

Characteristics of selective area growth of GaN/AlGaIn double heterostructure grown by hydride vapor phase epitaxy on r-plane sapphire substrate

S.H. Hong, H.S. Jeon, Y.H. Han, E.J. Kim, A.R. Lee, K.H. Kim, S.L. Hwang, H. Ha, H.S. Ahn and M. Yang[†]

Department of Applied Science, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

(Received October 30, 2008)

(Accepted November 21, 2008)

Abstract In this paper, a selective area growth (SAG) of a GaN/AlGaIn double heterostructure (DH) has been performed on r-plane sapphire substrate by using the mixed-source hydride vapor phase epitaxy (HVPE) with multi-sliding boat system. The SAG-GaN/AlGaIn DH consists of GaN buffer layer, Te-doped AlGaIn n-cladding layer, GaN active layer, Mg-doped AlGaIn p-cladding layer, and Mg-doped GaN p-capping layer. The electroluminescence (EL) characteristics show an emission peak of wavelength, 439 nm with a full width at half maximum (FWHM) of approximately 0.64 eV at 20 mA. The I-V measurements show that the turn-on voltage of the SAG-GaN/AlGaIn DH is 3.4 V at room temperature. We found that the mixed-source HVPE method with a multi-sliding boat system was one of promising growth methods for III-Nitride LEDs.

Key words Hydride vapor phase epitaxy, r-Plane sapphire, a-Plane GaN, Mixed-source, Selective area growth, Double heterostructure, HVPE, LED

HVPE 방법에 의해 r-plane 사파이어 기판 위의 선택성장된 GaN/AlGaIn 이중 접합구조의 특성

홍상현, 전현수, 한영훈, 김은주, 이아름, 김경화, 황선령, 하홍주, 안형수, 양민[†]

한국해양대학교 응용과학과 반도체물리전공, 부산, 606-791

(2008년 10월 30일 접수)

(2008년 11월 21일 심사완료)

요약 본 논문에서는 혼합소스(mixed-source) HVPE(hydride vapor phase epitaxy)방법으로 선택성장(SAG: selective area growth) GaN/AlGaIn 이중접합구조의 발광다이오드를 r-plane 사파이어 기판 위에 제작하였다. SAG-GaN/AlGaIn DH(double heterostructure)는 고온 GaN 버퍼층, Te 도핑된 AlGaIn n-클래딩층, GaN 활성층, Mg 도핑된 AlGaIn p-클래딩층, Mg 도핑된 GaN p-캡층으로 구성되어있다. GaN/AlGaIn 이중접합구조의 발광다이오드의 특성을 알아보기 위해 SEM을 통한 구조적 분석과 전류-전압 측정(I-V: current-voltage measurement), 전류-광출력(EL: electroluminescence) 측정을 통하여 전기적, 광학적 특성을 평가하였다.

1. 서론

화합물 반도체 발광다이오드 중 질화물 반도체 계열은 넓은 에너지 밴드갭의 특성이 있어 가시광선에서 자외선 영역까지 넓은 범위의 광전자소자의 재료로서 각광받고 있다[1-6]. 광전자소자로서 활용을 예로 들면, 핸드폰, PMP, PDA, MP3 등의 휴대용 전자기기의 액정표시소자

와 일상생활에서 접하는 모니터 back-light unit 등을 들 수 있다. 이 외에도 옥외용 대형 전광판, 교통 신호등, 자동차 계기판, 항만, 공항, 고층 빌딩의 경고 및 유도등, 그리고 의료용 조명 등과 같은 매우 다양한 활용범위를 가지고 사용되고 있다.

일반적으로 GaN를 기반으로 한 소자의 제작은 주로 c-plane [0001] 사파이어, SiC 그리고 free-standing GaN 기판이 사용되고 있다. 그러나 c-축면을 가지는 결정면 위에 광소자를 제작하는 경우에는 spontaneous 및 piezoelectric polarization에 의해서 전자 정공의 재결합 효율이 낮아지는 단점이 있기 때문에 최근의 연구에서는

[†]Corresponding author

Tel: +82-51-410-4782

Fax: +82-51-410-4781

E-mail: myang@hhu.ac.kr

무극성 또는 반극성 이중접합(nonpolar hetero)구조에 관한 연구가 현저히 증가하고 있으며 유기금속기상성장법(MOVPE : metal-organic vapor phase epitaxy)를 사용하여 r-plane 사파이어 기판과 a-plane SiC 기판 위의 a-plane GaN 성장과 LiAlO₂ 기판 위의 m-plane GaN 성장에 대한 연구가 활발하게 진행이 되고 있다[7, 8]. 그렇지만 반극성이나 무극성 GaN의 결정질은 c-축 방향의 GaN 결정질에 비하여 threading dislocation 이나 stacking faults 등의 결함밀도가 매우 높아서 이들 결함밀도를 줄이기 위해 여러 가지 연구들이 진행되고 있다. 특히 r-plane 사파이어 위에 a-plane GaN를 성장하는 경우에는 표면의 평탄도를 제어하는 것도 큰 문제가 되고 있다. 그렇지만 LED 구조에서 표면의 거칠기는 광추출 효율 향상에 오히려 도움이 될 수도 있을 것으로 기대한다. 따라서 본 연구에서는 r-plane 사파이어 위에 a-plane GaN 결정면을 가지는 광소자의 구현을 시도함에 있어서 비교적 경제적인 결정 성장방법의 하나인 혼합소스 HVPE 결정 성장 방법을 이용하여 DH구조의 LED를 제작하였으며 그의 표면거칠기를 포함한 구조적 형상 및 광학적 특성에 대해서 알아보았다.

본 논문에서는 혼합소스 HVPE(hydride vapor phase epitaxy)방법으로 선택성장 GaN/AlGaIn 이중접합구조의 발광다이오드를 r-plane 사파이어 기판 위에 제작하였다. 선택성장 GaN/AlGaIn 이중접합구조의 성장을 위해 mask와 multi-sliding boat system을 설계 및 제작하여 사용하였다. GaN/AlGaIn 이중접합구조의 발광다이오드의 특성을 알아보기 위해 SEM을 통한 구조적 분석과 전류-전압 측정(I-V: current-voltage measurement), 전류-광출력(EL: electroluminescence) 측정을 통하여 전기적, 광학적 특성을 평가하였다.

2. 실험

본 연구에서 이용한 혼합소스 HVPE 방법에서는 AlGaIn 층의 성장을 위해 미리 합성된 Ga과 Al의 혼합금속 위로 흐르는 HCl에 의해 형성된 Al-Ga 염화물과 NH₃ 사이의 화학적 반응에 의해 이루어지도록 하였다. 앞서 설명한 혼합소스에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 2는 혼합소스 HVPE 방법에서 사용되는 multi-sliding boat system을 나타내고 있다. 각 well은 분리되어 있고, 금속성 혼합소스로 채워져 있다. 고온 버퍼층(GaN)을 위한 Ga, n-클래딩층(Te-AlGaIn)을 위한 (Ga+Al+Te), 활성층(GaN)을 위한 Ga, p-클래딩층(Mg-AlGaIn)을 위한 (Ga+Al+Mg), 그리고 p-캡층(Mg-GaN)을 위한 (Ga+Mg)의 well로 구성되어 있다. HCl 내부 석영관은 보트의 덮개 부분인 top plate를 움직여서 반응하는 부

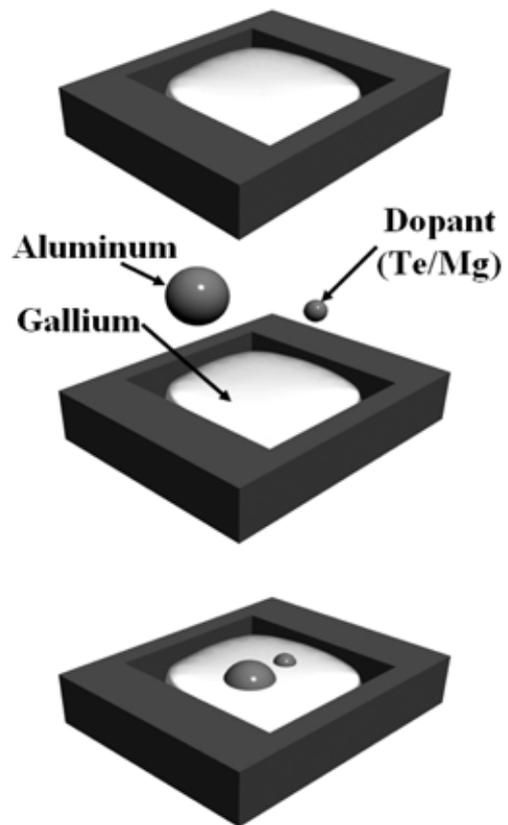


Fig. 1. Schematic of mixed-source.

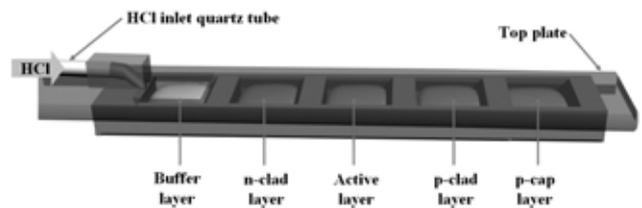


Fig. 2. Schematic of multi-sliding boat system.

분으로 위치시킬 수 있다. Multi-sliding boat가 놓여진 source zone은 900°C로 온도를 유지하였고, 기판이 놓여진 growth zone은 1090°C로 유지되었다.

DH 구조의 선택적 성장을 위해 r-plane 사파이어 기판 위에 GaN 버퍼층을 먼저 성장시켰다. 버퍼층의 성장 조건은 두 단계로 성장하였는데, a-plane GaN의 핵 생성을 위한 저온 버퍼층을 560°C에서 성장하였으며, DH구조 성장을 위해 비교적 평탄한 면을 가지는 GaN template를 820°C의 온도에서 성장하였다. 저온 버퍼층과 820°C에서 성장한 GaN template의 전체 두께는 약 2µm로 하였다.

버퍼층 성장 후 DH 구조를 선택적으로 성장하기 위하여 sputter로 SiO₂를 5000 Å 증착하여 wet etching 공정을 거쳐 mask pattern을 형성하였다. DH 구조는 1090°C에서 성장되었으며, 고온 버퍼층(GaN), n-클래딩층(Te-AlGaIn), 활성층(GaN), p-클래딩층(Mg-AlGaIn),

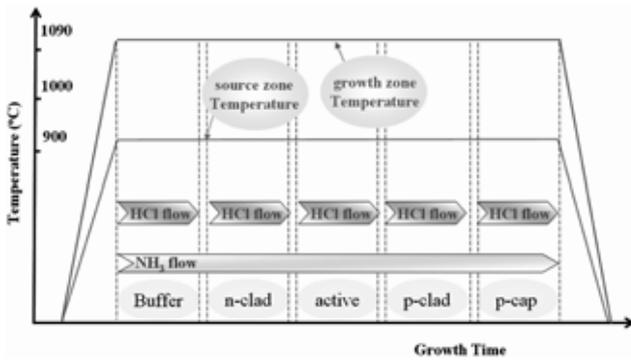


Fig. 3. Temperature-profile of growth.

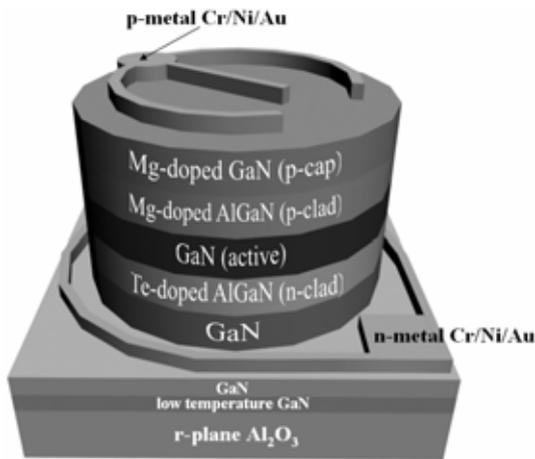


Fig. 4. Schematic of SAG-GaN/AlGaIn DH structure.

그리고 p-캡층(Mg-GaN)들은 각각 30초, 5분, 1분, 5분 그리고 1분의 성장시간으로 성장되었다. 각 층의 성장시간에 따른 성장온도를 Fig. 3에 나타내었다. 금속 전극은 p-캡층 (Mg-doped GaN) 위에 Cr/Ni/Au(150/150/500 Å)를 전자빔증착방법 (electron beam evaporator)으로 각각 증착시켰다. 열처리는 ohmic 접촉을 위해 N_2 분위기에서 $600^\circ C$ 로 5분간 실시하였다. 이와 같이 성장된 DH구조를 Fig. 4의 개략도로 나타내었다.

제조된 선택성장 GaN/AlGaIn DH의 구조분석을위해 SEM 사진을 촬영하여 단면과 표면의 구조를 확인하였으며, 전류-광출력 특성은 실온에서 직류전류를 주입하는 방식으로 평가되었고, 전류-전압 측정 또한 실온에서 실시되었다.

3. 결과 및 고찰

저온 버퍼층 위에 $820^\circ C$ 에서 성장한 GaN template의 단면 모습을 Fig. 5에 보였다. 일반적으로 상압에서 $1050^\circ C$ 이상의 고온으로 a-plane GaN을 성장하면 평탄한 면을 얻기가 매우 어렵고 표면이 거칠게 되면 선택적 성장을 위

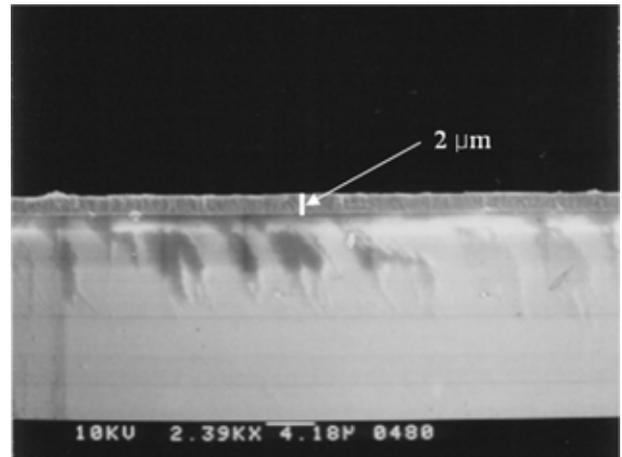


Fig. 5. Cross-sectional SEM image of 2-step GaN buffer layer.

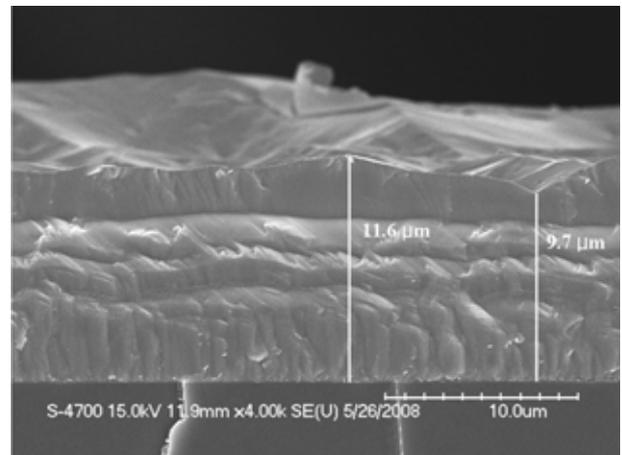


Fig. 6. Cross-sectional SEM image of SAG-GaN/AlGaIn DH.

한 mask pattern의 형성이 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서 실시한 GaN template 제작에서는 성장온도가 $820^\circ C$ 에서 다른 성장온도에 비해 비교적 평탄한 면을 얻을 수 있었고, 선택적 성장을 위한 평탄한 a-plane GaN을 얻기 위한 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 성장된 GaN/AlGaIn DH구조의 단면 SEM 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 DH구조는 표면이 매우 거친 형상을 보이고 있으며, 전체적으로 $7.8\sim 9.8\ \mu m$ 정도의 두께를 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, 표면의 굴곡을 확인하기 위한 SEM 표면 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 이런 울퉁불퉁한 표면과 계면을 가지는 이유는 r-plane 사파이어 기판의 격자구조와 그 위로 성장되는 a-plane GaN의 격자구조의 불일치와 비대칭성으로 인하여 생기는 현상으로 추정되며, 이에 대해 다른 연구기관들에서도 이러한 격자구조에 의한 영향을 알아보기 위해 시뮬레이션모델과 실험을 진행하고 있다[9].

반도체 소자에서 이와 같은 굴곡이나 울퉁불퉁한 표면은 소자의 성능에 좋지 않은 영향을 미친다. 하지만 본

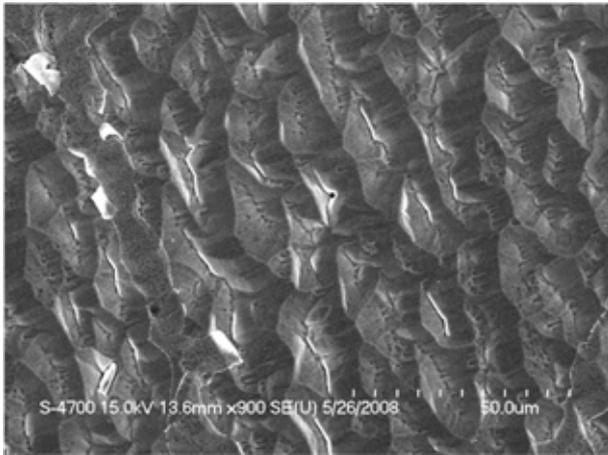


Fig. 7. Top-view SEM image of SAG-GaN/AlGaIn DH.

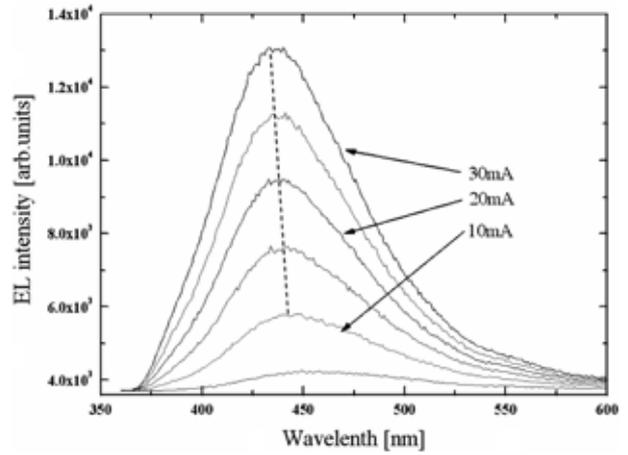


Fig. 9. Electroluminescence spectra depend on injection current of SAG-GaN/AlGaIn DH LED.

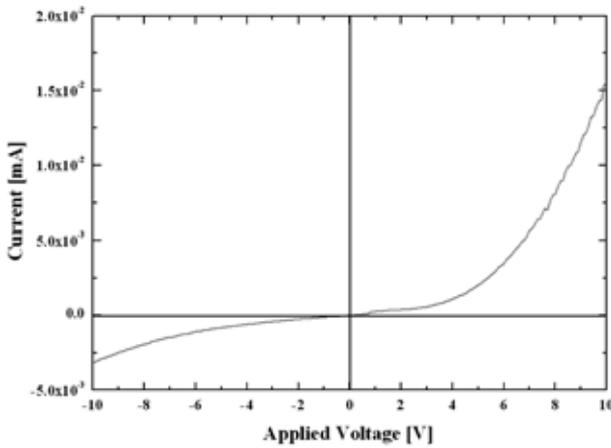


Fig. 8. Current-voltage characteristic of SAG-GaN/AlGaIn DH LED.

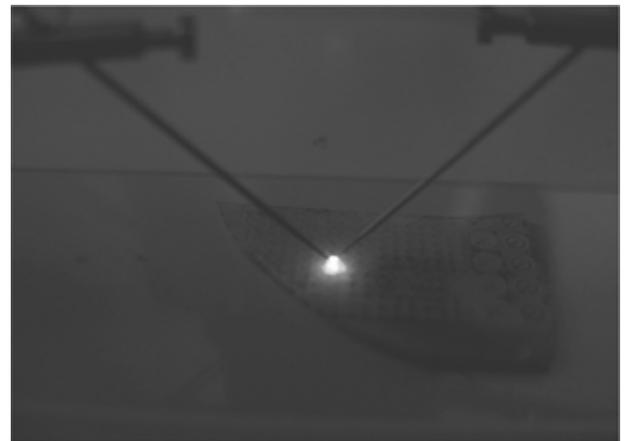


Fig. 10. Emission image of SAG-GaN/AlGaIn DH LED.

연구의 발광다이오드와 같은 광소자에서는 발광되는 표면적이 넓어짐으로서 광추출효율이 증대될 수 있을 것이라고 추정한다. 인위적으로 표면 거칠기를 조절하거나 일정 패턴을 만들어 광추출효율을 증대하는 연구가 곳곳에서 진행되고 있지만[10], 본 연구의 표면적 증가는 인위적인 공정을 추가하지 않고 자연적으로 생성될 수 있는 표면 거칠기를 성장변수로 제어하여 광소자 등에 응용할 수 있다는데 의의가 있다.

GaN/AlGaIn DH 발광다이오드의 소자성능을 평가하기 위해 I-V 측정과 EL 측정을 실시하였다. Fig. 8은 I-V 특성 곡선을 나타낸 그래프이다. 완성된 소자는 웨이퍼 상태로 측정되었으며, turn on 전압은 3.4 V이고 저항은 341 Ω로 측정되었다. Fig. 9는 EL 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 활성층이 GaN 임에도 440 nm 부근의 장파장의 스펙트럼을 보이는 이유는 클래드층으로 사용된 AlGaIn 층으로부터의 임의의 불순물이 확산되어 밴드-불순물준위 간의 천이에 의한 발광에 그 원인이 있을 것

로 추측된다. 실온에서 주입전류를 변화시키면서 측정한 결과, 중심파장은 10 mA 일 때 442 nm, 15 mA 일 때 439 nm, 20 mA 일 때 438 nm, 25 mA 일 때 437 nm, 30 mA 일 때 436 nm로서 주입 전류가 증가함에 따라 blue shift 현상이 나타났다. 이는 주입 전류가 증가함에 따라 캐리어의 과도한 발생에 의한 band filling 현상 등에 의하여 blue shift 현상을 나타낸 것으로 판단된다. 본 연구에서 제작된 발광다이오드는 추후 분극의 영향을 받는 c-plane 사파이어 기판을 이용한 발광다이오드를 비교적 동일한 조건에서 제작하여 비교 및 개선방향에 대한 논의가 필요할 것으로 보인다. Fig. 10에 20 mA에서 동작하는 GaN/AlGaIn 이중접합구조에서의 발광하는 모습을 보였다.

4. 결 론

본 논문에서는 혼합소스 HVPE 법을 이용하여 DH구조

조의 발광다이오드를 제작하였다. GaN/AlGaIn DH구조는 GaN 버퍼층, Te 도핑된 AlGaIn n-클래딩층, GaN 활성층, Mg 도핑된 AlGaIn p-클래딩층 그리고 Mg 도핑된 GaN p-캡층으로 구성되어 있다.

혼합소스 HVPE에 의해 선택적 성장방법으로 제작된 발광다이오드의 전기적, 광학적 특성의 개선을 위해 이 종접합구조의 결정질 향상 및 공정 조건의 개선이 필요하다. 하지만, 혼합소스 HVPE 방법은 질화물 반도체 발광다이오드의 새로운 제작 방법으로서 충분한 가능성이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2008년 부산테크노파크의 지원 하에 연구되었음.

참고 문헌

- [1] S. Nakamura and G. Fasol, *The Blue Laser Diode* (Springer, Berlin, 1997) 171.
- [2] V. Adivarahan, J. Zhang, A. Chitnis, W. Shuai, J. Sun, R. Pachipulusu, M. Shatalov and M.A. Khan, "Sub-milliwatt power III-N light emitting diodes at 285 nm", *Jpn. J. Appl. Phys.* 41 (2002) L435.
- [3] T.G. Zhu, U. Chowdhury, J.C. Denyszyn, M.M. Wong and R.D. Dupuis, "AlGaIn/AlGaIn UV light-emitting diodes grown on sapphire by metalorganic chemical vapor deposition", *J. Cryst. Growth* 248 (2003) 548.
- [4] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki, "P-Type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI)", *Jpn. J. Appl. Phys.* 28 (1989) L2112.
- [5] P. Reterana, M. Albrecht and J. Neugebauer, *Nitride Semiconductors: Handbook on Materials and Devices* (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003) 7-12.
- [6] J.I. Pankove and T.D. Moustakas, *Gallium Nitride II: Semiconductor and Semimetals* (Academic Press, New York, 1999) 57.
- [7] M.D. Craven, F. Wu, A. Chakaborty, B. Imer, U.K. Mishra, S.P. DenBaars and J.S. Speck, "Threading dislocation reduction via laterally overgrown nonpolar (11-20) a-plane GaN", *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 1201.
- [8] E. Kuokstis, C.Q. Chen, M.E. Gaevski, W.H. Sun, J.W. Yang, G. Simin, M. Asif Khan, H.P. Maruska, D.W. Hill, M.C. Chou, J.J. Gallagher and B. Chai, "Polarization effects in photoluminescence of C- and M-plane GaN/AlGaIn multiple quantum wells", *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 4130.
- [9] R. Chandrasekaran, A.S. Ozcan, d. Deniz, K.F. Ludqig and T.D. Moustakas, "Growth of non-polar (11-20) and semi-polar (11-26) AlN and GaN films on the R-plane sapphire", *Phys. Stat. Sol. (c)* 4, No. 5 (2007) 1689.
- [10] H.G. Kim, T.V. Cuong, H.K. Kim, H.Y. Kim, J.H. Ryu, M.G. Na and C.H. Hong, "InGaIn/GaN light emitting diode with R-plane polygonal facet deflectors", *Phys. Stat. Sol. (c)* 5, No. 6 (2008) 2267.