

半導体 超格子의 現況과 展望

Status and Prospects of Semiconductor Superlattices

李 鎭 九

동국대학교 공과대학 전자공학과

1. 序 論

정보의 다양화와 고속화는 끊임없는 시대적인 요구이다. 따라서 현실적인 또는 미래적인 요구에 부응하여 새로운 반도체 재료의 개발과 동시에 새로운 소자에 대한 연구가 부단하게 진행되고 있다. 이와 같은 연구의 결과로 반도체 산업계에서 최근에 각광을 받고 있는 반도체 재료는 III-V족 복합물 반도체이다. 특히 GaAs(Gallium Arsenide)는 Si에 비해서 약 6배 정도의 빠른 전자 이동도를 갖고 있고, Direct Band Gap이며, 비저항이 매우 큰 기관을 성장시킬 수 있는 이점 등을 갖고 있으며 이와같은 재료의 특수성 때문에 신호의 처리시간이 짧고 전력소비가 적은 고속의 집적회로와 광소자 등의 제작에 이용되고 있다.

Ternary 및 Quaternary는 Zine Blende의

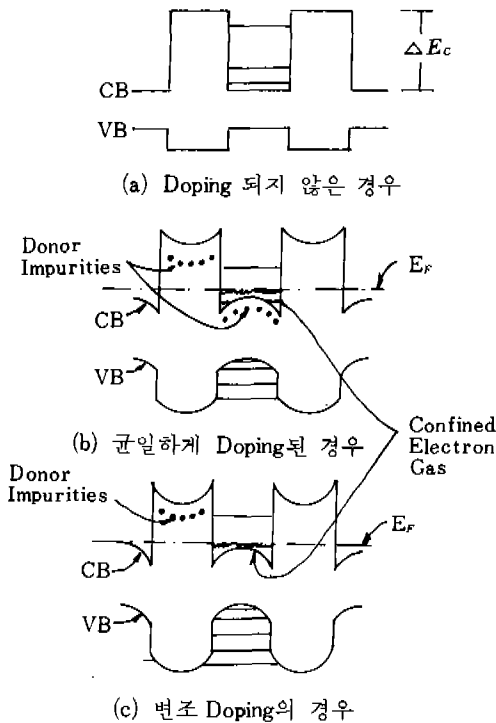
결정구조를 갖고 있는 III-V족 복합물 반도체를 적당히 혼합하여 만들 수 있는 새로운 반도체이다. 또한 Ternary 및 Quaternary를 구성하고 있는 복합물 반도체의 혼합비율을 변화시킴으로써 물성적 특성도 역시 변화시킬 수 있다. 즉 표 1은 불순물을 동일하게 Doping($N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 시킨 Binary, Ternary 및 Quaternary의 특성을 비교한 것이다¹⁾. 이와 같이 상이한 특성을 갖는 Binary, Ternary 및 Quaternary 재료를 이용하여 접합특성이 양호한 이종접합을 제작할 수 있다. 이러한 이종접합은 전자 및 정공의 운동을 제어할 수 있고 광의 발광, 투과, 반사 및 감금을 효율적으로 가능하게 할 수 있다.

Esaki와 Tsu는 상기에서 기술한 바와 같은 반도체 재료 등의 물성을 이용할 수 있는 초격자의 실현 가능성을 이론적으로 1970년에 제시했다^{2),3)}. 즉, 여러 가지 종류의 Binary 및 T

〈표 1〉 Binary, Ternary 및 Quaternary 특성비교

반도체 재료	전자이동도 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	최고속도 (10^7cm/s)	포화속도 (10^7cm/s)	비유전상수	Energy Gap (eV)	포화전계 (kV/cm)
GaAs	4500	1.86	1.33	12.9	1.439	2.96
InP	3815	2.6	1.84	12.3	1.350	4.82
$\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$	8875	2.2	1.43	13.73	0.717	1.61
$\text{InP}_{0.8}\text{As}_{0.2}$	5283	2.8	1.85	12.7	1.101	3.50
$\text{Ga}_{0.27}\text{In}_{0.73}\text{P}_{0.4}\text{As}_{0.6}$	7041	2.7	1.77	13.2	0.889	2.51
$\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}$	9377	2.2	1.41	13.8	0.708	1.50

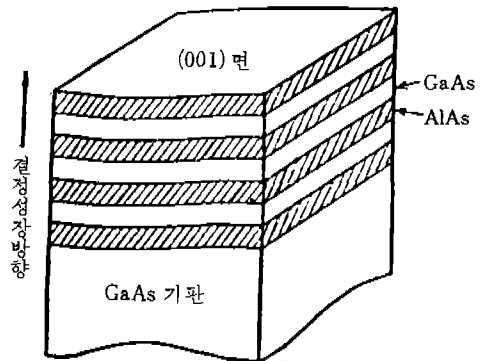
Ternary를 의도적으로 주기적인 규칙성을 갖도록 성장시킬 수 있다. 이때 주기가 길 경우에는 다중 양자우물이 된다. 그림 1은 3가지의 서로 다른 Doping 상태의 다중 양자우물의 Energy Band Diagram을 나타내었다. 이와 같은 경우의 전자 이동도는 Bulk GaAs의 전자 이동도 보



〈그림 1〉 GaAs - AlGaAs의 다중 양자우물의 Energy Band

다 상당히 크다. 만약 주기가 짧으면, 즉 결정층의 두께가 전자의 평균자유행정 정도로 얇아지면 초격자가 된다. 그림 2는 GaAs와 AlAs를 서로 반복하여 성장시킨 전형적인 초격자의 구조를 도시한 것이다.

Band Gap Engineering의 법칙을 사용해서 새로운 형태의 Band 구조를 갖는 소자의 설계가 가능하다. 그러나 초격자의 우물층이나 장벽층의 두께가 거의 2차원적인 개념을 갖기 때문에 초격자 성장시에 매우 정확하게 각 층의 두께를 제어할 수 있는 반도체 결정 성장장치가 필요하다. 따라서 현재까지는 단일 분자층 정도의 얇은 두께까지 매우 정확하게 결정층의 두께를 제어할 수 있는 MBE (Molecular Beam Epitaxy) 결정 성장장치의 개발에 힘입어 초격자



〈그림 2〉 GaAs - AlAs 초격자의 구조

의 제작이 용이하게 되었다. 그 외에 MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition), VLE (Vapor Levitation Epitaxy)⁵⁾, CBE (Chemical Beam Epitaxy)⁶⁾, HWE (Hot Wall Epitaxy)⁷⁾, 혹은 ALE (Atomic Layer Epitaxy)⁸⁾ 등의 성장방법이 초격자 제작에 응용되기도 한다.

2. 半導体 超格子의 종류

Binary 및 Ternary 등의 III-V족 복합물 반도체는 같은 결정구조를 갖고 있고 이종접합의 성장시에 격자정수의 정합이 가능하므로 성능이 우수한 초격자의 제작이 비교적 용이하다. 그러나 일반적으로 초격자의 결정층 두께는 약 80~100Å 정도이므로 격자정수가 정합되지 않아도 초격자 구조의 성장은 가능하다.

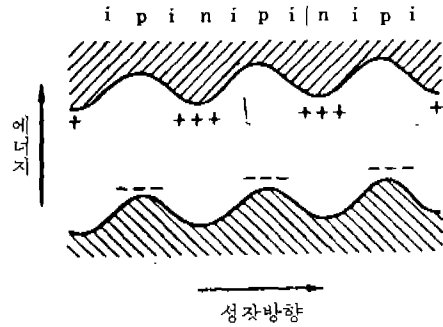
현재까지 제작 또는 제안된 반도체 초격자의 종류는 다음과 같다.

가. Doping 超格子 (Doping Superlattices)

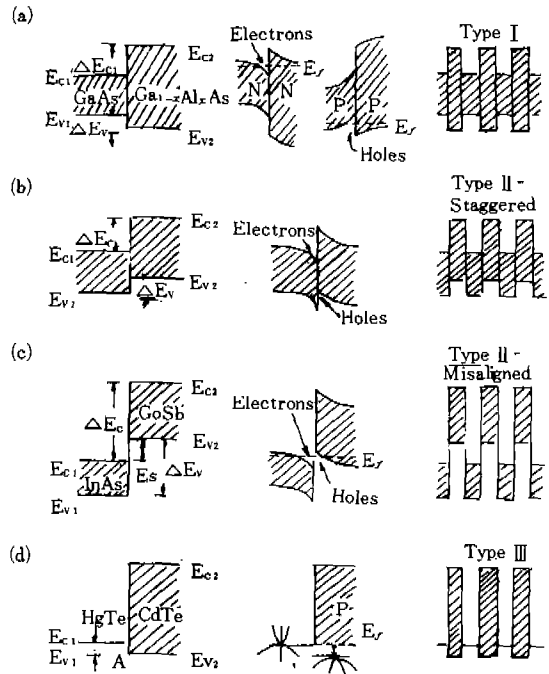
Esaki에 의해서 처음 제안된 초격자로 그림 3에 도시되어 있다^{2, 9)}. 즉, 동일한 반도체 재료에서 공간전하가 주기적으로 변화하도록 제작한 초격자이다. 예를들면 GaAs를 이용하여 Donor와 Acceptor를 교대로 Doping하면서 성장시킨 NiPi 구조의 초격자가 있다.

나. 合成超格子 (Compositional Superlattices)

그림 4에 도시된 바와 같이 Band Gap은 상이하지만 격자정수가 거의 같은 반도체를 이용한 이종접합의 주기적인 초격자이다. 여기서 ΔE_c 는 이종접합을 이루고 있는 반도체의 전자 친화력의 차이이다. 그림 4(a)는 Type I의 초격자 구조이며, GaAs-AlAs, GaSb-AlSb, GaAs-Gap 및 GaAs-AlGaAs 등의 예가 있



〈그림 3〉 Doping 초격자

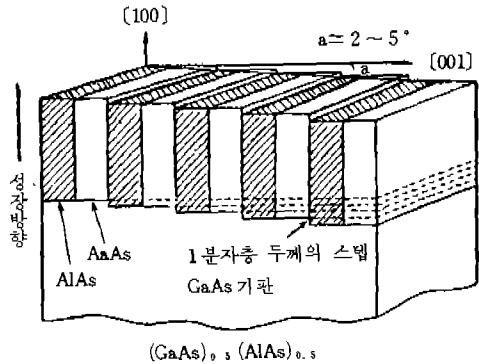


〈그림 4〉 Compositional 초격자

다. 그림 4 (b) 및 (c)는 Type II의 초격자구조이다. 예를 들면 $InAs-GaSb$, $(InAs)_{1-x}(GaAs)_x - (GaSb)_{1-y}(GaAs)_y$ 및 $InP-Al_{0.48}In_{0.52}As$ 등이 있다. 이런 경우의 Band Gap 차이는 ΔE_c 와 ΔE_v 의 차로써 결정된다. Type III 구조의 초격자는 그림 4 (d)에 도시되어 있으며 예로서는 $HgTe-CdTe$ 등이 있다.

다. 變形層 超格子 (Strained Layer Superlattices)

합성 초격자와 비슷한 구조이지만 격자정수가 상이한 반도체로 제작된 초격자이다. 즉, 반도체 결정층의 두께가 매우 두꺼운 경우에는 경계면에서 전위 (Dislocation)가 발생한다. 그러나 결정층의 두께가 매우 얇은 경우는 결정격자가 탄성한계 내에서 신축하여 전위 (Dislocation)의 발생을 억제하기 때문에 초격자의 제작이 가능하며, 예로서는 GaP-GaAs_xP_{1-x} 등이 있다.



〈그림 5〉 Submonolayer 초격자

라. 多結晶形 超格子 (Polytype Superlattices)

3종류 이상의 반도체 재료를 조합하여 제작한 초격자이며, Energy Band 구조는 Type I 과 Type II를 혼합한 형태로서 매우 복잡하게 된다. 예를 들면 InAs-GaSb-AlSb 등이 있다.

마. 有效質量 超格子 (Effective Mass Superlattices)

전자 친화력은 같고 유효질량이 상이한 2종류의 반도체를 조합한 새로운 형태의 초격자에 대한 제안이다. 아직까지는 연구단계이지만 이론적으로는 가능한 초격자 구조이다. 즉, 주기적인 양자우물은 형성되지 않지만 유효질량이 다르기 때문에 전자의 양자효과가 형성될 수 있다.

바. Submonolayer Superlattices

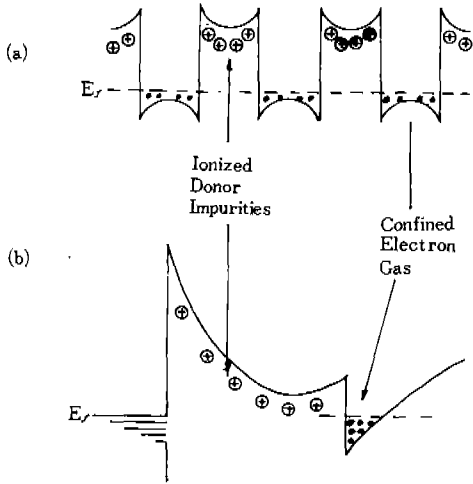
그림 5와 같이 반도체 결정격자의 임의의 면으로부터 약 2~5° 경사지게 만든 기판 위에 2종류의 반도체를 단일 분자층 보다 얇게 성장시킨 초격자이다. 결정층의 성장방향과 수직으로 주기성을 갖는 새로운 초격자의 제안이다. 그림 5는 GaAs와 AlAs를 0.5 분자층씩 성장시킨 (GaAs)_{0.5}(AlAs)_{0.5} 형태의 Submonolayer 초격자이다.

3. 半導體 超格子의 現況

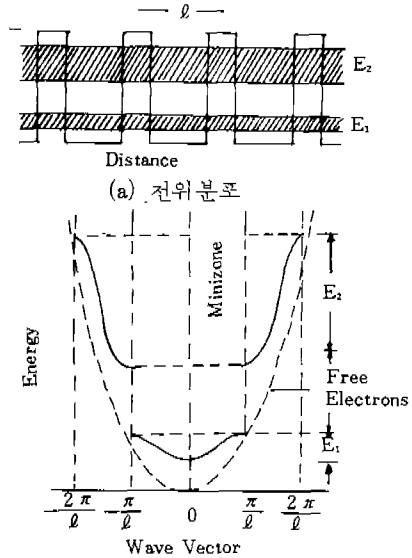
반도체 초격자를 제작하는 경우 다음과 같은 사항을 고려해야 한다. 즉, 결정층의 두께조절, 경계면의 평탄성, 경계면의 결합상태, 불순물 Doping의 제어, 경계면의 계단성과 결정층의 결정상태 등이다.

경계면의 결합상태와 불순물 Doping의 제어 등은 그림 4 (a)에 도시된 합성 초격자 (Compositional Superlattices) 구조에서 변조 Doping 상태의 전기적 특성을 위주로 연구하면 쉽게 파악할 수 있다. 그림 6에 도시된 바와 같은 반도체 초격자에서 장벽층의 Donor 불순물로 부터 자유전자는 쉽게 공간적으로 분리된다¹⁰⁾. 예를 들면 GaAs-AlGaAs 초격자에서 AlGaAs층에만 Doping을 함으로써 GaAs층에 형성되는 2차원적인 전자 Gas의 이동도는 Brooks-Herring의 이론적인 예측치를 훨씬 능가한다. MODFET (Modulation Doped FET)에서 Hall 이동도를 4.2°K에서 측정하면 약 10⁶cm²/v.s 이 상이다. 그러나 AlGaAs층의 DX-Centers 때문에 저온에서 전류-전압 특성이 현저하게 잡혀지는 단점이 있다.

일반적으로 반도체 초격자의 물리적 성질은



〈그림 6〉 초격자의 변조 Doping (a) 과 Schottky 접합 (b)

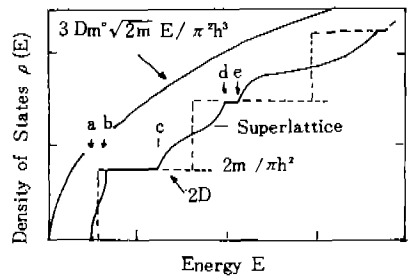


(b) Energy - Wave Vector 관계
〈그림 7〉 초격자의 전위분포와 Minizones

주기에 매우 민감하다. 초격자의 결정층의 두께가 매질내의 광파장 정도인 경우에 양자효과는 나타나지 않고 전자는 3차원적인 성질을 갖게 된다.

그러나 광학적으로는 각각의 결정층의 굴절률이 상이하기 때문에 특정파장을 선택할 수 있는 반사경이나 또는 선택적으로 광을 투과시킬 수 있는 Filter 등에 응용될 수 있는 광학적 다층박막의 제작도 가능하다.

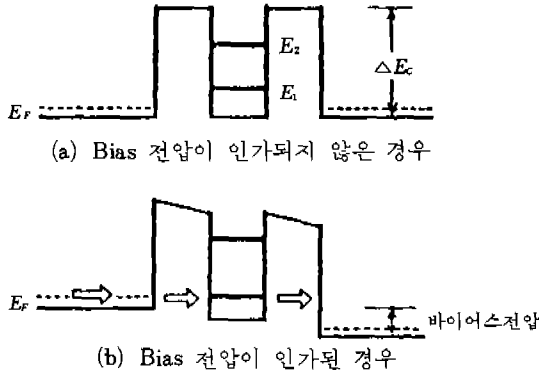
반도체 초격자의 우물층 두께가 De Broglie 파장보다 작으면 우물내에 갇혀있는 전자의 에너지는 준 2차원적으로 되어 양자 효과가 발생한다. 즉, 그림 7에 도시된 바와 같이 초격자의 주기(ℓ)는 반도체의 격자정수보다 크기 때문에 Brillouin Zone은 몇개의 Minizone으로 분할된다. 따라서 E_1 및 E_2 등과 같은 좁은 Subband가 형성된다. 이와 같이 형성된 Subband와 금지영역은 Krönig-Penny 모형을 이용하여 이론적으로 해석할 수 있다. 준 2차원적인 전자의 Subband는 우물층의 두께에 매우 강하게 의존하며, 상태밀도(ρ)도 그림 8에 도시



〈그림 8〉 초격자내의 3차원(3-D)와 2차원(2-D) 전자의 상태밀도 비교

된 바와 같이 2차원의 특유한 계단형태로 된다. 특히 그림 8은 3개의 Subbands E_1 (a와 b사이) E_2 (c와 d사이) 및 E_3 (e와 f사이)에 대한 2차원적인 상태밀도의 변화를 도시한 것이다⁹⁾.

초격자의 주기가 de Broglie 파장 정도로 되면 우물층내에서 양자화되어 있는 전자가 장벽층을 통과하는 Tunnel 현상이 일어난다. 그림 9 (a)와 같은 Energy 상태의 초격자에 인가된 Bias 전압[V]이 양자우물내의 전자 Energy 준위와 같게 되면 (그림 9 (b)) Tunnel 전류가 크게 증가하는 공진 Tunnel 현상이 발생한다. 이와같



(그림 9) 초격자내의 양자화와 공진 Tunnel

은 현상을 이용하면 약 2.5THz까지 동작할 수 있는 Diode를 제작할 수 있다.

Pin Diode의 i영역을 다중 양자우물 또는 초격자로 매치한 저잡음 광 검출기가 보고되고 있다. 즉, 입사광에 의해서 생성된 전자·정공 쌍이 분리되어 전자는 전도대의 우물에 갇히고, 정공은 가전도대의 우물에 갇힌다. 이때 전도대와 가전도대의 우물을 구성하고 있는 반도체 재료가 상이하여 전자와 정공의 이온화 비율이 증가하기 때문에 저잡음이 예상된다.

GaAs, InP 또는 PbTe 등을 이용하여 제작된 NiPi 초격자에 광을 조사하여 생성된 전자·정공 쌍은 공간적으로 분리되어 평균수명이 매우 길어진다. 그리고 분리된 잉여 반송자는 주기적인 전위장벽의 진폭을 감소시키는 역할도 할 수 있다. 따라서 Pumping Energy가 적게 소요되는 Laser를 제작할 수 있다.

$(\text{InAs})_{1-x}(\text{GaAs})_x - (\text{GaSb})_{1-y}(\text{GaAs})_y$ Pn 이종접합의 초격자 구조에서 x와 y성분을 영으로 접근시키면 정류특성이 없어진다.

이와같은 현상은 그림 4의 Type II-Staggered 초격자가 Type II-Misaligned 초격자로 변하기 때문에 나타난다. 즉, GaSb의 가전자대와 InAs의 전도대가 서로 겹쳐져서 반도체가 Semi-metal로 전환한 관계로 인하여 정류특성이 없

어지는 것이다.

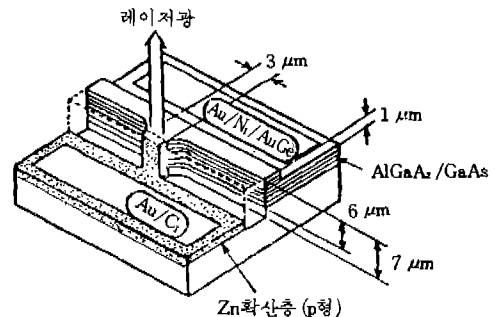
MBE로 성장시킨 Si-Si_{1-x}Ge_x와 같은 변형 층 초격자(Strained Layer Superlattices) 구조에서는 전자 이동도가 상당히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 Energy Band 구조가 간접천이형에서 직접천이형으로 변화하는 현상도 보고되었다.

GaAs-AlGaAs 초격자에서 인가된 전계가 강해지고 전자의 Energy가 커지면 GaAs층의 전자는 AlGaAs층으로 이동한다. 이때 AlGaAs층의 Energy Band Gap, 유효전자질량 및 유효전자질량 등이 GaAs에 비해서 크다. 이와 같은 경우의 전자의 천이가 부저항 특성을 나타내는 RST(Real Space Transfer) 현상이다. 이론적으로 RSTED(Real Space Transfer Electron Devices)는 100GHz까지의 발전이 가능하다.

CdTe-CdMnTe 및 ZnSe-ZnMnSe와 같은 구조의 초격자는 최근들어 제작된 Dilute-Magnetic Superlattices이며 Magneto-Optical 특성이 양호하다. 표 2에는 현재까지 보고된 반도체 초격자중에서 대표적인 초격자를 열거했다.

4. 半導體 超格子의 應用과 展望

반도체 초격자의 응용은 전기적 및 광학적 특성을 자기 이용하는 것으로 크게 분류할 수 있



(그림 10) 분포궤환형 면발광 Laser

(표 2) 초격자의 예

초격자 재료	성분	격자 부정합 (%)	성장기술	비고
IV / IV Si-Si _{1-x} Ge _x	x=0.22 x<0.22	0.92	MBE, CVD	Dislocations Mobility Enhancement
II - W / II - VI CdTe-HgTe		0.74	MBE	Theoretical Magneto-Optics
IV - W / IV - VI PbTe-Pb _{1-x} Sn _x Te	x=0.2	0.44	Hot Wall	Interdiffusion Magnetotransport
PbTe-Pb _{1-x} Ce _x Te	x=0.03	-	MBE	Dislocations Interdiffusion
Ultrathin Layer Superlattices GaAs-AlAs GaAs-InAs AlGaAs-Ge			MBE	Metaburgical Optical Properties
Doping Superlattices P and N GaAs			MBE	
Polytype Superlattices InAs-GaSb-AISb			MBE	

초격자 재료	성분	격자 부정합 (%)	성장기술	비고
III - V / III - V GaAs-AlGa _{1-x} As GaAs-AlAs InAs-GaSb In _{1-x} Ga _x As-GaSb _{1-y} As _y GaSb-AISb		0.16 0.61 0.66	MBE, MOCVD MBE MBE	Optical Properties Transport
InAs-AISb InAs-AISb _y As _{1-y} InP-In _{1-x} Ga _x P _{1-y} As _y	x=0.1 y=0.26	1.26 ~0.0 ~0.0	MBE LPE	D-H Lasers
InP-In _{1-x} Ga _x As _x	x=0.47	~0.0	MOCVD	May Transport
GaAs-GaAs _{1-x} P _x	x=0.5 x<0.5	1.79	MOCVD	X-ray Analysis Stimulated Emission
GaP-GaP _{1-x} As _x	x=0.5 x<0.5	1.86	MOCVD	PL Interdiffusion
GaAs-Ga _{1-x} In _x As GaP-AlP GaSb-InSb	x=0.2	1.43 0.01 0.29	MBE - Sputtering	Transport Theoretical Interdiffusion
IV / III - V Ge-GaAs Si-GaP		0.08 0.36	MBE -	Metaburgical Theoretical

다. 전기적 특성의 대표적인 변조 Doping의 경우에는 우물층에 감금된 전자는 불순물의 산란에 의한 영향을 거의 받지 않고 고속으로 움직일 수 있다는 것이다. 이같은 특성이 HEMT (High Electron Mobility Transistors; MOD FET와 같음) 등의 전자소자에 응용되고 있다. 또한 전자가 Tunnel 현상에 의해서 장벽층을 통과해서 운동할 수 있는 특성을 이용하여 매우 높은 주파수대에서 사용할 수 있는 소자가 제작되고 있다. 그 외에도 반도체 초격자의 Hot 전자 또는 RST에 의한 부성저항 특성을 이용하여 여러가지의 새로운 전자소자가 제안되어 시험적으로 제작되고 있다.

양자 우물형 Laser, 분포궤환형 면 발광 Laser, 초격자형 APD (Avalanche Photodiode) 와 광 쌍안정성 소자 등이 광학적 특성을 이용한 것이다. 다중 양자우물의 구조를 갖는 반도체 Laser는 Band 단의 상태 밀도가 크고 주입된 반송자가 효율적으로 감금되어 효과적으로 재결합을 할 수 있다. 그림 10에 도시한 분포궤환 면 발광 Laser는 초격자층 양자우물로 직접 사용한 예는 아니지만 분포 궤환방식을 이용함으로써 특정한 파장의 광만을 선택하는 데 매우 효율적이다. 즉, 분포궤환은 광의 도파로에 회절격자를 구성함으로써 특정한 파장을 선택할 수 있다. 회절격자는 굴절률이 상이한 GaAs-AlGaAs 층을 수 100Å씩 주기적으로 성장시킨 초격자 구조이다. 따라서 면 발광 Laser는 발사광을 결정의 성장방향에서 얻을 수 있기 때문에 광 집적회로의 구성을 용이하게 한다.

반도체 초격자를 이용하여 제작된 소자의 신뢰도를 개선하기 위해서는 III-V족 복합물 반도체가 갖고 있는 특이한 Deep Levels, 이중 접합을 성장시킬 경우에 생성되는 경계면의 결함 및 초격자 구조의 안정성 등에 대한 깊이 있고 집중적인 연구가 필요하다. *

참고문헌

- (1) R. S. Pengelly, "Microwave Field-Effect Transistors Theory, Design and Applications", Research Studies Press, 1982.
- (2) L. Esaki and R. Tsu, "Superlattice and Negative Conductivity in Semiconductors," IBM Res. Note, RC-2418, Mar. 1969.
- (3) L. Esaki and R. Tsu, "Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductor," IBM J. Res. Develop. pp. 61-65, Jan. 1970.
- (4) D. K. Ferry, "Gallium Arsenide Technology," Howard W. Sams & Co., Inc., 1985.
- (5) H. M. Cox, "Vapor Levitation Epitaxy: A New Concept in Epitaxial Crystal Growth," Journal of Crystal Growth, Vol. 64, 641, 1984.
- (6) W. T. Tsang, "Chemical Beam Epitaxy of InP and GaAs," Appl. Phys. Lett., Vol. 45, pp. 1234-1236, Dec. 1984.
- (7) H. Fujiyasu, et al., "Optical Properties of ZnS-ZnSe Superlattices Prepared by HWE", in Proc. 17th Int. Conf. Phys. Semiconductors, San Francisco, CA, Aug. 1984, pp. 539-542.
- (8) M. Pessa and Julhä, "Growth of Cd_{1-x}Mn_xTe Films with 0 < x < 0.9 by Atomic Layer Epitaxy", Appl. Phys. Lett., Vol. 45, pp. 646-648, Sept. 1984.
- (9) L. Esaki, "A Bird's-Eye View on the Evolution of Semiconductor Superlattices and Quantum Wells", IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-22, 1611, Sept. 1986.
- (10) R. Dingle, et al., "Electron Mobilities in Modulation Doped Semiconductor Heterojunction Superlattices", Appl. Phys. Lett., Vol. 33, pp. 665-667, Oct. 1978.