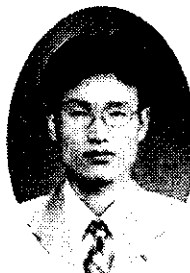


반도체 나노상을 이용한 발광 소자



박래만
(광주과학기술원 신소재공학과)



문웅태
(광주과학기술원 신소재공학과)

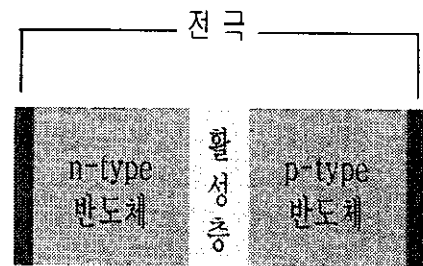


박성주
(광주과학기술원 신소재공학과)

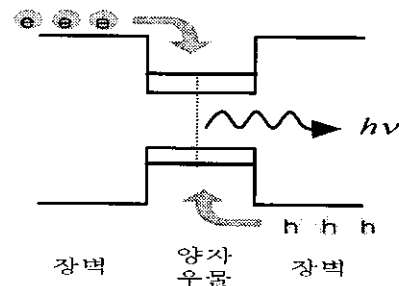
1. 반도체 발광 소자의 기본 구조

최근 정보 통신 등의 기술 발전과 더불어 고기능 고효율의 기능을 가진 광제품의 수요가 크게 증가하고 있다. 반도체를 이용한 광소자의 개발은 90년대 이후 그 발전 속도가 매우 빠르게 이루어지고 있고 특히 백색 광소자 개발 분야의 중요성이 크게 부각되고 있다. 반도체를 이용한 청색, 녹색, 그리고 적색 발광 소자의 경우에는 이미 상용화가 되었고 그 효율 또한 상당한 수준에 올라 있다(1). 반도체를 이용한 발광소자의 기본 원리는 n-형 반도체를 통해 공급된 전자와 p-형 반도체를 통해 공급된 정공이 활성층 반도체에서 서로 결합하여 활성층 반도체와 연관되는 특정 파장의 빛을 방출하는 것이다(그림 1 a). 따라서, 반도체를 이용한 발광 소자의 핵심 기술은 활성층에 관계된다. 활성층은 발광 효율을 증대시키기 위하여 기본적으로 양자 구속 효과를 이용한다. 나노미터 크기의 밴드갭이 작은 활성층 반도체가 밴드갭이 큰 장벽(barrier) 혹은 기지(matrix)의 물질에 의해 속박될 때 양자 구속 효과가 발생한다(그림 1b).

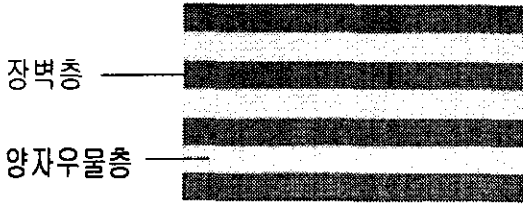
그림 1은 양자구속효과를 이용하는 반도체 발광소자의 기본 구조를 보여준다. n-형과 p-형 반도체로부터 각각 공급되는 전자와 정공은 양자우물, 양자점, 혹은 나노상에 속박되어 양자역학적으로 결정되는 에너지 간격에 해당하는 특정파장의



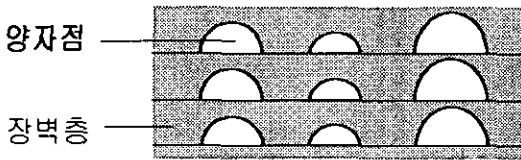
(a) 반도체 발광소자 기본구조
(Basic structure of semiconductor LED using quantum structures).



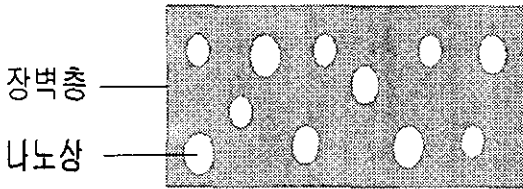
(b) 활성층에서의 양자구속 모식도
(Schematic band diagram of active layer).



(c) 다중양자우물 활성층
(Multiquantum well (MQW) active layer).



(d) 양자점 활성층
(Stacked quantum dots (QDs) active layer).



(e) 나노상 활성층
(Nanophase active layer).

그림 1. 양자구속효과를 이용하는 반도체 발광소자의 기본구조
(Schematic diagram of semiconductor light-emitting diode (LED) using quantum confinement effect).

빛을 방출하며 결합한다. 본 논문에서는 반도체 나노상을 이용한 발광소자가 가지는 장점에 대하여 기술하고자 한다.

2. 반도체 나노상

반도체 물질이 그 크기가 수 나노미터 크기로 작아질 때 일반적 물질 특성과는 다른 특이한 물리적, 광학적 특성을 나타낸다. 따라서, 나노미터 크기의 반도체에 대한 연구가 최근에 새로운 기능성 양자 소자의 구현을 위해 전세계적으로 활발히 진행되고 있다[2]. 본 논문에서는 발광특성을 갖는 나노미터 크기의 반도체 물질을 그 형성 메커니즘 관점에서 크게 양자점(quantum dot)과 나노상(nanophase)으로 분류하겠다. 발광특성을 갖는 대표적인 II-VI족과 III-V족 결정질 반도체 양자점들은 원자적으로 평평한 결정질 박막 위에 기판과의 격

자불일치 또는 표면 자유에너지에 의해 야기되는 스트레인에 의해 자발적으로 형성된다[3]. 보통 높이가 10 nm 이상이고 피라미드 또는 반구형의 모양을 갖으며 그 면밀도는 대개의 경우 10^{12} cm^{-2} 이하이다. 이러한 양자점이 양자구속효과를 보이기 위해서는 밴드갭 에너지가 더 큰 반도체 물질에 의해 덮여져야 한다. 따라서, 수직정렬이 가능하고 크기가 균일한 양자점들이 형성될 수 있다. 그러나, 장벽층 물질과 양자점 물질 사이의 격자 불일치에 의해 계면 특성이 저하될 수 있다. 반면, 발광특성을 보이는 반도체 나노상들은 원자적으로 평평한 결정질 박막기판을 요구하지 않는다. 비정질 박막과 같은 원자적으로 거친 표면 위에서도 형성될 수 있다. 나노상 형성의 기본 메커니즘은 과포화 고용체 속에서 용질의 석출현상과 연관될 수 있다[4]. 따라서, 나노상을 성장하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 상온 정도의 저온에서 스피터링이나 이온주입법에 의해 유리같은 비정질 기지(matrix) 속에 반도체 원자들을 물리적인 방법으로 혼합한 후 고온에서 열처리하여 나노상을 열역학적으로 형성시키는 방법과 수백도 정도의 온도에서 화학증착법(CVD)에 의해 박막 성장시 성장 중에 자발적으로 석출되어 기지 속에 포함되게 하는 방법이 있다. 따라서, 모양은 구형이고 직경은 자유로이 조절이 가능하며 면밀도는 10^{12} cm^{-2} 이상이다. 또한, 나노상은 밴드갭이 큰 기지 속에 열역학적인 구동력에 의해 원자들이 이동하여 자발적으로 형성되므로 별도의 장벽층 성장 단계가 필요 없고, 무질서하게 기지 내에 분포한다. 반도체 나노상 물질은 보통 IV족, II-VI족, III-V족 반도체이고 기지물질은 밴드갭이 나노상보다 크면 된다. 본 논문에서는 비정질 실리콘 질화물 박막 속에 형성되는 비정질 실리콘 나노상과 결정질 질화갈륨 박막 속에 형성되는 질화인듐갈륨 나노상에 대해 보고하고자 한다.

3. 비정질 실리콘 나노상

실리콘은 우수한 전기적 특성으로 인하여 전자소자에서는 폭넓게 이용되는 반도체 재료이지만, 간접천이 밴드구조를 갖기 때문에 광소자에는 응용되지 못했다. 그러나, 기존의 보편화된 반도체 장비와 우수한 소자제작 기술을 그대로 활용한 저비용·고부가가치 산업이 될 수 있으며, 광전자소자를 단일 칩에 구현한 차세대 소자 구현 등의 이점들이 예상되기 때문에 실리콘을 이용한 광소자 개발은 전세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 실제로 실리콘 소자는 공정 단가가 1 mm^2 당 0.01 달러로 화합물 반도체의 100분의 1이 수준이므로 실리콘 광소자는 화합물 반도체 광소자보다 훨씬 저렴한 가격으로 더 많은 이익을 낼 수 있다. 실리콘 광소자 중에서도 양자구속 효과(quantum confinement effect)를 갖는 실리콘 미세구조는 실리콘을 이용한 광전자소자 개발의 돌파구를 제공했다. 이는 양자구속 효과가 전자와 정공의 결합에 의한 발광효율을 증가

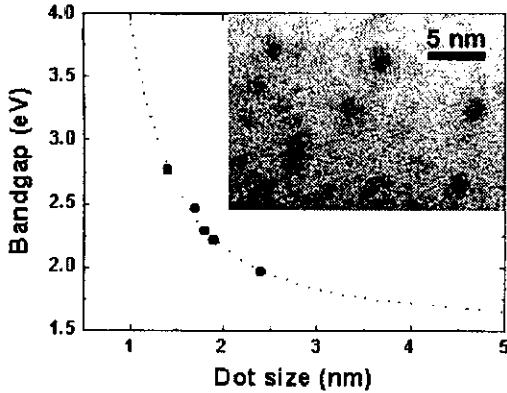


그림 2. 비정질 실리콘 나노상 사진 및 나노상의 크기와 발광파장과의 관계 (Photoluminescence peak position as a function of nanophase size. The inset shows a cross-sectional high-resolution transmission electron micrograph).

시키기 때문이다. 지금까지의 많은 연구들은 다공질 실리콘이나 결정질 실리콘 미세구조에 대해 주로 이루어져 왔으며, 적외선 영역에서부터 자외선 영역까지 광범위한 발광 파장이 관찰되었다. 하지만, 청색 이하의 단파장의 경우에는 결합이나 화학 종이 깊이 관련되어 있음이 보고되고 있다(5). 이것은 실리콘 발광소자를 제작하는데 있어서 큰 장애가 되고 있다.

비정질 실리콘의 경우는 벌크 특성이 결정질 실리콘보다 두 가지 우수한 특성을 가지고 있다. 첫째는 발광효율이 우수하고(6), 둘째는 에너지 간격이 1.6 eV로 결정질의 1.1 eV보다 더 크다.

따라서, 단파장에서 고효율의 발광특성을 얻기에 유리하며, 양자구속 효과와 접목이 된다면 다공질 실리콘이나 결정질 실리콘 미세구조보다 우수한 광특성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 게다가 비정질 실리콘의 양자구속 효과에 관한 연구는 비정질 실리콘에서의 캐리어 이동도와 관련된 물리적 이해에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다. 결정질 실리콘과는 달리 아직 비정질 실리콘에서는 이에 관한 정보가 전무한 상태이다.

비정질 실리콘 양자구조의 특성에 대해서는 주로 이론적인 연구가 주로 이루어져왔으며, Lu 등(7)과 Murayama 등(8)만이 양자우물의 구조에서 발광과 광흡수에 관한 실험적 연구 결과를 발표하였다. 그러나, 영차원 구조인 나노상(nanophase)에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 그 이유는 비정질 구조가 발광에 역효과를 주는 결합을 많이 가지고 있기 때문으로, 비정질 실리콘에서의 발광원이나 양자구속 효과를 실험적으로 관찰하기 위해서는 양질의 비정질 실리콘 양자구조를 성장시키는 것이 매우 중요하다. 본 연구실에서는 영

차원 구조의 비정질 실리콘 나노상에서의 양자구속 효과에 관한 실험적 증거를 처음으로 보고하였으며(9), 나노상의 크기를 조절하여 에너지 간격을 조절함으로써 2.0 eV에서부터 2.76 eV까지 발광파장을 변화시킬 수 있었다. 또한, 보편적으로 이용되던 기저체(matrix)인 실리콘 산화물 대신에 실리콘 질화물을 기저체로 이용하였다. 투과 장벽이 낮은 실리콘 질화물을 기저체로 이용함으로써 전자와 정공이 쉽게 전도될 수 있는 발광소자를 제작할 수 있었다(10).

시료는 플라즈마로 증진된 화학기상증착법으로 실란 가스와 질소를 이용하여 제작하였다. 나노상은 실리콘 질화물 박막이 성장됨과 동시에 박막 내에 성장되며, 실리콘 질화물 박막의 성장속도를 조절함으로써 나노상의 크기를 조절하였다(11). 투과전자 현미경 분석을 통하여 실리콘 질화물 박막 내에 비정질 실리콘 나노상이 성장되었음을 확인하였으며, photoluminescence (PL) 분석으로 발광파장을 조사하였다(그림 2 참고). 이 때, 발광파장과 나노상의 크기 사이에는 다음과 같은 관계식이 유도되었다.

$$E(eV) = 1.56 + 2.40/a^2$$

1.56 (eV)은 벌크 비정질 실리콘의 에너지 간격에 해당하는 값으로 실제 값과 거의 일치하고 있으며, 2.40 (eV · nm²)은 구속변수로서 Lu 등이 양자우물 구조에서 보고한 값의 약 3배에 해당하는 값이다. 비정질 실리콘은 전자의 유효질량이 각 방향에 대해 동일한 값을 갖는다고 볼 수 있으므로 양자우물 구조보다 나노상 구조에서 3배 큰 구속변수를 갖는 것은 매우 타당하다. 따라서, 위 관계식은 본 연구에서 언급한 비정질 실리콘이 나노상 구조로 성장되었으며, 양자구속 효과를 보여주고 있음을 분명하게 보여주는 결과이다. 또한, 전자의

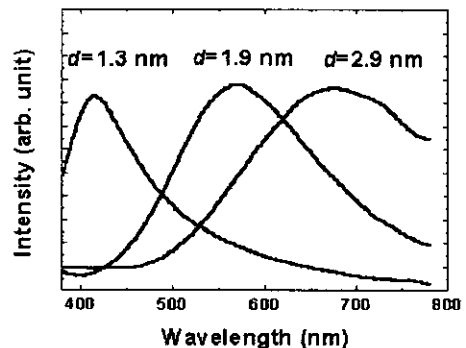


그림 3. 나노상의 크기를 조절하여 얻은 적색, 녹색, 청색 스펙트럼 (Red, green, and blue spectra obtained by controlling the amorphous silicon nanophases).

여기와 관련이 있는 광흡수 분석을 해 본 결과, 나노상의 크기에 대한 에너지 간격의 변화가 $4E$ (eV) = $2.2/a^2$ 의 관계를 보여주었다. 이 결과는 위 식과 잘 일치하고 있으며, 이는 비정질 실리콘 나노상의 광흡수와 발광에 관한 기원이 같음을 의미한다. 광흡수 에너지와 발광 에너지의 차이인 Stokes Shift도 약 300 meV로 다공질 실리콘이나 결정질 실리콘 미세구조에 비해 매우 작은 값을 보여주고 있다. 따라서, 비정질 실리콘 나노상의 표면결함이 다공질 실리콘이나 결정질 실리콘 미세구조에 존재하는 결함보다 매우 작음을 알 수 있다.

그림 3은 빛의 삼원색인 적색, 녹색, 청색 스펙트럼이다. 각 스펙트럼은 나노상의 크기를 각각 2.9, 1.9, 1.3 nm로 조절하여 구현할 수 있었으며, 단파장으로 갈수록 나노상의 크기 분포가 줄어들어 스펙트럼의 반치폭이 작아짐을 볼 수 있다. 이는 투과전자 현미경 분석을 통한 결과 및 라만 분광 분석과도 일치하는 결과이다. 또한, 청색을 발광하는 나노상층과 주황색 발광을 하는 나노상층을 적층하여 백색 발광을 얻을 수 있었으며, 여기에서 관찰된 백색은 색좌표 상으로 순백색에 매우 가까운 값인 $x=0.325$, $y=0.335$ 로 확인되었다 (그림 4 참고). 참고로 순백색은 색좌표 값이 $x=y=0.333$ 이다. 이러한 구조는 백색 발광소자를 구현하는데 있어 매우 유리하다. 왜냐하면, 캐리어들은 터널링에 의해 나노상을 이동하기 때문에 다양한 크기의 나노상들은 각각의 크기에 해당하는 빛을 발할 수 있기 때문이다.

따라서, 여러 색의 빛이 합쳐져서 백색 발광을 얻을 수 있다. 위에서 언급한 비정질 실리콘 나노상을 이용하여 간단한 구조의 발광소자를 제작하였다. 도핑 농도가 낮은 실리콘 기판 위에 비정질 실리콘 나노상 층을 성장시킨 후 기판과 나노상 층 양쪽에 모두 니켈/금 이종금속으로 전극을 형성시켰다. 이때의 전류-전압 특성은 그림 5에 잘 나타나 있다. 하지만, 니

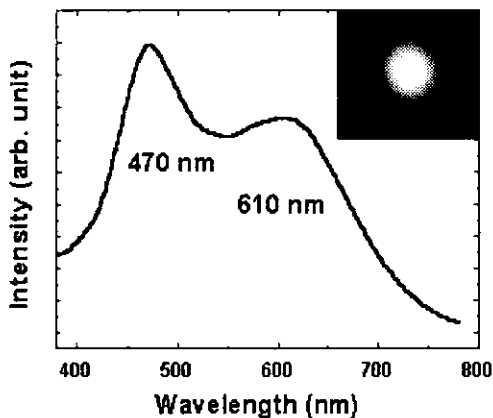


그림 4. 백색 발광 스펙트럼 및 발광사진 (White photoluminescence spectrum and photograph).

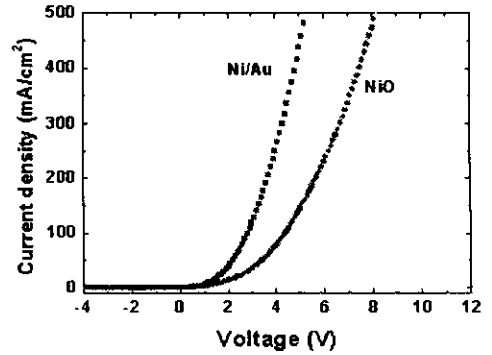


그림 5. 니켈/금과 니켈 산화물 전극에 대한 전류-전압 특성 그래프 (I-V characteristics of LED using Ni/Au and NiO as top electrodes).

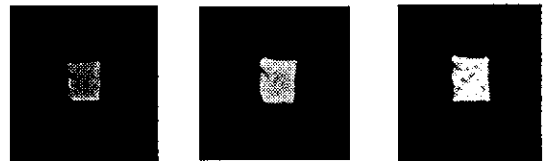


그림 6. 적색, 황색, 백색 발광소자 사진 (Photographs of red, orange, and white LEDs).

켈/금 전극은 불투명하여 실제 소자에서 나오는 빛을 관찰할 수 없었다. 이 문제를 해결하기 위해 나노상 층위에 증착된 니켈/금 전극을 약 400 °에서 80초 동안 열처리하여 니켈 산화물로 변화시켰다. 니켈 산화물은 니켈/금 전극보다는 저항이 약 4배정도 크긴 하지만, 가시광 영역에서 투과율이 약 50~80 %정도로 투명하기 때문에 소자에서 발광하는 빛을 관찰할 수 있었다.

적색, 황색, 백색 발광소자에 대한 사진이 그림 6에 나타나 있다. 현재까지 실리콘을 이용한 발광소자의 경우에는 미세구조 및 나노상을 둘러싸고 있는 기저체가 실리콘 산화물이나 실리콘 질화물 같은 절연체이기 때문에 캐리어가 전극의 평면 상에서 옆으로 퍼지질 못하고 전극의 바로 밑 부분으로만 수직으로 이동하게 된다. 따라서, 이와 같은 소자는 투명전극이 매우 중요하다. 본 연구실에서는 발광소자 제작시 투명전극으로 니켈 산화물을 이용하였다. 소자의 turn-on 전압도 5 V미만으로 같은 구조의 다공질 실리콘이나 결정질 미세구조 실리콘보다 우수한 특성을 보였으며, 외부 양자효율도 2×10^{-3} %로 역시 같은 구조의 다공질 실리콘이나 결정질 미세구조 실리콘보다 높은 값을 보여 주었다. 하지만, 아직 상용화하기에는 외부 양자효율이 낮기 때문에 도핑층을 사용하여 양자효율을 올려야 하는 과제가 남아 있다.

결과적으로 본 연구에서는 표면이 매우 잘 passivation된

비정질 실리콘 나노상이 실리콘 질화물 박막 속에 성장되었음을 확인하였으며, 양자구속 효과를 보여주고 있음을 관찰하였다. 또한, 나노상의 크기를 조절함으로써 양자구속 효과를 이용하여 발광파장을 조절할 수 있었다. 본 연구결과는 또한 실리콘을 이용한 고성능의 광전자소자의 제작 가능성을 보여주는 획기적인 것으로 생각된다.

4. 질화인듐갈륨 나노상

InGaN 삼원 합금은 In 조성을 변화시킴으로써 1.95 eV에서 3.4 eV 까지 그 에너지 갭을 조절할 수 있는 직접 천이(direct transition)형 반도체 물질이다(1). 따라서, 상용화 되어있는 질화물 반도체 청색 발광소자 및 레이저 다이오드의 활성층 물질로 사용하고 있다. 그런데, InN과 GaN는 그 격자상수의 차이가 약 10% 정도로 매우 크기 때문에 InGaN 삼원 합금은 일정 조성 범위에서 고유한 상분리 특성을 나타낸다. 그림 7은 InN-GaN 상태도를 나타내고 있다. 보통의 경우 InGaN 박막 성장은 700 - 800 °C 정도에서 화학증착법에 의해 주로 이루어진다. 따라서, 성장하는 박막에서 상분리 현상이 일어날 수 있다. 그림 7의 상태도를 고려하면, 예를 들어 760 °C에서 성장하는 InGaN는 인듐 함량이 22 와 78 %를 각각 갖는 열역학적으로 안정한 두 개의 상으로 spinodal 분해를 하게 된다(12). 게다가, 포물선형 binodal 분해 곡선으로부터 인듐 함량이 약 47 % 정도인 열역학적으로 준안정 (metastable) 상태에 있는 또 하나의 상이 형성될 수 있음을 알 수 있다(13). 한편, 일반적으로 InGaN 박막은 GaN 박막 위에 성장되는데 이 경우 GaN와 InGaN 사이의 격자상수 차이에 의해 InGaN

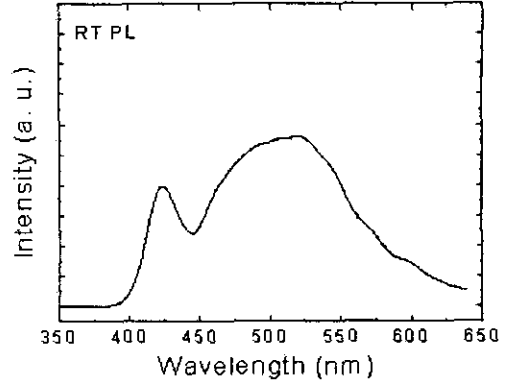


그림 8. 백색발광 소자를 위해 크기 및 조성분포가 비교적 넓은 나노상을 포함하고 있는 InGaN의 상온 발광 스펙트럼 (Room-temperature PL spectrum of InGaN thin film in which InGaN nanophases are spatially distributed with broad distributions of size and composition for white LED).

박막은 압축응력을 받게 된다. 이러한 압축응력은 성장하는 InGaN 박막의 표면을 원자적으로 거칠게 함으로써 방출된다. 이때, 거칠어진 표면은 열역학적으로 안정한 In 함량이 높은 InGaN 나노상 형성을 촉진시키고 계속되는 박막의 성장과 함께 In 함량이 적은 InGaN 기지 속에 자발적으로 In 함량이 많은 나노상이 무질서하게 포함될 수 있다(14). 한편, 성장 중에 자발적으로 형성된 나노상들의 경우 대개 그 직경 분포가 양자점들의 직경분포보다 넓다. 이러한 나노상들의 직경분포는 후 열처리 공정을 통하여 넓게 혹은 좁게 조절될 수 있다. 결과적으로 성장조건에 조절과 적절한 열처리는 일정한 크기 분포와 조성 분포를 갖는 나노상들을 InGaN 박막 내에 형성시킬 수 있다. 이와 같이 형성된 나노상들은 발광소자에서 각각의 인듐 조성과 크기에 따라 결정되는 파장의 빛을 방출하는 발광 중심으로 작용하게 된다(15). 그림 8은 In 조성과 크기 분포가 넓게 만들어진 InGaN 나노상들이 포함된 박막의 광(PL) 스펙트럼이다. 인듐 조성뿐만 아니라 크기 조절에 의해 가시광선 전역의 빛을 방출할 수 있는 것은 발광 효율이 우수한 InGaN 나노상의 가장 큰 장점이라 할 수 있다. 따라서, 단일 필름 내에 성장조건에 조절과 열처리를 통하여 청색, 녹색, 그리고 적색의 빛을 각각 방출할 수 있는 세 부류의 InGaN 나노상을 형성시킬 수 있다면, 전압 조절 특성 (voltage tunability) 을 갖는 단일 소자를 제작하여 전압을 변화시킴에 따라 빛의 삼원색뿐만 아니라 백색까지도 방출하는 것이 가능할 것이다.

5. 결론

반도체 나노상은 기존의 양자우물이나 양자점의 고효율 및

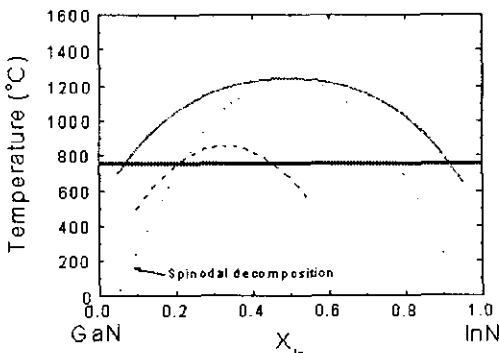


그림 7. GaN-InN 이종 화합물에 대한 binodal (solid) and spinodal (dotted) 곡선 (참고문헌 12), 파상선은 parabolic binodal 곡선을 나타낸다 (참고문헌 13) (Binodal (solid) and spinodal (dotted) curves for the GaN-InN binary system (Ref. 12). The broken line represents a parabolic binodal curve (Ref. 13)).

고기능성 등과 같은 특성을 그대로 살리면서 계면결함에 의한 문제점을 해결함으로써 보다 우수한 발광소자 제작을 가능하게 한다. 또한, 물질적 한계나 구조적 한계를 극복할 수 있는 새로운 소자 제작 기술을 제공할 수 있다. 이러한 장점들을 활용하면 단색 발광소자는 물론 최근 각광 받고 있는 반도체를 이용한 조명용 백색 발광소자의 제작에 있어서도 새로운 원천 기술을 제공할 수 있다.

참고 문헌

- [1] S. Nakamura and G. Fasol, "The Blue Laser Diode", (Springer, Berlin, 1997).
- [2] H. S. Nalwa, "Handbook of Nanostructures Materials and nanotechnology", (Academic Press, San Diego, 2000).
- [3] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, "Quantum Dot Heterostructures", (John Wiley & Sons, Chichester, 1999).
- [4] S. G. Gaponenko, "Optical Properties of Semiconductor Nanocrystals", (Cambridge Univ. press, Cambridge, 1998).
- [5] D. J. Lockwood, "Light Emission in Silicon: From Physics to Devices", (Academic Press, San Diego, 1998).
- [6] R. A. Street, Adv. Phys. 30, 593 (1981).
- [7] Z. H. Lu, D. J. Lockwood, and J.-M. Baribeau, Nature 378, 258 (1995).
- [8] K. Murayama, T. Toyama, S. Miyazaki, and M. Hirose, Solid State Commun. 104, 119 (1997).
- [9] N.-M. Park, C.-J. Choi, T.-Y. Seong, and S.-J. Park, Phys. Rev. Lett. 86, 1355 (2001).
- [10] N.-M. Park, T.-S. Kim, and S.-J. Park, Appl. Phys. Lett. 78, 2575 (2001).
- [11] N.-M. Park and S.-J. Park (To be published).
- [12] I. H. Ho and G. B. Stringfellow, Appl. Phys. Lett. 69, 2701 (1996).
- [13] M. Shimotomai and A. Yoshikawa, Appl. Phys. Lett. 73, 3256 (1996).
- [14] Y. T. Moon, D. J. Kim, J. S. Park, J. T. Oh, J. M. Lee, Y. W. Ok, H. Kim, and S. J. Park, Appl. Phys. Lett. 79, 599 (2001).
- [15] Y. T. Moon, D. J. Kim, K. M. Song, C. J. Choi, S. H. Han, T. Y. Seong, and S. J. Park, J. Appl. Phys. 89, 6514 (2001).

저 자 약 령

성명 : 박 래 만

◆학력

1995년 2월 한양대 물리학과 학사
 1997년 2월 한양대 물리학과 석사
 2001년-현재 광주과학기술원 신소재공학과 박사과정 재학

◆연구분야

비정질 실리콘 양자점의 성장 및 광학적·전기적 특성과 이를 이용한 소자 제작

성명 : 문 용 태

◆학력

1997년 2월 한양대 금속공학과 학사
 1999년 2월 광주과학기술원 신소재공학과 석사
 2001년- 현재 광주과학기술원 신소재공학과 박사과정 재학

◆연구분야

질화인듐갈륨 양자점의 성장 및 특성분석과 이를 이용한 소자 제작

성명 : 박 성 주

◆학력

1976년 서울대 화학과(학사)
 1979년 서울대 대학원, 표면화학(석사)
 1985년 Cornell University, 반도체물리화학(박사)

◆경력

1985년6월-1987년8월 : Postdoctor: IBM T. J. Watson Research Center, Yorktown Heights, N.Y, USA
 1987년 9월-1995년 3월 : 한국전자통신연구원(책임연구원)
 1992년: 한국과학기술원 전기전자공학과(대우교수)
 1995년-현재 : 광주과학기술원 신소재공학과(학과장)
 1995년 4월-1996년 6월 : 한국전자통신연구원(초빙연구원)
 1995년 4월-현재 : 광주과학기술원 신소재공학과(교수)
 1996년-현재 : 광전재료연구센터장
 1999년 9월-현재 : BK21 재료분야 연합사업단장 (KJIST/KAIST)
 2001년-현재 : 국가지정연구실장(National Research Lab)