

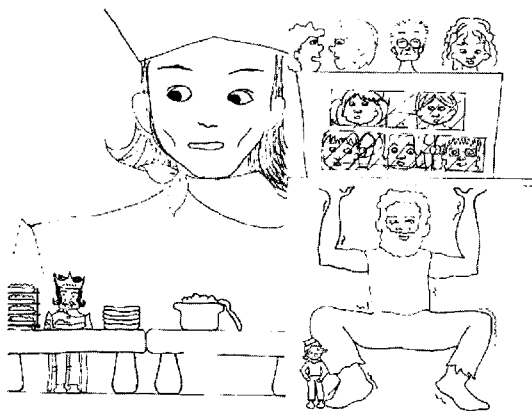
나노 포토닉스 : 과거, 현재, 미래

이정일*, 조운조*, 임한조**

*한국과학기술연구원 나노소자연구센터, **아주대학교 전자공학부

I. 레뮤엘 걸리버, 마르코 폴로와 나노기술

나노기술이란 재료의 크기를 점점 작게하여 100nm 이하가 되었을 때 나타나는 극심한 성질의 변화를 이용하는 것이다. 상사형으로 축소할 때의 물리적 성질의 변화가 미국 고교물리 교과서 PSSC에 걸리버 여행기의 소인국, 대인국의 문제점을 설명하는 대목에 잘 나타나 있다. 필요한 열량(기초대사량)은 표면적에 비례하므로 키가 10분의 일이라면 필요열량은 100분의 1, 공급되는 음식의 양은 부피에 비례하여 1000분의 1이 되어 우리가 밥 한 공기를 먹을 때 릴리푸트인들은 10공기를 먹어야 한다는 것이다. 알루미늄 분말에 성냥을 그어대면 폭발하는 것도 같은 이치이다. 대인국의 경우에는 뼈의 세기가 단면적에 비례하므로 키가 10배로 커졌을 때, 뼈의 세기는 100배로 강해졌지만 지탱해야 하는 무게는 1000

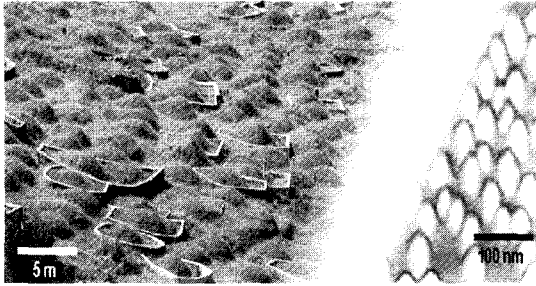


〈그림 1〉 걸리버 여행기 소인국과 대인국 (그림 이승현).

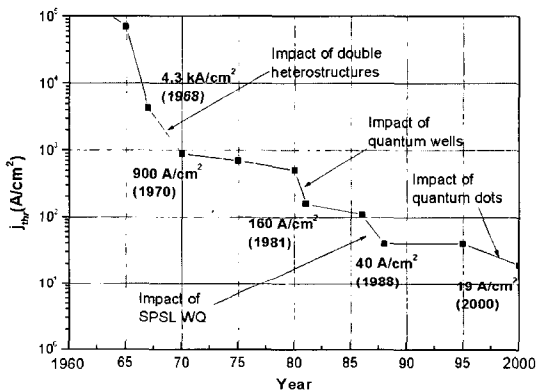
배로 늘어나 상당한 곤란을 겪게 된다. 상사형으로 축소하는 과정에서 이러한 원리를 바탕으로 문제가 생길 수도, 이득이 생길 수도 있다(그림 1).

오늘날 나노기술이 약속하는 세상을 13세기 말 마르코 폴로의 동방견문록에 비유하는 이도 있다. Timp 박사는 ‘나노테크놀로지’ 단행본^[1]을 편집하면서 서문에 마르코 폴로가 당대인들에게 들려준 만리장성, 석탄, 지폐, 도자기, 활자, 물시계 등을 양자선(우물), 탄소 풀러린, 자기조립 단일층, 홀로그램으로 조작된 원자, 원자 분자 조작, 전자를 하나씩 세는 시계 등에 비유하였다. 마르코 폴로의 이야기가 흑세무민하는 허풍으로 간주되던 당대의 상황을 소개하면서 나노기술 역시 당대인들이 믿기 어려운 놀라운 세계임을 역설하였다. 마르코 폴로가 한국의 공동묘지 봉분을 보고 동방견문록에 포함시켰더라면 Timp 박사는 곧장 양자점을 연상하였을 것이다. 구속하는 차원수를 점점 늘려 3차원적으로 구속하면 0차원 물리가 지배하는 양자점이 형성된다. 0차원보다 더 적은 차원은 지상에 없으므로 양자점과 묘지 봉분은 지상에서의 종착역(The last frontier, Our final destination)이라는 공통점도 갖게 된다(그림 2).

나노 포토닉스는 결국 전자나 광자를 구속함으로써 발생하는 특성을 이용하여 기존 광전소자의 특성을 향상시키거나 새로운 개념의 소자를 개발하는 것이다. 반도체에서 처음으로 1차원 구속(2차원계)을 구현한 이는 한국인으로 당시 Bell Lab에 재직하고 계시던 강대원 박사이다^[2]. 강박 사념께서 1960년 실리콘 MOSFET을 열산화법으로 성공적으로 제작한 이후 Fang 등이 1966



〈그림 2〉 공동묘지 봉분과 양자점-지상에서의 종착역 (사진 윤의준, 황희돈).



〈그림 3〉 차원감소에 따른 레이저 특성(문턱전류밀도)의 극적인 향상. 각각의 돌파기술이 표시되어 있다.

년 MOSFET의 반전층이 2차원 전자기체임이 실험적으로 증명하였고^[3] von Klitzing 1980년 양자 홀 효과^[4]를 관측하여 노벨상이 받았다. 또한 벌크상태에서 간접천이반도체에 속하는 Si은 광소자에의 응용이 어려웠으나 최근에 나노결정 상태에서는 직접천이 성질을 보이는 것이 확인되어 Si을 이용한 광소자 개발이 극히 최근에 시작되었다. 이와는 달리 Si보다 이동도 등 성질이 우수하고 직접천이반도체로서 수/발광 기능이 있는 화합물 반도체를 이용하여 전자소자를 제작하기 위하여 산화막 형성도 시도되었으나 성공하지 못하였다. 결국 MBE, MOCVD 같은 에피택시 기술의 발전을 바탕으로 한 양자우물, 초격자 양자점의 성질을 이용하여, 오늘날 우수한 특성의 전자소자, 광소자가 만들어지게 되었다. 대표적인 포토닉스 소자인 레이저 다이오드의 개념은 저명한 수학자인 von Neumann^[5]에 의해 일찍이

1953년에 제안되었지만, 1960년대 초에야 기초실험결과들이 등장하고^[6] 이어서 에피택시 기술에 힘입은 이중 이종구조, 양자 우물, 단주기 초격자, 양자점으로 이어지는 구속 차원의 증가로 급격한 성능 향상이 구현되었다. 〈그림 3〉에 지난 40년간 10⁴배의 급격한 성능향상을 보인 레이저의 문턱전압밀도가 도시되어 있고 각각의 돌파에 기여한 기술들이 표시되어 있다^[6]. 광자의 구속은 비교적 최근에 시도된 것으로서 광자결정(Photonic Crystal)이란 용어와 함께 쓰이는 광자 띠틈(Photonic Band Gap)은 1979년 Ohtaka^[7]가 처음 사용하였으나 본질을 약간 빗나갔다 하여 1987년 거의 동시에 Yablonovitch^[7]와 John^[8]이 각각 발표한 두 편의 논문이 폭발적인 연구의 기폭제가 되었다고 본다. 마치 주기적 쿨롱 퍼텐셜에 의해 반도체 띠틈이 형성되는 것과 마찬가지로 주기적 유전율 퍼텐셜을 가진 광자결정에서는 광자 띠틈이 형성된다. 이에 대한 이론 및 실험연구가 도처에서 격발되었으며 한 예로 일본의 OITDA에서는 2010년까지의 광자결정 소자 응용에 대한 기술지도를 발표한 바 있다.

본고는 이어지는 7편의 세부주제별 논문의 소개논문으로서 양자점과 광자결정의 기본 물리에 대한 개괄과 전망을 기술하였다.

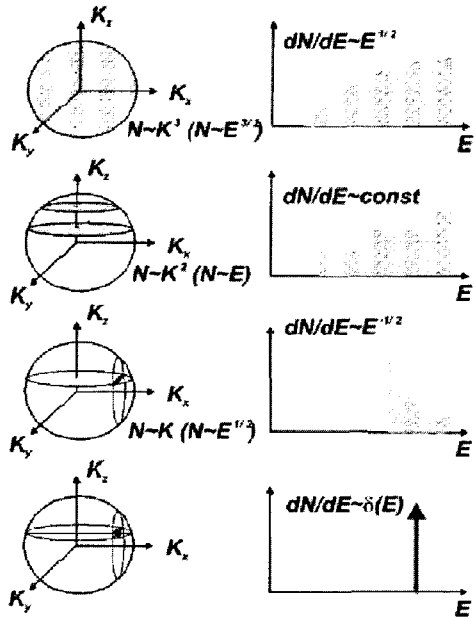
II. 양자점 소자

1. 저차원 물리

여러 가지 물리적 특성을 결정하는 전하 운반자(전자 또는 홀)의 상태밀도는 차원수가 줄어들어 따라 확연한 차이를 보이는 데 불연속화해지면서 밀도가 높아진다(그림 4).

나노 포토닉스 재료에서 나타나는 이러한 상태 밀도의 변화는 다음과 같이 소자의 특성 향상에 기여할 수 있다.

(1) 불연속 상태 밀도: 레이저의 방사파장이나 문턱전류의 온도 민감성을 둔화시켜 냉각이 불필요한 레이저 다이오드 제작이 가능하며, 수광소

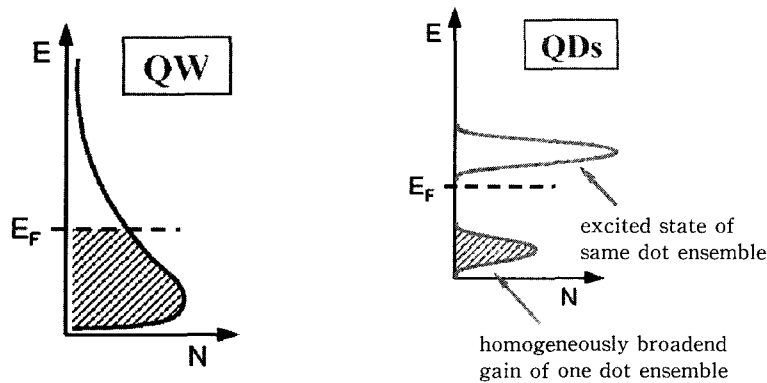


<그림 4> 위로부터 3, 2, 1, 0 차원계의 상태밀도.

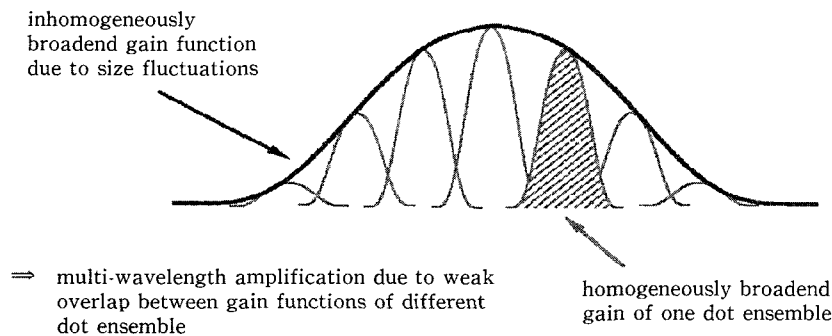
자의 고온 동작이 가능하다. <그림 5>에 양자우물과 양자점의 상태밀도 및 전자들의 채움 상태가 도시되어 있고 양자점이 온도에 덜 민감함을 알 수 있다.

(2) 작은 활성 부피와 높은 상태 밀도 : 레이저 및 반도체 광증폭기(SOA)의 문턱전류밀도는 활성부피에 비례하므로 작은 활성 부피와 높은 상태밀도는 문턱전압밀도를 감소시킨다.

(3) 비균질 넓어지기 (Inhomogeneous broadening) : 일정 면적의 소자는 수백개 이상의 양자점으로 구성되어 있으며 각각의 양자점에서 발생하는 매우 좁은 분광특성 (Homogeneous broadening)이 합쳐져서 넓은 분광 특성을 나타내므로 이를 이용하면 레이저 다이오드와 반도체 광증폭기의 이득 띠너비 (bandwidth)를 넓혀주며, 영구 분광 효율 버닝을 이용한 대용량 기억소자 개발이 가능하다. <그림 6>에 단일 양자점의 분



<그림 5> 양자우물과 양자점에서 전자의 에너지 분포. 양자점이 온도에 덜 민감함. (A. Forchel)



<그림 6> 단일 양자점 (homogeneous)과 양자점 군 (inhomogeneous)의 이득 분광 특성. (A. Forchel)

광특성과 특정 소자 전체의 분광 특성이 도시되어 있다.

그밖에 대칭적인 이득 함수와 작은 활성 부피는 고속 직접 변조에서 칩 현상을 감소시키고 고출력 레이저에서의 필라멘테이션을 줄여준다.

2. 화합물 반도체 양자점

화합물 반도체 양자점이 가장 먼저 소자에 응용된 것은 레이저 다이오드이다. <그림 3>에 나타난 바와 같이 양자점을 채용한 레이저 다이오드의 문턱전압은 현재 $18\text{A}/\text{cm}^2$ 의 기록을 보이고 있다. 레이저 다이오드의 또 다른 중요 특성인 온도 민감성도 획기적으로 둔화되고 있다. 이는 레이저 다이오드 동작시 온도 상승에 따른 보정이나 냉각장치가 필요 없게 함으로써 우수한 특성과 제작단가의 저렴화에도 기여한다. 본 특집에서는 양자점 성장, 고출력 레이저 응용, 광통신 파장대의 직접변조형 DFB 레이저의 개발 동향에 대해 서술하였다.

반도체광증폭기의 구조는 레이저 다이오드와 동일하나 양단에 반사층이 없다. 급격한 통신용량의 증가에 따라 한 가닥의 광섬유에 여러 파장의 신호를 실을 수 있는 증폭 이득대역의 확장을 위한 연구가 진행되고 있으며, 양자점소자의 비균질 넓어지기를 이용하면 광섬유의 손실이 적은 $1,250\text{nm}$ 에서 $1,620\text{nm}$ 까지의 모든 영역을 복개할 수 있는 광증폭기의 개발이 가능하다.

원적외선 수광소자는 양자점의 부피간 천이를 이용하여 적외선 영역의 파장대를 검출하는 것으로서, 기존의 양자우물소자에 비해 고온에서 동작할 수 있다는 장점 때문에 최근 활발한 연구가 진행되고 있고 중적외선($3\text{-}6\mu\text{m}$)과 원적외선($8\text{-}12\mu\text{m}$) 영역에서 InAs, InGaAs 양자점을 채용한 수광소자의 개발결과가 발표되고 있으며 동작온도가 상승하는 추세이나 검출률이 아직 상용화된 양자우물 수광소자에 못 미치고 있어 용감한 연구자들의 가슴을 설레게 하고 있다. 본 특집에서는 세계 연구동향과 국내 연구결과가 소개되었다.

넓은 띠틈 화합물반도체인 GaN에 대한 연구

역시 최근에 청색 레이저 다이오드의 개발 등으로 급부상한 분야인데 이 재료를 이용한 양자점 응용소자에 대한 연구가 도처에서 시작되고 있다. 본 특집에서는 주로 GaN 양자점 성장(MBE, MOCVD)에 관한 문제들을 고찰하고 소자응용도 논의하였다.

본 특집에서 다루지 않았지만 양자점군의 크기 및 이에 따른 에너지 분포에 의한 비균질 넓어지기를 이용한 분광홀 버닝과 이에 기초한 기억소자의 개발이 Fujitsu에서 제안되기도 했다^[10]. 자발 형성된 InAs 양자점의 크기분포에서 약 100meV 의 비균질 넓어지기가 나타나는데 단일 양자점의 균질 넓어지기는 30ueV 이하이므로 약 3000 이상의 파장 다중도가 가능하다. 이 결과는 극저온(5K)에서의 결과지만 양자점의 크기분포를 넓힌다면 주어진 소자내의 양자점 개수만큼의 다중도가 이론적으로 가능하다. 또 하나 지면관계로 본 특집에서 독립적으로 다루지 않은 중요한 분야는 나노결정 실리콘이다. 여기서 절을 달리하여 설명한다.

3. 나노결정 실리콘

벌크 실리콘은 간접 밴드갭 물질로서 전자가 두 개의 에너지 준위 사이에서 천이하기 위해서는 운동량의 변화가 필수적이다. 따라서 10K 이하의 저온에서만 빛을 관측할 수 있어 광전소자 측면에서 볼 때 실용적 가치가 낮다. 그러나 실리콘의 보아 직경인 4nm 이하 크기로 될 때 양자 크기 효과로 인하여 50%에서 60% 사이의 양자 효율을 갖게 되며 이는 벌크 상태와 비교하여 10,000배 이상의 효율이다. 이로써 많은 연구자들이 실리콘을 이용한 광전소자 개발에 관심을 가지게 되었고, 1% 효율을 가지는 LED가 발표되기도 하였다. 실리콘 나노 결정의 발광 기구으로써 표면 결합 이론과 양자 크기 효과가 제시되고 있으나 점차 양자 크기 효과를 뒷받침하는 연구 발표가 증가하고 있다.

1990년 영국, Royal Signals and Radar Establishment의 Canham^[11]이 최초로 포러스 실리콘의 나노 구조에서 상온 PL을 관찰한 이

래로, 다양한 방법으로 실리콘 나노결정 제조 방법이 개발되었다. 특히, 포러스 실리콘을 초음파 처리하는 방법^[12]과, silane ($\text{Si}(\text{OR})_4$, SiCl_4 , $\text{SiR}_4\dots$)의 열분해 방법^[13]이 많이 이용되었다. 이 밖에 습식 방법으로, 1992년 Heath^[14]는 고온 (385°C), 고압 ($>1000\text{ atm}$) 조건에서 실리콘 화합물을 환원시켜 실리콘 나노결정을 합성하였으며, Kauzlarich 연구그룹^[15]은 유기용매에서 Zintl compound (KSi)를 이용하여 성공하였다. PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition), rf-sputtering 방법, laser ablation 방법^[16]은 최근에 시작된 방법으로 주로 나노 결정 박막을 제조하는 데 이용된다.

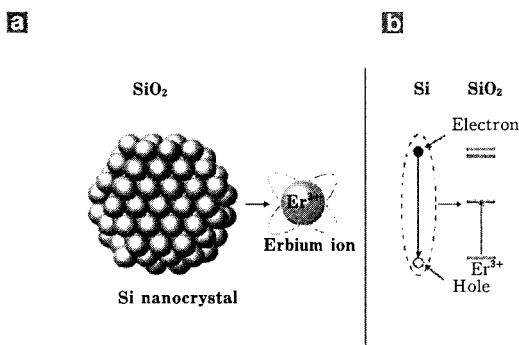
현재 광전자 소자에 응용하기 위한 대표적인 예로는 <그림 7>과 같이 광통신용 광증폭기가 제시되어있으며^[17] 그 개념은 실리콘 나노 결정에서 방출되는 빛이 Er^{3+} 이온을 펌핑하고, 이때 방출되는 $1.55\ \mu\text{m}$ 신호를 이용한다. 따라서 소자 개발을 위한 박막 공정^[18]이 활발하게 연구중이며, 광소자(Lasers, frequency doublers/mixers, light amplifiers, optical interconnects) 관련 특허들이 출원되어 있고, 실리콘 나노결정은 상온에서 단전자를 포착하고 방출할 수 있기 때문에 저전력 일렉트로닉스, nonvolatile floating gate memory에 응용 가능하다. 또한 실리콘은 값싸고, 무해한 물질로서, 방출된 빛은 생물학적으로 응용된 다른 물질과 비교할 때 100

배 정도 길게 지속되고, 크기에 따라 다른 파장의 빛을 방출하기 때문에 생물학적 tagging (Bio-sensors, imaging, targeted drug delivery, destruction of pathogens)에도 이용 가능하다.

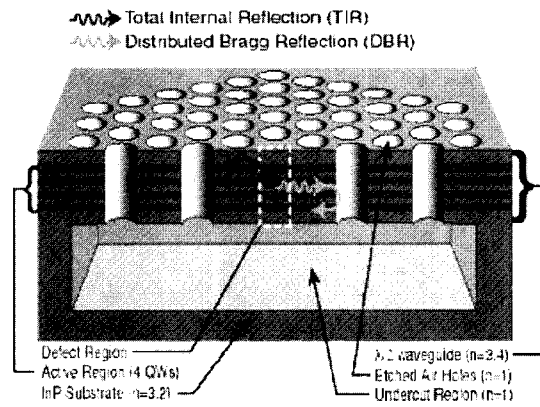
III. 광자결정

1. 원리

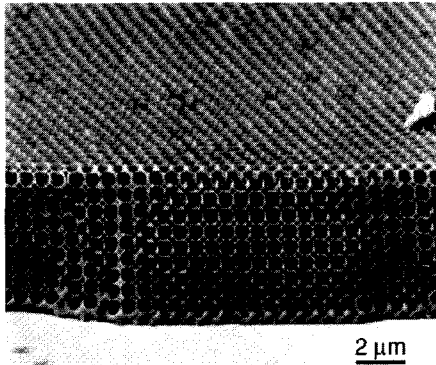
고체 결정체에서 주기적인 원자배열에 의한 쿨롱퍼텐셜에 의해 띠틈이 형성되듯이 유전율이 주기적으로 변화하면 주기의 두서너배에 달하는 파장 근처에 광자 띠틈이 형성되며 이러한 띠틈을 제공하는 (인공)결정구조를 광자결정이라 한다. 사실은 자연에도 이러한 광자결정구조가 존재한다. 나비날개의 일부분이나 풍뎅이의 잔등에도 비등방 광자결정구조가 있어 보는 각도에 따라 색깔이 달라진다. 오팔 같은 보석도 광자결정 구조를 갖고 있다. 광자결정의 이론은 모든 전자기파 영역에 적용되므로 때로는 전자기결정이란 용어를 쓰기도 하며 마이크로파 및 밀리미터파영역에서도 응용이 활발하다. 초기에는 반도체 나노공정기술이 미흡하여 주로 마이크로파영역에서 실험이 이루어졌다. 최근 발전된 반도체 미세공정기술에 힘입어 광자결정소자에 관한 연구가 극적으로 활발하여졌다<그림 8>, <그림 9>. 광자결



<그림 7> 나노결정 실리콘이 어둠에 감응하는 안테나 역할을 함^[17].



<그림 8> 광자결정 레이저 개략도



〈그림 9〉 화학적으로 구현된 역 오팔 구조
(Y.A. Blasov *et al.*, *Nature* 414, 289, 2001)

정의 이론은 또한 음파나 지진파, 파도 같은 탄성 파에도 적용되므로 결정구조물을 이용한 특정주파수대역의 음향반사판, 방진구조물, 방파제 등이 구현되거나 제안되고 있다. 유전율이 광자결정의 핵심인자로 알려져 있지만 전자파의 전파는 유전율과 자기투과성의 비가 결정하므로^[19] 자기투과성(magnetic permeability)을 주기적으로 바꾸어줄 수 있다면 똑같은 효과를 볼 수 있다. 즉 자기 광자결정도 제안할 수 있다.

2. 소지응용

광자결정소자의 응용은 매우 포괄적이어서 발광소자, 광섬유, 광자 IC, WDM 부품, 분산보상기, 전자파응용, 기록소자, 기억소자 등 현존하는 정보통신 분야의 소자, 부품을 대부분 대체할 수 있다. 발광소자의 경우 고효율(50-80%) 및 고속소자가 예견되며, 문턱전류가 1 μ A 보다 훨씬 적고, 편광이 제어되며, Q 인자가 매우 큰 레이저의 개발이 전망된다. 광섬유소자에서는 적은 손실(<10 dB/km)이 이미 보고되었고, 2010년에는 0.2dB/km 이하의 저손실 소자가 개발될 것으로 예측된다. 또한, 비선형소자가 구현되었다. 도파형 또는 전파형 광자 IC가 2차원적으로는 이미 구현되었으며 3차원 소자의 설계, 제작이 진행되고 있다. WDM 부품으로는 Add/Drop 등의 공명 여과기, AWG 여과기, 슈퍼 프리즘

여과기, 편광기, 파장 조절기 등이 유망하다. 단일 광자 방사, 구속, 및 검출을 통한 양자 통신/계산도 유망한 분야 중 하나이다. 마이크로파, 밀리미터파 및 미답의 영역인 THz 영역 소자들도 연구되고 있다. 본 특집에서는 능동소자, 수동소자, THz 응용의 세 부분으로 나누어 독립된 논문으로 취급하였다. 능동소자에서는 1차원 광자결정 공진기, 박막형 2차원 광자결정 레이저, 여러 가지 구조의 2차원 단일세포 광밴드갭 레이저, 공진기 없는 광자결정 레이저, 광자결정 고효율 LED, 등이 소개되어 있고, 수동소자에서는 각종의 유전체, 광섬유, 금속 도파로, 분배기, 여과기, 초 프리즘 현상에 관한 연구동향이 소개되어 있으며, THz 분야에서는 플라스틱 광섬유 도파로 등 여러 가지 수동소자와 측정 방법등이 요약되어 있다. 특히 능동소자와 THz 부분은 세계 선두그룹에 속하는 국내연구진의 연구결과가 소개되었다.

IV. 나노 포토닉스의 세계

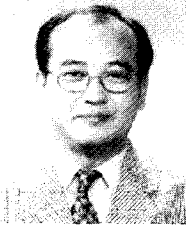
이상 살펴본 바 양자점과 광자결정을 기초로 하는 나노 포토닉스는 특히 IT 분야에서 혁명적인 소자 특성의 향상을 가져올 것으로 기대된다. 양자점과 광자결정은 또한 서로 결합되었을 때 상승작용을 나타낸다. 한 예로 양자점 발광소자와 광자결정을 접목시킨 초소형 단세포 광자결정 레이저가 본 특집 중 '광자결정 발광소자'(이용회)에 소개되어 있다. 나노 포토닉스는 여타 나노기술과 마찬가지로 학제간 연구가 필수이다. 양자점에 대한 연구에는 물리, 전자, 화학, 재료 등의 전문지식이 융합되어야 한다. 기존의 모든 학문이 2020년 경에는 나노과학기술로 합쳐지리라는 예상은 나노 포토닉스에도 적용된다. 나노 포토닉스라는 신비의 세계를 향해갈 때, 마치 마르크 폴로의 동방견문록이 300년을 격하여 콜럼부스로 하여금 신대륙을 발견케 한 것처럼, 우리

가 아직 상상하지 못하는 또 다른 새로운 세계가 발견될지도 모른다.

참 고 문 헌

- [1] *Nanotechnology*, Gregory Timp, ed., Springer-Verlag, AIP Press, 1999.
- [2] D. Khang, U.S. Patent 3,102,230 (filed in 1960, issued in 1963)
- [3] A.B. Fowler, F.F.Fang, W.E. Howard, and P.J. Stiles, *Phys. Rev. Lett.* 16, 901, 1966.
- [4] K. von Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, *Phys. Rev. Lett.* 45, 494, 1980.
- [5] J. von Neuman : In : *Collected Works*, Vol. 5 (Pergamon Press, Oxford 1963) p. 420.
- [6] Z.I. Alferov, "The history of heterostructure lasers," in *Nano-optoelectronics*, M. Grundmann Ed., Springer 2002.
- [7] K. Ohtaka, *Phys. Rev. B* 19, 5057, 1979.
- [8] E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* 58, 2059, 1987.
- [9] S. John, *Phys. Rev. Lett.* 58, 2486, 1987.
- [10] T. Sugiyama *et al.*, IEDM 98-445, 16. 5. 1-4, 1998.
- [11] L. T. Canham, *Appl. Phys. Lett.* 57, 1046, 1990.
- [12] L. T. Canham, *et al.*, *J. Appl. Phys.* 82, 909, 1997.
- [13] B. A. Korgel, *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* 123, 3743, 2001.
- [14] J. R. Heath, *Science* 258, 1131, 1992.
- [15] S. M. Kauzlarich, *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* 121, 5191, 1999.
- [16] S. Takafumi, *et al.*, *Nano Lett.* 1, 315, 2001.
- [17] A. Polman, *Nature Materials* 1, 10, 2002.
- [18] J. L. Coffey, *et al.*, *J. Phys. Chem. B.* 106, 3860, 2002.
- [19] C.S. Kee *et al.*, *Phys. Rev. E* 59, 4695, 1999.

저자 소개



李 精 一

1975년 2월 서울대학교 물리학과 학사, 1979년 6월 미국 부라운대학교 물리학과 석사, 1985년 10월 미국 부라운대학교 물리학과 박사, 1975년 3월~1977년 6월 : 육군 통신장교, 1985년 10월~1986년 9월 : 미국 GTE 연구소 박사후 연구원, 1987년 11월~현재 : 한국과학기술연구원 광전자연구실, 광기술연구센터, 나노소자연구센터(현재) 선임연구원/책임연구원, 1993년 9월~1996년 9월 : 한중과학기술협력센터 북경사무소장, 1997년 9월~1998년 8월 : 프랑스 LPCS INPG/CNRS 방문연구원, 2000년 3월~2002년 2월 : 한국과학기술기획평가원 우주원천 전문위원, <주관심 분야 : 양자전송, 저차원 반도체물리, 반도체/절연체 계면과학, 광자결정, 잡음, 과학기술정책, 국제협력연구>



曹 雲 朝

1981년 2월 서울대학교 요업공학과 학사, 1986년 8월 서울대학교 무기재료공학과 석사, 1995년 8월 서울대학교 무기재료공학과 박사, 1986년 8월~2003년 : 한국과학기술연구원 나노소자연구센터(현 : 책임연구원), 1997년 7월~1998년 7월 : U. of Minnesota, Dep. EE, Postdoctoral Research Associate, <주관심 분야 : Nano-structured Si, Polarization insensitive SOA>



林 漢 祚

1971년 서울대학교 문리대(물리학 학사), 1974년 서울대학교 물리학과(고체물리학 석사), 1982년 불란서 Montpellier 2대 물리학과(고체물리학 박사), 1982년 2~8월 : Montpellier, Post Doc, 1986년 2월~1987년 1월 : 불란서 Ecole Normale 고체물리 그룹 연구원, 1995년 4월~1997년 3월 : 물리학회 응용물리지 편집간사, 1993년 3월~1995년 2월 : 아주대학교 연구처장, 1997년 2~8월 : Northwestern대 전기 및 컴퓨터공학과 visiting scholar, 1975년 9월~현재 : 아주대학교 전자공학부 교수, <주관심 분야 : 반도체 결합 관련 전기적·광학적 특성, 반도체 계면 및 금속/반도체 계면의 전자적 특성, 양자구조의 전자적 특성, III-V족 반도체 소자, 화학 센서, 전자소자의 잡음현상, 광자결정>