

p-type GaN의 Activation을 통한 광전기화학적 특성 향상

방승완¹ · 김하성¹ · 배효정¹ · 주진우² · 강성주^{1,†} · 하준석^{1,3,†}

¹전남대학교 화학공학부

²한국광기술원 광 ICT 에너지 연구센터

³전남대학교 광전자융합기술연구소

Improvement of Photoelectrochemical Properties through Activation Process of p-type GaN

Seung Wan Bang¹, Haseong Kim¹, Hyojung Bae¹, Jin-Woo Ju², Sung-Ju Kang^{1,†}, and Jun-Seok Ha^{1,3,†}

¹Department of Advanced Chemicals & Engineering, Chonnam National University, 77 Yong-bong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

²Photonic ICT & Energy Research Center, 9 Cheomdan venture-ro, Buk-gu, Gwangju 61007, Korea

³Optoelectronics Convergence Research Center, Chonnam National University, 77 Yong-bong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

(Received December 7, 2017: Corrected December 12, 2017: Accepted December 17, 2017)

초 록: n-type GaN 반도체는 광전극으로서 우수한 성질을 가지고 있지만, 표면에서 일어나는 산소반응으로 인한 광부식으로 신뢰성이 저하되는 큰 단점이 있다. 이를 근본적으로 억제하기 위하여 표면에서 수소 발생 반응이 일어나는 p-type GaN를 광전극으로 사용함으로써 광부식을 피하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 p-type GaN은 비저항이 높고 정공 이동도가 낮기 때문에 효율이 낮다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 p-type GaN의 activation 공정을 통해 개선하고자 한다. 전극으로 사용될 p-type GaN을 N₂ 분위기의 500°C에서 1 분 동안 annealing을 하였다. Hall effect 측정을 통하여 전기적 특성을 확인하였으며, potentiostat (PARSTAT4000) 측정을 통하여 광전기화학적 (photoelectrochemical, PEC) 특성을 분석하였다. 그 결과 annealing 공정을 통하여 광전류밀도가 1.5배 이상 향상되었으며, 3시간 동안 안정적인 광전류 값을 확인하였다.

Abstract: The n-type GaN semiconductor has excellent properties as a photoelectrode, but it has disadvantage that its reliability is deteriorated due to the photocorrosion because the oxygen reaction occurs on the surface. For this reason, there are fundamental attempts to avoid photocorrosion reaction of GaN surfaces by using the p-type GaN as a photoelectrode where hydrogen generation reaction occurs on the surface. However, p-type GaN has a problem of low efficiency because of its high resistivity and low hole mobility. In this study, we try to improve the photocurrent efficiency by activation process for the p-type GaN. The p-type GaN was annealed for 1 min. at 500°C in N₂ atmosphere. Hall effect measurement system was used for the electrical properties and potentiostat (PARSTAT4000) was used to measure the photoelectrochemical (PEC) characteristics. Consequently, the photocurrent density was improved more than 1.5 times by improving the activation process for the p-type GaN. Also, its reliability was maintained for 3 hours.

Keywords: PEC, GaN, Activation, Photocurrent, Potentiostat

1. 서 론

태양광을 이용한 광전기화학적(photoelectrochemical, PEC) 수소 생산방법은 추가되는 에너지 없이 태양광을 수소 연료로 직접적으로 변환시켜 화학적 에너지로 사용하기 때문에 이산화탄소 등의 공해물질의 대기 방출이 없는 친환경적 에너지 생산 방식이다.^{1,2)} 이 때, 물을 분리

하기 위해서는 1.23 eV의 에너지가 필요하다. 또한 반도체 전극의 전도대 전위가 수소 발생 반쪽 반응 전위 보다 낮아야 하며, 가전자대 전위는 산소 발생 반쪽 반응 전위 보다 높아야 한다.³⁾ 그리고 계면과 전해질 사이 저항이나 내부 저항에 의해 2 eV 이상의 에너지가 생산되어야 한다.

이러한 조건들을 충족하기 위해 Si, GaAs 등 단결정 물질부터 TiO₂ 등 다양한 연구들이 광전극 반도체 물질로 연

[†]Corresponding author

E-mail: jsha@jnu.ac.kr, sjkang@jnu.ac.kr

© 2017, The Korean Microelectronics and Packaging Society

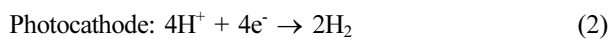
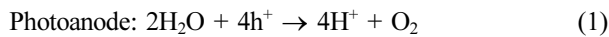
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

구되고 있으며, 그 중 gallium nitride (GaN)는 높은 열전도도, 전자포화속도, 이동도를 가지며 Si ($E_g = 1.1 \text{ eV}$)이나 GaAs ($E_g = 1.43 \text{ eV}$)에 비해 큰 에너지 갭(3.4 eV)을 가지고 있고, 열적, 화학적으로 안정하다.^{4,5,6} 또한, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 및 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 등의 3원소 화합물을 형성할 시에는 그 에너지 갭을 1.9 eV 에서 6.2 eV 까지 조절할 수 있으므로 자외선 영역을 포함하여 가시광 전과장 영역의 태양광 스펙트럼을 이용할 수 있는 이점을 가지고 있기 때문에 최근 광전극으로써 많은 연구가 진행되고 있다.⁷⁻¹⁰

이러한 PEC 수소 생산 방법은 전극과 전해질 용액이 접촉하였을 때, 전해질의 산화 환원 종과 반도체의 페르미 준위와 반도체 페르미 준위가 평형을 이루는 과정에서 반도체 표면의 가전자대와 전도대가 구부러지는 띠굽힘(band bending)현상이 발생한다.

이러한 시스템의 사용은 UV 또는 가시 광선에 의해 조사될 때 물을 수소 및 산소로 분해 할 수 있는 p-type 및 n-type 반도체 전극을 필요로 한다.¹¹

태양광을 받아 반도체 내에 전자-정공 쌍이 생성 및 분리된다. n-type 반도체의 경우 정공은 계면으로 이동하여 물과 산화 반응하여 산소를 생성하고, 전자는 상대전극으로 이동해 물과 환원 반응하여 수소를 생성한다. 반면, p-type 반도체의 경우 전자는 계면으로 이동하여 물과 환원 반응하여 수소를 생성하고, 정공은 상대전극으로 이동해 물과 산화 반응하여 산소를 생성하는 반대 반응이 일어난다.



n-type GaN은 p-type GaN과 비교하여 통상적으로 더 좋은 결정질과 더 높은 도핑농도 제어성을 가지고 있어 우수한 PEC 특성을 가진다.^{12,13} 식 (1)과 같이, 자외선 조사 하에서 물 산화반응이 일어나는 광산화전극(photoanode)으로서 표면에 광여기된 정공이 축적되며, GaN이 전해질에 점차적으로 용해되면서 광부식이 쉽게 일어나 표면 거칠기가 급격히 증가한다.^{13,14} 반면 p-type 반도체 재료는 식 (2)와 같이, 수소환원 반응이 일어나는 광환원전극(photocathode)으로서 band는 반대로 휘어지게 된다. 그리고 반도체 표면에 수소가 발생하는 환원반응이 일어나기 때문에 광부식으로부터 보호될 수 있다.¹⁵

하지만 p-type GaN 박막은 억셉터로 작용하는 Mg가 캐리어로 사용된 H에 의해 Mg-H 복합체를 형성해 높은 비저항과 낮은 정공 이동도를 나타낸다고 알려져 있다.¹⁶ 따라서 p-type GaN을 PEC 물분해에 사용할 경우, 광여기된 전자와 정공의 이동 저하로 인해 충분한 전압이 발생하지 않기 때문에 매우 낮은 효율을 갖게 된다.

p-GaN의 효율적인 활성화를 위해 post annealing 공정

¹⁶⁻¹⁹, minority carrier 주입^{18,19}, laser 조사²²⁻²⁴ 등을 이용하여 많은 연구가 시도되었으며, 그 중 전기적 특성을 향상시키기 위한 annealing 공정이 가장 널리 사용되고 있다. Nakamura 등은 질소 분위기 조건, 700°C 이상의 온도에서 활성화 열처리(activation thermal annealing) 하였을 시, 전기적으로 비활성인 Mg-H 복합체를 해리함으로써 p-type GaN의 전기적 특성을 향상시킨다는 연구결과를 보고하였다.²⁵ 또한, Youn 등은 박막 내 포함된 H의 해리에 의해 Mg이 활성화되어 정공 이동도를 증가시키고 p-GaN 박막의 전도도(conductivity)를 향상시킨다는 연구 결과를 보고하였다.²⁶ 하지만 activation 정도에 따라 p-type GaN의 특성 변화가 PEC 효율에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 아직 진행되고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 annealing 공정이 물분해 광전극인 p-GaN의 광전기화학적 특성에 어떤 영향을 주는지에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험 방법

먼저, hydride vapor phase epitaxy (HVPE)법으로 제작된 2 inch bulk $400 \mu\text{m}$ GaN 기판에 metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) 장치를 사용하여 $1 \mu\text{m}$ 두께의 p-type GaN을 성장시켰다. 그리고, rapid thermal annealing (RTA)를 사용하여 온도 500°C , 승온 시간 90 초, 60 초간 N_2 분위기에서 열처리를 진행하였다. 열처리 된 샘플을 광전극으로 제작하기 위하여 $1 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 크기로 cutting 하였다. 그후 acetone, isopropyl alcohol 그리고 deionized water에 넣고 각각 3 분, 3 분, 그리고 5 분간 유기세척 후 질소가스를 이용하여 건조하였다. 세척된 기판을 샘플 뒷면에 인듐 납땀으로 구리와이어와 ohmic contact을 형성시켰으며, 전해질 내의 dissolution을 피하기 위해 측정 부분인 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 크기를 제외한 영역을 모두 에폭시 수지로 감쌌다. 그리고 에폭시 수지가 충분히 굳을 수 있도록 24시간 동안 건조하였다.

제작된 광전극을 이용하여 광전기화학 셀을 제작하였다. 기준전극은 Ag/AgCl/NaCl (sodium chloride saturated silver chloride electrode; SSSE, $E^\circ_{\text{AgCl/Ag}} = 0.212 \text{ V vs. SHE}$), 상대전극은 직경 0.5 mm Pt 와이어를 사용하였고, 전해질은 1N의 NaOH ($\text{pH}=13.6$)를 사용하였다. 광원은 500W의 Xe-lamp (USHIO)에 neutral density filter ($190\text{-}1700 \text{ nm}$, 0.5 optical density, 직경 50 mm , 32% transmission)를 사용하여 태양광과 유사한 조건의 광 (100 mW/cm^2)을 조사하였다.

PEC 특성은 potentiostat (PARSTAT4000)을 사용하였으며, cyclic voltammetry (scan rate: 0.02 V/s)은 3전극법을 사용하였다. 그리고 chronoamperometry (3 hr, -0.7 V vs. Pt) 분석은 2전극법으로 측정하여 광전기화학적 특성을 평가하였다.

전기적 특성과 morphology을 알아보기 위해 Hall effect measurement system과 atomic force microscopy (AFM)을

Table 1. 각 샘플의 Hall effect measurement를 통한 전기적 특성

Sample	Temp. [K]	Bulk Con. [cm^{-3}]	Resistivity [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Conductivity [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Mobility [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]
Sample 1	300	5.87×10^{16}	11.9	8.38×10^{-2}	8.91
Sample 2	300	1.21×10^{17}	2.61	3.83×10^{-1}	19.7

사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

샘플의 전기적 특성을 알아보기 위해 캐리어 농도와 저항, 전도도, 전하 이동도를 측정하였고 그 결과를 Table 1에 나타내었다. Annealing 하기 전 샘플을 sample 1, annealing 후 샘플을 sample 2 라고 명명하였다. annealing 함으로써 캐리어 농도는 $5.87 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 에서 $1.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 로 2배 이상 증가함을 보였다. 또한, 저항은 $1.19 \times 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 에서 $2.61 \Omega \cdot \text{cm}$ 으로 약 10배 정도 현저하게 감소함을 확인하였다. 이는 annealing으로 인해 p-GaN 내부의 Mg-H 복합체의 결합이 끊어져 Mg 농도가 증가하였음을 예상할 수 있다. 전도도와 이동도 또한 각각 4배, 2배 이상 크게 증가함을 통해 샘플의 전기적 특성이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

실제로 광전류 값을 평가하기 위해서 cyclic voltammetry 측정을 진행하였다. Fig. 1(a)은 3전극법을 이용한 1 mol/L NaOH (pH=13.6) 전해질 하에서 각 샘플의 인가 전압에 따른 광전류 밀도를 보여준다. 실제 device와 유사한 환경에서의 PEC 특성을 확인하기 위하여, 전해질의 pH 전압과 기준 전극의 전압 효과를 제외한 cyclic voltammetry 값을 Fig. 1(b)에 나타내었다. 이 때, 전해질의 pH 전압 효과를 제거하기 위하여 Nernst 식을 이용하여 0.8 V 만큼 positive shift 하였다. 기준 전극의 전압 효과 역시 제거하기 위해 0.2 V 만큼 negative shift하여 Fig. 1(a)와 비교해 총 0.6 V 만큼 positive shift하였다.

-0.7 V vs. SHE 에서 sample 1과 sample 2의 광전류 값은 각각 $-0.04 \text{ mA}/\text{cm}^2$, $-0.06 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 로 annealing 후 광전류 특성 값이 1.5배 증가함을 보였다. 이는 Hall effect 측정값에서 sample 2가 sample 1에 비해 캐리어 농도가 2배 이상 증가한 것을 고려했을 때, 증가된 캐리어 농도가 광전류 밀도 향상에 영향을 주어 효율을 향상시켰다고 판단된다. 한편, 빛을 조사하여 광전류가 발생하기 시작하는 지점인 onset voltage 값을 Fig. 1(a)와 (b)에 inset에 도시하였으며, 결과를 보면 annealing 전에는 -0.13 V에서 annealing 후 -0.08 V로 0.05 V 만큼 positive쪽으로 이동하는 경향을 보였다. 이를 통해 annealing이 p-type GaN 샘플의 onset voltage를 향상시키는 역할을 하는 것을 알 수 있다. 이는 annealing으로 인해 p-type GaN의 환원반응으로 인한 광전류 발생 효율이 증대되었음을 보여준다.

이렇게 효율이 증가하는 p-type GaN 전극의 신뢰성을 확인하기 위해 chronoamperometry 분석을 진행하였다.

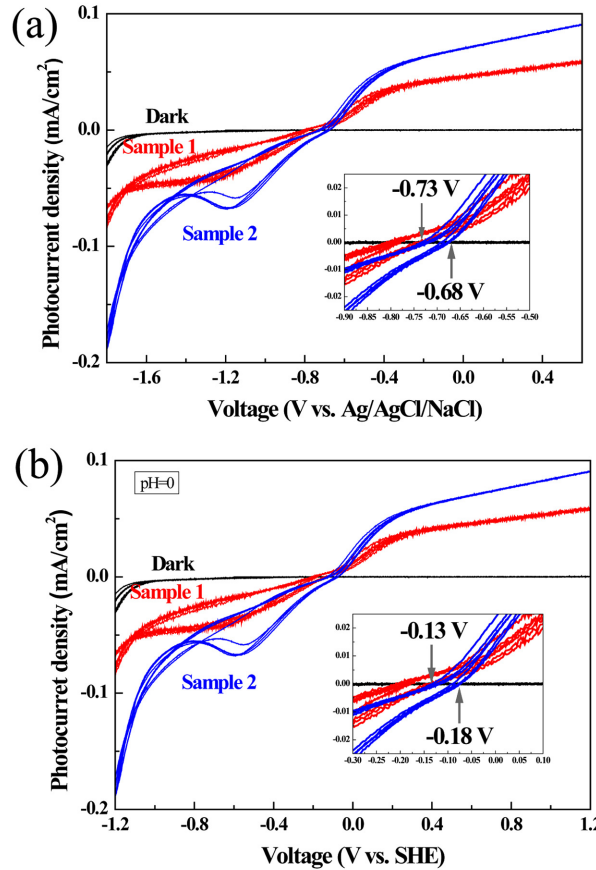


Fig. 1. (a) Sample 1과 sample 2의 cyclic voltammetry (V vs. Ag/AgCl/NaCl), 100 mW/cm^2 Xe-lamp로 1 mol/L NaOH 전해질 하에서 0.02 V/s 속도로 수행하였다. (b) Fig. 1(a)에서 pH 전압 효과와 기준 전극 전압효과를 제거하여 도시하였다.

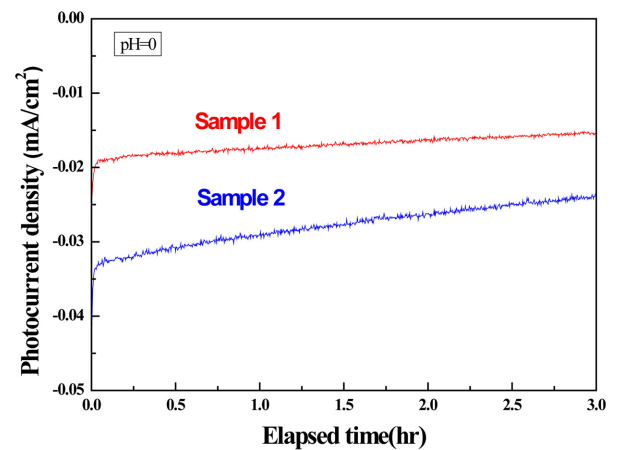


Fig. 2. Sample 1와 sample 2의 시간에 따른 광전류밀도 (인가전압 - 0.7 V vs. Pt). 전해질의 pH 전압 효과를 제거하였다.

Fig. 2는 sample 1과 sample 2의 시간에 따른 광전류밀도 값을 나타낸 그래프이다. Xe-lamp로 1 mol/L NaOH 전해질 하에서 수행하였으나, 실제 device와 유사한 환경에서의 PEC 특성을 보기 위하여 전해질의 pH 전압 효과를 제거하여 나타내었다. 신뢰성 측정 시 인가 전압은 Fig. 1의

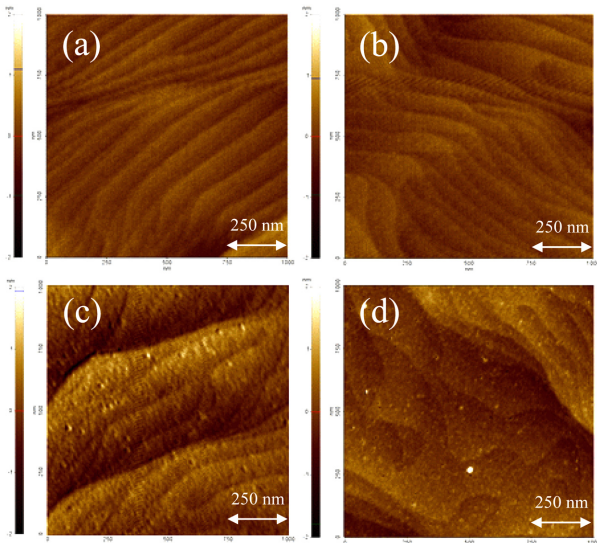


Fig. 3. PEC 측정 전 (a) sample 1와 (b) sample 2, PEC 측정 후 (c) sample 1과 (d) sample 2의 AFM morphology이다.

결과로부터 광전류가 saturated 된 것으로 확인 된 -0.7 V 의 하에서 2전극법으로 측정하였다. 광전류밀도는 sample 1의 경우는 최초 -0.019 mA/cm^2 에서 점차 감소하여 3시간 후에는 -0.015 mA/cm^2 를 보이고, sample 2는 -0.032 mA/cm^2 로부터 3시간 후 -0.023 mA/cm^2 값으로 감소함을 알 수 있다. 전 구간에서 모두 Sample 2의 광전류밀도 값이 더 높음을 알 수 있었으며, 그 정도는 약간 감소함도 함께 보여주고 있다.

PEC 분석 후, 각 샘플의 표면 안정성을 AFM image를 통해 확인하였다. Fig. 3(a), (b)는 각각 PEC 측정 전, (c), (d)는 PEC 측정 후 sample 1과 sample 2의 AFM morphology이다. PEC 전에는 테라스 형상의 잘 성장된 GaN epi 표면 형상을 보여주고 있다. 그런데, PEC 실험을 진행한 후에는 주기적으로 에칭되어 표면에 굴곡이 드러나고 있음을 확인하였다. 두 샘플의 표면거칠기 변화를 확인하기 위해 root mean square (RMS) 값을 비교하였다(Table 2). 신뢰성 실험 전의 sample (a), (b)의 RMS 값은 두 샘플 모두 각각 0.217 nm , 0.222 nm 의 안정된 값을 나타내고 있었다. 굴곡이 보였던 PEC 실험 후 sample (c), (d)의 경우는 RMS이 각각 0.432 nm , 0.349 nm 로 PEC 측정 전에 비해 표면 거칠기 값이 증가된 것으로 보이지만, 여전히 1 nm 이하의 아주 양호한 표면 거칠기 값을 보여주고 있는 것으로 보아, 시편의 신뢰성에는 큰 변화를 나타내지 않음을 알 수 있었다. 이를 통해 p-type GaN을 annealing 처리를 함으로써 효율은 향상되는 반면 광전기화학적 안

Table 2. 각 sample의 AFM 측정을 통한 표면거칠기

Sample	PEC 전 RMS [nm]	PEC 후 RMS [nm]
sample 1	0.217	0.432
sample 2	0.222	0.349

정성에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 HVPE를 이용하여 성장한 bulk GaN 위에 p-GaN을 MOCVD로 성장시킨 구조를, N_2 분위기 500°C 에서 1 분 동안 annealing 시킨후 광전극 셀로 제작하여 PEC 측정을 이용해 광전기화학적 특성을 보았다.

Hall effect 측정을 통한 annealing 후 캐리어 농도와 전도도, 이동도는 증가함을 보였고 저항은 감소하여 전기적 특성이 증가함을 확인 하였다. PEC 시스템에서는 annealing 후 Mg-H 복합체의 결합이 annealing에 의해 끊어지면서 p-GaN의 캐리어 농도가 증가하게 되었고, 전도대 전위 높이가 낮아져 광여기된 전자와 정공이 더 쉽게 이동되면서 산화환원 반응이 더 많이 발생하여 광전기화학적 특성이 1.5배 이상 향상됨을 확인할 수 있었다.

한편, AFM을 통해 표면 안정성을 확인하였을 때 sample 2는 sample 1에 비해 더 높은 광전류밀도값을 얻었음에도 불구하고 PEC 측정 전과 비교해 RMS 변화가 크게 나타나지 않았고, 이에 광전기화학적 안전성에 큰 변화를 주지 않았음을 알 수 있었다.

앞선 결과들을 통해 annealing 하지 않은 p-GaN과 비교할 때, 1.5배 이상의 광전류밀도값을 확인하였고, 물분해를 통해 안정적으로 수소를 발생시키기에 아주 적합한 전극으로 사용 될 수 있음을 확인하였다.

References

1. M. G. Walter, E. L. Warren, J. R. McKone, S. W. Boettcher, Q. Mi, E. A. Santori, and N. S. Lewis, "Solar Water Splitting Cells", Chem. Rev., 110(11), 6446 (2010).
2. S. Fan, B. Alotaibi, S. Y. Woo, Y. Wang, G. A. Botton, and Z. Mi, "High efficiency solar-to-hydrogen conversion on a monolithically integrated InGaN/GaN/Si adaptive tunnel junction photocathode", Nano. Lett., 15(4), 2721 (2015).
3. M. Pourbaix, "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", 2nd ed., pp.97, National Association of Corrosion Engineers, Houston (1974).
4. J. H. Edgar, "Properties of Group III Nitrides (Electronic Materials Information Service (EMIS) Datareviews Series)", 11, pp.3, IEE, London (1994).
5. J.-W. Yoon, J.-H. Bang, Y.-H. Ko, S.-H. Yoo, J.-K. Kim, and C.-W. Lee, "Power Module Packaging Technology with Extended Reliability for Electric Vehicle Applications", J. Microelectron. Packag. Soc., 21(4), 1 (2014).
6. H. S. Kim, H. J. Bae, S.-J. Kang, and J.-S. Ha, "MnO₂ cocatalyst effect on Photoelectrochemical Properties of GaN Photoelectrode", J. Microelectron. Packag. Soc., 23(4), 113 (2016).
7. S. Strite, and H. Morkoc, "GaN, AlN, and InN: A review", J. Vac. Sci. Technol. B., 10(4), 1237 (1992).
8. I. Akasaki, H. Amano, H. Murakami, M. Sassa, H. Kato, and K. Manabe, "Growth of GaN and AlGaIn for UV blue p-n junction diodes", J. Crystal Growth., 128, 379 (1993).

9. I. Akasaki, and H. Amano, "Widegap Column-III Nitride Semiconductors for UV/Blue Light Emitting Devices", *J. Electrochem. Soc.*, 141(8), 2266 (1994).
10. R. D. Dupuis, "Epitaxial growth of III-V nitride semiconductors by MOCVD", *J. Crystal Growth.*, 178, 56 (1997).
11. S. Ida, K. Yamada, T. Matsunaga, H. Hagiwara, Y. Matsu-moto, and T. Ishihara, "Preparation of p-Type CaFe_2O_4 Photocathodes for Producing Hydrogen from Water", *J. Am. Chem. Soc.*, 132, 17343 (2010).
12. K. Fujii, and K. Ohkawa, "Photoelectrochemical properties of p-type GaN in comparison with n-type GaN", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44(2), L909 (2005).
13. K. Fujii, T. Karasawa and K. Ohkawa, "Hydrogen gas generation by splitting aqueous water using n-type GaN photoelectrode with anodic oxidation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, L543 (2005).
14. K. Sato, K. Fujii, K. Koike, T. Goto, and T. Yao, "Anomalous time variation of photocurrent in GaN during photoelectrochemical reaction for H_2 gas generation in NaOH aqueous solution", *Phys. Status. Solidi. C.*, 6(2), S635 (2009).
15. K. Aryal, B. N. Pantha, J. Li, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, "Hydrogen generation by solar water splitting using p-InGaN photoelectrochemical cells", *Appl. Phys. Lett.*, 96, 052110 (2010).
16. D. H. Youn, M. Lachab, M. Hao, T. Sugahara, H. Takenaka, Y. Naoi, and S. Sakai, "Investigation on the p-type activation mechanism in Mg-doped GaN films grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, 631 (1999).
17. C. H. Kuo, S.J. Chang, Y.K. Su, L.W. Wu, J.K. Sheu, C.H. Chen, G.C. Chi, "Low Temperature Activation of Mg-Doped GaN in O_2 Ambient", *J. Appl. Phys.*, 41(2), p. L112(2002).
18. J. D. Hwang, and G. H. Yang, "Activation of Mg-doped P-GaN by using two-step annealing", *Appl. Surf. Sci.*, 253, 4694 (2007).
19. I. Waki, H. Fuchioka, M. Oshima, H. Miki, M. Okuyama, "Mechanism for low temperature activation of Mg-doped GaN with Ni catalysts", *J. Appl. Phys.*, 90, 6500 (2001).
20. S. J. Peaton, J. W. Lee, and C. Yuan, "Minority-carrier-enhanced reactivation of hydrogen-passivated Mg in GaN", *Appl. Phys. Lett.*, 68, 2690 (1996).
21. M. Miyachi, T. Tanaka, Y. Kimura, and H. Ota, "The activation of Mg in GaN by annealing with minority-carrier injection", *Appl. Phys. Lett.*, 72, 1101 (1998).
22. D. J. Kim, H. M. Kim, M. G. Han, Y. T. Moon, S. Lee, and S. J. Park, "Activation of Mg acceptor in GaN: Mg with pulsed KrF (248 nm) excimer laser irradiation", *Phys. Stat. Sol. (b).*, 228, 375 (2001).
23. Y. J. Lin, W. F. Liu, and C. T. Lee, "Excimer-laser-induced activation of Mg-doped GaN layers", *Appl. Phys. Lett.*, 84, 2515 (2004).
24. X. C. Wang, G. C. Lim, W. Liu, C. B. Soh, and S. J. Chua, "SIMTech Technical Reports", 6, 6 (2005).
25. S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa, "Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31(2), L139 (1992).
26. D. H. Youn, M. Lachab, M. Hao, T. Sugahara, H. Takenaka, Y. Naoi, and S. Sakai, "Investigation on the p-type activation mechanism in Mg-doped GaN films grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, 631 (1999).