

LED용 GaN 박막 제작 및 소자 응용

김 동 준*, 허 철*, 박 성 주**

(*광주과학기술원 신소재공학과 박사과정, **同학과 교수)

1. GaN 박막 성장 및 물성

인류가 처음 어둠 속에서 빛을 밝힌 이후로, 보다 효과적으로 빛을 발하는 물질과 방법을 찾아 개발하는 것에 대한 많은 관심과 연구가 이루어졌다. 1879년 에디슨에 의하여 발명된 전구는 인류 문명의 발전에 지대한 영향을 미치었으며 현재까지도 다양한 형태의 변화 발전된 전구가 생활 속에 사용되고 있다. 1960년대에 들어서면서, 인류는 반도체 기술의 발전에 힘입어 기존의 발광 방식보다 발광효율이 현격히 우수하고 전기 소모가 매우 적은 반도체를 이용한 LED(Light Emitting Diode)라는 발광소자를 개발하였는데,¹⁾ 이는 기하급수적으로 증가하는 조명용 전기 에너지 사용량을 감안할 때 조명용 광소자를 개발하는데 매우 중요한 기술이 되었다. 반도체 LED의 구동방식은 n형과 p형의 반도체를 접합하였을 때, n형에서 공급되는 전자와 p형에서 공급되는 정공이 결합하면서 그 반도체의 에너지 갭(Bandgap)만큼의 에너지를 갖는 빛을 발산하는 것이다. 반도체의 에너지 갭은 물질 고유의 특성으로 AlGaAs를 이용한 적색계통과 AlInGaP를 이용한 황색계통의 LED가 개발되었다. 그러나 빛의 삼원색을 구성하는 청색과 녹색의 LED는 개발되지 못했는데, 이는 청색과 녹색 계열의 에너지 갭을 갖는 적절한 반도체 물질을 찾지 못했기 때문이다. 적색과 황색의 LED만으로는 그 응용에 한계가 있게 된다. 즉, 상기의 두 색을 이용하여 구현할 수 있는 색상은 매우 제한적일 수밖에 없고 따라서, 최근까지 LED는 주로 표시 소자로서만 사용되어 왔다. 인류가 현재까지 개발한 가장 우수한 발광체인 LED의 응용범위를 넓히기 위한 청색을 발할 수 있는 반도체 물질의 탐구와 LED 소자 개발이 1970년대 이후 범세계적으로 광범위하게 이루어졌다. 그 결과의 산물이 1994년 세계 최초로 일본의 니치아화학공업에서 상업생산에 성공한 GaN계의 질화물 반도체를 이용한 청색 발광 다이오드이다.²⁾

GaN는 wurtzite라고 하는 hexagonal 구조와 cubic 구조를 갖는 것으로 알려져 있으나 보다 안정한 hexagonal 구조의 GaN를 이용한 LED용 소자 개발이 주를 이루고 있다. GaN는 직접 천이형 전이 특성을 갖고, 고온에서 안정하며, 부식환경에 강하여 LED의 재료로서 적합하다고 할 수 있다. 특히, 에너지 갭이 상온에서 3.4 eV인 GaN는 InN(1.9 eV), AlN(6.2 eV)와 고용체를 이루는 것이 가능하기 때문에 1.9 - 6.2 eV(적색 - 자외선)의 넓은 범위에서의 빛을 얻는데 유리하다.³⁾

일반적으로 반도체 LED 제작은 적당한 기판 위에 원하는 크기의 에너지 갭을 갖는 고품질의 반도체 박막을 epitaxy 성장한 후, 일련의 후속 공정을 거쳐서 최종적으로 LED를 만들게 된다. Epitaxy란 기판으로 사용되는 물질 위에 기판의 격자에 연결되어 단결정의 박막을 성장하는 기술을 말한다.⁴⁾ 따라서, 효과적으로 epitaxy 성장을 하기 위해서는 성장시키고자 하는 반도체 박막의 격자 상수와 유사한 격자 상수를 갖는 기판이 필요하게 된다. GaN를 포함한 질화물 반도체(AlN, InN)의 epitaxy 성장에 있어 가장 문제시되었고, 현재도 연구자들이 고민하는 것이 바로 GaN와 근접한 격자 상수를 갖는 적당한 기판 물질이 없다는 것이다. 현재까지 대표적으로 이용되고 있는 GaN epitaxy 성장용 기판으로는 sapphire와 6H SiC가 있다. 특히, 대부분의 연구자들이 사용하고 있는 sapphire의 경우 표 1⁵⁾에서 볼 수 있듯이 GaN와의 격자 상수 차이가 16%에 이른다. 기판 재료로서의 이러한 큰 약점에도 불구하고 sapphire와 6H SiC가 주로 사용되는 이유는 GaN의 성장 온도가 800 - 1050°C의 매우 높은 온도에서 이루어지기 때문에 고온에서 안정한 재료가 필요하기 때문이다. Sapphire의 경우는 비교적 값이 저렴하고 2 inch 이상의 웨이퍼를 얻는 것이 가능하기 때문에 실제 응용 측면에서 더욱 많이 이용되어 왔다. GaN박막의 epitaxy 성장은 주로 MOCVD(Metalorganic Chemical Vapor Deposition)와 MBE(Molecular Beam Epitaxy)법에 의하여 이루어지는데 여기서는 상업적으로 응

표 1

Material	Lattice parameters Å	Thermal conductivity W / (cm K)	Thermal expansion coefficient 1 / K	Bandgap at RT e V
w-GaN	a = 3.189 c = 5.185	1.3	a = 5.59 x 10 ⁻⁶ c = 3.17 x 10 ⁻⁶	3.4
w-AlN	a = 3.112 c = 4.982	2.0	a = 4.2 x 10 ⁻⁶ c = 5.3 x 10 ⁻⁶	6.2
w-InN	a = 3.548 c = 5.760			1.9
6H SiC	a = 3.08 c = 15.12	4.9	a = 4.2 x 10 ⁻⁶ c = 8.5 x 10 ⁻⁶	
Sapphire	a = 4.758 c = 12.99	0.5	a = 7.5 x 10 ⁻⁶ c = 8.5 x 10 ⁻⁶	

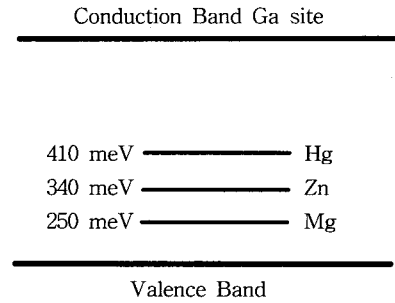


그림 1

용이 가능한 MOCVD기술에 초점을 맞추어 기술하고자 한다. 연구자들은 격자 상수와 열팽창계수의 불일치에 기인한 sapphire기판을 이용한 GaN epitaxy 성장의 어려움을 극복하는 방법에 골몰하였다. 해결의 실마리는 1986년 일본의 Akasaki 교수에 의하여 풀렸는데, 그것은 MOCVD법을 이용하여 600°C의 상대적인 저온에서 AlN를 사용하여 핵생성층을 성장하고 연이어서 1000°C 이상의 고온에서 GaN를 성장하는 방식이었다.⁶⁾ 이러한 2단계의 성장법을 사용하게 되면 16%이상의 격자상수 차이에도 불구하고 결정성과 전기적 특성 그리고 광학적 특성이 매우 우수한 GaN epitaxy 박막이 sapphire위에 성공적으로 증착되었다. 핵생성층은 sapphire 기판과의 큰 격자 상수 차이에서 생기는 수많은 misfit dislocation들에 대한 완충재 역할을 하여, 후속 성장되는 GaN 박막내의 결함 수를 획기적으로 줄여주게 된다. Akasaki 교수가 저온의 AlN를 사용하여 고품질의 GaN epitaxy에 성공한 이후로 현재는 GaN,^{7, 8)} InN,⁹⁾ ZnO¹⁰⁾ 등 핵생성층에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다.

고품질의 GaN epitaxy 성장에 이어서 등장하는 연구의 핵심은 GaN 박막에 n형, p형의 불순물 도핑을 하는 방법이다. GaN는 기존에 개발되어 있던 Si(1.11 eV) 이나 GaAs(1.43 eV)와 달리 에너지 갭이 3.4 eV로 크다. 박막에 불순물을 도핑 하게 되면 에너지 갭 내에 준위를 형성하게 되는데 에너지 갭이 크게 되면 상대적으로 불순물에 의하여 도입되는 에너지 준위도 CB(Conduction Band)와 VB(Valence Band)에서 많이 떨어져 생성된다. 이러한 깊은 준위에 위치한 전자나 정공은 상온에서의 열에너지만으로 여기시켜 전기적 성질을 띠게 하는 것이 어렵게 된다. 다행히도 n형 GaN의 경우 Si의 donor 준위가 5 - 30 meV 정도의 얇은 준위를 형성하기 때문에 Si를 포함한 SiH₄, Si₂H₆등의 가스를 MOCVD 반응기 내에 유입하면 쉽게 얻을 수가 있었다. 문제는 p형 GaN를 성장시키는 것이었는데, 그림 1¹¹⁾은 가능성을 가진 p형 불순물들의 GaN 에너지 갭 내에서의 준위를 나타낸다. 그림에서 보여지듯 모두 200 meV 이상의 깊은 준위를 형성하고 있다. 가능한 원소 중 Mg이 가장 얇은 준위를 형성하고 있기 때문에 p형 도핑을 위하여 많은 연구가 되어 왔다. 그러나, Mg을 사용하는 경우에도 p형 GaN를 성장하기 위해서는 하나의 복병이 도사리고 있었는데, 그것은 다른 아닌 성장 중에 유입되는 수소

이다. MOCVD법을 이용하여 GaN 성장을 하는 경우 Ga의 전구체인 TMGa(trimethyl gallium)을 운반하는 가스로 수소를 사용하고, N의 전구체로 NH₃을 쓰게 되는데, 이러한 성장 분위기 속의 수소가 GaN 박막 내부에 침입하여 Mg-H complex를 형성하여 Mg에 의한 정공을 중화시키는 것이다.¹²⁾ 따라서, Mg과 결합한 H를 분리하여 박막 밖으로 추출하는 과정이 필요한데, 이 역시 Akasaki 교수에 의하여 LEEBI(Low Energy Electron Beam Irradiation)¹³⁾이라는 방법이 개발되었다. 하지만 전자빔으로 전체 웨이퍼를 주사하는 것은 실용성 면에서 열세를 면치 못하는 기술이었다. 니치아화학공업의 Nakamura 박사¹⁴⁾는 수소를 제거한 분위기에서 700°C 이상의 온도에서 20분 정도 어닐링 처리를 하면 역시 p형의 GaN를 얻을 수 있다는 것을 발표하였는데, 이것은 간단한 공정으로 상업 생산에 그대로 이용될 수 있다. 이 기술에 연이어 RTA(Rapid Thermal Annealing)¹⁵⁾를 이용한 열처리 기법들이 연구되었는데, 모두 요지는 Mg-H complex에서 H를 분리하여 박막 밖으로 제거하는 것이다.

반도체 박막을 사용한 LED의 경우 문두에 언급한 것처럼 p-n의 접합 구조로 이루어진다. GaN LED의 경우 1989년 p형 GaN의 성공적인 성장을 계기로 Akasaki 교수에 의하여 p-n 접합에 의한 LED가 만들어지기에 이른다. 그러나, 단순히 p-n 접합을 이용한 LED의 경우 발광효율에 문제가 있어 발광 휘도가 떨어지는 단점이 있다. LED의 발광효율을 획기적으로 개선할 수 있는 구조로 양자우물 구조를 이용한 LED가 있다. 양자우물 구조의 경우 빛을 내는 활성층에 양자우물 구조를 응용하여 LED를 제작하는 것이다. 양자우물 구조는 에너지 갭이 상대적으로 큰 장벽과 에너지 갭이 작은 양자우물로 이루어진다. 양자우물 구조의 경우 양자우물로 도입된 전자와 정공이 에너지가 큰 장벽에 갇혀 양자구속효과를 얻을 수 있고, 이것은 발광효율의 증대를 가져온다. GaN LED에서 양자우물 구조를 구성하는 우물과 장벽층은 InGaN와 GaN 혹은 In_xGa_{1-x}N와 In_yGa_{1-y}N(x>y) 층으로 이루어진다. GaN의 경우 InN와 고용체를 이루는데, 이는 In의 함량을 변화시킴으로써 에너지 갭을 조절할 수 있음을 뜻한다. 즉, 3.4 eV의 에너지 갭을 갖는 GaN와 1.9 eV의 에너지 갭을 갖는 InN를 이용하여 1.9 - 3.4 eV의 범위에서 에너지 갭을 마음대로 조절할 수 있다. 따라서, 발광효율이 큰 양자우물 구조의

LED를 제작하기 위해서는 고품질의 InGaN 성장이 요구된다. InN의 경우 표 1에서 나타나듯 GaN와의 격자 상수 차이가 상당할 뿐더러, 400 - 500°C¹⁶⁾의 상대적인 저온에서 성장이 이루어지는 물질이기 때문에 GaN위에 고품질의 InGaN을 성장시키는데 어려움이 있다. 청색의 발광을 얻기 위해서는 X-ray로 측정하였을 때, 대략 20% 정도의 In의 함량이 요구된다. 그러나, GaN가 고품위로 성장되는 1000°C 이상의 고온에서는 In의 함량을 20% 대로 증가시키는데 어려움이 있고, InN를 성장할 수 있는 500°C의 저온에서는 고품질의 InGaN를 성장시킬 수 없다는 문제점이 대두된다. 이러한 문제점은 1992년 Nakamura 박사에 의하여 해결이 되었는데, 방법은 다음과 같다. 즉, InN와 GaN 고품위 박막 성장 온도의 중간 온도 정도 되는 800°C 정도에서 In의 전구체인 TMI(trimethyl indium)의 양을 Ga의 전구체인 TMGa의 10배 이상으로 증가시켜 성장하는 것이다.¹⁷⁾ 위의 방식으로 성장된 InGaN는 상온에서 광학적 특성인 PL(photoluminescence)이 청색계열까지도 우수한 성질을 보였다. GaN와 InN의 고용체에서 bowing parameter를 1로 하여 계산하였을 때 PL상으로 청색을 발하는 In의 함량은 30% 이상이지만, 실제로 청색의 발광을 하는 InGaN박막의 In 조성을 X-ray를 조사하여 구해보면 20% 정도 밖에 되지 않는다. 이러한 불일치는 piezoelectric effect¹⁸⁾와 composition fluctuations¹⁹⁾에 의하여 설명되고 있다. In 조성의 불일치가 piezoelectric effect에 의한 효과라고 설명하는 연구자들은 질화물 반도체의 piezoelectric constant 값이 크기 때문에 박막 성장 시에 유도되는 strain에 의하여 반도체의 에너지 갭이 휘어진다는 것이다. 따라서, InGaN 박막에서의 발광은 In의 함량이 In의 실제 조성보다 높은 즉, 에너지 갭이 적은 쪽에서 일어날 수 있다는 것이다. 반면에 다른 연구자들은 GaN와 InN가 열역학적으로 완전한 고용을 하지 못하여 spinodal decomposition을 일으킬 수 있고, 이는 결국 국부적으로 In의 양이 증가하는 현상을 야기한다고 주장한다. 전자와 정공은 에너지가 낮은 쪽으로 이동하는 것이 안정하기 때문에 In의 양이 증가된 부분으로 이동하여 그곳에서 발광을 하게 된다는 것이다. 어느 쪽의 이론

이 옳다라고 판단하는 것은 아직 논란의 여지가 있지만, 상기와 같은 특성들로 인하여 청색 혹은 그보다 장파장의 빛을 발하는 InGaN를 성장할 수 있다는 것은 LED를 제작한다는 관점에서 생각해 보면 행운이다. 일반적으로 디스플레이 소자로 응용할 수 있는 휘도는 1 cd 이상인데, InGaN를 활성우물로 갖는 양자우물 구조의 LED는 청색과 녹색 심지어는 황색의 발광에도 1 cd 이상의 휘도를 보인다. 활성우물 구조는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 단 1개의 활성우물 층을 갖는 단일양자우물 구조와 2개 이상의 활성우물 구조를 갖는 다중양자우물 구조로 분류할 수 있다. 니치아화학공업의 Nakamura 박사의 경우 단일활성우물 층을 이용한 LED를 제작하고 있으며, 미국의 Emcore사나 Hewlett Packard사의 경우 10개 정도의 활성우물층을 갖는 다중양자우물 구조를 사용하여 LED제작에 성공하고 있다(그림 2). 국내 기업체에서는 삼성종합기술원, LG종합기술원, 광전자반도체, 정부출연연구소에서는 표준연구소, 대학에서는 광주과학기술원, 전북대학교, 경북대학교에서 MOCVD 기술을 이용한 GaN 청색 LED 제작에 성공한 상태이다. GaN 청색 LED의 국내기술은 상당한 수준에 도달해 있어서 경쟁력 있는 반도체기술 분야 중의 하나라고 믿어지나, 외국 경쟁사에서 재료 및 소자공정 등에서 원천특허를 소유하고 있기 때문에 상업화에 많은 어려움을 겪을 것으로 예상되고 있다. 따라서 독창적이고 원천적인 기술확보를 위한 GaN 발광소재 및 소자기술에 대한 기초적인 연구가 지금부터라도 본격적으로 이루어져야 할 것이다.

2. 단파장 GaN LED 제작 및 응용

제조(fabrication) 공정은 전류 신호를 빛으로 변환시키는 발광 다이오드를 얻기 위한 아주 중요한 마지막 단계이다. 제조 공정은 최적화된 소자 디자인을 바탕으로 식각 공정(etching process), 금속 접합 공정(metallization process) 및 조립(packaging)등의 공정 단계를 거쳐 하나의 완성된 제품이 만들어진다.

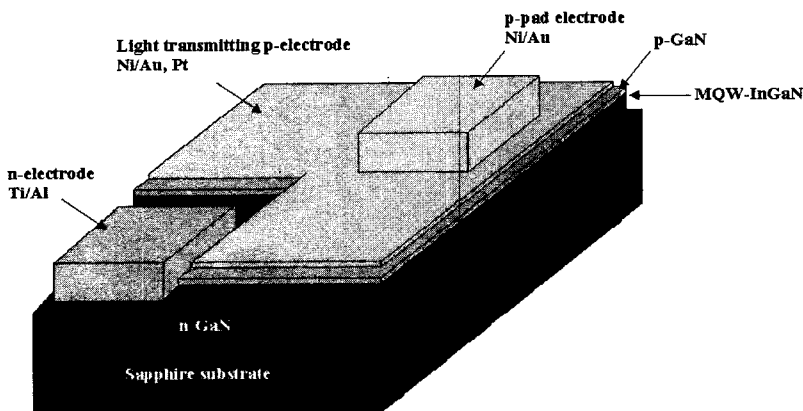
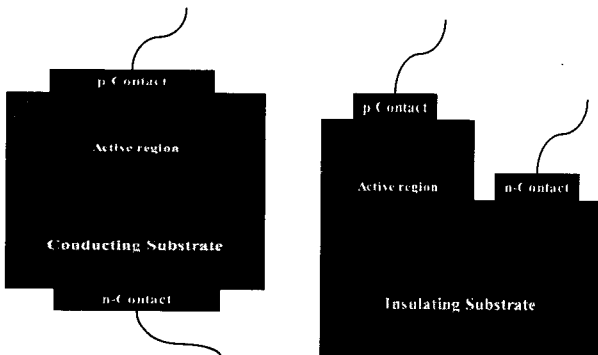


그림 2

2.1 소자 설계(device design)

발광 다이오드의 구조 설계를 할 때는 칩 사이즈, 전극형태 및 면적과 칩 높이, 가공공정에서의 작업성 등을 고려하여 최적의 칩을 제작하여야 한다. 최근까지 상업적으로 이용되고 있는 가시광선 영역의 발광 다이오드는 AlGaAs, InP, 그리고 ZnSe등과 같은 직접 천이형 물질을 가지고 발광 다이오드를 제작해 왔다. 그러나 최근 들어 GaN 계열의 물질을 사용하여 가시광선 영역 중 청색 및 백색 발광 특성을 내는 다이오드가 상업적으로 이용되고 있다. 이러한 GaN 계열의

발광 다이오드가 AlGaAs, InP, 그리고 ZnSe등과 같은 물질로써 만드는 발광 다이오드와 다른 점은 GaN 계열을 성장시키는 기판이 주로 사파이어(sapphire, Al₂O₃)와 같은 절연체위에 GaN를 성장한다는 점이다. 그러므로 발광 다이오드 제작 시 AlGaAs, InP, 그리고 ZnSe등은 기판이 전기적으로 전도성을 가지므로 수직 주입(vertical injection) 발광 다이오드를 제작할 수 있는 반면, GaN 계열은 기판이 전기적으로 전도성을 가지지 못하는 절연체이기 때문에 수직 주입 다이오드를 제작할 수 없고 수평 주입(lateral injection) 발광 다이오드를 제작해야 한다는 점이다(그림 3),²⁰⁾ 수직 주입 발광 다이오드는 수평 주입 발광 다이오드보다 제조 공정이 간단하고 소자의 시리즈 저항(series resistance)을 적게 할 수 있고 발광 다이오드 전체에 균일한 전류 분포를 만들 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, GaN 계열의 발광 다이오드는 수평 주입형으로 제작해야 하기 때문에 소자 구조 설계과정에서 발광 다이오드가 최적의 발광 효율과 수명 시간을 가지도록 소자를 디자인 할 때 사이즈, 전극형태 및 면적 등을 고려하여 최적의 소자를 만들 수 있도록 하여야 한다.

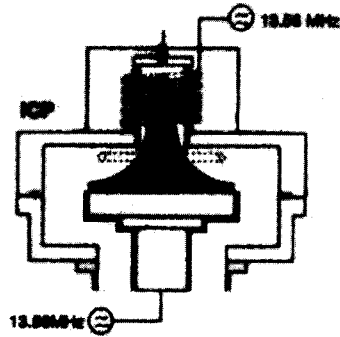


(a) 수직 주입형 발광 다이오드 (b) 수평 주입형 발광 다이오드

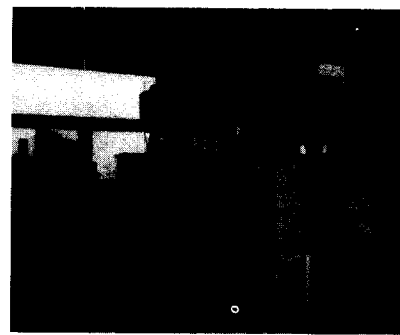
그림 3

2.2 식각 공정(etching process)

GaN 계열의 화합물 반도체를 이용하여 발광 다이오드를 제작하기 위해서는 식각(etching) 공정을 거쳐야 하는데, 질화물 반도체는 화학적으로 매우 안정하기 때문에 습식(wet) 식각 방법에 의해서는 만족할 만한 효과를 얻을 수 없어 건식(dry) 플라즈마(plasma) 식각 방법이 일반적으로 사용되어지고 있다. 플라즈마 식각 공정은 물리적 스퍼터링(physical sputtering), 화학적 반응(chemical reaction), 또는 이 두 가지가 혼합되어 이루어지는 ion-assisted 플라즈마 식각 공정을 통해서 이루어진다,²¹⁾ 질화물 반도체의 건식 식각 기술로써 사용되는 방법에는 reactive ion etching(RIE), chemically assisted ion beam etching(CAIBE), magnetron reactive ion etching(MRIE), electron cyclotron resonance etching(ECR), 그리고 inductively coupled plasma etching(ICP)등이 있다. 이러한 방법 중에서 질화물 반도체의 경우 고밀도 플라즈마를 사용한 식각 공정이 좋은 식각 특성을



(a) ICP의 간단한 구조



(b) 실험실에서 사용중인 ICP 장비 사진

그림 4

나타내므로 MRIE, ECR 그리고 ICP등의 건식 플라즈마 식각 방법을 이용하고 있다. 현재 본 연구실에서는 ICP를 이용한 건식 플라즈마 식각 방법을 이용하여 질화물 반도체 발광 다이오드를 제작하고 있다. 그림 4는 ICP 장비의 간단한 구조와 실험실에서 보유하고 있는 ICP 장비의 사진을 보여 주고 있다. 건식 식각 공정은 식각률, 이방성(anisotropy) 식각, 평탄한 측면벽(sidewall), 식각된 표면의 평탄한 구조 및 플라즈마에 의해서 생기는 결함 등을 최대한 억제시키는 방법으로 이루어져야 한다. 알루미늄(Al), 갈륨(Ga), 인듐(In) 등의 3족 원소와 5족 원소인 질소가 강하게 결합된 질화물 반도체의 건식 식각 공정에는 염소(Cl₂), 브롬(Br₂) 및 요오드(I₂)와 같은 할로젠 기체 플라즈마와 아르곤과 같은 불활성 기체 플라즈마 또는 이들의 혼합기체가 사용된다.²²⁾ 또한, 질화물 반도체를 건식 식각 하는 공정에서는 위에서 열거한 기체이외에 식각률, 선택비(selectivity), 평탄한 측면벽, 이방성 식각 특성, 플라즈마에 의한 결함 등이 식각 공정에 사용하는 기체 플라즈마에 매우 민감하게 대응하므로 이러한 식각 특성 등을 향상시키기 CH₄, H₂, O₂ 등의 기체를 첨가하여 최적의 건식 식각 특성을 얻을 수 있도록 연구가 진행되고 있다.

2.3 금속 접합 공정(metallization process)

질화물 발광 다이오드 제작에는 소자의 효율과 수명 시간

표 2

접합 금속	접촉 저항(Ωcm^2)	참고문헌
Al	8×10^{-9}	[23]
Ti/Al	5×10^{-9}	[23]
Ti/Ag	6.5×10^{-9}	[24]
Ti/Au	3.8×10^{-8}	[25]
Pd/Al	2.5×10^{-9}	[26]
Nd/Al	8×10^{-9}	[27]
W	8×10^{-9}	[28]

표 3

접합 금속	접촉 저항(Ωcm^2)	참고문헌
Cr/Au	4.3×10^{-1}	[29]
Ni/Pt/Au	2.1×10^{-2}	[30]
Mg/Ni/Au	2×10^{-3}	[31]
Cr/Ni/Au	9.1×10^{-3}	[32]
Pt/Ni/Au	5.1×10^{-4}	[33]
Pd/Au	4.3×10^{-4}	[34]

간의 향상을 위하여 질화물 반도체와 금속과의 접합 시 높은 품질을 갖는 오믹 접촉이 필수적이다. n-형 질화물 반도체의 경우에는 타이타늄(Ti)과 알루미늄(Al) 계열의 금속을 이용하여 접촉 저항이 매우 낮고 ($<10^{-4} \Omega\text{cm}^2$) 안정성이 뛰어난 우수한 오믹 접촉을 쉽게 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 표 2는 여러 가지 금속을 사용하여 n-형 질화물 반도체에 오믹 접촉을 형성 시 보여주는 접촉 저항을 보여주고 있다. 반면에 p-형 GaN의 경우에는 높은 정공 농도를 갖는 p-형 GaN을 얻기가 어렵고 GaN의 일함수(work function)에 비하여 높은 일함수를 갖는 금속이 없기 때문에 매우 낮은 접촉 저항을 가지며 안정성이 매우 우수한 금속 접합을 얻기가 어렵다고 알려져 있다. 일반적으로 p-형 GaN의 오믹 접합시 사용되고 있는 금속은 니켈(Ni)을 기본으로 한 금속 접합이 주로 사용되고 있다. 그러나, 이러한 금속 접합이 만족할만한 낮은 접촉 저항을 보여주지 못하므로 최근에는 크롬(Cr), 백금(Pt), 그리고 팔라듐(Pd)³⁵⁾등을 사용한 금속 접합이 많이 연구되고 있다. 표 3은 p-형 질화물 반도체와 금속 접합시 보여주는 접촉 저항 값을 보여주는 표이다. 최근에는 p-형 GaN과 금속과의 접합시 오믹 접촉 특성을 향상시키기 위하여 p-형 GaN 표면에 질소와 같은 기체 플라즈마를 사용하거나 또는 여러 가지 화학 용액³⁶⁾을 사용하여 GaN 표면에서의 정공 농도를 높이고 자연 산화층이나 오염층을 효과적으로 제거하여 오믹 접촉을 형성하는데 유리한 특성을 갖도록 금속 박막 형성 전에 표면개질(surface modification) 공정³⁷⁾을 도입함으로써 전기적, 열적, 구조적으로 특성이 우수한 오믹 접합을 위한 연구가 진행되고 있다. 또한, GaN 계열의 발광 다이오드는 일반적으로 표면 발광(surface emitting) 다이오드

형태로 제작되기 때문에 p-형 GaN위에 오믹 접촉으로 사용되는 금속의 전기적 특성뿐만 아니라 발광 다이오드의 활성층에서 발광되어 나오는 빛에 대한 투과도 또한 우수하여야 발광 다이오드의 효율이 우수해진다.³⁸⁾ 그러므로, GaN 계열의 발광 다이오드 제작 시 p-형 GaN와의 접합시 전기적 특성이 매우 우수하고 발광되어 나오는 빛에 대한 투과도가 우수한 투명전극 개발이 필수적이라 하겠다.

2.4 조립 공정(packaging)

발광 다이오드의 조립 공정은 일반적으로 die mount, wire bonding, epoxy molding 및 테스트의 순으로 진행된다. 그림 5는 본 실험실에서 제작한 다중양자우물구조를 가지는 하나의 칩을 보여주는 광학 현미경 사진이며 조립 공정 전까지의 단계를 마친 것이다. 조립 시 wire bonding은 금(Au) 또는 알루미늄(Al) 선을 주로 사용한다. 발광 다이오드 소자의 조립은 칩에서 발광된 광 신호를 원거리까지 도달시키고, 발광 효율을 향상시키기 위하여 몰드 에폭시 패키지를 구면렌즈 형태 및 타원 렌즈 형태로 조립한다. 그림 6은 일본의 니치아화학공업에서 만들어 상업적으로 이용하고 있는 청색 및 백색 발광 다이오드를 보여주는 그림이다.

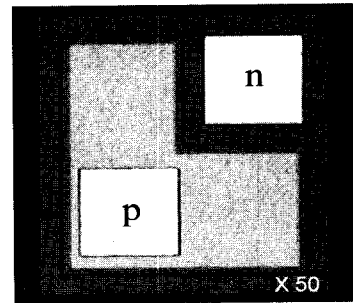
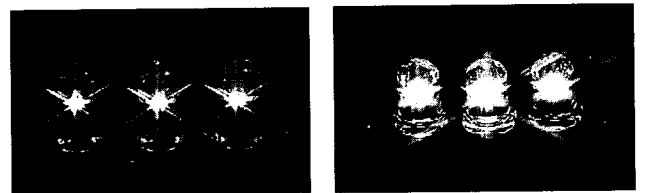


그림 5



(a) 청색 발광 다이오드 (b) 백색 발광 다이오드

그림 6

3. 백색 GaN LED 제작 및 응용

앞서 소개한 대로 LED는 현재까지 인류가 개발한 가장 효율적인 발광방식이다. 요사이에는 인류의 생활양식 변화로 말미암아 밤과 낮의 구분 없이 활동하는 인구가 늘어나고

있는 추세이다. 이에 따라 어두운 밤에도 대낮같이 빛을 밝혀주는 것이 필요하고, 이것은 결국 전기에너지의 소비가 끝없이 증가함을 얘기한다. 만약, 인류가 개발한 가장 전력 효율이 우수한 LED를 사용하여 형광등이나 백열등과 같은 조명기구를 대체할 수 있다면 에너지 소비 효율이 크게 증가할 것임은 주지의 사실이다. 보고된 바에 의하면 현재 전세계의 백열등과 형광등의 조명기구에 대한 시장규모는 연간 11조원에 이르고, 국내에서도 3000억 원에 달한다고 한다. 서두에 언급하였듯이 빛의 삼원색인 적색, 녹색, 청색이 있으면 자연색을 모두 구현할 수가 있다. 따라서, LED를 사용하여 백색의 조명을 만들어 내려면, 가장 간단하게는 적색, 녹색, 청색 각각의 LED를 조합하면 가능하다. 이 경우 각각의 LED 밝기를 조절하면 휘황찬란한 거리의 불빛을 가정에서도 볼 수 있을 것이다. 그러나, 각각의 LED를 만드는 재료가 다르기 때문에 (적색: AlGaAs, 청색과 녹색: InGaN) 세 가지의 다이오드를 조합한다는 것은 비경제적이고 비생산적이다. 현재까지 백색 LED를 만드는 가장 대표적인 방법은 청색 LED에 YAG와 같은 형광 물질을 결합하여 만드는 방법이다.³⁹⁾ 이것은 고휘도의 청색 LED에서 나오는, 충분히 높은 여기 에너지를 갖는 빛이 형광물질을 여기 시켜 형광 물질로부터 황색과 적색에 이르는 넓은 범위의 빛을 방출시킴으로써 전체적으로 백색 발광을 유도하는 방법이다. 상기의 방법은 현재 상용화되고 있으며, 다만 조명 대체 기구로서의 문제점은 단위 W당 Luminous Flux가 최대 15 lm/W 밖에 되지 않는다는 데 있다. 가정이나 사업체에서 사용되고 있는 형광등의 밝기를 얻으려면 120 lm/W 정도가 되어야 적합하다. 일본에서는 통산성 주체로 2005년을 목표로 한 백색 LED 활용화 방안이 추진 중에 있다. 또한 최근 3년 사이 세계 3대 조명 메이커인 필립스, 오스람, GE Lighting, 이 각각 청색 LED 개발에 성공한 업체인 Hewlett Packard, Siemens, Emcore와 손잡고 백색 LED 개발에 나서고 있다.

백색 LED 개발 기술은 청색 LED와 형광 물질을 결합한 형태 외에도 형광 물질의 자체 흡수 효과를 줄여 발광 효율을 개선할 수 있는 반도체성 공액 고분자(semiconducting conjugated polymer)를 사용하는 방법이 연구되고 있다.⁴⁰⁾ 또한, 형광 물질이나 반도체성 공액 고분자와 같은 보조의 물질이 필요 없이 GaN를 위시한 질화물 계열의 반도체만을 가지고 백색 LED를 개발하려는 시도도 이루어지고 있다. GaN에 Zn와 O를 첨가하여 백색 발광을 유도하는 방법이 소개되었으나⁴¹⁾ 불순물의 첨가로 인한 발광효율 저하가 문제점으로 대두되고 있다. 또한 광주과학기술원에서는 형광물질을 합성하는 노력 이외에도 InGaN의 상분리 현상을 이용하여 가시광선 전 영역에서 빛을 발할 수 있는 InGaN 활성층을 이용한 방법과 청색, 녹색, 적색을 방출하는 각각의 InGaN층을 한 LED 구조 내에 포함시켜 백색 LED를 개발하려는 연구를 시도하고 있다.⁴²⁻⁴³⁾ 백색 LED는 조명 기구 외에도 자동차 내부 등이나 장난감, LED back light등에 다양하게 이용될 수 있을 것으로 예측된다.

4. 결 론

GaN 화합물 반도체를 이용한 고휘도의 단파장 LED 개발은 화합물 반도체 연구의 중요성을 수요자 들에게 직접적으로 인식시키는데 매우 중요한 계기가 되었다. GaN를 이용한 다양한 광소자의 제작과 이를 이용한 상업적인 응용성 그리고 무한한 시장성을 고려하면 국내에서도 이분야의 집중적인 연구가 필요한 것을 알 수 있다. 외국에서 이미 개발한 LED 소자에 대해서는 막대한 시장성을 염두에 두고 연구의 포기보다는보다는 우월한 성능을 갖는 소자기술 확보를 위한 연구가 수행되어야하며 특히 발광소체에 대한 기초적인 연구가 적극적으로 진행되어야 한다. 또한 국내의적으로 연구가 경쟁적으로 진행되고 있는 분야는 원천기술, 원천특허의 확보를 위하여 정부, 산업체, 연구소, 대학 등이 협동하여 GaN 기술발전 대열에서 기술 우위를 확보할 수 있도록 힘을 모아야 할 것이다. 다행히 GaN 기술 분야는 최근에 기술 발전이 집중적으로 이루어지고 있으므로, 국내에서도 GaN 발광소체와 소자기술 확보에 집중적인 연구투자와 최선의 노력을 한다면 기초연구 및 상업화 기술에서 빠른 시일 내에 국제적으로 우월한 지위를 확보하게 될 것으로 믿어진다.

참고문헌

- [1] J. Black, H. Lowckwood, and S. Mayburg, J Appl. Phys. 34, 178 (1963).
- [2] F. A. Ponce and D. P. Bour, Nature 386, 351 (1997).
- [3] D. A. Neumayer and J. G. Ekerdt, Chem. Mater. 8, 9 (1996).
- [4] M. Ohring, The Materials Science of Thin Films (Academic Press, London, 1992) Ch. 7.
- [5] S. J. Pearton, GaN and Related Materials (Gorden and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1997) Ch. 8.
- [6] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, Appl. Phys. Lett. 48, 353 (1986).
- [7] S. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys. 30, 1705 (1991).
- [8] M. S. Yi, H. H. Lee, D. J. Kim, S. -J. Park, D. Y. Noh, C. C. Kim, and J. H. Je, Appl. Phys. Lett. 75, 2187 (1999).
- [9] T. Kachi, K. Tomita, K. Itoh, and H. Tadano, Appl. Phys. Lett. 72, 704 (1998).
- [10] X. W. Sun, R. F. Xiao, and H. S. Kwok, Appl. Phys. Lett. 73, 5776 (1998).
- [11] S. Strite and H. Morkos, J. Vac. Sci. Technol. B10, 1237 (1992).
- [12] J. Neugebauer and C. G. Van de Walle, Phy. Rev. Lett. 75, 4452 (1995).
- [13] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 28, L2112 (1989).
- [14] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa,

- Jpn. J. Appl. Phys. 31, 1258 (1992).
- [15] W. Gatz, N. M. Johnson, J. Walker, D. P. Bour, and R. A. Street, Appl. Phys. Lett. 68, 667 (1996).
- [16] N. K. Chen, H. C. Lin, Y. C. Pan, J. Ou, C. K. Shu, W. H. Chen, and M. C. Lee, Jpn. J. Appl. Phys. 37, 4870 (1998).
- [17] S. Nakamura and T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys. 31, L1457 (1992).
- [18] T. Wang, D. Nakagawa, J. Wang, T. Sugahara, and S. Sakai, Appl. Phys. Lett. 73, 3571 (1998).
- [19] N. Wieser, O. Ambacher, H. -P. Felsl L. Gergens, and M. Stutzmann Appl. Phys. Lett. 74, 3981 (1999).
- [20] R. Singh, a Ph. D. Thesis, Boston University, College of Engineering (1997).
- [21] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul, and F. Ren, J. Appl. Phys. 86, 1 (1999).
- [22] Y. B. Hohn, D. C. Hays, S. M. Donovan, C. R. Abernathy, J. Han, R. J. Shul, H. Cho, K. B. Jung, and S. J. Pearton, J. Vac. Sci. Technol. A 17, 768 (1999).
- [23] B. P. Luther, S. E. Mohny, T. N. Jackson, M. A. Khan, Q. Chen, and J. W. Yang, Appl. Phys. Lett. 70, 57 (1997).
- [24] J. D. Guo, C. I. Lin, M. S. Feng, F. M. Pan, G. C. Chi, and C. T. Lee, Appl. Phys. Lett. 68, 235 (1996).
- [25] J. Burm, K. Chu, W. A. Davis, W. J. Schaff, L. F. Eastman, and T. J. Eustis, Appl. Phys. Lett. 70, 464 (1997).
- [26] A. T. Ping, M. A. Khan, and I. Adesida, J. Electron. Mat. 25, 819 (1996).
- [27] C. T. Lee, M. Y. Yeh, and Y. T. Lyu, J. Electron. Mat. 26, 262 (1997).
- [28] M. W. Cole, D. W. Eckart, W. Y. Han, R. L. Pfeffer, and T. Monahan, J. Appl. Phys. 80, 278 (1996).
- [29] J. T. Trexler, S. J. Pearton, P. H. Holloway, M. G. Mier, K. R. Evans, and R. F. Karlicek, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 395, 819 (1996).
- [30] J.-S. Jang, K.-H. Park, H.-K. Jang, H.-G. Kim, and S.-J. Park, J. Vac. Sci. Technol. B 16, 3105 (1998).
- [31] J. B. Fedison, T. P. Chow, H. Lu, and I. B. Bhat, International conference on silicon carbide, III-nitrides and related materials, sweden (1997).
- [32] T. Kim, M. C. Yoo, and T. Kim, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 449, 1061 (1997).
- [33] J.-S. Jang, I.-S. Chang, H.-K. Kim, T.-Y. Seong, S. Lee, and S.-J. Park, Appl. Phys. Lett. 74, 70 (1998).
- [34] J. K. Kim, J.-L. Lee, J. W. Lee, H. E. Shin, Y. J. Park, and T. Kim, Appl. Phys. Lett. 73, 2953 (1998).
- [35] J.-K. Lee, M. Weber, J. K. Kim, J. W. Lee, Y. J. Park, T. Kim, and K. Lynn, Appl. Phys. Lett. 74, 2289 (1999).
- [36] J. K. Kim, J.-K. Lee, J. W. Lee, Y. J. Park, and T. Kim, J. Vac. Sci. Technol. B 17, 497 (1999).
- [37] K. Horiba, K. Ono, H. Fujioka, M. Oshima, H. Miki, A. Fukizawa, M. Okuyama, Y. Watanabe, J. Appl. Phys. 85, 6539 (1999).
- [38] J. K. Sheu, Y. K. Su, G. C. Chi, P. L. Koh, M. J. Jou, C. M. Chang, and W. C. Hung, Appl. Phys. Lett., 74, 2340 (1999).
- [39] S. Nakamura, G. Fasol, The Blue Laser Diode (Springer-Verlag, Berlin, 1997) Ch. 10.
- [40] F. Hide, D. Kozodoy, S. P. DenBaars, and H. J. Heeger, Appl. Phys. Lett. 70, 2664 (1997).
- [41] A. G. Drizhuk, M. V. Zaitsev, V. G. Sidorov, and D. V. Sidorov, Tech. Phys. Lett. 22, 441 (1996).
- [42] M. -H. Kim, J. K. Cho, I. H. Lee, and S. -J. Park, Phys. Stat. Sol. A, in press.
- [43] Y. T. Moon, D. J. Kim, K. M. Song, I. H. Lee, M. S. Yi, D. Y. Noh, C. J. Choi, T. Y. Seong, and S. -J. Park, Phys. Stat. Sol. B, in press.

저 자 소개

김동준 (金東俊)

1973년 5월 23일생. 1996년 한양대 공대 금속재료공학과 졸업. 1998년 광주과학기술원 신소재공학과 졸업(석사). 1998년-현재 광주과학기술원 신소재공학과 박사과정 재학중.

허철 (許 喆)

1969년 10월 26일생. 1996년 성균관대 공대 금속공학과 졸업. 1998년 광주과학기술원 신소재공학과 졸업(석사). 1998년-현재 광주과학기술원 신소재공학과 박사과정 재학중.

박성주 (朴成柱)

1952년 11월 1일생. 1976년 서울대 화학과 졸업. 1979년 서울대 대학원 화학과 졸업(석사). 1985년 Cornell 대 졸업(이학박사). 1985년-1987년 IBM T. J. Watson 연구소 연구원. 1987년-1995년 한국전자통신연구원 반도체기술연구단/기초기술연구부 선임/책임연구원. 1995년-현재 광주과학기술원 신소재공학과 교수.