

고속 및 광전자응용을 위한 반도체 첨단연구의 동향과 미래의 전망

이 일 항*

<요 약>

고속 및 광전자응용에 기반이 될 반도체들과 그 architecture 에 대한 연구 경향과 미래적 전망에 대하여 개괄적으로 살펴보았다. 주요점은 무기물 반도체에 두었고, 유기물 반도체 및 기타 반도체들은 필요한대로 언급할 뿐 넓게 다루지는 않았다. 우선 현대가 처한 정보처리의 전환기적 특성을 살핀뒤, 미래에 다가올 고속 및 광전자 정보처리의 필요성을 논하였다. 다음 전자와 광자의 특성을 비교해 보고, 이들의 매개체가 되는 반도체 재료와 소자들, 이들의 2차원적 집적과 3차원적 집적에 따른 제반문제, 해결점, 전망 등을 살펴 보았다. 결론적으로 점진적연구보다는 선진적연구의 필요성을 이야기하였다.

I. 서 론

우리는 현재, 미래학 저술가인 Alvin Toffler가 20년전 이야기했던대로 “미래의 충격(Future Shock)”속에 살고 있으며, “제3의 물결(The Third Wave)”을 이미 겪어가고 있다. 제3의 물결이란,

목 차

- I. 서론
- II. 전자와 광자의 비교
- III. 전자와 광자의 곡예장-반도체
- IV. 반도체 재료
- V. 반도체 HETEROSTRUCTURES
- VI. 고속소자
- VII. 광전소자
- VIII. 광전자집적 회로(OEIC)
- IX. 실리콘 기판위의 2차원 ELECTRONICS 및 PHOTONICS
- X. 3차원 집적
- XI. 기타 선진연구
- XII. 요약 및 결론

* 반도체기술연구단 책임연구원 및 기술
자문역

인류가 유사 이래로 겪은 세번째의 문명적 혁명을 말하는 것으로서, 곧 어마어마한 정보의 사회를 뜻한다. 제1의 물결은 농경의 문명이었고, 제2의 물결은 19세기 말을 기점으로 했던 산업혁명이었다. 제1의 물결, 제2의 물결과는 달리, 제3의 물결에서는 거대한 교통기관들이 움직이지 않아도 컴퓨터와 통신을 이용하여 대량의 정보를 교환하고 거래하게 된다.

현 정보시대의 몇개의 커다란 특성을 본다면 첫째 컴퓨터와 통신의 융합(merge) 이라고 볼 수 있겠다. 재래에는 computer가 주로 정보를 기억하고 처리하는 정도였으나, 이제는 그러한 정보들을 대량으로 이동시키기 위하여 통신망과 연결시키기 시작한 것이다. 개인용 전화기에 초차 memory가 이용되기 시작하였으며 그용량과 수요는 계속 늘어갈 것이다. 또다른 특성은 광자의 중요성이 더욱 많아진 것이다. 지금 우리가 이용하는 정보처리수단들은 대부분 전자를 이용하여 있다. 전자의 특성을 과학적으로 잘 이해하고, 또 기술적으로 잘 활용해서 오늘날의 전자정보 문명을 이루고 있는 것이다. 따라서 20세기를 “전자의 시대(electronic age)”로 본다면 21세기는 “광자의 시대(photonic age)”로 내다 보고 있다. 통신에는 이미 광자가 이용되고 있어 우리나라도 70년대에 이미 광통신의 시대로 들어섰다. 다가올 시대에는 computer와 computer를 연결하는 network에 photonics가 쓰이게 되고, 따라서 photonics의 중요성은 더욱 증가하게 될 것이다.

미래 지향적인 첨단연구를 해가는 과학기술자들 사이에는 광자를 정보의 운반자(information carrier)로 보고 연구해가는 경향이 짙어지고 있다. 광자를 통신수단으로 이용하는 광통신(optical communication)은 물론이고, photonic switching, photonic computing 등의 연구에 이미 손을 대고있는 것이다. 특히 광자를 생성(gene-

rate)하는 원초적인 기술로서 반도체 레이저(laser)가 있는데 정보통신의 관점에서 볼 때는 지대한 관심을 받지 않을 수 없다. 이들의 성격, 제조기술 등에 관하여는 뒤로 미루기로 하고, 어쨌든 역사적 관점에서 볼 때 이들의 역할에 대하여는 이미 폭발적인 응용가능성을 가진 것으로 보고 있는 것이다.

현재 광소자(optical element)들이 처하고 있는 위치는, 1940년대 실리콘 반도체들이 처해있던 상황과 비해 볼 수 있을 것이다. 1940년대말 최초로 반도체 transistor들이 개발되었을 때 과연 그누가 LSI, VLSI, ULSI 등 현대의 전자산업을 예시할 수 있었을까? 마찬가지로 현대의 광소자등이 집적(integrate) 되기 시작하면 과연 어떤 가능성을 예측할 수 있겠는지 그누구도 알수 없는 것이라는 이야기이다. 이와같이 광소자들은 그 중요성이 더욱 더 인식되고, electronics와 발맞추어 더욱 더 중요한 team player로 부각되어 가는 경향을 보이고 있다.

이러한 추세에 맞추어 절실하게 요구되는 것은 진화적(evolutionary)사고보다는 혁명적(revolutionary)사고라는 점이다. 1940년대의 transistor들은 진공관(vacuum tube)을 개량함으로써 얻어진 산물이 아니었다. 이들은 혁신적 사고에 의해 생산된 소자들이었다. 이와 마찬가지로 현대와 미래가 필요로 하는 photonic device들은 transistor를 개량해 나감으로써 가능해지는 것이 아니다. 혁명적 사고에 의해 새시대에 필요한 광소자를 새롭게 개발해가야 하는 것이다. 이러한 경향에 맞추려면, 새로운 물리와 재료, 소자 design과 소자구조 그리고 새로운 system 및 application이 창조되어야 한다는 것이다.

이렇게 광자의 역할이 부각되는 것은, 앞으로 photonics 그 자체적인 중요성도 있지만 photonics가 electronics의 한계를 보완(complement)해주는 역할도 하게 되리라는 의미이기도 하다.

즉, silicon을 기초로 한 electronics가 speed의 제한을 받게되고, 그 능력한계를 근접해 감에 따라 그 한계를 극복하고 능가하는 재료로써 화합물반도체 등이 대두되고 있다. 화합물반도체는 실리콘보다 고유적인 전자이동속도가 여러갑절 빠를 뿐아니라, 광자를 방출하는 능력도 훨씬 높아 발광소자로도 유용한 재료이다. 따라서 silicon으로 가능하지 않은 영역들은 화합물반도체로 대체될 가능성이 많을 뿐아니라, 광전소자들은 silicon-based electronics를 광학적으로 도울 것으로 전망된다.

사실 고속을 위한 electronics 분야에서도 반도체 재료와 소자의 개혁적인 사고는 많이 중요해 졌다. Compound-semiconductor-based electronics가 silicon-based electronics를 보완하게 된다는 것은 새로운 물리적 현상, 소자구조 등이 개발되어야 한다는 것이다. 기존의 재료, 소자를 개선시키는 것도 중요하지만 화합물반도체 또는 새로운 소자를 통한 개혁적인 개발이 중요한 주목을 끌 것이다. 실리콘에서도 metal-base transistor라든가, 화합물반도체에서는 HBT, HEMT의 소자가 개발되고 있는것은 이러한 개혁적 사고의 수요에 부합되는 경향인 것이다.

과연 고속전자와 광전자는 어떤 매개체를 통하여 어떻게 운영될 것인가?

II. 전자와 광자의 비교

정보를 운반하는 입자으로써 전자와 광자는 사실 근본적으로 많은 차이점을 가지고 있다.

전자는 첫째 전하를 가지고 있으며, Fermi-Dirac에 의한 통계역학적 입장에서 보면 공간적으로 같은 위치에 공존할 수 없게 되어있다. 또 전자가 이동할 때에는 주위에 자기(magnetic field)가 발생하도록 되어있어 electro-magnetic interference(전자장 간섭)이 일어난다. 또 전자가

이동하기 위하여는 반드시 wire 등을 이용하여 confinement를 시켜야 하며, 병렬적 처리(parallel processing)보다는 직렬적 처리(serial processing)를 시켜야 하는 것이 보통이다. 전자가 어떠한 medium(특히 반도체)을 통과할 때는 effective mass에 의해 이동속도가 낮아지는 것도 또한 특성중의 하나이다. 또 진공이 아닌 자유공간에서의 이동 거리가 길지 못한 것도 사실이다.

한편, 광자는 전하와 질량을 갖지 않으므로, Bose-Einstein의 통계역학적 원리에 따라 공간적으로 같은 위치에 공존할 수 있다. 따라서 beam과 beam이 서로 교차해도 좋으며, 또 electromagnetic interference가 없으므로 통신에 잡음을 받지 않는다. 또 빛의 이동속도는 이동 medium에서 refractive index의 크기에 따라 변화하기는 해도, 자유공간 에서는 변함이 없고 먼거리까지 전달이 가능하기도 하다. Serial processing보다는 parallel processing이 가능한 것이 전자와는 다른 특성이기도 하다.

이렇게 전자와 광자는 서로 상반되는 특징 등을 갖고 있으나, 전자의 진동없이 광자의 생성이 불가능하고, 또 전자의 움직임도 광자의 진입에 의해 많이 영향을 받으므로 이 두종류의 입자는 정보처리에 밀접한 관계를 유지하게 된다. 이와같이 전자와 광자가 interactive한 영역을 광전영역이라고하며, 정보처리에 중요한 영역으로 등장하고 있다. 사실 현대는 전자시대(Electronic Age)에서 광자시대(Photonic Age)로 넘어가는 광전시대(Optoelectronic Age)라고 보아도 좋을 것이다.

III. 전자와 광자들의 곡예장 — 반도체

전자와 광자가 곡예를 부리며 운용되는 field로써 오늘날 전자, 통신 산업에 기초가 되는

물질이 반도체들이다. 반도체는 전도체(금속 등) 또는 절연체(유리, 세라믹 등)와는 달리 상온에서는 비전도체이나, 온도를 높이면 전도체가 되는 물질로써, 유기물 반도체 또는 무기물 반도체로 구분하여 종류가 무척 다양하다. 여기서는 주로 무기물 반도체를 다루기로 하며, 그중에서도 가장 유용도가 높은 반도체들을 주로 다루기로 한다.

1. 전자소자 (Electronic Devices)

현재 silicon의 유용성은 고속소자에 보다는 고집적 또는 초고집적 소자에 더 많은 가치를 가지고 있다. 우선 다른 어떠한 반도체보다도 기판위의 defect density가 극히 낮은(a few defects/cm²)관계로 complexity가 높고 gate count가 높은 micro processor 또는 다량생산으로 가능한 signal-processing, data-processing module에 보편적으로 쓰여질 것으로 전망된다. 현재 우리나라에서도 4M DRAM에 뒤이어 16M DRAM, 64M DRAM 등의 복잡하고 밀도 높은 소자 개발을 하고 있는 것도 좋은 예이다. 이러한 추세는 미국, 일본, 유럽 등에서도 일관적이며, 고속소자로는 개량된 silicon과 더불어 III-V 등이 많이 쓰일 전망이다.

Silicon은 low cost MOSFET VLSI가 지배적인 반면, bipolar device를 MOSFET VLSI와 집적하여 점진적으로 속도가 빠른 device를 지향하게 된다. 한편 III-V 화합물 반도체는 MMIC, lightwave, sensor 등과 더불어 high speed에 많이 쓰이게 된다. 화합물반도체 bipolar device(HBT 종류)는 FET보다도 더 속도가 빠른 device로 전망이고, DAC와 amplifier 등에 쓰이게 될 것으로 본다. InP-based electronics는 절연체의 부족으로 인하여 MOSFET에의 가능성이 아직 실현되고있지 않으며 MESFET로도 적합치 않다. 더 연구가 필요할 것이다.

한가지 분명한 것은, 정보산업의 추세가 고

속지향이라고 해서 silicon을 기초로 한 전자소자들이 III-V 소자들에 의하여 대체되지 않을 것임은 물론, 21세기까지도 silicon은 지배적인 전자산업의 기초로써 천원적으로 풍부하다는 단순한 이유에서 보아도 납득되는 이야기이다. 따라서 대량적인 수요는 silicon에 의해 충족되고, III-V 등의 고속 또는 광소자들은 silicon을 보완하거나 고속을 필요로 하는 일부 전문적인 수요에 충당하게 될 것이다.

2. 광자소자 (Photonic Device)

Silicon의 한가지 약점은 photon의 발광도가 유용성이 없을만큼 낮아서 photonic device의 재료로는 적합치 않은 것이다. Silicon은 indirect bandgap을 가지고 있으므로 해서 direct bandgap을 갖고 있는 일부 화합물 반도체에 비해 무척 발광도가 낮게되어 있다. 따라서 발광소자로는 III-V, II-VI, IV-VI 등 화합물반도체 재료를 많이 쓰고 있다.

III-V화합물 반도체중에서 광전소자로 중요한 것은 GaAs, InP, GaSb, InSb 등이 있다. 그중 가장 많이 연구되고 있는것이 GaAs와 InP이다. 이들 화합물 반도체는 binary compound 로써 주로 substrate로 쓰이며, 광전자를 위하여는 GaAlAs, InGaAs, InGaAsP 등 ternary 또는 quaternary 등의 epitaxy를 입혀서 사용하게 된다. 이들은 단파장 통신(0.85 μ m)또는 장파장 통신(1.3~1.5 μ m)을 위하여 많이 개발되고 있다.

화합물반도체에는 II-VI compound, IV-VI등도 포함되어 있는데 이들도 역시 대부분 전자소자보다는 광소자로 쓰여질 특성들이 많다. IV-VI 화합물에는 PbS, PbSe, PbTe, Pb_(1-x)Sn_(x)Se, PbS_(1-x)Te_(x)등이 있는데, 이들은 대개 100~300 meV의 bandgap을 가지고 있고, 4 μ m 이상의 장파장 photonics에 적합하다. 한편 II-VI 화합물로는 ZnS, ZnSe, CdS, CdSe, MnSe, MnTe,

ZnTe, CdTe, HgSe, HgTe 등이 있는데, $0.3\mu\text{m}$ 부터 $6\mu\text{m}$ 이상까지의 photonics 에 응용이 가능하다. 특히 mercury (Hg) compound를 제외한 II-VI compound들은 단파장($0.3\mu\text{m}\sim 0.9\mu\text{m}$) 영역내의 photonics에 유용하게 보인다. 이들이 새로운 주의를 받게된 것은 역시 MBE, MOCVD 등을 통하여 multi-layer heterostructure 등의 구조가 가능해졌고 따라서 새로운 특성과 소자의 개발이 가능해졌기 때문이다.

광자소자의 동향은 크게 light source, detector, waveguide, OEIC 등으로 나누어 볼 수 있겠다. Light source의 경향은 spectral purity, stability, 그리고 tunability 등을 지향하며 광대역 bandwidth, 손실의 최소화, 장거리통신과 single mode를 위한 source 등을 개발토록 노력하고 있다. 장거리통신을 위하여는 단파장 source보다 장파장 source를 위한 개발, 고출력 array, 양자우물 구조 등을 통한 새로운 소자개발 등을 지향한다. Detector는 PIN diode보다 APD를 향한 노력이 경주되고 있다. Waveguide는 아직도 propagation loss 및 coupling loss가 높은 경향을 보이고 있다. OEIC의 동향은 high speed communication을 위하여 GaAs-based OEIC와 InP-based OEIC로 나누어 연구되고 있다. 자세한 이야기는 아래 section에서 다루기로 한다.

IV. 반도체 재료

반도체 결정물질은 기판(substrate wafer)과 증착박막(epitaxial thin film)으로 볼 수 있는데, 역사적 측면에서 볼때 반도체산업은 반도체 결정체의 완전성을 지향하여 왔으며 앞으로도 그러한 가정하에 발전되어 갈 것이다. 반도체 기판표면의 defect density가 점점 적어지고 MBE, MOCVD등을 동원하여 완전한 박막결정을 성취하려는 것은 이러한 경향 때문인 것이다. 물론

반도체 비결정물질도 많은 가치를 갖고있으나 여기서는 다루지 않기로 한다.

1. Wafer공학 (Wafer Engineering)

가. Silicon Substrates

Silicon은 인간이 알고 있는 반도체 물질로써는 가장 잘 알려진 물질이다. 평방 cm당 defect가 불과 수개에 지나지 않는 높은 수준에 달하고 있으나, 여전히 더욱 더 높은 수준의 silicon wafer를 성취하는 노력은 계속되고 있다. 최근의 issue들로는 oxygen behaviors, carbon complex, denuded zone, gettering(intrinsic and extrinsic), surface oxide, surface contamination 등이다. Silicon 성장방법은 Czochralski(Cz) method 와 float-zone method인데, Cz방법이 지배적으로 사용되고 있다. Silicon은 본유적으로 열전도율이 높고, 높은 기계적 강도를 갖고 있다. 더우기 모래 등에서 쉽게 얻어질만큼 풍부하고, 값이 싸고, 6", 8"등 넓은 직경의 wafer가 가능한 등 이 점들을 가지고 있다. High speed를 위하여는 SOI(Silicon-On-Insulator) 등의 wafer engineering 노력이 있다. SOI에서는 silicon bulk substrate에서 비롯하는 capacitance 또는 resistance등에 의한 parasitic element를 제거함으로써 device speed를 높이고자 하는 노력이다. 또 최근에는 GaAs, InP, GaSb 등의 화합물반도체를 silicon substrate위에 증착시켜보려는 노력도 있다. 이것은 silicon의 우수한 기판적 성질을 이용해 보고자 하는 이유에서 이다. 이면에 대해서는 뒷부분에서 좀더 자세히 다루기로 한다.

나. GaAs Substrates

가장 많이 알려진 GaAs wafer생산방법은 LEC (liquid-encapsulated Czochralski) 방법이다. Silicon과는 달리 직경이 아직 4"정도까지 얻지

못하고 있다. 결정의 주요원인은 직경에 따라, 높은 thermal gradient와 stress를 induce하기 때문인 것으로 알려져 있다. 이러한 요소는 곧 dislocation 등의 결정결함을 쉽게 유발하기 때문이다. Silicon에 비해 아직도 표면의 결정결함이 수십배에 달하여 평방 cm당 수십내지 100여개의 defect density를 보이고 있다. 또 한편 결정성장중에 diameter control, striae formation, stoichiometry control 등의 어려움이 있으나, indium을 첨가(dope)한다든가, 자장을 가한다든가 또는 arsenic gas를 over-pressure로 가한다든가 하여 어려움을 부분적으로 극복하고 있다. 앞으로는 vertical gradient 방법 등을 통하여 substrate의 quality가 향상될 것으로 전망된다.

다. InP Substrates

InP 결정들도 대부분 LEC 방법으로 성장되고 있다. GaAs 결정 성장에 흔히 쓰이는 수평형 Bridgeman 방법은 InP에서는 잘 쓰이지 않는다. 이는 phosphorous의 high vapor pressure로 인하여 InP 용액을 담은 석영용기(ampoule)가 쉽게 깨어지기 때문이다. GaAs 보다 더 연구발달이 부진하여 현재 직경 2" 정도의 substrate밖에 얻어지지 않고 있다. 표면의 defect density도 GaAs보다 높아 평방cm당 수백에서 천여개에까지 이른다. GaAs에서와 같이 vertical gradient방법이 보다 질이 좋은 InP를 생산할 수 있을 것으로 전망된다. InP에서는 전자의 고유이동속도가 GaAs보다 높아서 high speed device 등에 이용가능성이 높으나 InP에 맞는 dielectric film 등의 부족으로 electronics가 아직 성숙한 단계에 미치지 못하고 있다. 연구가 진행됨에 따라 더 발전할 것으로 전망된다.

2. 박막결정 증착기술

다음으로 현대의 반도체물질에 중요한 자리를

차지하고 있는 것이 박막결정 증착기술이라고 보겠다. 박막증착기술에는 LPE, VPE, MBE, MOCVD, CBE, ALE 등이 있는데 흐름을 간략히 다루어 본다.

가. LPE (Liquid Phase Epitaxy)

이 방법은 액화된 물질 밑으로 substrate를 서서히 이동시키면서 substrate위에 박막을 형성하는 방법이다. 액화물질은 한종류 또는 여러종류로써 1개 또는 수개의 container에 담겨 있어 단층 또는 여러층의 박막을 형성할수 있게 된다. 역사적으로 볼 때, 반도체 laser, optoelectronics 등을 포함한 대부분 화합물반도체 기술의 workhorse가 되어온 것이 사실이다. 이는 비교적 기술이 간단하고, 값이 싸기 때문이었다. 그러나 이 기술은 차츰 좀더 세련된 기술들, 특히 MBE, MOCVD 등에 의해 대치될 가능성이 많다. 주요단점으로는 wafer size에 제약이 있으며, 표면이 거칠고, 박막두께를 조절하는데 어려움이 많고, 또 경우에 따라서는 고착된 박막이 용액과 접촉할 때 다시 용해되는(melt-back problem)경우가 있는 것들이다.

나. VPE (Vapor Phase Epitaxy)

이 방법은 gas를 substrate위로 흘려보내면서 substrate 표면에서 화학반응을 일으켜 박막을 형성하는 방법이다. 후에 서술한 MOCVD방법과 system은 흡사하지만 gas로는 hydride 또는 chloride 등을 사용하므로 다른 mechanism을 갖고 있다. Chloride 방법은 $AsCl_3$ 또는 PCl_3 gas를 In, Ga, GaAs 또는 InP 위로 흘려내서 박막을 형성하게 된다. Hydride방법은 AsH_3 또는 PH_3 gas를 HCl과 혼합하여 흘림으로써 고온의 substrate표면에서 분해되는 증착방법이다. 대부분의 광전자 device들은 chloride 방법으로 얻어지고 있다.

다. MBE (Molecular Beam Epitaxy)

MBE방법은 고진공안에서 원자 또는 분자를 증발시켜, 가열된 substrate위에 고착시키는 방법으로 반도체뿐만아니라, 전도체인 금속 또는 유전체 등도 증착시킬 수 있다. 이 방법의 장점으로 박막의 두께 및 배합률을 정확하게 조절할 수 있고, interface에서의 abruptness 등을 단위자두께 정도까지 조절할 수 있다는 것이다. 대부분의 양자구조 또는 SLS(strained-layer super-lattice) 등은 이 방법을 써서 얻어지고 있다. MBE의 약점은 system 가격이 높고 throughput이 낮으며, 고진공을 유지하기에 어려움이 있다는 점 등이다. MBE가 과연 factory 환경에서 생산수단으로 사용될 것인가는 아직 판명되지 않았으나 새로운 physics와 재료, 소자 등을 개발해 내는 도구로는 혁신적인 역할을 해온 사실은 이미 알려져 있다. 일부 MBE 판매회사들은 생산성을 높이는 장비를 연구하고 있으며, commodity item이 아닌 높은 부가가치의 연구는 계속될 것으로 보인다.

라. MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition)

이 방법은 TMG (Trimethyl Gallium)와 AsH₃ (Arsine) 등의 gas를 가열된 GaAs substrate에서 화학반응을 일으켜 GaAs layer를 얻어내는 방법이다. 이 방법은 substrate 표면에서 gas가 화학반응을 일으키면서 Ga 원자와 As 원자가 공급받는다는데서 MBE와는 다른 방법이다. MBE에서는 Ga 원자와 As 원자가 각각 substrate에 도달하여 격자를 만들게 되어있는 것이다. MOCVD에서는 gas switching의 time constant가 길고, 또 substrate위에 gas boundary layer가 형성되어 diffusion에 시간이 걸리는 까닭에 박막두께의 조절 또는 interface abruptness의 조절 등이 MBE에 비해 열등하다. Interface의 경우

abruptness가 대개 2~3 atomic layer 정도인 것으로 알려져 있다. 그러나 MBE에 비하여 장비운영이나 정비가 쉽고 throughput도 높아 제조 생산도구로는 MBE보다 가능성이 높다. 한가지 안전에 있어 중대한 고려사항이 있다면, 독성이 높은 gas(예를들면 Arsine)가 유출되지 않도록 주의해야 할 뿐만아니라, monitor를 장치하여 수시로 경보를 받고 대피할 수 있도록 해야 한다는 등의 기본 대책 등이 필요하다. 최근에는 arsine 보다도 독성이 10~50배씩 낮은 TBA(tertia buthyl arsine) 등의 용도가 실험되고 있다. MOCVD에서는 MBE에서 문제되는 oval defect 등이 없는 반면, flow pattern에 따라 uniformity 조절이 꽤 어렵다.

마. CBE (Chemical Beam Epitaxy)

이 방법은 MOMBE(Metal Organic Molecular Beam Epitaxy)라고도 불리우는 방법으로 종래에 MBE에서 사용하던 metallic solid source를 gas source로 대체해서 증착해 나가는 이른바 gas source MBE라고 해도 좋을 것이다. 이 방법은 이런뜻에서 MBE와 유사하지만, 또한 다르기도 하다. Gas source를 사용한다는 의미에서 MOCVD와 유사하지만, chemical reaction이 다르므로 MOCVD와도 엄격한 의미에서 다른방법이라고 볼 수도 있다. MOCVD에서는 Group III alkyl의 확산율(diffusion rate)에 의해 증착속도에 제한을 받지만, CBE에서는 Group III 분자들이 바로 substrate 위에 증착되므로, MBE 에서처럼 shadow effect가 들어나게 되어있다. GaAs 또는 InP계열의 ternary와 quaternary, 즉 GaAlAs, InGaAs, InGaAsP 등이 양질의 수준으로 얻어지고 있다.

CBE의 특징을 본다면, MBE와 MOCVD의 장점을 공유하고 있는것으로써 uniformity가 높고 area 가 넓은 substrate를 써도 좋으며, morpho-

logy가 고르고, 박막간의 interface가 abrupt 하여 superlattice가 가능하며, gas diffusion이 없으므로 증착속도가 높아서 throughput 이 높고, Ga, Al, As, In, P 등의 증착종류에 다양성을 가지며, system이 비교적 간단하고 고진공이 필요치 않아 운용과 정비가 비교적 수월한 것으로 여겨지고 있다.

이러한 추세로 볼때, CBE 증착방법은 물리적 증착방법과 화학적 증착방법이 merge한 방법이라 보아도 좋겠다. 즉, 물리적 방법에서 볼때는 solid-source MBE로부터 hydride source MBE를 거쳐 metal organic MBE로 향하는 동향을 보이고 있으며, chemical한 증착방법측에서 볼때에는 atmospheric MOCVD로 부터 low pressure MOCVD를 거쳐 이제는 MOCVD의 한계를 넘어서는 동향을 보이고 있다고 보아도 좋을 것이다.

바. ALE (Atomic Layer Epitaxy)

이러한 맥락에서 또 하나의 증착방법으로 등장한 것이 ALE 방법이다. 이 방법은 TMG(Tri-methyl Gallium)와 같은 gas와 AsH₃(arsine)와 같은 gas를 주입시킴으로써 비교적 낮은 온도에서 GaAs 박막을 형성할 수 있는 기술이다. 특징으로는 계층에서 단원자층 abruptness가 가능하며, 박막의 균일성이 좋고, 낮은온도에서 증착이 가능하므로 원자확산에 문제가 적으며, delta-doping 등이 가능한 것으로 보고 있다. 이 방법은 아직 연구단계이나 원자수준의 control이 가능하다는 차원에서 볼 때 새로운 physics, 물질, 구조등을 인공적으로 창출하는데 기여도가 높을 것으로 보여진다.

V. 반도체 HETEROSTRUCTURES

현대의 반도체 박막증착은 두가지 형태로

얻어지고 있는데, 곧 homoepitaxy 와 heteroepitaxy이다. Homoepitaxy는 substrate와 같은 종류의 격자들이 증착되는 것을 말하는 것으로써 예를들면 silicon substrate위에 silicon 박막을 입히거나, GaAs substrate위에 GaAs 박막을 입히거나 하는 것들이다. Heteroepitaxy에는 substrate와는 다른 격자들이 증착되는 것으로써 silicon substrate위에 GaAs, InP 등의 격자들을 증착시키거나, GaAs substrate위에 GaAlAs, InP 위에 InGaAs등을 증착하는 것을 말한다.

현대의 반도체기술을 더욱 놀랍게 만드는 것은 homoepitaxy보다는 heteroepitaxy이다. Superlattice 등의 heteroepitaxy로 인하여 이전의 single crystal에서 볼수 없었던 새로운 physics와 현상, 또 성질들이 얻어지고 있어서 반도체 고체물리 및 기술에 새로운 전기를 이루고 있으며, 새로운 물리적 성질을 가지는 희귀한 반도체 물질들이 인공적으로 제조되고 있는 바, quantum device니, bandgap engineering이니, 3차원 OEIC니 하는 것들이 모두 이러한 heteroepitaxy에 기초를 두고있는 것이다. HEMT(High Electron Mobility Transistor), HBT(Heterojunction Bipolar Transistor) 등도 이 부류에 속한다.

1. 초격자구조 및 양자구조

초격자란 서로가 다른 반도체 박막 (예를들면 GaAs 와 AlGaAs)을 같은 두께로 여러번 교대해서 증착시켜 얻어내는 구조이다. 이때 박막의 두께는 격자의 crystallinity가 유지되는 critical thickness안에 제한되도록 하는 것이 보통이다. Critical thickness는 두개의 상이한 박막의 격자간격(lattice constant)의 차이에 의해 정해지게 된다. 그러나 두께가 전자의 de Broglie 파장(약 100Å)정도로 작아지게 되면 bandgap이 작은 박막안에 양자우물 (quantum well)을 형성하게 되고, 따라서 원자에서처럼 discrete한 energy level을 형성하게

된다. 이처럼 형성된 energy level간에 전자가 천이하면 energy가 다른 광자(photon)들이 발생 또는 흡수되어 양자적 고체 device를 만들 가능성이 생기게 된다. 이렇게해서 효율이 높은 quantum well laser, detector 등이 만들어지고 있으며, 비선형소자(non-linear device)로써 SEED (self electro-optic effect device)와 같은 소자도 얻어져 photonic switching에도 새로운 전망을 보여주고 있다. 또한 예를 들어 quantum well laser의 경우 발광 efficiency가 높아서 고출력 반도체 laser array 등에 기여할 것으로 보인다.

2. Bandgap Engineering

Quantum well structure에 있어서 “well” 박막과 “barrier” 박막을 superlattice의 형태로 교대로 형성했을 경우, 거의 임의적인 또는 지속적인 bandgap변화를 가질 수가 있게 되어, 새로운 형태의 전자소자 또는 광전자소자를 만들어 낼 수 있게 된다. 즉, energy band diagram을 조정할 수 있을 뿐만 아니라, electrical transport의 성질을 modelling하거나 tune할 수 있다는 이야기이다. 현재 연구가 진행되고 있는 소자들로는, 다중막 avalanche photodiode, staircase 소자, solid state photomultiplier, graded-gap을 가지는 HBT, graded-gap laser, graded-gap solar cell 등을 들 수 있다. 이러한 소자들은 더욱 효율이 높은 discrete소자로써 뿐만 아니라, 전혀 새로운 차원의 optical, electronic 그리고 optoelectronic 응용을 할 수 있을 것으로 보인다.

fect transistor), SDHT(selectively doped heterojunction transistor), TEGFET(two-dimensional electron gas FET)의 다양한 이름으로 불리우고 있는데 여러기관에서 연구가 되어오고 있다. HEMT의 구조는 undoped된 GaAs layer(약 20~80Å 두께)에 highly-doped된 GaAlAs layer(약 300~500Å 두께)를 인접하여 형성하는데, GaAlAs의 electron들이 GaAs로 spillover하게 되면 impurity가 적은(undoped) GaAs layer에서 electron mobility가 크게 증가하는 것을 이용하는 것이 작용원리이다. HEMT가 최초 superlattice에 대한 연구에서 비롯된 것은 말할 필요가 없겠다. 지금까지 얻어진 mobility는 0.2°K에서 약 5,000,000 cm²/V.s.까지 다다르고 있다. Switching time은 10 ps을 기록하고 있으며, frequency가 60 GHz에 다다르고 있어, MESFET, bipolar, CMOS 등을 모두 능가하고 있다. Heat dissipation도 비교적 적어서 (10⁻¹⁵Joule) supercomputer 등에 이용 가능성이 많다. HEMT는 GaAs뿐 아니라, Ge/Si, InP, InSb 등을 이용하여서도 연구되고 있다. Device로는 high speed, low noise amplifier, millimeter wave circuit, MMIC 등이 연구되고 있다. 몇가지 극복해야 할 점들은 layer thickness의 정밀한 조절, photoconductivity의 suppression, radiation hardness의 보완, contact/parasitic resistance의 감소 등이 있다. 아직 연구단계로써 AT&T, Motorola, Honeywell, Hughes, TRW, Rockwell, IBM, GE, NTT, Fujitsu, Thomson-CSF 등 많은 기관들에서 연구가 되고 있다.

2. HBT (Heterojunction Bipolar Transistor)

HEMT에 못지않게 관심을 끌고있는 것이 HBT이다. HBT의 구조도 역시 superlattice에서 유래한 것으로, 구조의 핵심적 특징은 wide band-gap emitter(예를들어 N-type GaAlAs laer)와 nar-

VI. 고속소자

1. HEMT (High Electron Mobility Transistor)

HEMT는 MODFET(modulation-doped field ef-

row band-gap base(예를들어 p^+ GaAs layer)의 heterojunction interface에서 일어나는 electronic dynamics에 있다. 즉, 이러한 heterojunction interface에서는 emitter와 energy band-gap의 차이에 의해 hole injection이 suppress된다. 이때에 base는 emitter보다 더욱 doping이 많아지게 되어 base의 저항은 작아지고 동시에 emitter-base의 capacitance도 감소된다. 따라서 time constant의 감소와 함께 high frequency operation이 가능하게 되는 것이다. 지금까지의 HBT는 대개, GaAlAs/GaAs 등이 초점되어 왔으나, 최근에는 AlnAs/GaInAs/InP HBT의 구조로 연구되고 있다. 고주파 응용을 위한 HBT의 장점은 HEMT 또는 MESFET에서와는 달리 전류가 vertical 하게 흐름으로써 trapping effect가 적을뿐 아니라, $1/f$ noise도 적은 것으로 알려지고 있다. 최근에는 bandgap engineering의 한 방법으로 emitter layer를 gradidng 함으로써 종래에 conduction band에 존재하던 높은 barrier를 제거하여 emitter-base의 valence band carrier를 증가시키는 방법등도 연구하고 있다. HBT의 impact는 amplifier, mixer, future communication 등 다양하게 있을 것으로 보인다. 이미 수십 GHz의 고주파 능력을 보이고 있다. 특히 collector 부분에 p^+ layer, n^+ layer등을 도입하면 electron velocity에 overshooting이 가능해져서 speed가 더욱 증가하는 것이 실험되어 있다. 이러한 HBT를 "Ballistic Collection Transistor(BCT)"라 하며 이러한 ballistic transistor의 연구는 bandgap engineering과 더불어 더욱 진전될 것이다.

3. MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit)

MMIC는 analog device로써 GaAs device, resistor, inductor, capacitor등 electrical element들을 semi-insulating GaAs substrate위에 모두 monoli-

thic하게 집적된 device를 말한다. Silicon substrate보다 GaAs substrate를 선호하는 것은 GaAs substrate resistance가 silicon substrate resistance보다 높아서 element간의 절연성이 좋기 때문이다. Hybrid integration보다 monolithic integration이 우월한 이유는 저렴한 가격으로 batch processing이 가능하고, wire bond 또는 discrete component 등이 최소화될 수 있으며, size가 작고 무게가 가벼워 airborne에 좋고, design의 융통성이 있으며, 다양한 기능을 가질수 있고, reliability나 reproducibility 등이 좋은 것으로 알려져 있다. GaAs device는 수요에 따라 MESFET, HEMT, HBT 등이 쓰일 수 있다. 응용분야로는 direct broadcast satellite통신, 자동차의 충돌방지장치, 항공/우주장치 안테나 등 다양하게 쓰일 것으로 전망된다. 아직 실험, 연구단계이나 수년 후에는 생산, 상품화될 것으로 내다보고 있다.

VII. 광전소자

1960년대초에 개발된 laser들은 오늘날 우리가 누리고 있는 각종 optical technology를 미리 내다보고 개발된 것만은 아니다. 그중 반도체를 이용한 optical technology도 예외는 아니었다. GaAs를 이용하여 p-n junction laser또는 LED(light emitting diode)등을 만드는데 성공한 이후, 과학자들은 optical communication, signal processing등에 쓰여질 optical device들에 대한 연구를 계속하여 왔다. 이들 분야는 optoelectronics 또는 photonics라하여 optical source, optical detector, waveguide 등으로 분류되며, 각 분야마다 괄목할만한 연구들이 진행되고 있다.

Optical source의 경우, GaAs와 GaAlAs반도체를 이용한 단파장 LD, LED등이 개발되어 왔으나, optical fiber내의 optical transmission loss를 최소화하기 위한 노력의 하나로 InP 또는

InGaAsP등을 이용한 장파장 LD, LED등도 개발되고 있다.

GaAs-based laser로는 gain-guided laser와 index-guided laser등으로 분류되는데, gain-guided laser에는 oxide-defined, proton-bombarded, Zn-diffused stripe-geometry laser등의 방법등이 있으며, index-guided laser에는 transverse junction stripe(TJS) lasers, buried-heterojunction(BH) laser, channel substrate planar-stripe(CSP)laser등의 방법등이 있다. 이 방법들은 모두 laser의 효율을 높이기 위하여 current confinement를 effective하게 하는 방법의 차이에서 오는 것들이다. GaAlAs를 기초로 하는 laser와 LED 등은 이미 성숙한 기술로써 제1세대 optical communication system에 수만개씩 사용되고 있으며, 이미 수만시간의 작동 기록을 가지고 있다.

InGaAsP를 기초로 하는 장파장 laser로는 stripe laser, inverted rib laser, ridge waveguide laser, etched mesa buried heterojunction laser, V-substrate buried heterojunction laser, double-channel planar buried heterojunction laser등이 있으며 long distance communication에 쓰여질 device로 많이 연구되고 있다. 특히 최근에는 single frequency laser에 대한 연구가 많이 진행되고 있는데, 이는 coherent transmission을 지향하는 노력의 일부이다. Coherent transmission은 과거 radiowave transmission 에서와 같이 optical frequency domain에서 homodyne 또는 heterodyne detection 방법을 이용하는 방법이다. 아직 실용화되지는 않고 있으나, spectrad purity가 높은 laser가 필요하다. 이를 위하여 사용되는 laser 구조들은 distributed bragg reflector(DBR) laser, distributed feedback(DFB) laser, cleaved coupled-cavity(C³) laser등이 있다. Detector에는 quantum noise, shot noise등이 궁극적으로 문제가 되는데, PIN diode detector에서부터 APD

(Avalanche Photodetector)로 연구경향이 바뀌고 있다. Homodyne detection의 경우는 9 photoelectrons/bit 그리고 heterodyne detection의 경우는 18 photoelectrons/bit의 sensitivity가 필요하다. Coherent communication은 실용화될 수 있다면 revolutionary한 가치를 가지고 있다. 이 밖에 optical switching, optical computing에 쓰여질 전망이 높은 SEED와 같은 Quantum device에 대한 노력도 많이 경주되고 있다. Photonic device들은 optical disk 또는 video disk등의 optical storage에도 쓰일뿐만아니라, optical interconnect 등으로 쓰일 가능성도 연구되고 있다.

VIII. 광전자 집적회로 (OEIC)

광전자 집적회로(OEIC)의 개념은 1970년대초 Caltech의 A.Yariv교수에 의해 최초로 도입되었다. 이 개념은 GaAs 또는 InP substrate위에 전자소자(electronic device)와 광소자(photonic device)를 함께(monolithically) 집적시키는 것이다. Electronic device로는 drive, modulator, amplifier등이며, photonic device로는 laser, waveguide, detector 등이다. OEIC 최초에는 대개 한개의 electronic component와 한개의 photonic component 등을 integrate 시키는 단순한 것들이었다. 그러나 최근에는 component의 수가 늘고 있다. OEIC 장점들로는 compact 하다는 점, reliability가 높아진다는 점, 기능이 다양해 진다는 점, performance가 개선된다는 점, 값이 싸진다는 점을 들고 있다. OEIC는 실현되면, electronic circuit과 optoelectronic device를 link시킴으로써 system 상호간의 복잡한 interface를 간소화할 뿐만 아니라, electronic-to-optical conversion 및 optical-to-electronic conversion을 쉽게하여 multiplexer, demultiplexer등에도 융통성있게 쓰일 수 있을 것이다. OEIC는 미래의 optical processing/communica-

tion뿐만 아니라 optical computing에 이르기까지 다양하게 응용될 가능성을 크게 가지고 있다.

역사적으로 볼 때, OEIC는 electronic IC에 비해 집적도가 훨씬 뒤떨어진다. Transistor의 integration에서는, IC, LSI(Large Scale Integration), VLSI(Very Large Scale Integration)을 거쳐 이제는 ULSI(Ultra Large Scale Integration)을 바라보고 있다. OEIC에서는 아직 IC(Integrated Circuit)의 단계를 못 벗어나고 있는 것이다. 이는 OEIC의 역사가 비교적 짧고, 그 필요성이 최근에야 비로써 인식되기 시작한 때문이기도 하다. OEIC는 지금까지 light source(LD)+driver(FET) 또는 detector(PD)+amplifier(FET)등 간단한 2개의 기능을 integrate해 보는 정도였지만, 앞으로는 몇개의 generation을 거치면서 발전되리라 보는데, 첫째로는 light source, detector, electronics등 2개 이상의 functional한 component들이 integrate될 것으로 보이며 optical repeater등에 사용 가능성이 있다. 다음 세대로는 IC-compatible한 optoelectronics 또는 electro-optic device들과 waveguide 그리고 electronics등이 integrate되어 VLSI의 optical interconnection이나 optoelectronic computer등에 쓰이게 될 것이다. 다음 좀더 advanced된 세대에는 optical logic device, optical processor, optical computer등에의 응용이 전망된다.

앞으로 연구될 OEIC의 component를 본다면, electronic IC와 compatible한 microoptic device(lasers, detectors), surface-emitting laser array, high speed optoelectronic/electro optic conversion device, quantum devices, optical logic devices(bistable, nonlinear), spatial light modulator(time-domain, spatial-domain), optical transistor, optoelectronic transistor등이 예상된다.

OEIC의 material/processing issue로는 electronic device의 material/processing과 photonic de-

vice의 material/processing의 compatibility로 보겠다. 예를들어 ion implantation이 필요한 electronic processing과 필요없는 photonic processing의 조화 문제, electronic device와 photonic device의 구조문제, etching문제, temperature cycle문제, 또 layering 차이에서 오는 두께의 차이, 즉 planarization 문제등이 issue가 될 것이다.

OEIC는 GaAs substrate를 기초로한 GaAlAs-based OEIC와 InP substrate를 기초로한 InGaAsP-based OEIC의 두갈래로 대분할 수 있다. GaAs-based OEIC는 단파장 system에, InP-based OEIC는 장파장 system에 사용될 것이다. 따라서 GaAs-OEIC는 local area network, optical signal interconnect등에 쓰이게 되며, InP-OEIC는 high speed long-distance통신에 쓰이게 될 것이다. 허나 결국에는 두개의 system이 하나로 합쳐서 파장의 차이에는 오는 barrier를 넘어서게 될 지도 모른다. 즉, optical fiber내에 손실이 적은 장파장이 local, short distance communication에도 필요하게 될 가능성도 있기 때문이다. 그러나 InP-based electronics는 GaAs-based electronics에 비해 아직 insulating gate등의 부족으로 인하여 성숙단계에 있지 못하므로, MESFET, MISFET 보다는 JFET등이 이용되고 있다. 또한 InP의 semi-insulating substrate질도 GaAs보다 훨씬 뒤떨어진 까닭에(defect density= $10^5\text{-}6\text{cm}^2$), high resolution feature를 가진 device등은 아직 제조가 어려운 상태이다. InP의 ion-implantation technology도 아직 미흡하며, InP의 Schottky barrier energy도 낮기 때문에 (0.4-0.5 eV) 누설전류가 높아서 MESFET device등이 적당하지 못한 것으로 보고있다. 그러나 effective electron drift velocity가 GaAs의 $V=1.5 \times 10^7\text{cm/s}$ 에 비해 높아서 ($V=2.5 \times 10^7\text{cm/s}$), high speed device등을 위한 많은 발전이 있을 것으로 보고있다. 더욱이 InP의 bandgap이 어떤 배합률을 가진 InGaAsP보다도

높아서 optical radiation에 투명하므로, OEIC 상에서의 transistor는 laser간에 cross talk 등이 없을 것이라는 것이 장점으로 보여지고 있다. 이와 반대로 GaAs-OEIC에서는 optical radiation이 GaAs device에 의해 흡수될 가능성이 높다. 여러가지 technological issue 등이 문제로 남아 있으나, value로 보아서 많은 연구가 계속될 것이다.

IX. SILICON 기관위의 ELECTRONICS 및 PHOTONICS

현재 전자산업의 기초적인 substrate material은 silicon임을 부정할 수 없을 것이다. Silicon은 다른 어떠한 electronic substrate material보다도 값이 싸고, 풍부하고, 견고하며, 열전도율이 높고, 강도도 높고, 또 직경이 크게 제조될 수 있다는 것들을 장점으로 갖고 있다. 한가지 단점이 있다면 발광 가능성이 매우 낮아서 optoelectronic device로는 부족하다는 것이다. 최근에 와서 이러한 점들을 보완하고 또 활용하기 위하여 silicon을 substrate로 하여 electronics와 photonics를 공히 integrate하려는 노력이 일고있다. 이것은 즉, GaAs-based OEIC와 InP-based OEIC등에서처럼 Si-based OEIC를 시도해 보려는 technology의 일환이다. 예를들어 GaAs 박막결정을 silicon substrate위에 입힌 다든가, InP 박막을 silicon위에 입힌다든가 하면 GaAs 또는 InP의 장점과 silicon의 장점을 함께 보완 이용할 수 있겠다는 논리이다.

역사적으로 볼때 이러한 시도는 거의 없었다고 보아도 좋을 것이다. 1960년대에 heterojunction device를 만들기 위한 노력이 있었으나, 이는 interface property를 이용한 photovoltaic device등의 목적이 있었을 뿐이다. 최근에 재개된

GaAs on Si, GaAs on InP, InP on Si 등의 노력은 functional하게 이러한 layer들을 monolithic integration의 목적에 사용코자 함이다. 이것은 전통적으로 III-V material과 silicon material등 독자적인 연구, 개발에만 주력되어 왔던 노력을 상호보완적으로 연구 개발해 보자는 시도에서 나온 것이다. 또 하나는 MBE, MO-CVD와 같은 정교한 증착기술들이 가능해져서 III-V lattice와 silicon lattice간의 큰 차이를 극복할 수 있는 가능성이 많아졌기 때문이기도 하다. 어쨌든 이러한 시도가 성공된다면 III-V material을 통한 high speed, optoelectronic function에 silicon material을 기초로한 electronic device들과 integrate하게 되는것이다. 또 한가지 이점은 위에 말한대로 silicon의 substrate로써 우월한 점을 이용할 수 있는 것이다.

III-V on silicon의 응용분야는 (1) III-V substrate를 우수한 silicon substrato 대체할 수 있다는 점, (2) board-to-board, chip-to-chip, frame-to-frame등의 optical interconnection, (3) intrachip optical interconnection, (4) 3차원 집적 회로의 가능성 들이다. 이미 LED, LD, MESFET, HBT, HEMT등의 개별적 소자뿐 아니라, 이들의 monolithic integration도 발표되어 있다. Silicon위에 얹혀진 device들은 GaAs device, InP device, GaSb device, 또 Ge/Si superlattice device등 이미 다양하다. GaAs FET on silicon의 경우 performance는 GaAs FET on GaAs에 비해 약 80%에 달하는 것으로 보고되어 있다. Optoelectronic device의 경우 cw quantum-well laser들이 보고 되어 있으나, 10^{7-8} dislocation/cm²의 높은 defect density 때문에 불과 20여시간 정도밖에 유지되지 못한 것으로 보고되고 있다. 따라서 지금까지의 결론은 GaAs/Si은 electronic device로는 가능성이 있으나 optoelectronic device로는 어려움이 있을 것으로 전망된다. 오히려 InP-based optoelectronic

device가 더 실현성이 많은 것으로 보여지는데 이는 InP laser가 defect에 비교적 덜 민감하기 때문인 것으로 보여지고 있다.

III-V layer를 silicon위에 실현하는데 있어 문제가 되는것은 역시 격자와 열팽창이 서로 다른 물질사이에서 오는 이질적인 요소이다. 이 문제는 lattice mismatch, thermal mismatch, chemical mismatch의 세부분으로 구분될 수 있다. GaAs 과 silicon의 경우 4%의 lattice mismatch, InP와 silicon의 경우 7%의 lattice mismatch등이 알려져 있는데, 박막증착이 이루어지기는 해도 mismatch에서 빚어지는 많은 defect density, thermal instability, wafer warpage 그리고 chemical interdiffusion들에 의한 cross-doping등이 문제가 되어있다. Superlattice layer 또는 germanium layer들을 intermediate layer로 삽입하여 이 문제들을 감소시켜 보려는 노력들이 단편적으로 도움을 주고있기는 하나, 근본적으로 해결될 지는 좀 더 연구해 보아야 할 것이다. Integration의 경우 electronic device와 photonic device의 compatibility등에 관한 문제는 OEIC와 관련하여 위에 언급한 바와 같다고 볼 수 있다.

Ge_(x)Si_(1-x)/Silicon의 경우는 III-V on Silicon의 경우와 좀 다른데, 이는 Ge와 Si의 성분비를 조금씩 바꾸어가면서 SLS(strained-layer-superlattice)를 만들으로써 mismatch가 비교적 완화되게 만들수 있기 때문이다. 이러한 경우 band-gap variation을 dynamic하게 변화할 수 있을뿐 아니라, photon emission까지도 가능할 것으로 내다보고 있다. 이러한 경우 또하나의 가능성으로는 Ge atom과 Si atom을 교대로 증착시킴으로써 새로운 부류의 Ge-Si compound semiconductor를 synthesize할 수 있는 노력을 하고있는 것이다. 이와같이 heteroepitaxy를 통하여서 silicon위에 다양한 layer를 증착시킴으로써 전에 없었던 새로운 material과 device 또 structure를

개발해 나가고 있으며, electronics와 photonics를 integrate할 가능성에 대한 연구도 많은 기관을 통해 진행되어 가고 있다.

X. 3차원 집적

현대 반도체 연구의 또하나 frontier는 어떻게 3차원 소자(three-dimensional device structure)를 구축하여 좀 더 밀도높은 회로를 만들어 낼 수 있을까 하는 것이다. 이개념은 1980년대 초에 시작된 SOI(silicon-on-insulator) 기술에 그 구조를 두고있다. 현재까지 대부분의 연구는 silicon을 중심으로 행해져 왔으나, 다른종류의 반도체에 대해서도 SOI와 같은 구조를 얻기위한 노력이 진행되고 있다.

우선 간단히 SOI의 구조를 살펴본다면, 첫째 silicon substrate 위에 SiO₂ 또는 Si₃N₄등의 비결정 dielectric layer를 입힌다음 crystalline silicon layer를 얻어내는 방법이 있고, 또 다른 방법으로는 CaF₂ 등의 crystalline insulator를 silicon위에 얹은후, crystalline silicon 박막을 얻어내는 방법이 있다. 이렇게 insulator외에 얻어진 silicon device의 장점들은 high speed, high density, radiation-hardened, 3차원구조 등의 circuitry를 만들 수 있다는 데 있다. High speed는 substrate에서 오는 parasitic resistance와 capacitance를 insulator로 예방함으로써 time constant를 감소시켜 얻어질 수 있다고 보며 실제로 3~4배 정도의 speed 증가가 실험적으로도 얻어졌다. High density는 인접한 device와 device간에 거리가 좁혀질 때 발생하는 latch-up을 예방함으로써 밀도를 높일 수 있다고 보는 것이다. 또 radiation hardening의 경우는 SOI가 radiation의 영향을 받는 substrate로부터 insulator에 의해 보호를 받음으로써 그 영향을 줄일수 있는 것으로 보며, 그 효과가 이미 증명되고 있기도

하다. 이러한 여러가지 이점이 있음과 동시에 3차원구조가 특별히 관심을 받는 이유는 silicon과 dielectric layer를 교대로 증착하여 multiple SOI layer를 얻어낼 경우 각 silicon layer마다 인접한 layer의 interference없이 device를 만들수 있으며, 수직적으로 multiple stack을 만들수 있기 때문에 밀도높은 device는 물론 위에 말한 SOI 장점들을 최대로 이용할 수 있다는 것이다. Fujitsu 등에서는 이미 two-layer SOI로 1K SRAM 등을 만든 예가 있다. 한마디로 3차원 device의 개념은 광활한 Texas 땅에 낮고 넓직한 ranch house를 짓는 개념에서 벗어나, 도시나 우리나라와 같은 좁은땅에 고층 아파트를 짓는 개념과도 같다고 보아도 좋겠으며, 앞으로 점점 더 밀도가 높아질 초고집적 회로들에 대처하여 볼때 개념적으로 건전한 접근방법중의 하나임을 인식할 필요가 있으리라고 본다.

결국 문제는 어떻게 질이 높은 SOI와 multiple stack를 이루어 나갈 것인가 하는 것이다. 역사적으로 볼때 몇가지 시도해온 방법들이 있는데, 이는 zone melting방법, solid-phase epitaxy, SIMOX, 그리고 epitaxial insulator의 사용방법 등이다. zone-melting방법은 SiO₂위에 비결정 silicon을 증착한 후 laser beam등을 이용해서 용해된 molten-zone을 서서히 이동시키면 결정 silicon으로 solidify하게 되는 과정을 말한다. Solid-phase epitaxy는 비결정 silicon의 온도를 높이면 고체상태에서 재결정화 된다. SIMOX(Separation by IMplantation of Oxygen)는 oxygen ion을 400 KeV로 silicon에 주입시켜 buried oxide layer를 형성한 후 anneal하여 얻어지는 SOI방법이다. 또 다른 SOI방법은 silicon위에 CaF₂결정을 증착시키고 그위에 silicon epi-layer를 증착시켜서 얻어내는 SOI방법이다. 이중 가장 실용적인 방법은 zone-melting방법과 SIMOX방법으로써 과거에는 zone-melting방법이 많이 연구되었으나,

최근에는 SIMOX방법이 많은 관심을 끌고 있다. Texas Instrument의 경우 16K SRAM을 SIMOX방법으로 성취해 낸 것으로 보고되어 있다. 그러나 3차원 방법으로는 zone melting방법, 또는 solid-phase방법, CVD방법 또는 epitaxial insulator 사용방법등이 가능성이 많은 것으로 보이며 아직도 기초연구가 많이 되어야 함은 말할 필요도 없겠다.

3차원구조를 형성함에 있어 개념적으로 issue가 되는 것은, 우선 device-quality의 material layer를 얻어내는 것이고 1차, 2차, 3차 등의 layer를 형성함에 있어 각층마다 planarization이 확보되어야 하며, 또한 low-temperature processing, heat dissipation cross-talk등이 중요한 issue로 다루어져야 할 것이다.

3차원 개념은 silicon뿐만 아니라 GaAs, InP등 화합물반도체에도 매력적인 개념이다. 허나 이들 화합물반도체는 silicon과는 달라서 epitaxial방법이 더유력하게 보인다. 따라서 GaAs-on-CaF₂등이 연구되고 있으며, zone-melting 방법등은 사용되지 않고있다. 또 epi-insulator의 경우, CaF₂와 SnF₂등을 배합하여 Sn_(x)Ca_(1-x)F₂등의 insulator를 형성하면 InP 등과도 lattice match가 가능하여 지므로 이들을 이용한 InP/insulator/Silicon등에 대한 연구도 되고있다. 이처럼 GaAs/insulator/Si, InP/insulator/Si등의 구조가 가능해 지면 3-dimensional electronics와 photonics의 monolithic integration이 가능해 질 것이다.

XI. 기타 선진 연구

1. Indirect-to-Direct Band Gap Conversion

Silicon, germanium, AlSb등 어떤 반도체들은 indirect bandgap material로써 optical radiation의

probability가 매우 낮아서 발광이 잘 안되는 것으로 알려져 있다. 그러나, 이들을 atomic dimension에서 변화시켜 발광을 할 수 있는 물질을 만들어 보려는 노력들이 있다. 예를들어 Ge/Si superlattice에서 "compound semiconductor"를 만들어 zone-folding을 하는 경우, indirect band-gap이 direct-bandgap으로 바꿀수 있다면 발광의 확률이 높아질 수 있다는 것이다. 아직 발표되지 않았으나 이에대한 연구는 계속되고 있다. 또한예로서 GaP의 경우 He Atom을 He-GaP-He의 형태로 incorporate시키는 경우, direct band-gap을 형성하게 된다는 이론적 연구도 되고 있다.

2. II-VI, IV-VI, 유기물 등 기타

II-VI 반도체들은 5-10 micron에 이르는 infrared 영역에 이용될 수 있는 물질들로서 연구가 많이 진행되고 있다. 또 다른 연구분야는 video disk, information display등 optical device에 이용될 blue laser의 연구개발이다. 대부분의 II-VI 반도체는 direct bandgap을 가지며, 따라서 발광능력이 있으므로 optoelectronic device에 사용가치가 높다. 또 한예를 들면, II-VI 반도체는 ionization ratio가 높은 관계로 해서 원하는 spectral range에 효율높은 avalanche photodetector 등이 가능하므로 optical communication등에도 사용가능성이 높다. 다만 아직 III-V에서와 같은 epitaxy등 재료연구가 부족 하여 실용단계에는 시간이 좀 걸리기는 하겠으나, infrared spectrum이 중요해 짐에 따라 II-VI 반도체가 좀 더 많은 관심을 얻게되리라고 보고 있다.

II-III반도체는 또한 배합률에 따라 고유의 magnetic property를 나타냄으로 용도는 더욱 다양할 것으로 본다.

IV-VI반도체들로는 Pbs, PbSe, PbTe등이 있는데, 이들도 optoelectronic/optical technology에

중요한 자리를 차지하가 될 것이다. Polymer등 고분자를 이용한 organic semiconductor들도 무기물반도체 못지않은 성질을 보이고 있는데, Langmur-Blodget method 또는 direct evaporation 증착방법등을 통해 유용성을 개발해 나갈 것이다. Silicon 또는 GaAs 등에 반도체 유기물, 비선형 유기물 등을 증착시키는 연구는 이미 진행되고 있다. II-VI, IV-VI, 유기물의 반도체는 아직 material에 대한 연구조차 Si 또는 III-V에 비해 뒤 떨어진 관계로 impact는 약하나, 다양성을 제 공함으로써 지속적인 관심과 연구가 필요함을 말할 필요가 없겠다.

XII. 요약 및 결론

현대 전자산업은 대부분 실리콘 반도체를 기초로 한 과학과 기술에 근거하고 있다. 1940년대 말 발명된 silicon transistor가 현대와 같은 정보문명을 이루게 되리라고는 거의 예측을 못했을 것이다. 그러나 차츰 silicon의 고유능력이 한계를 들어냄에 따라, 좀더 많은 정보를 신속히 처리하기 위한 수요에 맞추어 기본적으로 혁신적인 기술을 더듬고 있는것이 사실이다. 이와 함께 대두되고 있는 반도체 첨단연구의 동향을 몇개 분야에 걸쳐 살펴보았다. 현대전자산업이 기술적 차원에서 어떠한 위기에 다다른 것은 아니다. 다만 미래에 다가올 정보산업에 좀더 적극적으로 대처할 기본적인 연구가 필요하기 때문이다. 연구는 evolutionary한 점진적, 진화적 진보도 필요하지만 revolutionary한 연구가 좀더 심도 있게 느껴진다는 것이 과학기술공동체의 공통된 의견이다. 이러한 차원에서 볼 때, 새로운 물질의 개발, 새로운 physics의 발견, 새로운 구조, 새로운 소자의 개발연구 등이 필요하게 된다.

예를들어 전자(electron)를 이용한 information processing에 한계를 느낀다면 광자(photon)를

이용한 information processing을 개척해 보아야 하는 것이다. 사실 역사적 입장에서 볼때, 반도체 laser, photonic device등이 이미 optical fiber와 함께 optical communication에 적극적으로 쓰여지고 있음을 주지하고 있는 사실이다. 이러한 차원에서 볼때 반도체 광소자들의 출현은 1940년대의 silicon전자소자의 출현과 유사한 역사적 기점으로 여겨지고 있기도 하다. 즉, 당시의 반도체 transistor가 현대의 전자정보 문명을 이루듯이, 현대의 광소자도 미래에 어떠한 문명을 이룰 것인지 예측하지 못하는 것이다. 이 논고는 이러한 맥락에서 살펴본 것이다. 다루어진 대부분의 분야는 확실성을 가진것 이라기 보다는 가능성을 가진 분야들이다. 하지만 이미 많은 연구가 진행되고 있으며, breakthrough도 있어왔고 또 앞으로도 있어질 것으로 전망된다. 이러한 분야들은 단기간에 이루어지는 연구개발이 아니다. 선진국들에서도 장기적으로 보고 기술과 know-how를 축적하고 있다. 우리나라에서도 다가올 기술적 변화에 능동적으로 대처하려면 이러한 기초분야에 능력이 닿는 한 연구경험과 기술, 지식을 축적해 나가야 한다. 선진국에서 중요해 졌으니 우리도 해보자고 할 때에는 이미 늦어져 있을 것이기 때문이다. 우리나라가 이런 분야에 관심을 기울여야 하는 또 하나 중요한 이유는 이런 분야가 아직 미개척 분야들이므로, 선진함으로써 더 많은 것을 습득할 수 있다는 이유에서이다. 지금까지는 선진국의 기술을 copy하여 습득했다 하더라도, 이제는 copy할 만한 margin(여유)들이 줄어들고 있으며, 따라서 그 한계에 닿아 있다고 보아도 좋을 것이다. 이제부터는 추종한다는 개념에서 벗어나 선진한다는 개념을 가지고 연구풍토와 지원을 가꾸어 가야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] "And Now, The Age of Light," Time Magazine, Oct. 6, 1986. p56.
- [2] T. E. Bell, "Optical Computing: A Field in Flux," IEEE Spectrum, August, 1986. pp34-57. Also, H. J. Caulfield, et al., "Optical Computing: The Coming Revolution in Optical Processing," Laser Focus, November, 1983. pp100-110
- [3] L. C. Gunderson and D. B. Keck, "Optical Fibers: Where Light Outperforms Electrons," Technology Review, May/June, 1983. pp33-44.
- [4] J. R. Barker, "The Physical Limitations of Integration and Size Reduction in Semiconductors," Microelectronics Journal, 17, 15, 1986. Also, C. A. Mead and L. Conway, Introduction to VLSI Systems, Addison-Wesley, 1980.
- [5] Special Issue on Optoelectronics, Physics Today, May, 1985.
- [6] A. M. Glass, "Optical Materials," Science, 235, 1003-1009, February, 1986; "Materials for Optical Information Processing," Science, 226, 657-62, 1984
- [7] See, for example, (a) J. W. Goodman, et al., "Optical Interconnections for VLSI Systems," Proceedings of the IEEE, 72, 850, 1984; (b) L. D. Hutcheson, "Optical Interconnects Replace Hardwire," IEEE Spectrum, March, 1987, pp30-35; (c) D. H. Harman, "Digital High Speed Interconnects: A Study of the Optical Alternative," Optical Engineering, 25, 1086, 1986.
- [8] See, for example, D. K. Ferry, Ed, Gallium Arsenide Technology, Howard W. Sams & Co., 1985; M. J. Howes and D. V. Morgan,

- Eds. *Gallium Arsenide : Materials, Devices, and Circuits*, John Wiley & Sons, 1985.
- [9] V. Narayanamurti, "Crystalline Semiconductor Heterostructures," Physics Today, 37, 24(1984) ; "Artificially Structured Thin Film Materials," Science, February 27, 1987.
- [10] See, for example, *Heteroepitay on Silicon*, Materials Research Society Symposia Proceedings, 67, MRS, 1986. Also, proceedings of 1987.
- [11] See, for example, (a) K. V. Ravi, *Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon*, John Wiley & Sons, New York, 1981 ; (b) R. B. Swaroop, "Advances in Silicon Technology for the Semiconductor Industry," Solid State Technology, June, 1983, p111.
- [12] J. B. Mullin, et al., "Liquid Encapsulation Crystal Pulling at High Pressures," J. Cryst. Growth, 34, 281-5, 1986 ; Also, Phys. Chem. Solids, 26, 782, 1965.
- [13] W. A. Gault, et al., "A Novel Application of the Vertical Gradient Freeze Method to the Growth of High Quality III-V Crystals," J. Cryst. Growth, 74, 491-506, 1986.
- [14] See, for example, (a) B. M. Welch, "Integrated Circuits : The Case for Gallium Arsenide," IEEE Spectrum, December, 1983, pp 30-37 ; (b) T. P. Pearsall, "Two-dimensional Electronic Systems for High-Speed Device Applications," Surface Science, 142, 529-544, 1984 ; (c) H. H. Wieder, "Device Physics and Technology of III-V Compounds," J. Vac. Sci. Technol., A2, 97-102, 1984.
- [15] H. Kressel, Ed, *Semiconductor Devices for Optical Communication*, Springer Verlag, New York, 1982
- [16] S. Fuke, et al., "The Heteroepitaxial Growth of ZnSe on GaP and GaAs substrates," J. Appl. Phys., 61, 492, 1987.
- [17] H. Nelson, "Epitaxial Growth from the Liquid State and Its Application to the Fabrication of Tunnel and Laser Diodes," RCA Review, 24, 603, 1963.
- [18] See, for example, (a) M. B. Panish, "Molecular Beam Epitaxy," Science, 208, 916, 1980. (b) J. M. Woodall, "III-V Compounds and Alloys : An Update," Science, 208, 908, 1980. (c) K. Ploog, "Molecular Beam Epitaxy of III-V Compounds : Application of MBE-grown Films," Ann. Rev. Mater. Sci., 12, 123-48, 1982. (d) A. Y. Cho and J. R. Arthur, "Molecular Beam Epitaxy," Progress in Solid-State Chemistry, 10, 157-191, 1975.
- [19] H. Morkos and P. M. Solomon, "The HEMT : A Superfast Transistor," IEEE Spectrum, February, 1984, pp28-35.
- [20] See, for example, (a) H. M. Manasevit, J. Crystal Growth, 55, 1, 1981 ; (b) P. D. Dapkus, Ann. Rev. Mater. Sci., 12, 243, 1982 ; (c) M. J. Ludowise, "Metalorganic Chemical Vapor Deposition of III-V Semiconductors," J Appl. Phys., 58, R31, 1985.
- [21] J. J. Tietjen and J. A. Amick, J. Electrochem. Soc., 113, 724, 1966.
- [22] G. H. Olsen and V. S. Ban, "InGaAsP : The Next Generation in Photonics Materials," Solid State Technology, February, 1987, pp 99-105.
- [23] See, for example, W. T. Tsang, "Chemical Beam Epitaxy of InP and GaAs," Appl. Phys. Lett., 45, 1234, 1984 ; "Very High Quality Single and Multiple GaAs Quantum

- Wells Grown by Chemical Beam Epitaxy," Appl. Phys. Lett., 48, 1288, 1986 ; "Chemical Beam Epitaxial Growth of Extremely High Quality InGaAs on InP," Appl. Phys. Lett., 49, 170, 1986 ; "GaAs/AlGaAs Quantum Wells and Double-Heterostructure Lasers Grown by Chemical Beam Epitaxy," J. Crystal Growth, 77, 55-65, 1986 ; "Chemical Beam Epitaxy of III-V Semiconductors," International Solid State Devices and Materials, August 25-27, 1986, Tokyo, Japan.
- [24] E. Esaki, "Semiconductor Superlattices and Quantum Wells," IEEE J. Quant. Elect., JQE 22, 1611, 1986.
- [25] "Advances in Semiconductors and Semiconductor Structures," SPIE Conference, March 23-27, 1987, Bay Point, Florida, USA.
- [26] R. Nottenburg, et al., "High-Speed InGaAs(P)/InP Double-Heterostructure Bipolar Transistor," IEEE Elect. Dev. Lett., EDL-8, 282, 1987.
- [27] K. Ploog and G. H. Dohler, "Compositional and Doping Superlattices in III-V Semiconductors," Advances in Physics, 32, 285-359, 1983.
- [28] F. Capasso, "Compositionally Graded Semiconductors and Their Device Applications," Ann. Rev. Mater. Sci., 16, 263-91, 1986 ; "New Multilayer and Graded Gap Optoelectronic and High Speed Devices by Band Gap Engineering," Surface Science, 142, 513-528, 1984.
- [29] J. C. Bean, "Strained-Layer Epitaxy of Germanium-Silicon Alloys," Science, 230, 127, 1985.
- [30] A. Yariv, "The Beginning of Integrated Optoelectronic Circuits," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-31, p.1656 (1984).
- [31] S. R. Forrest, "Monolithic Optoelectronic Integration : A New component Technology for Lightwave Communications," J. Lightwave Technol., vol. LT-3, p. 1248, (1985).
- [32] H. Yajima, Trends and Future Prospects of Optoelectronic Integrated Circuits," Optoelectronic Conference(OEC'86), Tokyo Institute of Technology, O-Okayama, Tokyo, Japan, July 29-31, 1986.
- [33] T. Nonaka, M. Akiyama, Y. Kawarada, and K. Kaminishi, "Fabrication of GaAs MESFET Ring Oscillator on MOCVD Grown GaAs/Si(100) Substrate," Japan. J. Appl. Phys., vol. 23, L919 (1984).
- [34] R. Fischer, T. Henderson, J. Klem, W. T. Masselink, W. Kopp, and H. Morkoc, "Characteristics of GaAs/AlGaAs MODFETs grown directly on (100) Silicon," Electron. Lett., vol. 20, 945(1984).
- [35] R. Fischer, J. Klem, C. K. Peng, J. S. Gedymin, and H. Morkoc, "Microwave Properties of Self-aligned GaAs/AlGaAs HBT on Silicon Substrates," IEEE Electron. Device Lett., vol. EDL-7, 1129 (1986).
- [36] H. Shichijo, J. W. Lee, W. V. McLevige, and A. H. Taddiken, "GaAs E/D MESFET 1-kbit Static RAM Fabricated on Silicon substrate," IEEE Electron. Device Lett., vol. EDL-8, 121 (1987).
- [37] See, for example, Materials Research Society Symposia Proceedings, 13, (1983), 23, (1984), 35, (1985) ; and "SOI Technology and 3-D Integration," International Workshop on Future Electron Devices, March 19-21, 1985,

Shuzenji, Japan.

- [38] For example, K. Tsutsui, et al., "MESFETs on a GaAs-on-Insulator Structure," IEEE Elect. Dev. Lett., *EDL-8*, 277, 1987.
- [39] T. Nishioka, et al., *J. Appl. Phys.*, 56, 336 (1984); E. H. Lee, et al., "Heteroepitaxy of GaAs on Si with Intermediate Layers of Evaporated Ge and Recrystallized Ge-on-Insulator (GOI)," *Proceedings of SSDM*, August, 1986, Tokyo, Japan.
- [40] T. Asano and H. Ishiwara. "Epitaxial Growth

- of Si films on CaF₂/Si Structures with Thin Si Layers Predeposited at Room Temperature," J. Appl. Phys., Vol. 55, 3566 (1984).
- [41] L. J. Schowalter and P. W. Sullivan, "Growth and Characterization of GaAs/CaF₂/Si Heteroepitaxial Structures," *MRS Spring Meeting*, April 21-25, 1987, Anaheim, CA.
- [42] D. M. Wood and A. Zunger, "Electronic Structure of Generic Semiconductors: Antifluorite Silicide and III-V Compounds," Physical Review B, 34, 4105, 1986.