

수직공진 표면광 레이저

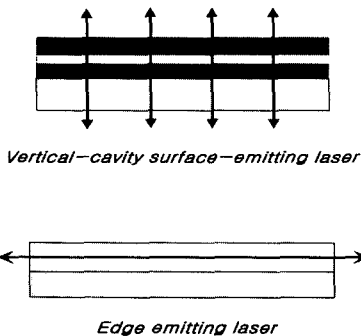
이 용 희

한국과학기술원 물리학과

I. 서 론

반도체 레이저 다이오드는 1960년대의 초창기 레이저들과 거의 같은 시기에 발명되어 지금에 이르고 있으며 현재는 광통신, 가전 제품 등 다양한 분야에서 현대 문명의 발전에 기여하고 있다. 기존의 전통적인 측면 발광 레이저와는 대조적으로, 수직공진 표면광 레이저(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)는 레이저 공진기가 반도체의 기판에 수직하게 형성이 되는 아주 작은 레이저 다이오드이다. 기본적으로 pin 다이오드의 구조로 되어 있고 III-V족의 화합물 반도체로 제작되므로 반도체 레이저로서의 제 특성을 가지고 있다.

특징적으로 볼 때 VCSEL은 기존의 측면 발광 레이저 다이오드에 비하여 두 가지의 면에서 차이가 있다. 첫 번째의 특징은 VCSEL의 평면성이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 레이저의 공진 방향이



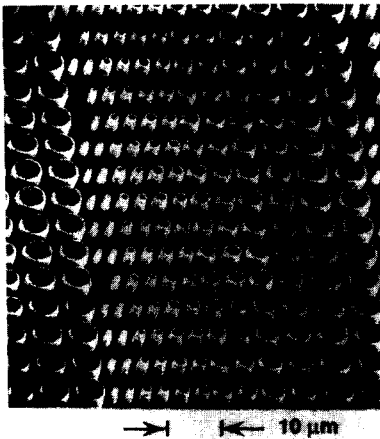
(그림 1) 수직 공진 표면광 레이저와 측면 발광 레이저의 개념적 비교

기판에 수직하므로 빛이 기판에 수직하게 방출되며, 마치 실리콘 IC 소자들과 같이 기판 위에 임의의 형태를 가지는 2차원 배열의 VCSEL을 자연스럽게 구현할 수 있다. 이 경우 완성된 레이저의 성능 측정도 웨이퍼를 절단하여 패키징을 하기 전에 웨이퍼의 상태로 테스트 핀을 사용하여 미리 쉽게 할 수 있다. 이것은 레이저 제작에 있어서의 수율과 관련되는 중요한 장점 중의 하나이다. 또한 레이저의 출력경의 형태를 우리가 원하는 모양으로 기판 위에 쉽게 정의할 수 있기 때문에, 광섬유와 에너지 결합 효율이 좋은 원 대칭형 출력분포 등 각자가 원하는 형태의 공간적인 출력 빔의 모양을 쉽게 얻어낼 수 있어서 다양한 응용이 기대된다. 두 번째의 특징은 VCSEL의 크기가 아주 작다는 것이다. VCSEL은 직경이 수 마이크로, 두께가 1 마이크로 미만이며, 주로 다중 양자 우물 구조로 된 레이저 능동 매질의 체적은 이보다도 더욱 더 작다. 따라서 기존의 측면 발광 레이저에 비해서 문턱 전류가 수십 내지는 수백 배 더 작아질 수 있으며 실제로 그렇다는 것이 보고되고 있다. 반도체 레이저에서 발진 문턱전류는 레이저의 효율 및 열 부하와 직접적으로 관련되는 가장 중요한 특성 중의 하나이며, 문턱 전류의 최소화는 실질적으로 중요한 의미를 지니고 있어서 수많은 연구자들의 관심을 끌어 왔다. 이러한 미세 문턱 전류의 가능성은 앞서 언급한 VCSEL의 평면성과 맞물려서 에너지 효율성이 높은 2차원 광원 행렬이 가능하게 만들어 줄 것으로 기대한다. 미래형의 고효율, 초고속 광원은 이런 모습이 되리라고 생각한다.

역사적으로 볼 때 전류로 동작되는 VCSEL은 1979년 일본의 이가 교수에 의해서 발표된 77K에

서 발전하는 InGaAsP VCSEL이 처음이다^[1]. 하지만 높은 문턱 전류, 상온 연속 발진 불능 등의 만족스럽지 못한 특성들 때문에 연구의 활성화에는 상당한 시간이 소요되었다. 실제로 VCSEL의 연구가 본격화되기 시작하는 것은 1989년 AT&T Bell Labs에서 상온 동작 저 문턱전류 InGaAs VCSEL^[2]에 대한 연구 결과가 발표되면서부터 라고 볼 수 있다. 즉, 상온 동작과 저 문턱 전류로 요약되는 VCSEL의 실용화 가능성이 학계 및 산업계에서 주목받은 것이다. 이러한 VCSEL의 출현은 실제로 MBE, MOCVD 등의 정밀 결정 성장 기술의 발전에 힘입은 바가 크다. 최근에는 이런 복잡한 구조의 VCSEL구조의 기판을 화합물 반도체 결정 성장 전문 업체로부터 주문 생산을 할 수 있는 단계에까지 결정 성장 기술이 성숙하였다.

초창기의 InGaAs VCSEL은 화학적 식각 방식에 의해서 그림 2 에서와 같은 원통형의 메사 형



(그림 2) 식각형의 InGaAs VCSEL의 전자 현미경 사진

태로 제작되었다. 하지만 외부에 노출된 능동 매질의 표면에서의 강력한 비발광 재결합 때문에 성능 향상에 제약을 받았다. 그후 양성자 주입형의 VCSEL^[3]이 곧 이어서 발표되면서, 상온 연속 발진, 수 mW급의 출력 등 여러 가지의 특성들이 기존의 반도체 레이저 다이오드와 비교할 수 있는 단계에 도달하게 된다. 현재 상용화된 VCSEL은 대부분 이 양성자 주입형 VCSEL을 채택하였다. 또한 최근 AlAs를 습식 산화시키면 알루미늄의

산화막을 만들 수 있다는 것이 알려지면서, 산화막 VCSEL이 등장하였다. 여기서의 Al_xO_x 의 산화막은 전류 제어의 역할 뿐 아니라, 광도파로로서도 훌륭하게 동작하면서 VCSEL의 성능을 한 차원 더 높였다. 예를 들어서, 수 내지 수십 μA 정도의 문턱 전류^[4], 50% 정도의 에너지 변환 효율 등 이상적인 다이오드 레이저에 근접하는 특성들이 달성되었다.

발전 파장 영역은 초창기의 980nm의 InGaAs를 출발로 하여, AlGaAs 계열의 700nm와 1000nm 사이의 대부분의 파장에서의 발전이 보고되고 있다. 우선 GaAs 양자 우물을 기초로 한 850nm^[5], AlGaAs 양자 우물을 근거로 한 680-780nm^[5] 등이 발표되었으며, AlGaInP 계열의 640-690 nm의 파장 영역에서의 동작^[6]도 보고되었다. 광통신의 파장인 1.3-1.5 μm 은 InGaAsP를 도입하여 성공시켰다. 이 파장 대역에서는 기판 용융법을 도입하여 상온 연속 발진^[7]을 제한적으로 성공시켰다. 최근의 일본의 도시바에서는 GaInNAs의 양자 우물을 GaAs 기판 위에 성장시키는 방법을 도입하여 1.2-1.6 μm 에서 동작하는 VCSEL^[8]을 성공시켰다고 보고하고 있어서 이 분야에서의 기술 경쟁은 현재 매우 치열한 상황이다. 또한 GaN를 능동 매질로(본권의 'GaN 광원' 논문 참조 바람) 하는 청록색 계열의 VCSEL도 조금씩 보고되기 시작하고 있으므로 가시광의 전 영역, 근적외선과 적외선 등 넓은 파장 영역에 걸쳐서 여러 가지의 VCSEL이 구현되었으며, 그 성능이 지속적으로 향상되고 있다.

II. VCSEL의 구조와 제작 방법

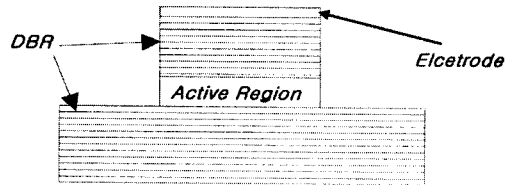
VCSEL은 두 개의 고 반사율 반사경과 그 사이에 존재하는 공진기로 구성되어 있다. 그리고, 이 공진기의 중앙에 발전 파장에서 광 이득을 가지는 GaAs, InGaAs, InGaAsP, AlGaInP 등의 다중 양자 우물이 위치된다. 이런 구조는 대부분의 경우 Molecular Beam Epitaxy(MBE)나 Metal

Organic Vapor Deposition(MOCVD) 방식으로 단결정의 형태로 정밀 성장된다. 일반적으로 반사경 부분은 두 가지의 서로 다른 화합물 반도체(예를 들어서 GaAs와 AlGaAs)의 박막(두께가 $\lambda/4$)을 서로 번갈아 가면서 여러 층 성장시켜서 99% 이상의 반사율을 얻어내어야만 발진 조건을 만족시킬 수 있다. 뿐만 아니라 이 결정 박막들의 절대적인 두께를 1% 이내의 오차 내에서 정확하게 제어할 수 있어야만 원하는 반사율을 얻을 수 있다. 일반적으로 기판 위에 첫 번째로 위치하는 다층 박막의 반사경은 n-형으로 성장하고, 능동 매질이 위치하는 공진기 부분은 도핑을 하지 않고, 위쪽의 반사경은 p-형으로 만들어 준다. 그리고, 레이저 공진기의 내부 광 손실을 최소화하기 위해서 특히 공진기에 가까운 부분의 p-형 반사경의 도핑 정도를 상대적으로 작게 설계하여 주는 것이 좋다. 레이저 능동 매질로는 일반적으로 다중 양자우물을 4 개 이내에서 사용하고 있으며, 전체 두께는 <40nm 정도로 아주 얇다. 최근에는 양자점을 능동 매질로 하여 VCSEL 동작을 성공시킨 논문도 보고되고 있다. VCSEL의 반경은 일반적으로 1-10 μm 이며, 결정 성장된 전체 공진기의 물리적인 두께는 5-6 μm 정도가 된다. 초기의 VCSEL연구에서는 주로 MBE를 이용한 웨이퍼들이 주로 사용되었으나, 최근에 와서는 MOCVD의 방식이 더욱 활발하게 사용되고 있다. 실질적으로 양산용의 VCSEL 웨이퍼 제작에 있어서는 MOCVD가 더 유리한 것으로 알려져 있다. 뿐만 아니라 동일 기판 내에서의 VCSEL구조의 불균일성(발진 파장)의 정도도 1% 이내가 상업적인 MOCVD로부터 어렵지 않게 얻어질 수 있음이 증명되어서 VCSEL의 실용화 가능성을 더욱 높이고 있다.

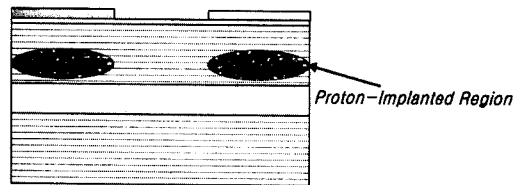
전기적으로 문제가 되었던 특성 중의 하나가 이종 접합면에서의 무시할 수 없는 전기저항이다. 이 저항의 근본적인 이유는 이종 접합면 사이에 형성되는 밴드갭의 불연속성에 의한 에너지 장벽(Potential Barrier)이다. 이를 해결하기 위해서 두 개의 이종접합면 사이에 여러 단계의 아주 얇은 박막을 여러 층 더 첨가시켜서 정공이나 전자가 완만한 경계 면을 느끼게 만들어주는 기법을

사용한다. 이에 대해서는 많은 연구가 수행되어서 이제는 직렬 저항 값이 수십 Ω 정도까지 감소되어서 대부분의 경우에 큰 문제가 되지 않고 있다.

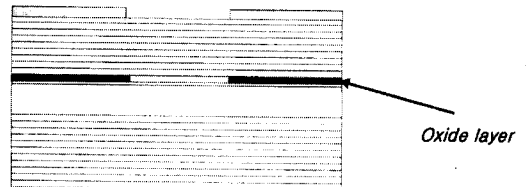
현재 가장 널리 연구되고 있는 3가지 형태의 VCSEL 구조의 개략적인 모습은 그림 3에 나타나어 보았으며 각 구조의 특성은 다음과 같다.



(1) 식각형 VCSEL



(2) 양성자 주입형 VCSEL



(3) 산화막 VCSEL

<그림 3> VCSEL의 대표적인 세 가지의 구조

1) 식각형 VCSEL

이 구조는 1989년 최초의 저 문턱 전류 980-nm InGaAs VCSEL 구현에 도입되었던 방식으로 그림 2에서의 전자 현미경 사진이 바로 식각형 VCSEL의 모습이다. VCSEL의 제작 방식 중에서는 가장 간단한 방식으로 볼 수가 있다. VCSEL 설계의 모든 사항은 화합물 반도체 형성 단계에서 결정이 되며 Chemically-Assisted Ion-Beam Etching과 같은 정밀 비등방성 식각 방식으로

Mesa 구조를 만들어 주는 한 단계의 공정으로 VCSEL의 제작을 끝낼 수 있다는 장점을 지니고 있어서 초창기의 연구에 많이 사용되었다. 이 구조 제작에 있어서 가장 중요한 기술은 깊이 있는 비등방성 건식 식각법으로 양질의 웨이퍼와 식각 기술만 보유하면 VCSEL을 쉽게 제작할 수 있다. 하지만 이 구조의 단점은 식각의 결과로 노출되는 능동 매질 표면에서 운반자가 심하게 비발광 표면 재결합을 하게 되어서 문턱 전류에 나쁜 영향을 미친다는 것이다. 이 비발광 표면 재결합 문제 때문에 초기에 상온 연속발진을 얻어내는 데 많은 어려움이 있었다. 그리고, 이 구조에서는 레이저의 위쪽 반사경의 표면을 금으로 코팅하여 보조 반사경의 역할과 p-접촉점의 역할을 동시에 수행하도록 하였기 때문에 레이저의 출력은 GaAs의 기판을 통과한 후 외부로 방출되는 경로를 택하게 된다. 따라서 레이저의 파장이 GaAs 기판의 밴드갭인 870nm 보다 짧은 경우에는 외부로 빛이 방출될 수 있는 방법이 없다.

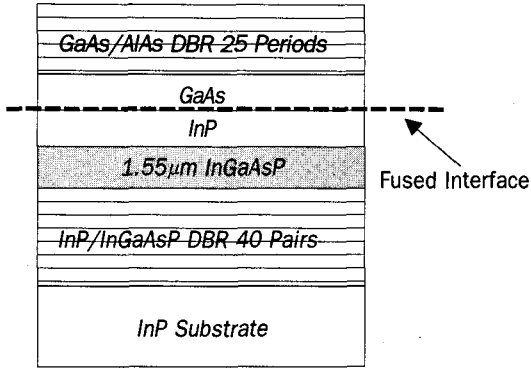
2) 양성자 주입형 VCSEL

식각형 VCSEL의 단점을 보완하고 AlGaAs 계열에서 얻을 수 있는 모든 파장에서 VCSEL을 구현하기 위해서는 기판을 통하지 않고 위쪽으로 빛이 방출될 수 있는 구조가 필요하다. 이런 목적으로 제안된 것이 그림 3-(2)에서 보는 양성자 주입형 VCSEL이며 빛이 기판을 통하지 않고 위로 나온다는 의미에서 초기에는 상측 표면광 레이저 (Top-emitting surface emitting laser)라고도 불렀다. 이 구조에서는 레이저 출력경으로 사용될 부분을 두께가 $6\mu\text{m}$ 정도가 되는 물질(Photo-Resist)로 보호한 후에 에너지가 300-350 keV되는 양성자를 주입시켜서 전류를 우리가 원하는 부분에만 흐를 수 있게 조절하는 방식을 취하고 있다. 실제로 양성자 주입의 효과가 가장 강하게 나타나는 곳은 표면으로부터 약 $2\mu\text{m}$ 정도 깊이의 공간이다. 그림 2를 보면 이해가 쉬우리라 생각된다. 이 구조는 원리적으로 이득유도형 레이저이며, 이로부터 수 mW 급의 상온 연속 발진이 쉽게 가능해지게 되었다. 그리고, 발진 문턱 전류는 1-10mA

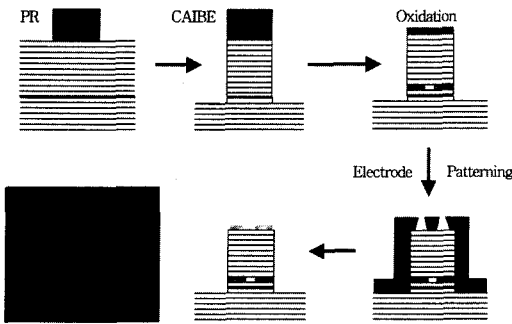
정도이며, 미분 효율은 $0.1-1.0\text{mW}/\text{mA}$ 로서 기존의 측면 발광 반도체 레이저 다이오드와 직접적인 비교가 가능해지는 단계에 도달하였다. 양성자 주입형 VCSEL의 경우에는 레이저 능동 매질이 외부로부터 격리되어서 결정 내부에 잘 보호되어 있으며 전체적인 구조 자체도 평면성을 그대로 유지하고 있기 때문에 구조적으로 아주 견고하다고 볼 수 있다. 양성자 주입형의 수명은 약 수십만 시간이상이 되는 것으로 보고되고 있다. 이렇게 전반적으로 우수한 상온 연속 동작 특성과 수명에 대한 긍정적인 데이터가 발표되면서 진정한 의미에서 산업계에서 관심을 가지기 시작하게 되었다. 다시 말하자면 VCSEL이 사회적으로 인정받기 시작하였다는 뜻이 된다. 그리고, 현재 산업계에서 상용으로 개발하고 있는 VCSEL의 구조는 대부분이 양성자 주입형이다.

3) 산화막 VCSEL

1990년 Holonyak 그룹에서 습식 산화법을 도입하여 전자광학 소자나 전자 소자에 응용될 수 있는 안정된 AlGaAs 산화막막을 얻었다는 실험 결과가 알려진 바로 다음 해에 같은 그룹에서 측면 발광 레이저 다이오드가 발표된다. 그 후 이 새로운 개념을 VCSEL에도 적용하게 되어서, 1994년 U. Texas 그룹과 Sandia 그룹의 산화막 VCSEL[9, 10]을 중심으로 하여 산화막 VCSEL의 연구가 폭발적으로 증가하게 된다. 개념적으로는 그림 3-(3)을 보면 이해가 빠를 것이다. 이것은 우선적으로 산화막 VCSEL의 제작 방법이 그림 4에서 나타난 것과 같이 간단하다는 점과 그 광학적, 전기적 특성이 아주 우수하기 때문이었다. 이 방법은 기존의 VCSEL의 박막 중의 하나의 층을 AlAs나 AlGaAs로 설계 제작하여, 400-450도의 열적 환경 하에서 시료를 위치시킨 상태에서 80-100도의 수증기를 흘려주면서 이 층만을 선택적으로 습식 산화시키는 것이다. 이렇게 습식 산화되면 AlAs는 이의 산화물인 Al_2O_3 로 변환되는데, 이 Al_2O_3 는 아주 훌륭한 절연체가 되어서 GaAs 계열의 화합물 반도체에서 SiO_2 의 역할을 하게 된 것이다. 따라서 이 산화막을 이용하여 전류의 흐름을 효과적



(그림 4) 용융 결합형 VCSEL의 구조



(그림 5) 산화막 VCSEL의 제작 과정

으로 제어할 수 있게 되었다. 그리고, 일반적인 AlGaAs의 굴절률이 3.0-3.6 사이의 값을 가지는데 반하여 AlxOy의 굴절률은 유리의 굴절률과 비슷한 1.5 정도의 값을 가지므로 이 Al_xO_y를 VCSEL의 중심부에 위치시키면 충분한 광도파로 효과를 유도하여서 이득 유도형의 양성자 주입 VCSEL에서의 심하게 발생하는 회절 손실을 극소화시킬 수 있게 되었으며, 그 결과 발진 문턱 전류가 10 배 이상 감소되었다. 가장 작은 문턱 전류의 값으로는 8.7 μ A에서 수십 μ A 정도가 보고되고 있다. 또한 이 방법에 의하여 보고된 결과들 중에는 Wall-plug 효율이 50 %에 달하는 결과도 보고되었다. 장차 이 방법은 더욱 더 활발하게 연구되리라 생각한다. 다만 양산에 있어서의 균일성이나 수명 등의 문제들을 개선시킬 수 있다면 앞으로 산화막 VCSEL의 우수한 특성들은 널리 실제적인

응용을 찾을 것으로 본다.

최근의 통신용 파장에서 동작하는 VCSEL에 대한 연구가 활발하게 연구가 되고 있는데, 이 분야에서는 기판 용융법에 의해 제작된 VCSEL이 비교적 좋은 성능을 나타내고 있다. 1.3-1.5 μ m를 구현하기 위해서는 InGaAsP 계열의 물질을 도입하여야만 한다. 이 물질은 InP 기판 위에 성장된다. 이 경우 결정 다층 박막으로 사용될 물질은 InP와 InGaAsP이 조합이지만 이들 사이의 굴절률 차이가 별로 크지 않기 때문에 많은 쌍의 박막을 쌓아야만 하며, 상대적으로 작은 굴절률 차이 때문에 결정 성장에서의 절대 두께의 정확성에 대한 요구도 기존의 AlGaAs 계열의 경우에 비해서 더 엄밀해져서 0.2-0.3% 정도가 되어서 결정 성장에 어려움이 많다. 이런 문제 때문에 반사경은 AlGaAs 계열의 물질로 만들고 능동 매질은 InGaAsP 계열의 물질로 만들어서 이들을 나중에 융합시키는 방식을 시도하게 된다. 이것을 기판 용융법이라고 부르는데 Hewlett-Packard에서는 기판 용융법을 산업용 LED 생산에 실제로 적용하고 있으므로 현실적인 방법으로 볼 수도 있다. UC Santa Barbara에서 이 방법을 도입하여 1.3-1.5 μ m의 VCSEL의 상온 연속 발진^[7]을 최근 성공시켰다. 문턱 전류가 1mA급이 되는 등 좋은 특성을 보이고 있으나, 기본적으로 레이저 하나를 만드는 데 3 장의 기판이 필요하다는 점에서 개선할 점이 있다고 본다. 최근 일본의 Hitachi에서 GaAs 기판 위에 GaInNAs의 능동 매질을 이용하여 이 파장 대역에서의 발진을 성공시켰다는^[8] 보도는 이 분야 연구자들을 흥분시키고 있다. GaAs 기판 위에 능동 매질이 있으므로 성능이 우수한 AlGaAs 계열의 고 반사경 박막이 가능한 것이 바로 좋은 결과를 얻어내게 하였으며 앞으로의 장파장 VCSEL의 연구를 GaInNAs가 주도할 것으로 본다.

III. VCSEL의 특성

1) 발진 문턱 전류와 에너지 변환 효율

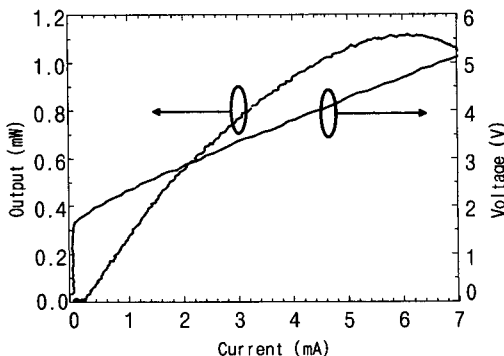
단일 소자로서 VCSEL의 장점 중에서 가장 우선적으로 꼽을 수 있는 것이 바로 발진 문턱 전류의 미세성이다. 이 특성은 VCSEL의 능동 매질의 체적이 대략 $2\text{-}3\mu\text{m}^2$ 정도로 측면 발광 레이저의 체적인 $20\text{-}40\mu\text{m}^2$ 의 약 1/10에 지나지 않기 때문에 당연한 결론이라고 할 수 있다. 즉, 밀도 반전을 시켜 주어야 하는 원자의 개수가 그 체적만큼 줄어든 것이다. 하지만 이에 반비례하여 능동 매질에서 얻어낼 수 있는 전체 이득의 절대량이 줄어들기 때문에 이를 다른 방법으로 보상해 주어야만 한다. 즉, 레이저 공진기의 다른 광 손실들을 최소화시켜야 한다. 이를 위해서 아래위의 반사경의 평균 반사율이 99.5% 정도가 결정 성장을 아주 정밀하게 하여야 한다. 그리고, 이에 더하여 공진기 내부의 자유 전자나 정공에 의한 광 흡수 손실이나 회절 손실 등 모든 손실들도 아울러 극소화되어야 한다. 실제로 4 개의 다중 양자 우물의 경우 이론적으로 얻어낼 수 있는 광 이득의 최대치는 약 0.01 정도이다. 따라서, 상기한 공진기 모든 손실들의 합이 0.01보다 작아야만 레이저 발진과 기본 조건을 만족시킬 수 있다. 현재까지 보고된 발진 문턱 전류 값들 중에서 가장 우수한 것은 $8.7\mu\text{A}$ 로서^[4] 산화막의 InGaAs VCSEL에서 얻어졌다. 그리고, 수십 μA 정도의 값은 거의 모든 종류

의 산화막 VCSEL에서 실현되었다. 참고로 그림 6의 광출력 곡선은 본 실험실에서 제작한 780-nm 산화막 VCSEL로부터 얻어낸 것으로서 $200\mu\text{A}$ 의 문턱 전류를 가지고 있다. 한편 양성자 주입형의 경우에는 대부분 1-10mA 정도의 문턱 전류로 동작하고 있다. 레이저 발진문턱 전류가 작으면 저 출력에서의 고효율을 보장받을 수 있다는 점에서 차세대에 필요하게 될 대형 고 밀도의 광원 행렬 등 열효율 문제가 심각해지는 경우 해결책을 제시해 줄 수 있을 것으로 기대된다. 기본적으로 VCSEL은 저 출력의 응용을 위해서 설계 제작되었다.

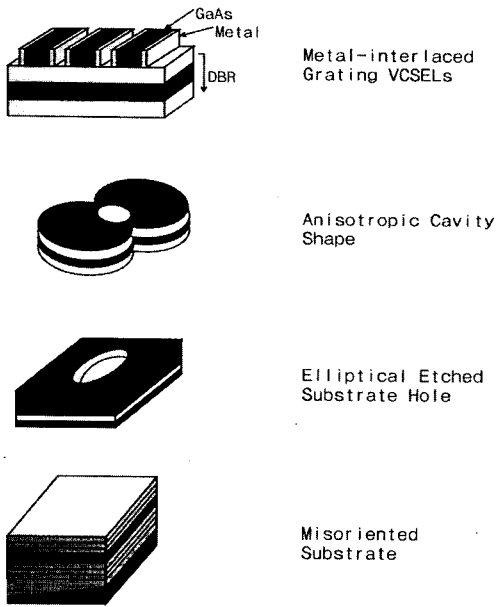
저 출력의 경우($<1\text{ mW}$)에는 발진 문턱 전류를 줄임으로서 에너지 전환 효율을 높일 수 있지만 이보다 더 큰 출력($>1\text{mW}$)이 필요한 경우에는 발진문턱 전류보다 미분 양자 효율이 더욱 중요한 변수가 된다. 기존의 반도체 레이저의 가장 강력한 장점이 바로 이런 경우의 고효율성과 레이저 펄핑을 간단하게 전류 주입으로 가능하다는 점이었으며, 최근에는 이 논리가 VCSEL의 경우에도 그대로 적용될 수 있을 정도로 특성이 향상되었다. 입력된 전기적 에너지의 50% 이상을 광출력으로 전환시킬 수 있다는 결과가 계속 보고되고 있다.

2) 편광 특성

VCSEL은 GaAs 기판의 (100) 평면상에 성장되기 때문에 구조적으로 대칭성을 지니고 있다. 따라서 VCSEL의 구조가 특별히 선호하는 편광 방향이 일반적으로 존재하지 않는다. 하지만 광 자기 기록소자 등 빛의 편광 상태가 중요한 의미를 가지는 응용의 경우에는 안정된 편광 상태를 가지는 VCSEL을 요구하게 된다. 이론적으로 레이저 공진기가 한쪽 방향의 편광 성분을 좋아하게 만들려면 VCSEL 공진기의 공간적인 대칭성을 깨뜨려 주어야만 한다. 이와 같은 의도를 가지고 그림 7에서 보듯이 여러 가지의 시도가 지금까지 이루어졌다. 기본적으로는 레이저 공진기의 이득에 비대칭성을 유도시키던지, 공진기 손실에 비대칭성을 유도하는 두 가지 중의 하나의 방법을 취하게 된다. 예를



(그림 6) 산화막 VCSEL의 전형적인 광출력 특성 곡선



〈그림 7〉 대표적인 편광 제어 방법

들어서, 레이저의 출력경에 격자 무늬를 집어넣어서 비등방성 광 손실을 유도하거나, 비등방성 양자선 등을 능동 매질로 사용하여 좋은 편광 선택성을 보고하고 있다. 레이저 출력경의 모양을 원형이 아닌 타원과 같은 형태를 도입하여 편광 제어를 얻어낼 수도 있다. 이들 중 가장 현실적이며 간단하다고 생각되는 방법은 기울어진 기판 위에 VCSEL을 성장시키는 방법이다. 일본에서는 (311) 기판 위에 VCSEL을 성장시켜서 우수한 편광 선택성을 얻었다고 보고하고 있으며, 본 실험실에서는 (100) 기판에서 2° 정도 기울어진 기판 위에 성장된 VCSEL로부터 아주 강한 편광 선택 특성을 얻어내었다. 하지만 아직 이들의 편광 선택에 대한 근본적이며 물리적인 이해는 아직 완벽하게 이루어지지 않고 있으며 지속적인 연구가 필요한 부분이라고 본다.

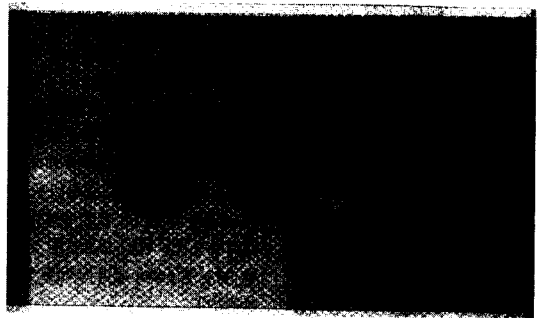
3) 고속 변조 특성

VCSEL의 응용 분야 중에서 현재 산업계에서 가장 활발하게 추진하고 있는 쪽이 바로 단거리 통신이나 광연결용 광원으로서의 VCSEL이다. 현

상에서 벌써 850 nm 파장에서의 제품들이 출시되어서 주목을 받고 있지만 미래에 있어서 850 nm에 머물러 있을 지는 미지수이다. 앞에서 언급한 바와 같이 1.3-1.5 μm의 광원들에 대한 연구가 활발한 것은 이런 광통신 관련 시장의 막대한 잠재력 때문이라고 볼 수 있다. VCSEL의 변조 특성에 대한 논문들을 보면 GHz급의 결과들이 쉽게 얻어짐을 보고하고 있으며, 수십 GHz의 변조 결과도 보고되고 있다. 아직까지는 이런 결과들이 주로 GaAs 계열의 VCSEL로부터 얻어지고 있으나, 통신용 장파장 VCSEL의 데이터도 보고되기 시작하고 있다. 변조 특성의 향상에 있어서의 기본적인 방향은 측면 발광 레이저 다이오드에서 알고 있는 방법들이 대부분 그대로 적용되리라 생각한다. 주요 응용 분야로는 Fiber-to-the-Home과 같은 저가의 수 GHz급의 광통신관련 분야에서 경쟁력을 가지리라 예상한다.

4) 공간 횡모드 특성

VCSEL의 레이저 공진기의 길이는 매질 내에서의 빛의 한 파장에 해당되는 정도이다. 따라서 일반적인 레이저 다이오드와는 달리 레이저의 종모드가 단 한 개밖에 존재할 수 없다. 하지만 이 기판 면에 평행한 면을 따라서 보면, 레이저 출력경의 직경이 수 μm 정도가 되므로 빛의 파장 단위로 생각하면 수 내지 수십 개의 파장이 들어갈 수 있다. 따라서, 이론적으로 여러 개의 횡모드가 존재 가능하다. 그래서 일반적으로 여러 개의 횡모드가 밀집되어 동시에 발진되고 있다. 하지만 그림 8



〈그림 8〉 VCSEL과 홀로그램을 이용한 CDP용 광 Pick-up module 의 사진

에 보이는 Compact Disk Player용 Optical Pick-up Module에 쓰이는 VCSEL과 같은 경우에는 빛을 아주 작게 직경 $1\mu m$ 정도로 집속을 시켜야 하며, 종모드 잡음 같은 것도 극소화할 필요가 있다. 이런 경우에는 가능하면 기본 횡모드 하나만이 존재하는 구조를 실현시키고 싶어한다. 여기서 기본적으로 취할 수 있는 방향은 우선 출력경의 직경을 줄이는 방법이다. 산화막 VCSEL의 경우에는 산화막에 의한 광도파로 효과 때문에 직경을 최소한 $2-3\mu m$ 이내로 제한하여야만 단일 횡모드를 얻을 수 있다. 양성자 주입형의 경우에는 직경이 $6\mu m$ 보다 작은 경우 단일 횡모드로 동작함을 관찰할 수 있다. 실제적인 응용에서는 레이저 출력경의 직경은 출력 빔의 분산 각도와 직결되어 있으므로 이를 함께 종합적으로 고려하여 최적의 광원의 형태를 결정하여야 할 것이다. 광연결과 같은 응용에서는 VCSEL의 직경을 $20-30\mu m$ 정도로 크게 잡아서 처음부터 여러 개의 횡모드가 동시에 발전할 수 있게 설계하여서 잡음 특성을 높이는 경우도 있다.

IV. 전 망

장차 광통신에의 응용이 활발해지면 각종의 경계면에서 반사되어 되돌아오는 빛에 의한 광 되먹임 효과가 VCSEL의 잡음 특성에 미치는 영향이 중요한 연구과제로 부상할 것으로 예상된다. 일반적으로 VCSEL의 출력경의 반사율이 $>99\%$ 로 아주 높기 때문에 광 되먹임의 효과가 그리 크지 않으리라 생각하기 쉽지만, 실질적인 실험 결과와 분석에 의하면 기존의 레이저 다이오드와 거의 비슷한 정도이다. 따라서 실질적인 광통신이나 광연결을 생각하고 있는 산업체나 연구원들의 연구가 계속되리라 본다. 그리고, VCSEL을 실제로 산업적으로 사용하려는 사람들에게 가장 필요한 기능 중의 하나가 바로 광출력을 직접 모니터할 수 있는 내장 광검출기이다. 즉, 광검출기를 VCSEL과 집적시켜서 광출력을 알 수 있게 해 달라는 것이

다. 여기에 대해서는 여러 가지의 제안들이 제시되었으나 아직까지 효과적이며 실제 응용 가능한 만족스러운 방법은 발표되지 않고 있다. 앞으로 VCSEL의 보다 넓은 잠재력을 최대한 활용시키기 위해서는 이에 대한 연구도 병행되어야 할 것으로 본다. CD용 광 Pick-up 모듈에서의 VCSEL이 채택되고 있는 가장 강력한 원인은 앞에서 언급한 기술적인 면보다도 Packaging에서의 편리함이 주된 이유였음은 참으로 흥미있다고 하겠다. 미래에서의 VCSEL의 응용도 생각지 못했던 부분에서 창출될 가능성도 있다.

새로운 VCSEL에 대한 연구는 통신용 파장에서 동작하는 VCSEL에 대한 것이 많은 관심을 끌 것으로 보이며, GaN를 이용한 청록색의 VCSEL에 대한 연구도 상당히 매력적으로 보인다. 현재 VCSEL 관련 연구 인력은 수년 전에 비하여 상당히 증가하였으며, 새로운 VCSEL 개발이나 VCSEL의 성능 향상을 연구하는 사람들보다, 더 많은 사람들이 VCSEL의 시스템 응용에 관심을 가지고 이에 대한 다양한 가능성을 제안하고 연구하고 있다. 문턱 전류가 수십 μA 정도까지 내려왔으므로 이제 2 차원의 간섭성 광원이 거의 현실로 다가온 것으로 생각할 수 있으며, 이러한 광원을 가지고 무엇을 할 것인가에 대해서는 실질적인 연구 주제가 조심스럽게 대두되고 있다. 광 연결 시스템이나 초보적인 광컴퓨터, 또는 신경망 조직의 광적 구현을 위한 2 차원 능동형 광 논리소자 등으로서의 가능성도 조금씩 발표되고 있다. VCSEL을 기본으로 하는 이런 새로운 기능성의 2 차원 광원의 응용은 각자의 상상력에 따라서 전혀 새로운 소자나 시스템을 창출할 수 있는 잠재력을 지니고 있다.

VCSEL에 대한 연구는 저 전력, 저 출력, 고효율의 2-차원 광원 행렬을 목표로 하여 시작되었다. 이러한 레이저가 궁극적으로 추구하는 것은 발전 문턱 전류가 0이 되는 반도체 레이저 다이오드이다. 문턱 전류가 없다면 레이저와 LED(Light Emitting Diode)의 구분이 모호해지며, 실제로 이런 광원은 레이저와 LED의 특성을 모두 지니게 되리라 기대한다. 이러한 궁극적인 광원을 실현시

키기 위해서는 지금까지 VCSEL에 적용하였던 것과는 전혀 다른 새로운 개념의 도입이 필요할 지도 모른다. 하지만 보다 작게 만들어야 하고, 어떤 식으로든지 빛을 능동적으로 제어하는 방식을 찾아야만 한다는 지금까지의 기본 방향은 지속적으로 유지되어야 할 것으로 본다.

참 고 문 헌

- [1] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara and Y. Suematsu, "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers", Jpn. J. Appl. Phys. vol. 18, p. 2329 (1979).
- [2] J. L. Jewell, A. Scherer, S. L. McCall, Y. H. Lee, S. J. Walker, J. P. Harbison and L. T. Florez, "Low-threshold electrically-pumped vertical cavity surface emitting microlasers", Electron. Lett. vol. 25, p. 1377 (1989).
- [3] Y. H. Lee, B. Tell, K. F. Brown-Gebeler, J. L. Jewell and J. Hove, "Top-surface-emitting GaAs four-quantum-well lasers emitting at $0.85 \mu\text{m}$ ", Electron. Lett. vol. 26, p. 710 (1990).
- [4] G. M. Yang, M. H. MacDougall and P. D. Dapkus, "Ultralow threshold current vertical-cavity surface-emitting lasers obtained with selective oxidation", Electron. Lett. vol. 31, p.886 (1995).
- [5] Y. H. Lee, B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, R. E. Leibenguth and V. D. Matterna, "Deep-red top-surface-emitting vertical cavity AlGaAs superlattice lasers at room temperature", IEEE Photon. Tech. Lett. vol. 3, p.108 (1991).
- [6] J. A. Lott and R. P. Schneider, "Electrically injected visible(639-661nm) vertical cavity surface emitting lasers", Electron. Lett. vol. 29, p.830 (1993).
- [7] D. I. Babic, J. Piprek, K. Streubel, R. P. Mirin, N. M. Margalit, D. E. Mars, J. E. Bowers and E. Hu, "Design and analysis of double-fused $1.55 \mu\text{m}$ vertical-cavity surface-emitting lasers", IEEE J. Quantum Electron. vol. 33, p.1369 (1997).
- [8] M. C. Larson, M. Kondow, T. Kitatami, K. Tamura, H. Inoue and K. Uomi, "GaInNAs-GaAs long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser diodes", IEEE Photon. Tech. Lett. vol. 10, p.188 (1998).
- [9] D. L. Huffaker, D. G. Deppe and K. Kumar, "Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers", Appl. Phys. Lett. vol. 65, p. 97 (1994).
- [10] K. D. Choquette, K. L. Lear, R. P. Schneider, K. M. Geib, J. J. Geib, J. J. Figiel and R. Hull, "Fabrication and performance of selectively oxidized vertical-cavity lasers", IEEE Photon. Tech. Lett. vol. 7, p. 1237 (1995).

저 자 소 개



李 用 熙

1955년 6월 3일생, 1977년 2월 서울대 물리학과 졸업, B.S, 1979년 2월 한국 과학기술원 물리학과 졸업, M.S, 1986년 12월 Univ. of Arizona, Ph.D in Optical Sciences, 1987년 6월~1991년 2월 AT & T Bell Labs. 연구원, 1991년 3월~현재 KAIST 물리학과 교수, <주관심 분야: 반도체 광학>