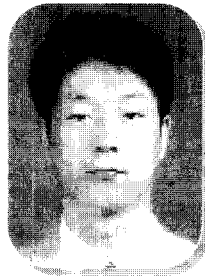


차세대 HD-DVD 광원용 GaN based laser diode의 개발동향



· 남옥현 ·
삼성종합기술원
수석연구원

1. 서론

21세기는 정보화 시대이다. Multimedia의 발달과 더불어 컴퓨터, 휴대전화, 정보기기 등의 시장이 급속히 확산되면서 각종 정보와 자료를 문자, 음향, 화상의 다중매체에 저장할 수 있는 시스템이 개발되고 있다. 최근 들어 컴퓨터, 디지털 TV 등에서 동화상을 여러 형태로 가공해야 하는 경우가 많아 짐에 따라 대용량의 정보를 저장하는 매체에 대한 요구가 급증하고 있다. 이러한 정보저장 기술은 정보지식산업사회에서 정보처리 및 통신과 더불어 주요 3대 분야에 속한다.

정보저장 매체는 정보를 매체에 기록(recording)하여 고정화시키는 정보기록과 이를 기억(memory)해내는 매체로서 자기테이프, 플로피 디스크, 광자기 디스크 (MO), Compact Disk (CD) 및 Digital Versatile Disk (DVD) 등이 있다. 이 중, 광(光)을 이용한 정보저장기술은 레이저의 발달과 더불어 실용화 되기 시작한 기술로서 집속된 레이저 광을 이용하여 정보를 기록하고, 레이저에 의하여 해독, 소거, 재기록이 가능한 정보저장 기술이다. 이러한 광저장장치는 기록된 내용을 단지 읽어 내기만 하는 판독 전용(read-only) 장치, 빈 디스크에 한번의 기록만 가능한 일회기록(write once) 장치 그리고, 반복해서 기록할 수 있는 반복기록(rewritable) 장치 등 세가지로 나눌 수 있다. 또한, 용량이나 특성, 기능, 시장 출시 시기에 따라 CD 계열 (1세대), DVD 계열 (2세대),

HD(high density)-DVD 계열 (3세대)로 구분할 수 있다. (표1)

1세대인 CD 계열이 시장 성숙단계에 이른 것에 비하여 DVD 계열은 지난 1996년 11월 시장에 첫 출시된 이래 표준화를 둘러싼 업체간의 경쟁과 지원 소프트웨어 부족으로 인하여 시장형성이 예상보다 늦어지다가 작년부턴 시장이 급속히 확대되고 있으며, HD-DVD는 시제품 정도만 개발되어 있는 상황으로 이에 대한 업체간의 기술개발 경쟁이 치열해지고 있는 상황이다.

이상의 광저장장치에서 정보기록 및 기억을 수행하기 위한 수단으로 집속된 레이저 광을 사용하는데, 여러 레이저 종류 (기체 레이저, 고체 레이저, 반도체 레이저 등) 중에서 크기가 월등히 작고 가격이 싼 반도체 레이저가 광저장장치에 사용되고 있다. 반도체 레이저는 화합물 반도체의 발광원리를 이용하여 레이저를 발생시키는 다이오드의 일종으로, 레이저 다이오드 (이하 LD)에서 발생된 레이저 광이 디스크에 조사된 후 반사되는 빛의 세기에 따라 0 과 1의 디지털 신호로 변환되어 정보를 처리하게 된다.

표 1. 광 디스크 드라이브의 종류.

구분	1 세대 (CD계열)	2 세대 (DVD계열)	3 세대 (HD-DVD계열)
재생계 (read only)	CD-ROM	DVD-ROM	HD DVD-ROM
기록계 (write once, rewritable)	CD-R CD-RW DVD-RW	DVD-R DVD-RAM, DVD-RW	DVD-R DVD-RAM,

이러한 LD는 광 저장장치의 종류에 따라 LD의 종류 또한 달라 지는데 1세대인 CD계열의 광 저장 장치에는 레이저 광의 파장이 780nm 대역인 적외선 영역의 LD가 사용되고, 2세대인 DVD계열에는 레이저 광 파장이 650nm 대역인 적색 영역의 LD가 사용되며, 3세대인 HD-DVD계열에는 레이저 광 파장이 405nm 대역인 청자색 영역의 LD가 사용된다. CD와 DVD 및 HD-DVD에서 사용하는 LD 레이저 광의 파장이 다른 이유는 파장이 짧을수록 기록, 재생할 수 있는 최대 용량이 증가되기 때문이다.

또한, 영화 타이틀 시장이 점차 활성화됨에 따라 기존의 VCR를 대체할 DVD-Player (이하 DVD-P)가 미국을 중심으로 1999년부터 대체되기 시작하여 2000년에는 1800만대의 DVD-P가 판매되었다. 미국 시장조사기관인 캐너스인스탯은 올해 세계 DVD플레이어 판매량이 작년의 1800만대보다 1000만대 늘어난 2800만대에 이르고 오는 2004년에는 6000만대를 넘어서면서 VCR 판매량을 앞지를 것으로 전망했다. 국내 시장의 경우 IMF이후 전반적인 소비감소와 이에 따른 기기보급의 저조, 콘텐츠의 부족 등의 원인으로 인하여 DVD관련 기기 시장의 활성화가 미진하였으나 2001년부터 보급형모델의 출시, DVD대여 시장의 형성 등으로 국내 DVD-P 시장이 점차 활성화 되고 있다.

한편, 3세대인 HD-DVD계열의 광 저장장치에 대한 연구 개발이 기기 메이커간에 치열하게 진행되고 있다. 이는, 2002년 이후 시작되는 HD(High Density)-TV 방송 수준의 화질에서 표준 2시간 이상 녹화할 수 있는 광 저장장치인 HD-DVD를 선점하는 기기 메이커가 포스트 VCR을 노리는 광 디스크 녹화 장치의 최종승자가 될 것으로 예상되기 때문이다. 3세대 HD-DVD계열의 광 저장장치는 2003년에 시장에 선보일 것으로 예상되며 출하 이후 2~3년간은 2세대 DVD와 같이 시장 형성능이 높다가 이후부터 급격하게 시장 규모가 증가하여 2005년에는 4.3억불, 2009년에는 20.7억불 규모의 시장을 형성하리라 예측되고 있다.

이상의 제3세대 HD-DVD 계열의 광 저장장치 개발의 핵심은 광원으로 사용되는 405 nm 파장을 갖는 청자색 레이저 다이오드의 개발에 있다. 현재, 청자색 레이저 다이오드에 관한 대부분의 연구는 GaN (Gallium Nitride) 반도체에 집중되고 있다. 과거에 HD-DVD용 광원으로 녹색 파장대역에서 상당한 연구가 ZnSe (Zinc Selenide) 반도체에 대해서도 수행 되었으나 수명이 긴 레이저 다이오드를 개발하는데 있어서 심각한 문제가 있었기 때문에 대부분 중지되었다. 반면 GaN-based laser에 있어서의 연구개발은 비약적인 발전을 거듭하여 현재 30mW급 LD의 시제품이 개발되어 있는 상황이다. 본 논문에서는 GaN-based laser와 관련된 주요한 연구개발 성과가 간단히 정리되었다.

2. GaN based laser diode의 개발동향

Gallium Nitride (GaN) 는 밴드갭이 약 3.36 eV(366 nm)로서 InN(1.9 eV) 와 AlN(6.2 eV)와 함께 alloy를 형성하면서 UV 대역의

로부터 deep blue 혹은 green 대역까지 레이저로 개발될 수 있는 가능성을 가지고 있는 재료이다. GaN계 레이저의 개발은 ZnSe계에 비하면 비교적 짧은 편이며, 비록 광범위를 포함한 부분적인 연구가 과거 수년동안 수행되기는 했으나 전류주입레이저(current injection laser)가 구현된 것은 1995년 말이었다.

GaN bulk crystal을 성장하는데 있어서의 어려움 때문에 대부분의 GaN 발광소자는 사파이어(Al_2O_3) 기판이나 탄화규소(SiC) 기판위에 제조되어 왔다. 사파이어 기판을 사용할 경우, GaN와 사파이어 기판과의 열팽창계수의 차이 외에도 격자상수의 큰 불일치(~13%) 때문에 결정성이 좋은 GaN 에피 박막을 성장하기가 매우 어려웠다. 이러한 어려움은 얇은 AlN 또는 GaN 완충층(buffer layer)을 GaN와 사파이어 기판과의 사이에 도입함으로써 해결되었다. 이러한 buffer 성장기술을 사용하여 결정성이 양호한 단결정 GaN 에피층을 사파이어 기판위에 성장시키는 것이 가능하게 되었다.

1995년 12월, 일본의 작은 중소기업인 니치아화학 (Nichia Chemical Inc.)의 주임연구원이었던 Nakamura 박사는 사파이어 기판을 사용하여 GaN계 청자색 레이저 다이오드의 발전을 세계 최초로 보고하였다. 이러한 놀라운 개발은 동시에 의해서 청색 LED (1994년) 및 녹색 LED (1995) 개발에 이어진 쾌거였다. 최초로 개발된 Nichia 레이저는 InGa계 활성층을 사용하였으며 발진파장이 417nm 였다. 이때 개발된 레이저는 상온에서 펄스전류에 의해서 동작되었는데, 사용된 펄스조건은 500Hz, 0.1% duty cycle 였으며, 레이저의 발진개시전류(threshold current)는 $4kA/cm^2$, 발진개시전압은 34V 이었다. 광출력은 200mW까지 확인되었으며, 높은 발진개시전압의 원인으로는 p-type contact 저항이 매우 높았기 때문이었다. 이때 개발된 레이저는 상온에서 2시간 동안 동작한 것으로 발표되었으며, 그 구조는 그림 1과 같다.

Nichia에 의해서 최초로 개발된 상온 GaN 레이저는 26층의 양자우물구조(quantum well structure)와 GaN wave guide, AlGaN cladding layer를 사용하였다. 사용된 사파이어 기판은 성장된 GaN 레이저 구조와 결정의 cleaving 방향이 달라서 cleaving에 의한

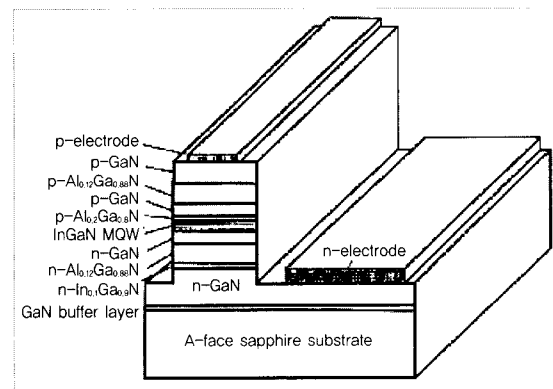


그림 1. 세계최초의 GaN계 레이저 다이오드 구조.

mirror을 만들 수 없었기 때문에 RIE (reactive ion etching) 방법이 mirror facet을 만들기 위해서 사용되었다. 발진개시전류를 낮추기 위해서 reflective coating이 facet위에 사용되었으며, 레이저 소자의 크기는 30×1500 micron 이었다. Nakamura 박사는 후에 이 레이저를 더욱 개량하여 성능을 향상시킬 수 있었다. 양자우물의 수를 26층에서 7층으로 줄여서, 발진개시전압을 20volt로 감소시켰다. 또한 AlGaN층이 활성층 위에 성장되어 In의 desorption과 전자의 overflow를 감소시켰으며, InGaN층을 n-AlGaN clad층 하부에 성장시켜 crack의 발생을 방지하였다. 또한 GaN 레이저 구조를 사파이어의 C-face(0001)가 아니라 A-face(1122)로 성장하는 것이 시도되었으며, 이때 cleaving에 의해서 레이저의 공진면(cavity facet)을 형성하는 것이 가능하다고 보고하였다.

이러한 초기의 결과들을 능가하는 연구결과가 1996년 여름에 국제학술회의에서 발표되었다. 위에서 논의된 것과 동일한 duty cycle(0.1%)에서 상온 24시간의 수명을 갖는 레이저가 보고되었으며, 이때 발진개시전류와 전압은 각각 150-350mA 와 20-30V 이었다.

그 후에는 duty cycle을 50% 까지 향상시키고 발진개시전류 및 전압도 각각 90mA 와 10V로 감소되었다. 1996년 7월에 나카무라 박사는 최초로 GaN 레이저의 상온 연속발진을 보고하였다. 그러나 이때 레이저의 수명은 불과 수초에 불과할 정도로 매우 짧았다. 1996년 11월 LEOS meeting에서 레이저의 상온 연속발진 수명이 27시간까지 증가된 결과들을 발표하였다. 소자구조는 7 InGaN/GaN MQW(Multi Quantum Well), AlGaN cladding층, GaN waveguide층을 갖는 ridge waveguide 구조였다. 발진개시전류와 전압은 각각 90mA와 10V, 발진파장은 408nm 였다. 이후 1997년 6월에는 레이저의 수명이 35시간으로 증가되었다.

1997년 9월에 미국에서 개최된 ISCS 학회에서 나카무라 박사는 Nichia GaN 레이저의 수명이 1.150시간 이상으로 향상되었음을 보고하여 세계를 깜짝 놀라게 하였다. 이 결과는 두가지의 전혀 새로운 시도를 통해서 얻어 졌는데, 하나는 획기적인 에피성장 방법의 도입이었으며, 다른 것은 새로운 레이저 구조를 사용하여 얻어진 것이었다. 이때 사용된 획기적인 성장방법이란 필자가 NCSU(North Carolina State University)에 연구원으로 있을때 처음으로 개발에 성공하여 발표한 한 것으로 사파이어 기판과 GaN 에피층 사이에 격자상수 차이에 의해서 도입되는 결함의 수를 수백~수천분의 1정도로 감소시킬 수 있는 측면에피성장법(LEO:Lateral Epitaxial Overgrowth 또는 ELO: Epitaxial Lateral Overgrowth)을 이용하는 것이다.

LEO(또는 ELO) 방법은 사파이어 기판위에 통상적으로 얇은 두께(~2 micron)의 GaN을 성장하고 그 위에 SiO₂ mask를 증착한 뒤 photo lithography 공정을 이용하여, SiO₂ stripe pattern을 형성한다. 이렇게 stripe pattern이 형성된 시편을 regrowth 조건을 조절하여 lateral growth를 일으키면 결함이 획기적으로 감소된 에피층을 얻을 수가 있게된다. LEO 방법을 이용하면 결함밀도를 10^8 - $10^{10}/\text{cm}^2$

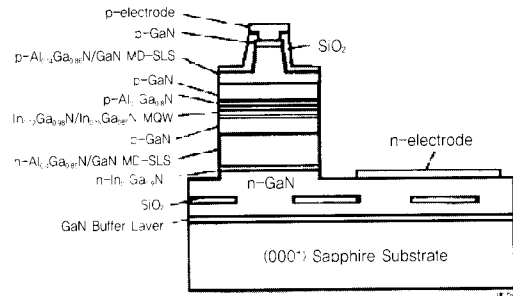


그림 2. 상온 10,000시간 발진에 성공한 Nichia 레이저 다이오드 구조.

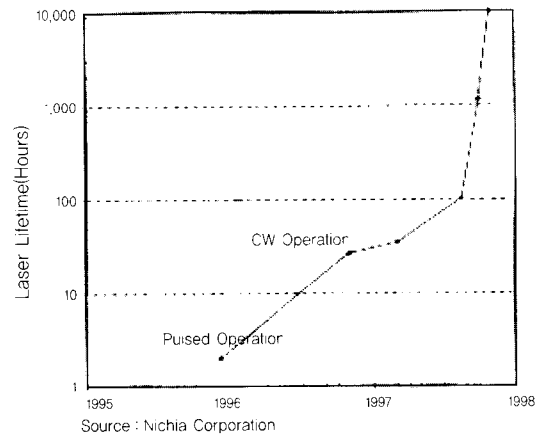


그림 3. Nichia의 GaN 레이저 다이오드의 개발과정.

정도에서 최대 $10^7/\text{cm}^2$ 대로 낮출 수가 있다. 나카무라 박사가 두 번째로 사용한 방법은 AlGaIn cladding층에 MD-SLS (modulation-doped strained layer superlattice) 구조를 사용하여 성장 중에 발생하는 crack의 생성을 억제한 것이다. 이때 보고된 LD 구조를 그림 2에 나타내었다.

1997년 10월 마침내 나카무라 박사는 레이저 다이오드의 상용화를 위한 수명기준인 10,000시간 발진을 세계 최초로 보고하였다. 이러한 결과를 기반으로 하여 Nichia사는 1999년부터 저출력 레이저 다이오드 시제품을 판매하기 시작하였다. 이상과 같은 Nichia사의 청자색 레이저 다이오드 기술의 개발역사를 간단히 그림 3에 나타내었다.

GaN 레이저 다이오드 개발에 있어서 또 하나의 획기적인 연구는 HD-DVD recording에 필요한 고출력(30mW) LD의 개발이었는데, 이 또한 Nichia사에 의해서 실현되어 2001년에 30mW 청자색 GaN LD 시제품의 출하가 발표되었다.

과거 수년동안 세계의 많은 기업연구소와 대학들이 GaN계 레이저 다이오드를 개발하여 상온에서의 레이저 발진을 보고하였

는데, 표 2에 지금까지 레이저의 발전을 발표한 대학과 기업체 연구소들을 정리하였다.

비록 많은 기업과 대학들이 이 분야에서 연구개발을 진행해 왔지만 현재 Nichia사가 독주를 하고 있는 상황이며, 최근 Sony는 NCSU에서 LEO방법을 변형시켜 발표한 Pendoeepitaxy (Modified LEO) 방법을 사용하여 결함을 감소시키고, Nichia 사의 LD와 유사한 구조를 사용하여 상용화 수준인 10,000시간 발진을 발표하는 등 거의 Nichia와 동등한 수준까지 GaN LD의 성능이 향상되었음을 보고하였다.

국내에서는 삼성종합기술원과 LG전자기술원이 GaN계 LD개발을 하고 있는 것으로 알려져 있으며, 공식적으로는 삼성종합기술원만이 유일하게 1998년 12월 청자색 GaN LD의 펄스발진을 보고하였고, 현재 30mW에서 100 시간 정도의 발진을 확인한 상태로 2003년 까지 30mW급 LD의 상용화를 목표로 개발을 진행하고 있는 상황이다.

표 2. GaN 청자색 레이저 다이오드를 발표한 회사 및 대학.

Companies		Universities/Research Centers	
Japan	U.S.	Japan	U.S.
Agilent labs	Cruc	Meijo University	Brown University
Fujitsu			North Carolina state University
Matsushita pioneer	Nitres Xenox		Northwestern University
NEC			Oklahoma State University
Nichia			UC Santa barbara
Panasonic	Europe		
Sony	Osram opto		
Toyota Gosei			
Korea			
Samsung			

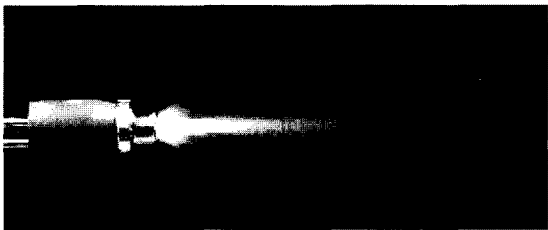


그림 4. 삼성종합기술원에서 개발한 GaN 레이저 다이오드의 상온연속발진.

3. 결론

이상과 같이 차세대 HD-DVD의 광원으로 개발되고 있는 GaN계 레이저 다이오드의 개발역사 및 동향에 대해서 간단히 소개하였다. 현재 가정의 필수품으로 오랫동안 자리를 차지해 왔던

VCR이 점차 적색 레이저 다이오드를 사용한 DVD로 대체되어 가고 있는 추세이다. 그러나 수년 내에 디지털 방송이 본격화 되고 HDTV가 가정에 광범위 하게 퍼지게 되면 현재 서서히 시장에 보급되고 있는 DVD 마저도 GaN계 레이저 다이오드를 광원으로 사용한 차세대 HD-DVD로 대체될 것이다.

참고 문헌

- [1] Laser Diode Market Review and Forecast. Strategies Unlimited, 2000.
- [2] Shuji Nakamura. "The Blue Laser Diode", Springer, 1997.
- [3] Shuji Nakamura, et al., Jpn. J. Appl. Pjys., Vol. 35, p. L74, 1995.
- [4] O.H. Nam, et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 71, p. 2638, 1997.
- [5] Shuji Nakamura, et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 72, p. 211, 1998.

저 자 약 력

성명 : 남 옥 현

❖ 학 력

- 1986년 연세대 금속공학과 공학사
- 1989년 연세대 대학원 금속공학과 공학석사
- 1994년 연세대 대학원 금속공학과 공학박사

❖ 경 력

- 1994년 - 1995년 한국과학기술연구원, 연구원
- 1995년 - 1998년 North Carolina State University, Research Scientist
- 1998년 - 1999년 삼성종합기술원, Photonics Lab, 선임연구원
- 2000년 - 현재 삼성종합기술원, MD Lab, 수석연구원 (GaN LD Project Manager)