

초격자 구조를 이용한 반도체 소자의 연구 동향

李承昌

韓國電子通信研究所 新素子材料室

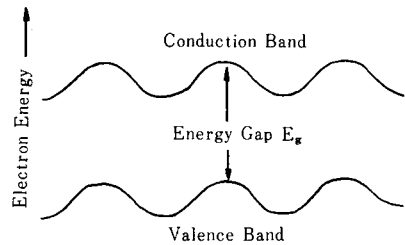
I. 서론

반도체 분야에서 초격자 구조라는 것은 반도체 band gap의 공간적 변화가 구성 물질의 격자상수 크기보다 일차원 혹은 이차원적으로 더 큰 주기성을 갖는 구조를 의미한다. 이와 같은 구조를 얻는 방법으로 band gap이 같지 않은 두가지 이상의 반도체를 주기적으로 번갈아 성장시키거나, 혹은 불순물의 종류나 주입 농도를 주기적으로 변화시키는 등의 방법이 있는데 흔히 전자층 heterostructure superlattice, 후자를 doping superlattice라 부른다. 그림 1은 이와 같은 초격자 구조의 band diagram으로 성장 방향으로 일차원적 주기성을 갖는 초격자 구조의 band 구조를 나타낸 것이다. Heterostructure superlattice는 band alignment 정도에 따라 다시 type I, II superlattice로 분류되기도 한다.^[1]

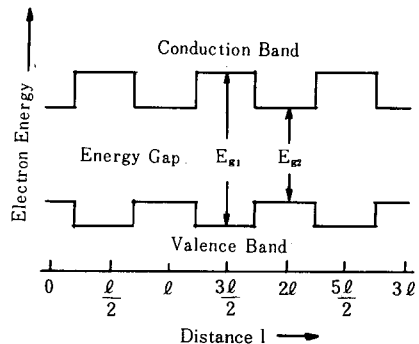
초격자 구조는 구조상 다중 양자샘(multiquantum well, MQW)과 유사하나 MQW와 구별할 수 있는 특성을 가지고 있다. MQW가 well 간의 상호작용을 거의 무시하여 단일양자샘(single quantum well, SQW)의 array와 같은 구조의 특성을 갖는다면 초격자 구조는 well간의 상호작용 특히 tunneling 효과가 중요시되는 구조로 이와 같은 효과가 주로 반도체 소자 내에서 초격자 구조의 역할을 결정해 준다. Tunneling이란 barrier가 충분히 두꺼울 때 서로간의 상호작용이 거의 없이 인접한 well에 분리 속박되어 있던 electron이나 hole이 barrier가 얇아짐에 따라 이들 입자들이 인접 well에 존재할 확률을 무시할 수 없는 상태에 이르는 현상을 의미한다.

초격자 구조에서 이와 같은 tunneling 효과에 영향을 미칠 수 있는 요인은 barrier 두께 뿐만 아니라

well의 두께나 well과 barrier의 조성비 차이 등도 영향을 미친다. 물리적으로 이들 구조의 일차원적 특성을 잘 설명할 수 있는 모형으로 Kronig-Penney 모형이 있는데 이 모형에 따르면 초격자 구조에서는 well의 양자적 속박 효과(confinement effect)와 함께 well간의 상호작용에 의하여 electron이나 hole이 subband 혹은 miniband라 불리는 새로운 band를 형성하게 되는데 이러한 성질은 초격자 구조가 가지는 저차원적 특징으로서 bulk와는 구별되는 성질이다. 현



(a) Doping superlattice



(b) Heterostructure superlattice

그림 1. 초격자 구조의 band 구조

재 연구중인 초격자를 이용한 반도체 소자들은 이들 구조의 conduction band와 valence band간의 전이현상(interband transition)뿐만 아니라 각 band의 subband간의 전이현상(intersubband transition) 또한 중요한 응용 대상이 되고 있다. 대부분의 광소자들이 interband transition을 이용하나 최근들어 적외선 발광 소자로 intersubband transition을 이용하는 방법이 제안되고 있으며 전기소자 가운데에도 단순히 subband의 tunneling 효과를 이용하는 소자외에도 intersubband transition을 이용하는 resonant tunneling diode 등의 연구도 많은 관심을 끌고 있다. 이들 구조를 소자에 적용하기 위해서는 불순물의 주입이 필요한데 주입방법도 주기성을 갖게 할 수 있어서 저온에서 전자의 움직임의 제한 요소인 impurity scattering을 최소화하거나(modulation doping) alloy layer내에서 불순물이 DX center화 하는 현상을 억제함으로써(antimodulation doping) 저온에서의 소자특성을 향상시킬 수 있다.

최근들어 molecular beam epitaxy(MBE)나^[2] metal organic chemical vapor deposition(MOCVD)과^[3] 같은 진보된 성장법과 함께 초격자 구조와 같은 양자 효과를 이용한 소자의 구현을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있고 많은 새로운 제안들이 제시되고 있으나, 초격자 구조를 실제로 적용하는 문제는 대부분이 아직도 초기 연구단계라 할 수 있다. 초격자를 구성하는 물질들은 band gap이 다를 뿐만 아니라 격자 상수나 열팽창계수도 달라 이러한 구조를 성장하는 과정에서 우선적으로 이러한 장애요인들을 극복하고 양질의 epilayer를 얻는 것이 매우 중요하다. 반면에 이러한 성질의 차이가 오히려 장점으로 소자에 적용되는 경우가 있는데 최근의 strained superlattice 등의 연구가 활발한 것도 이러한 이유에서라 하겠다. 따라서 과거에는 AlGaAs/GaAs 물질계나 InGaAsP/InP 물질계와 같은 lattice matched superlattice가 주 연구 대상이었으나 현재는 구성물질의 고유성질에 별달리 구애받지 않고 IV족, III-V족, II-VI족에 이르는 각종 반도체의 heterostructure와 초격자 구조 모두가 연구대상이라 할 수 있다.

초격자 구조는 직접적으로 active layer로 사용되기도 하나 때로는 소자의 성능을 향상시키기 위하여 buffer layer와 같이 간접적인 수단으로서 사용 연구되고 있다. 본 논문에서는 광소자와 전기소자를 망라하여 초격자 구조가 직접 active layer로 연구되고 있는 주요 소자의 연구 현황과 기술 수준을 요약 기

술한다.

II. 본 론

1. 광소자

광소자 분야에서 초격자 구조가 많이 쓰이는 소자는 역시 laser diode(LD)이다. LD는 개발초기부터 주로 광통신 분야에서 많이 사용되어 왔으며 그외에도 초격자 구조를 응용하는 다양한 형태의 소자가 개발중이다.

현재의 반도체 laser diode의 연구 동향은 기능면에서는 가시광선이 출력가능한 visible LD, 통신용 LD와 고출력 LD 등에 집중되고 있으며, 성능면에서는 임계전류의 극소화, 소자의 소형화 및 집적화, 고속화와 더불어 수명 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 구조면에서는 edge-emitting 구조와 함께 surface-emitting 구조에 관한 연구가 폭넓게 이루어지고 있으며 최근에는 광신호 처리를 위한 직경 수 μm 에 임계전류 수 mA를 갖는 미세 laser인 micro-resonator에 관한 연구도 많은 관심을 끌고 있다. 이들 LD 소자들은 bulk나 heterostructure, quantum well 혹은 초격자 구조를 이용하여 제작되고 있다. Visible LD의 경우 670nm 파장에 CW 동작으로 3~5mW 출력을 갖는 AlGaInP/GaAs LD가 이미 상품화되어 시판되고 있으며 최근에는 상온에서 630nm 파장대까지 진전된 실험결과도 발표되었다.^[4] 통신용 LD의 경우 1.3~1.55 μm 파장대의 InGaAs/InP LD에 관한 연구와 single mode를 낼 수 있는 LD, 원거리 통신을 위한 고출력 LD의 연구가 활발한데 한 예로 distributed feed-back LD(DFBLD)등의 연구가 이루어지고 있다. 고출력 LD 분야는 GaAs/AlGaAs quantum well array를 주로 사용하여 CW 동작으로 76 W, pulse 동작으로 2 KW에 이르는 높은 효율의 고출력 LD가 제작 발표된 바 있으며, phase-lock array를 이용하여 출력광의 위상을 결합하여 방사각도를 줄이는 연구도 이루어지고 있다.

일반적으로 초격자 구조는 LD 소자내에서 active layer로 직접적으로 사용되는 기능과 함께 substrate와 LD 구조와의 사이에 lattice mismatch 등이 존재할 때의 완충층 역할(superlattice buffer)^[5], active layer의 속박 효과를 증가시키고 bulk alloy cladding layer의 결정결함을 보완해 주는 역할(superlattice interface)^[6-7] waveguide 혹은 reflector 등의 기능을 가지고 있는데^[8] 이러한 기능들은 임계전류를 낮추는 데도 기여하고 있다.

격자상수가 다른 물질계에서 strained superlattice 형태로 초격자 구조를 active layer로 사용할 경우 QW LD에 비하여 보다 낮은 임계전류에서 작동될 수 있으며 따라서 온도에 대한 안정성 역시 우수한 것으로 나타난다. 또한 SL의 두께 주기, 불순물 농도나 조성비 변조 주기를 변화시키거나 lattice-mismatch에 따른 구성물질의 band 구조의 변화를 이용하여 출력광의 파장을 변화시킬 수 있는 이점이 있는데 최근에는 lattice mismatch가 비교적 큰 strained superlattice에 대한 연구가 이와 같은 특성과 함께 활발히 진행되고 있다.

최근의 초격자 LD 연구의 한 분야로 적색광이나 청색광을 얻기 위한 연구가 진행되고 있다. 한 예로 H. Imamoto 등은^[9] MBE로 성장한 $(AlGaAs)_m(GaAs)_n$ short period superlattice를 이용하여 $300\mu m$ cavity length를 갖고 $100^\circ C$ 범위내에서 $720nm$ 파장에 임계전류 $24mA$, 75% differential quantum efficiency를 갖는 LD를 발표했다. 그림 2는 이들이 발표한 LD의 초격자 구조 및 소자 개략도이다. 그림 2에서 보듯이 alloy 대신에 short period SL을 사용한 이유는 well의 균일도와 active layer의 질적 향상을 위함이고 아울러 graded index, separate confinement heterostructure (GRIN-SCH) SLLD와 달리 하나의 Al cell 만으로도 성장이 가능하다는 장점 때문이다. GRIN-SCH 구조는 그림 3과 같이 cladding layer의 Al 조성비를 active layer에 접근함에 따라 감소시킴으로써 carrier의 속박효과를 강화시킴과 동시에 임계전류를 감소시키는 기능을 가지고 있는데 H. Z. Chen 등은^[10] 초격자로 구성된 이와 같은 구조의 cladding layer를 사용하여 최저 $80A/cm^2$ 의 전류를 갖는 $AlGaAs/GaAs$ QWLD를 발표한 바 있다.

청색광 LD는 $InGaAs/InP$ 물질계에서 strained superlattice를 이용하여 $0.9\mu m$ 파장대의 출력광을 ADP나 KDP와 같은 nonlinear optic material을 통하여 frequency doubling을 하는 방식으로 $0.45\mu m$ 대의 청색광을 얻는 연구가 진행되고 있다. II-VI족 화합물 반도체 물질계에서도 청색광을 얻기 위한 연구도 시도되고 있는데 최근자에 K. Nakanishi등이^[11] $GaAs$ wafer위에 metal-organic vapor phase epitaxy(MOVPE)를 이용하여 $0.48\mu m$ $ZnS_{0.09}Se_{0.91}$ 의 buffer layer를 쌓고 $(150\text{ \AA} - ZnS_{0.18}Se_{0.82}) / (150\text{ \AA} - ZnSe)$ layer를 16번 반복하여 성장한 cavity 길이 $1.5mm$ LD 구조를 N_2 -laser로 pumping 하여 $260K$ 에서 약 4620 \AA 의 파장을 내는 실험결과를 발표하였다. 그들은 단파

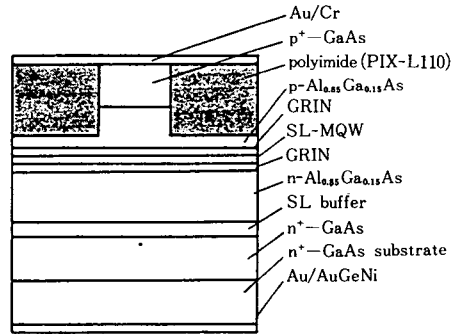
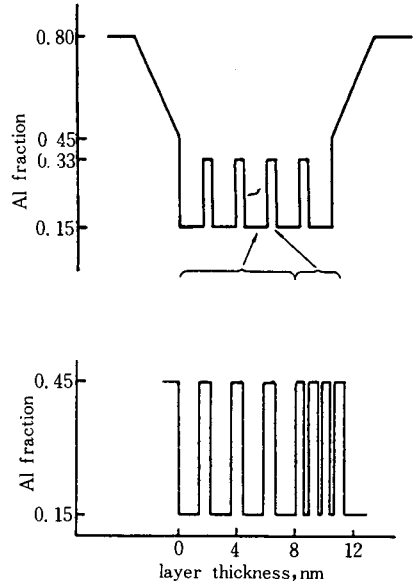


그림 2. $(AlGaAs)_m(GaAs)_n$ short period superlattice를 사용한 laser diode

장을 출력시킬 수 있는 원인으로 misfit dislocation의 감소와 heterobarrier의 높이 증가를 통해 thermionic emission을 억제했기 때문으로 분석하고 misfit dislocation을 줄이면서 더 큰 band offset을 갖는 구조를 성장할 수 있다면 보다 높은 온도에서도 작동이 가능할 것으로 예견했다.

통신용 LD분야에서 초격자 구조는 $InGaAs/InP$ 초격자 구조가 $1.5\mu m$ 파장대에서 bulk $InGaAsP$ LD에 비하여 좁은 spectral linewidth와 더 큰 값의 이완 진동 주파수(relaxation oscillation frequency)와 출력

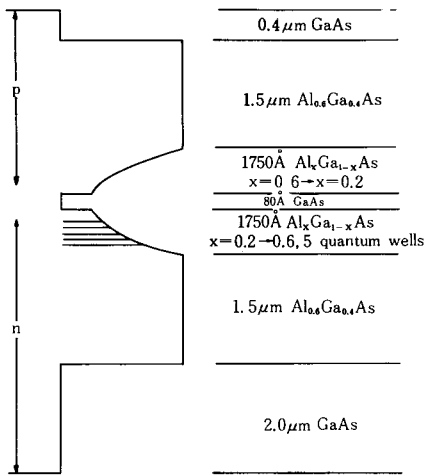
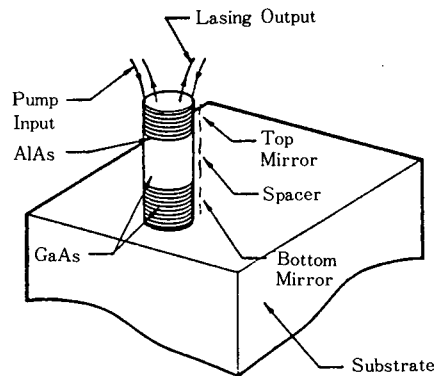


그림 3. Superlattice를 cladding layer로 사용한 GRIN-SCH laser diode

을 갖는 이점 때문에 그동안 지속적으로 연구되어 왔으며 최근에는 lattice-matched $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ 와 더불어 이보다 더 좋은 성능을 보일 것으로 제시된 strained-layer $InGaAs/InP$ 의 연구도 관심을 끌고 있다. Strained superlattice를 active layer로 사용할 경우 valence band의 heavy hole과 light hole의 splitting에 의한 효과로 임계전류의 감소와 Auger recombination이나 intervalence band absorption을 줄일 수 있는 장점이 있는데^[12] 한 예로 최근에 P. Thijs와 T. Dongen 등은^[13] low-pressure (LP) MOVPE로 성장된 biaxially compressed $In_{0.8}Ga_{0.2}As/InP$ 초격자 LD에서 lattice matched $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ 소자보다 개선된 성능을 관측하였다고 발표했다. 이들은 30 Å well 두께를 갖는 $In_{0.8}Ga_{0.2}As/InP$ 초격자 구조를 active layer로 사용하는 cavity length 200~1500 μm의 double channel planar buried heterostructure (DCPBH) LD를 제작하여 이들 소자가 differential external efficiency 82%, cw 동작에서 1.5 μm 파장으로 최고 200 mW의 출력으로 8500시간 이상의 수명을 갖고 있음을 발표했다.

최근의 흥미있는 연구 분야 중의 하나로 관심을 끌고 있는 microcavity laser 혹은 microresonator라는 소자가 있는데 이 소자는 굳이 SL 구조라고는 할 수 없으나 AlAs와 GaAs를 번갈아 성장한 다층박막 구조를 laser의 reflecting mirror로 사용하는 surface

emitting 형태의 laser 소자이다. 그림 4는 J. L. Jewell 등이^[14] MBE와 reactive ion beam etching으로 제작 발표된 microresonator 혹은 microcavity surface emitting LD로서 GaAs wafer 위에 (813 Å-AlAs)/(594 Å-GaAs) (quarterwave-stack mirror)를 9 1/2번 반복하여 성장하고 1.6 μm의 GaAs spacer를 성장한 뒤 다시 (813 Å-AlAs)/(594 Å-GaAs)를 7 1/2번 반복하여 총 두께를 약 4 μm로 성장한 뒤 직경 약 1.5 μm의 cylinder waveguide를 etching하여 만든 소자의 도식도이다. 앞으로의 chip간의 data 전송이나 다른 형태의 통신 응용에 있어서 극도의 낮은 임계전류를 갖는 high speed laser가 절대적으로 필요하게 되는데 cavity mirror가 고반사율을 갖는 것 역시 임계전류를 낮출 수 있는 좋은 방법중의 하나이다. Surface emitting (SE) LD는 이러한 요구에 적절히 부응할 수 있는 소자로 그림 4와 같은 vertical cavity 구조를 사용한다면 AlAs/GaAs 구조를 reflecting mirror로 사용하여 99% 이상의 고반사율을 얻을 수 있기 때문에 임계전류를 낮출 수 있는 중요한 요인이 된다. 또한 짧은 길이의 cavity length를 정확히 조절할 수 있으며 single mode 작동을 할 수 있고 narrow circular beam을 얻을 수 있는 장점이 있다. 현재 보고된 microresonator의 임계전류 최소치는 약 0.7 mA이나 이 값은 이론치에 비하면 아직도 높은 수치인데 현재 이 분야의 목표는 직경 1 μm 이하에서 임계전류 수 μA의 소자 실현에 있다.



검은색층-AlAs, 흰색층-GaAs.

그림 4. AlAs/GaAs microresonator의 개략도

Switching device는 변조 가능한 파장대가 넓을수록, contrast ratio가 높을수록 효율적이며 integrated circuit (IC)에 적용하는 전원으로 구동 가능한 고속 소자가 요구된다. Switching device 분야에서 초격자 구조 응용은 이들 구조가 bulk와는 달리 상온에서도 exciton 현상을 갖고 있다는 점을 이용하여 이들 exciton peak의 변조를 응용하는 연구가 활발하다. 초격자 구조는 tunneling 효과에 의하여 이 구조를 이루는 QW와 동일한 두께의 well과 조성비의 barrier로 구성된 SQW에 비하여 낮은 energy 준위를 갖는 subband를 형성하게 된다. 이와 같은 초격자 구조 양단에 그림 5에서와 같이 전압을 가해주면 각 well 상의 전압강하에 의하여 tunneling 효과가 감소하게 된다. 이것은 그림 5의 초격자 특성이 SQW의 특성 쪽으로 변화를 의미하는 것으로 곧 subband energy 준위의 증가와 더불어 effective band gap이 증가하는 이른바 blue shift 현상으로 나타난다. ($E_g < E_g^0$) 그림 5에서와 같은 상태의 energy 준위를 Stark ladder라고도 하며 이와같은 현상을 Wannier-Stark localization이라 부른다.^[15] 초격자 구조의 이와 같은 특성은 modulator 등의 응용에 적합하며 한 예로 J. Bleuse 등이^[16] MBE를 이용하여 $n^+ - \text{InP}$ wafer 위에 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (50 Å) / $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.24}\text{In}_{0.52}\text{As}$ (55 Å) 구조

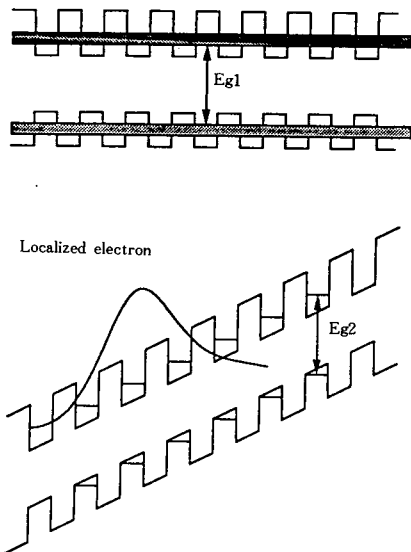


그림 5. Wannier-Stark localization 효과에 의한 electro-optic modulator의 작동원리

를 성장한 electro-optic modulator를 발표했으며 E. F. Schubert 등은^[17] 이와는 다소 다른 GaAs doping superlattice를 이용하여 contrast ratio 1.7에 5V 이하에서 구동되는 modulator를 제작 발표하였다. 이러한 switching device들은 작은 switching energy를 갖는 장점을 갖고 있으며 tunable detector 등에 이용될 수 있다.

Photodetector나 infrared 분야에서도 초격자 구조의 응용은 폭넓게 연구되고 있다. Metal-semiconductor-metal photodiode(MSM-PD)는 lateral, planar 구조를 갖고 있어서 bias가 걸린 상태에서 semiconductor layer가 공핍되었을 때 매우 작은 capacitance를 갖게 되므로 고속 저잡음 PD에 응용할 수 있다. MSM-PD는 FET와 같은 전기소자들과 함께 광전 회로에 집적할 수 있는 장점이 있으나 기존의 장파장대(1.0~1.6 μm)에서의 적용은 InGaAs 물질계가 낮은 Schottky barrier height($\sim 0.2\text{eV}$)를 갖고 있기 때문에 과도한 dark current가 문제가 되어 그 응용이 제대로 연구되지 못했다. 그러나 최근에 이러한 PD의 metal-semiconductor 접합부분에 metal 쪽에는 Schottky barrier height가 큰 물질을 성장하고 이것과 InGaAs 물질계 사이에 lattice mismatch를 이완시켜 주기 위한 compositional grade superlattice를 삽입시켜서 Schottky barrier의 높이를 증가시키는 한편 광여기 전자의 속박 효과를 증가시키고 동시에 lattice mismatch에서 생길 수 있는 nonradiative recombination center의 수를 감소시키는 기능으로 PD의 성능을 향상시킨다.^[18-19] 한 예로 O. Wada 등은^[19] InP wafer 위에 MBE로 성장한 그림 6과 같은 $\text{In}_{0.25}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ graded superlattice PD 구조에서 bias voltage 10V 하에서 가지고 100nA 이하의 40fF의 capacitance를 1.3 μm 파장대에서 dark current와 80% 이상의 internal quantum efficiency를 갖는 InAlAs/InGaAs MSM-PD를 제작하였다. 이들은 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 가 InP와 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 에 lattice match가 되면서 큰 값의 Schottky barrier height($\sim 0.82\text{eV}$)를 갖는다는 점을 이용하여 그림 6과 같이 InP wafer 쪽으로 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 층의 두께를 감소시키는 반면에 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 층의 두께를 증가시키는 방법으로 초격자 구조를 사용하였다. 이 소자는 반응속도 또한 14.7ps로 이와 같은 MSM-PD 소자는 고속, 고감도 및 고집적화 회로의 응용이 예상된다.

Photodetector에 초격자 구조를 응용하는 또다른

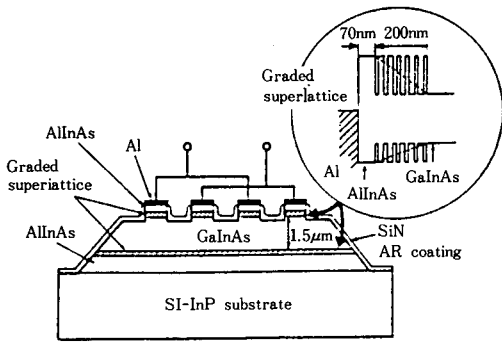


그림 6. InAlAs/InGaAs graded superlattice의 metal-semiconductor-metal photodiode의 단면도

방법으로 이른바 mass filtering 효과를 이용한 고품격 PD의 제안이다.^[20-21] 그림 7과 같은 초격자 구조에서 electron 이나 hole은 effective mass가 크게 차이나기 때문에 초격자 구조내의 barrier tunneling rate 에도 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 광여기된 electron 이 subband상에서 tunneling 할 수 있는 반면 hole은 여기된 well에 속박된 채 국소화되어 있게 된다. 이 경우 PD의 current gain은 electron의 transit time t_e 에 대한 PD의 response time 혹은 electron의 life time τ 의 비율로 결정되는데 t_e 는 barrier 두께가 증가함에 따라 지수함수적으로 증가하고 well 두께에도 크게 의존하므로 $gain(=\tau/t_e)$ 은 초격자 구조를 변화시키기에 따라 큰 폭으로 변화하게 된다. F. Capasso등은^[20] MBE를 이용하여 n^+ -InP wafer 위에 $In_{0.53}Ga_{0.47}As(35 \text{ \AA})/In_{0.53}Al_{0.48}As(35 \text{ \AA})$ 를 100번 반복하여 성장한 구조에서 $1.3 \mu m$ 파장대에서 mass filtering 효과에 의한 2×10^4 이상의 current gain을 얻었다고 발표했는데 이와같은 소자는 low voltage, high current gain을 특성으로 갖는다.

만일 silicon VLSI와 silica fiber-optics, 그리고 long wavelength ($1.3 \sim 1.55 \mu m$) photodetector가 Si chip상에 집적될 수 있다면 optoelectronics 분야에서 speed나 가격면에서 엄청난 이득이 있다. 이와 같은 목적에서 $Si_{1-x}Ge_x/Si$ 초격자 구조를 이용한 PD의 연구도 많은 관심을 끌고 있다.^[22] 그림 8은 Si-SLS (strained layer superlattice)-Si p-i-n PD의 개략도로 SLS 구조중 $Si_{1-x}Ge_x$ layer가 absorbing media 역할을 하는데 Ge composition이 $0.4 \sim 0.6$ 이 $1.3 \sim 1.55 \mu m$ 파장대에 적합하다. 한 예로 H. Temkin 등

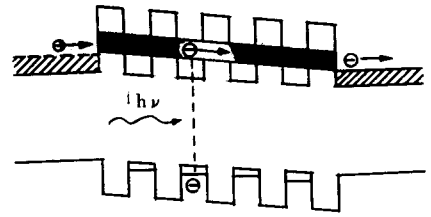


그림 7. Effective mass filtering을 이용한 photodiode의 작동원리

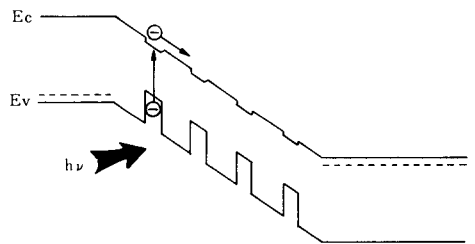
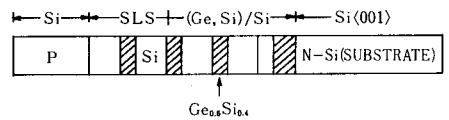


그림 8. Si-SLS-Si p-i-n diode의 시료 구조와 bias 하에서의 작동원리

은^[22] 그림 8의 SLS 구조를 $Si_{0.4}Ge_{0.6}(60 \text{ \AA})/Si(290 \text{ \AA})$ 을 20번 반복한 구조로 대체한 p-i-n detector로 $1.3 \mu m$ 파장대에서 internal quantum efficiency 40%의 측정치를 얻었다고 발표한 바 있다.

Infrared detector 분야에서는 잘 알려진 바와 같이 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ alloy가 주로 사용되어 왔으며 $HgTe$ - $CdTe$ superlattice와 같은 small-band-gap superlattice나 $InAs_{0.4}Sb_{0.6}$ - $InAs_{1-x}Sb_x$ 와 같이 internal strain effect에 의하여 $InAs_{0.4}Sb_{0.6}$ 의 band gap이 감소하는 초격자 구조를 이용한 photovoltaic detector의 연구가 계속되어 왔다. 그러나 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 물질계는 tunneling current가 큰 값을 가지고 cutoff 파장을 정확하게 조절하기 위한 조성이 정확히 제어되지 않단 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 small band gap을 갖는 III-V족 화합물을 이용하여 이를 대체하려는 연구 움직임이 있으며 특히 $InAs-Ga_{1-x}In_xSb$ 초격자 구조와 같은 strained type-II superlat-

tice가 cutoff wavelength $\lambda_c > 10\mu\text{m}$ 의 장파장대에서 적합한 소자로 제시되고 있다.^[23-24] 최근에 C. Mailhiet 등이 제안한 내용에 의하면 10~12 μm 부근에서 InAs-In_{0.4}As_{0.6}Sb 초격자 구조가 absorption coefficient가 Hg_{1-x}Cd_xTe에 비하여 큰 값을 가지고 이들 구조의 electron의 effective mass가 거의 등방성을 가지면서 tunneling current를 감소시키면 충분할 정도의 큰 값을 가지고 ($m^*_{\text{super}}/m \sim 0.05$) 동시에 큰 값의 mobility나 diffusivity를 유지할 수 있는 크기를 갖기 때문에 leakage current등이 거의 없이 Hg_{1-x}Cd_xTe alloy 보다 우수한 소자 성능을 보일 것이라고 예측했다.

소자 제작이 직접 이루어진 적은 없으나 흥미있는 제안 가운데 하나가 초격자 구조를 이용한 infrared source이다.^[25] 그림 9에서와 같이 초격자 구조의 radiative intersubband transition과 resonant tunneling 효과를 이용한 AlGaAs/GaAs infrared light-emitting diode이 제시된 바 있는데 barrier 두께를 적절히 조절하여 인접 well 간의 double-barrier를 통과하는 tunneling time이 radiative relaxation time 보다 짧게 할 수 있다면 이와 같은 소자의 실현도 가능할 것으로 생각된다.

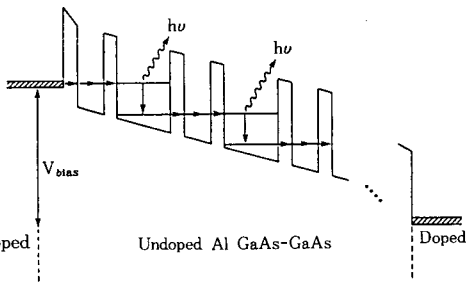
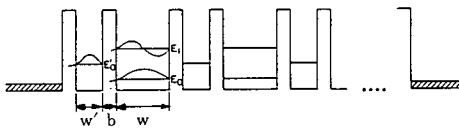


그림 9. 초격자 구조의 infrared source 작동원리

2. 전기 소자

초격자 구조를 이용하는 전기 소자는 heterostructure나 quantum well 구조를 이용하는 소자에 비하여 그다지 많지 않은 편이다. 한 두가지의 device를 제외하고는 초격자 구조는 시험적으로 적용되는 정

도의 수준에 불과하지만 microwave 소자와 고속소자 분야에서 다양한 가능성을 가지고 연구되고 있다.

Esaki와 Tsu등이^[26] 초격자 구조에서 tunneling 효과에 의한 negative differential resistance(NDR)의 가능성을 이론적으로 제시한 이래 이것을 이용한 microwave oscillator나 switching device에 관한 연구가 폭넓게 이루어져 왔으며 최근들어 MBE와 같은 성장기술의 발전과 더불어 이들 분야의 소자개발 연구에 상당한 진전을 이루어 왔다. 최근에 관심을 끌고 있는 분야중의 하나로 quantum well 구조내의 barrier간의 소위 resonant tunneling 효과를 이용한 tunneling device이다. 이 소자는 그림10와 같은 구조에서 3차원 Fermi surface상의 electron이 2차원적 특성을 갖는 barrier 구조를 통과할 때 electron의 lateral momentum을 보존하기 위하여 연속적인 투과 현상을 나타내는 효과를 이용한 것으로^[27] 특히 AlGaAs/GaAs 물질계를 이용한 double barrier diode(DBD)의 연구가 활발하며 InGaAs/InAlAs, AlGaSb/InAs, HgCdTe/CdTe 물질계에 대해서도 이미 많은 연구 결과들이 발표되었다. 근자에는 초격자 구조가 이들 소자에도 응용 시험되고 있다.^[28-29] DBD 소자의 특성을 평가하는 주요 항목은 peak-to-valley current(PVC) ratio와 peak current density인데 근자에 DBD 구조의 AlGaAs alloy barrier를 초격자 구조로 대체하여 이들 소자의 성능을 개선한 연구결과가 발표되었다. C. I. Huang 등은^[28] Al_{0.42}Ga_{0.58}As alloy barrier와 AlAs/GaAs short period superlattice

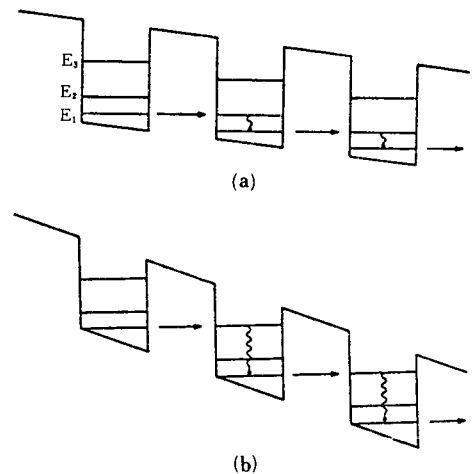
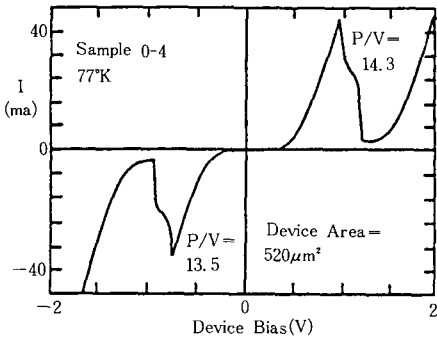


그림10. 초격자 구조에서의 resonant tunneling 효과

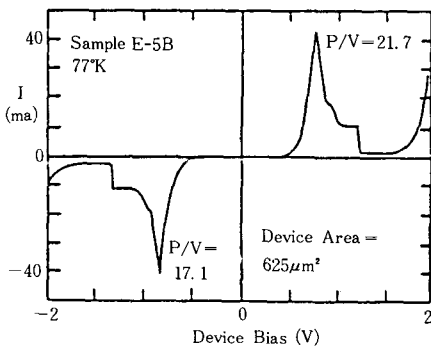
를 각각 사용한 DBD에서 상온에서 각각 3.9와 3.6, 77K에서 14.3과 21.7의 P/V ratio를 얻었다(그림11 참조). Short period superlattice가 alloy barrier에 비하여 저온에서 좋은 성능을 가질 수 있는 까닭은 초격자 구조내의 multiple interface가 불순물이나 격자결함을 trapping 함으로써 양질의 quantum well을 형성함과 동시에 substrate쪽의 interface를 개선할 수 있다는 부수적인 이점도 있으나 주된 요인은 초격자 구조에서는 X-point effective mass가 더 큰 값을 갖기 때문에 X-point tunneling이 감소하는데 있다.^[28] 이와 같은 resonant tunneling diode (RTD)를 microwave oscillator나 fast digital switch 등에 적용하기 위해서는 series resistance, active region의 capacitance, quantum well의 charging/discharging time 이나 depletion region의 drift time 등이 중요한 parameter인데 그동안 AlGaAs/GaAs 물질계가 주연

구 대상이었으나 GaAs cladding layer나 ohmic contact의 series resistance 등이 maximum frequency를 제한하는 요소로 밝혀짐에 따라 근자에는 InAs/AlSb 물질계를 이용한 DBD 연구가 관심을 끌고 있다.^[29] InAs는 effective mass가 작기 때문에 high mobility와 low resistivity를 갖게되며 metal-InAs junction이 Schottky barrier를 형성하지 않기 때문에 매우 낮은 contact resistance를 갖는다. 이와 같은 물질계의 또다른 이점은 큰 값의 conduction band offset 때문에 AlGaAs/GaAs 물질계에 비하여 낮은 valley current값을 갖게 된다. 이들 물질계에서도 초격자 구조를 이용한 연구 움직임은 있으나 특성상 SL 구조를 사용하는 것이 별다른 개선요인이 되지 못하고 있다.

Microwave 소자의 또다른 형태로 heterostructure field effect transistor (HFET) 혹은 high electron mobility transistor (HEMT)라는 소자가 있는데 이들 소자에도 초격자 구조를 응용하는 연구가 폭넓게 진행되고 있다.^[30] 이들 소자들은 저온에서 high mobility를 갖는다는 것은 이미 잘 알려져 있으며 따라서 dc나 RF 특성 또한 우수한 것으로 평가되고 있으나 AlGaAs/GaAs HFET의 경우 source layer인 AlGaAs 층이 Al 조성비나 Si 불순물 주입 농도에 있어서 DX center에 의한 한계를 가지고 있어서 소자 성능향상에 제한적 요소로 적용하고 있다. 이를 해결할 수 있는 방법으로 선택적으로 불순물을 주입하는 selectively doped superlattice의 응용이 제안되었다. 그림12는 이와 같은 구조의 도식도로 GaAs 층에만 선택적으로 Si를 주입하고 AlGaAs 층은 charge tunneling이 충분히 이루어질 수 있도록 얇게 성장하여 AlGaAs/GaAs 초격자 구조와 GaAs buffer층 사이에 2-dimensional electron gas(2DEG)가 형성되도록 한 것이



(a)



(b)

그림11. (a) AlGaAs alloy barrier와 (b) superlattice를 사용한 tunnel diode의 I-V특성 곡선 (77°K).

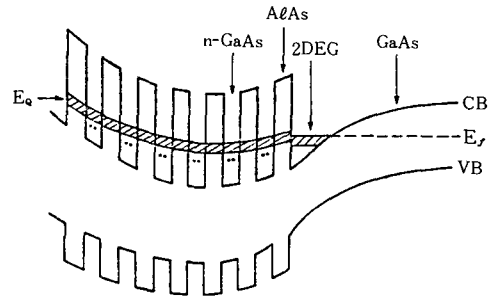


그림12. Selectively doped superlattice를 source layer로 사용한 superlattice HFET의 band 구조

다. 이와 유사한 구조에서 최근에 기존의 HFET 에 비하여 초격자 HFET가 보다 우수한 고주파 특성을 보이는 연구 결과가 발표되었다. W. Brockerhoff 등은^[9] 그림13과 같은 구조의 conventional n-AlGaAs/GaAs HFET와 AlAs/GaAs superlattice HFET의 RF 특성을 비교해 보았는데 저온(120K)에서 superlattice HFET가 보다 우수한 고주파 특성을 보이는 것을 관측했다.

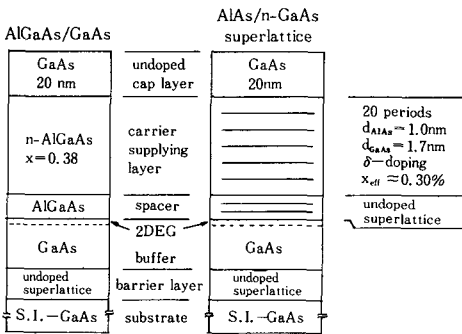


그림13. Conventional AlGaAs HFET와 superlattice HFET의 성능 비교에 사용된 시료 구조

이밖에도 RF 특성을 평가할 수 있는 주요 측정치로는 transconductance g_m , gate-source capacitance C_{gs} , output resistance R_d 등인데 이들 측정치들은 상온에서는 비슷한 성능을 보이나 저온에서는 superlattice HFET쪽이 보다 넓은 gate-source voltage V_{gs} 범위에서 높은 g_m 과 낮은 C_{gs} , 그리고 큰 값의 R_d 측정치를 나타냈다. R_d 를 제외하고는 g_m 나 C_{gs} 는 superlattice HFET source layer인 초격자 구조에서의 DX center의 감소에 기인한다. 또한 analog 응용을 위해서 보다 넓은 V_{gs} 범위에서 높은 g_m 을 유지하는 것이 중요한데 이것 역시 상온이나 저온 모두에서 superlattice HFET가 우수한 성능을 보이는 것으로 관측된다.


III. 결 론

현재 초격자 구조를 이용한 반도체 연구는 주로 광소자 분야에 치우쳐 있으며 소재도 III-V족 화합물 위주로 이루어지고 있다. 그러나 Si MBE 개발과 더불어 전기소자 분야에서도 초격자 응용에 관한 연구가 서서히 관심을 끌고 있으며 III-V족 물질체에

서도 과거 기술상 초격자 응용이 불가능했던 소자에도 이들 구조의 적용이 예상된다. 예를 들어 DFB laser에 초격자 구조를 응용해 본다면 또다른 특성을 보일 수 있을 것이다. 따라서 초격자 구조의 연구영역은 계속 확장될 것이며 소자로서의 가능성 또한 무한한 것으로 볼 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] For example, see "Semiconductors and semimetals," ed. R. Dingle, Academic, 1987.
- [2] For example, see "Technology and physics of molecular beam epitaxy," ed. E.H.C. Parker, Plenum, New York, 1985.
- [3] For example, see "The MOCVD challenge," M. Razeghi, Adam Hilger Press, 1989.
- [4] K. Itaya, M. Ichikawa, H. Shiozawa, Y. Nishikawa, M. Suzuki, H. Sugawara, and G. Hatakoshi, "High-temperature cw operation of 630 nm band InGaAlP visible light laser diodes," Extended Abst. 22nd Conf. Solid State Devices and Mat., Sendai, p. 565, 1990.
- [5] A.C. Gossard, W. Wiegmann, R.G. Miller, P.M. Petroff, and W.T. Tsang, in Collected papers of the 2nd Int. Sym. MBE and Related Clean Surface Tech., Tokyo, p. 39, 1982.
- [6] W.T. Masselink, M.V. Klein, Y.L. Sun, Y.C. Chang, R. Fischer, T.J. Drummond, and H. Morkoc, Appl. Phys. Lett., vol. 44, p. 435, 1984.
- [7] K. Fujiwara and K. Ploog, Appl. Phys. Lett., vol. 45, p. 1222, 1984.
- [8] H. Sakaki, J. Yoshino, and Y. Sekiguchi, Electron. Lett., vol. 20, p. 320, 1984.
- [9] H. Imamoto, F. Sato, K. Imanaka, M. Shimura, "Visible multi-quantum well laser diode composed of (AlGaAs)m/(GaAs)n short period superlattice," *Electron. Lett.*, vol. 25, p. 121, 1989.
- [10] H. Z. Chen, A. Ghaffari, H. Morloc, and A. Yariv, "Very low threshold current densities (under 100 A/cm²) in AlGaAs/GaAs single-quantum-well GRINSCH lasers grown by molecular beam epitaxy," *Electron. Lett.*, vol. 23, p. 1334, 1987.

- [11] K. Nakanishi, I. Suemune, H. Masato, Y. Kuroda, and M. Yamanishi, "Nearly Room-temperature photopumped blue lasers in $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}/\text{ZnSe}$ multilayer structures," Extended Abst. 22nd Conf. Solid State Devices and Mat., Sendai, p. 621, 1990.
- [12] A.R. Adams, "Band-structure engineering for low-threshold high-efficiency semiconductor lasers," *Electron. Lett.*, vol. 22, p. 249, 1986.
- [13] P.J.A. Thijs and T. van Dongen, "Strained-layer InGaAs multiple quantum well lasers emitting at 1.5 micron wavelength," Extended Abst. 22nd Conf. Solid State Devices and Mat., Sendai, p. 541, 1990.
- [14] J.L. Jewell, S.L. McCall, Y.H. Lee, A. Scherer, A.C. Gossard, and J.H. English, "Lasing characteristics of GaAs microresonators," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, p. 1400, 1989.
- [15] G.H. Wannier, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 34, p. 645, 1962.
- [16] J. Bleuse, P. Voisin, M. Allovon, and M. Quillec, "Blue shift of the absorption edge in AlGaInAs-GaInAs superlattices: Proposal for an original electro-optical modulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, p. 2632, 1988.
- [17] E.F. Schubert and J.E. Cunningham, "Photonic switching by tunneling-assisted absorption modulation in a GaAs sawtooth structure," *Electron Lett.*, vol. 24, p. 980, 1988.
- [18] O. Wada, H. Nobuhara, H. Hamaguchi, T. Mikawa, A. Tackeuchi, and T. Fujii, "Very high speed GaInAs metal-semiconductor metal photodiode incorporating an AlInAs/GaInAs graded superlattice," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, p. 16, 1989.
- [19] H.T. Griem, S. Ray, J.L. Freeman, and D. L. West, *IEEE Transac. Electron Devices*, vol. 36, p. 2625, 1989.
- [20] F. Capasso, K. Mohammed, A.Y. Cho, R. Hull, and A.L. Huchinson, "Effective mass filtering: giant quantum amplification of the photocurrent in a semiconductor superlattice," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 47, p. 420, 1985.
- [21] F. Capasso, K. Mohammed, and A.Y. Cho, *IEEE Quantum Electronics*, vol. 22, p. 1853, 1986.
- [22] H. Temkin, T.P. Pearsall, J.C. Bean, R.A. Rogan, and S. Luryi, " $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ strained-layer superlattice waveguide detectors operating near 1.3 μm ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 48, p. 963, 1986.
- [23] C. Mailhot and D.L. Smith, "Long-wavelength infrared detectors based on strained InAs-Ga $_{1-x}$ In $_x$ Sb type-II superlattices," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. A7, p. 445, 1989.
- [24] D.L. Smith and C. Mailhot, *J. Appl. Phys.*, vol. 62, p. 2545, 1987.
- [25] H.C. Liu, "A novel superlattice infrared source," *J. Appl. Phys.*, vol. 63, p. 2856, 1988.
- [26] L. Esaki and R. Tsu, *IBM J. Res. Develop.*, vol. 14, p. 61, 1970.
- [27] M. Heiblum, V. Sivan, and M.V. Weckwerth, *The 4th Int. Conf. Modulated Semicon. Structures* (Ann Arbor, Michigan), p. 463, 1989.
- [28] C.I. Huang, M.J. Paulus, C.A. Bozada, S.C. Dudley, K.R. Evans, C.E. Stutz, R.L. Jones, and M.E. Cheney, "AlGaAs/GaAs double barrier diodes with high peak-to-valley current ratio," *App. Phys. Lett.*, vol. 51, p. 121, 1987.
- [29] J.R. Soederstroem, D.H. Chow, and T.C. McGill, "InAs/AlSb double-barrier structure with large peak-to-valley current ratio: A candidate for high-frequency microwave devices," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 11, p. 27, 1990.
- [30] W. Brockerhoff, H. Meschede, W. Prost, K. Heime, G. Weimann, and W. Schlapp, "RF measurements and characterization of heterostructure field-effect transistors at low temperatures," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 37, p. 1380, 1989. 

筆者紹介

**李承昌**

1959年 2月 27日生

1983年 2月 서울대학교 물리학과 졸업

1985年 2月 서울대학교 대학원 물리학과(석사)

1989年 8月 서울대학교 대학원 물리학과(박사)

현재 한국전자통신연구소 신소재재료실 선임연구원
주관심분야: 반도체소자물리 및 고속소자
