

# 차세대 발광소자용 ZnO 및 Si 발광박막 연구

이 상 렬\*

(\*연세대 전기공학과 교수)

## 1. 서 론

발광소자의 응용범위가 기존의 표시용 LED에서 레이저 다이오드 등으로 정보통신분야에 이르기까지 급속히 확장됨에 따라 원천 제작기술을 확보하기 위한 차세대 발광소자 개발이 매우 큰 주목을 받고 있다. 이에 따라, 본 글에서는 차세대 발광소자용 재료로 ZnO 박막과 Si 나노결정을 이용한 발광박막의 발광메카니즘과 발광소자 응용가능성에 대해 논하고자 한다. 직접형 반도체는 에너지밴드갭 만큼의 파장을 갖는 빛을 방출한다. 직접형반도체는 그 특유의 성질 때문에 발광소자로 널리 이용이 된다. 이와 같은 직접형 반도체로 널리 사용되는 GaN는 III-V족 화합물 반도체로 이미 발광소자로써 널리 이용되고 있으며, 이와 매우 비슷한 특성을 갖는 물질로 차세대 발광소자용 응용에 각광을 받고 있는 ZnO가 있다 [1]. ZnO는 II-VI족 화합물 반도체로 큰 에너지 밴드갭을 갖는 물질로써 단결정일 경우에는 3.37eV정도의 에너지 밴드갭을 가지므로, UV영역의 발광을 갖게 된다. 또한 가시광선 영역에서의 높은 투광성을 갖으며 굴절률, 큰 압전상수, 큰 광학계수를 갖고 있기 때문에 압전트랜스듀서, 광도파로, 가스검출센서, 발광 다이오드, 레이저 다이오드등 그 이용범위가 매우 다양하다 [2-4]. 현재까지의 연구에서는 ZnO의 광소자로의 연구보다는 앞서 말한 특성을 이용한 태양광 발전지의 투명전극이나 압전소자로의 이용 등에 더 많은 연구가 이루어졌지만, 전세계적으로 ZnO는 발광소자용 재료로 큰 관심과 연구가 이뤄지고 있는 실정이다 [5,6]. 또 다른 차세대 발광용 재료로 많은 연구가 이뤄지고 있는 물질에는 Si 나노 결정박막이 있다. Si은 간접형 반도체로 기존의 일반 Si박막의 경우는 전혀 발광특성을 갖지 않는다. Si 나노 발광구조는 간접형 반도체인 Si에서 직접형 반도체의 특성인 발광(light-emission)를 얻어내는 것으로 Si 반도체 나노구조는 전위장벽이 높은 matrix 물질에 둘러 쌓여 있을 때에 0차원적 양자우물 즉,

양자점(quantum dot)으로 고려될 수 있기 때문에 양자 크기 효과에 의하여 에너지 밴드갭이 증가하며, SiO<sub>2</sub> matrix에 과량의 Si이 존재하게 되면 열역학적으로 화학양론(stoichiometry)을 초과하게 되어 Si 나노 결정이 어닐링시에 입자(particle)로 석출되게 되며 형성된 Si 나노구조의 발광특성은 증가된 밴드갭에 의하여 가시광선영역에서의 발광으로 나타나게 된다. SiO<sub>2</sub> 내에 Si 나노구조제작은 반응가스하에서 원자구조 적층이 가능한 레이저 어블레이션 법이나 SiO<sub>2</sub>에 Si 이온주입법, CVD법이나 에 의한 제조방식등을 이용하여 제작하게 된다[7-9]. 이온주입법은 전세계적으로 97년부터 연구되기 시작하였으며 레이저 어블레이션은 98년부터 연구 결과가 이제 막 보고되기 시작하는 단계이다 [7-9]. 본 글에서는 차세대 발광소자용 재료로 주목 받고 있는 ZnO와 Si 나노결정연구동향과 연구결과를 밝히고자 한다.

## 2. 발광 현상의 개요

Planck는 가열된 시료로부터의 복사가 에너지의 불연속적인 단위인 양자(quantum)를 단위로 방출한다는 것을 관측하였다. 그때 방출되는 에너지는  $h\nu$ 로 표시되며,  $\nu$ 는 주파수를 말하며,  $h$ 는 Planck상수이다. Planck의 가정후 아인슈타인(Einstein)은 빛의 불연속적인 성질을 증명하는 실험을 통해 금속에서의 전자에 의한 광학적 에너지의 흡수와 흡수된 에너지의 양과 빛의 주파수와와의 관계를 밝혀내었다. 즉, 발광현상은 물질에 에너지를 가했을 경우 물질의 양자화된 에너지 밴드갭만큼 반도체에 에너지를 가하면 직접형 반도체의 경우 에너지 밴드갭 만큼의 빛을 방출하게 된다 [10]. 직접형 반도체에서의 발광 메카니즘을 정리하여 표 1에 나타내었다.

ZnO 박막의 경우 발광에 관한 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있으며, 기존의 연구를 통해 앞서 설명한대로

아연 과잉이나 산소 부족등의 결함을 갖지 않은 단결정에 가까운 박막들의 경우에는 대역간 전이에 의한 발광과 도너-억셉터간의 전이, 도너나 억셉터에서 deep-level로의 전이등에 의해 대역간 전이에 의한 발광시 에너지 밴드갭인 3.37 eV정도의 에너지를 발광하는데 에너지의 파장은 UV 영역의 파장이 된다 [6].

표 1. 발광 메카니즘

발광(전이)메카니즘	방출되는 에너지
Near-bandgap radiative transitions	$\hbar \omega = E_g - E_{ex}$
Band-to-Band recombination	$\hbar \omega = E_g$
Donor-Acceptor and impurity-band transitions	$\hbar \omega = E_D - E_{impurity}$ OR $\hbar \omega = E_{impurity} - E_A$
Donor-Acceptor and impurity-band transitions	$\hbar \omega = E_D - E_{deep}$

직접형 반도체의 경우에는 발광 현상을 관찰할 수 있지만 간접형 반도체의 경우에는 일반적으로 발광현상을 기대할 수 없다. Si은 간접형 반도체 물질로 메모리 소자등으로 매우 폭 넓은 사용이 되고 있는 물질이지만, 발광소자재료로의 이용은 Si 나노 구조를 통해 발광 현상을 관찰 할 수 있음이 보고되고 있다. SiO<sub>2</sub> matrix에 과량의 Si이 주입되어 존재하게 되면 열역학적 화학양론을 초과하게 되어 Si 나노 결정이 particle로써 석출된다. 나노결정은 포텐셜 장벽이 높은 matrix 물질에 둘러 쌓여 있을 때에 0차원적 양자우물(confinement well), 즉 양자점으로 고려될 수 있기 때문에 양자 크기 효과에 의하여 에너지 밴드갭이 증가할 수 있다. 그 증가분은

$$\Delta E = \frac{h^2}{8m^*R^2} - Ae^2/\epsilon R - BE^*_{Ry}$$

이며, 여기서 R은 결정의 크기, m\*는 전자와 정공의 감소된 질량, E\*<sub>Ry</sub>는 유효 Rydberg 에너지, ε와 h는 각각 유전상수와 Planck 상수이다. 또한 A, B는 실험 상수이다. 이와 같은 식은 Brus 등에 의하여 80년대에 보고된 바 있고 밴드갭의 증가에 기인하여 Si 입자에서의 광발광이 가능케 되는 것으로 생각된다 [11]. 95년이후 최근에는 양자 크기

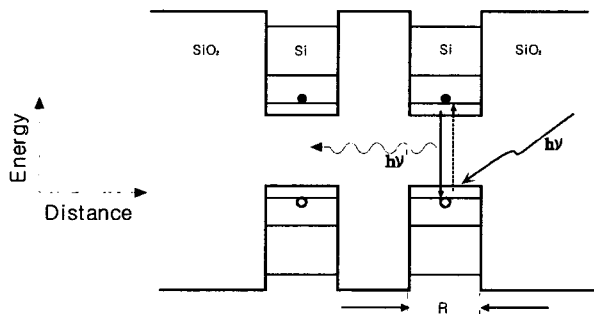


그림 1. Quantum Size (Confinement) Effect

효과와 더불어 다른 발광 메카니즘이 보고되고 있는데 그것들은 SiO<sub>2</sub> 내에 Si의 주입으로 인하여 존재하는 결점에 의한 발광 효과에 관한 것들이다. 이러한 결점들은 소위 E' 결점 중심으로 불리워지며, 저준위 주입으로 인하여 형성될 수 있고 비대칭적으로 완화된 산소의 vacancy에 붙잡혀 있는 정공에 기인한 것이다. 그림 1과 그림 2는 이러한 두 가지의 luminescence의 메카니즘을 나타내는 그림들이며 여기서는 안정한 상태에 있는 캐리어(전자, 정공)들을 포톤(레이저)나 전계에 의하여 높은 에너지 준위로 여기시켜서 그들이 재결합될 때의 발광을 개략적으로 설명하고 있다.

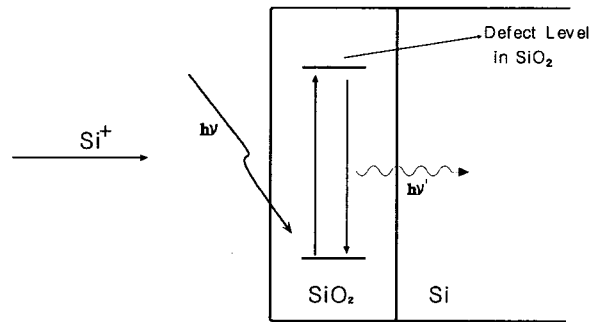


그림 2. Luminescence By Defect

### 3. ZnO와 Si의 기본 물성 및 발광특성

#### 3.1 ZnO에서의 발광

ZnO는 II-VI족 화합물 반도체로 3.37 eV의 에너지 밴드갭을 갖는 직접형 반도체로 대역간의 재결합에 의한 발광시 380 nm의 파장을 갖는 UV발광을 일으키게 된다. UV 발광소자를 위한 연구가 많이 이루어 졌는데, UV 발광소자로 ZnO 박막을 증착하기 위해서 다양한 증착 방법들이 시도되었다 [12-14]. ZnO 박막을 증착시키는 방법에는 반도체 박막제작시 가장 널리 쓰이고 있는 CVD법과 r.f. sputtering, atomic layer deposition, MBE, 펄스 레이저 증착법(pulsed laser deposition) 등이 있다 [12-16]. 최근들어 펄스 레이저 증착법을 이용하여 도핑하지 않은 ZnO박막을 에피택셜하게 증착하여 UV영역에서의 강한 발광현상을 얻어내는 연구결과들이 발표되고 있다. 펄스 레이저 증착법은 낮은 증착은 도범위와 비교적 높은 분위기 산소압에서 물질의 증착이 가능하다 [17-18]. 본 글에서 주목하는 방법은 펄스레이저 증착법으로 여타의 증착법에서 얻은 박막의 UV 발광 특성은 매우 미약한데 비해 펄스레이저 증착법에 의한 UV 발광 특성은 매우 강하게 나타났으며, 에피택셜한 성장을 보여주었다 [19]. 그림 3은 펄스 레이저 증착법을 이용하여 증착시킨 ZnO 박막의 PL특성으로 매우 강한 UV발광을 하는 것을 관찰할 수 있다. 앞서 소개한 여러 가지 방법들로 증착시킨 ZnO 박막의 경우 상온에서 그 화학양론의 불완전성

으로 아연의 과량함유나 산소의 부족현상 등으로 대개는 화학량론이 맞지 않게 되며 n형 직접형 반도체로 증착이 된다. 이 경우 UV 발광을 일으키는 대역간의 재결합이외에도 그림에 나타낸 바와 같이 도너준위에서 deep-level로의 전이현상이나 도너 준위에서 역셉터 준위로의 전이 혹은 LO 에너지 준위에서 deep level로의 전이과정에 의해서 UV보다 긴 파장을 갖는 가시광선 영역에서의 발광을 일으킨다 [20].

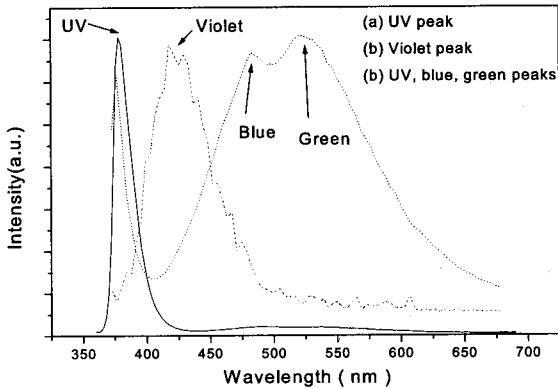


그림 3. UV 발광과 가시광선영역에서의 발광을 보여주는 PL 결과

가시광선 영역에서의 발광에 가장 큰 영향을 미치는 것으로는 산소결함이라는 연구결과가 있다 [21]. 가시광선영역의 발광은 ZnO 박막 증착시의 결함에서 나타나게 되는데 아직까지 가시광선영역에서의 발광을 인위적으로 조절한 예는 없다. 가시광선영역에서 발광되는 빛의 파장으로는 자색, 파란색, 녹색, 노란색등이 있으나, 주로 발광되는 빛의 파장은 녹색과 노란색이다 [22]. 녹색의 발광은 도너에서 역셉터 센터로의 전이과정에서 나타나는 것인데, 그 에너지는 다음식으로 표현된다 [22].

$$h\nu = E_D - E_A + \frac{e^2}{\epsilon\epsilon_r r(D-A)}$$

여기서  $E_D$ 는 도너의 에너지 준위이며,  $E_A$ 는 역셉터의 에너지 준위이다.  $r(D-A)$ 는 역셉터와 도너간의 거리이다. 가시광선 영역에서의 발광시 원하는 파장을 얻기 위한 노력이 계속 되었는데, 그 방법으로는 여러 가지 도핑방법을 통한 불순물의 주입이 있다. 불순물로는 Cu, Ni, Cd, Al 등 매우 다양한 물질들이 사용되었다. 불순물의 주입방법으로는 이온주입법이 가장 널리 사용되고 있다 [23,5]. 에피택셜한 박막성장을 위해서는 어떤 기판위에 증착하느냐도 큰 문제가 된다. 일반적인 기판으로는 가장 흔히 사용되는 Si 이 있다 [24].

하지만 ZnO 박막과의 열팽창계수가 맞지 않으므로, 증착시 에피택셜한 성장은 어렵다 [24]. 그 외에 coming glass 나 quartz등이 사용되고 있으나, 에피택셜한 성장을 위해서는 사파이어가 가장 많이 사용되고 있다 [24]. 사파이어에 박막을 증착할 경우 c-축으로 에피택셜한 성장을 얻어 낼 수

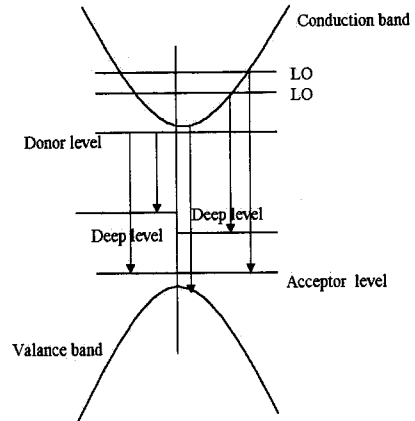


그림 4. UV 및 가시광선영역에서의 발광 메카니즘

있다. 다음은 사파이어 기판위에 펄스 레이저 증착법으로 증착시킨 ZnO 박막의 XRD결과로 에피택셜한 성장을 함을 관찰할 수 있다.

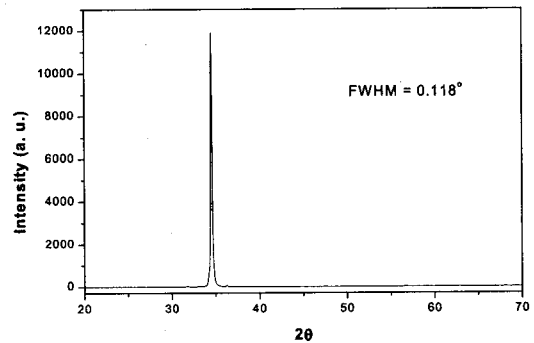


그림 7. 에피택셜하게 증착된 ZnO 박막의 XRD 결과

이와 같이 펄스레이저 증착법으로 제작한 ZnO 박막의 경우에는 에피택셜한 박막이 성장되었으며, UV영역에서의 PL역시 강한 강도를 얻을 수 있었다. UV 영역이외에도 가시광선영역의 발광이 관찰되긴 하였지만, 그림 3에서 보이는 것과 같이 강도가 UV에 비해 매우 미약한 것을 알 수 있다. 이상과 같이 ZnO 박막의 UV 발광세기는 소자로 응용하기에 충분함을 제시하였으며 이에 따라 ZnO 박막을 거저로한 UV 발광 소자 제작 가능성을 제시되었다.

### 3.2 Si 나노결정에서의 광방출

Si의 광방출은 실리콘결정(c-Si)이 미세 전자공학에서의 주요한 물질로 인식된 1950년대 이후에 활발히 연구되어 왔다 [25]. 실리콘은 간접대역형 반도체이고, 운동량 보존은 방사성 전자-홀 재결합에서의 포톤의 도움을 필요로 한다. 포톤은 모멘텀과 에너지를 운반하기 때문에, 포톤의 도움을 받은 재결합의 전형적인 그래프는 극저온에서 PL spectra에 나타나는 몇 개의 peak들이다. PL peak들은 'photon replica'라고 한다. 기존의 연구들을 통해 고순도의 c-Si에



서의 광방출은 11meV 이하의 엑시톤결합에너지를 가진 자유 엑시톤에 의해서 이루어지는 것으로 알려졌다 [26]. 광방출시 양자효율은  $\sim 10^{-5}$ 의 차수이나, 완전히 passivate된 표면을 가진 dislocation-free 크리스탈의 경우에 1% 이상까지 증가될 수 있다 [27]. 이에 반해 직접형 반도체에서의 방사수명은 나노초(nanosecond)정도나 되며, 광방출물질에서 엑시톤의 결합에너지는 0.5 eV 정도로 커질 수 있다. 직접형 반도체의 상온에서의 광방출 양자효율은 100% 가까이 될 수 있으며, III-V족 반도체나 광방출 중합체와 비교할 때, c-Si는 형편없는 광방출 물질로 밝혀졌다. 이에 반해 Si를 기반으로 한 광방출소자들(LEDs)은 집적된 광전자공학과 진보된 형태의 거대 집적소자들에 사용되기 위한 광학적 상호연결소자로 매우 유용하게 사용될 수 있다. Si를 바탕으로 한 물질을 이용해 효율적인 광방출을 위한 연구는 매우 활발하다. 1990년에 Canham은 전기화학적으로 에칭된 Si 또는 다공질-Si(por-Si)이 상온에서 효율적인 광방출을 하는 결과를 보고하였다 [28]. 일반적으로 por-Si는 2 eV 이하의 광자에너지를 가진 빛을 방출한다. c-Si( $\sim 1.1$  eV)에서의 밴드갭 에너지보다 2배만큼 크며, 방출은 쉽게 수백 meV 이상 조정될 수 있다. por-Si의 특이한 특성과 낮은 제조가격 때문에 이 연구이후 세계적으로 매우 많은 연구가 시작되었다. PL에 더하여, 1991년에 por-Si에서의 EL(electro-luminescence)은 전해질, 전도성중합체, Indium Tin Oxide와 같은 투명 또는 반투명 금속으로 다양한 소자들에서 관찰되었다 [29]. Canham의 최초논문에서 por-Si에서 관찰된 PL은 2차원 양자크기효과에 원인이 있었다 [28]. 모델에 의하면 여기자는 동요폭의 실리콘 양자선에서 재결합한다. por-Si에서 Si 들은 전기화학 식각에 의해서 만들어졌다.

TEM(transmission - electron - microscopy) 데이터를 통해 por-Si가 수 나노미터의 크기를 가진 연결된 Si 나노결정들의 불규칙적인 망이라는 것을 확인할 수 있었다 [30]. 나노미터 크기의 반도체결정에서 효과적인 질량 근사로  $d$ 를 나노결정 직경이라 할때, 대역차 이동  $\Delta E \sim d^{-2}$ 을 예상할 수 있었다. 양자구속과 Si나노결정에서의 밴드갭의 개방의 효과에 대한 더 많은 연구가 이뤄졌는데,  $2 < n < 1.4$  일때,  $\Delta E \sim d^{-n}$ 은 더 복잡한 이론으로 계산할 수 있다. por-Si에서의 PL이 대역대 대역 재결합에 의한 것이라 가정한다면, 나노결정 크기의 변화는 크며 일반적인 광방출 spectrum밖에 보이지 못 할 것이다. PL의 FWHM은 300 meV이하이고 매우 낮은온도(4K)에서조차 어떤 효율적인 발광을 하지 못했다. Si나노결정이 가시광선 영역의 파장을 갖는 PL peak와 직접 연관된다는 증거는 공진 광여기를 가진 PL spectroscopy결과를 통해 얻을 수 있었다. Calcott등은 발광대역의 중간에 가까운 광자에너지를 가진 빛에 의해 여기된 por-Si에서의 저온 PL spectra를 측정했다. 그 경우에 PL spectrum은  $E_{ex}$ 이하의 에너지  $\hbar\omega$ 에서 일어나며, c-Si에서의 운동량을 보존하는 포톤의 에너지와 같은 공간을 가진 계단모양의 특징을 보였다. 저온시의 PL lifetime은 msec시간영역에 있는 것으로 밝혀졌다. Calcott

의 연구의 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다: (1) 음향양자들은 방사성 재결합에 직접적으로 연관된다, (2) 방사성 수명은 길다, 그리고 (3) por-Si는 간접-대역차 반도체로 남는다. 세번째 결론은 계산으로 확인 되었는데, nanosized Si에서의 quasidirect 전이는 나노결정의 직경  $d_{nc}^{sil}$ 가 10-15 Å보다 더 작아지게만 된다면 가능하게 된다는 것으로 입증되었다 [30].

Si 나노결정의 표면에 집중된-결합을 포함하는 경쟁적 재결합 메카니즘은 특히 산화된 por-Si에서의 몇몇 그룹에 의해 연구되어 왔다. 산소입자의 역할은 PL spectroscopy와 연결된 전자스핀에 관한 연구에 의해 지적되어 왔다 [31]. 표면결합과 관계된 PL은 1.6-1.7 eV 근처에서 peak가 나타나는데, 이것은 Si 나노결정에서의 양자구속에 기인한 방출에 밀접하다. 상온 PL lifetime은 또한 por-Si에서의 PL lifetime과 비교하여  $\mu$ sec시간영역에 있다 [30].

Canham의 발견이후에 많은 연구가 이루어졌지만 몇몇 문제점들이 나타나기 시작했다. 상온에서의 광 방출 효율은 5%이상까지 얻을 수 있으나, 1시간내에 높은 다공성과 유연성, 불안정한 수소표면의 passivation, 그리고 매우 나쁜 열적전도도에 의해서 대체로 야기되는 주위조건에서 나빠지게 된다. PL효율에 비하여 EL효율은 100배 이하인 것으로 보고되었으나 EL효율의 감쇠는 분단위로 훨씬 더 빨랐다. 그후 많은 연구들이 이루어져왔다. 연구결과로는 (1) spark erosion, (2) 선택적 식각과 연계된 photolithography (3) chemical syntheses, 그리고 (4) 제어진 분리와 열적 재결정화에 의해 재현가능하게 만들어진 나노결정 Si간간 물질(nc-Si)의 전체군은 por-Si에서의 것들과 매우 유사한 광방출특성을 나타내 왔다. 둘째로, PL이 Si 나노결정에서 발생한다는 것을 뒷받침 하는 연구들이 증가하고 있다 [31]. 또한 다른 연구들을 통해 Si이외의 다른 원소들을 SiO<sub>2</sub> matrix에 이온 주입하여 나노입자를 만들었으며, sputter deposition target을 이용한 연구도 있었다. Caltech(USA)의 Atwater등은 96년까지 Holland의 FOM Institute과의 공동 연구에서 Si 나노 결정의 가시광선영역의 PL이 나노 결정 자체에서 뿐만 아니라 matrix 결합에서도 발광되어 나타나고 있음을 보고하였으며 [33,34], 그 밖의 여러 연구결과에서 주입량, 어닐링 온도, 주입이온의 종류 등의 변화 및 여러 실험 조건의 변화에 따른 연구 결과들을 보고되고 있다 [35-37]. 일본의 경우 주로 주입 결합에 의한 luminescence의 연구가 자세히 보고 되고 있으며 [38], 중국의 Liao등의 연구에서 가시광선영역의 PL 뿐만 아니라 EL의 결과 까지 보고되고 있다 [39,40]. 펄스 레이저 측정법으로 제작한 Si 나노결정 박막의 경우 나노결정의 크기를 조절하여 IR영역의 발광을 UV영역까지 이동시키는데 성공하였으며, 양자 크기 효과를 확인 시켜주는 연구들이 보고되고 있다 [7-9].

## 5. 결 론

차세대 발광소자재료로 큰 관심을 불러일으키는 ZnO 박

막과 Si 나노 결정 박막에 관한 기초이론과 연구진행상황, 결과와 향후 추진되어야 할 연구분야에 대해서 알아보았다. ZnO는 직접형 반도체로 UV 영역에서 강한 발광현상으로 UV laser diode의 활용등 발광소자로의 이용 가능성을 제시해 주고 있으며, Si 나노 결정 박막은 비 발광소자인 Si 으로부터 발광을 얻어내어 기존의 Si 소자들과 집적된 발광 소자로의 활용 가능성을 제시하였다.

### 참고문헌

- [1] R. D. Vispute, V. Talyansky, et al, "Heteroepitaxy of ZnO on GaN and its implications for fabrication of hybrid optoelectronic devices", American Institute of Physics, Vol. 73, No. 3, p. 348. 1998.
- [2] K. L. Chopra, S. Major and K. K. Pandya, "Transparent conductors - a status reviews" , Thin Solid Films, Vol. 102, pp. 1-46 1983
- [3] K. Tabuchi, W. W. Wenas, A. Yamada, "Optimization of ZnO films for amorphous silicon solar cells", Jpn J. Appl. Phys., Vol. 32, Part 1, No. 9A , pp. 3764-3769, 1993
- [4] K. Tominaga, Y. Sueyoshi, C. Munfei and Y. Shinatani, "Energetic O-ions and O-atoms in planar magnetron sputtering of ZnO target", Jpn J. Appl. Phys., Vol 32, part 1, No. 9B, pp. 4131-4135, 1993
- [5] Z. Y. Ying, S. H. Cheng, S. B. Ge, Y. Chao, Z. Q. Gang, Y. X. Zhan, Z. G. Liu, "Preparation and characterization of ZnO:Al films by pulsed laser deposition", Thin Solid Films, Vol. 307, pp. 50-54, 1997.
- [6] P. Zu, Z. K. Tang, G. K. L. Wong, M. Kawasaki, A. Ohtomo, H. Koinuma, Y. Segawa, "Ultraviolet spontaneous and stimulated emissions from ZnO microcrystallite thin films at room temperature", Solid State Communications, Vol. 103, No. 8. pp. 459-463, 1997.
- [7] S. Tamir, S. Berger, "Correlation between microstructure and photoluminescence of nanocrystalline silicon powder prepared by laser-induced CVD", Thin Solid Films, Vol. 276, pp. 108-111, 1996.
- [8] L. Partrone, D. Nelson, V. Safarov, M. Sentis, W. Marine, "Size dependent photoluminescence from Si nanoclusters produced by laser ablation", Journal of Luminescence, Vol. 80, pp 217-221, 1999.
- [9] T. Yoshida, Y. Yamada, "Electroluminescence of silicon nanocrystallites prepared by pulsed laser ablation in reduced pressure inert gas", Journal of Applied Physics, Vol. 83, No. 10, pp. 5527-5432, 1998.
- [10] B. G. Streetman, "Solid State Electronic Devices", A Simon & Schuster Company, 4th Ed., chapter 4, 1995.
- [11] L. E. Brus, J. Chem. Phys. 80, 4403 (1984)
- [12] Y. Chen, D.M. Bagnall, Z. Zhu, T. Sekiuchi, K. Park, K. Hiraga, T. Yao, S. Koyama, M.Y. Shen, T. Goto, "Growth of ZnO single crystal thin films on c-plane(0001) sapphire by plasma enhanced molecular beam epitaxy", Journal of Crystal Growth, 181, 165, 1997.
- [13] K. B. Sundaram, A. Khan, "Characterization and optimization of zinc oxide films by r.f. magnetron sputtering" Thin Solid Films, 295, 87, 1997.
- [14] B. M. Atev , A. M. Bagamadova, V. V. Mamedov "On exciton luminescence of ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epitaxial thin films", Thin Solid films, 283, 5, 1996.
- [15] K. Saito, Y. Watanabe, K. Takahashi, T. Matsuzawa, B. Sang, M. Konagai, "Photo atomic layer deposition of transparent conductive ZnO films", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 49, pp. 187-193, 1997.
- [16] J. F. Muth, R. M. Kolbas, A. K. Sharma, S. Oktyabrsky, J. Narayan, "Excitonic structure and absorption coefficient measurements of ZnO single crystal epitaxial films deposited by pulsed laser deposition", Journal of Applied Physics, Vol. 85, No. 11, pp 7784-7887, 1999.
- [17] Y.S. Jeong, S.Y. Lee, H.K. Jang, I.S. Yang, S.H. Moon, and B.D. Oh, "Surface modification of laser ablated YBCO target" Applied Surface Science, vol.109, 424-427, 1997.
- [18] Y.S. Jeong, J.H. Park, D.S. Eun, S.Y. Lee, C.H. Kim, T.S. Hahn, J.Y. Kim, and I.S. Yang "Film thickness effect on the properties of interconnection between YBCO and Si for superconductor and semiconductor integration", Applied Superconductivity, Vol.5, No. 7-12, pp.353-356, 1998.
- [19] Sang Hyuck Bae, Sang Yeol Lee, Beom Jun Jin, and Seongil Im, "Pulsed laser deposition of ZnO thin films for the application of light emission", to be published in Applied Surface Science.
- [20] D.C. Reynolds, D.C. Look, B.Jogai, J.E. Van Nostrand, R. Jones and J. Jenny, "Source of the Yellow luminescence band in GaN by gas-source molecular beam epitaxy and the green luminescence band in single crystal ZnO", Solid State Communications, Vol. 106, No. 10, pp. 701-704, 1998.
- [21] K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant, J. A. Voigt, "Correlation between photoluminescence and oxygen vacancies in ZnO phosphors", Applied Physics Letter, Vol. 68, pp. 403-405, 1996.
- [22] H. J. Egelhaaf, D. Oelkrug, "Luminescence and nonradiative deactivation of excited states involving

- oxygen defect centers in polycrystalline ZnO", Journal of Crystal Growth, Vol. 161, p. 192, 1996.
- [23] A. E. Jimenez-Gonzalez, "Modification of ZnO thin films by Ni, Cu, and Cd doping", Solid State Chemistry, Vol. 128, pp. 176-180, 1997.
- [24] S. L. King, J. G. E. Gardeniers, I. W. Boyd, "Pulsed-laser deposited ZnO for device applications", 96-98, pp. 811-818, 1996.
- [25] H. R. Haynes, H. B. Briggs, Physics Revolution, Vol. 86, p. 647, 1952.
- [26] M. A. Vouk, E. C. Lightowers, Journal of Physics C, Vol. 10, p. 3689, 1977.
- [27] E. Yablonovitch, D. L. Allara, C. C. Chang, T. Gmitter, T. B. Bright, Physics Revolution Letter, Vol. 57, p. 249, 1986.
- [28] L. T. Canham, Applied Physics Letter, Vol. 57, p. 1046, 1990.
- [29] A. Richter, P. Steiner, F. Kzlowski, W. Lang, IEEE Electron Device Letter, Vol. 12, p. 691, 1991.
- [30] J. P. Proot, C. Delerue, G. Allan, Applied Physics Letter, Vol. 61, p. 1948, 1992.
- [31] A. G. Cullis, L. T. Canham, *ibid*, Vol. 353, p. 335, 1991.
- [32] S. S. Iyer, R. T. Collins, L. T. Canham, "Light Emission From Silicon", Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 256, Pittsburgh, 1992.
- [33] K. S. Min, K. V. Shcheglov, C. M. Yang, H. A. Atwater, M. L. Brongersma, A. Polman, Appl. Phys. Lett. Vol. 69, p. 2033, 1996.
- [34] K. V. Shcheglov, C. M. Yang, K. J. Vahala, H. A. Atwater, Appl. Phys. Lett. Vol. 66, p. 745, 1995.
- [35] F. Koch, V. Petrova-Koch, J. Non-Crystalline Solids, Vol. 840, pp. 198-200, 1996.
- [36] B. Garrido, M. Lopez, S. Ferre, A. Romano-Rodriguez, A. Perez-Rodriguez, P. Ruterana, J. R. Morante, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 120, p. 101, 1996.
- [37] P. Mutti, G. Ghislotti, S. Bertoni, L. Bonoldi, G. F. Cerofolini, L. Meda, E. Grilli, M. Guzzi, Appl. Phys. Lett. Vol. 66, pp. 851, 1995.
- [38] H. Nishikawa, E. Watanabe, D. Ito, M. Takiyama, A. Ieki, Y. Ohki, J. Appl. Phys. Vol. 78, p. 842, 1995.
- [39] L. Liao, X. Bao, X. Zheng, N. Li, N. Min, Appl. Phys. Lett. Vol. 68, p. 850, 1996.
- [40] L. Liao, X. Bao, X. Zheng, N. Li, N. Min, Solid State Communications, Vol. 97, p. 1039, 1996.

## 저 자 소 개



### 이상렬(李相烈)

1963년 9월 11일생. 1986년 2월 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 State Univ. of New York at Buffalo 졸업 (석사). 1992년 State Univ. of New York at Buffalo 졸업 (공학). 1993년-1995년 한국 전자통신 연구소 선임연구원. 1995년-현재 연세대 전기공학과 조교수. 주전공분야 : 전기재료/레이저 공학. 연구관심분야 : 정보전자 소자제작, 초전도 통신소자 제작, 메모리소자용 유전체 박막제작, 디스플레이용전계방출소자 제작