GaN 반도체의 응용 및 연구방향

김동준 허 철 박성주

(광주과학기술원 신소재공학과 및 광전재료연구센터)

1. GaN 반도체의 발전

GaN 반도체 개발의 원동력은 GaN 반도체 고유의 뛰어난 물리, 화학적 특성의 활용에 기인하는 바 크다. 특히 넓은 금지대폭과 높은 breakdown field (1.5 x 106 V/cm) 및 열전도도 (1.3 W/cm ℃), 그리고 radiation hardness 등의 물리적 성질과 고온에서의 화학안정성은 GaN 반도체의 소자 응용 가능성을 한층 증대시키고 있다.[1] GaN는 InN 및 AlN와 고용체 (solid solution)를 이루어 금지대폭의 조정이 가능하며, 고용체의 전 조성 범위 내에서 직접천이형 반도체의 특성을 나타내기 때문에 광효율이 우수한 광전소자로의 응용에 매우 적합한 물질이다. 특히, $In_xGa_{1-x}N$에서 In의 조성을 변화시킬 경우 가시광선 영역에서 미개척 분야로 남아 있던 청색 및 자외선 영역의 발광소자를 개발할 수 있는 장점이 있다. 또한, GaN 반도체의 큰 압전상수는 AlGaN/GaN의 이종접합 구조 제작이 용이하다는 특성과 어우러져 고주파, 고전력 트랜지스터 등의 전자소자 개발에 밝은 빛을 던진다. GaAs의 약 3배에 이르는 압전상수는 AlN/GaN 계면의 면전자농도(sheet electron density)를 5×10^{13} cm^{-2} 까지 증가시키는 것이 가능하다고 보고되고 있다.[2] 이러한 뛰어난 물리, 화학적 특성과 소자로서의 무궁한 응용 가능성으로 일각에서는 GaN를 중심으로 한 질화물 반도체가 GaAs를 위시한 III-V족 화합물 반도체의 대를 이을 것으로 예측하고 있다.

GaN 반도체의 성장에 관한 체계적인 연구는 지금으로부터 약 30년 전으로 거슬러 올라간다. 1970년대에 미국과 일본에서 고품위의 GaN를 성장시키려는 시도가 있었다. 그러나, GaN 반도체의 격자 상수에 부합하는 기판 물질의 부재와 고품위의 단결정을 성장시킬 수 있는 성장방법의 미비로 인하여 고품위의 GaN 반도체를 성장시키는데 어려움이 따랐다. 1980년대에 들어서면서 고품위의 단결정 박막 성장법으로 널리 알려진 금속 유기 화학 기상 증착법과 분자선 에피택시법의 발전에 힘입어 GaN 반도체의 성장에 관한 연구는 가일층 심화되었다. 특히, 1986년 일본의 Akasaki교수에 의하여 도입된 AlN의 핵생성층의 개발은 GaN와 격자불일치가 약 16%에 이르는 사파이어 기판 위에 결정성과 전기 및 광학적 특성이 우수한 GaN를 성공적으로 성장시키는 데에 이른다.[3] 핵생성층을 이용한 2단계의 GaN 반도체 성장법은 그 후 발전을 거듭하여 핵생성층으로 AlN뿐만 아니라 GaN, AlGaN 등의 다양한 물질을 사용하는 것이 가능해졌다.[4, 5] 고품위의 GaN 성장이 가능한 이후에 문제점으로 등장한 것이 p-GaN를 성장시키는 것이다. 인위적으로 도우핑하지 않고 성장된 GaN가 기본적으로 n-type특성을 나타냈고, 성장분위기 중의 수소가 억셉터 도우핑 물질과 결합하여 복합체를 형성하였기 때문에 p-GaN를 성장하는 것에 어려움이 있었다. p-GaN 역

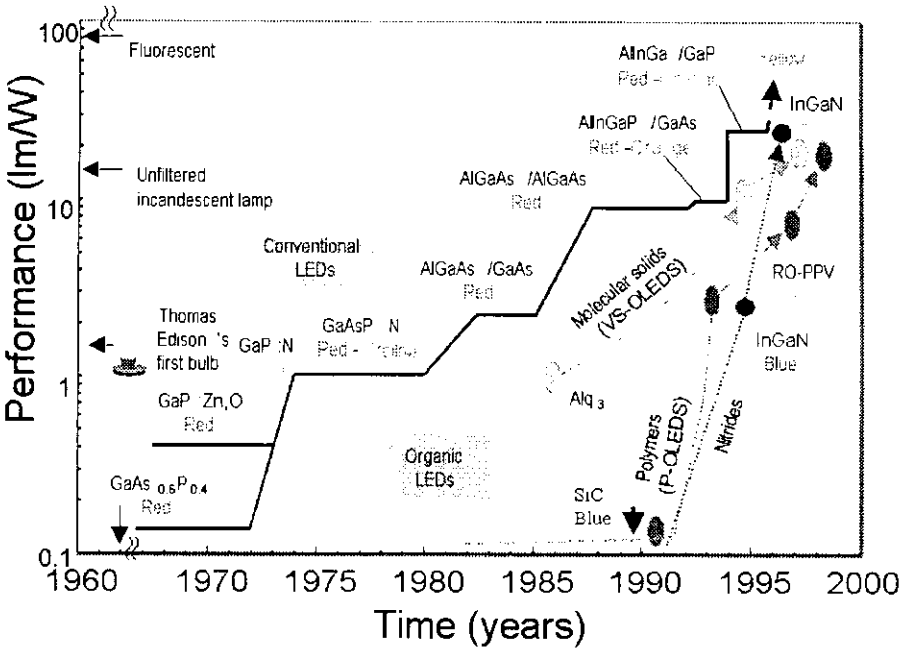

그림 1. 발광다이오드의 발전과정
Fig. 1. Evolution of light emitting diode (LED)

사 Aksasaki 교수의 공적에 힘입어 처음 개발되었는데 그 방법은 Mg을 억셉터로 사용하여 p-GaN을 성장한 후 낮은 에너지의 전자를 이용하여 p-GaN박막을 주사하는 것이었다. 효과적으로 p-GaN을 만들 수 있는 방법은 후에 일본 니치아화학공업의 Nakamura 박사에 의하여 제시되었다. Nakamura 박사는 질소분위기 하에서 고온 열처리를 하는 것만으로 효율적으로 p-GaN을 성장하는 방법을 개발하였다. n-, p-GaN의 개발과 더불어 광효율이 뛰어난 InGaN의 성장이 가능하게 되었고, 이러한 눈부신 GaN 반도체 박막 성장 기술의 발전은 1994년 일본 니치아화학공업에서 세계 최초로 고휘도의 청색 발광다이오드를 상업화하는 것을 가능하게 하였다.[6]

1980년대 이후 GaN 반도체에 관한 연구는 전세계적으로 활발하게 진행되고 있으며 현재는 GaN 반도체를 이용한 자색, 청색, 녹색, 호박색, 적색 등의 전 가시광선 영역에 걸친 발광다이오드와 청자색 및 청색 레이저다이오드, 그리고 UV-photodectctor 등의 광전소자와, metal semiconductor field effect transistor (MESFET), modulation doped field effect transistor (MODFET), heterojunction bipolar transistor (HBT) 등의 트랜지스터의 제작이 가능한 단계에 이르렀다. 본 논문에서는 GaN 반도체를 이용한 광전소자 및 전자소자로의 응용과 연구방향에 대해서 기술하고자 한다.

2. GaN 반도체 광전소자

GaN 반도체를 응용한 대표적인 광전소자로는 발광다이오드와 레이저다이오드를 생각할 수 있다. 반도체를 이용한 가시광 발광다이오드의 시초는 1960년대로 거슬러 올라간다. 가시광 발광다이오드는 그 등장이래 매 10년마다 10배 이상의 효율 상승을 나타내고 있다 (그림 1). 현재 상용화되고 있는 고효율 발광다이오드는 AlGaAs계를 이용한 적색 발광다이오드와 AlGaInP계를 주로 하는 황색 발광다이오드이며, 1994년에 InGaN를 이용한 청색 발광다이오드 및 녹색 발광다이오드가 개발되어 상용화되었다. 최근에 상용화에 성공한 InGaN를 이용한 청색 및 녹색 발광다이오드는 그 동안 빛의 삼원색을 이루는 적색, 녹색, 청색 중에서 반도체 발광다이오드로 실현되지 못했던 것을 실용화 시켰다는데 그 의미가 크다. 1980년대 후반 SiC를 이용한 청색 발광다이오드가 개발되었다. 그러나, SiC의 경우 간접천이형 반도체 물질이기 때문에 발광효율을 상승시키는 데는 원천적인 문제점을 내포하고 있었다. 1990년대 초반까지 주류를 이루던 ZnSe계의 청색 및 녹색 발광다이오드 개발 시도는 ZnSe계의 고유한 문제점인 다이오드 사용중의 결함의 발생에 의한 수명의 감소가 상용화를 가로막는 요인이 되었다. 일반적으로 반도체 발광다이오드의 발광효율은 그림 2에서 보여지는 것처럼 반도체 내부의 결함 밀도의 증가에 따라서 크게 감소

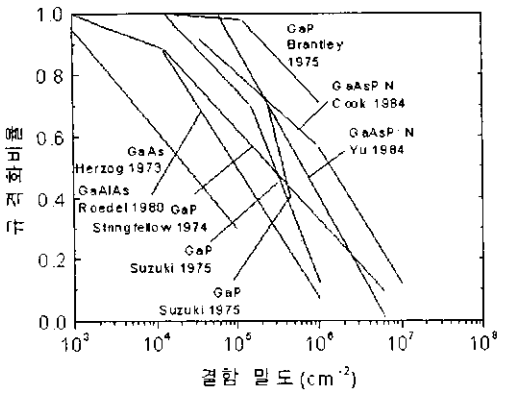

그림 2. 발광다이오드 효율의 결함밀도 의존성
Fig. 2. Dependence of efficiency of light emitting diode (LED) on the defect density

하는 특성을 나타낸다. 그러나, GaN 반도체의 경우 결함 밀도가 1x 1010 cm^{-2} 에 달함에도 불구하고 수명이 100,000 시간 이상의 고휘도를 발하는 것으로 알려져 있다.

GaN 반도체를 사용하여 발광다이오드를 개발하는데 있어서 핵심이 되는 발광다이오드 구조는 주로 InGaN를 이용한 단일양자우물 구조나 다중양자우물 구조가 된다. 기본적인 발광다이오드의 발광원리는 n형 반도체에서 공급되는 전자와 p형 반도체에서 공급되는 정공이 결합하여 그 반도체의 금지대폭과 관련하여 빛을 발하는 것이다. 즉, p-n의 반도체 이종접합구조만 완성할 수 있으면 하나의 발광다이오드가 완성되는 것이다. 1989년 Akasaki교수에 의하여 p-GaN의 성장이 가능해 짐에 의해 p-n 접합에 의한 GaN 청색 발광다이오드가 처음 제작되었다.[7] 그러나, 단순 p-n 이종접합 구조의 발광다이오드는 발광효율의 측면에서 약점을 가지고 있다. 이에 개발된 것이 양자우물을 이용한 단일양자우물 혹은 다중양자우물 구조의 발광다이오드이다. 양자우물 구조를 활용한 발광다이오드의 경우 n-GaN 및 p-GaN에서 공급된 각각의 전자와 정공이 InGaN/GaN로 구성되는 양자우물 구조내에 양자구속효과에 의하여 갇히게 되어 전자와 정공의 결합 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있게된다 (그림 3).

일반적으로 발광다이오드의 발광효율은 전압 효율, 내부양자효율, 외부양자효율로 결정되어질 수 있다.[8] 이중 외부양자효율은 다이오드의 외형을 이루는 에폭시의 선택과 제작에 관련된 것으로 기존에 개발되어 있는 것을 활용할 수 있다. 그러므로, 발광효율을 증대시키기 위해서는 내부양자효율 및 전압 효율을 증가시키는 것이 필수적이다. 내부양자효율의 개선을 위해서는 전술한 양자우물 구조를 이용한 전자와 정공의 결합 확률을 높이는 것이 효과적이다. 전압효율은 반도체 내부의 저항 및 반도체와 전극간의 접촉저항에 의하여 결정된다. 따라서, 전압효율을 높이기 위해서는 접촉저항이 낮

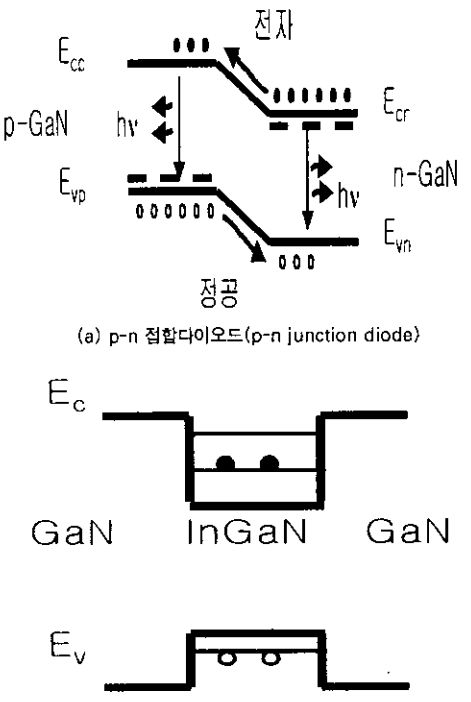

그림 3. 간략한 p-n접합 및 양자우물 발광다이오드 구조
Fig. 3. Schematic diagram of p-n junction and quantumwell light emitting diode (LED)

은 금속 오믹접합을 개발하는 것이 필요한데 특히, p-GaN의 경우 정공의 농도가 보통 10^{17} cm^{-3}대로 낮기 때문에 적합한 오믹접합 개발에 어려움이 대두된다. 그러나, 최근에는 p-GaN의 표면처리 및 Pt/Ni/Au, Ni/Au, Pd/Au 등을 이용하여 접촉저항이 1 x 10^{-5} Ωcm로 낮은 만족할 만한 수준의 오믹접합 금속이 연구되고 있다.[9]

최근 도심의 거리에 많이 등장하고 있는 대형옥외전광판의 경우 고효율의 적색, 녹색 및 청색 발광다이오드가 이용되고 있으며, 각종 표시등과 교통신호등에도 발광다이오드를 활용하고 있다. 미국 Strategies Unlimited사의 보고서에 의하면 2003년까지 반도체 발광다이오드의 세계시장은 32억 달러에 이른다고 하니 엄청난 시장규모를 자랑한다. 특히 고효율 발광다이오드의 경우 시장 성장 속도가 연 15 %로 전체 발광다이오드의 성장 속도 연 10.4 %에 비하여 월등한 것으로 예측하고 있다.

근간에 들어서는 발광다이오드를 활용하여 기존의 조명기구를 대체하려는 연구가 미국과 일본을 중심으로 하여 활발히 진행되고 있다. 즉, 자외선 혹은 청색 GaN 발광다이오드와 광변환효율이 큰 형광체를 이용하여 백색 발광다이오드를 개발하려는 것이다. 현재 개발되어 있는 가장 고효율의 GaN

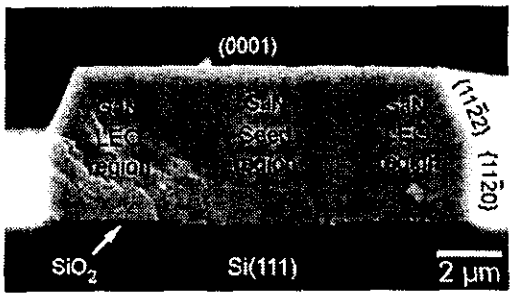

그림 4. Si 기판 위에 LEO 성장법을 통하여 성장된 GaN
Fig. 4. LEO grown GaN on silicon subatrate

백색 발광다이오드의 경우 효율이 15 lm/W에 달한다. 그러나, 백열등의 효율이 20 lm/W, 형광등의 효율이 80 lm/W에 달하는 것에 비하면 아직 개선의 여지가 많다. 현재 백색 발광다이오드는 발광효율 문제로 인하여 자동차 계기판용 백라이트나 밝지 않은 국부조명 등으로 사용되고 있으나, 머지 않은 장래에 실내외 조명으로 백색 발광다이오드를 사용하는 것이 현실로 다가오리라 생각된다. 백색 발광다이오드를 조명으로 사용하게 되면 기존의 조명기구에 비하여 사용전력이 1/10 - 1/8로 획기적으로 감소되며 수명이 100,000 시간 이상으로 에너지소비효율의 비약적인 향상과 더불어 환경친화적인 조명기구가 탄생하게 되는 것이다.

반도체를 이용한 레이저다이오드의 경우 단파장의 레어저다이오드가 개발되면 차세대 저장매체로 손꼽히는 DVD의 광원으로 활용되어 저장밀도를 약 2.5배정도 향상시킬 수 있는 것으로 예측되고 있다. 청색 및 녹색 영역에서의 레이저다이오드는 ZnSe계열의 II-VI 화합물 반도체를 사용하여 실험실에서 이미 1990년대 초반에 발진에 성공하였다. 그러나, 전술한 ZnSe 고유의 결함문제 때문에 수명을 향상시켜 상용화하는 데에 어려움이 따랐다. GaN 반도체를 이용하여 레이저다이오드를 개발하는데는 발광다이오드 개발에서와는 다르게 결정결함의 밀도를 최소화하는 것과 결정결함을 유발하지 않으면서 In의 조성을 증가시키는 것, 그리고 mirror facet을 제작하는 것이 최대 난관이 되었다. 최근 들어 이러한 문제점들이 해결되기 시작하였는데, 대표적인 것이 lateral epitaxial overgrowth (LEO)라는 방법을 사용하여 결정결함 밀도가 $\langle 10^5\ cm^{-2}$대의 고품위의 GaN 단결정을 성장하는 것이 가능하게 된 점이다.[10] LEO는 SiO_2를 마스크로 사용하여 GaN 반도체를 overgrowth하는 방법 (그림 4)으로 마스크 바로 위쪽에 위치하는 지역에서는 매우 깨끗한 결정이 얻어졌다. 이러한 방법으로 일본의 니치아화학공업은 1999년 청자색 GaN 반도체 레이저다이오드의 상업화에 나섰고, 현재는 청색 레이저다이오드의 시험제작도 하고 있다.

청색 레이저다이오드의 개발은 적색, 녹색 레이저다이오드와 결합하여 레이저디스플레이어를 개발할 수 있는 시금석이 될 것으로 예상된다.

3. GaN 반도체 전자소자

최근 전세계적으로 정보통신기술의 급격한 발달로 인하여 이동통신, 위성통신 등 무선통신을 이용한 개인통신의 수요가 점점 확대되면서, 무선통신 서비스의 품질도 다양화, 광대역화, 고품질화가 요구되고 있다. 이를 위한 서비스로 개인 휴대통신, 저궤도 위성을 이용하여 지구상 어디서나 움직이며 통신할 수 있는 범세계 개인 휴대통신, 제 3세대 이동통신인 IMT-2000등 0.8-2 GHz 대역의 대중성 이동 통신 기술이 사용되고 있다. 고속 무선통신 시스템으로는 30 GHz대의 주파수 대역을 사용하는 전화국간의 통신, 인공위성을 이용한 직접위성방송, 컴퓨터간의 고속정보 전달을 위한 무선 LAN 및 화상전화를 가능하게 하는 다점 지역통신 시스템 등이 있다. 이와 같은 이동 통신 서비스를 가능하게 하기 위해서는 상기의 주파수 대역에서 동작되는 고주파 부품의 개발이 선행되어야 한다. 무선통신 서비스의 다양화, 고속화, 대형화는 무선통신 기술의 고속화 및 고주파를 의미하며, 이에 부응하여 소자기술로써 고주파 및 저 잡음, 그리고 고출력 소자의 개발과 소형화/경량화/저소비 전력화를 위한 집적화를 필요로 하고 있다.

GaN 반도체는 광소자나 전자소자 분야에서 실리콘, 갈륨비소 등과 같은 반도체의 다음 세대를 열어갈 차세대 반도체로써 인식되고 있다. 현재 이미 상용화 되어있는 실리콘이나 갈륨비소 등을 위주로 만들어진 고출력 소자는 이들이 가지는 물성의 특성으로 인하여 능력의 한계에 다다랐다고 할 수 있다. 이러한 한계를 극복하고 위에서 서술한 바와 같은 미래의 초고속 무선통신 시대에 필요한 광대역 고출력 전자소자 제작이 절대적으로 필요한 시점에 도달했다. 이와 같은 소자로써 가장 각광받고 있는 소자가 GaN계 화합물반도체 소자이다. GaN 반도체는 0.5 ~ 30 GHz에 해당하는 광대

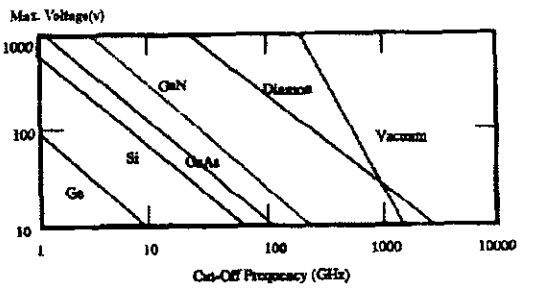

그림 5. 반도체 소자의 전압과 주파수의 한계
Fig. 5. Voltage and frequency limit of various semiconductor devices

역의 마이크로 영역에서 고전압, 고전류, 고온용으로 크게 활용될 수 있을 것이며[11], 연구개발이 점진적으로 이루어지면 미래의 무선통신 시스템으로 밀리미터파 영역인 60 GHz의 초고속 정보통신용 시스템의 전력소자로도 활용될 수 있으리라 전망된다.

GaN 반도체 FET(field-effect transistor) 소자가 1993년 처음으로 제작된 이후 미국등 선진국을 중심으로 GaN 반도체를 이용한 전자소자 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[12] 미국의 NASA Lewis연구소, Hewlett-Packard사, Cree Research사, APA Optics사, 일리노이 주립대, Santa Barbara의 캘리포니아주립대 및 US Army 연구소의 연구팀들이 기술적 우위를 확보하기 위하여 전략적 연구를 수행하고 있으며, 일본과 유럽에 있는 다수의 연구기관과 대학 또한 연구개발에 경쟁적인 노력을 기울인 결과 많은 기술적 진보를 이루었다. 이와 같이 국외에서는 정부와 산업체 및 대학을 중심으로 활발한 연구가 이루어지고 있는 반면에 국내에서는 몇몇 연구소와 대학에서 산발적으로 연구개발을 하고 있고, 투자의 정도가 미비하여 박막 증착 이나 물성의 기초적 연구가 대부분을 차지하고 있다. 특히 GaN 반도체를 이용한 전자소자분야는 기술적으로 상당히 뒤떨어져 있으며, 응용분야에 관한 연구도 거의 전무한 실정이다. 무선통신의 막대한 시장성에 비추어 전망이 매우 밝은 기술분야를 선도하여 개발해야 할 제품으로 0.8 - 30 GHz의 광대역 AlGaN/GaN HEMT 증폭기, 믹서, 스위치를 들 수 있다. 이를 실현시키기 위해서는 AlGaN/GaN 이종접합구조의 박막성장, HEMT MMIC (monolithic microwave integrated circuit)의 공정연구 연구가 수행되어야 한다. 이러한 소자는 상온에서 6 W/mm의 출력을 내는 고 전력용 MMIC로 구성되어 무선전화시스템의 기지국 전송기, phase-array 레이다의 전력모듈 등에 활용될 수 있다.[13] GaN 반도체 MODFET(Modulation Doped Field Effect Transter)는 고전력, 고온, 고주파 소자로 크게 주목을 받고 있는 소자이다. 표 1은 현재 연구 개발된 고 전력 소자의 예를 보여주고 있다. MODFET 구조의 특징인 높은 운반자 농도와 이동도는 고전력, 저잡음 특성을 우수하게 만드는 주요한 요인이다. 이러한 특성을 나타내는 원인으로는 기본적으로 GaN 반도체가 가지는 높은 항복전압과 전자의 포화속도, 높은 열전도도, 800 ℃의 고온에서도 안정성이 좋은 성질을 가지기 때문이다. GaN 반도체 전자소자의 용도는 고 전력/고주파 마이크로 웨이브 레이다 기기, 항공기 및 자동차의 고온소자, 위성통신시스템용 소자 등 범위가 매우 넓다.

그림 5는 여러 종류의 반도체재료에서 허용되는 cut-off 주파수와 전압의 한계를 보여준다. 10 GHz에서 100 GHz 대역까지 고주파용으로 사용되는 GaAs, InGaAsP와 같은 화합물반도체의 전력밀도보다 10배 이상, Si보다 2배 이상 높다. 고온소자의 경우에는 현재 500 ℃의 고온에서도 안정적인 동작을 보여주는 소자가 개발되고 있는 단계이다.[14]

미국의 NAVY는 APA Optics, Cree Research, Superior vacuum technology사 등을 통하여 700 ℃까지의 고온에서 사용할 전자소자를 GaN 반도체로 구현하고자 막대한 연구비를 투자한 결과 현재까지 많은 기술적 진보를 이루었다. 그러나, 현재 최적화된 이종접합구조의 제작에는 많은 개선점들이 남아있다고 보여진다. GaN 반도체를 이용한 MODFET의 경우에는 이종접합구조로 이차원 전자가스층을 구성하므로 AlN/GaN의 조합에 의한 박막단결정의 성장에 있어서 원자층 수준에 도달되는 평탄한 이종접합계면이

표 1. 고 전력 소자의 대표적 특성
Table 1. Major parameters of high power devices

	AlGaN/GaN MODFET	AlGaAs/GaAs P-HEMT	AlGaN/GaN HFET	AlGaN/GaN MODFET
Growth	MOCVD	MBE	MBE	MOCVD
X_{Al}	0.15	0.2	0.3	0.175
2DEG 농도(cm^{-2})	7.9×10^{12}	-	1.67×10^{13}	8×10^{12}
Gm max(mS/mm)	100-140	~550	182	240
L_g(μm)	1.5	〈0.25	0.15	0.25 T-gate
f_t(GHz)	36	-	32-36	50
f_{max}(GHz)	~70	150	55-57	92
이동도($cm^2/V\cdot sec$)	1500	6000	405	1200
최대채널전류 (mA/mm)	150-400	-	1000	806
출력(W/mm)	-	1	6	1.7
V_B(V)	230-340	10	30-35	80

성장되어야 한다.[2] 높은 고주파 특성을 얻기 위해서는 전자의 이동도를 최대한으로 높임으로써 가능해진다. 박막의 결정성을 개선하고 우수한 이종접합계면을 얻을 수 있다면 최대 동작 주파수를 140 GHz 대역까지 높일 수 있을 것으로 기대된다.[15] 또한 복잡한 이종접합구조의 성장법과 금속-반도체 계면의 고온 안정성의 확보를 위한 연구가 소자의 신뢰도를 높이는데 필요하다.

위에서 살펴본 봐와 같이 현재 GaN 반도체를 이용한 전자소자 분야는 기초연구의 성숙 단계를 거쳐 가시적인 기술개발의 결과들이 나오기 시작하고 있으며, 기술개발 속도 또한 점진적으로 가속화되고 있다. 현재 및 미래의 초고속 정보통신 사회에서는 무선통신 서비스의 다양화, 대형화, 고속화를 요구하고 있으며, 이를 실현시키기 위해서는 고주파수대의 무선통신 기술 및 소자기술로써 고주파 저잡음, 고출력 소자의 개발과 소형화/경량화/저소비전력화를 필요로 하고 있다. 이러한 요구에 부응할 수 있는 반도체 소자로써 주목받고 있는 소자가 GaN 반도체를 이용한 소자이며, 앞으로 연구개발이 점진적으로 이루어진다면 개개의 단위소자 수준에서 우수한 성능을 제공하는 집적회로까지 발전할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

[1] C. Yuan, T. Salagaj, A. Gurary, A. G. Thompson, W. Kroll, R. A. stall, C. -Y. Hwang, M. Schurman, Y. Li, W. E. Mayo, Y. Lu, S. Krishnankutty, I. K. Shmagin, R. M. Kolbas, and S. J. Pearton, "Investigation of n- and p-type doping of GaN during epitaxial growth in a mass production scale multiwafer-rotating-disk reactor", J. Vac. Sci. Technol. B13, 5, pp.2075-2080, 1995.9/10.

[2] S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul, and R. Ren, "GaN: Processing, defects, and devices", J. Appl. Phys. 86, 1, pp.1-78, 1999.7.

[3] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, "Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer", Appl. Phys. Lett. 48, 3, pp.353-355, 1986.2.

[4] J. N. Kuznia, M. Asif Khan, and D. T. Olson, "Influence of buffer layers on the deposition of high quality single crystal GaN over sapphire substrates", J. Appl. Phys. 73, 9, pp.4700-4702, 1993.5.

[5] M. S. Yi, H. H. Lee, D. J. Kim, S. J. Park, D. Y. Noh, C. C. Kim, and J. H. Je, "Effects of growth temperature on GaN nucleation layers", Appl. Phys. Lett. 75, 15, pp.2187-2189, 1999.10.

[6] S. Nakamura and G. Fasol, The Blue Laser Diode, Springer-Verlag, pp201-222, 1997.

[7] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, "P-type conduction in Mg doped GaN treated with low-energy electron irradiation (LEEBI)", Jpn. J. Appl. Phys. 28, 12, pp.1989-1990, 1989.12.

[8] N. Yamada, "可視光 LEDの 高效率化", 應用物理, 68, 2, pp.139-145, 1998.9.

[9] J. S. Jang, I. S. Chang, H. K. Kim, T. Y. Seong, S. Lee, and S. J. Park, "Low-resistance Pt/Ni/Au ohmic contacts to p-type GaN", Appl. Phys. Lett. 74, 1, pp.70-72, 1999.1.

[10] O. H. Nam, M. D. Bremser, T. S. Zheleva, and R. F. Davis, "Lateral epitaxy of low defect density GaN layers via organometallic vapor phase epitaxy", Appl. Phys. Lett. 71, 18, pp.2638-2640, 1997.11.

[11] S. C. Binari, K. Doverspike, G. Kelner, H. B. Dietrich, and A. E. Wickenden, "GaN FETs For microwave and high-temperature applications", Solid-State Electronics 41, pp. 177-180, 1997.

[12] M. A. Khan, J. N. Kuznia, A. R. Bhattarai, and D. T. Olson, "Metal semiconductor field effect transister based on single crystal GaN", Appl. Phys. Lett. 62, pp. 1786-1788, 1993.

[13] J.-Y. Duboz, "GaN as seen by the industry", Phys. Stat. Sol. (a) 176, pp. 5-14, 1999.

[14] B. Monemar, "Ⅲ-Ⅴ nitrides —important future electronic materials", J. Mater. Sci. 10, pp. 227-254, 1999.

[15] Y. S. Park, "Current Status of Group Ⅲ-Nitride Semiconductors and Future Prospects", J. Korean Phys. Soc. 34, pp. S199-S219, 1999.