

論文99-36D-12-4

MgZnSiN₂ 모체에 Tb 또는 Eu이 첨가된 형광체의 발광 특성(Luminescent Characteristics of MgZnSiN₂ Phosphors Doped with Tb or Eu)

李 淳 錫 *, 林 聖 奎 **

(SoonSeok Lee and SungKyo Lim)

요 약

박막 전계발광소자의 새로운 형광체를 개발하기 위하여 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Tb 및 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu 형광체를 합성한 후, 각각 빛 발광 및 음극선 발광 특성을 조사하였다. 합성된 각각의 형광체의 빛 발광 스펙트럼과 음극선 발광 스펙트럼은 동일하였으며, Tb 또는 Eu 발광 중심체의 고유한 발광 기구에 의해서 발광하는 것으로 확인되었다. 전자빔 증착 장비로 제작된 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu 박막 전계발광소자의 CIE 색 좌표는 $x=0.47$, $y=0.46$, 문턱 전압은 47V 및 최대 전압 80V에서의 휘도는 23.5 cd/m²를 나타내었다. 또한 박막 전계발광소자의 capacitance-voltage 특성과 charge-voltage 특성 등의 전기적 특성도 함께 측정되었다.

Abstract

The Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Tb and Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu materials were synthesized and studied to develop new phosphors for thin-film electroluminescent device application. Photoluminescence and cathodoluminescence characteristics of the synthesized phosphors were measured. It was found that the photoluminescence and the cathodoluminescence spectra were similar to general emission spectra of Eu, Tb ion, respectively. The CIE color coordinates, threshold voltage and luminance of the Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu thin-film electroluminescent device fabricated by electron-beam deposition system were $x=0.47$, $y=0.46$, 47V, and 23.5 cd/m² at 80V, respectively. The capacitance-voltage and charge-voltage characteristics of the thin-film electroluminescent devices were also measured.

I. 서 론

G. K. Gaido 등에 의해서 MgSiN₂에 소량의 Eu이 첨가된 물질로부터 빛 발광(photoluminescence, PL) 현상

이 발표된 바 있다^[1]. 이것은 MgSiN₂:Eu이 형광체로 사용될 수 있는 가능성을 내포하는 것이며 빛을 발생시키는 에너지원으로 자외선을 사용한 예이다. 가속된 전자를 형광체에 충돌시켜 발광시키는 음극선 발광(cathodoluminescence, CL) 또는 고전계를 형광체에 인가하여 빛을 발생시키는 전계 발광(electroluminescence, EL) 등도 형광체에 에너지를 공급하는 또 다른 방법이며, MgSiN₂:Eu이 이들로부터도 빛이 발생된다면 형광체로 사용될 수 있는 가능성은 더욱 높아진다.

현재 평판 표시 디스플레이(flat panel display, FPD)로 개발되고 있는 발광 소자 중에서 박막 전계 발광(thin-film electroluminescence, TFEL) 소자는 모든 부

* 正會員, 檀國大學校 정보디스플레이 研究所
(Information Display Research Center, Dankook Univ.)

** 正會員, 檀國大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics Engineering, Dankook Univ.)

※ 본 연구는 교육부 반도체분야 학술연구조성비(ISRC 97-E-4027)에 의해 이루어짐.

接受日字: 1999年8月10日, 수정완료일: 1999年11月11日

분이 고체로 형성되어 있기 때문에 진동과 충격에 매우 강하고 넓은 시야각을 가지는 등 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 TFEL 소자의 형광체 모체로 사용되고 있는 ZnS, CaS 및 SrS 등은 모두 황 화합물로 취급하는 사람과 진공 증착 장비에게 해로운 영향을 미치는 단점을 가지고 있다. MgSiN₂는 II-IV-V2 그룹의 화합물이므로 주기율표상의 II 족, IV 족 또는 V 족의 다른 원소로 각각 교체하여 결합되었을 경우에 MgSiN₂ 화합물과 유사성을 갖는다. 즉, MgSiN₂:Eu에서 PL 현상이 관찰되었으므로 CaSiN₂, ZnSiN₂ 및 MgGeN₂ 등에 Eu이 첨가되면 PL 현상이 관찰될 가능성은 매우 높다.

이에 본 논문에서는 진공장비를 부식시키는 황화합물 형광체가 아닌 질소화합물의 새로운 형광체를 합성하고, 형광체로의 활용가능성을 평가하고자 한다. 즉, II 족 원소인 Mg과 Zn를 각각 0.5 mol씩 사용하여 합성된 MgZnSiN₂를 형광체 모체로 하고, 여기에 Tb 또는 Eu를 발광 중심체로 첨가된 MgZnSiN₂:Tb 및 MgZnSiN₂:Eu 형광체에 대하여 PL, CL 특성을 조사하였다. Zn는 에너지 밴드 갭이 4.8 eV인 MgSiN₂¹²⁻³¹에 합성되어 에너지 밴드 갭을 낮추는 동시에 발광 중심체 Tb 또는 Eu 이온이 쉽게 치환될 수 있도록 첨가된 것이다. 또한 전자빔 증착 장비로 제작된 MgZnSiN₂:Eu TFEL 소자에 대하여 전기, 광학적 특성을 조사하였다.

II. TFEL 소자 제작

MgZnSiN₂ 모체와 Tb 또는 Eu 발광 중심체를 첨가하기 위하여 Mg, Zn, Si₃N₄ 및 Tb₂O₃ 또는 Eu₂O₃ 미분말을 사용하였다. 합성에 사용된 각 재료들은 모두 325 mesh의 크기를 가지고 Mg(99.6%)을 제외하고 모두 99.9% 이상의 순도를 갖는다. 발광 중심체 Tb 또는 Eu은 각각 1 mol%씩 첨가하였으며 균일한 혼합을 위하여 볼 밀링으로 10 시간 동안 혼합시켰다. 혼합된 분말은 성형한 후, 알루미늄이나 보오트에 담아 전기로의 중앙에 놓고 1400°C에서 1 시간 동안 열처리하였다. 이때 분위기 가스로 질소와 수소를 각각 300scm과 20 sccm의 양으로 공급하였다. 소결 전 전기로 내의 잔류 기체에 의한 오염을 방지하기 위하여 온도 상승 30분 전부터 질소 가스를 500 sccm의 양으로 공급하여 튜브 내의 잔류 기체를 모두 제거시켰다.

합성된 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Tb과 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu 형광체의 PL 특성은 제논 램프(Osram XBO 150 Watt)를 사용하여 가시광선 영역 400 nm에서 700 nm까지 발광되는 빛의 파장을 측정하였고, CL 특성 역시 캐소드-아노드 간의 전압 12kV, 전류 60 nA 및 챔버 내부 압력 8×10^{-8} torr에서 가시광선 영역의 발광 파장을 측정하였다.

MgZnSiN₂:Eu TFEL 소자는 전자빔 증착 장비를 사용하여 제작하였다. 형광체 재료인 Mg, Zn, Si₃N₄ 및 EuF₃들은 10⁻⁴g까지 측정할 수 있는 전자 저울(Mettler, AJ180)을 사용하여 정확히 측정하였으며 Mg과 Zn의 비율은 0.8:0.2로 하였다. 마노에서 30 분 동안 혼합된 혼합물은 직경 13 mm의 몰드에 넣고 4 ton/cm²의 압력으로 성형하였다. 혼합, 성형된 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu 형광체 재료는 전자빔 증착 장비 안에서 5~10 mA의 적은 전자빔 전류로 20~30 분 동안 열처리하여 형광체의 타겟으로 사용하였다. 전자빔 증착 장비 내부의 진공 상태에서 열처리하는 것도 효과적인 타겟 제작 방법이 될 수 있기 때문이다. Indium tin oxide(ITO) 투명 전극과 AlTiO₃(ATO) 하부 절연층이 증착된 coming 7059 glass를 구입하여 TFEL 소자를 제작하였다. 전자빔 증착 장비의 진공도, 증착 온도, 전자빔 전류 및 증착율이 각각 5×10^{-6} torr, 500 °C, 20 mA 및 2 Å/sec의 조건에서 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu 형광체 두께를 6000 Å로 증착시켰다. 형광체의 열처리는 800 °C에서 30 초 동안 질소 분위기에서 수행하여 결정성을 향상시켰으며, 상부 절연층이 없는 상태에서 Al 전극을 1500 Å의 두께로 증착시켜 TFEL 소자를 완성시켰다. 그림 1은 제작된 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL 소자의 구조를 나타낸다.

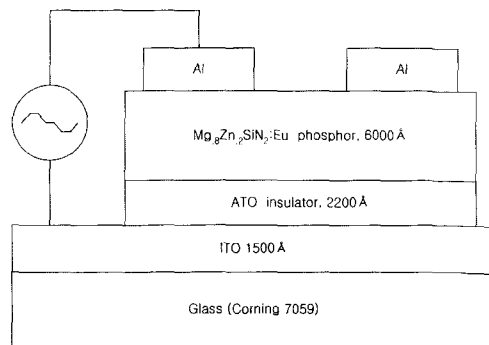
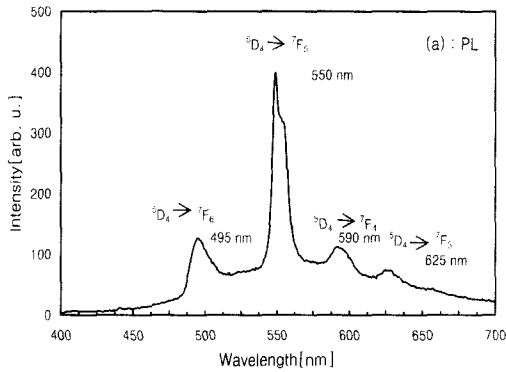


그림 1. 제작된 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL 소자의 구조
Fig. 1. Cross sectional structure of Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL device.

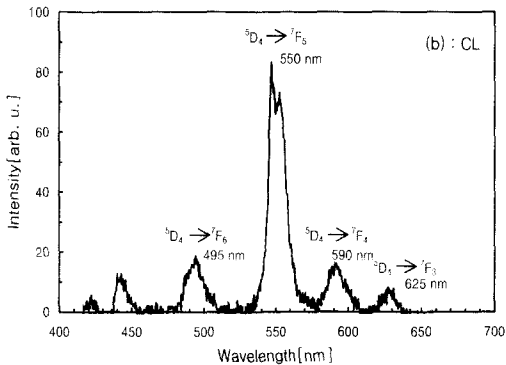
III. 결과 및 검토

그림 2 (a)는 1400 °C에서 소결, 합성된 $Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN_2$: Tb 형광체의 PL 스펙트럼으로 발광 중심체 Tb 이온의 발광과 관계된 에너지 준위를 자세히 나타내고 있다. 495 nm에서의 발광은 Tb^{3+} 이온내의 5D_4 준위에 있는 전자가 7F_6 준위로 떨어지면서 발광되는 파장이고, 550 nm의 발광은 5D_4 준위에서 7F_5 준위로, 590 nm의 발광은 5D_4 준위에서 7F_4 준위로 및 625 nm의 발광은 5D_4 준위에서 7F_3 준위로 떨어지면서 그에 해당하는 에너지를 빛으로 방출하기 때문에 나타난 것이다^[4]. 그림 2-(a)와 같은 PL 스펙트럼은 Tb 발광 중심체를 ZnS 모체에 첨가시킨 경우에도 동일한 결과를 얻을 수 있

다. 이것은 발광 중심체 Tb 이온내의 전자가 외부로부터 에너지를 공급받아 여기된 후 다시 기저상태로 떨어질 때 외부의 f 준위에 있던 전자가 내부의 f 준위로 떨어지면서 빛을 방출하는데, 외부의 f 준위는 그 외각에 d 준위가 있어 모체 재료의 영향을 감소시켜 주기 때문이다. Tb^{3+} 이온 외에 이와 같은 발광 준위를 갖는 발광 중심체는 Sm^{3+} 및 Tm^{3+} 등이 있다^[5-6]. 즉 Tb^{3+} 이온을 발광 중심체로 사용할 경우 모체 재료에 관계 없이 언제나 안정된 녹색 빛을 얻을 수 있다. 그림 2-(b)는 $Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN_2$: Tb 형광체의 CL 스펙트럼이다. CL 스펙트럼이 PL 스펙트럼과 동일하며, 이것은 $Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN_2$: Tb 형광체내의 발광 기구가 모두 동일하기 때문에 나타나는 현상으로 새로운 형광체로 사용할 수 있는 가능성을 한층 높여주고 있다.

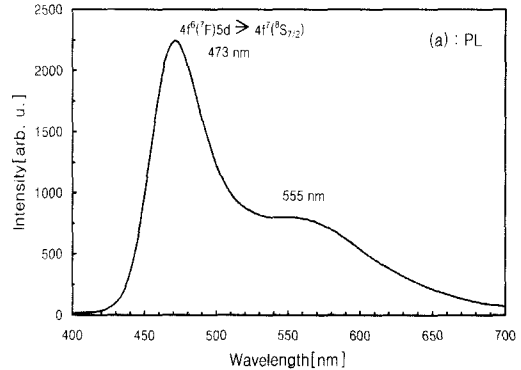


(a)

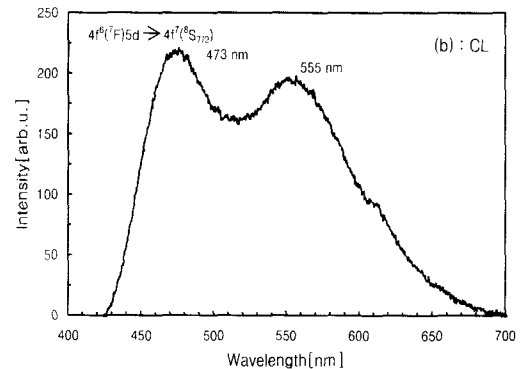


(b)

그림 2. $Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN_2$: Tb 형광체의 (a) PL 스펙트럼, (b) CL 스펙트럼
Fig. 2. (a) PL spectrum, (b) CL spectrum of $Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN_2$ Tb phosphor.



(a)



(b)

그림 3. $Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN_2$: Eu 형광체의 (a) PL 스펙트럼, (b) CL 스펙트럼
Fig. 3. (a) PL spectrum, (b) CL spectrum of $Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN_2$: Eu phosphor.

그림 3 (a)는 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu 형광체의 PL 스펙트럼이다. 제작조건을 달리해도 473 nm에서의 최대 발광 파장은 항상 일정하였고 시편에 따라 555 nm에서 또 다른 발광 파장을 나타내었다. 473 nm의 발광은 발광 중심체 Eu²⁺ 이온내의 전자가 4f⁶(⁷F)5d 준위에서 4f⁷(⁸S_{7/2}) 준위로 천이 하면서 그에 해당하는 에너지를 빛으로 방출하기 때문에 나타나는 것으로 판단된다^[7]. 그림 3-(b)은 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu 형광체의 CL 스펙트럼이다. CL 스펙트럼이 PL 스펙트럼과 유사함을 알 수 있으며 이것은 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu 형광체의 발광 기구가 동일하기 때문에 나타나는 현상이다.

그림 4는 전자빔 증착 장비를 이용하여 제작된 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL 소자에 상승과 하강 시간이 각각 5 μsec, 최대 전압 유지시간 30 μsec의 사다리꼴 전압을 1 kHz로 인가하여 측정된 인가 전압의 크기에 따른 휘도의 변화를 나타내고 있다. 인가 전압이 47 V에서부터 휘도가 급격히 증가하여 최대 전압 80 V에서는 23.5 cd/m²의 휘도를 나타내었다. 이것은 TFEL 소자의 전형적인 luminance-voltage(L-V) 특성과 일치하는 것으로 그림 4로부터 제작된 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL 소자의 문턱 전압(threshold voltage, V_{th})은 47 V임을 알 수 있었다. ZnS:Mn 또는 ZnS:Tb 형광체를 이용하여 제작된 TFEL 소자의 전형적인 문턱 전압과 휘도는 150 V, 2000 cd/m² 전후이나 본 연구에서 제작된 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL 소자의 문턱 전압과 휘도는 낮은 것으로 나타났다. 발광중심체 농도, 증착 조건 및 열처리 조건 등을 최적화시킨 후, 상부 절연층을 적층 시킨다면 향상될 것으로 기대된다.

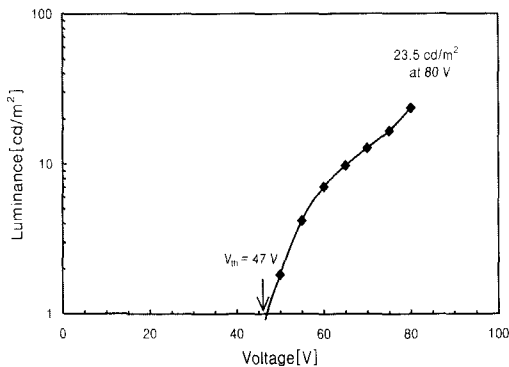


그림 4. Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL 소자의 L-V 특성
Fig. 4. L-V characteristics of Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL device.

그림 5는 제작된 Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL 소자의 전계 발광 스펙트럼이다. 발광하는 빛의 CIE(commission internationale de l'Éclairage) 색 좌표는 $x = 0.47$, $y = 0.46$ 로 백색 빛이었다. 또한 최대 발광 파장은 530 nm이었으며 615 nm에도 또 다른 발광 파장을 가지고 있다. PL 및 CL 스펙트럼을 나타내는 그림 3과 EL 스펙트럼을 나타내는 그림 5를 비교하면 발광 스펙트럼의 형태는 동일하면서도 최대 발광 파장이 473 nm에서 530 nm로 변하였음을 알 수 있다. 이것은 Eu²⁺ 이온내의 발광 준위가 모체의 영향을 매우 쉽게 받는 최 외각의 d 준위에서 내부의 f 준위로 전자가 천이 하면서 빛을 발생시키기 때문이다. 즉, 형광체 분말과 형광체 박막에 포함되어 있는 Eu²⁺ 이온의 발광 천이 준위(4f⁶(⁷F)5d → 4f⁷(⁸S_{7/2}))는 동일하면서도, 에너지의 크기가 서로 다르게 되어 최대 발광 파장이 변하는 것으로 판단된다. 모체 재료의 종류에 따라서 발광 파장이 매우 쉽게 변하는 Eu²⁺ 및 Ce³⁺ 발광 중심체는 발광 천이 준위가 이온내의 최 외각에 존재하며 Eu²⁺ 이온을 각각 CaS 및 SrS에 첨가시켰을 경우는 각각 650 nm 및 600 nm에서 발광 파장을 나타내고, Ce³⁺ 이온을 각각 CaS 및 SrS에 첨가되었을 경우에는 각각 505 nm 및 480 nm에서 발광 파장을 나타내는 것으로 알려져 있다^[6-9]. 615 nm에서의 발광은 형광체 박막 내에 존재하는 불순물 또는 결정 결함이 트랩으로 작용하여 고전계에 의해서 가속된 전자가 트랩에 포획되면서 발광하는 것으로 판단되며 정확한 원인을 위하여 향후 심도 있는 연구가 더욱 진행되어야 할 것이다.

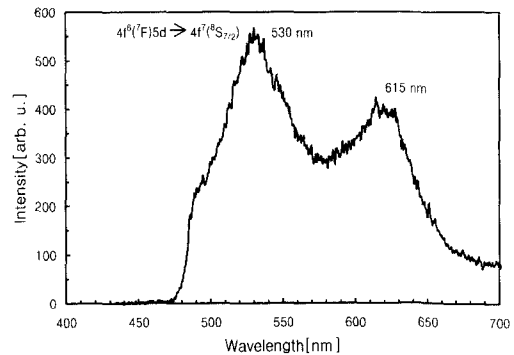


그림 5. Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL 소자의 발광 스펙트럼
Fig. 5. Emission spectrum of Mg_{0.5}Zn_{0.5}SiN₂:Eu TFEL device.

그림 6은 $Mg_{0.8}Zn_{0.2}SiN_2:Eu$ TFEL 소자에 상승과 하강 시간이 각각 $5\mu sec$, 최대전압 유지시간 $30\mu sec$ 의 사다리꼴 전압을 $1kHz$ 로 인가하였을 때, 인가 전압의 크기에 따른 커패시턴스의 변화를 나타내고 있다. 절연층과 형광층의 직렬 구조로 되어 있는 TFEL 소자의 커패시턴스는 문턱 전압(V_{th}) 이하에서는 절연층 커패시턴스(C_i)와 형광층 커패시턴스(C_p)의 직렬 합으로 나타낼 수 있으며, 문턱 전압(V_{th}) 이상에서는 형광층이 breakdown 되어 절연층만의 C_i 로 나타난다. Capacitance-voltage(C-V) 특성 곡선에서 커패시턴스가 급격히 증가하는 $68V$ 는 형광층이 breakdown 되기 시작하여 전압이므로 문턱 전압(V_{th})이다. 문턱 전압 이하에서의 커패시턴스는 $10.0 nF/cm^2$ 였고, 문턱 전압 이상에서는 $55.0 nF/cm^2$ 이었으며 이것으로부터 C_p 는 $12.2 nF/cm^2$, C_i 는 $55.0 nF/cm^2$ 임을 알 수 있다. $ZnS:Mn$ TFEL 소자의 전형적인 C-V 특성 곡선은 문턱 전압 이전은 작은 커패시턴스로, 문턱 전압 이후에는 큰 커패시턴스로 일정한 값을 가지며, 문턱 전압 이하에서의 일정한 커패시턴스는 형광층으로 터널링하는 전자가 무시할 정도로 적기 때문에 나타나는 현상이다. 그러나 전자빔 증착 장비로 제작된 $Mg_{0.8}Zn_{0.2}SiN_2:Eu$ TFEL 소자의 C-V 특성은 그림 6에서와 같이 문턱 전압보다 작은 상태에서도 인가 전압이 증가하면서 커패시턴스가 완만한 증가하고 있다.

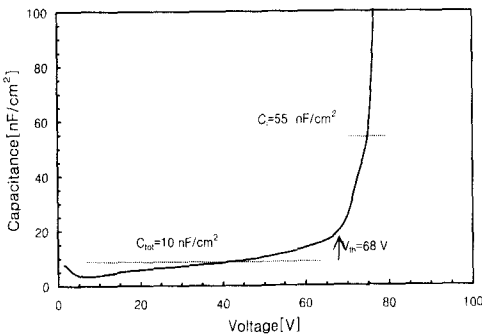


그림 6. $Mg_{0.8}Zn_{0.2}SiN_2:Eu$ TFEL 소자의 C-V 특성
Fig. 6. C-V characteristics of $Mg_{0.8}Zn_{0.2}SiN_2:Eu$ TFEL device.

이것은 형광층과 절연층의 낮은 계면 준위에 포획된 전자가 문턱 전압 이하의 작은 인가 전압에서 형광층으로 터널링하면서 나타나는 것이다.

그림 7은 본 연구에서 제작된 $Mg_{0.8}Zn_{0.2}SiN_2:Eu$

TFEL 소자의 charge-voltage(Q-V) 특성을 나타낸다. 인가된 사다리꼴 전압이 최대 전압을 유지하고 있는 동안에 이동하는 전하(relaxation charge, $Q_{relax,e}$)가 약 $15\mu C/cm^2$ 로 $ZnS:Mn$ TFEL 소자^[10]에 같은 전압을 인가하여 얻은 $0.1\mu C/cm^2$ 과 비교할 때 제작된 TFEL 소자에서의 $Q_{relax,e}$ 는 매우 큰 값을 나타낸다. 또한 인가 전압이 $0V$ 를 유지하고 있는 동안에 형광층과 절연층 계면에 포획되어 있는 전하(polarization charge, $Q_{pol,e}$)도 $13\mu C/cm^2$ 로 측정되어 $ZnS:Mn$ TFEL 소자의 $0.32\mu C/cm^2$ 과 비교할 때 매우 크다. $Q_{pol,e}$ 은 인가 전압의 극성이 변화될 때 변화된 극성과 같은 방향으로 동작되기 때문에 문턱 전압을 낮추는 역할을 한다. 인가 전압 $80V$ 에서의 휘도 $23.5 cd/m^2$ 과 그림 7의 Q-V 면적으로부터 발광 효율을 계산할 경우 $0.002 lm/w$ 를 얻을 수 있다.

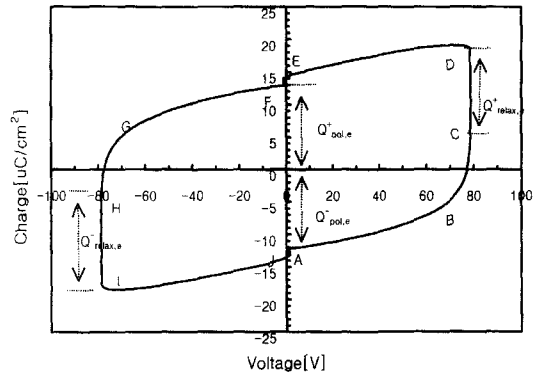


그림 7. $Mg_{0.8}Zn_{0.2}SiN_2:Eu$ TFEL 소자의 Q-V 특성
Fig. 7. Q-V characteristics of $Mg_{0.8}Zn_{0.2}SiN_2:Eu$ TFEL device.

IV. 결 론

TFEL 소자의 새로운 형광체를 개발하기 위하여 Mg, Zn, Si_3N_4 및 Tb_4O_7 또는 Eu_2O_3 미분말을 혼합, 성형 및 소결하여 $MgZnSiN_2:Tb$ 및 $MgZnSiN_2:Eu$ 형광체를 합성한 후 PL 및 CL 특성을 조사하였다. $MgZnSiN_2:Tb$ 형광체의 PL 스펙트럼과 CL 스펙트럼은 동일하였으며 각각 $490 nm, 550 nm, 590 nm$ 및 $625 nm$ 에서 발광 파장을 나타내었고 Tb 발광 중심체의 고유한 발광 기구에 의해서 발광하는 것으로 확인되었다. $MgZnSiN_2:Eu$ 형광체 역시 PL 및 CL 스펙트럼이 동일하였고 최대 발광 파장은 $473 nm$ 에서 관찰되었으며 Eu^{2+} 이온내의 전자가 $4f^6(^7F)5d$ 준위에서 $4f^7(^8S_{7/2})$ 준

위로 천이 하면서 발광하는 것으로 확인되었다.

전자빔 증착 장비로 제작된 Mg_{0.8}Zn_{0.2}SiN₂:Eu TFEL 소자는 530 nm에서 최대 발광 파장을 나타내어 백색 빛이 발광되었다. CIE 색 좌표는 $x=0.47$, $y=0.46$, 문턱 전압은 47 V 및 최대 전압 80 V에서의 휘도는 23.5 cd/m²를 나타내었다. C-V 특성과 Q-V 특성으로부터 절연층과 형광층의 커패시턴스가 각각 55.0 nF/cm², 12.2 nF/cm²됨을 알 수 있었고, Q_{relax}와 Q_{poke}가 매우 큰 값을 가짐을 확인하였다. 이상의 결과로부터 MgZnSiN₂에 Tb 또는 Eu이 첨가된 형광체가 TFEL 소자의 새로운 형광체로 사용될 수 있음을 최초로 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] G. K. Gaido, G. P. Dubrovskii, and A. M. Zykov, "Photoluminescence of MgSiN₂ activated by europium," *Inhomogenic Materials*, pp. 487-495, 1974 (Translated from *Izvestiya Akademii Nauk SSSR*, Vol. 10, No. 3, pp. 546-566, 1974).
- [2] H. T. Hintzen, P. Swaanen, R. Metselaar, W. Agroen, and M. J. Kraan, "Hot-pressing of MgSiN₂ ceramics," *J. Mater. Sci. Lett.*, Vol. 13, pp. 1314-1316, 1994.
- [3] E. D. Whitney, and R. F. Giese, "Preparation of a new ternary lithium silicon nitride, LiSi₂N₃, and the high-pressure synthesis of magnesium silicon nitride, MgSiN₂," *Inor. Chem.*, Vol. 10, No. 5, pp. 1090-1092, 1971.
- [4] E. W. Chase, R. T. Hepplewhite, D. C. Krupka, and D. Kahng "Electroluminescence of ZnS lumocen devices containing rare-earth and transition-metal fluorides," *J. Appl. Phys.*, Vol. 40, No. 6, pp. 2512-2519, 1969.
- [5] A. Mikami, T. Ogura, K. Tanaka, K. Taniguchi, M. Yoshida, and S. Nakajima, "Tb-F emission centers in ZnS:Tb, F thin-film electroluminescent devices," *J. Appl. Phys.*, Vol. 61, No. 8, pp. 3028-3034, 1987.
- [6] Y. A. Ono, "Electroluminescent displays," World Scientific, 1995.
- [7] S. Tanaka, "Thin-film electroluminescent devices using CaS and SrS," *J. Crystal Growth*, Vol. 101, pp. 958-966, 1990.
- [8] V. Shanker, S. Tanaka, M. Shiiki, H. Deguchi, H. Kobayashi, and H. Sasakura, "Electroluminescence in thin-film CaS:Ce," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 45, No. 9, 1984.
- [9] A. Ono, M. Fuyama, K. Onisawa, K. Tamura, and M. Ando, "White-light emitting thin film electroluminescent devices with stacked SrS:Ce/CaS:Eu active layers," *J. Appl. Phys.*, Vol. 66, pp. 5564-5571, 1989.
- [10] 이순석, 윤선진, 임성규, "Atomic Layer Epitaxy(ALE) 방법으로 제작된 ZnS:Mn 박막 전계발광소자의 전기, 광학적 특성," *전자공학회 논문지* Vol. 35D, No. 2, pp. 146-154, 1998

저 자 소 개

李淳錫(正會員) 第36卷 D編 第10號 參照
현재 단국대학교 정보디스플레이 연구소 연구원

林聖奎(正會員) 第36卷 D編 第10號 參照
현재 단국대학교 전자공학과 교수