



광전소자 및 전력소자용 AlN 반도체 단결정 소재 및 응용분야

글 _ 강승민*, 인경필**
*한서대학교
**(주)세라컴

1. 서론

오늘날 지구 환경 오염 및 에너지 고갈의 문제가 대두됨에 따라 에너지 절약과 자원 절약 효과가 우수한 기술의 개발을 통해 그린에너지 기술의 시대가 도래하였다. 이런 이유로 에너지 소비 증가율을 감소시키고 환경오염의 주범인 화석연료의 사용을 억제하기 위하여 에너지 사용기기·시스템의 고효율화, 고성능 제어장치 개발을 통한 에너지 절약 방법을 필요로 하고 있다. 이를 위하여 소재 관련 연구 분야에서도 기존 사용 환경보다 더 가혹한 환경에서의 기능 안정화와 신뢰성이 우수한 새로운 소재의 개발이 요구되어지고 있다

Si 반도체는 고온에서 사용할 수 없는 방열특성 및 고밀도 절연특성의 한계 등으로 System의 초고집적화 및 초고속화 등에 따른 고밀도 발열 문제를 원천적으로 해결하기 어렵다. 또한, 보조 시스템들 간의 절연성 문제는 근본적인 초 고집적화 디바이스에 있어 방해요소로 나타나고 있어 이러한 물리적 특성의 문제를 해결하기 위해 Wide Band Gap을 갖는 새로운 특성의 반도체 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이런 차세대 반도체 소자 재료로서 GaN, SiC, ZnO, AlN 등의 Wide Band Gap 반도체 재료가 많이 연구되고 있으며, 특히 AlN 기판은 현재 GaN 박막의 기판으로 사용되는 SiC와 사파이어 기판과 비교 했을 때 작은 lattice mismatch, 높은 열전도도, GaN과 유사한 열팽창계수 등의 이점을 가지고 디바이스의 성능 및 lifetime을 크게 증가시킬 수 있다.

또한 매우 높은 band gap 에너지 값을 가지며 뛰어난 물리적 특성으로 인해 LED 및 Laser용 기판으로 AlN의 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁾ 그러나 단결정 성장 및 결정성 향상 등의 문제를 가지고 있으며, 이를 극복하기 위하여 많은 연구가 진행되어 오고 있다.²⁻¹¹⁾

또한, 직접 천이형 반도체인 GaN, AlN 화합물반도체는 발광소자로의 이용에 적합하며, 레이저 다이오드 및 발광 다이오드로 광학기에 적용된다. 레이저 다이오드는 광통신과 CD, DVD와 같은 광학기에 사용되고, 발광 다이오드는 가정용 전자기기의 리모컨과 각종 표시 소자 등에 사용되며, 최근 GaN 소재를 적용한 청색 및 백색 LED의 개발에 따라 고휘도, 고효율의 점광원 특성이 필요한 TV, 모니터 등의 디스플레이 가전 및 저소비 전력 특성과 고수명의 조명 광원으로 점진적으로 대체되어 가고 있다. 화합물반도체의 다른 특징으로는 높은 캐리어 이동도와 낮은 누설전류 특성과 낮은 유전율을 갖는 특성이 있어 휴대전화 및 위성방송수신기 등의 고주파 트랜지스터에 적용된다. 특히, GaN, AlN, InN 등과 같은 질화물들은 그 특성이 매우 우수하다. Fig. 1에 대표적인 화합물 반도체들에 대한 격자 상수와 밴드갭 에너지를 보였다. GaAs, InP는 대표적인 적색 LED 소재로 응용되며, GaP는 지금까지 다양한 색상의 LED용 소재로 적용되어 오고 있다. 밴드갭 에너지가 클수록 발광파장이 짧아지게 되고, SiC와 GaN, AlN 간의 격자 상수가 유사함을 알 수 있는데, 이것은 반도체를 만들기 위한 이종 기판 소재로 사용이 가능함을 시사하고 있다. 또한 전

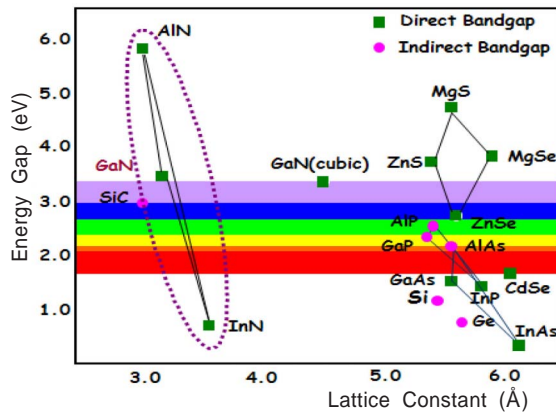


Fig. 1. 소재에 따른 발광 파장대별 분류와 각 반도체 소재들의 격자 상수 및 밴드갭 에너지.

자의 천이 형태가 직접 천이형 반도체의 발광 효율이 높아 직접 천이형이 상대적으로 좋은 효율 특성을 보인다.^{12,13)}

2. AlN의 주요 특성 및 응용분야

AlN (질화알루미늄) 단결정은 단파장 발광소자와 고온/고출력/고속 전자소자의 기관 소재로 사용이 가능한 새로운 반도체 재료이며, AlN 기관은 대부분의 기존 반도체 소재보다 높은 에너지 밴드갭, 열전도도와 고온 안정성을 보유하여 LD/LED와 같은 광전소자와 고온, 고출력 전자소자 구현이 가능하다 (Fig. 2).

특히 AlN 단결정은 상온에서 6.2 eV의 밴드갭을 갖는 직접 천이형 화합물 반도체로 GaN 및 InN와 고용체를 형성하여 UV 영역부터 IR까지 넓은 범위의 발광소자 (LD/LED) 제조에 적용되고 있다. AlN은 이론 열전도도가 알루미늄보다 10배 이상이고 전기절연성이 우수하다.

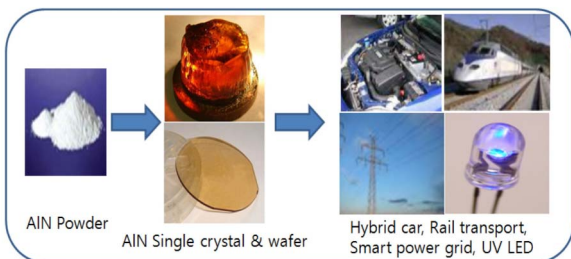


Fig. 2. AlN 단결정과 응용 분야

게다가 열팽창계수가 알루미늄보다 작고 Si 반도체와 비슷하고, 기계적 강도도 우수한 특징이 있어 고열전도 세라믹스의 반도체 기관이나 부품에 응용되고 있다.

AlN은 현재 뛰어난 열전도도 특성을 이용하여 기관 형태의 소결체로 제조하여, 반도체장치용 질화알루미늄 부품, 금속박막접착 질화알루미늄 기관, LED용 방열판, 고출력 Si 장치용 방열판, 화합물반도체용 레이저소자용 기관, 하이브리드자동차 전원제어용 기관 등에 이용되고 있다. 특히, 방열특성이 좋은 LED 구조물 등에 응용성이 높다. 오늘날 모든 에너지 소비의 40%가 전자기기에서 소모되며, 향후 30년 내에 60% 이상으로 증가 할 것으로 예상된다.

전 세계 에너지 사용량 40% 중에 50% 이상이 가정 및 산업용으로 사용될 것으로 예상되어 SiC와 GaN, AlN 단결정을 기관으로 적용한 전력소자의 사용은 수송 기기, 정보기기 등 전력 효율을 높이기 위한 용도로 그 응용 범위가 넓다. 또한, 에너지 절약의 가장 큰 부분을 담당할 수 있기 때문에 파괴전압이 높고, 유전율이 낮아서 Fig. 3에 보인 것과 같이 고전력 반도체 및 고주파 반도체로서의 응용성이 매우 크다.¹⁴⁻¹⁸⁾

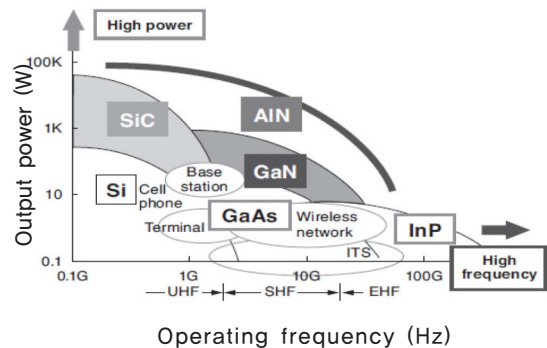


Fig. 3. 소재별 적용 가능한 주파수 대역과 출력.

한편 UV LED란 UV-A (100~280 nm), UV-B (280~315 nm), UV-C (315~400 nm) 영역의 자외선을 발광할 수 있는 LED를 통칭하며 응용 가능한 분야를 살펴보면 아래의 Fig. 4와 같다.

AlN 단결정의 응용분야를 구체적으로 정리해 보면, UV용 LED, LD 기관소재; AlN 기관 상에 GaN-AlN 소재의 AlGaN MQW를 제작하면, 기존 타 기관 사용 시 보다

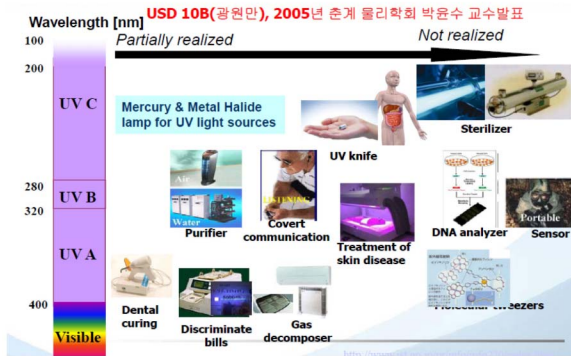


Fig. 4. 바이오조명용 LED 파장별 응용분야.

결함이 적은 에피 구조물을 얻을 수 있어서 효율이 몇 배 높아지고, 적용 가능한 분야가 매우 넓으며, 기판소재만 판매되면 기존 소자업체들의 생산은 단기간에 쉽게 가능할 것으로 예상된다. UV를 이용한 다양한 응용기기(공기정화기, 정수장치, 의료기기 등)의 개발로 인하여 관련 업계 및 의료 사업의 혁신적 활성화를 유도할 수 있으며, 인공위성 또는 우주선 등에서 대기권 밖의 풍부한 단파장 자외선을 이용한 초고효율 태양전지용 기판 소재로 응용이 가능하다. 또한 AlN 기판 소재를 기반으로 제작된 단파장 자외선 광원을 이용한 고분해능 광학현미경에 응용되며, AlGaN 또는 AlN층을 성장시켜 고전력 고주파 트랜지스터 (High power RF transistor)를 제작할 수 있다. 이는 AlN의 큰 밴드갭 특성과 매우 높은 열전도도 때문에 고전류가 소자에 흘러도 열에 의한 손실이 적다는 장점을 가지고 있어 고온에서 동작하는 고에너지 전력소자로 제작이 가능하다고 말할 수 있다. AlN 단결정 기판은 낮은 유전률을 갖기 때문에 SAW (Surface Acoustic Waveguide) 필터로도 이용할 수 있는데 특히 고주파 대역에서 좋은 특성을 보인다. 기존 AlN SAW 필터제품은 다결정 박막형태로 만들어져 이용되고 있으나 단결정 기판이 상용화되면 고효율 필터 소자가 가능할 것으로 예상된다.^{19, 22)}

AlN 단결정에 대한 응용성 전망에 관해서는 앞으로 지속적으로 금속유기 화학증착 (MOCVD, Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 기술과 장비의 발달이 진행되면 이중기판을 이용한 증착 기술이 대단히 발달되기

때문에 AlN 기판이 모든 화합물 반도체의 기판으로 사용될 수 있는 가능성을 조심스럽게 논하고 있다.

Fig. 5에 AlN 벌크 단결정 기판의 응용분야를 종합하여 보았다. AlN 단결정 기판의 주요 응용분야별 전망을 보면 AlN 단결정 기판은 현재 생산 초기 상태에 있고 일부가 UV 레이저 다이오드용으로 사용되고 있으나 아직 개발이 필요한 상태이며 주로 일본 및 미국업체들에 의해 이끌어져 가고 있다. 이러한 시장은 추후 UV 소자 산업이 지속적으로 증가하고 UV를 이용한 다양한 응용제품 (공기정화기, 정수 및 정화장치, 의료용 살균기 및 치료기기, 초고효율 태양전지, Deep UV 광원을 이용한 현미경 및 분석기기 등)이 지속적으로 상용화되면 수요가 기하급수적으로 증가할 것이라고 전망하고 있다.

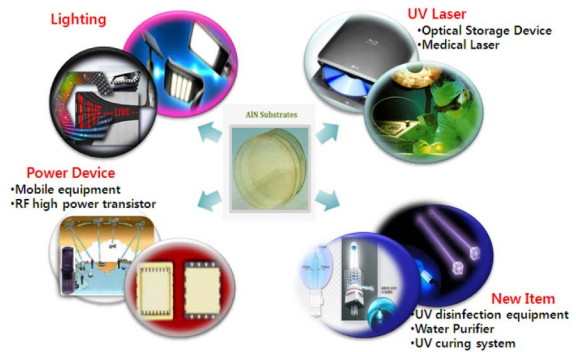


Fig. 5. Bulk AlN 기판의 응용분야.

전력기기 및 소자 분야 (Power Devices and Electronics)에서의 주요한 시장요인은 고전력 고주파 트랜지스터 (High power RF transistor)로서 최근 전기자동차 및 전력 송수신 기기에 적용될 수 있기 때문에 발전이 예상되고 있다. 자외선 LED는 발광 파장에 따라 자외선 A 영역 (315~400 nm)은 주로 산업용 경화기, 위폐감별기 등에 사용되며, 자외선 B 영역 (280~315 nm)은 의료/바이오 분야에서의 치료기 및 분석기기, 비타민 D 합성 등에 주로 이용된다. 또한 자외선 C 영역 (280~200 nm)은 살균/정화/정수 등 환경 분야에서 집중하고 있는 분야로서 지금까지 알려진 소재 중 AlN 소재만이 그 특성을 가지고 있는 유일한 소재라 할 수 있다. 향후 인류의 숙제는 물의 이용을 얼마나 잘 할 수 있는가에 달려있을 정도로 물



의 부족현상이 우려되고 있는 실정에 있기 때문에, 정수 시장에서의 자외선 소자의 적용 가능성은 엄청난 파급효과가 있다고 전망하고 있다.

현재 우리나라 LED 산업은 가시광 LED를 중심으로 한 백색 LED 산업이 주를 이루고 있으나, 파장영역이 200~400 nm에 해당하는 자외선 LED 광원 제조기술 및 응용기술에 대한 개발 및 연구가 서서히 시작되고 관심이 높아지고 있는 실정으로 외국에 비해서 많이 부족한 상태에 있다. Yole Development사가 전망한 것처럼 2015년 자외선 LED 광원 시장이 약 6500억 원, 2020년에 약 3조 6천억 원 수준으로 상승 발전하게 되면 자외선 C 광원 및 응용 기기 시장은 폭발적으로 성장 할 것으로 예측되고 있다. 또한 기존 mercury UV 램프를 대신할 낮은 소비전력, 장수명화의 "에코"조명으로 AlN wafer를 사용한 UV LED가 폭발적으로 확대되고 있으며, 조명용 LED의 고성능화와 같이 자외선 (UV) 영역의 LED도 고효율화, 고출력화가 진전되고 이의 산업이용도 확산되는 추세에 있어 2016년 자외선램프를 대체할 수 있는 시장이 전체 28.1%를 차지할 것으로 전망하고 있다 (Fig. 6).

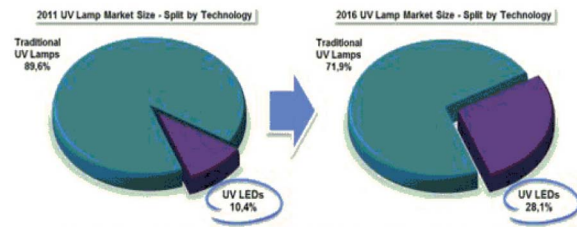


Fig. 6. 전통적인 자외선램프와 LED를 비교한 시장 점유율(M\$). (2011년과 2016년 대비). (http://www.semiconductor-today.com/news_items/2012/MAR/YOLE_290312.html)

3. AlN 연구개발동향

현재까지 화합물 반도체의 개발 방향에서 보면 모든 범위의 파장을 포함하는 고효율 LED, LD 특성을 구현하기 위하여 Bulk AlN 단결정이 필요하다는 인식에 관심이 모아지고 있으나, 많은 응용 및 잠재시장이 있음에도 불구하고 현재 UV LED 광원으로 Bulk AlN 단결정

기판이 아직 상용화되지 않고 있다. AlN계 물질을 소스로 사용함에 따른 고품질 박막성장 기술상의 문제점, 소자제작 공정기술 미개발 및 자외선 LED용 패키지 소재의 미개발 등으로 인한 자외선 LED 소자의 낮은 광출력으로 인하여 시장진입에 어려움이 있다.

자외선 영역의 발광소자 (LED, LD)는 기존 Sapphire, GaN, SiC 기판에 제작하는 것보다 AlN 단결정 기판 상에서 가장 높은 효율이 달성될 뿐만 아니라 AlN 기판은 높은 열 전도율, 광투과율 측면에서 가장 우수한 기판 소재로 예상하고 있다.¹⁸⁻²⁰⁾

Fig. 7은 이에 대한 비교 사진을 보였다. AlGaIn 등의 활성층과의 완벽한 격자정합으로 내부 양자효율도 증가하는 결과를 보인 것으로, Fig. 1에 보인 격자상수의 크기 비교에서 사파이어와 AlN 기판을 사용했을 때 그 위에 성장되는 박막의 상태는 많은 차이를 보이고 있다. 이는 기판의 격자상수 차이로 인해 박막에 결함이 생기게 되기 때문이며, 이 결함의 차이는 Fig. 7의 우측 PL (Photo Luminescence) 측정 결과로부터 소자 LED의 발광 성능에 직접적으로 작용한다는 것을 알 수 있다.

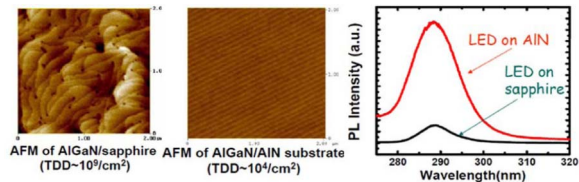


Fig. 7. 기존 사파이어기판과 AlN 기판 상에 제조된 AlGaIn 박막의 표면 AFM (Atomic Force Microscope) 사진과 PL (Photo Luminescence) 결과²²⁾(결함밀도가 ~10⁵배 감소하며, 효율 향상).

현재 AlN 단결정 기판의 개발 기술은 LED, LD 소자의 세계 시장 점유율 증대를 위한 기반 기술로서 향후 반도체 시장의 판도를 바꿀 수 있는 핵심 기술이다. 따라서 고품질 AlN 결정 관련 핵심기술 개발을 통해 세계 UV LED, LD 시장에서 국내기업의 시장점유율이 증대함에 따라 해외시장에서 경쟁력을 보유할 수 있다고 전망된다. 또한 원천특허를 보유하고 있는 대표 기업들이 서로 간의 특허제휴 (cross licence)를 통하여 세계시장을 점유하고 있어 원천특허를 보유하지 못한 국내 기업들은 세



계시장에 진입하기에 많은 어려움이 많기 때문에 고품질 저결함 AlN 결정 개발을 통한 원천특허 및 기술 확보가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

또한 이를 위해서는 단결정 성장용, 반도체, LED 및 태양광 소재 용 초고순도 SiC, AlN, GaN 등의 비산화물계 세라믹 분말이 필수적으로 요구되고 있으나, 전 세계적으로 몇몇의 선진국 회사만이 기술을 독점하고 있는 상황에서 미래 거대시장을 선점하기 위하여 기초 원료 소재의 국내 상용화 개발도 필수불가결하다. 이러한 기술적인 한계를 극복하기 위해서는 원천기술 확보 차원, 조명용 및 다양한 응용 가능성이 높은 고품질 저결함 AlN 단결정 기술 개발에 많은 투자 및 지원이 요구되는 실정이다.

현재 국내에서는 작년부턴 정부의 지원으로 AlN 단결정을 개발하는 과정이 진행 중에 있다. Fig. 8에 세라컴과 한서대 등에서 자체 개발한 AlN 단결정 성장 장비의 사진과 개발 중인 AlN 단결정 사진, DCXRD (Double Crystal X-ray Diffractometry) rocking curve 측정 결과를 보였다. 결정의 종자 결정은 SiC 단결정을 종자 결정으로 사용하지 않고, 임의로 성장된 핵으로부터 연속적으로 성장시켜 단결정을 성장시켰다.

현재 선진업체인 Crystal IS, Fairfield Technology, Hexatech 등은 정부과제인 DARPA (Mid-UV Technology Program), NSF (A Novel Approach for Production of Free standing GaN Wafers for III-Nitride Light Emitters and Detectors) 과제들을 수행하였으며, 일본의 경우 "The high efficiency photoelectric conversion compound semi-

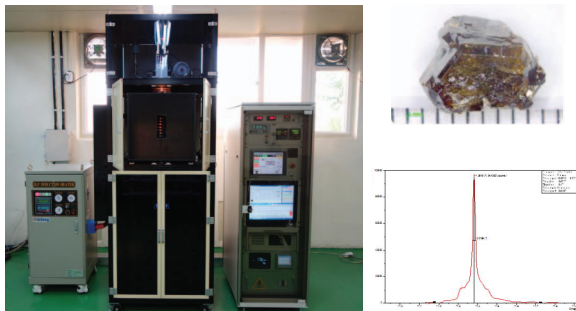


Fig. 8. 한서대와 세라컴에서 자체개발한 AlN 단결정 성장 장비 사진과 개발 중인 AlN 단결정 사진. (FWHM = 60.84arcsec)

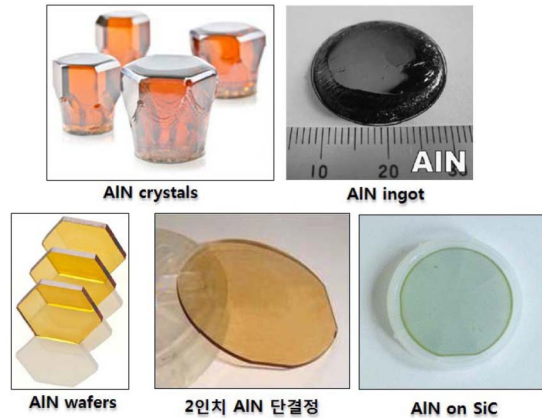


Fig. 9. 해외 선진업체들의 Bulk AlN과 연마된 AlN 기판.

conductor development project" "Development of semiconductor for high efficiency UV light-emitting devices" 등의 산학연 R&D project를 진행 중에 있어 국가 차원의 지원이 적극적으로 이루어지고 있다.

AlN 단결정 성장방법은 PVT (Sublimation)법, Solution growth법, Flux법 등에 의한 bulk 단결정 성장, HVPE법에 의한 에피막 성장방법이 연구되고 있고, Crystal IS Inc.(미), Fairfield Crystal Technology(미), Hexatech(미), DOWA(일), Nitride Crystal Inc.(미) 등에서 2 inch AlN wafer 상용화를 시작하고 있는 단계에 있다. Fig. 9에 AlN 단결정의 세계적인 현황 및 상태를 보였다.²³⁻²⁶⁾ 현재 사용가능한 AlN 기판 소재는 벌크로 된 소재와 사파이어와 SiC에 AlN을 에피한 기판 (epiwafer) 두 종류가 있는데 이에 대한 판매 가격을 Table 1에 보였다. 벌크 AlN의 경우 생산하고 있는 회사는 Fox Group, Nitride-crystals Group, Crystal IS, Hexatech, Fairfield Crystal 등이

Table 1. 해외 AlN 관련 기판 제조사 및 AlN 기판의 판매가격

	AlN/Sapphire epiwafer 2"	AlN/SiC epiwafer 2"	Bulk AlN 1cm ²	Bulk AlN 2"
Useable area (Single-crystal)	>80%	>80%	~90%	50%
Dislocation Density	~ 10 ⁹ /cm ²	~ 10 ⁹ /cm ²	< 10 ⁴ /cm ²	< 10 ⁵ /cm ²
Market price very small lot size	\$400~\$700	N-type : \$600~\$900 SI : \$1,500~2,500	~ \$2,000	> \$5,000
Suppliers	TDI, Hitachi cable.	TDI, Hitachi cable.	Fox Group, Nitride-crystals group, Crystal IS, Hexatech, Fairfield Crystal	



있으며 판매 가격이 작은 것은 1cm² 당 약 US \$2,000 정도이며 큰 규격의 2인치의 경우 US \$5,000 이상 정도의 고가격이 형성되고 있다.

에피텍셜한 기판 혹은 템플레이트 (epiwafer or template)의 경우 TDI와 Hitachi cable이 있으며 2인치 기준 AlN/사파이어가 약 US \$400~700 정도이며, AlN/SiC 2인치의 경우 N-type이 약 US \$600~900 정도이며, SI의 경우 약 US \$1,500~2,500 정도로 시판 되고 있는 것으로 알려져 있다. 현재 AlN 기판을 수요하는 기업으로는 Nitride Semiconductors(미), Seoul Optodevice(한), SEMI-LEDS(대만) 등에서 AlN wafer를 사용하여 UV-LED module을 개발 또는 생산판매하고 있다. 국내의 Seoul Optodevice는 GaN계 자외선 LED의 개발 이후 소량 판매 중인 것으로 알려져 있으며, AlN 단결정 기판을 이용한 자외선 LED는 개발 중에 있다.

한편, 정부가 내년부터 대규모 전력반도체 국산화 프로젝트를 추진하는 이유는 지난해 9월에 일어난 정전 사태 제발을 막고 전기차 충전소, 대용량 에너지 저장 시스템 (ESS) 등 새로운 녹색성장 동력을 키우는 핵심 부품 산업이라는 판단때문이다. 전력반도체는 자동차 전장 및 '저전력'화 추세에서 갈수록 중요해진다는 점에서 대규모 국책 과제는 든든한 지원군이 될 것으로 기대되고 있다.

4. 결론

현재까지 사파이어 기판을 이용하여 GaN 계의 청색 및 백색 발광소자의 개발이 지속적으로 이루어지고 있는 가운데, GaN의 벌크 단결정 기판에 대한 절대적인 필요성이 강조되고 있다. 이와 함께 AlN 단결정 기판도 아직 상용화가 되지는 않았지만, 개발 및 상용화의 필요성이 매우 증대되고 있는 실정이기 때문에 AlN 단결정 기판의 응용성 및 필요성에 대하여 결론적으로 정리해 보고자 한다.

1) 자외선 영역의 발광소자 (LED, LD)는 기존 Sapphire, GaN, SiC 기판에 제작하는 것보다 AlN 단결정 기판 상에서 가장 높은 효율이 달성될 뿐 아니라 AlN 기판은 높은 열 전도율, 광투과율 측면에서 가장 우수한 기판 소재

로 예상되고 있으며, AlGaIn 등의 활성층과의 완벽한 격자정합으로 내부 양자효율도 증가하기 때문에 고효율 발광소자의 제작이 가능하다. 따라서 AlN 벌크 단결정 기판의 상용화 시 고효율 LED, LD의 급속한 보급으로 거대한 LED 조명시장 진출 및 새로운 조명용 발광 소자의 시장을 창출할 수 있다.

2) 소재의 기술적인 측면에서 보면 AlN 벌크 단결정 기판을 적용하게 되면 격자정수가 상호 유사하므로, 이중 박막성장 공정을 이용하지만 동종박막성장 (homo epitaxy)에 준하기 때문에 열팽창 mismatch 문제가 근본적으로 해결되며 자연적으로 높은 열전도도와 높은 UV 투과성의 장점을 가진 다양한 디바이스 구현이 가능해진다.

3) AlN UV LED는 100 nm ~ 400 nm 대역의 파장을 갖는, 의료/바이오/환경/지능형 농수산업/국방산업 등 미래형 산업을 위한 광원으로, 현재 일반 자외선 광원은 인체에 유해한 수은 (Hg)이나 Xe 등의 특수한 gas를 이용하여 고비용 저효율의 광원을 사용하고 있지만, 이를 고효율 AlN UV LED로 대체할 경우 매우 다양한 분야에 적용 가능한 장점이 있다. 따라서, 고효율 UV LED 발광 소자는 태양광 발전 및 전지 기술의 실현을 촉진하며, 최근 정보통신, 디지털 가전, 교통, 자동차, 의료, 조명산업 등으로 응용분야가 급속히 확대됨에 따라 21세기 생활혁명을 주도하며 LED 사회로의 전환을 촉진할 수 있을 것으로 전망한다.

4) AlN의 큰 밴드갭 에너지 특성과 높은 열전도도 특성으로 고에너지 및 고전력을 다루는 전력 소자의 제조가 가능하기 때문에 최근 에너지 절감 및 대체 에너지 개발의 국면에서 발생된 적력 소자의 고효율화에 의한 에너지 절감 및 기존 전력 소자를 대체할 수 있는 저렴하고 성능 좋은 전력 소자의 개발이 가능하다.

5) 승화법, HVPE법에 의해 Bulk AlN 개발 시 동 기술에 의한 고품질의 다양한 기판 개발이 연계선 상에서 이루어질 수 있을 것으로 전망되며, 특히 AlN 단결정 기판을 개발, 생산하기 위해서는 원료물질, 공정장비, 가공 기술 및 장비 등이 포함되는 밸류 체인 산업의 동반 발전을 유도할 수 있는 원천기술이 된다.



참고문헌

1. S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto, and H. Kiyoku, "InGaN-Based Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes," *J. Appl. Phys. Lett.*, **70** 14-17 (1997).
2. R. Schlessler and Z. Sitar, "Growth of Bulk AlN Crystals by Vaporization of Aluminum in a Nitrogen Atmosphere," *J. Cryst. Growth*, **234** [2-3] 349-53 (2002).
3. R. Schlessler, R. Calmau, R. Yakimova, and Z. Sitar, "Hot Electron Transport in AlN," *Mat. Res. Symp. Proc.*, **693** 1941 (2001).
4. J. C. Rojo, G. A. Slack, K. Morgan, L. J. Schowalter, and M. Dudley, "AlN Bulk Crystal Growth by Physical Vapor Transport-Springer Handbook of Crystal Growth," *Mat. Res. Symp. Proc.*, **639** G1.10.1 (2001).
5. J. C. Rojo, G. A. Slack, K. Morgan, B. Raghathamachar, M. Dudley, and L. J. Schowalter, "Single Crystal Aluminum Nitride Substrate Preparation from Bulk Crystals," *J. Cryst. Growth*, **231** 317 (2001).
6. G. A. Slack, J. Whitlock, K. Morgana, and L. J. Schowalter, "Properties of Crucible Materials for Bulk Growth of AlN," *Mat. Res. Symp. Proc.*, **798** 293-96 (2004).
7. G. A. Slack and T. F. McNelly, "Aluminum Nitride Crystal Growth," *J. Cryst. Growth*, **34** 263 (1976).
8. G. A. Slack and T. F. McNelly, "Aluminum Nitride Crystal Growth," *J. Cryst. Growth*, **42** 560 (1977).
9. B. M. Epelbaum, C. Seitz, A. Magerl, M. Bickermann, and A. Winnacker, "Natural Growth Habit of Bulk AlN Crystals," *J. Cryst. Growth*, **265** [3-4] 577-81 (2004).
10. S. M. Kang, "Growth of AlN Crystals by the Sublimation Process," *J. Kor. Crystal Growth Crystal Tech.*, **18** 68 (2008).
11. S. M. Kang, "Morphological Study on Non-seeded Grown AlN Single Crystals," *J. Kor. Crystal Growth Crystal Tech.*, **22** [6] 265-68 (2012).
12. D. J. Zhuang, *Wet Etching Studies of AlN Bulk Crystals and Their Sublimation Growth by Micro Waves (in English)*, Kansas State University, 2004.
13. K. B. Nam, M. L. Nakarmi, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, "Optical Properties of the Nitrogen Vacancy in AlN Epilayers," *Appl. Phys. Lett.*, **84** [7] (2004).
14. B. Raghathamachar, R. Dalmau, B. Moody, S. Craft, R. Schlessler, J. Xie, R. Collazo, M. Dudley, and Z. Sitar, "Low Defect Density Bulk AlN Substrates for High Performance Electronics and Optoelectronics," *Mater. Sci. Forum*, **717-720** 1287-90 (2012).
15. K. A. Aissa, A. Achour, J. Camus, L. L. Brizoual, P. Y. Jouan, and M. A. Djouadi "Comparison of the Structural Properties and Residual Stress of AlN Films Deposited by Dc Magnetron Sputtering and High Power Impulse Magnetron Sputtering at Different Working Pressures," *Thin Solid Films*, **550** 264-67 (2014).
16. X. Meng, C. Yang, and J. Yang, "Structure and Electrical Properties of AlN Films Prepared on PZT Layers with Different Orientations," *J. Cryst. Growth*, **386** 57-61 (2014).
17. D. Godwinraj, H. Pardeshi, S. K. Pati, N. Mohankumar, and C. K. Sarkar, "Polarization Based Charge Density Drain Current and Small-signal Model for Nano-scale AlInGaN/AlN/GaN HEMT Devices," *Superlattices Microstruct.*, **54** 188-203 (2013).
18. S. B. Sudip and K. Mazumder, "Atomistic and Electrical Simulations of a GaN-AlN-(4H)SiC Heterostructure Optically-triggered Vertical Power Semiconductor Device," *Solid-State Electron.* **62** [1] 5-13 (2011).
19. Y. Kumagai, Y. Kubota, T. Nagashima, T. Kinoshita, R. Dalmau, R. Schlessler, B. Moody, J. Xie, H. Murakami, A. Koukitu, and Z. Sitar, "Preparation of a Freestanding AlN Substrate from a Thick AlN Layer Grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy on a Bulk AlN Substrate Prepared by Physical Vapor Transport," *Appl. Phys. Express*, **5** [5] 055504-3 (2012).
20. M. Tanaka, S. N. akahata, K. Sogabe, H. Nakata, and M. Tobioka, "Morphology and X-Ray Diffraction Peak Widths of Aluminum Nitride Single Crystals Prepared by the Sublimation Method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** L1062 (1997).
21. S. Y. Karpov, D. V. Zimina, Y. N. Makarov, E. N. Mokhov, A. D. Roenkov, M. G. Ramm, and Y. A. Vodakov, "Sublimation Growth of AlN in Vacuum and in a Gas Atmosphere," *Phys. Status Sol(a)*, **176** [1] 435-38 (1999).
22. R. Dalmau, B. Moody, R. Schlessler, S. Mita, J. Xie, M. Feneberg, B. Neuschl, K. Thonke, R. Collazo, A. Rice, J. Tweedie, and Z. Sitar, "Growth and Characterization of AlN and AlGaIn Epitaxial Films on AlN Single Crystal Substrates," *ECS Trans.*, **33** [13] 43-54 (2010).
23. T. Yu. Chemekova, O. V. Avdeev, I. S. Barash, E. N. Mokhov, S. S. Nagalyuk, A. D. Roenkov, A. S. Segal, Yu. N. Makarov, M. G. Ramm, S. Davis, G. Huminic, and H. Helava, "Sublimation Growth of 2 Inch Diameter Bulk AlN Crystals," *Phys. Status Solidi*, **5** [6] 1612-14 (2008).
24. H. Helava, S. J. Davis, G. D. Huminic, M. G. Ramm, O. V. Avdeev, I. S. Barash, T. Yu. Chemekova, E. N. Mokhov, S. S. Nagalyuk, A. D. Roenkov, A. S. Segal, Yu. A.



Vodakov, and Yu. N. Makarov, "Growth of Bulk Aluminum Nitride Crystals," *Phys. Status Solidi*, **4** [7] 2281-84 (2007).

25. M. Kazan, R. Nader, E. Moussaed, and P. Masri, "What Causes Rough Surface in AlN Crystal Growth?," *J. Cryst. Growth*, **290** [1] 44-49 (2006).

26. P. Lu, J. H. Edgar, R. G. Lee, and J. Chaudhuri, "Nucleation of AlN on SiC Substrates by Seeded Sublimation Growth," *J. Cryst. Growth*, **300** [2] 336-42 (2007).

●● 강승민



- 1998년 한서대학교 신소재공학과 전임강사
- 2011년 현재한서대학교 신소재공학과 교수

●● 인경필



- 2011년 현재 (주)세라컴 단결정 개발팀