

## 표면광 마이크로레이저 및 능동형 광학 연산소자의 특성

이 용 희

한국과학기술원 물리학과

(1991년 12월 7일 받음)

### I. 서 론

수직공진 방식의 표면광 레이저는 반도체 레이저 다이오드의 발명과 거의 동시부터 세계의 많은 연구원들의 관심사가 되어온 분야이다. 이것은 표면광 레이저<sup>[1]</sup> 고유의 2차원적인 특징을 이용한 광원 행렬에의 가능성과 아주 적은 기초발진전류(threshold current)에의 기대 때문이라고 볼 수 있다. 표면광 레이저와 재래식의 레이저 다이오드의 개념적인 차이는 그림 1에서 보인 것과 같다. 이와 같은 표면광 레이저가 실현되면 기존의 레이저 다이오드와 비교하여 여러 가지의 장점이 있다. 우선 레이저 동작 매질의 용적이 아주 작으므로 미소 전류로서 레이저의 발진이 가능하다. 또한 기존의 VLSI의 제조공정과 같은 방법을 통해 고밀도의 2차원 표면광 마이크로 레이저의 행렬을 손쉽게 만들 수 있을 뿐 아니라, 실제 레이저 다이오드를 자르기 전에 웨이퍼에 있는 상태로 레이저 행렬의 성능을 테스트 핀을 통해서 측정할 수 있다. 그리고 원 대칭형의 레이저 빔을 쉽게 얻어낼 수 있으므로 광섬유에의 에너지 주입을 효율적으로 간단한 광학계를 써서 실현시킬 수 있다.

역사적으로는 1965년 에 Melngailis 등이 발표한 펄스형의 InSb 표면광 레이저 다이오드<sup>[2]</sup> 극저온(10 K)에서 발진된 것을 효시로 하여 1979년에는 일본의 Iga 교수가 77 K에서 발진하는 InGaAsP 표면광 레이저 다이오드<sup>[3]</sup>를 발표하였다. 그러나, 불행히도 표면광 레이저 다이오드에 관한 연구는 다른 팀들의 호응을 별로 얻지 못한 채로 Iga 그룹에 의해서만 최근까지 계속되어 왔던 실정이었다. 그러나, 최근 2년 정도 사이에 표면광 레이저에 대한 관심은 극도로 커져서 이제는 세계의 여러 연구소 및 학교에서 아주 적극적인 연구활동이 재개되었다. 이렇게 10년정도 연구가 침체되었던 주된 이유는 표면광 레이저의 만족스럽지 못한 특성들 때문이었다.

즉, 높은 기초발진 전류와 상온 연속발진 불능 등이 이들의 실용화 가능성을 의문시하게 만들었기 때문이다. 그러나, 최근의 GaAs 결정성장 기술의 완성은 고성능 표면광 레이저의 출현을 촉진시키는 직접적인 원인이 되었다. 우선적으로 몇 개의 그룹에서 독립적으로 광학적 펌핑에 의한 표면광 레이저의 발진<sup>[4-7]</sup>을 MBE(Molecular Beam Epitaxy)로 성장시킨 수직공진식의 GaAs/AlGaAs 발진기로부터 성공시켰다. 곧이어 1989년에 상온 연속발진의 InGaAs 표면광 마이크로 레이저 다이오드가 낮은 기초발진전류(~1 mA)로 성공함을 AT&T Bell Laboratories<sup>[8,9]</sup>에서 발표함과 발맞추어 InGaAs와<sup>[10,11]</sup> GaAs<sup>[12]</sup>의 표면광 마이크로 레이저는 반도체 레이저 학계와 산업체의 비상한 관심속에 활발한 연구가 빠른 속도로 진행되고 있는 실정이다.

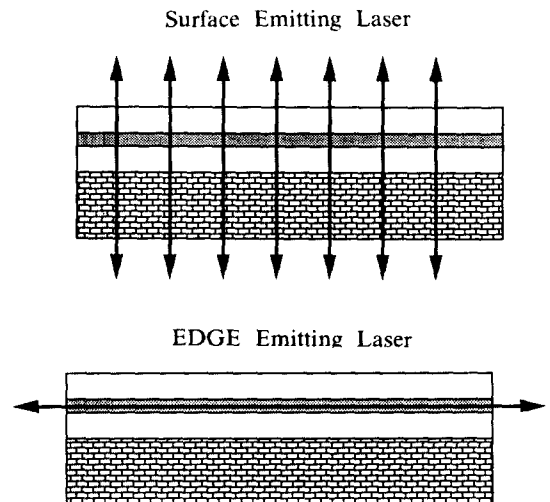


그림 1. 수직공진식의 표면광 레이저와 재래식의 레이저 다이오드의 개념적인 비교.

현재 연구되고 있는 수직공진 방식 표면광 레이저의 종류는 여러 가지가 있으나 제작 방식에 따른 분류를 하면, 순수 MBE형 표면광 레이저와 복합형 표면광 레이저로 구분된다. 순수 MBE형 표면광 레이저는 이름 그대로 레이저 전체구조(두 개의 레이저 반사경과 레이저 능동 매체)가 MBE(또는 MOCVD)에 의해서 완성되는 형태를 말하며, MBE 결정성장 후의 공정은 부식 또는 양성자 주입 그리고 전극 부착 등 아주 간단하다. 그리고, 제작된 표면광 레이저는 물리적으로 상당히 견고하다는 것도 장점으로 논의된다. 복합형의 표면광 레이저는<sup>[13,14]</sup> 레이저 반사경(1개 또는 2개 모두)이 결정성장이 끝난 후 별도로 진공증착에 의해서 GaAs/AlGaAs가 아닌 물질 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>, Ag, Au 등에 의해서 이루어지는 경우를 말한다. 이 경우 결정성장 후에 공정이 비교적 복잡하고, 견고성 등의 문제가 있으나 레이저에서의 전기저항 값을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 지금까지의 보고된 결과들로부터 보면 레이저 기초발전전류는 순수 MBE형이 우수하고 레이저 기초발전전압은 복합형이 우수하다고 판단된다. 실제 응용에 있어서의 가장 중요한 문제점 중의 하나가 레이저 동작시의 방열문제(2차원 행렬경우)라고 생각하면 이 두 가지의 문제는 모두 더욱 개선되어야 할 과제로 아직도 남아있는 실정이다. 또한, 표면광 레이저의 출력 방향에 따라서 상표면광 레이저와 하표면광 레이저로 구분이 된다. 이것은 역사적으로 볼때 89년도 Jewell 등에 의해서 구현된 제 1세대 표면광 레이저<sup>[8,9]</sup>가 InGaAs를 능동소자로 써서 파장 9,800Å의 출력광을 GaAs 기판을 통과하여 외부로 방출시켰기 때문이다. 이 경우 GaAs의 밴드간격인 8,700Å 보다 짧은 파장영역은 GaAs 기판에서 모두 흡수가 됨으로 제작이 불가능하다. 상표면광 레이저는<sup>[15,16]</sup> 레이저 출력이 GaAs 기판을 통과할 필요가 없이 결정성장층 위쪽으로 방출됨으로 넓은 파장대역에서<sup>[17]</sup> 설계 제작될 수 있다.

본 논문에서는 이 중에서 특히 고출력, 고효율의 순수 MBE형의 수직공진식 상표면광 레이저<sup>[18]</sup>(top-surface-emitting vertical cavity laser)의 최근 실험결과들을 주로 언급할 예정이며 이를 이용한 능동형 광학연산 소자의 광학 컴퓨터에의 응용 등을 논의하겠다.

## II. 표면광 마이크로 레이저의 구조 및 제작방법

표면광 마이크로 레이저는 기본적으로 수직 pin 다이오드의 구조를 가지며 동시에 수직공진형의 레이저 발진

구조를 취하고 있다. 그리고, 전류는 상부와 하부의 레이저 반사경을 통해서 레이저 능동매체(laser active medium)로 전달된다. 본 논문에서 취급하는 표면광 마이크로 레이저의 전체 구조는 모두 MBE에 의해서 성장되었다. 일반적인 레이저와 같이 표면광 마이크로 레이저도 두 개의 레이저 반사경과 중앙의 레이저 능동매체로 구분된다. 우선 이 중에서 레이저 능동매체 부분은 빛을 발생시키는 부분으로서 중요한 의미를 지니고 있다. 본 논문에서의 표면광 마이크로 레이저의 경우 레이저 능동매체의 두께는 100Å짜리의 GaAs 양자샘(quantum well) 4개를 가져서 총 두께는 400Å이다(그림 2 참조). 실질적으로 4개의 100Å GaAs 양자샘이 3개의 70Å Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As의 양자벽에 의해 분리되어 있으며 8,500Å에서 발광하도록 설계되어 있다. 그리고, 이 GaAs 양자샘들은 Fabry-Perot 공진기 중앙의 최대 광파 진폭 위치에 놓여서 레이저 발진 모드에 효율적으로 기여할 수 있게 하였다. 이 4개의 GaAs 양자샘으로부터 얻어낼 수 있는 레이저 최대 이득(maximum gain per pass)은 0.01 정도이다. 따라서, 아래-위쪽 반사경의 반사율도 최소 99% 이상이 되어야 한다. 앞서 언급한 바와 같은 이 순수 MBE 레이저 구조는 n<sup>+</sup> GaAs 기판위에 성장되었다. 우선 Si 도핑된 아래쪽 반사경은 27.5쌍의 GaAs와 Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>As의 λ/4 층으로 8,500Å에서 설계되었다. 이 때의 반사율은 계산상으로 >99.9%가 되게 하였다. 그리고 Be도핑(p-type)된 위쪽 반사경(레이저 출력경)은 20쌍의 Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>As/Al<sub>0.58</sub>Ga<sub>0.42</sub>As/AlAs의 λ/4 층으로 구성되어 있다. Be 도핑의 정도는 5×10<sup>18</sup>~2×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>가 되

CROSS-SECTIONAL TEM MICROGRAPH OF AN 850nm VCSEL

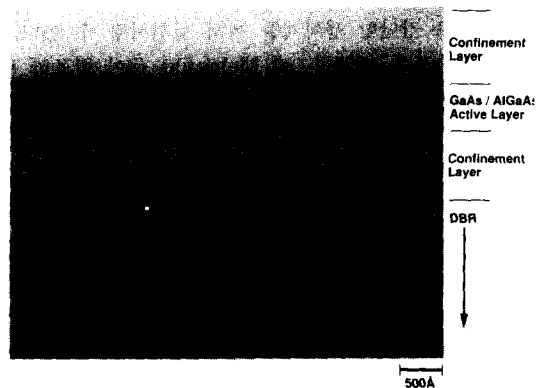


그림 2. 표면광 마이크로 레이저 중심부에 위치한 GaAs 양자샘의 투과형 전자현미경 사진.

게 하였으며 위쪽으로 갈수록 도핑밀도가 커지도록 조정하였다. 이 때의 반사율은 99.6%가 되도록 설계하였다. 그리고, 이 두 개의 레이저 반사경 사이에는 앞서 말한 GaAs 양자섀프와 이를 양쪽으로부터 둘러싼  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $x=0.6 \rightarrow 0.3$ )에 의해서 구성되어 있다. 이 레이저 반사경 사이에 놓은 물질들의 전체 광학적 두께(total optical thickness)가 레이저 발진 파장을 결정하는데에 중요한 역할을 하며, 이 전체광학적 두께를 발진 파장과 같은  $8,500\text{\AA}$ 으로 하였다. 이 전체적인 레이저의 구조는 그림 3에 나타나 있다.

Be 도핑된 위쪽 반사경 구성에서의  $Al_{0.16}Ga_{0.84}As/Al_{0.58}Ga_{0.42}As/AlAs$  중 중간의  $100\text{\AA}$  두께의  $Al_{0.58}Ga_{0.42}As$  층은 p 도핑된 AlGaAs/AlAs의 경계면에서의 전기저항을 줄이기 위해서 삽입되었다(그림 4 참조). 실제로 이 중간층의 도입은<sup>[19, 20]</sup> p형 반사경의 저항을 100배 이상 줄여서 레이저의 발진을 가능하게 만드는 직접적인 동기가 되었다. 그리고 가장 효율적이며 제작이 용이한 중간층의 활용은 앞으로도 이러한 순수 MBE형의 표면광 마이크로레이저의 성능 극대화에 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, 추가 연구가 요망되는 분야이기도 하다.

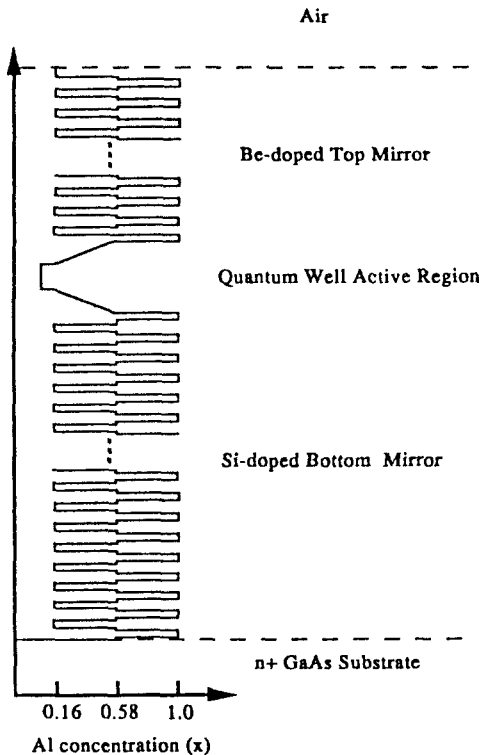


그림 3. 표면광 마이크로 레이저의 수직결정성장 구조.

이와 같이 성장된 표면광 레이저의 반사 특성은 그림 5에서 보는 바와 같이 고반사율의 파장대역이  $8,000 \sim 8,900\text{\AA}$  사이가 됨을 알 수가 있다. 그러나 실제에 있어서 발진조건을 만족시키는 파장대역은 이 중에서  $8,300 \sim 8,700\text{\AA}$  정도에 불과하다. 따라서, MBE에 의한 결정성장에  $\lambda/4$  층의 두께의 정확성이 결정적인 문제가 된다. 즉, 설계된 값에서의 두께 허용오차 범위는 1% 이하가 되어야함은 측정치를 통해서 알 수 있다. 물론 결정면의 성질 등도 중요한 요소임은 강조할 필요가 없다. 그림 5에서의 점선은 표면광 레이저 구조 중에서 위쪽 반사경만을 부식시켜 내었을 때의 반사율을 측정했던 것인데

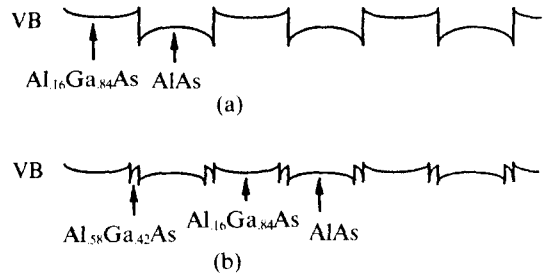


그림 4. P형 반사경에서의 저항치 감소를 위한  $Al_{0.58}Ga_{0.42}As$  층의 도입효과를 설명하는 GaAs/AlGaAs 경계면의 band diagram의 비교. 그림 (b)의 경우 경계면에서의 전위차가 그림 (a)의 경우 보다 훨씬 낮으므로 정공의 흐름이 용이해진다.

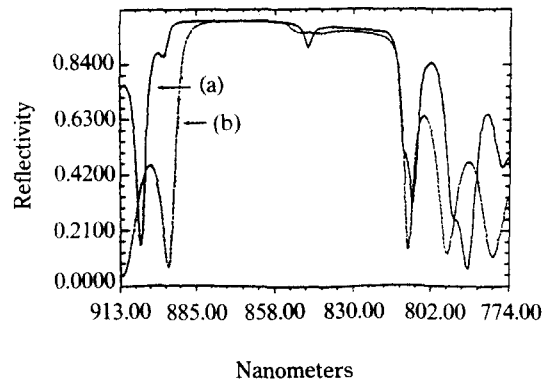


그림 5. MBE로 결정성장된 직후의 표면광 마이크로레이저의 반사곡선(a)과 위쪽 반사경만은 화학 부식 시켰을 때의 반사곡선(b). 그림 (b)에서는  $100\text{\AA}$  GaAs 양자섀프의 밴드간격 근처에서 나타나는 두 가지 exciton의 흡수와 아랫쪽 반사경만의 반사곡선을 관찰할 수 있다.

양자샘에 의한 흡수와 아래쪽 반사경의 반사곡선을 복합적으로 나타내고 있다.

본 논문에서의 표면광 마이크로 레이저는 제 1세대의 InGaAs 표면광 레이저와는 달리 그림 6에서 보는 바와 같이 레이저의 출력이 GaAs 웨이퍼를 통하지 않고 위쪽으로 방출됨을 특징으로 하고 있다. 따라서, 출력파장의 선택은 AlGaAs계가 허용하는 넓은 파장 대역을 용도에 따라서 조절할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그림 6에서 보는 바와 같은 입체적인 전류 공급은 고에너지(300~350 keV)의 양성자를 MBE로 기른 표면광 레이저 웨이퍼에 주입시켜서 얻어내었다. 그림 7에서 컴퓨터 시뮬레이션에<sup>[21]</sup> 의한 결정성 파괴의 정도를 보여주고 있다. 300 keV의 양성자의 경우 GaAs 표면에서 약 2.5  $\mu\text{m}$ 의 깊이에 최대 파괴가 있음을 볼 수 있으며 1  $\mu\text{m}$ 보다 얇은 깊이의 결정층은 비교적 잘 보존되어 있음을 관찰할 수 있다. 실제의 전기저항은 결정성 파괴의 정도에 비례해서 증가함은 잘 알려져 있는 사실이며, 따라서 양성자의 에너지를 조절하여 그림 6에서와 같이 중앙 진한 부분은 전기저항이 아주 크고 윗부분은 전

기저항이 상대적으로 아주 작게(길내기 형으로) 조절할 수가 있다. 뿐만 아니라 450~500°C에서 30초 정도 열처리를 하면 윗쪽의 조금 파괴된 결정은 거의 원상태로 복원시킬 수가 있어서 그림 6에서 보는 것과 같은 수직저항 분포를 실현시킬 수가 있다. 제작방법에 있어서는 우선 6  $\mu\text{m}$  두께의 photoresist(PR)를 써서 원하는 형태를 만들어낸다. 이 6  $\mu\text{m}$ 의 두꺼운 PR은 양성자 폭격으로부터 레이저 발진이 되는 결정부분만을 선택적으로 보호하는 역할을 한다.

실제 제작에 있어서는 다층의 보호막을 제작하였는데, 우선적으로 0.3  $\mu\text{m}$ 의 SiO<sub>2</sub> 박막을 레이저 웨이퍼 위에 증착을 시킨 후 6  $\mu\text{m}$ 의 PR을 입힌 후 200°C에서 1시간 정도 구워낸다. 그런 후, 그 위에 0.1  $\mu\text{m}$ 의 Cr 박막을 다시 입힌다. 이 Cr 박막은 추후 이온부식(reactive ion etching)에서의 보호막으로 사용된다. 마지막으로 1  $\mu\text{m}$  두께의 표준형 PR을 입힌 후, 표준형 PR 위에 원하는 모양의 레이저를 전자빔으로 제작된 마스크를 사용하여 UV로 노출시켜서 현상시킨다. 설계된 레이저는 원형으로서 직경 10, 15, 20, 30  $\mu\text{m}$ 의 4가지의 크기가 있다. 레이저의 직경이 10  $\mu\text{m}$  보다 작으면 본 논문에서 다루는 형태의 표면광 레이저와 같은 방식의 경우(gain-guided laser) 회절에 의한 손실이 급격히 증가됨을 계산과 실험을 통해서 확인하였으므로 10  $\mu\text{m}$  보다 소형의 표면광 레이저는 설계에서 제외시켰다. 앞서의 표준형 PR의 현상과정이 끝나면 0.1  $\mu\text{m}$ 의 Cr 박막이 나타나게 되는데

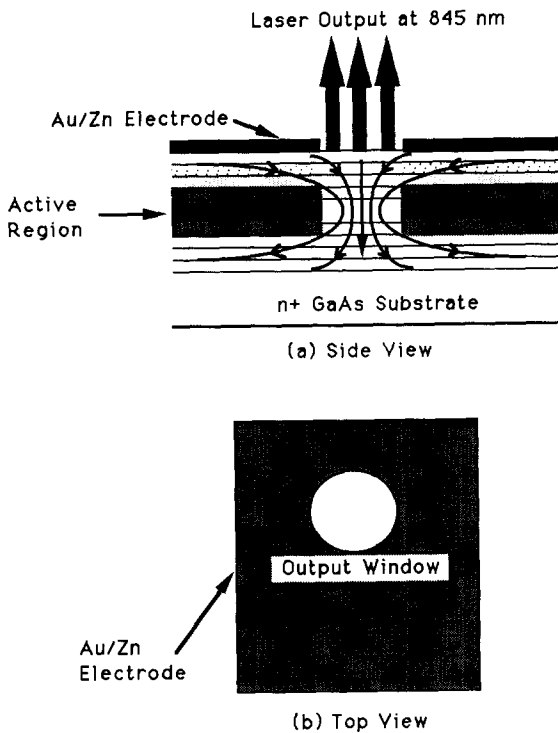


그림 6. 표면광 마이크로 레이저의 상표면 레이저 방출을 수직형의 깔대기 모양의 공간저항 분포를 나타내는 개념도 (a) 및 실제의 전극모양 (b).

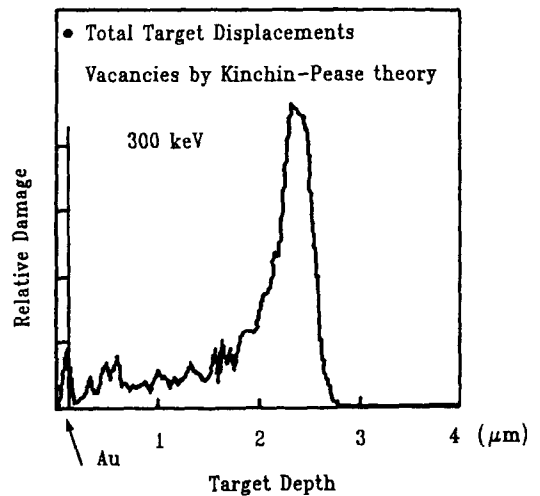


그림 7. TRIM 프로그램을 사용하여 계산한 결정성 파괴정도의 수직분포 그림. 입사된 양성자의 에너지는 300 keV이다.

이것은 화학 부식에 비해서 제거시킨다. 그런 후 두꺼운 PR은 산소이온 부식방식으로 깎아내었다. 마지막으로 SiO<sub>2</sub>층은 HF를 사용하여 또한 쉽게 제거된다. 전극용의 Au-Zn 박막은 이렇게 처리된 웨이퍼 위에 진공증착시켰다. 실험에 사용된 양성자의 에너지는 300 keV였고 주입밀도는 2.5×10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup>로 하였다. 이 때 실제로 양성자 방패용으로 쓰인 것은 Cr 박막, 6 μm PR과 SiO<sub>2</sub>의 3층 구조를 가진다. 양성자 폭격이 끝난 후 시료는 PR 제거액을 사용하여 벗겨내면 그림 6에서 보는 것과 같은 형태를 얻어내게 된다. 또한 n<sup>+</sup> GaAs의 밑판에 Au-Su의 도름을 하여 추후 음극으로 사용한다. 마지막으로 이렇게 하여 준비된 표면광 레이저 웨이퍼를 450~500°C에서 30초 정도 열처리를 함으로써 제작과정이 완료된다. 이 열처리 과정에서 양성자 폭격에 의하여 파괴된 결정의 일부가 복원되어서 상부 1 μm 정도 두께의 GaAs/AlGaAs의 저항값이 현저히 감소될 뿐 아니라, Au-Zn 전극의 ohmic contact도 동시에 이루어진다. 그리고, 실험에 들어가기 직전에 표면광 레이저 웨이퍼를 3×3 mm<sup>2</sup> 정도로 잘라서 구리판 위에 In을 써서 붙인다.

### III. 표면광 마이크로 레이저의 동작 특성

표면광 마이크로 레이저의 동작 특성 중 가장 대표적인 L-I와 V-I 곡선이 제작된 4가지의 크기에 대하여 그림 8에 나타나 있다. 이 특성은 모두 상온 연속동작의 경우를 나타내고 있다. 우선 상온 연속동작에서의 최대 출력은 >3 mW로서(30 m 직경) 지금까지 보고된 표면광 레이저들 중에서 최대치를 기록하고 있으며, 모든 크기

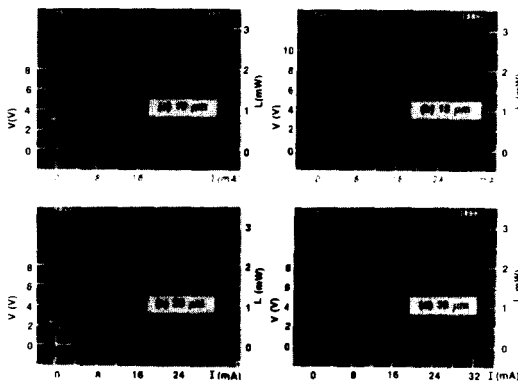


그림 8. 4가지 크기의 표면광 마이크로 레이저의 전형적인 상온 연속 동작 특성.

에서 1 mW 이상의 안정된 출력을 보여준다. 그리고, 기초발진전류는 크기에 따라 4~8 mA 정도가 되며 기초발진전압은 모든 경우 약 4 V 정도가 됨을 볼 수 있다. 4 V의 기초발진전압은 재래식의 레이저 다이오드의 1.5 V에 비해 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 앞서 p-형의 반사경내의 AlAs-AlGaAs 경계면에서의 정공에 의한 전기저항값이 주된 이유가 되고 있다. 상대적으로 봐서 n형 반사경내의 AlAs-AlGaAs 경계면에서의 전자에 의한 저항값은 p형의 경우보다는 아주 작다. 이것은 반도체 밴드에서의 전자의 질량이 정공의 질량보다 아주 작기 때문에 전자는 AlAs-AlGaAs 경계면에 생성되는 전위차를(그림 4 참조) 잘 뛰어 넘을 수가 있어서 상대적으로 쉽게 전류가 흐를 수 있기 때문이다. 그림 9에서는 직경 10 μm의 표면광 마이크로 레이저의 출력 특성을 자세히 보여주고 있는데, 4.2 mA에서 5.2 mA 사이를 보면 전류 1 mA 증가시켰을 때 레이저 출력이 1 mW정도 변화함을 볼 수 있다. 이것은 1 mW/mA로서 순간양자효율(differential quantum efficiency) 70%에 해당된다. 이것은 기존의 표면광 레이저들 중 가장 높은 순간양자효율치를 기록하고 있다.

그림 9에서 L-I 곡선 중 4.6 mA 부근에서 보면 곡선의 단절이 관찰된다. 이것은 레이저 발진 횡모드의 변이를 나타내고 있다. 모든 표면광 레이저의 경우 레이저발진 시초에는 기본 횡모드인 원대칭형 Gaussian 모드에서 TEM<sub>01</sub>이 도너츠형으로 천이가 L-I 곡선상이 나타나고 있다. 추후 새로운 고차의 횡모드가 발진되는 경우에도 L-I 곡선식의 흠집으로 일반적으로 나타난다. 그리고 15, 20, 30 μm 경우의 그림 8에서도 자세히 관찰하면 더욱

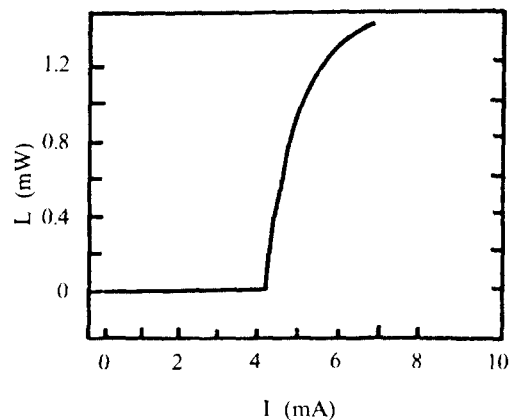


그림 9. 고효율의 직경 10 μm 표면광 마이크로 레이저의 상온 연속 동작 특성.

다양한 고차 횡모드의 발생을 볼 수 있다. 레이저 편광은 선편광을 나타내고 있으며, 레이저 발진 초기에는 단일 선편광을 나타내던 것이 고차 횡모드들이 여기되면서 수직인 두 개의 선편광을 동시에 나타낸다. 이 때 GaAs 결정의 전단면과 평행한 두 가지의 수직 선편광이 레이저의 고유 선편광이 됨을 관찰하였으며 이 두 개의 수직 선편광의 모드는 서로 보완관계를 가지면서 고차 횡모드로 발진함을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 고차 횡모드의 발진은 주로 p형 반사경내의 높은 저항에 의한 불균일 발열에 기인한 열렌즈 효과가 기본 원인으로 추측되고 있다. 이와 같은 고차 횡모드의 출현과 두 가지의 수직 선편광의 조절문제는 실제 응용분야에 따라서 결정적인 역할을 하는 경우도 있다. 표면광 레이저의 모양과 크기 등의 구조적인 변환을 통한 고차 횡모드와 선편광의 제어문제에 대한 연구는 현재 진행되고 있는 중요한 문제들 중의 하나라고 할 수 있다.

본 논문에서의 표면광 마이크로 레이저는 상온 8,500 Å에서 동작되도록 설계되었으며 실제의 발진 파장은 GaAs 웨이퍼내의 기하학적인 위치와 동작 전류 등에 따라 조금씩의 차이를 보이나, 전반적으로 8,400~8,500 Å 사이에 위치하여 설계치보다는 조금 짧은 파장 영역에서 발진함을 관찰하였다. 일반적으로 레이저 동작 전류를 증가시키에 따라서 레이저의 동작 온도가 올라가면 레이저 발진 파장은 수십 Å 정도 증가됨을 볼 수가 있다. 이것은 온도 상승에 따른 굴절률의 증가 및 GaAs의 밴드에너지의 감소 등으로 잘 설명이 되는 부분이나 재래식의 레이저 다이오드에 비해서는 훨씬 레이저 동작 전류 증가의 효과가 크게 나타남을 특징으로 한다. 앞서 언급한 p형 레이저 반사경내의 높은 저항치가 주된 이유이다.

표면광 레이저의 선폭은 최소치가 50 MHz(0.0012Å)이다. 이것은 선폭이 6 MHz인 Hitachi 레이저 다이오드와 광학적인 혼합방식(Optical Heterodyne Detectron)으로 측정된 값이다.<sup>[22]</sup> 이 값은 단일 기본 횡모드만이 발진된 경우의 값이며 고차의 횡모드가 발진될 경우는 새로운 파장이 독립적인 위치에서 나타남을 관찰하였다. 선폭 측정실험 중 관찰한 재미있는 현상 중의 하나가 빛의 반사에 의한 되먹임(optical feedback) 효과이다. 단순하게 우선 생각하면 표면광 레이저의 경우 출력경의 반사율이 99.6%로서 레이저 공진기속으로 재주입되는 반사광의 세기는 아주 미약하므로(0.4% 이하) 재래식의 레이저 다이오드(반사율 30%, 투과율 70%)에 비해서 되먹임에 의한 공진파장 및 위상의 변화는 미세하리라 추측할 수 있다. 그러나, 실제로 나타난 현상은 주사형

Fabry-Perot 분광기로 분석한 결과 재래식의 레이저 다이오드와 비슷한 정도임이 관찰되었다. 이것은 표면광 레이저의 경우 레이저 공진기의 광학적 길이가 1 μm 정도이고 재래식의 레이저 다이오드는 200~300 μm 정도로서 약 200~300배 정도의 차이가 있다. 레이저 출력경을 통한 투과율의 비율이 또한 비슷한 정도로 70/0.4 ≈ 180가 되는 것을 보면 기본적인 설명이 된다. 이론적으로 반사광의 되먹임이 레이저발진 모드의 변이에 미치는 효과의 강도는 기본적으로 투과율에 비례하고 레이저 공진기의 광학적 길이에 반비례하게 나타난다. 따라서, 재래식의 레이저 다이오드의 광학적 되먹임에서 나타나던 현상이<sup>[23]</sup> 비슷한 정도로 특징적으로 아주 비슷하게 전개됨을 관찰할 수 있었다.

표면광 마이크로 레이저의 수명에 대한 실험치는 아직 충분한 양이 얻어지지 않았으므로 지금까지의 결과만을 종합해서 고찰하여 보자. 실험환경은 온도 40°C의 항온실속에서 연속 발진시켜서 출력 0.8 mW를 유지하게 되면서 이를 만족시키는 레이저 발진 전류를 장시간 기록하여서 상온에서의 수명을 유추하는 방법을 사용하였다. 측정된 몇 개의 경우 상온에서의 수명은 10,000~20,000시간 정도로 일차 계산되었다. 이 수명은 현재 상용으로 팔리는 레이저 다이오드에는 아직 훨씬 못미치는 실정이다. 통계적으로 의미있는 데이터를 얻어 내려면 보다 많은 표면광 마이크로 레이저를 측정해야 함은 물론이고, 보다 안정된 전극부착 등을 통해서 훨씬 개선될 수 있으리라 기대된다. 실제로 99% 이상되는 고반사율의 레이저 출력경을 사용하였으므로 레이저 공진기 중심에서의 레이저의 세기는 재래식의 레이저 다이오드 보다 훨씬 높으리라 생각되지만, 표면광 마이크로 레이저의 경우에는 레이저 발진 면적이 75 μm<sup>2</sup> 이상으로 재래식 레이저의 레이저 발진 면적인 0.5 μm<sup>2</sup> 보다 100배 이상 크므로, 결과적으로 비슷한 수준의 광도가 된다. 뿐만 아니라, 레이저 능동 소자가 AlGaAs 결정 내부에 파묻혀 있으므로 외부로부터의 산화에 의한 레이저 능률 감소 등의 나쁜 영향으로부터 잘 보호되어 있다. 따라서, 본 논문에서의 표면광 마이크로 레이저의 수명은 기존의 레이저 다이오드의 수명에 버금가거나 오히려 우수한 값을 가질 수 있을 것으로 예측된다.

#### IV. 능동형 광학연산 소자

지금까지 알아본 표면광 마이크로 레이저는 고유의 평면성을 사용하여 2차원의 광원 행렬제작에 아주 적격이라 하겠으며, 이는 광스위치 소자나 광컴퓨터에의 응

용에 필수적인 요구 품목이라 하겠다. 이에 덧붙여서 표면광 마이크로 레이저를 잘 변형시키면 능동형의 광학연산 소자의 실현이 가능하게 되며, 이는 광컴퓨터의 필수 소자로 또는 신경망 컴퓨터에서의 능동형 신경소자로서 중요한 역할을 하게 된다. 본 절에서의 능동형 광학연산 소자는<sup>[24]</sup> 그림 10에서 보는 것과 같이 표면광 마이크로 레이저와 광학 트랜지스터(Heterojunction Photo-Transistor, HPT)를 결합시킨 것이다. 지금까지 HPT의 성능에 관한 연구는 많이 진행되어 온 바 있으므로 이의 기본적인 특성은 잘 알려져 있다. 우리가 궁극적으로 계획하는 것은 수직구조의 단결정형의 광학연산 소자로서 HPT와 표면광 마이크로 레이저를 결정성장 과정에서 수직 결합시키고자 하는 것이다. 개념적으로는 입사광이 HPT의 광검출 부분에서 흡수되면 광전류가 발생되는데, 이것을 증폭시켜서 기초발진전류 보다 크게 되는 경우 표면광 마이크로 레이저를 발진시키고자 한다. 이러한 광학연산 소자는 독립적인 비선형의 문턱형 광증폭기(thresholding optical amplifier)의 역할을 하게 된다.

이와 같은 광-전류-광변환에 의해 광증폭은 외부의

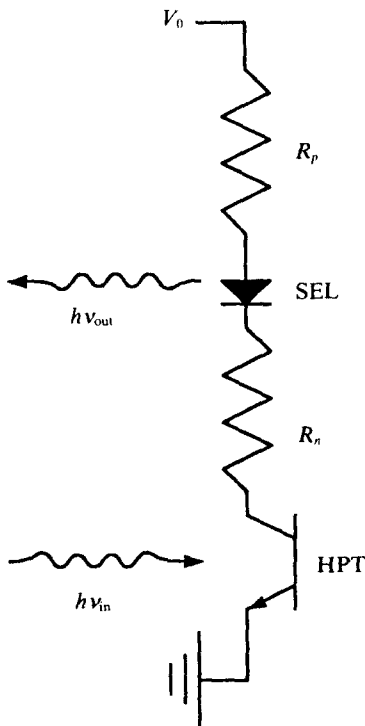


그림 10. 능동형 광학연산 소자의 전기적인 개념도.

광학적 되먹임에 의한 레이저 발진조건 변화의 가능성을 극대화 시키게 된다. 또한, HPT는 기본적으로 GaAs 광센서로서 넓은 파장 대역( $\lambda < 8,700\text{\AA}$ )을 가지므로 입사광의 파장 변화에 관계없이 안정되게 동작할 수 있게 된다. 이것은 기존의 SEED(Self Electrooptic Effect Device)가 수동형의 광변조기이며 동시에 온도 변화에 아주 민감하다는 것과 비교할 때 큰 강점으로 등장한다. 즉, 이러한 능동형의 광학연산 소자를 실제의 광컴퓨터나 광교환기 등에 여러단 사용할 때 개개의 광학연산 소자에서의 표면광 마이크로 레이저의 발진 파장이 정확하게 일치하지 않더라도 동작 특성상의 변화는 아주 작다는 것을 의미한다. 기본의 동작 특성을 규정하여 놓으면 서로 독립적으로 서로 다른 기계나 다른 회사에서 제작된 능동형 광학연산 소자도 같은 광학 시스템에서 문제없이 사용할 수 있게 됨을 말한다. 실험에서는 능동형 광학연산 소자 실현의 첫단계로서 우선 앞절에서의 표면상 마이크로 레이저와 HPT를 전선으로 연결하여 복합소자로서의 가능성을 우선 타진해 보았다. 사용된 HPT는 npn 형으로서 MBE로 성장되었다. 구조적으로  $3,000\text{\AA}$ 의 n형  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  ( $n=1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ) 에미터,  $2,350\text{\AA}$ 의 p형 GaAs ( $p=1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) 베이스,  $3,000\text{\AA}$ 의 n형 GaAs ( $n=1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ) 컬렉터와  $1,670\text{\AA}$ 의 GaAs ( $n=1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) 2차 컬렉터(sub-collector)로 되어있다. 이 구조에서 넓은 밴드 간격의  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  에미터는 베이스에서 에미터로 흘러 들어오는 정공을 효과적으로 제지시켜서 HPT의 전류 증폭률을 증가시키는데 기여한다. 앞서와 같이 양성자 폭격으로 개개의 HPT를 전기적으로 절연시켰으며 입사광 센서의 크기는 직경 15

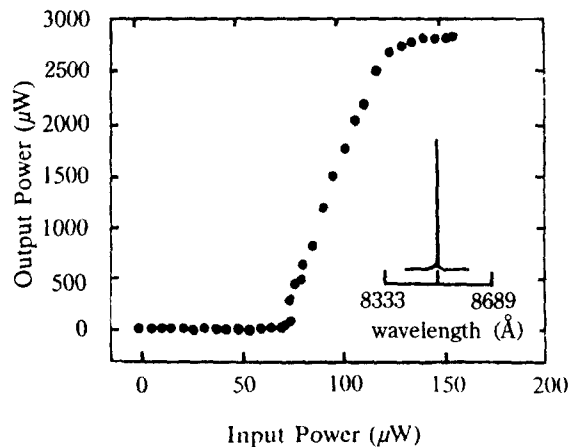


그림 11. 능동형 광학연산 소자의 동작 특성.

$\mu\text{m}$ 의 원형으로 하였고, 하나의 HPT의 크기는  $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 가 되게 하였다.

이와 같이 제작된 HPT를 common-emitter, floating-base 방식으로 동작시켰을 경우  $8,000\text{\AA}$ 에서  $120 \mu\text{W}$ 의 광이 흡수되면( $176 \mu\text{W}$ 입사)  $10 \text{mA}$ 의 전류가 흐름을 측정하였다. 그림 11에서 보면 직경  $15 \mu\text{m}$ 인 표면광 마이크로 레이저의 출력이 HPT 입사광의 세기에 따라 나타나 있다. 이 곡선은 공급 전압치에 따라 변화한다. 이 능동형 광학연산 소자는 높은 광학적 이득( $>20$ )과 높은 순간 광학적 이득(differential optical gain  $>200$ )을 가진다.  $40 \mu\text{W}$ 의 입사광이 흡수되었을 때 표면광 마이크로 레이저가 발진되기 시작하여 이 값이  $75 \mu\text{W}$ 가 되면 출력이  $75 \mu\text{W}$ 가 되어서 입력과 출력이 같아진다.  $140 \mu\text{W}$  이상이 HPT에 흡수되면 출력광의 세기는  $2.8 \text{mW}$ 에서 포화된다. 능동형 광학연산 소자로서 중요성질 중의 하나인 ON/OFF 비율은 거의 무한대로서 추후 광학 시스템 구성을 매우 용이하게 한다. 그리고  $6,800 \sim 8,700\text{\AA}$ 의 넓은 파장대역의 입사광을 사용하여도 비슷한 동작 특성을 가짐도 확인하였다. 여기서  $8,500 \sim 8,700\text{\AA}$ 의 입사 파장은 표면광 마이크로 레이저의 출력 파장인  $8,500\text{\AA}$ 보다도 더 긴 파장임을 주시할 필요가 있다. 또 하나의 흥미로운 시험은 표면광 마이크로 레이저의 출력의 일부를 다시 이 능동형 광학연산 소자의 HPT쪽으로 재입사를 시키면 이 소자를 순환 동작시킬 수 있다(cascadability)는 것이다. 이 성질은 추후 광학연산 시스템의 구현에 있어서는 필수적인 요구사항 중의 하나이다.

장차 표면광 마이크로 레이저와 HPT를 MBE를 사용하여 수직 단결정으로 성장시켰을 경우 본 논문에서 관찰한 것과 비교하여 어떠한 성능을 가지며 제작과정에서 어떠한 어려움이 있을 것인지는 예상하기 힘들다. 그러나, 현재 이와 같은 집적형의 능동형 광학연산 소자의 실현을 위한 연구는 본 저자를 비롯한 여러 연구소에서 진행되고 있다.

## V. 결 론

중성자 주입방법을 통하여 설계 제작된 상표면광 마이크로 레이저는 고효율( $>3 \text{mW}$ , cw), 고효율( $>1 \text{nW}/\text{mA}$ )로서 상온에서 안정된 동작 특성을 보여주었다. 레이저 기초발전 전류( $\sim 4 \text{mA}$ )와 전압( $\sim 4 \text{V}$ ) 등은 설계의 개선을 통하여 좀 더 나아지리라 기대되며, 횡모드 발전의 제어 및 편광 방향의 조절 등도 실질적인 응용면에서 볼 때는 매우 중요한 분야이므로 추가 연구가 필요한 분야이다.

표면광 마이크로 레이저와 HPT를 전선으로 연결시켜서 동작시킨 능동형 광학연산 소자는 현재로는 초보적인 단계이지만 상당히 고무적인 특성을 보여주었다. 현재 연구 중인 수직 단결정형 능동형 광학연산 소자 행렬이 실현되면 광컴퓨터나 광교환기 등의 응용 가능성이 다양할 것으로 기대된다. 본 논문의 제작방법에서 설명한 바와 같이 양성자 주입방법에 의한 표면광 마이크로 레이저의 제작방법은 다른 방법들에 비하여 간단하기 때문에 MBE 또는 MOCVD의 GaAs/AlGaAs 결정성장 기술만 완성되면 국내 제작도 그리 어렵지 않으리라 생각된다. 또한 구조 설명에서 밝힌 바와 같이 레이저 발진 파장은 약  $7,500 \sim 10,000\text{\AA}$  정도로 넓은 파장대역이 되며, 이 중에서도  $7,700 \sim 7,800\text{\AA}$ 의 영역은 현재 레이저 프린터나 레이저 FAX기 등의 광원으로 사용되는 레이저 다이오드의 파장대역이다. 1차원의 표면광 마이크로 레이저 행렬은 레이저 프린터에서의 차세대 광원으로서의 응용이 기대되고 있으며 산업계의 관심을 끌고 있는 분야이기도 하다.

## 감사의 글

본 논문은 저자가 미국의 AT&T Bell Laboratories에 근무할 때 수행한 내용들이 주를 이루고 있으며, B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, J. L. Jewell, R. E. Leibenguth, S. L. McCall, A. Scherer, L. T. Florez, J. P. Harbison, Y. C. Chung, J. C. Jeong 등과의 공동 연구 및 협조로 가능하게 되었다. 이 모든 분들께 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 표면광 레이저는 수직공진 방식과 수평공진 방식의 두 가지로 크게 구분되는데 주로 고효율 레이저 다이오드를 목표로 한 수평공진 방식의 레이저 다이오드는  $45^\circ$ 의 반사경이나 2차 grating을 사용하여 레이저의 발진 방향과 수직한 방향으로 레이저가 방출된다. 본 논문에서는 수직공진 방식만을 취급한다.
- [2] I. Melngailis, Appl. Phys. Lett. **6**, 59 (1965).
- [3] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara and Y. Suematsu, Appl. Phys. Lett. **18**, 2329 (1979).
- [4] J. L. Jewell, K. F. Huang, K. Tai, Y. H. Lee, R. J. Fisher, S. L. McCall and A. Cho, Appl. Phys. Lett. **46**, 424 (1989).
- [5] J. L. Jewell, S. L. McCall, Y. H. Lee, A. Scherer, A. C. Gossard and J. H. English, Appl. Phys. Lett. **54**, 1400 (1989).



- [6] P. L. Gourley, T. M. Brennan, B. E. Hammons, S. W. Corzine, R. S. Geels, R. H. Yan, J. W. Scott and L. A. Coldren, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 1209 (1989).
- [7] J. Faist, J. D. Ganiere, P. Buffat, S. Sampson and F. K. Reinhart, *J. Appl. Phys.* **66**, 1023 (1989).
- [8] J. L. Jewell, A. Scherer, S. L. McCall, Y. H. Lee, S. J. Walker, J. P. Harbison and L. T. Florez, *Electron. Lett.* **25**, 1123 (1989).
- [9] Y. H. Lee, J. L. Jewell, A. Scherer, S. L. McCall, J. P. Harbison and L. T. Florez, *Electron. Lett.* **25**, 1377 (1989).
- [10] H. Yoo, A. Scherer, J. P. Harbison, L. T. Florez, E. G. Paek, B. P. Van der Gaag, J. R. Hayes, A. Lehmen, E. Kapon and Y. Kwon, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 1198 (1990).
- [11] M. Orenstein, A. Lehmen, C. Chang-Hasnain, N. G. Stoffel, J. P. Harbison, L. T. Florez, E. Clansen and J. L. Jewell, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 2384 (1990).
- [12] L. M. Zinkiewicz, T. J. Roth, L. J. Mawst, D. Tran and D. Botez, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 1959 (1989).
- [13] F. Koyama, S. Kinoshita and K. Iga, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 221 (1989).
- [14] E. F. Schubert, L. W. Tu, R. F. Kopf, G. J. Zyzdik and D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 117 (1990).
- [15] Y. H. Lee, B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, J. L. Jewell and J. V. Hove, *Electron. Lett.* **26**, 710 (1990).
- [16] Y. H. Lee, B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, J. L. Jewell, C. A. Burrus and J. V. Hove, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **2**, 686 (1990).
- [17] Y. H. Lee, B. Tell, K. F. Brown-Goebeler, R. E. Leibenguth and V. D. Mittera, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **3**, 108 (1991).
- [18] B. Tell, Y. H. Lee, K. F. Brown-Goebeler, J. L. Jewell, R. E. Leibenguth, M. T. Asom, G. Livescu, L. Luther and V. D. Mittera, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1855 (1990).
- [19] R. S. Geels, S. W. Corzine, J. W. Scott, D. B. Young and L. A. Coldren, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **2**, 234 (1990).
- [20] K. Tai, L. Yang, Y. H. Wang, J. D. Wynn and A. Y. Cho, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 2496 (1990).
- [21] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids*. (Pergamon, New York, 1984), Vol. 1.
- [22] Y. C. Chung, Y. H. Lee, Paper JthA4, Conference on Lasers and Electro-Optics, May 12-17, 1991, Baltimore, Maryland.
- [23] R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy, *J. Lightwave Tech.* **LT-4**, 1655 (1986).
- [24] G. R. Olbright, R. P. Bryan, K. Kear, T. M. Brennan, Y. H. Lee and J. L. Jewell, Submitted for publication in *Electron. Lett.*

### Characteristics of Top-Surface-Emitting Microlasers and Active Surface Emitting Laser Logic Devices

Y. H. Lee

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon, Korea*

(Received: December 7, 1991)

Structures, fabrication, and characteristics of top-surface-emitting GaAs four quantum well microlaser are described. The microlasers have good room-temperature CW characteristics. The maximum CW laser output is  $>3$  mW from a  $30\ \mu\text{m}$  diameter microlaser and the maximum differential quantum efficiency is  $>70\%$  from a  $10\ \mu\text{m}$  diameter microlaser. Active surface emitting laser logic devices are designed and fabricated as a discrete version of a top-surface-emitting laser and heterojunction phototransistor. The active surface emitting laser logic device have high optical gain ( $>20$  overall,  $>200$  differential) and very high on/off ratio. Two-dimensional arrays of top-surface-emitting microlasers and active surface emitting laser logic devices will be critical elements for optical computing, photonic switching and neural network applications.