

特輯

반도체 초격자

이 주 신(공학박사, 경성대학교 교수)

1. 서 론

최근의 재료합성기술 및 미세가공기술의 발전은 종래의 천연물질에는 없는 새로운 기능을 가진 신물질이나 새로운 디바이스의 제작을 가능하게 하고 있다. 여러가지 초박막 물질의 다층막이나 초격자는 그 형상 및 물질의 조합에 따라 모체의 물질과는 새로운 성질을 나타내는 것으로 크게 관심을 모으고 있다.

1970년 Esaki와 Tsu¹⁾는 상당히 얇은 두 종류의 반도체결정을 상호교대로 규칙정연한 주기로서 성장시킨 초격자결정이 지금까지 없었던 특이한 성질을 갖을 가능성이 있다는 것을 지적했는데, 그 제안은 수년 후 MBE법에 의해 실현되었다. 반도체 초격자의 주기성은 전자 및 양공에 인공적으로 새로운 주기 퍼텐셜을 부가한다. 전자의 파동함수 자체가 인공적으로 제어된다는 점은 종래에 없었던 새로운 특징으로, 그런 의미에서 초격자는 이른바 새로운 인공물질이라 말할 수 있을 것이다.

주기성 이외에도 양자퍼텐셜에 의해 거의 이상적인 2차원적 성질을 가진 전자계를 만들 수 있다는 점은 최근의 저차원 전자계로의 관심의 증대와 아울러 헤테로접합 및 MOS구조의 계면과 함께 여러가지 새로운 물

리현상이 나타나는 무대로서 주목을 끌고 있다. 정수 및 분수 양자 Hall효과 등의 2차원 전자계 특유의 새로운 현상의 발견, 2차원 여기자의 실현 등은 물성물리학의 새로운 분야를 개척하고 있다. 초격자나 2차원 전자계의 응용면에서는 초고속디바이스 및 양자우물구조 반도체레이저 등 현재 가장 유망한 선단 기술 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 반도체 초격자의 결정을 상호교대로 성장시킬 수 있는 오차는 현재 1원자층 이내까지 되었으며, 물질계로서는 최초로 연구를 시작한 GaAs/AlGaAs계 이외에 각종의 III-V족계, VI족, II-VI계, amorphous계 등 상당히 많은 조합으로 만들어지고 있다.

본 논문에서는 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 반도체초격자에 관하여 그 종류 및 전자상태, 결정성장 및 평가법, 기초적 물성, 디바이스 응용 그리고 앞으로의 전망을 간단하게 총망라하여 소개해 보고자 한다.

2. 반도체 초격자의 분류와 전자상태

2-1. 반도체 초격자의 분류

반도체의 에너지대 구조는 재료가 갖는 전자친화력 및 밴드갭에 의해 결정된다. 또 각종의 두께나 퍼텐셜의 형태를 제어함으로써 여러가지 특성을 가진 초격자를 형성할 수

있게 된다. 초격자라 하여도 각 층의 두께에 따라 전자상태가 다르게 되는데, 그 중에서도 특히 전도전자의 양자역학적 파장 λ 와 초격자의 주기(또는 각 층의 두께)가 거의 같은 크기를 갖는 것을 협의의 초격자라 부른다. 양자역학적 파장 λ 는 드브로이파장으로 나타내져 에너지 0.1eV, 유효질량 $m^*=0.1m_0$ (m_0 : 자유공간의 전자질량)을 가진 전자에 대하여 $\lambda=123\text{\AA}$ 으로 된다.

여러 반도체체료를 사용하여 초격자를 만든 경우 퍼텐셜 분포의 형태에 따라 그림1과 같은 3개의 형태로 분류될 수 있다. GaAs/AlGaAs를 대표로 하는 type I의 초격자에서는 전자와 양공 모두 밴드갭이 작은 반도체 내에 갇혀진 구조로 되어 있다. 한편 type II에서는 전자와 양공이 갇혀지는 공간적 위치가 다르다. 만약 각 층이 상당히 얇아 파동함수가 퍼텐셜장벽내로 침투하게 되면 유효밴드갭은 본래의 재료 어느쪽보다도 작게 된다.

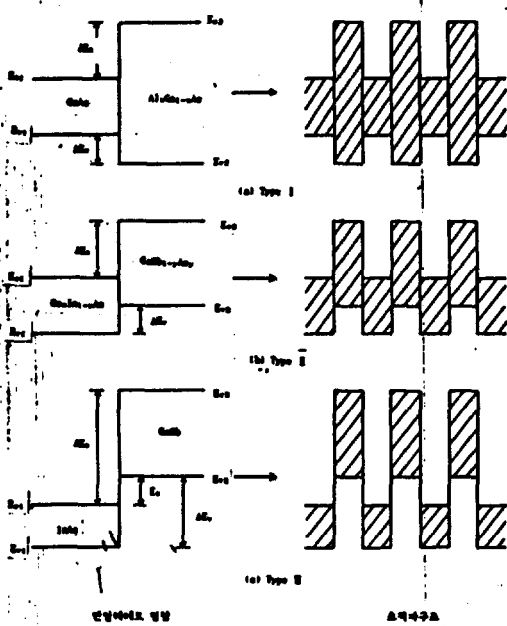


그림 1. 퍼텐셜분포의 형태에 따른 초격자의 분류

또한 InAs/GaSb을 대표로 하는 type III에서는 유효밴드갭이 음으로 되어 반금속상태로 된다.

그림 1에서는 불순물도우핑을 고려하고 있지 않으므로 밴드단의 구부러짐은 나타나 있지 않다. 그러나 GaAs/AlGaAs초격자계에 주제를 첨가하면 그림 2와 같이 공간전하 때문에 밴드의 구부러짐이 발생한다.

이상과 같은 type I ~ III의 초격자에서는 밴드갭 및 전자친화력의 제어를 기본으로 하고 있다. 다음으로 불순물도우핑에 분포를 가지게 함으로써 전자의 거동에 특이성을 갖도록 제안된 예를 몇 개 소개한다.

그림 2(b)에서는 n형불순물이 균일하게 도우핑되어 있다. 이 경우 GaAs층에 갇혀진 전자는 GaAs층에 도우핑된 불순물로부터 여기된 것과 AlGaAs층내의 dopant로부터 여기된 것의 합으로 된다. 한편 GaAs층에는 도우핑을 행하지 않고 AlGaAs층에만 도우핑을 행한 경우의 퍼텐셜분포를 그림 2(c)에 나타낸다. 이 경우에는 AlGaAs층에 도우핑된 불순물로부터 여기된 전자가 GaAs층에 갇혀져 공간전하를 형성한다. 이처럼 초격자계에서는

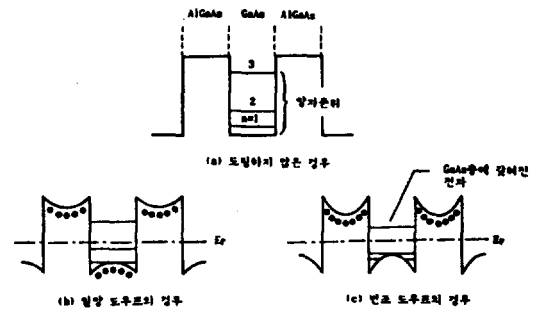


그림 2. GaAs/AlGaAs 초격자계의 n형 불순물 첨가효과. 이 그림에서는 전도대 바닥 부근의 에너지변화만 그려져 있다. ●는 이온화 불순물을 나타낸다. 불순물을 도우핑하면 에너지대의 구부러짐이 생긴다.

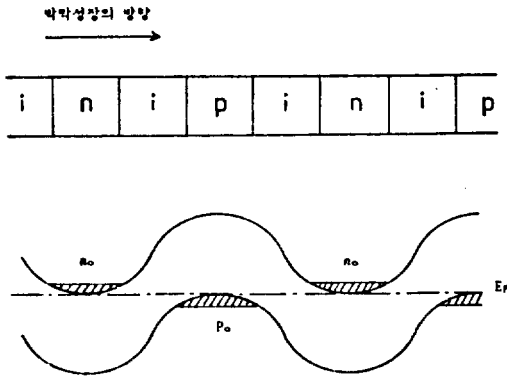


그림 3. nipi초격자의 구조와 에너지대. 주기적으로 도우핑을 행함으로써 퍼텐셜에너지도 주기적으로 변화시킬 수 있다. 단 전자, 양공은 공간적으로 분리되어 있다.

AlGaAs층에만 도우핑을 행하여도 GaAs층에 전도전자를 만들 수 있다. 특히 공간전하 때문에 GaAs층내의 전자는 접합부근에 강하게 존재하게 되어 접합에 수직인 방향으로 양자화된다. 이런 전자를 특히 2차원 전자가스(2DEG)라 부른다. 또 이 경우 이온화한 불순물과 전자가 분리되므로 전하이동도에 미치는 불순물산란의 영향이 작게 된다. 특히 GaAs층을 두겹게 한 것은 HEMT(High Electron Mobility Transistor)등에 이용되고 있다.

한편 같은 종류의 재료 예를 들면 GaAs를 사용하여도 n형과 p형 불순물을 교대로 도우핑한 그림 3과 같은 적층재료에서는 퍼텐셜분포를 주기적으로 변화시키는 것이 가능하다. 실제로는 n층과 p층사이에 불순물을 도우핑하지 않은 고저항층(i층)을 도입하고 있으므로 nipi초격자라 불리워지고 있다.

이상과 같이 불순물도우핑에 공간적분포를 갖게 해 특이한 현상이 일어나도록 하는 기술을 변조도우핑이라 부른다.

지금까지 연구된 초격자재료를 정리하여

표 1에 나타낸다. 재료로서는 III-V족 화합물 반도체를 비롯하여 IV족, II-VI족계, amorphous계가 있다. 새로운 기능성에 관하여도 양자준위를 이용한 광학적인 것으로 부터 2차원 전자가스를 이용한 전자적인 것, 이동도나 유효질량 제어 그리고 zone folding효과에 의한 간접·직접천이의 전환 등 광범위하다.

2-2. 반도체 초격자의 전자상태

초격자의 성질은 각 층의 주기에 따라 크게 달라진다. 그림 4는 장벽층(밴드갭이 큰 층)과 우물층(밴드갭이 작은 층)의 두께와 초격자의 전자적, 광학적 성질의 관계를 나타낸 것이다. 각 층이 수백Å이상의 두께이면 유전체다층막으로서의 bulk적 성질 밖에 나타나지 않는다. 장벽층이 100Å이하로 되면 양자역학적 터널효과가 나타난다. 이 효과는 공명터널효과 등의 새로운 기능성을 발휘한다. 한편 장벽층이 상당히 두껍고 우물층만이 드브로이파장 이하로 되면 우물층에 양자준위가 형성된다. 이러한 양자우물을 사용하여 반도체레이저를 만들면 발광파장을 넓은 범위에 걸쳐 제어할 수 있게 되고 발광스펙트럼의 반치폭도 크게 감소시킬 수 있다. 장벽층, 우물층 모두 100Å정도 이하로 되면 장벽층의 양쪽에 있는 우물층의 전자나 양공이 서로 영향을 미쳐 전도대나 가전자대에 minizone이 형성된다. Minizone이 형성되면 Bloch진동에 의한 음의 저항이 관찰될 것이다. 더욱 더 장벽층, 우물층을 원자층 두께 정도까지 얇게 하면 초격자의 주기에 대응한 Brillouin zone의 folding효과가 나타난다. 이 효과를 이용하면 Si/SiGe계 초격자에서 시도되고 있는 것처럼 간접천이 재료의 조합으로서 직접천이를 일으킬 수 있게 된다.

표 1. 대표적인 초격자

분 류	초격자재료	비 고
III-V	GaAs/AlGaAs(AlAs)	· 기초물성, 디바이스응용면에서 가장 활발하게 연구되고 있음. · miniband, 양자우물내의 준위의 제어 · 2차원 전자가스에 의한 이동도의 향상 · 공명터널효과 등의 새로운기능성 탐사
	InAs/GaSb ⁺	· type III 초격자
	InP/InGaAsP	· 광디바이스 응용
	GaAs(GaP)/GaAsP ⁺	· 광학적 성질 제어
	GaAs/InAs(InGaAs ⁺)	· 이동도 제어, 광학적 성질 제어
I V	Si-SiGe ⁺	· 이동도제어
	CdTe/HgTe ⁺	· 간접· 직접천이의 전환(zone의 folding) · 광범위한 밴드갭의 제어(금속~반도체)
II-VI	ZnSe/ZnTe ⁺	· type II 초격자 · 광학적 성질 제어 · <i>pn</i> 제어
	ZnS/ZnSe ⁺	· 양자준위에 의한 광학적 성질 제어
amorphous	a-SiC ⁺⁺	· 광학적, 전자적 성질 제어
	a-Si/a-SiGe	· 광학적, 전자적 성질 제어 · 흡수계수 제어
특수한 초격자	InAs/GaSb/AlSb ⁺	· poly type 초격자 · 전자 수송기구의 제어 · 다기능화
	n-GaAs/P-GaAs	· 도우핑 초격자 · 여기상태에 의한 외견상의 밴드갭 제어

⁺strained-layer 초격자

3. 반도체 초격자구조의 제작기술과 구조평가

반도체 초격자구조·양자우물구조는 초박막 결정을 다층으로 적층시킨 구조이다. 한층한 층은 1원자층 내지 100원자층 정도의 두께를 가지고 있다. 이런 초박막 다층구조를 제작하는 수단으로서 MBE(Molecular Beam Epitaxy)법이나 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)법이 사용되고 있다. 이 장에서는 이들 방법의 장치구성 및 특징에 대

하여 간단히 기술한 다음, 이들 방법을 사용하여 제작된 구조가 결정학적으로 보아 어느 정도 이상에 가까운 것인가를 평가하는 여러 가지 평가기술에 대하여 간단히 기술한다.

3-1. MBE법

MBE법은 성장시킬려고 하는 물질을 진공 중에서 가열, 증발시켜 기관상에 단결정을 증착시키는 진공에피탁시법의 일종인 3온도법을 개량한 것으로, 현재 초격자구조를 제작하

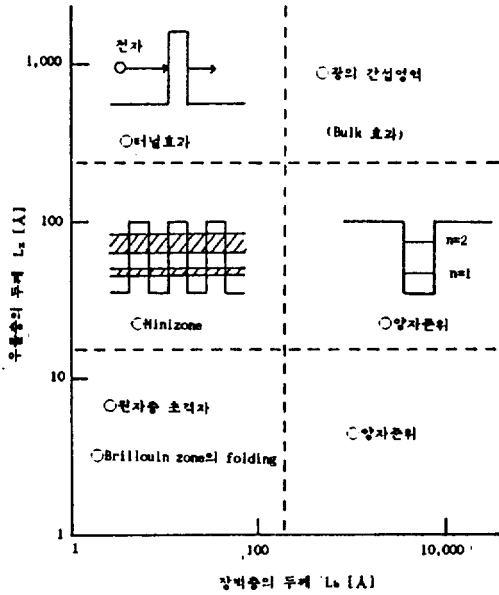


그림 4. 장벽층의 두께 L_b , 우물층의 두께 L_s 과 초격자의 전자적, 광학적 성질의 관계

는데 가장 넓게 사용되는 방법이다. MBE법이 종래의 증착법과 크게 다른 점은 초고진공(10^{-9} Torr이하)을 사용하며 증발물을 분자선 또는 원자선의 형태로 조사한다는 것이다.

그림 5에 MBE프로세스의 원리를 나타낸다. Knudsen cell이라 불리워지는 여러 개의 증발원 cell에 성장시킬려고 하는 박막의 구성원소나 화합물 또는 dopant원소를 넣어 일정온도로 가열한다. 각각의 증발원에는 Ta등으로 만들어진 저항가열 히터와 온도검출용 열전대가 부착되어 있다. 가열에 의해 증발된 분자선이 가열된 기판위에 증착된다. 또한 각각의 증발원 cell과 기판 사이에는 기계적으로 움직이는 shutter판이 설치되어 있어, 그것을 열고 닫음에 따라 필요한 분자선만을 기판위에 도달시키고 필요없는 분자선을 차단시킨다.

일반적으로 MBE장치(그림 6)는 비교적 낮

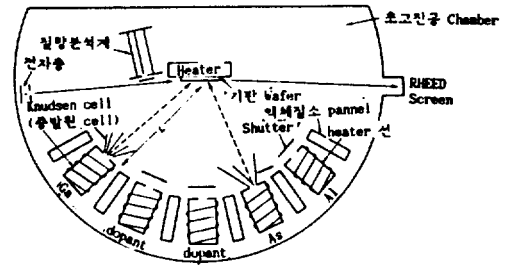


그림 5. MBE성장의 원리도

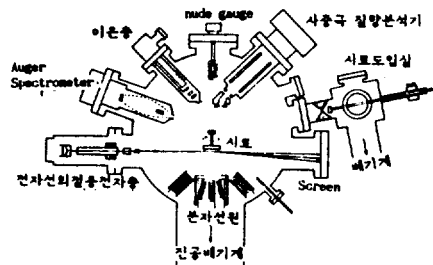


그림 6. MBE장치의 개략도

은 진공(10^{-4} Pa이하)의 시료도입실과 적당한 진공도($10^{-4} \sim 10^{-6}$ Pa)를 갖는 분석실(기판의 세척 및 성장표면의 분석을 행하는 실) 그리고 상당히 높은 진공도(10^{-8} Pa이상)를 갖는 성장실의 3실로 구성되어 있다. 각 종의 분석장치로서는 분자선 및 잔류가스를 검출하기 위한 질량분석기(사중극질량분석기), 시료표면의 결정성 및 흡착물의 유무를 보기 위한 반사전자선회절장치(RHEED), 부착물 및 화학결합상태를 판정하기 위한 Auger전자분광장치(AES), 표면을 스फ터하기 위한 이온총 등이 있다. 그 외 2차이온분석기(SIMS) 및 광전자분광기(UPS, XPS 등)도 이용된다.

이와 같이 구성된 MBE법의 일반적인 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 성장속도를 느리게 할 수 있어 (1~10 Å/sec) 원자층 정도로도 박막성장을 제어할 수 있다.
- (2) LPE, VPE, MOCVD법에 비하여 성장온도가 낮으므로 (GaAs : 450~800°C, Si : 400~900°C) 조성이 다른 두께 층사이의 상호확산이 작은 박막을 만들 수 있다.
- (3) 성장표면을 원자 레벨로 평탄하게 할 수 있다.
- (4) 박막성장의 시작과 정지를 순간적으로 행할 수 있으므로 (<1sec) 급격히 조성 변화하는 구조를 만들 수 있다.
- (5) 각종 표면분석기술을 사용하여 in situ 관측을 행할 수 있다.
- (6) 분자빔이 직진하는 특성을 이용하여 증착마스크를 이용한 선택성장이 가능하다.

이런 특징때문에 MBE법에 의한 초격자구

조의 제작이 가능하다.

3-2. MOCVD법

MOCVD법은 유기금속화합물을 사용한 열분해 기상성장법으로 Ga, Al, In 등의 반도체재료 구성원소를 기판까지 수송하는데 증기압이 높은 alkyl화합물(메틸화합물, 에틸화합물 등)을 사용하는 것이 특징이다. 이들 유기금속화합물은 수소를 포함한 분위기중에서 열분해하여 금속을 석출시키고 남은 메틸기, 에틸기 등은 각각 메탄, 에탄 등의 기체로 된다. GaAlAs계의 경우에는 원료로 Ga(CH₃)₃

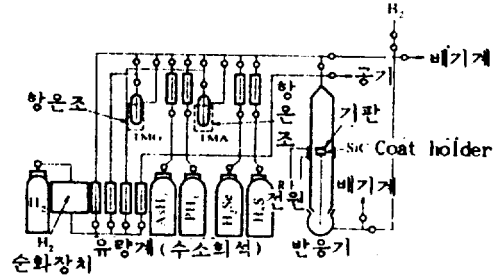


그림 7. MOCVD장치의 개략도

표 2. MBE법과 MOCVD법의 비교

	MBE법	MOCVD법
압력	<10 ⁻¹⁰ Torr	0.1~1기압
양산성	낮음	높음
가열장소	3이상	1
성장속도[Å/s]	0.3~30	1~250
성장온도	낮음	MBE법보다 약간 높음
계면의 급변성	1원자층도 가능	5Å 이하라는 보고도 있음
상장층의 평탄성, 균일성	양호	양호
표면결함	oval defect	방위에 따라서는 hillock이 존재
GaAs의 순도	n~10 ¹⁴ /cm ³ μ _e =144,000cm ² /V·s(77K)	n~10 ¹³ /cm ³ μ _e =140,000cm ² /V·s(77K)
고유결함(trap)	-	EL2
As와 P를 포함하는 계의 성장	극히 곤란	가능하나 어려움
성장시 관찰	가능(RHEED, Auger분석 등)	거의 불가능

(TMG), $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ (TMA), AsH_3 등이 주로 사용되고 있다. 그림 7에 대표적인 MOCVD 장치의 개략도를 나타낸다. TMG, TMA 등의 원료는 보통의 사용범위에서 액체로 되어 있으며, 증기압은 항온조에 의해 제어되고 있다. Dopant로는 n 형에 S(원료는 H_2S), Se(H_2Se), p 형에 $\text{Zn}(\text{Zn}(\text{CH}_3)_2)$ 등이 사용되고 있다. MOCVD법에서는 기관부분만 가열하므로 graphite susceptor를 이용한 고주파유도 가열방식이 채용되고 있다.

MOCVD법의 크나큰 특징은 종래의 기상성장법보다 제어성이 뛰어나고 원료가스의 혼합에 따른 다원계 재료의 형성이 용이하다는 점이다. 또 MBE법에 비하여 면적이 큰 기관 위에도 균일하게 성장을 시킬 수 있으므로 대량생산에 적합하다는 점이다.

MBE법과 MOCVD법의 특징을 정리하여 표 2에 나타낸다. 박막두께제어, 조성제어, 계면급변성이란 점에서는 MBE법이 뛰어나나 양산성, 최고순도면에서는 MOCVD법이 우수하다. 다음 절에서는 이와 같은 방법들로 만들어진 초격자의 표면 구조 및 각 층의 두께, 조성 등을 평가하는 방법에 대하여 기술한다.

3-3. 초격자구조의 평가

다층막의 구조평가에 주로 사용되는 것으로는 주사형전자현미경(SEM)과 투과형전자

현미경(TEM)이 있다. 박막두께가 수 백Å 이상일 때는 SEM의 단면주사에 의해 다층구조를 관찰할 수 있으나, 100Å 이하로 되면 TEM이 유력한 수단으로 된다. TEM은 시료를 투과한 전자선으로 내부구조를 반영한 상을 보는 것으로서, 초격자구조의 관찰, 헤테로계면에서의 전위 및 결함의 관찰, 부착된 원자·분자의 동적관찰이 가능하다. 또한 초격자구조의 헤테로접합계면의 평탄성을 평가하는 수단으로서 광학스펙트럼 특히 발광스펙트럼 피크의 반폭치를 이용하기도 한다.

초격자층의 두께 및 조성을 결정하는 방법으로는 비파괴적인 X선회절법이 주로 사용되고 있다. 그림 8에 GaAs/AlAs 초격자의 (400) X선회절패턴을 나타낸다²⁾. GaAs기관으로 부터의 반사피크 이외에 초격자에 피택설막으로 부터의 주된 회절피크(0차의 회절피크)와 그것을 중심으로 초격자구조 특유의 긴주기구조(주기 (L_a+L_b))에 의한 고차의 회절피크가 나타난다. 이들 피크가 나타나는 각도를 가지고 초격자구조중의 각 층의 두께 L_a, L_b 를 구할 수 있다. 인접한 satellite 피크간의 각도로 부터 주기 L_a+L_b 를 구할 수 있으며, GaAs기관으로 부터의 피크와 0차 회절피크와의 차는 초격자층의 평균적 Al조성에 비례하므로 그림중의 각도차 $\Delta\theta_0$ 로 부터 Al조성비, 즉 $L_b/(L_a+L_b)$ 를 구할 수 있다. 순수한 AlAs에 대하여는 $\Delta\theta_0 = 360''$ 로 되는 것이 알려져 있으므로 L_a/L_b 가 결정된다. 이와 같은 방법으로 L_a, L_b 가 구해질 수 있다. 그림 8에 나타낸 예에서는 $L_a = 29\text{Å}$, $L_b = 31\text{Å}$ 이다.

초격자결정을 구성하고 있는 원자나 불순물의 종류·분포 등을 비파괴적으로 측정하는 방법으로는 RBS(Rutherford Backscattering Spectrometry)법이 있는데, 이것은 물질에 MeV의

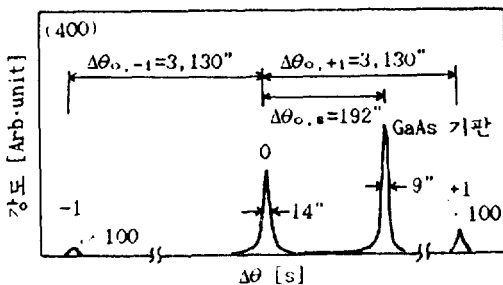


그림 8. 2결정법에 의한 GaAs/AlAs 초격자의 X선회절패턴²⁾

고에너지를 갖는 가벼운 원소이온(He^+)을 인가한 후 산란되어 나오는 He^+ 의 에너지를 측정하는 방법이다. X선회절법은 주기구조를 평균화하여 평가하고 있는 반면 RBS법에서는 수Å의 분해능을 기대할 수는 없으나 한층한층의 적층상태를 평가한다는 이점이 있다.

그 밖에 조성분석법으로서 AES(Auger Electron Spectrometry)법과 IMA(Ion Micro Analysis)법, SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)법이 있다. AES법은 시료표면에 전자선을 입사시켜 발생한 Auger전자를 에너지분석하는 것으로 헤테로접합계면 부근의 원소의 동정 및 조성분포, 계면조성변화 등을 평가할 수 있다. 한편 IMA법과 SIMS법은 시료에 이온을 조사하여 스피터한 후 시료로부터 나온 2차이온을 에너지분석하여 조성원소를 평가하는 것으로 특히 불순물분포의 평가에 사용되고 있다.

4. 반도체 초격자의 물성

반도체 초격자의 주요 특징중의 하나는 양자퍼텐셜에 의해 2차원 전자계(양자우물구조)를 만들 수 있다는 것이다. 3차원 자유전자계의 상태밀도 $D(E)$ 가 에너지 \sqrt{E} 에 비례하여 연속적으로 변화하는 반면 2차원 자유전자계의 상태밀도는 그림 9(a)와 같이 에너지에 의존하지 않고 계단모양으로 된다. 이와 같은 상태밀도의 차이로부터 종래의 bulk반도체에서는 나타나지 않았던 광학적, 전기적 현상들이 양자우물구조를 도입함으로써 나타나는데, 이 장에서는 이 현상들을 간단히 설명해 본다.

4-1. 광학적 현상

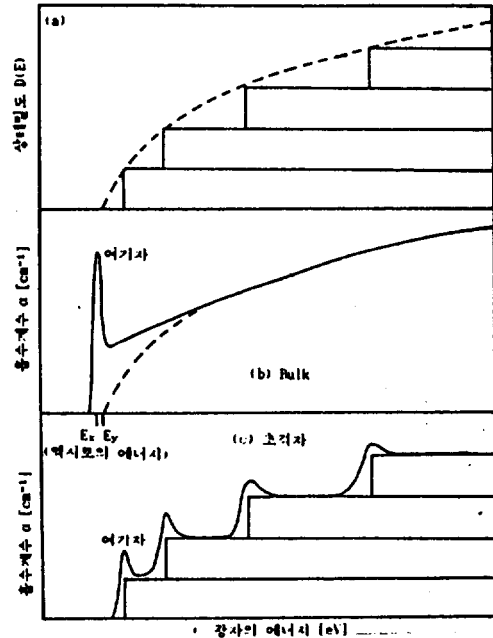


그림 9. (a) 2차원계(실선) 및 3차원계(점선)의 종합상태밀도

(b) Bulk의 흡수계수. 점선은 여기자 효과가 없는 경우이며, 실선은 여기자 효과가 있는 경우를 나타낸다.

(c) 초격자의 흡수계수

초격자구조의 광학적 현상을 흡수스펙트럼을 통하여 살펴본다. 광학적 흡수계수는 반도체재료의 상태밀도를 강하게 반영하는 것으로 그림 9(b), (c)에 bulk와 초격자로부터 기대되는 흡수계수 스펙트럼을 비교하여 나타낸다. Bulk계에서는 흡수스펙트럼이 $\sqrt{\hbar\omega - E_g}$ ($\hbar\omega$: 광자의 에너지, E_g : 밴드갭)로서 변화하는 반면 초격자계에서는 계단모양으로 될 것이 예상된다. 또 실제로는 가전자대로부터 전도대에 전자가 천이하면 가전자대에 생긴 양공과 전도대의 전자와의 쿨롱인력에 의해 일종의 속박상태(여기자; 엑시톤)가 형성되므로 밴드 단보다 약간 저에너지측에 여기자에 의한 흡수피크도 보여진다.

Bulk와 같은 3차원계의 경우 여기자의 속

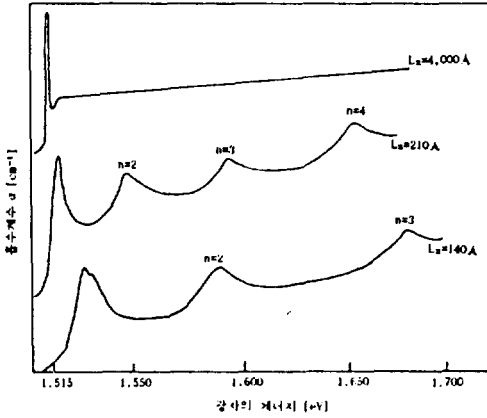


그림 10. GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As 단일양자우물의 광흡수스펙트럼³⁾

박에너지 E_n 은 수소원자모델에 의해

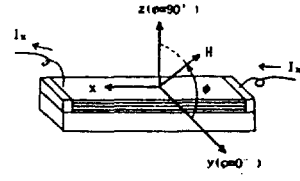
$$E_n = \frac{Ry^*}{n^2} \quad (n=1, 2, 3\cdots) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으나, 양자우물구조와 같은 2차원계의 경우에는

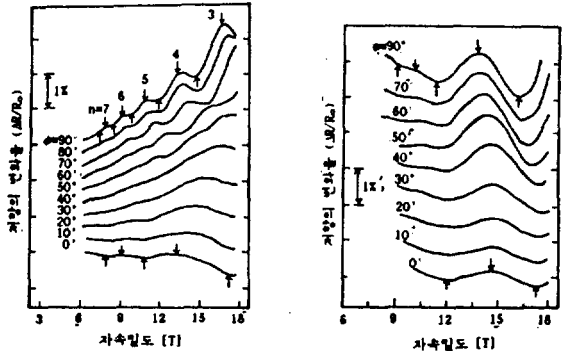
$$E_n = \frac{Ry^*}{(n + \frac{1}{2})^2} \quad (n=0, 1, 2\cdots) \quad (2)$$

로 표시되어, 기저상태의 속박에너지는 2차원계가 3차원계에 비하여 배나 증대된다. 여기에서 Ry^* 는 물질의 유전율과 전자, 양공의 환산질량에 의존하는 Rydberg상수이다. 그러므로 2차원계의 경우 bulk계에 비하여 여기자효과가 현저하게 나타난다.

그림10에 GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As 단일양자우물 구조를 가지고 측정한 저온(4.2K)광흡수스펙트럼의 GaAs우물층 두께 L_z 의존성을 나타낸다.³⁾ L_z 이 클 때에는 bulk GaAs와 비슷한 흡수스펙트럼을 나타내나, L_z 이 작게되면 우물형 퍼텐셜에 따른 양자화가 현저하게 나타난다. 즉 L_z 이 작게 됨에 따라 계단모양의 2차원 상태밀도를 반영한 흡수스펙트럼이 보여지며, 흡수단도 고에너지측으로 이동한다.



(a) 속결편리



(b) AlGaAs 장벽층이 상당히 두꺼워 (90Å), 전자가 (90°) 양자우물내에 완전히 갇혀져 있는 경우

(c) AlGaAs 장벽층이 얇아 (30Å), Subband가 형성되어 있는 경우

그림 11. Shubnikov-de Haas효과에 의한 초격자내의 전자상태의 평가⁵⁾

이상과 같이 초격자구조의 특이한 광학적 현상은 2차원계 여기자의 실현과 양자우물폭에 따른 광자에너지의 변화일 것이다. 속박에너지가 증대되는 2차원계 여기자의 실현에 따라 bulk에서는 저온에서만 관측되었던 여기자피크가 양자우물구조에서는 실온에서도 관측되도록 되었다.⁴⁾

4-2. 전기적 현상

이 절에서는 양자우물내에 전자가 갇혀져 있는 것을 확인하는 방법으로서의 Shubnikov-de Haas(SdH)효과를 설명한 후 변조도우프 구조에 있어서의 전자상태를 설명하고, 끝으로 2차원 전자계의 특징이 뚜렷하게 나타나는 현상으로서 양자 Hall효과에 대하여 간단히 설명한다.

초격자의 전자상태는 장벽층의 두께에 크게 의존한다. 장벽층이 상당히 두꺼운 경우에

는 전자가 우물내에 갇히지게 되나, 장벽층이 얇게 됨에 따라 이웃 우물과의 상호작용이 강하게 되어 subband가 형성된다. 이런 장벽층 두께에 따른 전자상태의 변화를 강자장에 있어서의 전기저항의 변화(SdH효과)에 의해 검출할 수 있다. Bulk재료에 강자장을 인가하면 전자는 사이클로트론운동을 행하는데, 이때 사이클로트론 각주파수 $\omega = qB/m^*$ (B : 자속밀도)와 산란완화시간 τ 와의 곱이 $\omega\tau \gg 1$ 의 조건을 만족시키면 전도전자는 양자화되어 에너지 $\hbar\omega(n+1/2)$ 의 Landau준위를 형성한다.

그림 11은 장벽층이 다른 2종류의 시료에 대하여 자기저항의 자장방위 ϕ 의존성을 나타낸 것이다⁵⁾. 자장을 초격자면에 수직으로 인가했을 때 ($\phi=90^\circ$) 전자는 초격자면에서 사이클로트론운동을 행하여 자기저항 $\Delta R/R_0$ 에 진동이 나타난다. 이것은 Landau준위가 페르미준위와 마주치는 자장에서 $\Delta R/R_0$ 가 극대치로 되기 때문이다. 한편 초격자면에 평행으로 자장을 인가했을 때 ($\phi=0^\circ$)에는 그림 11(b)와 (c)의 거동이 다르게 된다. 장벽층이 두꺼운 (b)에서는 사이클로트론운동이 AlGaAs장벽층에서 저지되므로 진동적 자기저항은 관측되지 않는다. 그러나 장벽층이 얇게 되면 전자파의 터널확률이 높게 되어 평행자장에 있어서도 진동적변화가 관측된다. 이렇듯이 SdH효과의 측정을 행하면 초격자내의 전자상태를 평가할 수 있게 된다.

다음으로 초고속 전자디바이스의 응용과 밀접한 관계에 있는 전자이동도 특성에 대하여 살펴본다. 종래의 bulk재료의 전자이동도는 광학포논산란(고온영역)과 이온화불순물산란(저온영역)때문에 제한을 받아왔다. Bulk반도체재료중 가장 전자이동도가 뛰어난 un-

doped 고순도 n -GaAs의 전자이동도는 $10^4 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ order로서 고이동도 재료로서 유망한 재료이지만, 저온으로 되면 운반자농도가 상당히 작게 되어 대전류가 흐를 수 없게 된다. 한편 변조도우프 초격자구조를 도입하면 전자농도를 높게 유지할 수 있어 고순도 GaAs의 고이동도 특성을 살릴 수 있게 된다.

그림 12는 대표적인 변조도우프 GaAs/ n -AlGaAs구조를 나타낸 것이다. 기본적으로는 GaAs기판위에 고순도 GaAs 및 n 형 AlGaAs를 성장시킨 구조로 되어 있다. AlGaAs층에 도우핑된 n 형 불순물로부터 자유전자가 공급되며 주계자신은 양의 전하를 띠게 된다. 주계

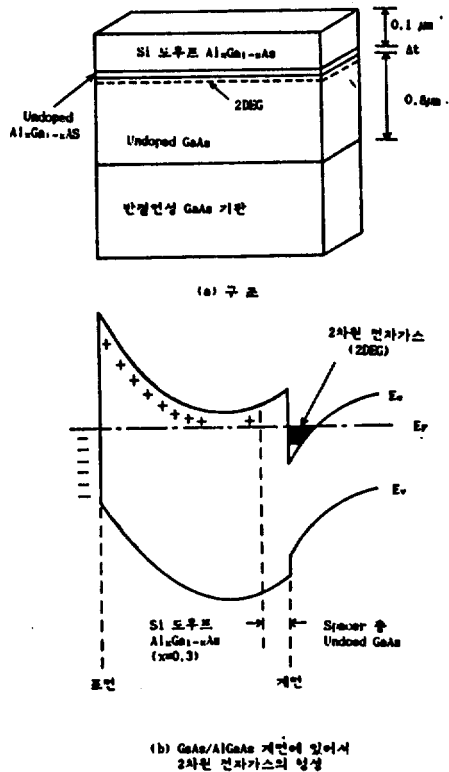


그림 12. 변조도우프 초격자구조에 의한 2차원 전자가스의 형성과 이온화불순물산란의 제거

로부터 나온 전자의 일부는 AlGaAs 표면준위에 포획되나, 헤테로계면 부근의 전자는 전자친화력이 큰 GaAs층으로 이동하여 역삼각형퍼텐셜의 우물내에 고여 2차원전자가스(2DEG)를 형성한다. 2DEG는 이온화불순물과 공간적으로 분리되므로 이온화불순물산란의 영향을 받지 않고 고이동도를 나타낸다. 지금까지 77K에서의 전자이동도 $\mu=1 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 가 얻어져 있다. 실제로는 고이동도를 얻기 위해 n-AlGaAs와 고순도 GaAs사이에 un-doped AlGaAs spacer층을 도입하고 있다. 이것은 도우핑층이 계면에 가까워져 불순물이 고순도 GaAs층에 확산되거나 2DEG가 이온화불순물에 의해 산란을 받기 쉽게 되는 것을 방지하기 위해서이다. 지금까지 spacer층이 200 Å일 때 5K에서의 전자이동도 $\mu=2.12 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 가 얻어져 있다⁶⁾. 이것은 지금까지 보고되어 있는 반도체재료중에서 가장 높은 값이다.

1985년도에 Klitzing⁷⁾에게 노벨물리학상을 안겨 준 양자 Hall 효과는 반도체의 계면에 만들어진 2차원계가 저온, 강자장하에서 나타나는 기묘한 현상으로, 이 현상을 이용하면 미세구조상수를 정확히 구할 수 있으며 표준저항으로서도 이용될 수 있다는 점에서 주목을 끌고 있다.

2차원 전자계의 전류밀도 J 와 전장 E 와의 관계를

$$J_x = \sigma_{xx}E_x + \sigma_{xy}E_y \quad (3a)$$

$$J_y = \sigma_{yx}E_x + \sigma_{yy}E_y \quad (3b)$$

로 나타내면, 면내의 전도에 이방성이 없을 경우 대각전도율은 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ 로 되며, 비대각전도율은 $\sigma_{xy} = -\sigma_{yx}$ 로 된다. 여기에서 σ_{xy} 를 Hall 전도율이라 부른다. 정상자장중에서 전자농도 N_s 를 변화시키면 Hall 전도율 σ_{xy} 는 계단상으로 변화한다. 그리하여 $\sigma_{xx} \approx 0$ 에 대응하여

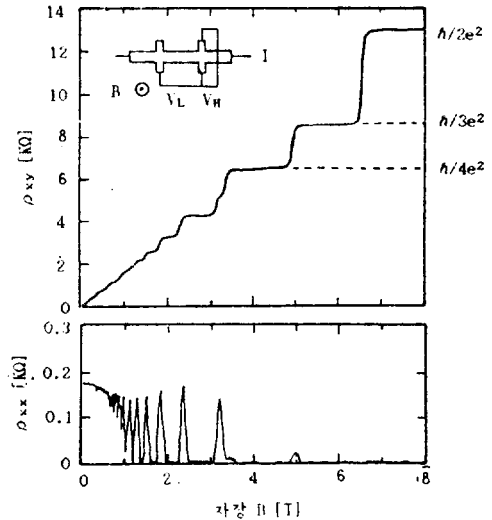


그림 13. 선택도우프한 GaAs/AlGaAs 초격자의 50mK에서의 전류방향의 저항률 ρ_{xx} 와 전류에 수직방향의 저항률(Hall 저항률) ρ_{xy} 에서 관측된 양자 Hall 효과⁸⁾. ρ_{xy} 는 계단상으로 되어 있는데 평탄한 부분의 값은 h/e^2 의 정수분의 1로 되어 있다. ρ_{xx} 의 평탄한 부분에 대응하여 ρ_{xx} 는 0으로 되어 있다.

σ_{xy} 에 평탄한 부분이 나타난다. 다시 말하면 이웃한 Landau 준위의 상태밀도 피크 사이의 국재상태의 에너지내에 페르미준위가 있을 때 $\sigma_{xx} \approx 0$ 로 되어 대응하는 σ_{xy} 는 일정한 값으로 된다. 이때 측정되는 σ_{xy} 의 일정한 값은 N 개의 Landau 준위가 채워지기 전후의 N_s 로서

$$\sigma_{xy} = -N \frac{e^2}{h} \quad (N=1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

와 같이 양자화된 값을 취한다. 이 현상을 양자 Hall 효과(Quantum Hall Effect)라 부른다.

그림 13에 GaAs/AlGaAs 헤테로접합에서의 양자 Hall 효과 측정예를 나타낸다⁸⁾. 2차원 전자의 밀도를 일정하게 유지시키면서 자장을 변화시켜 전류방향의 저항률 $\rho_{xx}(=dV_L/l)$, 단 l 은 전극간의 거리, d 는 시료의 폭)와 전류에 수직방향의 저항률 $\rho_{xy}(=V_H/I)$ 를 측정할 것이다. 여기에서 ρ_{xy} 는 계단상으로 변화하며 평

탄한 부분의 값이 h/e^2 의 정수분의 1로 되어 있는 것을 알 수 있는데, 이것이 양자 Hall효과를 나타내는 것이다. ρ_{yy} 는 특히 시료의 형태, 크기에 무관하고 전류와 전압만으로 결정되는데, 이것은 2차원계 특유의 성질에 기인된 것이다. 이 현상은 크게 두가지의 의의를 가지고 있는데, 그 하나는 전류와 전압이라는 고전물리의 양을 측정함으로써 e^2/h 이라는 양자역학적 양을 구해 기본적 물리정수의 하나인 미세구조상수 $\alpha \equiv e^2/hc \cong 1/137$ 을 아주 정밀하게 측정할 수 있다는 것이다⁹⁾. 또 다른 하나는 표준저항으로서 이용할 수 있다는 것이다.

이러한 정수 양자 Hall효과 이외에도 불순물산란이 거의 없는 고이동도의 반도체 초격자구조를 작성하게 됨에 따라 σ_{xy} 가 e^2/h 의 정수배 뿐만아니라 1/3, 2/3, 2/5, 3/5, 3/7, 4/7, 4/9...배에서도 일정한 값을 갖는 반도체 초격자구조 특유의 분수 양자 Hall효과가 나타난다¹⁰⁾.

5. 반도체 초격자의 디바이스 응용

본래 반도체초격자의 개념은 1970년 Esaki 등¹¹⁾에 의해 Bloch진동을 이용한 발진·증폭소자로서 제창되었다. 그 후 초격자를 전자디바이스, 광디바이스에 응용하려는 연구가 활발히 진행되어 양자우물 반도체레이저와 같은 이미 시판되고 있는 디바이스도 있다. 여기에서는 종래형의 디바이스와 구조 및 성능을 비교함으로써 초격자계 디바이스의 기능적 성질을 간단히 살펴본다.

5-1. 초고속 전자디바이스

초고속을 실현하기 위한 디바이스구조에는 종래로 부터 알려져 있는 것을 개량한 것과

전혀 새로운 발상에 의해 디바이스 설계된 것이 있다. 전자로는 GaAs FET(Field Effect Transistor)에 초격자를 도입한 고전자이동도 트랜지스터 (HEMT(High Electron Mobility Transistor), TEGFET(Two-dimensional Electron Gas Field Effect Transistor)), 헤테로접합 바이폴라 트랜지스터(HBT, Hot Electron Transistor) 등이 있으며, 후자로는 공명터널효과를 이용한 것과 속도변조 트랜지스터 등이 있다.

이미 4-2에서 기술한 바와 같은 2차원 전자가스를 이용한 트랜지스터를 HEMT 또는 TEGFET라 부르고 있다.

HEMT구조를 종래의 GaAs FET와 함께 그림 14에 나타낸다. GaAs FET에서는 반절연성 GaAs기판 위에 결정성을 맞추기 위한 buffer층, 그리고 그 위에 전자전도를 위한 n형층이 0.1~0.2 μ m 적층되어 있다. 게이트부분에는 Schottky장벽이 형성되어 있다. GaAs FET에서는 소오스로 부터 드레인에 흐르는 전자전류를 게이트전압에 의해 제어한다. 따라서 고속성이라는 측면에서는 최종적으로 GaAs에피

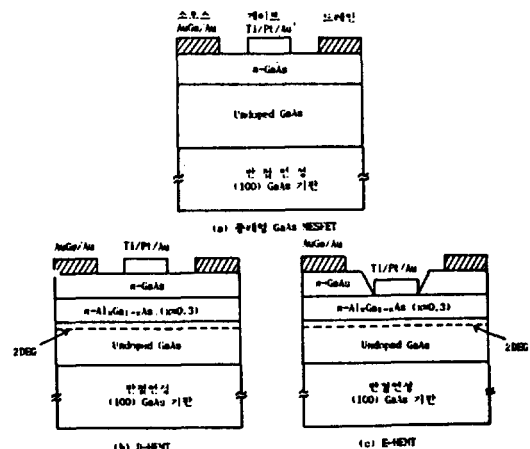


그림 14. 각종 GaAs계 전계효과 트랜지스터의 구조 비교.

GaAs FET에서는 n-GaAs층을, HEMT에서는 GaAs/AlGaAs계면을 전자가 전도한다.

탁설막의 전자속도로서 제한된다. 한편 HEMT에서는 변조도우프에 의해 2차원 전자가스가 형성되어 전하이동도가 비약적으로 향상된다. HEMT에는 Depletion mode(D-HEMT)와 Enhancement mode(E-HEMT)가 있다. D-HEMT와 E-HEMT의 구조상 다른 점은 n -AlGaAs층의 두께 L_b 이다. L_b 가 클 때에는 게이트전압 0에서도 헤테로계면에 2차원 전자가스가 존재하여 전류가 흐르며, 게이트에 음의 전압을 인가하면 2차원 전자가스농도가 감소되어 전류가 감소된다. 한편 E-HEMT에서는 게이트전압 0에서 2차원 전자가스가 존재하지 않으며, 양의 전압을 인가하면 2차원 전자가스가 발생되어 전도도가 향상된다. 이와 같은 E-HEMT의 특성을 이용함으로써 집적회로의 회로구성을 간단하게 할 수 있으며, 게이트당의 소비전력을 작게 할 수 있으므로 HEMT 대규모 집적회로를 제작하는데 유용하다.

5-2. 광디바이스

초격자구조의 광학적 특성을 이용한 광디바이스로서는 양자사이즈효과에 의해 생기는 높은 상태밀도를 가진 양자준위간의 전자천이를 이용하는 양자우물구조 반도체레이저,

실온에서도 안정하게 존재하는 2차원 여기자를 이용한 광쌍안정디바이스, 그 외 비전형 광학소자, 도우핑초격자를 이용한 파장가변 발광다이오드 등을 들 수 있다.

직접천이형 반도체 예를 들면 GaAs의 pn 접합을 순바이어스로 하면 발광이 관측된다. 더욱이 주입운반자를 극도로 증가시키면 반전분포가 발생하여 반도체레이저가 발진하게 되는데, 이때 분포반전을 충분히 행하기 위하여 대전류(GaAs호모접합의 경우 $3\sim 5 \times 10^5$ A/cm²)를 흘리지 않으면 안된다. 이런 단점을 보완하기 위하여 그림 15(b)와 같은 Double Hetero(DH)구조를 사용한다. 단순한 pn 형접합에서는 주입된 전자, 양공이 모두 방사성 재결합을 하지 않으며, 많은 운반자가 전극 쪽에 흘러 손실이 크게 된다. 한편 DH구조에서는 헤테로계면에 있어서의 퍼텐셜장벽에 의해 전자, 양공이 p -GaAs 활성층에 갇혀져 있어 반전분포가 실현되기 쉽게 되어 있다. 또 p -GaAs활성층의 굴절률이 양측의 AlGaAs의 굴절률보다도 크므로 발생한 광이 활성영역에 갇히므로 손실도 감소하여 문턱치전류가 대단히 작게 된다. DH구조에 의해 문턱치전류 $\sim 10^3$ A/cm² 전후의 값이 실현되도록 되었다. 이와 같은 DH구조의 활성층을 초격자구조로 한 반도체레이저를 일반적으로 양자우물레이저라 부른다. 활성층내에 포함되는 퍼텐셜우물이 하나인 것을 단일 양자우물(SQW, Single Quantum Well)레이저, 다수인 것을 다중 양자우물(MQW, Multi Quantum Well)레이저라 부르고 있다. 대표적인 양자우물레이저의 구조를 그림 16에 나타낸다. 이들 양자우물레이저는 종래 DH레이저에 비하여 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

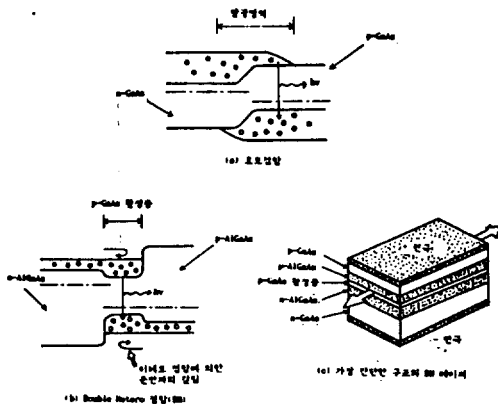


그림 15. 반도체레이저의 구조와 동작

1) 양자우물폭 L_z 을 변화시킴에 따라 발광

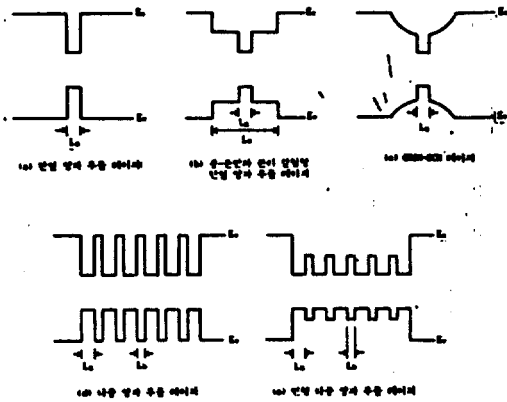


그림 16. 각종 양자우물레이저. (a)~(c)는 SQW 레이저, (d), (e)는 MQW 레이저. (e)의 구조에서 가장 낮은 발진 문턱치전류가 얻어져 있다.

파장을 장파장측 또는 단파장측으로 이동시킬 수 있으므로 반도체재료의 조성을 바꾸지 않아도 목표로 하는 파장의 레이저를 제작할 수 있다.

- 2) 양자준위간의 천이이므로 상태밀도 함수가 계단모양으로 되고 그에 따라 전자의 에너지분포가 보다 더 국재화되므로 강한 발광피크가 나타난다.
- 3) 같은 이유로 전자분포의 온도변화가 작게되므로 레이저의 온도특성이 향상된다.
- 4) 안정한 단일 종모드발진이 실현되기 쉽다.

이와 같은 특징을 가진 양자우물구조 반도체 레이저는 초격자다이오드로서는 처음으로 1984년도 시판되도록 되었다.

이상으로 초격자가 디바이스에 응용되고 있는 예로서 전자디바이스에 HEMT, 광디바이스에 양자우물구조 반도체레이저를 간략하게 살펴보았는데, 아직 시험제작 단계로서 이들이 완전히 실용화되기까지는 결정성장기술, 프로세스기술, 디바이스물리 등 다방면으로부터의 정력적인 연구가 필요하다.

6. 반도체 초격자의 앞으로의 전망

표 3에 반도체 초격자의 앞으로의 장래를 전망하여 나타낸다. III-V족 화합물반도체는 물성적으로도 비교적 잘 알려져 있으므로 초격자계의 기초물성, 기초현상을 파악하기 위하여 앞으로의 폭넓게 연구할 필요가 있다. 디바이스면과 밀접한 관계에 있는 문제로서 불순물확산에 의한 초격자의 혼정화 및 구성원소의 상호확산현상 등 초격자계에 있어서의 특이성을 명확하게 할 필요가 있다. 또 헤테로계면의 균일성의 평가도 중요한 문제로 된다. 물성적으로 상당히 흥미를 끄는 것은 초격자의 주기를 점점 작게하여 간 짧은 주기의 초격자계와 구성원소가 자유롭게 배치된 혼정계와의 물성적 차이이다. 양자의 차가 현저히 나타나는 것은 이동도일 것이다." 앞으로 짧은 주기의 초격자계와 혼정계의 전기적 성질 및 광학적 성질을 비교함으로써 초격자계의 특이점을 명확하게 할 필요가 있다.

재료면에서는 지금까지 주로 III-V족 화합물반도체를 중심으로 초격자의 연구가 진행되어 왔으나, 앞으로 II-VI족 화합물반도체 초격자와 SiGe계 초격자의 연구가 기대된다. II-VI족 화합물반도체를 구성재료로 하는 변형초격자에는 CdTe 및 HgCdTe 등 밴드갭이 작은 반도체재료를 조합한 것과 ZnS, ZnSe, ZnTe 등 밴드갭이 큰 반도체재료를 조합한 것이 있다. CdTe-HgCdTe계 변형초격자는 밴드갭을 0eV로 부터 1.44eV까지 제어할 수 있어 적외로부터 원격의 영역의 광학소자용 재료로서 주목받고 있다. 한편 ZnS, ZnSe, ZnTe 등의 반도체는 밴드갭이 크므로 청색을 중심으로 한 가시영역에서의 발광재료로서 기대된다. 그러나 이들 재료는 자기보상효과에 의해 n형이든지 p형이든지 한가지 형태밖에

표 3. 반도체 초격자의 앞으로의 전망

반도체 초격자	(1) 재료면에서의 전개	<i>pn</i> 제어	
제1단계	II-VI족 초격자	zonefolding 효과에 의한	
III-V족 화합물반도체를 중심으로 한 1차원 초격자계	SiGe계 초격자	간접·직접천이의 전환	
새로운 전개	이온성/공유성 초격자 결정/amorphous 초격자	새로운 기능의 탐색 전자·양공 초전도기구	
<ul style="list-style-type: none"> ·기초현상의 파악, 초격자계의 특성의 명확화 양자준위, subband의 효과, 변조도우핑의 효과, 공명터널효과, 계면평탄성의 평가, 제어법 ·혼정계와 짧은 주기의 초격자계와의 차이점 파악 ·불순물확산, 구성원소의 상호 확산의 특이성 해명 ·III-V족 변형초격자계의 검토 	무기, 유기계와의 적층화	새로운 기능의 탐색	
	유효질량 초격자		
	(2) 주기성의 제어	초격자 조성, 주기의 자유로운 설계	유효질량, 이동도의 제어
	·chirp초격자	·graded초격자 등	pseudo-quaternary
			새로운 기능의 탐색
	(3) 차원의 확대		
	2차원계 초격자 (Quantum wire)	디바이스의 고성능화	
	3차원계 초격자 (Quantum box)	새로운 기능의 탐색	
	(4) 헤테로계면의 제어(interface engineering)		
	(5) 초미세화에 의한 새로운 기능의 탐색		
	Aharonov-Bohm 효과		
	Superatom		

되지 않아 *pn*접합(호모접합)형 발광다이오드가 형성될 수 없다는 문제가 있다. 최근에는 변형초격자를 도입함으로써 *pn*접합형의 발광소자를 만들 수 있을 것이 기대되고 있다. 그 외 SiGe계에서는 zone folding 효과에 따른 간접, 직접천이의 전환이 예측되어져 있어, 간접천이형 재료끼리의 조합으로 직접천

이형 재료가 형성될 것이 기대된다. 또 II-VI족 반도체와 같이 이온성결합이 강한 재료와 III-V족 반도체나 Si과 같이 공유성결합이 강한 재료의 조합, 결정과 비정질재료의 조합에 의한 초격자로서 새로운 기능을 탐색할 필요가 있다.

주기성의 제어면에서는 지금까지 주로 두

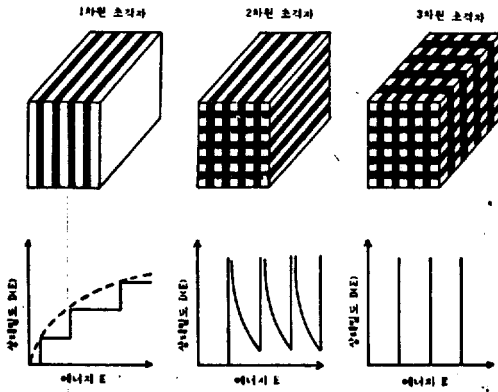


그림 17. 초격자 구조와 전자의 상태밀도 함수

개의 반도체층의 두께 L_A , L_B 를 기본단위로 하여 일정한 주기성을 갖도록 하였으나 앞으로는 초격자의 조성 및 주기를 자유롭게 설계하여 전자, 양공의 유효질량 및 이동도를 제어함으로써 새로운 기능을 탐색할 필요가 있다. 이런 대표적인 예가 chirp초격자¹²⁾이다. Chirp초격자는 장벽층의 두께와 우물층의 두께를 점진적으로 변화시킨 것으로 주기가 작은 곳일수록 miniband와 전도대의 바닥의 간격이 넓게 된다. 인가전압이 작을 때에는 전자가 miniband를 터널현상에 의해 투과하나, 어느 바이어스 전압하에서는 miniband가 수평으로 되어 입사전자가 반사되도록 된다. 그 결과 전류-전압 특성에 음의 저항이 나타날 것으로 예상된다. 그 외 InP와 InGaAs를 사용하여 주기가 서서히 변화하는 초격자를 만들면 외견상 4원혼정을 사용하여 graded 밴드갭을 적중한 것과 마찬가지로 재료를 형성할 수 있다(graded 초격자)¹³⁾. 원래 MBE법은 4원혼정을 형성하기 어려운데, 이런 초격자를 사용하면 4원은 아니더라도 4원과 비슷한 기능을 갖는 재료를 만들 수 있게 된다.

또 지금까지의 초격자는 모두 1차원초격자였는데, 앞으로는 프로세스기술의 발전에 따

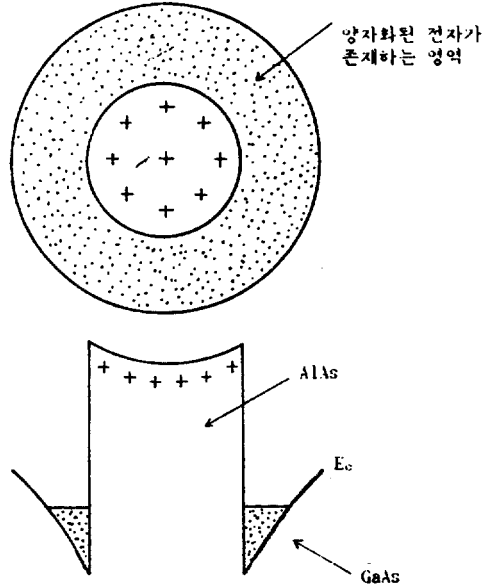


그림 18. Superatom의 구조

라 2차원계 더 나아가서는 3차원계로 차원을 확대해 나갈 것이다. 그림 17에 1, 2, 3차원 초격자구조와 전자의 상태밀도함수 $D(E)$ 를 나타낸다. 3차원 초격자구조가 실현가능하게 되면 $D(E)$ 는 δ 함수형태로 되므로 흡수나 발광피크가 보다 강한피크로 관측될 것이 기대되어 낮은 문턱치전류값을 갖는 레이저다이오우드 등을 만들 수 있다. 또한 2차원 초격자구조는 산란기구가 단순화됨에 따라 고전자이동도를 기대할 수 있어 전자디바이스면에서도 중요하다.

앞으로는 프로세스기술이 진보됨에 따라 초미세화가 보다 더 가능하게 되어 Abaronov-Bohm(AB)효과¹⁴⁾와 같은 새로운 기능의 연구가 진척될 것이다. 또한 새로운 개념으로서 그림 18과 같이 밴드갭이 큰 반도체로 이루어지는 극히 좁은 영역에 불순물을 갇히게 하면 마치 거대화된 인공원자와 같은 작용을 하는 이른바 Superatom¹⁵⁾을 만들 수 있게 될 것이다.