

Enhanced Photoluminescence of CsPbBr₃ via Improved Optical Transparency of Thermally Treated GaN Nanowires

Kwang Jae Lee¹, Jungwook Min^{2,*} 

¹ Department of Carbon Neutrality, Soonchunhyang (SCH) University, Asan 31528, Korea

² Department of Integrative Engineering, Myongji University, Yongin 17058, Korea

열처리된 GaN 나노와이어의 광투과 특성 향상을 통한 CsPbBr₃의 발광 특성 향상

이광재¹, 민정욱^{2,*} 

¹ 순천향대학교 탄소중립학과

² 명지대학교 융합에너지학전공

✉ Corresponding author(s): jwmin@mju.ac.kr (J. Min)

Cite as J. Electr. Electron. Mater., 39(3), 272–280 (2026), DOI: <https://doi.org/10.4313/JEEM.2026.39.3.6>

Received April 15, 2026; Revised April 26, 2026; Accepted April 27, 2026

ABSTRACT: GaN nanowire (NW)-based hybrid structures have attracted attention for optoelectronic applications due to their high surface area and efficient carrier transport. However, the optical transparency of GaN NWs is often limited by unintended residual species accumulated on the surface and in the inter-wire regions, as well as defect-related absorption, leading to reduced light transmission. In this work, we demonstrate that thermal annealing significantly improves the optical transparency of GaN NWs grown on indium tin oxide (ITO)/glass substrates. The transmittance increased from 47.9% to 78.5% at 550 nm after rapid thermal annealing at 800°C for 3 min, while a comparable value (~75.5%) was achieved at 600°C for 5 min. CsPbBr₃ was deposited onto the GaN NWs to form hybrid structures, and temperature-dependent photoluminescence (TDPL) measurements revealed enhanced emission stability with suppressed peak shift and reduced spectral broadening. Arrhenius analysis based on a two-channel model revealed that the activation energy of the dominant non-radiative recombination pathway increased from 62 meV in the as-grown sample to 85 meV after thermal annealing, while its relative contribution remained nearly unchanged. In contrast, the shallow trap-assisted pathway exhibited a similar activation energy of approximately 6 meV in both samples, but its contribution decreased from 0.35 to 0.17 after annealing. As a result, the internal quantum efficiency (IQE) improved from 75.9% to 87.4%. These results show that thermal annealing improves optical transparency by removing residuals and suppresses defect-related recombination, leading to enhanced carrier dynamics and improved optical performance of CsPbBr₃-based hybrid structures.

KEYWORDS: GaN nanowire, Thermal annealing, Optical transparency, Electron transport layer, Photoluminescence

1 서론

GaN 나노와이어(nanowire, NW)는 넓은 밴드갭, 우수한 결정성, 그리고 높은 열적 및 화학적 안정성을 기반으로 발광소자, 광검출기, 태양전지 등 다양한 광전자 소자에 적용 가능한 구조로 연구되고 있다 [1,2]. 특히 NW 구조는 3차원 형상과 높은 비표면적을 통해 광흡수 및 전하 수송 특성을 향상시킬 수 있으며, 다양한 기판 위에서 이종 집적이 가능하다는 점에서 응용 가능성이 크다 [3]. GaN NWs는 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy, MBE)와 같은 물리증착법을 통해 구현될 수 있으며, 핵 생성 및 수직 성장 메커니즘이 비교적 잘 이해되어 있어 구조 제어가 용이하다 [4,5]. 이러한 특성은 균일한 나노와이어 형성과 재현성 있는 공정 구현에 유리하며, 광전자 소자 적용을 위한 기반 구조로 활용될 수 있다 [6].

그러나 성장된 GaN NWs는 성장 이후 표면 및 계면에 잔류하는 불순물과 결합 상태로 인해 광학적 특성 저하를 나타낼 수 있다. 특히 NWs 표면과 NW 사이 공간에 축적된 비의도성 성분은 시편의 흑화를 유발하며, 가시광 영역에서의 광투과도를 감소시키는 주요 요인으로 작용한다 [7]. 이러한 광학적 열화는 단순한 구조적 산란 효과와 구별되며, 실제 광흡수 증가와 광 손실로 이어진다. 또한, 이러한 결합 상태는 흡수단 부근에서 Urbach tail로 나타나는 비이상적 광학 거동을 유도하며, 이는 구조적 무질서와 국소화된 에너지 상태의 존재를 반영한다 [8]. 결과적으로, 이러한 특성은 광전 소자에서 입사광의 전달을 저해하고, 활성층에서의 광흡수 및 발광 효율을 제한하는 요인으로 작용한다. 따라서 GaN NWs를 광전자 소자에 적용하기 위해서는 성장 이후 잔류하는 불순물 및 결합 상태를 제어하고, 광투과 특성을 개선하는 공정이 필요하다. 열처리 공정은 표면에 축적된 비의도성 성분을 제거하고 구조적 결함을 완화하는 방법으로 활용될 수 있으나, 열처리 조건에 따른 광학적 특성 변화와 그 영향에 대한 정량적 분석은 충분히 이루어지지 않았다.

한편, 최근에는 할라이드 페로브스카이트의 우수한 광학적 특성을 유지하면서도, 전하 수송 및 장기 안정성을 개선하기 위한 다양한 하이브리드 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [9,10]. 특히, GaN 기반 소재는 우수한 화학적 안정성, 높은 열적 안정성, 그리고 뛰어난 전자 이동도를 동시에 가지는 반도체로서, CsPbBr₃와 같은 페로브스카이트와 결합된 구조에서 전자수송층(electron transport layer, ETL)으로 활용 가능성이 제시되고 있다 [9-11]. 이와 같은 접근은 단순한 나노와이어 구조뿐만 아니라 벌크 GaN, 박막, 및 다양한 나노구조 형태를 포함하여 확장되고 있으며, 특히 GaN NWs

구조는 높은 비표면적과 3차원 계면 형성을 통해 페로브스카이트와의 접촉 면적을 극대화할 수 있다는 점에서 주목받고 있다 [10,11]. 이러한 구조적 특징은 전하 분리 및 추출 효율을 향상시키고, 비방사 재결합을 억제하는 데 유리한 조건을 제공한다.

본 연구에서는 MBE를 이용하여 성장된 GaN NWs에 대해 급속 열처리(rapid thermal annealing, RTA) 공정을 적용하고, 열처리 온도 및 시간에 따른 광투과 특성 변화를 정성적 및 정량적으로 분석하였다. 또한, 최적화된 열처리 조건을 적용한 GaN NWs를 ETL로 활용하고, 그 위에 CsPbBr₃를 스핀코팅하여 하이브리드 구조를 형성하였다. 이를 기반으로 온도 의존성 광발광(temperature-dependent photoluminescence, TDPL) 특성, Arrhenius 분석, 그리고 내부양자효율(internal quantum efficiency, IQE)을 평가함으로써, 열처리에 따른 GaN 나노와이어의 광학적 개선이 활성층의 발광 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 열처리를 통해 GaN 나노와이어의 광투과 특성과 결합 상태를 동시에 개선하고, 이를 ETL로 활용하여 CsPbBr₃ 활성층의 발광 특성, 열적 안정성, 그리고 내부양자효율 향상을 구현하였다. 이러한 결과는 NW 구조의 광학적 한계를 공정적으로 제어하고, 이를 실제 광전 소자 성능 향상으로 연결할 수 있음을 보여준다.

2 실험 방법

2.1 ITO/glass 기판 열처리 공정

본 연구에 사용된 ITO 박막은 RF 마그네트론 스퍼터링(RF magnetron sputtering) 기법을 이용하여 fused silica (glass) 기판 위에 직접 증착되었다. 증착 공정에 앞서, 기판은 아세톤과 이소프로필 알코올을 이용한 표준 용매 세정 과정을 통해 불순물을 제거하였다. ITO 박막은 상온에서 아르곤 플라즈마를 이용하여 약 100 nm 두께로 증착되었으며, 이때 인가된 RF 파워는 60 W, 챔버 압력은 2.5 mTorr, 아르곤 가스 유량은 25 sccm으로 유지하였다.

증착이 완료된 2인치 크기의 ITO/glass 기판은 이후 GaN NWs 성장을 위해 1/4 크기로 절단되었다. 절단된 기판은 스퍼터링으로 형성된 ITO 층의 결정성을 향상시키기 위해 RTA 공정을 적용하였다. 열처리는 RTA 시스템 내에서 산소 분위기 하에 650°C까지 가열하여 수행되었다. 이때 승온 속도는 20°C/초로 설정하였으며, 해당 온도에서 5분 동안 유지한 후, 시편은 챔버 내에서 자연 냉각되었다.

2.2 MBE 공정

Si이 도핑된 *n*-형 GaN NWs는 ITO/glass 기판 위에 MBE 시스템을 이용하여 성장되었다. 챔버 장입 전, 기판은 표준 용매 세정 기법을 통해 불순물을 제거하였다. 이후 기판을 챔버에 장입하고, 표면의 수분 및 잔류 오염 물질을 제거하기 위해 로드락 챔버와 준비 챔버에서 각각 200°C 및 650°C로 열 세정을 수행하였다. GaN NWs 성장을 촉진하기 위해, 우선 기판 온도를 500°C로 설정하여 30분 동안 *n*-형 GaN 젖음층(wetting layer)을 형성하였다. Wetting layer 성장 이후, 기판 온도를 750°C로 승온하여 2시간 동안 본격적인 *n*-형 GaN NWs 성장을 진행하였다. 이때 모든 기판 온도는 열전대를 이용하여 정밀하게 측정되었다. 질소 공급원으로는 질소 플라즈마를 사용하였으며, Ga 소스의 빔 등가 압력(beam equivalent pressure, BEP)은 1.0×10^{-7} Torr로 유지하였다. 또한, *n*-형 도핑을 위한 Si 도펀트 셀의 온도는 1,180°C로 고정하여 진행하였다.

2.3 GaN NWs 후열처리 공정

GaN NWs의 광학적 특성 개선을 위해 RTA 공정을 적용하였다. 열처리하는 RTA 장비를 이용하여 산소 분위기 하에서 수행되었으며, 챔버 내 가스 유량은 100 sccm으로 유지하였다. 시편은 20°C/초의 승온 속도로 600~800°C의 목표 온도까지 가열한 후, 각 조건에 따라 해당 온도에서 1~10분 동안 유지하였다. 이후 열처리가 완료된 시편은 챔버 내에서 자연 냉각되었다. 본 공정은 NWs 표면 및 NW 사이에 잔류하는 비의도성 성분을 제거하고, 표면 상태 및 계면 특성을 개선하기 위해 적용되었다.

2.4 CsPbBr₃ 제조 및 스핀 코팅

CsPbBr₃ 전구체 용액은 CsBr과 PbBr₂를 dimethylformamide (DMF)와 dimethyl sulfoxide (DMSO)의 혼합 용매에 용해하여 0.5 M 농도로 제조하였다. 전구체는 실온에서 30분 동안 교반하여 완전히 용해시켰으며, 용액의 균일성을 확보하기 위해 0.45 μ m syringe filter를 이용하여 여과하였다. 준비된 용액은 GaN NWs가 형성된 기판 위에 약 50 μ L를 drop casting 한 후, 3,000 rpm에서 30초 동안 스핀 코팅하여 나노와이어 표면 및 나노와이어 사이 공간에 균일하게 분포되도록 하였다. 이후 시편은 핫 플레이트 상에서 100°C에서 60초 동안 열처리를 수행하여 용매를 제거하고 CsPbBr₃ 결정화를 유도

하였다. 이 과정에서 전구체 용액은 나노와이어 사이 공간으로 침투하여 다결정(polycrystalline) CsPbBr₃ 박막을 형성하였다 [12].

2.5 PL 특성 분석

PL 특성은 325 nm He-Cd 레이저를 광원으로 사용하여 측정하였다. 레이저는 시편에 수직으로 조사되었으며, 여기 출력(excitation power)은 약 1.0 mW로 유지하였다. TDPL 측정은 폐순환 헬륨(closed-cycle He) 크라이오스탯(cryostat)을 이용하여 수행하였으며, 측정 온도 범위는 10 K에서 300 K까지로 설정하였다. 온도 제어를 이용하여 정밀도와 온도 안정성을 제어하였다. 각 온도 조건에서 PL 스펙트럼은 동일한 excitation power 및 광학 정렬(optical alignment) 조건에서 측정하여 데이터의 신뢰성을 확보하였다. 수집된 PL 강도(intensity)는 온도에 따른 열적 소광(quenching) 거동을 분석하기 위해 Arrhenius 식을 이용하여 피팅하였다. IQE는 저온(10 K)과 상온(300 K)에서의 PL intensity 비를 이용하여 계산하였다.

3 결과 및 고찰

3.1 GaN NWs 성장

우선 GaN NWs 성장을 위해 ITO/glass 기판에 대해 열처리를 수행하여 기판의 결정성을 개선하였다. 그림 1(a)에 나타난 바와 같이, 열처리 전 ITO 표면은 뚜렷한 결정립이 관찰되지 않는 비교적 평탄한 형태를 보인다. 반면, 그림 1(b)와 같이 열처리 후에는 결정화가 진행되며 명확한 결정립 구조가 형성된 것을 확인할 수 있다. 열처리된 ITO 표면의 평균 결정립 크기는 약 270 ± 89 nm로 나타났다. 이와 같은 기판 표면의 결정화는 이후 GaN 나노와이어의 핵 생성 및 성장 거동에 유리한 기판 조건을 제공한다. 그림 1(c)는 열처리된 ITO/glass 기판 위에 MBE를 이용하여 성장된 GaN NWs의 SEM 이미지를 나타낸 것이다. GaN NWs는 750°C에서 2시간 동안 성장되었으며, 성장 초기 wetting layer 형성 이후 나노와이어가 형성되었다. 성장된 나노와이어는 평균 직경 약 80 nm, 높이 약 300 nm의 균일한 형상을 나타내며, 기판 전반에 걸쳐 비교적 균일한 분포를 보인다. 또한, 나노와이어 구조는 기판과 수직 방향으로 성장하는 경향을 나타내며, 이는 MBE 공정에서의 자가 조립(self-assembled) 성장 특성을 반영한다.

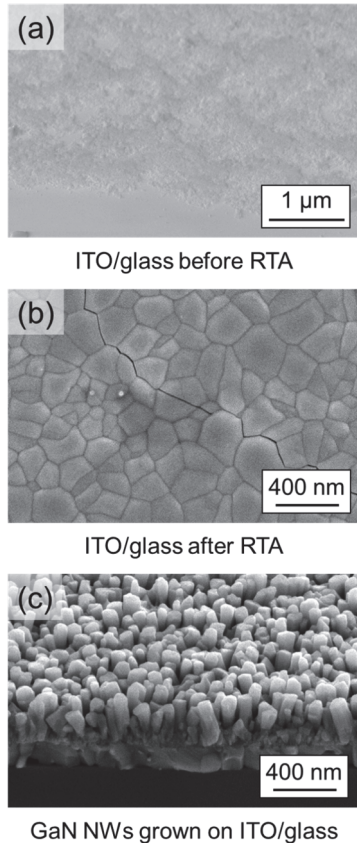


Fig. 1. SEM images of (a) an ITO/glass substrate before thermal annealing, (b) an ITO/glass substrate after thermal annealing, and (c) GaN NWs grown on the annealed ITO/glass substrate by MBE

열처리 전후 시편의 구조적 변화를 분석하기 위해 X-ray diffraction (XRD) 분석을 수행하였다. 그림 2는 GaN 나노와이어가 형성된 ITO/glass 기판의 열처리 전후 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 열처리 전 시편에서는 ITO (222), (400) 등의 회절 피크가 상대적으로 낮은 intensity와 넓은 peak width를 가지며 나타난다. 이는 ITO 박막의 결정성이 충분히 발달되지 않은 상태를 의미한다. 반면, 열처리 이후에는 동일 회절 피크의 intensity가 증가하고 peak가 보다 sharp하게 나타나며, 이는 결정화(crystallization) 및 결정립 성장(grain growth)이 진행되었음을 보여준다. 또한, 열처리 과정에서 과잉의 In 및 Sn 성분이 grain boundary 영역으로 이동하거나 응집(seggregation)될 가능성이 있으며, 이러한 금속성 또는 준금속성 성분은 광흡수 중심으로 작용할 수 있다. 이러한 결과는 열처리 전후 시편의 구조적 차이가 단순한 결정성 변화뿐만 아니라 결함 상태 및 조성 변화와도 연관될 수 있음을 시사한다.

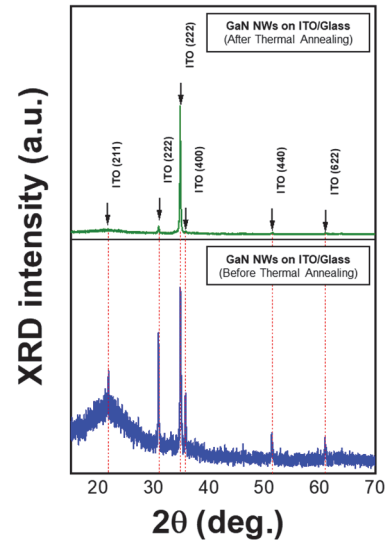


Fig. 2. XRD patterns of GaN NWs on ITO/glass before and after thermal annealing

3.2 GaN NWs 열처리에 따른 투과도 변화

GaN NWs의 광학적 열화 원인을 규명하고, 열처리를 통한 광투과 특성 개선 가능성을 평가하기 위해 다양한 조건에서 RTA 공정을 적용하였다. 그림 3은 열처리 조건에 따른 시편의 광학적 변화를 정성적으로 비교하기 위해 촬영된 이미지이다. 초기 성장된(as-grown) GaN NWs 시편은 전체적으로 어두운 색상을 나타내며, 이는 NWs 표면 및 NW 사이 영역에 존재하는 비의도성 성분에 의해 광흡수가 증가한 결과로 해석된다. 반면, 열처리를 수행한 시편에서는 표면이 점차 투명해지는 경향을 보이며, 특히 열처리 시간이 증가할수록 어두운 영역이 감소하고 보다 균일한 투명도가 확보된다. 온도 조건에 따른 비교 결과, 높은 온도만으로는 균일한 투명도를 확보하기 어렵고, 충분한 열처리 시간이 확보되어야 표면에 존재하는 흡수 중심이 효과적으로 제거되는 것으로 나타났다. 또한, 과도한 온도 조건에서는 ITO/glass 층과의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient) 차이에 의해 계면 박리 혹은 열화가 발생할 수 있으므로, 상대적으로 낮은 온도에서 충분한 시간 동안 열처리를 수행하는 조건이 보다 안정적인 공정으로 판단된다.

그림 3에서 확인된 바처럼 어두운 색상의 초기 성장 GaN NWs 시편은 NWs 표면 및 NW 사이 공간에 존재하는 비의도성 성분에 의한 광흡수 증가를 반영한다. 이러한 광학적 특성은 단순한 구조적 산란과는 별개로 흡수 중심에 의한

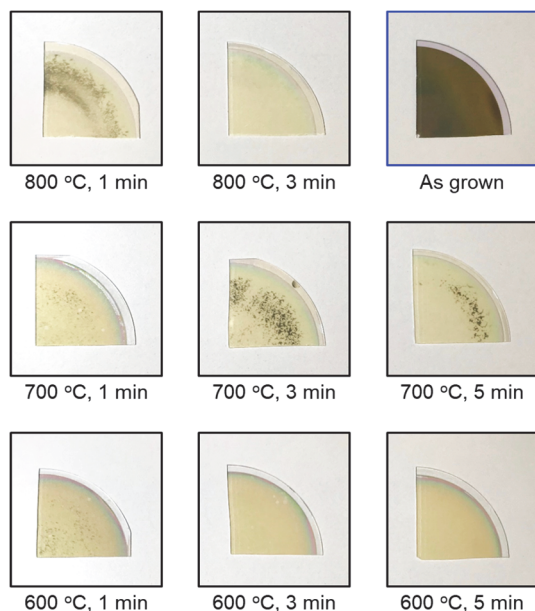


Fig. 3. Photographs of GaN NWs samples on ITO/glass substrates under different RTA conditions

광손실이 존재함을 의미하는 것으로 해석된다. 그림 4의 투과도 스펙트럼을 통해 이러한 정성적 변화를 정량적으로 확인할 수 있다. ITO/glass 기판은 가시광 영역에서 높은 투과도를 나타내며, 파장 550 nm를 기준으로 약 93.6%의 투과도를 보인다. 반면, GaN NWs가 형성된 as-grown 시편에서는 동일 파장에서 투과도가 약 47.9% 수준으로 급격히 감소한다. 이는 NWs 구조에 의해 증가한 광 경로 길이와 함께, 표면 및 계면에 존재하는 결함 및 비의도성 성분이 광흡수 중심으로 작용하여 광손실을 유도한 결과이다.

열처리 조건에 따른 비교 결과, 800°C에서 3분 동안 열처리한 시편은 가시광 영역에서 가장 높은 투과도를 나타내며, 550 nm 파장에서 약 78.5% 수준까지 회복된다. 이는 고온 열처리를 통해 표면에 축적된 유기 잔류물 또는 비정질 성분이 제거되고, 결함 상태가 감소함에 따라 광흡수가 효과적으로 억제된 결과로 해석된다. 특히, 열처리 과정에서 발생하는 재배열(reconstruction) 및 재결정화(recrystallization)는 표면 상태 밀도를 감소시키고 광학적 균일성을 향상시키는 역할을 할 수 있다. 그러나 800°C와 같은 고온 조건에서는 ITO/glass 기판과 GaN 사이의 열팽창 계수 차이에 의해 열적 응력이 증가하며, 이는 계면 열화 또는 박리(delamination)로 이어질 수 있다. 또한, ITO 층의 전기적 및 광학적 특성 저하 가능성도 존재하므로, 공정 안정성 측면에서 한계를 갖는다.

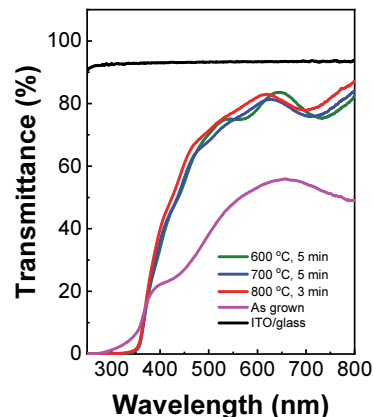


Fig. 4. Optical transmittance spectra of ITO/glass and GaN NWs samples on ITO/glass substrates under different thermal annealing conditions

한편, 700°C 및 600°C 조건에서 열처리된 시편은 800°C 조건 대비 약간 낮은 투과도를 나타내지만, 두 조건 간 차이는 크지 않으며 전반적으로 유사한 수준의 광투과 특성을 보인다. 특히 600°C 조건에서도 가시광 영역에서 평균 투과도가 75.5% 수준까지 향상되며, 이는 상대적으로 낮은 온도에서도 충분한 열처리 효과가 확보될 수 있음을 의미한다. 이러한 결과는 열처리 온도보다 열처리 시간에 의해 결함 제거 효율이 더 크게 영향을 받을 수 있음을 시사한다.

투과도 스펙트럼에서 흡수단 부근에 나타나는 완만한 기울기는 Urbach tail에 해당하며, 이는 구조적 무질서 및 결함에 의해 형성된 국소화된 에너지 상태를 반영한다. 본 연구에서는 투과도(T)와 흡수계수(α) 사이의 관계인 $\alpha \propto -\ln(T)$ 를 기반으로 Urbach tail 특성을 간접적으로 분석하였다. 초기 성장된 시편에서는 완만한 기울기의 Urbach tail이 나타나며, 이는 높은 결함 밀도와 비정질 성분의 존재를 의미한다. 반면, 열처리된 시편에서는 Urbach tail이 감소하고 보다 급격한 흡수 경계가 형성된다. 이는 열처리 과정에서 표면 및 계면 결함이 감소하고, 비의도성 흡수 중심이 제거됨에 따라 대역단(band edge) 근처의 상태 밀도가 감소한 결과로 해석된다.

3.3 GaN NWs/CsPbBr₃ 광특성 분석

GaN NWs 기반 하이브리드 구조에서 CsPbBr₃의 형성 거동 및 계면 특성을 분석하기 위해 구조적 특성 평가를 수행하였다. 그림 5는 GaN 나노와이어 위에 CsPbBr₃가 형성된 구조 및 계면 특성을 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 GaN NWs 위

에 CsPbBr₃가 스핀 코팅 공정을 통해 형성되는 과정을 모식적으로 나타낸 그림이다. 용액 공정 과정에서 CsPbBr₃ 전구체는 NW 사이 공간으로 침투하며, 열처리 이후 NW 상부 및 내부 공간에 걸쳐 연속적인 활성층을 형성한다. 그림 5(b)의 단면 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM) 이미지에서 확인할 수 있듯이, CsPbBr₃는 GaN NWs 상부에 균일하게 형성될 뿐만 아니라 NW 사이 공간을 효과적으로 채우며 빈 공간 없이 치밀한 구조를 형성한다. 이는 단순한 표면 코팅이 아닌, NW 기반 3차원 구조 내에서의 균일한 채움이 이루어졌음을 의미한다. 이러한 구조적 특징은 광흡수 및 전하 전달 경로 형성에 있어 중요한 역할을 한다. 그림 5(c)는 에너지 분산형 X선 분광법(energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS) 매핑(mapping) 결과로, GaN NW와 CsPbBr₃ 구성 원소의 공간 분포를 나타낸 것이다. N 및 Ga 신호는 나노와이어 영역에서 뚜렷하게 관찰되며, Cs, Pb, Br 신호는 나노와이어 사이 및 상부 영역에 균일하게 분포한다. 이는 CsPbBr₃가 나노와이어 사이 깊숙한 영역까지 침투하여 형성되었으며, GaN과 CsPbBr₃ 사이에 연속적인 계면이 형성

되었음을 의미한다.

GaN NWs 기반 CsPbBr₃ 하이브리드 구조에서 열처리 공정이 광학적 안정성 및 재결합 특성에 미치는 영향을 규명하기 위해 온도 의존성 PL 특성 평가를 수행하였다. 그림 6(a)는 초기 성장된 GaN NWs 위에 형성된 CsPbBr₃ 시편의 온도 의존 PL 스펙트럼을 나타내며, 그림 6(b)는 600°C, 5분 조건에서 열처리된 GaN NWs 위에 형성된 시편의 결과를 나타낸다. 그림 6(a)의 초기 성장된 시편에서는 온도가 10 K에서 300 K로 증가함에 따라 PL peak position이 519.5 nm에서 516.8 nm로 점진적으로 이동하며, 비교적 큰 청색 편이(blue-shift)가 관찰된다. 이러한 피크 이동(peak shift)은 온도 증가에 따른 결함 및 국소화된 상태(localized states)에 포획되었던 캐리어들이 열 에너지를 얻어 보다 높은 에너지 준위인 대역단으로 재분포됨에 따라 나타나는 거동으로 해석된다. 특히, 저온에서는 NWs 표면 및 계면의 결함 준위에 국소화되었던 캐리어들이 주된 발광에 기여하지만, 온도가 상승함에 따라 이들이 열적 탈출(thermal escape)을 통해 국소화 에너지 장벽을 극복하고 대역단 근처의 자유 캐리어 상

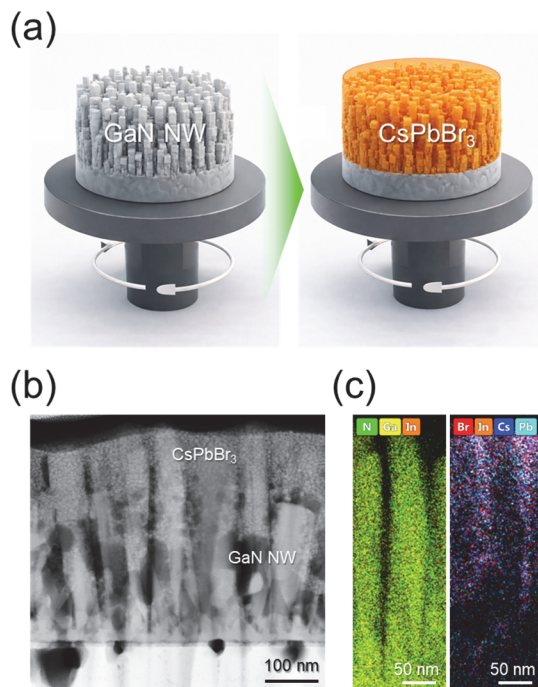


Fig. 5. (a) Schematic illustration of CsPbBr₃ deposition on GaN NWs via spin-coating process, (b) cross-sectional TEM image of the CsPbBr₃/GaN NWs hybrid structure, and (c) EDS elemental mapping images showing the spatial distribution of Ga, N, Cs, Pb, Br, and In elements

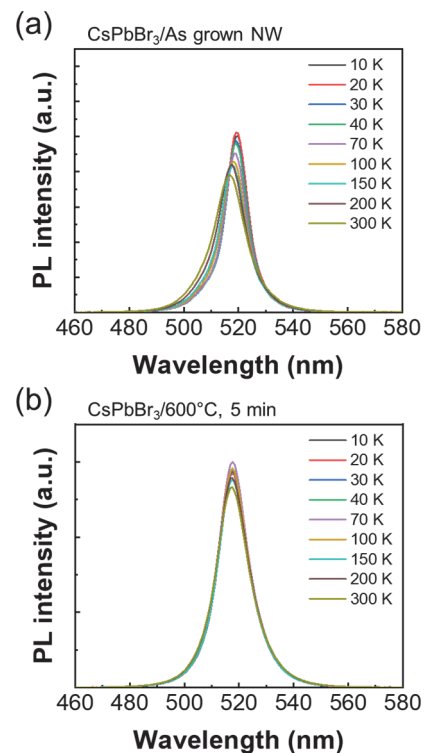


Fig. 6. Temperature-dependent PL spectra of CsPbBr₃ deposited on (a) as-grown GaN NWs and (b) thermally treated GaN NWs (600°C, 5 min)

태로 전이되면서 발광 에너지가 상승하는 거동을 보인다. 또한, 반치폭(full width at half maximum, FWHM)은 10.7 nm에서 15.3 nm로 증가하며 온도 상승에 따라 뚜렷한 스펙트럼 확장(spectral broadening)이 나타난다. 이는 엑시톤-포논 상호작용(exciton-phonon interaction)의 증가뿐만 아니라, 결함 및 불균일한 결정 구조로 인한 비균질 확장(inhomogeneous broadening)이 동시에 작용한 결과로 해석된다. 특히, 구조적 무질서가 큰 경우 다양한 에너지 준위 분포가 존재하게 되어 온도 증가 시 더 넓은 에너지 분포에서 발광이 발생하게 된다. 반면, 그림 6(b)의 열처리된 시편에서는 온도 변화에 따른 PL peak shift가 관찰되지 않으며, 피크 위치(position)는 10 K에서 300 K까지 517.5 nm를 유지한다. 이는 열처리 공정을 통해 결함 밀도가 감소하고, 국소화된 상태의 분포가 감소함에 따라 캐리어의 재분포가 억제된 결과로 해석된다.

FWHM 변화 또한 as-grown 시편 대비 현저히 감소하여 14.2 nm에서 15.3 nm 수준으로 제한적인 증가만을 보인다. 이는 열처리를 통해 결정성 향상 및 계면 정합성이 개선되면서, 발광에 기여하는 에너지 상태의 분포가 보다 균일해졌음을 의미한다. 결과적으로, 열처리된 시편에서는 엑시톤 재결합(exciton recombination)이 보다 band gap 근처에서 발생하는 특성을 나타낸다. PL intensity의 온도 의존성에서도 두 시편 간 뚜렷한 차이가 관찰된다. As-grown 시편에서는 온도 증가에 따라 PL intensity가 급격히 감소하는 반면, 열처리된 시편에서는 intensity 감소가 상대적으로 완만하게 나타난다. 이러한 thermal quenching 거동의 차이는 비방사 재결합 경로의 활성화 정도 차이에 기인한다. 즉, as-grown 시편에서는 결함 및 트랩 상태가 풍부하여 온도 증가 시 캐리어가 비방사 경로로 빠르게 소멸되는 반면, 열처리된 시편에서는 이러한 트랩 상태가 감소하여 방사 재결합이 상대적으로 유지된다. 이와 같은 결과는 그림 4에서 확인된 투과도 향상 및 Urbach tail 감소와 직접적으로 연결된다. 열처리 공정은 나노 와이어 표면 및 계면에 존재하는 비의도성 흡수 중심을 제거하고 구조적 무질서를 감소시킴으로써, 국소화된 에너지 상태의 밀도를 감소시키는 역할을 수행한다. 그 결과, 온도 변화에 따른 캐리어 동역학(carrier dynamics)이 보다 안정적으로 유지되며, 광학적 특성의 온도 의존성이 완화되는 것으로 이해할 수 있다.

온도에 따른 PL intensity 감소 거동을 정량적으로 분석하고, 열처리 공정이 비방사 재결합 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 Arrhenius 분석을 수행하였다. 그림 7은 TDPL을 기반으로 1/T에 대해 재구성한 Arrhenius plot을 나타낸 것이다. Arrhenius 분석은 아래 식으로 표현되고, 서로 다른 활성화 에너지를 갖는 두 개의 비방사 재결합 경로를 고려한 2-channel Arrhenius 모델을 적용하였다 [13,14].

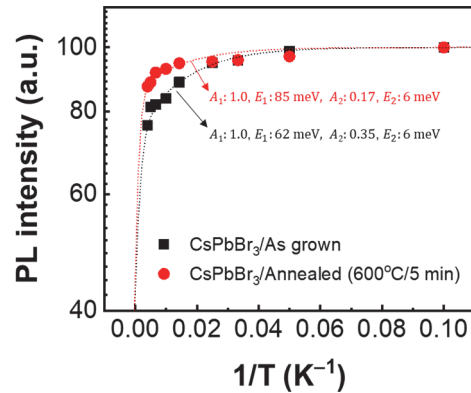


Fig. 7. Arrhenius plots and IQE analysis of CsPbBr₃ on GaN NW structures with and without thermal annealing

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + A_1 \exp\left(\frac{E_1}{k_B T}\right) + A_2 \exp\left(\frac{E_2}{k_B T}\right)} \quad (1)$$

여기서 $I(T)$ 는 온도 T 에서의 PL intensity, I_0 는 저온에서 비방사 재결합의 영향이 최소화된 조건에서의 최대 PL intensity를 의미한다. A_1 , A_2 는 각각의 비방사 재결합 경로의 상대적 기여도를 나타내는 계수이며, E_1 , E_2 는 해당 재결합이 활성화되기 위한 에너지 장벽을 의미한다. 일반적으로 높은 활성화 에너지를 갖는 항은 deep-level defect와 관련된 재결합 경로를, 낮은 활성화 에너지를 갖는 항은 shallow trap 또는 표면 결함에 의한 재결합 경로를 반영한다. As-grown 시편의 경우, 주요 비방사 재결합 경로에 해당하는 첫 번째 항에서 활성화 에너지 E_1 은 약 62 meV로 나타났으며, 해당 경로의 상대적 기여도 A_1 은 약 1.0 수준으로 확인되었다. 이는 주요 재결합 경로의 비중이 유지되면서도 비교적 낮은 에너지에서 활성화가 가능함을 의미한다. 두 번째 항에 해당하는 저에너지 재결합 경로에서는 활성화 에너지 E_2 가 약 6 meV로 나타났으며, 해당 경로의 기여도 A_2 는 약 0.35 수준으로 확인되었다. 이러한 낮은 활성화 에너지와 높은 기여도는 shallow trap에 의한 비방사 재결합이 주요 손실 경로로 작용하고 있음을 의미한다. 반면, 600°C, 5분 조건에서 열처리된 시편에서는 첫 번째 항의 활성화 에너지 E_1 이 약 85 meV로 증가하였으며, 해당 경로의 기여도 A_1 은 약 1.0 수준으로 유지되었다. 이는 주요 재결합 경로의 상대적 비중은 유지되지만, 활성화에 필요한 에너지 장벽이 증가했음을 의미한다. 두 번째 항의 경우, 활성화 에너지 E_2 는 약 6 meV로 as-grown 시편과 유사하게 유지되었으나, 해당 경로의 기여도 A_2 는 약 0.17 수준으로 감소하였다. 이는 shallow trap의 에너지 준위는 변

하지 않았지만, 해당 결함 경로의 밀도 또는 재결합 기여도가 감소했음을 의미한다. 따라서, 열처리 공정은 주요 재결합 경로의 활성화 에너지를 증가시키는 동시에, 저에너지 결함 기반 재결합 경로의 기여도를 감소시키는 효과를 나타낸다. 이러한 변화는 GaN NWs 표면 및 계면 결함이 완화되었음을 반영하며, 결과적으로 비방사 재결합이 억제되고 방사 재결합 경로가 상대적으로 우세해지는 방향으로 PL 특성이 개선된 것으로 해석된다.

IQE는 저온(10 K)과 상온(300 K)에서의 PL 강도 비를 이용하여 계산하였다. [15] 저온(10 K) 조건에서는 열적으로 활성화된 phonon의 밀도가 크게 감소함에 따라 비방사 재결합 경로가 효과적으로 억제되고, 방사 재결합이 지배적으로 나타난다고 가정하였다. 이러한 조건에서는 결함 준위의 열적 활성화가 제한되므로, 측정된 PL intensity는 대부분 방사 재결합에 의해 결정되는 최대 발광 상태에 근접한 값으로 간주할 수 있다. 따라서, 10 K에서의 PL intensity를 방사 재결합이 지배적인 기준값으로 설정하고, 상온(300 K)에서의 PL intensity와의 비를 통해 비방사 재결합에 의해 감소된 발광 비율을 정량화함으로써 IQE를 추정할 수 있다.

$$IQE(\%) = \frac{I_{300\text{ K}}}{I_{10\text{ K}}} \times 100 \quad (2)$$

As-grown 시편의 경우 IQE는 약 75.9%로 나타났으며, 열처리된 시편에서는 약 87.4%로 증가하였다. 이는 열처리를 통해 비방사 재결합 중심이 감소하고, 전하 재결합이 보다 효율적으로 방사 재결합 경로로 이루어지는 것을 의미한다. 이러한 결과는 그림 4에서 확인된 투과도 향상 및 Urbach tail 감소, 그리고 그림 6에서 나타난 온도 의존 PL 안정성 향상과 일관된 경향을 보인다. 즉, 열처리 공정은 NW 표면 및 계면 결함을 감소시키고 구조적 균일성을 향상시킴으로써, 광학적 특성뿐만 아니라 전하 재결합 특성까지 동시에 개선하는 역할을 수행한다. 결과적으로, 열처리된 GaN NWs 기반 CsPbBr₃ 하이브리드 구조는 향상된 내부 양자 효율과 우수한 온도 안정성을 나타내며, 광전자 소자 응용에 있어 보다 안정적인 발광 특성을 제공할 수 있음을 확인하였다.

4 결론

본 연구에서는 MBE를 이용하여 ITO/glass 기판 위에 성장된 GaN NWs의 광학적 열화 원인을 규명하고, 열처리 공정을 통해 이를 개선하였다. As-grown GaN NWs는 표면 및 계

면에 잔류한 비의도성 성분으로 인해 시편의 흑화가 발생하며, 가시광 영역에서의 광투과도가 크게 저하되고 Urbach tail이 형성되는 특성을 나타냈다. RTA 공정을 적용한 결과, 열처리 조건에 따라 NW 표면의 광학적 상태가 개선되었으며, 특히 800°C, 3분 조건에서 550 nm 기준 투과도가 47.9%에서 78.5%까지 증가하였다. 또한 600°C 조건에서도 약 75.5% 수준의 투과도가 확보되어, 낮은 온도에서도 충분한 열처리 효과가 구현될 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 열처리를 통해 NW 표면 및 계면에 존재하는 비의도성 흡수 중심이 제거되고 구조적 무질서가 완화된 데 기인한다. 최적화된 조건(600°C, 5분)의 GaN NWs를 ETL로 활용하여 CsPbBr₃를 형성한 결과, NW 사이 공간까지 활성층이 균일하게 채워지며 공극 없이 연속적인 계면 구조가 형성되었다. 온도 의존성 PL 분석에서 as-grown 구조는 10 K에서 300 K로 증가함에 따라 PL peak가 519.5 nm에서 516.8 nm로 이동하고, FWHM이 10.7 nm에서 15.3 nm로 증가하는 등 뚜렷한 열적 불안정성을 나타냈다. 반면, 열처리된 구조에서는 peak position이 약 517.5 nm로 거의 변화하지 않으며, FWHM 또한 14.2 nm에서 15.3 nm 수준으로 제한적인 변화만을 보여, 온도 안정성이 크게 향상된 것을 확인하였다. Arrhenius 분석을 통해 재결합 메커니즘의 변화를 정량적으로 확인할 수 있었다. As-grown 시편에서는 deep-level defect에 해당하는 경로에서 활성화 에너지가 62 meV, 기여도 A_1 이 1.0 수준으로 나타났으며, shallow trap 기반 경로에서는 활성화 에너지 6 meV, 기여도 A_2 가 0.35로 비교적 높은 값을 보였다. 이는 낮은 에너지 장벽에서도 비방사 재결합이 쉽게 활성화되는 구조임을 의미한다. 반면, 열처리된 시편에서는 deep-level 경로의 활성화 에너지가 85 meV로 증가하면서 해당 재결합 경로의 활성화가 억제되었으며, shallow trap 경로의 활성화 에너지는 동일하게 유지되었으나 기여도 A_2 가 0.17로 감소하였다. 이는 결함의 에너지 준위 자체보다는 결함 밀도 및 재결합 확률이 감소했음을 의미하며, 열처리를 통해 비방사 재결합 중심이 효과적으로 제거되었음을 나타낸다. 이에 따라 IQE는 as-grown 시편에서 75.9%에서 열처리된 시편에서 87.4%로 향상되었다. 이러한 결과는 GaN NWs의 광학적 열화가 성장 이후 잔류하는 불순물 및 결함 상태에 기인하며, 열처리 공정을 통해 이를 효과적으로 제어할 수 있음을 명확히 보여준다. 나아가, 광투과 특성이 개선된 GaN NWs를 ETL로 적용함으로써, CsPbBr₃ 활성층의 발광 특성, 열적 안정성, 그리고 IQE가 동시에 향상됨을 확인하였다.

ORCID

Jungwook Min

<https://orcid.org/0000-0002-7570-1739>

감사의 글

본 연구는 순천향대학교 교내연구비(과제번호: 20250606)와 한국연구재단(과제번호: RS-2025-24535701)의 지원에 의해 수행되었음.

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

Author Contributions

Kwang Jae Lee: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Writing – original draft, Visualization.

Jungwook Min: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Writing, Visualization.

Data Availability

Data openly available in a public repository that issues datasets with DOIs.

References

- [1] R. Calarco, R. J. Meijers, R. K. Debnath, T. Stoica, E. Sutter, and H. Lüth, *Nano Lett.*, **7**, 2248 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl0707398>
- [2] F. Qian, Y. Li, S. Gradečák, H. G. Park, Y. Dong, Y. Ding, Z. L. Wang, and C. M. Lieber, *Nat. Mater.*, **7**, 701 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1038/nmat2253>
- [3] H. P. T. Nguyen, M. Djavid, S. Y. Woo, X. Liu, A. T. Connie, S. Sadaf, Q. Wang, G. A. Botton, I. Shih, and Z. Mi, *Sci. Rep.*, **5**, 7744 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep07744>
- [4] G. Tourbot, C. Bougerol, A. Grenier, M. Den Hertog, D. Sam-Giao, D. Cooper, P. Gilet, B. Gayral, and B. Daudin, *Nanotechnology*, **22**, 075601 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/7/075601>
- [5] S. Fan, S. Y. Woo, S. Vanka, G. A. Botton, and Z. Mi, *APL Mater.*, **4**, 076106 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4958964>
- [6] Y. H. Ra and C. R. Lee, *Adv. Mater. Technol.*, **6**, 2000885 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202000885>
- [7] A. Prabaswara, J. W. Min, R. C. Subedi, M. Tangi, J. A. Holguin-Lerma, C. Zhao, D. Priante, T. K. Ng, and B. S. Ooi, *Nanoscale Res. Lett.*, **14**, 45 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-019-2870-9>
- [8] M. A. Jacobson, O. V. Konstantinov, D. K. Nelson, S. O. Romanovskii, and Z. Hatzopoulos, *J. Cryst. Growth*, **230**, 459 (2001).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)01246-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)01246-5)
- [9] H. Zhou, J. Mei, M. Xue, Z. Song, and H. Wang, *J. Phys. Chem. C*, **121**, 21541 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b07536>
- [10] Y. Wang, D. Zheng, L. Li, and Y. Zhang, *ACS Appl. Energy Mater.*, **1**, 3063 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b00713>
- [11] K. J. Lee, J. W. Min, B. Turedi, A. Y. Alsalloum, J. H. Min, Y. J. Kim, Y. J. Yoo, S. Oh, N. Cho, R. C. Subedi, S. Mitra, S. E. Yoon, J. H. Kim, K. Park, T. H. Chung, S. H. Jung, J. H. Baek, Y. M. Song, I. S. Roqan, T. K. Ng, B. S. Ooi, and O. M. Bakr, *ACS Energy Lett.*, **5**, 3295 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.0c01621>
- [12] M. Kulbak, S. Gupta, N. Kedem, I. Levine, T. Bendikov, G. Hodes, and D. Cahen, *J. Phys. Chem. Lett.*, **7**, 167 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.5b02597>
- [13] M. Leroux, N. Grandjean, B. Beaumont, G. Nataf, F. Sémoud, J. Massies, and P. Gibart, *J. Appl. Phys.*, **86**, 3721 (1999).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.371242>
- [14] T. Lu, Z. Ma, C. Du, Y. Fang, H. Wu, Y. Jiang, L. Wang, L. Dai, H. Jia, W. Liu, and H. Chen, *Sci. Rep.*, **4**, 6131 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep06131>
- [15] I. E. Titkov, S. Y. Karpov, A. Yadav, V. L. Zerova, M. Zulonas, B. Galler, M. Strassburg, I. Pietzonka, H. J. Lugauer, and E. U. Rafailov, *IEEE J. Quantum Electron.*, **50**, 911 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1109/jqe.2014.2359958>