

## ZnSSe:Te/ZnMgSSe DH 구조 청색~녹색발광다이오드의 개발

이 홍 찬†

(원고접수일 : 2002년 8월 4일, 심사완료일 : 2002년 10월 14일)

### Development of ZnSSe:Te/ZnMgSSe DH structure Blue~Green Light Emitting Diodes

Hong-Chan Lee†

**Key words** : Light Emitting Diode(발광다이오드), Blue(청색), Green(녹색), ZnSSe:Te

#### Abstract

The optical properties of  $ZnS_ySe_{1-x-y}Te_x$  ( $x < 0.08$ ,  $y \sim 0.11$ ) alloys grown by molecular beam epitaxy (MBE) have been investigated by photoluminescence (PL) and PL-excitation (PLE) spectroscopy. Good optical properties and high crystal quality were established with lattice match condition to GaAs substrate. At room temperature, emission in the visible spectrum region from blue to green was obtained by varying the Te content of the ZnSSe:Te alloy. The efficient blue and green emission were assigned to  $Te_1$  and  $Te_n$  ( $n \geq 2$ ) cluster bound excitons, respectively. Bright green (535 nm) and blue (462 nm) light emitting diodes (LEDs) have been developed using ZnSSe:Te system as an active layer. The turn-on voltage of 2.1 V in current-voltage characteristics is very small compared to that of commercial InGaN-based LEDs (>3.4 V), indicating the formation of a good ohmic contact due to the optimized p-ZnSe/p-ZnTe multi-quantum well (MQW) superlattice electrode layers.

#### 1. 서 론

가시광 발광다이오드(Light Emitting Diode: LED)는 최근 고효율화에 동반하여 다양한 분야에 응용되고 있다. 최초에는 옥내용의 표시등에 그 용도가 제한되었으나, 자동차 계기판 및 정지램프, 교통신호기, 대면적 칼라디스플레이, 바이오 테크

놀로지 분야 등으로 그 용도가 확대되고 있다.

백색 LED 조명제품은 백열전구 및 형광등보다 에너지 소모량이 적고 (약1/5), 수명이 반영구적으로 길며 (약5만 시간 이상), 환경친화적인 조명제품으로 각광 받고 있으며, 특히 LCD(liquid crystal display) 백라이트, 자동차 조명, 의료기구 등 등의 특수용도의 차세대 조명제품으로 확대 적

† 책임저자 (일본Tottori University 대학원), E-mail : leehc3@hanmir.com

용되고 있다<sup>1)</sup>.

현재 조명등으로는 백열전구 및 형광등이 거의 지배적으로 사용되고 있으나, 그 사용수명은 각각 약 2000시간 및 8000시간 정도로 알려져 있다. 하지만 그 사용처가 제조공장이나, 특히 진동이 심한 선박의 경우라면 전구의 필라멘트 단락 또는 파손 등의 취약점을 안고 있다. 만약 백색LED 조명등이 선박에 사용된다면 에너지 절약은 물론, 유지·보수 등에 필요한 인력 절감효과가 클 것으로 사료된다.

최근, 인터넷에 대응하는 휴대폰에는 칼라 액정 디스플레이(LCD)가 필수부품이 되었다. 칼라액정 표시는 백색광원(白色光源)이 필요하게 되었지만, 휴대폰의 크기 및 동작전압의 제약 등으로부터 백라이트로써 백색 LED가 가장 적합하다고 생각된다<sup>2)</sup>. 현재, 휴대폰에 사용중인 백색 LED는 GaN 계 발광다이오드가 주로 사용되고 있다. 이것은 백색광을 얻기 위해 InGaN 청색 LED의 칩(chip) 표면에 YAG형광체를 분산시켜 에폭시 수지를 코팅하는 등 제작 공정이 복잡하다<sup>3)</sup>. 이 백색 LED의 동작전압은, InGaN계 청색 LED와 같은 3.6 V 정도이다. 휴대폰에 사용되고 있는 Li(lithium)이온 2차전지의 평균 동작전압은 3.6 V 이고, 안정하게 동작하기 위해서는 승압(昇壓)회로 등의 전자회로가 필요하다. 게다가 저소비전력의 관점에서, 보다 더 저전압에서 동작하는 LED가 필요성이 대두되고 있다<sup>4)</sup>.

필자는, II-VI족 화합물 반도체인 ZnSe(zinc selenide)계 재료를 사용하여 청색(462 nm)~녹색(535 nm) 발광하는 저전압구동(2.1 V)의 LED의 제작에 성공하였다<sup>4a)5)</sup>. 이 LED는, ZnSSe(zinc sulfur selenide)에 미량 doping(첨가)한 Te(tellurium)의 농도변화량에 따라서 청색(Te=0.5%), 청-녹색(2~3%), 녹색(4~5%)발광을 한다. 또한, 공명터널(共鳴 tunnel)효과를 이용한 p형 ZnSe/ZnTe 초격자전극(superlattice electrode: SLE)의 최적화 설계의 결과, InGaN계 LED의 구동전압(3.6 V)보다 낮은 전압에서 구동할 수 있게 되었다. 본 논문에서는, Te doping한 ZnSSe 박막(thin film)의 성장과 그 물성적 특성에 관하여 기술하고, 저전압에서 구동하는 청색~

녹색발광 LED의 개발·제작에 관한 연구결과 및 Te의 백색 LED에 응용가능성을 소개하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 molecular beam epitaxy(MBE) 장치의 개략도이다. MBE장치는 여러 개의 챔버(chamber), 즉 성장실(growth chamber), 운반실(transfer chamber), 교환실(load chamber) 등으로 구성되어 있다. 각 챔버는 gate valve로 차단되어 있고, 각각 ion pump 또는 cryogenic pump 등에 의해서  $10^{-10} \sim 10^{-11}$  Torr 정도의 초진공상태를 유지할 수 있다. 따라서 성장실은 잔류불순물 분자 ( $H_2O$ , C,  $O_2$ ,  $CO_2$  등)가 거의 존재하지 않은 상태이며, 고순도(高純度)의 결정을 성장할 수 있으며, 원자레벨(atomic level)에서 박막의 제어가 가능하다.

성장실의 잔류분자는 질량분석기(quadropole mass spectrometer: QMS)에 의해서 측정이 가능하다. 잔류분자의 양이 적을수록 성장층의 결정표면에 부착되는 불순물이 억제되어 순도(純度)가

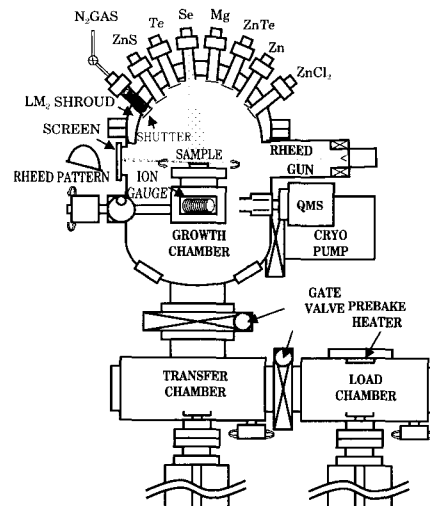


Fig. 1 Schematic diagram of molecular beam epitaxy(MBE) apparatus.

높은 결정을 얻을 수 있다.

성장실에는 RHEED(reflection high energy electron diffraction)가 장착되어 있고, 성장 중인 결정의 관찰에 가장 유력한 수단으로 사용된다. 또한, 성장표면의 평가·분석, 성장속도 및 혼합결정 등의 성장조건 설정 등 다양한 목적으로 광범위하게 사용된다.

### 2.2 결정 성장 및 평가 방법

MBE장비를 이용하여 n<sup>+</sup>-GaAs (100) 기판 상에 이하의 각 박막 및 LED를 성장·제작하였다. 사용한 원료로는 Zn(6N), Se(6N), ZnS(6N), Te(6N), Mg(6N), ZnTe(6N)이고, n형 dopant로는 ZnCl<sub>2</sub>, p형 dopant로는 radio-frequency (RF) plasma source에 의한 active nitrogen이 각각 사용되었다. 성장온도(Tsub.)는 230°C로 각 샘플 및 LED를 성장시켰다.

박막형 샘플은 ZnSe:Te (Te:0.2 - 4.2%) 및 ZnSSe:Te (Te:0.4 - 7.4, S: ~11 %)을 성장시켰다. 샘플의 성장속도는 약 0.7μm/hour이며 각 샘플의 두께는 약 0.7μm이다. ZnSSe:Te/ZnMgSSe DH구조 LED에 있어 ZnSSe:Te는 active layer(발광하는 영역) 역할을 하고 있다. 이 active layer를 성장할 때 Te doping량을 0.5~5% 변화시켜 발광다이오드를 제작하였다.

박막형 샘플의 광학적 특성(optical property)을 평가하기 위하여 PL(photoluminescence) 및 PLE(PL-excitation) 측정을 실시하였다. 결정성 평가를 위해 2결정 X선 회절(double crystal X-ray diffraction: DCXRD) 측정과, 각 샘플의 원소성분의 분석을 위해 EPMA(electron probe micro analysis) 장비를 사용하였다. LED의 제반특성을 고찰하기 위해 EL(electroluminescence) 및 I-V(current-voltage) 측정을 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 결정성의 비교

화학의 원소 주기율표에서 Zn, Se 및 Te는 각각 IIb, VIb 및 VIIb족(族)에 해당된다. 여기서, Se 및 Te는 최외각 전자수(6개)가 같고, 혼합결정을 만

들 때 서로 치환(substitution)하는 성질을 갖고 있다. 따라서 ZnSe:Te 및 그 외 다른 혼합결정 등을 만들 수 있다.

Fig. 2에서는 혼합결정인 ZnSe<sub>1-x</sub>:Te<sub>x</sub> 및 ZnS<sub>y</sub>Se<sub>1-x-y</sub>:Te<sub>x</sub> 박막형 샘플의 2결정 X선 회절실험의 측정결과를 나타내고 있다. Fig. 2(a)에서는 GaAs 기판 위에 성장시킨 각 혼합결정의 Te doping량 변화에 따른 격자정수 변화량을 나타내고 있다. ZnSe:Te 경우는 Te doping량을 증가시키기에 따라 격자정수가 커지게 되고, 이로 인해 GaAs기판과의 격자부정합률(the ratio of lattice mismatching, Δa/a)이 점점 증가함을 보여주고 있다. Fig. 2(b)에서, ZnSe:Te 경우는 Te doping량의 증가에 따라 결정성이 악화(>500 arcsec)됨을 보여주고 있다. (설명: FWHM 수치가 높을수록 결정성이 나쁘다.)

화합물 반도체인 ZnSe는 zincblende(ZB) 결정 구조이며 격자정수는 5.6687Å이다. ZnTe(ZB구조) 및 ZnS(ZB구조)의 격자정수는 각각 6.1037Å

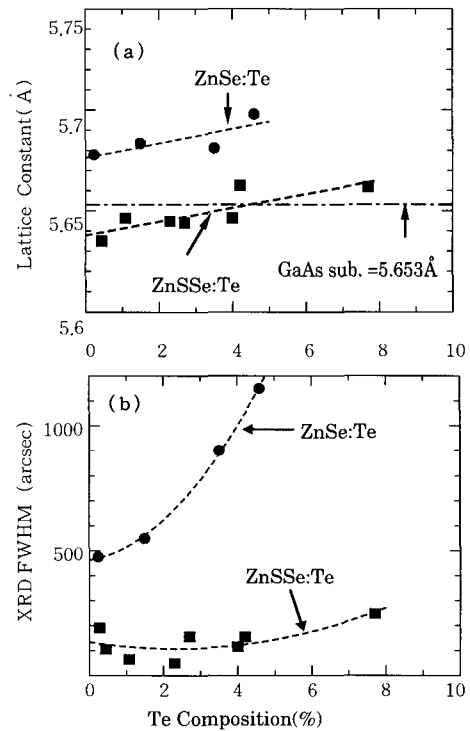


Fig. 2 Lattice constant and XRD FWHM in ZnSe:Te and ZnSSe:Te epilayers as a function of Te composition.

및  $5.4093\text{\AA}$ 이다<sup>6)</sup>.

Te을 doping한 기존의  $\text{ZnSe}_{1-x}:\text{Te}_x$ <sup>7)8)</sup> 혼합결정은 모체원자인 Se보다 격자정수가 큰 Te성분의 증가로 인해서, GaAs( $5.653\text{\AA}$ )기판 위에 성장시킨 혼합결정( $\text{ZnSe}:\text{Te}$ )의 격자정수가 증가한다 (Fig. 2(a)). 그 결과, Te 성분의 증가에 의해 결정성이 악화되는 단점을 안고 있다 (Fig. 2(b)).

이러한 문제점 해결을 위해서, VIb족에 해당되고 격자정수가 비교적 작은 S를 도입하였으며, 혼합결정인  $\text{ZnS}_y\text{Se}_{1-x-y}:\text{Te}_x$ 를 성장하게 되었다. 이때 S성분은 약 11%로 고정하였다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 ZnSSe:Te 결정은 Te성분 8% 이하 영역에서 GaAs와 거의 격자정합(lattice matching)하는 특성을 나타내고 있다. 격자부정합률이  $\Delta a/a \pm 0.25\%$  이내로 ZnSe:Te 경우( $\Delta a/a > 0.44\%$ )에 비해 좋은 특성을 나타낸다. 또한, 결정성에 있어서도 종래의 ZnSe:Te보다 우수한 결정성(high crystal quality, FWHM < 200 arcsec)을 나타내고 있다 [Fig. 2(b)].

### 3.2 광학적 특성

$\text{ZnSe}_{1-x}:\text{Te}_x$  화합물 반도체 혼합결정은 속박 여

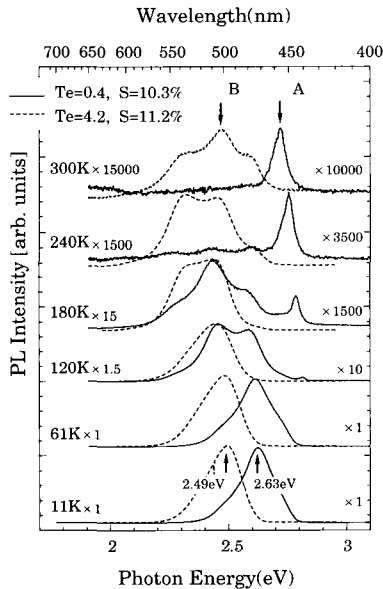


Fig. 3 Temperature dependent PL spectra for the ZnSSe:Te epitaxial layer.

기자(trapped exciton)를 형성하는 특성을 가지고 있다<sup>7)8)</sup>. 그 원인으로는, 모체원자인 Se보다 전기 음성도(electronegativity)가 작은 Te dopant는 정공 친화력(hole affinity)이 매우 크다. 따라서 정공은 Se site보다 Te site에 속박되고 전자(electron)는 쿨롱 인력(Coulombic attraction)에 의해서 유도되어, 속박 여기자를 형성한다. (설명: 전자 및 정공의 쌍(pair)을 여기자라고 한다.)

ZnSe:Te 결정의 광학적 특성에 대해서 많은 연구가 되었다<sup>7)8)</sup>. 그 특성 중의 하나인 포토루미네선스(PL)에 있어서 하나의 Te원자에 속박된 여기자(trapped exciton)에 의한 청색발광(blue band) 및  $\text{Te}_n$  ( $n \geq 2$ ) cluster에 속박여기자에 의한 녹색발광(green band)을 볼 수 있었다<sup>7)</sup>. 이 속박(trap)에 의한 발광은, Te을 doping하지 않은 undoped-ZnSe의 발광특성보다 PL적분강도가 수십배 이상으로 강하다는 것은 잘 알려져 있다. 그렇지만, 이 발광은 저온영역( $T < 250\text{ K}$ )에서는 발광특성을 확인할 수 있었지만 실온(300 K) 부근에서는 발광특성을 거의 볼 수 없었다<sup>8)</sup>. 그 원인으로는 앞 절(3.1 결정성의 비교)에서 살펴본듯이 ZnSe:Te는 결정성이 좋지 않았기 때문이다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 S를 도입한 결과,  $\text{ZnS}_y\text{Se}_{1-x-y}:\text{Te}_x$ 의 결정성이 향상되었다. Fig. 3은 대표적으로 Te성분이 0.4 및 4.2%인 ZnSSe:Te의 PL 온도의존성을 나타내고 있다. 측정온도는 11 K에서 300 K까지 측정하였다. Te 성분이 4.2%의 경우를 살펴보면, 온도 11 K에서 발광피크(emission peak)는 2.49 eV(498 nm)인 녹색발광을 나타내며, 그 스펙트럼 폭이 비교적 넓은 190 meV를 나타내고 있다. 이것은  $\text{Te}_n$  ( $n \geq 2$ ) cluster의 속박여기자에 의한 발광( $\text{Te}_n$  cluster 발광)에 의한 것으로 생각된다<sup>9)10)</sup>. 그리고 점차 온도를 상승 시킴으로써 발광스펙트럼이 변화함을 볼 수 있고, 실온에서도 있어서 강한 녹색발광(2.48 eV, B)을 볼 수 있다. 300K에서의 3개의 발광을 볼 수 있는데, 각 발광의 원인(origin)은 다음과 같다: 2.48 eV는  $\text{Te}_n$  cluster related S 발광, 2.32 eV는  $\text{Te}_n$  cluster related Se 발광, 그리고 2.59 eV  $\text{Te}_1$ 의 속박여기자에 의한 발광으로 사료된다<sup>6)</sup>.

Te성분이 0.4%인 경우, 저온영역( $T < 100\text{ K}$ )에

서는 청-녹색(2.63 eV) 발광을 나타내지만, 실온에서는 2.72 eV peak (A)의 청색의 발광특성을 보여준다. 청색발광은  $Te_1$  속박여기자에 의한 발광( $Te_1$  발광)으로 생각된다<sup>44</sup>. 온도변화에 따른 청색 및 녹색 발광메커니즘은 배치좌표(configuration coordinate energy diagram)를 사용하여 다음에 설명하고자 한다.

광학적 특성 중에서 중요한 점은 실온에서 강한 청색 또는 녹색 발광을 관측할 수 있다는 것이다. 이것은 S를 도입하여 결정성을 향상(XRD FWHM < 200 arcsec)시킨 결과로 볼 수 있다.

다음으로, Gaussian fitting에 의하여 각 PL 스펙트럼을 피크 분리, 각 발광의 적분강도를 Arrhenius plot한 후, 활성화 에너지(activation energy)를 구하였다. 온도에 따른 PL강도(PL intensity)는 다음의 식으로 표현할 수 있다<sup>44</sup>.

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + A \exp\left(\frac{-\Delta E}{k_B T}\right)}$$

여기에서,  $\Delta E$  는 thermal quenching process의 활성화 에너지,  $k_B$ 는 볼츠만 상수,  $I(0)$  는 0 K에서 발광강도,  $T$  는 측정온도, 그리고  $A$  는 상수이다.  $Te_n$  cluster 발광(green band, B) 및  $Te_1$  발광(blue band, A)의 활성화 에너지는 각각  $\Delta E_{Te_n} = 260 \pm 20^{61}$  및  $\Delta E_{Te_1} = 43 \pm 15$  meV의 값을 구하였다. 일반적으로, 이 활성화 에너지는 배치좌표에서 포텐셜 장벽(potential barrier)과 직접적으로 관계가 있다.

배치좌표는 반도체의 발광 메커니즘 등의 물리적 현상을 설명할 때 자주 사용되며, 여기에서는 간단한 모델을 생각하고자 한다. Fig. 4에서의 횡축은 결정격자를 형성하는 원자의 변위(Q), 종축은 전자-격자 계의 전 에너지(total energy)를 나타내며, 3개의 곡선은 기저상태(ground state)와 여기상태[free exciton(F. E.) or  $Te_1$  및  $Te_n$  cluster]를 나타내고 있다.

ZnSSe:Te (Te=4.2, S=11.2 %) 경우, He-Cd laser (325nm, 3.815eV)를 사용하여 밴드갭(band gap) 에너지 이상으로 여기(excitation)시키면, 기

저상태로부터 여기자(즉, 전자와 정공의 페어)가 생성되고 그 중 전자는 F. E.(or  $Te_1$ ) state로 천이된다. 그 후 전자는 포텐셜이 낮고 안정된  $Te_n$  cluster 상태에 속박된다. 이때 속박된 여기자(전자 및 정공)는  $Te_n$  cluster를 중심(center)으로 재결합에 의한 강한 녹색발광을 하게된다. 그리고 온도를 상승시켜도 이 발광을 계속 유지하는 이유는, 발광의 센터(recombination center)역할을 하는  $Te_n$  cluster는 수백 meV 이상(260 meV)의 binding energy (A-B간의 포텐셜 장벽, Fig. 4)를 갖고 있기 때문에, 실온(300 K)에서도 강한 녹색 발광특성을 나타낸다.

다음으로, ZnSSe:Te (Te=0.4, S=10.3 %) 경우를 온도변화에 따른 3개 영역으로 분류하여 설명할 수가 있다.

(i) 10 - 100 K의 저온영역은 청-녹색 발광 (2.63 eV)을 나타낸다. 이 발광의 기원(起源)은 Te=4.2 %경우와 같이  $Te_n$  cluster에 의한 발광으로 사료된다.

(ii) 100 - 200 K 영역은 청-녹색 및 청색 발광이 공존한다.  $Te_n$  cluster(B state)에 속박된 여기자는, 온도가 상승함에 따라 결정(ZnSSe:Te)중의 각 원자들간의 격자진동이 격렬해지고,  $Te_n$  cluster에 속박된 여기자의 일부가 열해리(thermal dissociation) 작용에 의해서  $Te_1$  state로 이동하게 되고 청색발광이 관측된다. (설명: 열해리 작용은

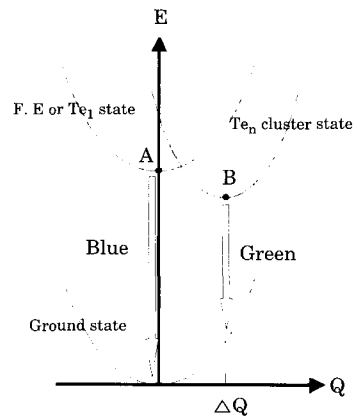


Fig. 4 Configuration coordinate energy diagram in the ZnSSe:Te epilayer.

온도 상승(열)에 의해 속박된 여기자가 free exciton 상태로 되돌아가는 현상)

(iii) 200 - 300 K의 고온영역에서는 청색 발광만 존재한다. 이것은 여기자의 열해리 작용이 더욱 진행되어 A의 상태(F. E. or  $Te_1$  state)로 여기자가 대부분 이동하였기 때문이다. 위에서 기술한 바와 같이, ZnSSe:Te 결정은 종래의 ZnSe:Te에 비해서 결정성이 뛰어났으며, 또한 Te doping 농도(density)에 따라서 실온(300K)에서도 강한 청색 또는 녹색 발광특성을 확인할 수 있었다. 이것은 발광다이오드(LED 및 laser diode)에 적용·응용에 있어서 매우 중요한 파라메타의 하나이며, 이 특성을 발광 다이오드 제작에 적용하고자 한다.

3.3 ZnSSe:Te계 LED 제작 및 특성

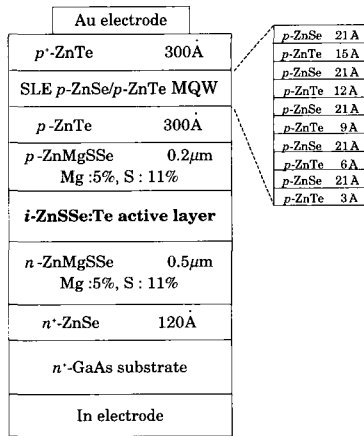


Fig. 5 Schematic structure of ZnSSe:Te-based DH LED device grown by MBE.

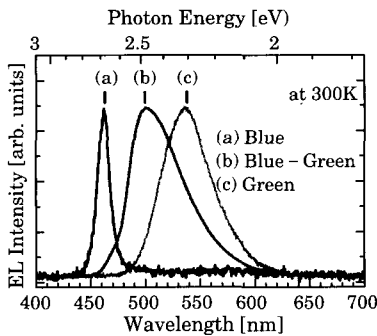
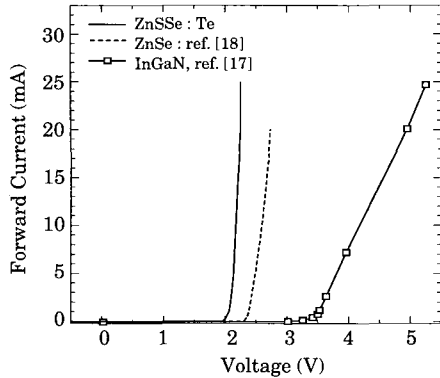


Fig. 6 EL spectra of ZnSSe:Te-based LEDs at 300 K: (a) Blue (b) Blue-Green (c) Green.

MBE 장치를 이용하여 ZnSSe:Te/ZnMgSSe double-hetero(DH) 구조의 LED를 성장·제작하였다. Fig. 5는 LED의 구조를 보여주고 있다. n-GaAs(100) 기판 상에 n-ZnSe를 성장시킨 후, n형/p형-ZnMgSSe cladding layer 간에 ZnSSe:Te를 도입하였으며, 이 ZnSSe:Te는 발광하는 active layer 역할을 한다. 초격자전극(SLE)은 오믹성 접촉(ohmic contact)특성을 얻는데 필요할 뿐만 아니라 고효율의 LED의 제작에 중요한 부분이다. 이 초격자전극은 p-ZnSe/p-ZnTe multiple quantum well (MQW) layer를 도입하였다. 이 SLE 구조는 21Å ZnSe barrier로 분리된, 3, 6, 9, 12, 15Å의 ZnTe를 성장시켰다. ZnTe의 두께를 변화시킨 이유는 p-ZnSe와 p-ZnTe간의 가전자대 오프셋(valence band offset)이 ~ 1 eV 정도 되는데, 공명 터널(resonant tunneling)효과를 이용한 정공의 흐름을 원활히 하기 위한 것이다<sup>[12][13]</sup>. LED의 p측 표면전극으로는 gold(Au), n측은 indium(In)을 사용하였다.

Fig. 6는 각 LED의 실온에서의 EL 스펙트럼을 나타내고 있다. Te doping량의 제어에 의하여 청색, 청-녹색 및 녹색 LED의 제작에 성공하였다. Active layer에 도입된 ZnSSe:Te layer에 있어, 각 LED의 Te 및 S 성분은 다음과 같다. (a) 청색(462 nm) LED는 Te: ~0.5%, S: ~6%이고, (b) 청-녹색(500 nm) LED는 Te: 2-3%, S: ~11%이고, (c) 녹색(535 nm) LED는 Te: 4-5%, S: ~11%이다. 청색 발광의 기원(origin)은  $Te_1$  속박여기자에 의한 발광이며, 청-녹색 및 녹색 발광은  $Te_n$  cluster에 의한 속박여기자의 발광으로 사료된다. 청색 발광 LED는 II-VI족 화합물 반도체 재료 중에서 Te doping을 이용한 ZnSSe:Te계 청색 LED를 세계 최초로 실온에서 성공하였다<sup>[14][15]</sup>.

발광 다이오드의 신뢰성에 있어서 중요한 수명성에 관해서, 종래의 ZnCdSe계 LED는 수명이 20시간 이하를 나타냈으나, ZnSSe:Te계 녹색 LED의 경우는 2000시간 이상의 장수명 특성을 나타냈다<sup>[15][16]</sup>. 이것은 Te doping에 의한 "lattice-hardening effect"로 LED의 수명 특성이 개선되었다고 사료된다<sup>[16]</sup>. 따라서, II-VI 화합물 반도체에 Te doping의 발광 다이오드에 적용은 다음과



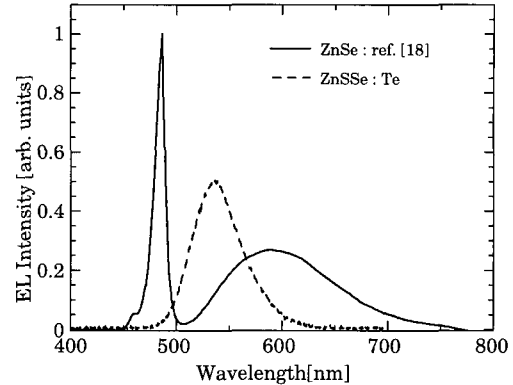
**Fig. 7 Current and Voltage (I-V) characteristics from ZnSSe:Te-, InGaN-, and ZnSe-based LEDs at room temperature.**

같은 장점으로부터 그 응용 가능성을 기대한다: (i) 청색~녹색 영역에서 유효한 발광센터의 역할과 (ii) 결함(defect)의 발생 및 진전을 억제(즉, 장수명화에 공헌)하는 유효한 dopant로써 역할을 한다.

Fig. 7은 실온 및 암상태(dark condition)에서 각 LED의 전류-전압(I-V) 특성을 나타내고 있다. 현재 휴대폰의 백라이트용으로 사용되고 있는 InGaN계 LED<sup>[17]</sup>의 동작전압은 약 3.6 V 정도이고, ZnSe계 백색LED<sup>[18]</sup>는 약 2.5 V를 나타내고 있다. 그리고 ZnSSe:Te계 LED는 동작전압이 약 2.2 V를 나타내고 있다. 이 전압은 InGaN 및 ZnSe계 백색 LED와 비교해서 낮은 동작전압이다. 이것은 p-층 금속전극인 Au과 p-ZnSe간의 오믹성 접촉(ohmic contact)에 필요한 p형 ZnSe/ZnTe MQW SLE 구조의 최적화 설계에 따른 것으로 사료된다. 이 SLE구조의 실험결과, 접촉저항은 300Ω, 비접촉저항은 1.5Ωcm<sup>2</sup>를 나타냈다.

### 3.4 백색 LED에 응용 가능성

현재, 휴대폰의 칼라 LCD의 광원으로 III-V족 반도체 재료를 사용한 InGaN계 백색 LED가 주로 사용되고 있다. 그러나, 이 백색 LED는 YAG형광체의 분산 및 그 제작 공정이 다소 복잡하며 그 동작전압이 3.6 V 정도로, 동작에 필요한 승압회로가 필요하다. Katayama씨 등은 ZnSe계 재료를 사용하여 저전압(2.5 V)에서 구동하고(Fig. 7), 그 제작 공정이 다소 간소화된 백색 LED의 개발에



**Fig. 8 Emission spectra of ZnSe-based white (solid line) and ZnSSe:Te-based green (dotted line) LEDs.**

성공하였다<sup>[21][18]</sup>.

일반적으로, 빛의 3원색(primary color)인 적색(R), 녹색(G), 그리고 청색(B)을 동일한 빛의 강도로 혼합하면 선명한 백색광을 얻을 수 있다.

Fig. 8에서는 ZnSe계 백색LED의 발광 스펙트럼(실선)을 나타내고 있다<sup>[21]</sup>. 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 녹색영역(510~560 nm)의 발광이 청색(440~490 nm) 및 적색(650~700 nm)발광에 비해서, 그 적분강도가 약하기 때문에 선명한 백색광을 얻을 수 가 없다. 따라서, ZnSe계 백색 LED의 active layer에 Te doping할 것을 제안하며, 그 효과로써 태양빛에 가까운 백색광의 재현이 가능하리라 생각된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 MBE 장치를 이용하여 ZnSe:Te 및 ZnSSe:Te 박막을 성장시켜 광학적 및 물리적 특성을 살펴보았으며, 그 특성을 이용한 ZnSSe:Te/ZnMgSSe DH구조 LED를 성장·제작하였다. 각 측정실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ZnSSe:Te 박막은 Te성분이 5% 이하에서 중래의 ZnSe:Te와 비교해서 결정성이 매우 우수한 특성을 나타냈다. 또한 Te doping량의 제어에 의해서, 실온에서 청색 및 녹색의 강한 발광특성을

얻을 수 있었다.

(2) ZnSSe:Te 박막형 샘플의 발광특성을 발광다이오드(LED)에 적용하였으며, 실온에서 청색(462 nm)부터 녹색(535 nm) 영역까지 발광하는 ZnSSe:Te/ZnMgSSe DH 구조 LED의 제작에 성공하였다.

(3) 초격자전극(SLE)부의 최적화 설계의 결과, 상용화된 InGaN계 및 ZnSe계 백색 LED의 동작전압에 비해서, 그 동작전압이 2.2 V 이하로 우수한 특성을 나타냈다.

(4) ZnSe계 백색 LED의 active layer에 Te doping(5 % 이하)을 제안하며, 보다더 선명한 백색발광 LED의 제작이 가능하리라 사료된다.

## 후 기

본 논문의 연구수행에 도움을 주신 **Prof. K. Ando** 및 **Dr. T. Abe** 님과, 발광 디바이스의 성장·제작을 지원해주신 **Tottori Univ.** 지역공동연구센터의 관계자 분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] <http://icat.snu.ac.kr:8000/> "백색LED 기술동향 News".
- [2] 武部 敏彦, "ZnSe系 白色發光ダイオード", 應用物理, 第70卷, 第5, pp. 554~558, 2001.
- [3] 向井 孝志, 中村 修二, "白色および紫色 LED", 應用物理, 第68卷, 第2, pp. 152~153, 1999.
- [4] H. C. Lee, N. Kaneko, M. Watanabe, Y. Fujita, T. Abe, H. Ishikura, M. Adachi, H. Kasada and K. Ando, "High Efficiency and Long-lived Green and Blue Light Emitting Diodes Based on ZnSSe:Te Active Layer Grown by Molecular Beam Epitaxy", Proc. of the 10th Int. Conf. on II-VI Compounds, Tu-P63, 2001, Bremen, Germany.
- [5] H. C. Lee, T. Abe, N. Kaneko, M. Adachi, M. Watanabe, Y. Fujita, H. Kasada and K. Ando, "Efficient and Long-Lived Green Light-Emitting Diodes Based on ZnSSe:Te Active Layer", Japan Journal of Applied Physics, Vol. 41, pp. 1359~1364, 2002.
- [6] L.I. Berger and B.R. Pamplin, Handbook of Chemistry and Physics, 71th ed., Ed.-in-chief D.R. Lide, (CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1991) p.4/118 & pp.12/54-59.
- [7] D. Lee, A. Mysyrowicz, A. V. Nurmikko, "Exciton Self-Trapping in ZnSe-ZnTe Alloys", Physical Review Letters, Vol. 58, No. 14, pp. 1475~1478, 1987.
- [8] C. S. Yang, D. Y. Hong, C. Y. Lin, W. C. Chou, C. S. Ro, W. Y. Uen, W. H. Lan, S. L. Tu, Journal of Applied Physics, Vol. 83, No. 5, pp. 2555-2559, 1998.
- [9] H. C. Lee, T. Abe, M. Watanabe, Z. M. Aung, M. Adachi, T. Shirai, H. Yamada, S. Kuroda, H. Kasada and K. Ando, "Efficient blue-green light emitting diodes of ZnSSe:Te/ZnMgSSe DH structure grown by molecular beam epitaxy", Proc. of the 9th Int. Conf. on II-VI Compounds, Tu-P101, 1999, Kyoto, Japan.
- [10] H. C. Lee, T. Abe, M. Watanabe, Z. M. Aung, M. Adachi, T. Shirai, H. Yamada, S. Kuroda, H. Kasada and K. Ando, "Efficient blue-green light-emitting diodes of ZnSSe:Te/ZnMgSSe DH structure grown by molecular-beam epitaxy", Journal of Crystal Growth, Vol. 214/215, pp. 1096~1099, 2000.
- [11] D. S. Jiang, H. Jung and K. Ploog, "Temperature dependence of photoluminescence from GaAs single and multiple quantum-well heterostructures grown by molecular-beam epitaxy", Journal of Applied Physics, Vol. 64, No. 3, pp. 1371~1377, 1988.
- [12] F. Hiei, M. Ikeda, M. Ozawa, T. Miyajima, A. Ishibashi, K. Akimoto, Electron. Lett. Vol. 29, p. 878~, 1993.
- [13] T. Abe, H. Ishikura, Y. Saomoto, K. Goto, K. Masuda, T. Shirai, H. Yamada, S. Kuroda, H. Kasada and K. Ando, "Optimization of ZnSe/ZnTe superlattice structured p-contact for ZnSe-based optical devices", Journal of Crystal Growth, Vol. 214/215, pp. 492~496, 2000.
- [14] H. C. Lee, N. Kaneko, M. Watanabe, Y. Fujita, T. Abe, H. Ishikura, M. Adachi, H. Kasada and K. Ando, "High Efficiency and Long-Lived Green and Blue Light Emitting Diodes Based on ZnSSe:Te Active Layer Grown by Molecular Beam Epitaxy", phys. stat. sol. (b), Vol. 229, pp.



- 1043~1047, 2002.
- [15] 이홍찬, 이상태, 이성근, 김윤식, "ZnSSe:Te 청-녹색 발광다이오드의 고효율화 및 장수명화에 관한 연구", 2002년도 한국박용기관학회 춘계학술대회 논문집, pp. 167~171, 2002.
- [16] K. Maruyama, K. Suto and J. Nishizawa, "Effective segregation coefficient of tellurium in  $ZnSe_{1-x}Te_x$  and  $Be_yZn_{1-y}Se_{1-x}Te_x$  bulk crystals grown using traveling solvent method", Vol. 38, pp. 6636~6639, 1999.
- [17] S. Nakamura, S. Pearto and G. Fasol, "The Blue Laser Diodes" Springer, p. 97, 2000.
- [18] K. Katayama, H. Matsubara, F. Nakanishi, T. Nakamura, H. Doi, A. Saegusa, T. Mitsui, T. Matsuoka, M. Irikura, T. Takebe, S. Nishine and

T. Shirakawa, "ZnSe-based White LEDs", Journal of Crystal Growth, Vol. 214/215, pp. 1064~1070, 2000.

## 저 자 소 개



### 이홍찬(李鴻燦)

1965년 1월생. 1989년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1995년 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 수료. 2000년 일본 Tottori대학 전기전자공학과 석사과정 수료. 2000~현재 일본 Tottori대학 전기전자공학과 박사과정 중. 당학회 회원.