

P형 GaN 중간층이 삽입된 녹색 발광다이오드 특성 평가

김은진 · 김지민 · 장수환[†]

단국대학교 화학공학과
16890 경기도 용인시 수지구 죽전동 126
(2015년 10월 13일 접수, 2015년 11월 9일 수정본 접수, 2015년 11월 12일 채택)

Evaluation of green light Emitting diode with p-type GaN interlayer

Eunjin Kim, Jimin Kim and Soohwan Jang[†]

Department of Chemical Engineering, Dankook University, 126, Jukjeon-dong, Suji-gu, Yongin, Gyeonggi, 16890, Korea
(Received 13 October 2015; Received in revised form 9 November 2015; accepted 12 November 2015)

요 약

녹색 발광다이오드의 다량자우물층과 전자막이층 사이에 p형 중간층 삽입이 소자의 특성에 미치는 영향이 소자 시뮬레이션을 통하여 연구되었다. 중간층의 Mg 도핑 깊이에 따른 발광다이오드의 전류-전압, 발광파장, 누설전류, 광효율 특성이 분석되었으며 최적의 발광 특성을 나타내는 소자 구조가 제시되었다. 중간층 전 영역이 p형으로 도핑된 구조와 30 nm까지 도핑된 구조는 누설전류 억제층을 통하여 녹색 발광다이오드의 가장 큰 문제점 중에 하나인 효율 드롭 현상을 효과적으로 완화하였다. 특히, 30 nm까지 도핑된 구조는 전류-전압 및 발광 특성에 있어서 가장 향상된 결과를 보였다.

Abstract – Effects of interlayer insertion between multi-quantum well and electron blocking layer of green light emitting diode on diode performances were studied by device simulation. Dependence of Mg doping depth on characteristics of current-voltage, emitting wavelength, leakage current, and external quantum efficiency was investigated, and the optimum diode structure was presented. Device structures with interlayers doped in entire region and up to 30 nm showed remarkable reduced leakage current and effectively relieved efficiency droop which is one of the biggest challenges in green light emitting diode. Furthermore, the most improved characteristics in current-voltage and electroluminescence was obtained by the latter structure.

Key words: Light Emitting Diode, GaN, Efficiency Droop

1. 서 론

1907년 SiC에 의한 전기장발광(electroluminescence) 현상이 발견된 이래로 반도체 물질을 이용한 발광 현상에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다[1]. 이를 바탕으로 GaN 계열의 화합물반도체 물질에 기반한 발광다이오드(light emitting diode)는 낮은 소비전력, 긴 수명, 빠른 응답속도 등의 장점으로 디스플레이 및 조명용으로 널리 사용되고 있으며, 실외 조명을 포함한 조명용 발광다이오드의 활용은 더욱 확대될 전망이다[2,3]. 그러나, 현 시점에서 조명용 발광다이오드는 고전류의 주입 시 발광효율이 떨어지는 효율 드롭(efficiency droop)의 문제점을 안고 있다. 특히, 25% 이상의 인듐이 포함된 InGaN 발광층을 사용하는 녹색 발광다이오드에서 위와 같은 문제점이 더욱 크게 작용하고 있다[4]. 효율 드롭의 원인은 여전히 논쟁 중에

있지만, (1) 결함에 의한 재결합(defect-assisted recombination), (2) 오제 재결합(Auger recombination), (3) 누설전류(leakage current)가 원인으로 파악된다[5]. 결함에 의한 재결합 현상은 발광층의 인듐이 고온의 후속 공정에 의한 인듐 클러스터 형성과 관련이 있다[6]. 양자우물 내 인듐 클러스터에 의해 전자 및 정공 캐리어(carrier)의 국지화(localization)가 일어나 낮은 전류 주입 시에는 결함의 영향을 받지 않는다. 고전류 주입 시 인듐 클러스터에 의한 양자우물은 높은 밀도의 캐리어에 의해 채워지고 남은 캐리어들이 결함 부위에서 쇼클리-리드-홀 재결합(Schokley-Read-Hall recombination)을 통하여 비발광 재결합(non-radiative recombination)을 일으키는 비율이 증가하여 효율 드롭 현상을 일으킨다[7]. 오제 재결합은 고전류 주입 시 전도대(conduction band)의 전자 및 가전자대(valence band)의 정공과의 재결합 에너지가 전도대의 고밀도 캐리어에 의한 상위 에너지 준위의 역위에 기여하여 비발광 재결합을 일으키는 현상을 일으킨다[8,9]. 마지막 원인으로 고전류의 주입 시 음극의 전자는 다양자우물을 뛰어 넘어 양극으로 이동하여 비발광 재결합을 일으키는 누설전류 현상이 있다[10,11]. 일반적으로 누설전류 방지를 위하여

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jangmountain@dankook.ac.kr

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.

양자우물구조와 p형 GaN 사이에 전자막이층(electron blocking layer)을 사용한다. 그러나, 양자우물구조의 장벽층(barrier layer)과 전자막이층 계면에서의 분극전계(polarization field)에 의한 전자 넘침(overflow) 현상을 막기에 충분하지 않다. 더욱이 25% 이상의 높은 인듐이 주입되는 녹색 발광다이오드의 경우 격자상수 불일치로 인한 밴드 휘어짐(band bending)에 의해 더 많은 누설전류를 일으킬 수 있다[4].

본 연구를 통하여 녹색 발광다이오드의 효율 드롭 현상 개선을 위해 p형 GaN 중간층을 전자막이층(electron blocking layer)과 다양자우물구조(multi-quantum well)에 삽입하여 녹색 발광다이오드의 누설전류를 감소시키는 구조가 제시되었다. P형 GaN 중간층의 도핑 깊이에 따른 소자의 전류-전압, 발광과장, 누설전류, 광효율 특성이 소자 시뮬레이션을 통하여 연구되었다.

2. 실험

Fig. 1은 시뮬레이션에서 사용된 발광다이오드의 구조를 나타낸다. 200 nm의 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 농도를 갖는 n형 GaN 위에 6층의 다양자우물구조(multi-quantum well)가 적용되었다. 다양자우물층은 녹색 영역의 발광을 위한 28%의 인듐이 포함된 2.5 nm 두께의 $\text{In}_{0.28}\text{GaN}$ 발광층과 15 nm의 GaN 장벽층으로 이루어진다. 다양자우물구조 상부에 45 nm의 p형 GaN 중간층이 삽입되었다. p형 도핑이 적용되지 않은 구조를 A구조, $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 p형 도핑이 상단으로부터 15, 30, 45 nm까지 적용된 구조를 각각 B, C, D구조라 한다. 중간층 상단에 20 nm 두께의 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 p형 $\text{Al}_{0.15}\text{GaN}$ 전자막이층이 위치한다. 마지막으로 홀 공급을 위한 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 p형 GaN층이 존재한다. p형 중간층을 제외한 모든 구조의 두께, 도핑, 물질은 동일하며 시뮬레이션 계산시간을 단축하기 위하여 소자의 수평길이는 1000 nm로 한정되었다. 시뮬레이션을 위하여 Silvaco사의 Atlas™ 프로그램이

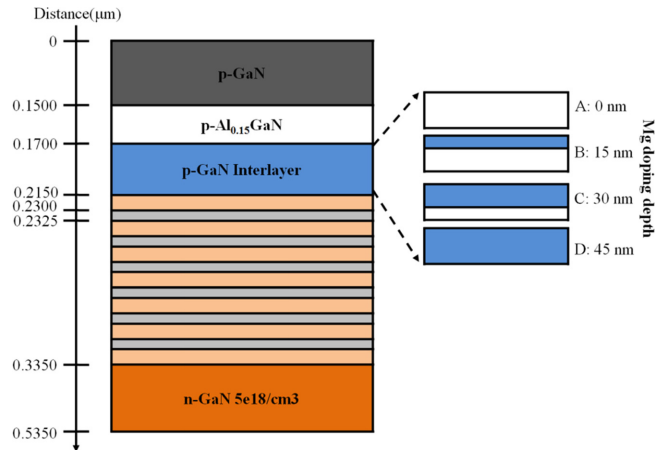


Fig. 1. Schematic diagram of the simulated LED structure with Mg doped interlayers.

사용되었다. 푸아송 방정식(Poisson's equation) 및 연속방정식(continuity equation)이 사용되었으며, 페르미-디랙 통계(Fermi-Dirac statistics)를 이용한 표류-확산 이동(drift-diffusion transport), 쇼클리리드-홀 재결합, 오제 재결합, 자발적(spontaneous) 및 압전 분극(piezoelectric polarization), 광발광(optical generation)이 고려되었다. 소자 시뮬레이션을 위한 물질 변수는 Atlas™ 프로그램 및 문헌값을 적용하였다[5].

3. 결과 및 고찰

Fig. 2은 구조 A, B, C, D에 대하여 인가전압이 5V일 때 발광 재결합율(radiative recombination rate)을 나타낸다. 모든 구조에 대해

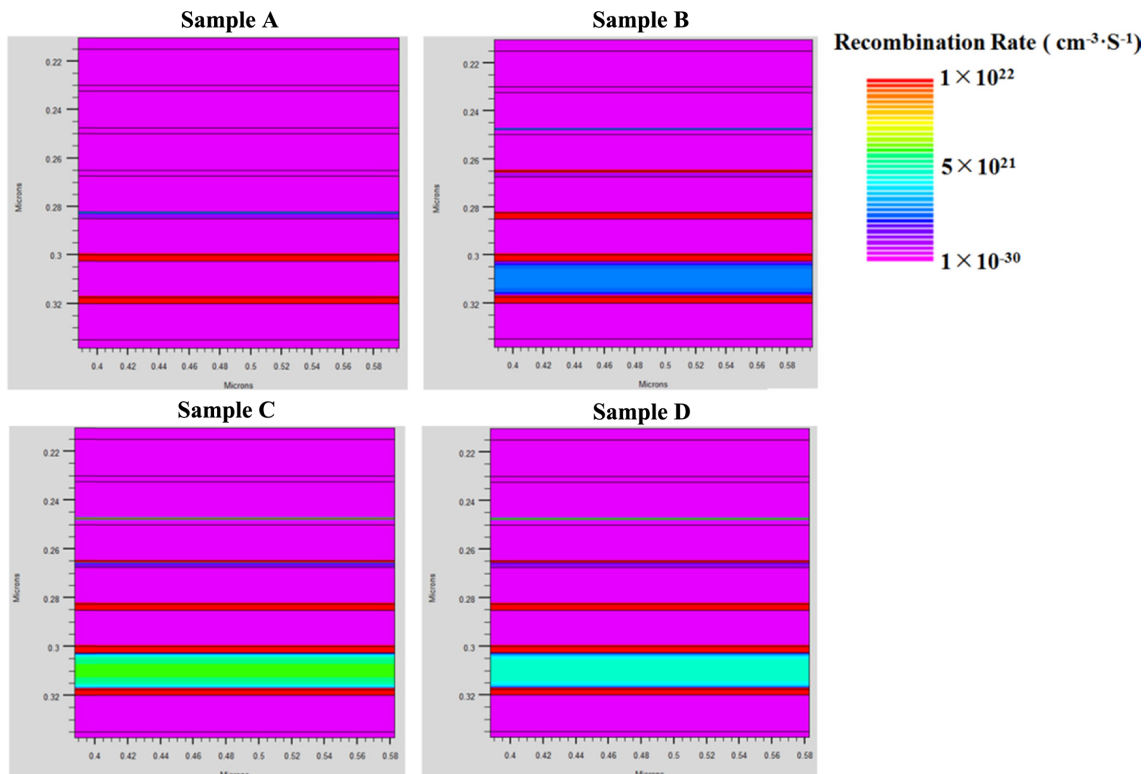


Fig. 2. Cross-sectional views of recombination rates for quantum-well regions of sample A, B, C, and D at 5 V.

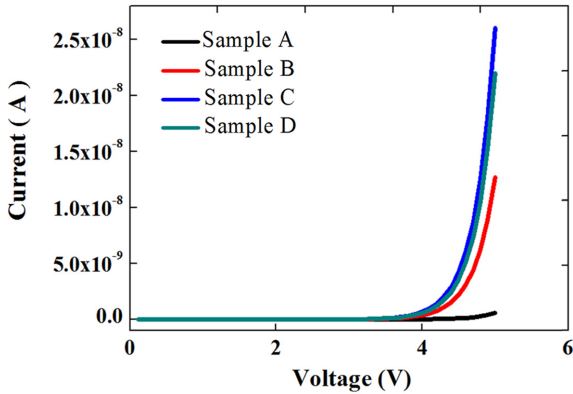


Fig. 3. Current-voltage characteristic of sample A, B, C, and D.

서 양자우물에서의 뚜렷한 발광현상을 관찰할 수 있으며, n형 GaN 층에 가까운 양자우물일수록 높은 전자농도를 가짐으로 높은 발광 재결합율을 보인다. 인가전압이 증가함에 따라 n형 GaN층에 가까운 양자우물부터 전자 넘침(overflow)에 의한 장벽층에서의 발광 재결합이 소량 관찰되었다.

Fig. 3은 인가전압 증가에 따른 A, B, C, D의 구조를 갖는 녹색 발광다이오드의 전류-전압 특성을 보여준다. 중간층의 도핑 깊이에 관계 없이 모든 구조는 유사한 문턱전압(turn-on voltage)을 나타내나, 동일 인가전압 하에서 상이한 전류값을 나타냄을 알 수 있다. 도핑이 되지 않은 중간층이 삽입된 A구조는 상대적으로 낮은 전류값을 나타내는 반면 전 영역의 중간층이 도핑된 구조 D와 30 nm까지 도핑된 구조 C는 유사한 전류값을 보이며 15 nm까지 도핑된 구조 B는 중간층의 전류값을 나타낸다. 도핑의 깊이에 따라 상이한 전류값을 나타내는 것은 중간층의 도핑 증가에 따른 저항 감소 및 양자우물 내 높은 정공 농도에 의한 발광 재결합 전류의 증가에 따른 것으로 사료된다. Fig. 4는 인가전압 5 V에서의 전기장발광 스펙트럼을 나타낸다. 구조 C와 D에서 매우 증가된 512 nm의 녹색발광을 관찰할 수 있다. 구조 A, B, C, D의 전기장발광 스펙트럼에 대한 반가폭은 각각 23.12, 22.20, 22.17, 22.18 nm를 보였으며 구조 C는 가장 강한 발광 및 가장 적은 반가폭을 나타냈다. 이를 통해 도핑된 중간층 삽입을 통한 양자우물 내 발광재결합 향상을 확인할 수 있다.

도핑이 된 중간층 삽입을 통하여 누설전류를 감소시킬 수 있으며 결과적으로 효율 드롭 현상을 완화할 수 있다[4]. Fig. 5는 5V 인가

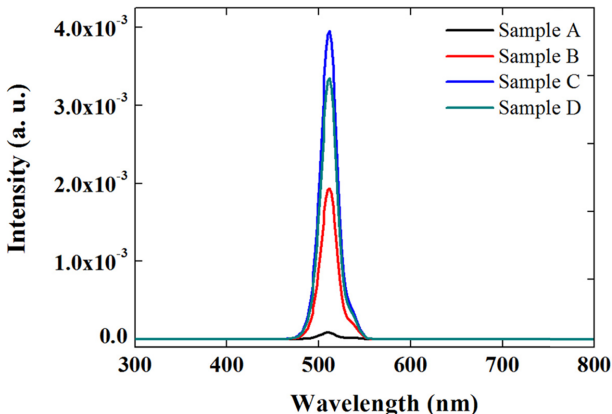


Fig. 4. Electroluminescence spectra of sample A, B, C, and D at 5 V.

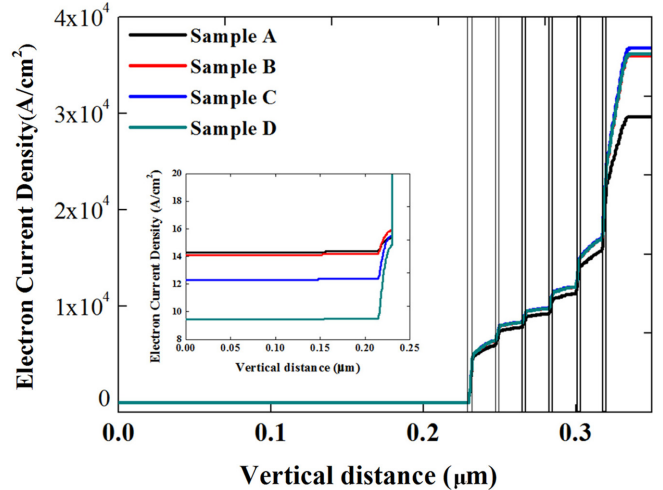


Fig. 5. Electron current density distribution in the vertical direction at 5 V. The inset is the enlarged electron current density in the vertical range from 0 to 0.25 μm .

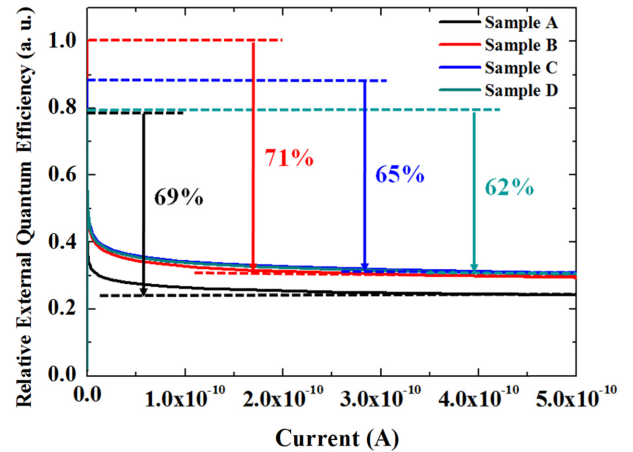


Fig. 6. Relative external quantum efficiency of sample A, B, C, and D as a function of the injection current.

전압 하에서 P형 GaN층으로의 위치에 따른 누설전류 값을 나타낸다. 구조 A와 B 대비 전영역이 Mg으로 도핑된 구조 D는 양자우물 상단 즉, 0.215 μm 이하에서 가장 적은 누설전류를 나타내며 중간층 삽입을 통하여 누설전류가 효과적으로 억제되었음을 알 수 있다. 중간층의 p형 도핑을 통하여 양자우물 내 정공 주입을 향상시켜 발광 재결합을 도움으로써 전자 넘침에 의한 누설전류 생성을 감소시킬 수 있다. 이와 같은 p형 중간층 삽입을 통한 누설전류의 감소는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 효율 드롭을 완화시킴을 확인할 수 있다. 도핑이 되지 않은 구조 A의 경우 69%의 효율 저하를 보이는 반면 도핑된 중간층 구조를 갖는 구조 C와 D는 각각 65, 62%의 완화된 효율 드롭 현상을 나타내었다. 전 영역이 도핑된 구조 D는 30 nm까지 도핑된 구조 C 대비 효과적인 누설전류 억제를 통한 향상된 효율 드롭 완화를 보이지만, Fig. 3과 4에서 나타내는 바와 같이 구조 C보다 광 발광 특성이 우수하지 않다. 일반적으로 고온후속 공정에 의한 Mg의 양자우물 내 확산에 의한 광발광 특성의 열화가 알려져 있다[4,5]. 전체적으로 Mg으로 도핑된 구조 D는 구조 C 대비 양자우물 내 Mg 확산에 의한 광발광 특성 저하를 나타낼 가능성이 크다. 그러나, 본

연구는 시뮬레이션에 의한 결과로 고온 공정에 의한 Mg 확산은 구조 C의 우수한 발광 특성에 대한 원인이 될 수 없다. 구조 C의 도핑이 되지 않은 15 nm 영역은 p형으로 도핑된 구조 D 대비 전도대의 에너지가 낮아 양자우물 전도대의 에너지 밴딩(energy banding)을 유도하여 상단에 위치한 양자우물 내 전자의 밀도가 구조 D 대비 증가하였음을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다. 상단의 양자우물에 보다 증가된 전자 밀도를 갖는 구조 C는 구조 D 대비 증가된 발광 재결합을 나타내어 우수한 녹색 발광의 결과를 낳았다.

4. 결 론

녹색 발광다이오드의 효율 드롭 현상의 원인 중 하나인 누설전류 감소를 위하여 다양자우물 구조와 p형 GaN 사이에 p형으로 도핑된 중간층이 삽입된 구조가 제시되었으며 소자 시뮬레이션을 통하여 소자의 특성에 미치는 영향이 연구 되었다. 중간층 내 p형 도핑의 깊이를 달리한 구조 중, 전 영역 및 30 nm 깊이로 도핑된 중간층 구조의 발광다이오드가 효과적인 누설 전류 차단에 의한 효율 드롭 완화의 결과를 나타냈다. 30 nm까지 도핑된 중간층 구조는 양자우물 내 증가된 전자농도로 인하여 가장 향상된 발광 특성을 나타내었으며, 실제 소자 제작 시 Mg 확산에 의한 양자우물내 침투를 막아 효과적인 누설전류 차단 중간층으로 작용할 것으로 예상된다.

감 사

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-나노-소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015M3A7B7045185).

References

1. Baik, K. H., Kim, H., Kim, J., Jung, S. and Jang, S., "Nonpolar Light Emitting Diode with Sharp Near-ultraviolet Emissions Using Hydrothermally Grown ZnO on p-GaN;" *Appl. Phys. Lett.*, **103**,

- 091107(2013).
2. Park, K. S., Swain, B., Kang, L. S., Lee, C. G., Uhm, S., Hong, H. S., Shim, J.-G. and Park, J.-J., "Study on Leaching Behavior for Recovery of Ga Metal from LED Scraps;" *App. Chem. Eng.*, **25**(4), 414(2014).
3. Chung, W., Yu, H. J., Park, S. H., Chun, B.-H. and Kim, S. H., "Luminescence Properties of White LED with Different CdSe nanoparticles Phosphor Layer;" *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(3), 320(2011).
4. Jun, Z., Zhuo, X.-J., Li, D.-W., Yu, L., Li, K., Zhang, Y.-W., Diao, J.-S., Wang, X.-F. and Li, S.-T., "Effect of Mg Doping in GaN Interlayer on the Performance of Green Light-Emitting Diodes;" *IEEE Photonics Technology Letters*, **27**(2), 117(2015).
5. Piprek, J., "Efficiency Droop in Nitride-based Light-emitting Diodes;" *Phys. Status Solidi A*, **207**(10), 2217(2010).
6. Mukai, T., Yamada, M. and Nakamura, S., "Characteristics of InGaN-Based UV/Blue/Green/Amber/Red Light-Emitting Diodes;" *Jpn. J. Appl. Phys. 1*, **38**, 3976(1999).
7. Hsueh, T.-H., Sheu, J.-K., Lai, W.-C., Wang, Y.-T., Kuo, H.-C. and Wang, S.-C., "Improvement of the Efficiency of InGaN-GaN Quantum-Well Light-Emitting Diodes Grown With a Pulsed-Trimethylindium Flow Process;" *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **21**, 414(2009).
8. Meneghini, M., Trivellin, N., Meneghesso, G., Zanoni, E., Zehnder, U. and Hahn, B., "A Combined Electro-optical Method for the Determination of the Recombination Parameters in InGaN-based Light-emitting Diodes;" *J. Appl. Phys.*, **106**, 114508(2009).
9. Laubsch, A., Sabathil, M., Baur, J., Peter, M. and Hahn, B., "High-Power and High-Efficiency InGaN-Based Light Emitters;" *IEEE Trans. Electron Devices*, **57**, 79(2010).
10. Knauer, A., Brunner, F., Kolbe, T., Küller, V., Rodriguez, H., Einfeldt, S., Weyers, M. and Kneissl, M., "MOVPE Growth for UV-LEDs;" *Proc. SPIE*, **7231**, 72310G(2009).
11. Vampola, K. J., Iza, M., Keller, S., DenBaars, S. P. and Nakamura, S., "Measurement of Electron Overflow in 450 nm InGaN Light-emitting Diode Structures;" *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 061116(2009).