는 반도체 레이저의 역사, 동작원리, 재료, 구조, 레이저 광의 특징, 응용에 대하여 소개하고자 한다.

반도체 레이저의 발전

SiC 반도체에서의 발광 현상이 1907년 Henry Joseph Round에 의하여 우연히 발견된 이래 103년이 지났다. 1958년 Schawlow-Townes에 의해 레이저의 기본이론이 구축되고 1960년 He-Ne 레이저 발진이 확인된 직후인, 1962년 최초의 반도체 레이저인 GaAs 레이저로 저온에서 발진이 관측되었다. 이후 광섬유 통신용 및 광디스크용 광원으로 사용되게 됨에 따라 괄목할 만한 기술적 및 산업적 진보를 달성하게 되었다.

기술적인 측면에서 발광소자의 개발은 크게 다음과 같이 나누어 이해할 수 있다. 화합물 반도체에 관한 물성과 발광소자로서의 다이오드 기본 특성은 1960년대 들어서 서서히 이해되기 시작하였다. 이종접합구조의 도입으로 처음으로 반도체 레이저가 상온에서 연속 발진이 가능하게 되었으며 실용화에 큰 진보를 이루었다.^[1,2] 1970년대에서는 주로 문턱전류 저감 및 펄스모드 제어를 위한 기술들이 개발되었으며, 1980년대에 들어서서 종모드 제어에 관한 기술들이 확립되었다. 1990년대 들어서서 반도체 재료 및 결정성장기술의 향상으로 활성층에 양자우물구조 도입에 의한 성능향상 및 대량생산을 위한 기반을 갖추 수 있었다. 1990년대 중반부터는 GaN계 반도체 레이저가 연구되기 시작하여 성능이 우수한 자색, 청색 레이저를 만들 수 있게 되었으며, 작년부터는 반도체로서 아직까지 성공하지 못하였던 500 nm~600 nm 영역의 녹색 반도체 레이저도 상온 발진에 성공하였다는 보고가 이어지고 있다.

저자약력

심중인 교수는 일본 동경공업대학(Tokyo Institute of Technology) 공학박사(1992)로서 일본전기(NEC) 연구원을 거쳐 1994년부터 한양대학교 전자통신공학과에서 교수로 재직 중이다. 1985년 한국전자통신연구원에서 반도체 레이저를 연구한 이래 현재까지 25년 이상의 반도체 레이저에 대한 연구를 수행하고 있다. (jishim@hanyang.ac.kr)

REFERENCES

- [1] J. -In Shim, *et al.*, Fundamentals of modern light emitting semiconductors, ISBN 978-89-5526-429-6 (2008).
- [2] L. Coldren, *et al.*, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, ISBN 0-471-11875-3 (1995).
- [3] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode.

Table 1. Technological history of semiconductor lasers.

Years	Materials	Technology
1962–1970	GaAs/GaAs	LPE, homojunction direct modulation
1970–1975	GaAs/GaAlAs	heterojunction transverse mode
1975–1985	1 μm InGaAsP	lateral mode longitudinal mode
1985–1990	0.78 μm GaAlAs 1 μm band InGaAsP	low noise high coherence
1990–1995	0.6 μm AlGaInP 0.4 μm UV/blue InGaN	MOCVD, strained QW, surface emitting
1995–	1 μm InGaAsP 0.5 μm InGaN	wavelength tuning, integration nano-technology

동작원리 및 구조

반도체 레이저 다이오드는 pn 접합다이오드이다. 그림 1(a)에 LD의 횡단면 구조를 나타내었다. 반도체 윗면과 아랫면에 각각 양극(anode)과 음극(cathode)의 전극이 있어, i-층으로 표시된 활성층영역에 전류를 주입한다. 이때 주입된 전류를 유도방출을 극대화하는데 효과적으로 사용하기 위하여 전극 가장자리에 전류 차단층이 있다. 그림 1(b)는 LD의 종단면 그림을 나타낸다. 광파가 공진기 단면 사이를 공진기 축 방향으로 왕복하면서 유도방출에 의하여 증폭됨을 보여 주고 있다. 페브리-페롯(FP)형 LD의 공진기 단면은 결정의 절개면을 일반적으로 이용되며, 발진 주파수 제어 기능을 갖는 분포반사기를 집적한 구조가 사용되기도 한다.

LD의 활성층에서는 (1) 자연방출, (2)유도방출, (3)유도흡수(일반적으로 광흡수라 칭함)의 3가지 중요한 광자와 전자 사이의 상호작용이 있다. 자연방출은 캐리어 수가 열평형상태보다 많아지게 되며, 발광다이오드에서 발생된 빛은 대부분 자연방출과정을 통하여 발생된 빛이다. 한편, 유도방출과 광흡수는 서로 상반된 과정이기 때문에 캐리어의 반전분포 상태에 따라 둘 중 어느 하나의 과정에 의하여 지배된다. 유도방출율이 광흡수율보다 커지게 되면 순이득(g_{net})이 양이 되어 광파는 공진기 내를 진행하면서 증폭된다. 유도방출율이 흡수율보다 큰 상태를 반전분포라 하며, 반전분포를 얻기 위하여서는 pn접합에 인가하는 순방향전압 V [Volt]가 밴드갭 에너지 E_g [eV]보다 커야 한다. 즉, $V > E_g/q$ 이며 q 는 전자의 전하량이다.

반전분포가 만들어져 있다고 하여도 반드시 레이저 발진이 얻어지는 것은 아니다. 광파는 공진기 내부를 진행하면서 광도파로의 산란, 반도체 내부의 자유캐리어에 의한 에너지 흡수, 레이저 단면을 통한 출사 등의 이유로 많은 광자수를 잃

Fig. 1. Schematic cross-sectional views of a semiconductor laser diode along the (a) lateral- and (b) longitudinal directions.

Fig. 2. Light output power, optical spectra, and net gain as a function of current.

어버리게 된다. 따라서 레이저의 발진이 이루어지기 위하여서는 광파가 공진기 내를 1회 왕복할 때 얻어지는 광이득과 광손실이 거의 같아져야 한다. 그림 2에 주입전류에 따른 LD의 광출력, 스펙트럼의 변화, 이득과 손실의 상태를 나타내었다.

밴드갭 에너지와 발진 파장

반도체 레이저에 사용되는 반도체 재료는 직접천이형 밴드갭을 갖는 물질이어야 한다. 직접 밴드갭 반도체로 이루어진 LD의 발진파장 λ 는 밴드갭 에너지 E_g 에 의하여 결정되며 λ

Fig. 3. Bandgap energy and lattice constant of several semiconductors.

$[\mu\text{m}] = 1.2398 / E_g$ 관계가 있다. 그림 3은 광소자로 널리 사용되고 있는 주요 반도체의 밴드갭 에너지와 반도체 결정의 격자상수와의 관계를 보여주고 있다. 광통신에 사용되는 적외선 영역의 광원 물질로는 GaAs나 InP의 III-V족 반도체가 널리 사용된다. 자외선 영역에서부터 녹색 가시광 영역에서는 GaN와 InN의 합성물질인 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 가 일반적으로 사용된다.

이종접합 p-i-n 활성층 구조

현재의 고효율 LD가 개발 가능하게 된 가장 큰 기술 혁신은 이중이종접합(DH) 구조를 채용한 것이라 하여도 과언이 아니다. 이종접합이란 반도체의 밴드갭 에너지가 다른 물질끼리 경계를 이루는 접합을 일컫는다. 대부분의 반도체 레이저는 그림 4와 같은 p-i-n 다이오드 구조로 되어 있으며, pn 접합다이오드의 경계면에 아무런 도핑을 하지 않은 중성 반도체(intrinsic semiconductor)를 삽입한 구조에 해당된다. 이 구조에 순방향 전압을 인가하게 되면 그림 4와 같이 n형 반도체 쪽에서 밀려온 전자는 에너지 준위가 낮은 중성 반도체 영역에 모이게 된다. 아울러 p형 반도체에서 밀려온 정공도 n형으로 확산되어가는 경우는 거의 없이 대다수가 중성 영역에 모여 있게 된다. 그러므로 이 중성 반도체 영역에서 전자와 정공을 밴드갭이 작은 i-형 영역(활성층)에 모이게 할 수 있어 발광효율을 매우 좋게 할 수 있다. DH 구조는 캐리어의 구속뿐만 아니라 광자의 구속에도 좋은 역할을 하고 있다. DH 구조에서의 활성층의 굴절율은 주변의 클래드(p형 및 n형 반도체)보다 크며 그 차이는 대략 수% 정도가 된다. 이로 인하여 DH 구조에서 자연적으로 광도파로의 역할을 하여 유도방출효율을 극대화할 수 있다. 최근에는 발진개시전류의 저감, 온도특성, 변조특성 등의 성능향상을 위해 활성층의 두께가 수 nm 정도로 매우 얇은 양자우물(QW) 혹은 양자우물들이 다중으로 적층된 다중양자우물(MQW) 구조 등이 사용되고 있다.

DH 구조를 형성하기 위하여서는 밴드갭이 서로 다른 얇은 결정성장층들이 다층으로 적층할 필요가 있다. 반도체는 격자

Fig. 4. Schematic energy band diagram of double heterostructure (DH).

상수가 비슷할 경우 쉽게 적층이 가능하나, 격자상수가 크게 다른 반도체를 서로 적층할 경우 결정성장 시 많은 결함을 포함하게 되어 발광효율을 저하시키는 원인이 된다. 실용화되어 있는 대부분의 LD는 많은 실험을 거쳐 기판과 동일한 격자상수를 가지면서 밴드갭이 서로 다른 물질들을 적층한 구조로 하고 있다.

횡모드 및 종모드

그림 5에 반도체 레이저의 기본 구조와 횡모드 및 종모드의 광분포를 나타내었다. 활성층에 수직인 방향(성장층 방향)의 횡모드를 수직횡모드라 하며, 활성층과 클래드 경계의 이종접합 단면에서 만들어지는 정재파의 상태를 나타내며 레이저광의 수직방향으로의 퍼짐각을 결정한다. 문턱전류를 낮추기 위하여 활성층의 두께를 수 nm~수백 nm 정도를 사용하기 때문에 수직 횡모드는 기본모드만 존재하게 된다. 성장층에 평행한 방향의 수평 횡모드는 발진영역과 그 외측영역과의 사이에 만들어지는 정재파의 상태를 나타내며 레이저광의 수평방향으로의 퍼짐각을 결정한다. 대부분의 반도체 레이저의 응용분야에서는 수평 횡모드는 하나이며 단봉성이 요구된다. 그러나 전류량 혹은 온도 등 외부환경의 변화에 따라 활성층 내의 캐리어수가 변화하게 되어 수평 횡모드가 불안정하게 되기 쉽다. 이러한 이유 때문에 안정한 공진기를 소자 내에 만들어 수평 횡모드를 제어하기 위한 연구는 반도체 레이저 역사 가운데 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 현재에는 활성층의 굴절율이 주변의 매질보다 매우 크게 한 굴절율형 도파구조가 많이 이용된다.

반도체 레이저는 밴드 간 천이를 이용하고 있기 때문에 수십 meV 정도의 넓은 에너지 범위에 걸쳐서 평탄한 이득분포를 갖고 있다. 반도체 레이저로부터 방출된 광 스펙트럼은 일

Fig. 5. Vertical and lateral transverse modes with their near-field and far-field patterns in semiconductor laser.

Fig. 6. Lasing spectra of (a) multiple longitudinal mode FP laser and (b) single longitudinal mode DFB laser.

Fig. 7. 1.55 μm InGaAsP/InP distributed feedback (DFB) laser diode.

반적으로 규칙적으로 떨어져 있는 파장성분들로 구성되어 있으며, 이러한 파장들은 레이저 공진기의 종모드라 불린다. 레이저 발진 시, 종모드의 수에 따라 (1) 단일종모드 레이저와 (2) 다중종모드 레이저로 구분된다. 그림 6에 다중종모드 레이저 및 단일종모드 레이저의 발진 스펙트럼을 비교하여 놓았다.

일반적인 다수의 종모드로 발진하는 레이저는 변조 시 발진스펙트럼이 매우 넓어지고, 전류 혹은 동작온도 변화에 따라 종모드 간 천이가 발생하여 잡음특성이 매우 나빠지는 단점이 있다. 정상상태 및 과도상태에서도 주모드와 인접부모드 사이의 인접모드 억제비가 약 40 dB 정도로 매우 큰 차이를 유지하면서 안정된 단일 종모드로 동작하는 레이저를 단일종모드(혹은 동적단일모드) 레이저라 부른다. 대표적인 단일종모드 반도체 레이저로서 분포피드백(DFB) LD가 있다.

변조 특성

반도체 레이저의 광출력을 변조하는 방식으로는, (1) 반도체 레이저에 주입하는 전류를 변조하는 직접변조 방식과 (2) 레이저는 직류로 동작하고 외부에 광변조기를 달아서 변조하는 외부변조방식이 있다. 현재의 대부분의 반도체 레이저를 사용하는 시스템은 제작이 간단하고 가격이 저렴한 (1)의 직접변조방식이 사용되고 있으나, 장거리 대용량 광전송시스템과 같이 양질의 변조 광특성이 요구되는 곳에서는 외부변조방식이 사용되기도 한다.

광출력 변조 시 바람직한 특성은 시간에 따른 주입 전류

Fig. 8. Schematic explanation of direct modulation in a semiconductor laser.

모양과 선형적으로 비례하는 광출력 특성과 시간에 따라 변화하지 않는 안정된 발진 주파수 특성을 얻는 것이다. 그러나 실제로는 주입캐리어밀도와 광자밀도 사이의 위상차에 의한 광출력 지연 및 완화진동 특성의 출현, 변조상한 주파수가 존재하며 주파수에 따른 일정하지 못한 변조효율로 인한 광출력 파형의 변형, 발진파장이 주입전류에 따라 변화하는 파장처핑 현상 등 다양한 문제점이 있다.

반도체 레이저의 변조대역폭을 확대하기 위해서는 외부 기생용량에 의한 제한에서 벗어나야 하여야 하며, 공진주파수를 극대화하는 것이 가장 중요하다. 공진주파수는 광자와 전자계의 공진현상을 반영한 것으로 그 이상의 속도로 전류 혹은 캐리어 밀도를 변조하여도 광출력의 변화가 그 속도를 따라가지 못함을 의미한다. 일반적으로 AlGaAs계에서는 약 5 ~ 6 GHz, InGaAsP계에서는 약 10 GHz 정도이다.

FP-LD 혹은 DFB-LD에서 직접변조 시의 스펙트럼의 퍼짐은 직류동작 시에 비하여 월등히 커지게 된다. 장거리 광섬유 통신의 경우 다모드로 발진하고 레이저를 사용하면 광섬유의 색분산 혹은 종모드들간의 모드분배잡음 등에 의해 전송대역폭이 제한된다. 따라서 고속직접변조를 이용한 장거리 통신용 광원으로는 DFB-LD와 같이 단일종모드로 발진하는 레이저를 이용한다. 하지만 DFB-LD에서도 변조를 행하면 시간에 따라 발진파장이 변화하는 파장처핑(wavelength chirping) 현상이 나타나며, 결국 전송률을 제한하는 가장 큰 요인이 된다. 파장 처핑의 원인은 직접변조 시 발생한 캐리어의 변동을 통하여 발진파장이 시간적으로 변하기 때문으로, 광강도는 변화하지만 발진파장은 작게 변화되도록 하는 많은 방법들이 제안되어 있다.

Fig. 9. Wavelength chirping in single longitudinal mode laser.

대표적 반도체 레이저 및 이의 응용

반도체 레이저는 양자역학을 근본으로 하여 만들어진 과학 기기 가운데 우리들 일상생활에 가장 가깝게 사용하고 있는 제품 중 하나라 생각된다. 반도체 레이저의 다양한 응용 가운데 광섬유 통신용 광원으로서 반도체 레이저의 사용은 반도체 레이저의 개발 및 실용화에 있어 결정적인 역할을 하였다고 하여도 과언이 아니다. 우선 GaAs계 레이저를 이용한 근거리 광통신 시스템이 1970년대부터 개발되기 시작하였다. 이후 장거리고속 전송시스템 개발을 위하여 석영계 광섬유의 군속도 분산이 최소로 되는 파장 $1.3\ \mu\text{m}$ 대, 전파손실이 최소로 되는 $1.5\ \mu\text{m}$ 대의 반도체 레이저로서 InGaAsP계 레이저가 1980년대부터 적극적으로 개발되었다. 장거리 대용량 정보 전송을 위하여서는 광대역변조, 작은 처핑, 높은 가간섭성, 저잡음, 고신뢰성 등의 매우 엄격한 성능이 요구되었다. DFB 및 DBR (Distributed Bragg Reflector)형의 공진기 구조 도입, 활성층에 스트레인 양자우물구조 도입, 변조기 집적화 등의 개선으로 1990년대 초반 실용화할 수 있었다. 1990년대 후반부터 전송 용량을 높이기 위하여 개발된 파장다중화(WDM) 혹은 코히런트 통신 방식에서는 보다 높은 주파수 제어가 필요하게 되었으며, 파장가변레이저를 포함한 다수의 고성능 반도체 레이저가 개발되었다. 이와 더불어 반도체 레이저 증폭기 혹은 반도체 레이저에 의한 비선형파장변환기술, 솔리톤 통신용 초단 펄스 발생기술, 광섬유 증폭기용 펌핑 광원, 외부 공진기 혹은 광변조기 집적화 기술 등이 매우 활발하게 연구되었다. 2000년대 멀티미디어 시대의 도래에 따라 각 가정까지 광섬유망이

이용되게 되었으며, 반도체 레이저를 포함한 각종 광소자들의 저가격화, 대량생산화 기술이 핵심적 화두가 되었다.

반도체 레이저의 또 다른 중요한 응용으로서 광디스크가 있다. 여기서는 저잡음 및 높은 안정성의 특성이 요구됨과 동시에, 고밀도 기록을 위하여 단파장화 및 저가격화 기술이 매우 중요하다. CD 시스템의 피크업용 광원으로서 AlGaAs 레이저는 가정까지 널리 보급된 최초의 반도체 레이저가 되었으며, DVD 시스템용에서는 AlGaInP 적색 레이저가 주로 사용되고 있다. 최근 들어서는 자외선 및 가시광 영역의 InGaN계 반도체 레이저에 대한 연구도 발광다이오드의 보급 확대에 따라 다시 활발하여지고 있다. 405 nm 자외선 레이저는 고밀도 DVD 응용 시스템의 광원으로서, 450 nm 청색레이저 및 530 nm 녹색레이저는 디스플레이용 광원으로서 개발되어지고 있다.

반도체 레이저와 전자회로를 집적한 광전집적회로, 그리고, 레이저, 광변조기, 광검출기, 광결정구조를 이용한 광도파로 등의 광전자소자를 집적한 광집적회로 등은 소형이며 저가격으로 신호전송 효율을 높일 수 있는 차세대 정보통신시스템 구현 기술로서 매우 활발히 연구되고 있다. 이외에도 레이저 거리 측정기, 위성 간 통신, 건물 간 가시광 통신 등의 공간 통신의 응용, 그리고 의료용 기기에서의 응용, 각종 계측기기에서의 응용 등에 실제 사용되고 있다.

나오는 글

반도체 레이저는 1962년도 저온 발진을 시작으로, 현재는 정보통신의 근간이 되는 광통신용 광원으로서 지난 50여 년 동안 기술적 측면에서 뿐만 아니라 응용면에서도 괄목할 성장을 해왔다. 우리나라에서는 1980년 초반부터 한국전자통신 연구소를 중심으로 본격적으로 연구되어 왔다. 결정성장기술, 반도체 재료, 구조설계, 공정 기술, 집적화 기술 등의 끊임없는 연구로 이제는 광출력, 주파수, 출사패턴, 변조특성, 온도 특성 등을 거의 원하는 만큼 제어할 수 있도록 되었다. 반도체 레이저는 다른 레이저들에 비하여 소형이며 고이득으로써 Si 반도체 공정에서 개발된 반도체 공정기술을 백분 활용할 수 있다는 장점이 있다. 자외선 영역에서부터 적외선 영역까지 폭넓은 파장 구현이 가능하기 때문에 앞으로도 더욱 다양하게 사용될 것으로 예측된다. 그러나 30여 년의 반도체 레이저 역사를 갖고 있는 우리나라에서는 불행히도 현재 큐에 스아이라는 중소기업만이 그 명맥을 잇고 있다. 최근에는 반도체 레이저와 유사한 발광다이오드는 우리나라가 세계의 중심 국가로서의 지위에 다가가고 있다. 반도체 메모리에 이어 반도체 발광다이오드, 반도체 레이저 분야에서도 세계 일류 국가가 되길 기대하여 본다.