

직 · 병렬 회로로 금속배선된 포토마스크로 설계된 백색LED 조명램프 제조 공정특성 연구

송상옥 · 김근주[†]

[†]전북대학교 기계공학과

Fabrication of White Light Emitting Diode Lamp Designed by Photomasks with Serial-parallel Circuits in Metal Interconnection

Sang Ok Song and Keunjoo Kim[†]

[†]Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT

LED lamp was designed by the serial-parallel integration of LED chips in metal-interconnection. The 7.45×4.5 in² masks were designed with the contact type of chrome-no mirror?dark. The white epitaxial thin film was grown by metal-organic chemical vapor deposition. The active layers were consisted with the serial order of multi-quantum wells for blue, green and red lights. The fabricated LED chip showed the electroluminescence peaked at 450, 560 and 600 nm. For the current injection of 20 mA, the operating voltage was measured to 4.25 V and the optical emission power was obtained to 0.7 μW.

Key Words : White LED, Serial-parallel circuits, Metal interconnection, Photomasks

1. 서 론

발광 다이오드(light emitting diode: LED)램프는 자외선을 이용하는 형광등이나 뜨거운 적외선 영역의 열을 발산하는 백열등을 대신하는 차세대 반도체조명으로 많은 연구가 진행되고 있다[1, 2]. 일본 니치아 화학에서 고휘도 청색 LED칩 위에 YAG(Yttrium Aluminum Garnet)계 형광물질을 도포하여 백색 LED 램프를 제조하였다[3]. 이러한 청색 LED에 바탕을 둔 백색 광소자는 연색지수(rendering index)가 낮아 이를 개선하기 위하여 형광등처럼 발광과장이 자외선인 자색 LED연구를 촉진시켰다[4]. 또한 백색 광소자를 구현하기 위하여 양자점(quantum dot)을 이용하거나 InGaN, AlGaIn, AlInGaN 등의 3원 및 4원합금을 이용한 양자우물구조를 형성함으로써 청색, 녹색 및 적색을 질화물반도체로 구현하기 위하여 많은 시도가 진행 중이다[5-6].

발광다이오드 램프는 가시광선 영역의 파장을 갖고 있기 때문에 인체에 무해하며, 고휘도의 백색을 구현하는데 용이하다. 그리고 백열등이나 형광등에 비해 열로 인한 전력 손실이 적으며 반영구적이다. 발광 다이오드를 이용해 램프를 제작한 기존 방식은 개개의 칩 형태를 배열해 조립, 제작한 경우로, 이는 낮은 공간효율과 저밀도의 다이오드 수로 인한 고휘도의 빛을 발할 수 없는 한계를 가지고 있다.

기존의 개별 칩 형태의 단점을 보완하기 위해 일체형 구조를 갖는 고밀도로 집적화된 백색 램프를 제작한 연구가 활발하며[7, 8], 금속배선 시에 개별 칩간의 배선의 어려움을 단순화하기 위하여 2층 배선으로 N층과 P층 사이를 실리콘 산화막으로 절연하였다. 하지만 완전한 병렬구조로 인하여 임의의 개별 칩이 단락됨으로 인하여 전체램프가 단락되는 단점을 갖는다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 직렬 및 병렬이 혼합된 배열 형태의 고밀도로 집적화된 백색 램프를 제작하기 위한 포토마스크를 설계 및 제작 하였다. 금속배선은 개별 칩의 전극들을 형성한 다

[†]E-mail : kimk@chonbuk.ac.kr

음 실리콘 산화막으로 패틴화된 구조를 가지며 직렬 및 병렬형태의 개별 칩 배열을 그룹화하였다.

2. 실험방법

2.1. 박막 성장 및 포토마스크 설계

Fig. 1은 청색 발광다이오드 램프의 칩 한 개에 적용한 집적 칩 구조를 나타낸다. 사파이어 기판이 절연체로 전극이 Two-top 방식이며 칩 둘레가 스크라이빙되어지는 개별 칩 경우에는 달리 금속배선 되어지는 집적 칩에서는 P형 N형 두 전극이 인근 칩과 직/병렬회로를 구성하여 부분적인 단락상태나 단일층 절연 보호층을 형성함으로써 공정을 단순화 할 수 있는 장점이 있다.

먼저 Fig. 2는 질화물계 백색 발광다이오드 박막구조의 내부단면도이다. 유기금속화합물 화학 기상증착방법(metal-organic chemical vapor deposition: MOCVD)을 이용하여 사파이어 기판 위에 제일 먼저 520°C의 온도

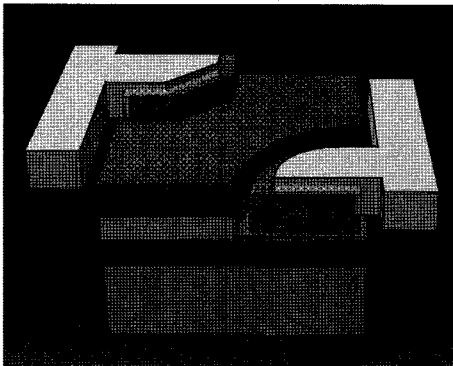


Fig. 1. Schematic diagram of integrated cell of LED.

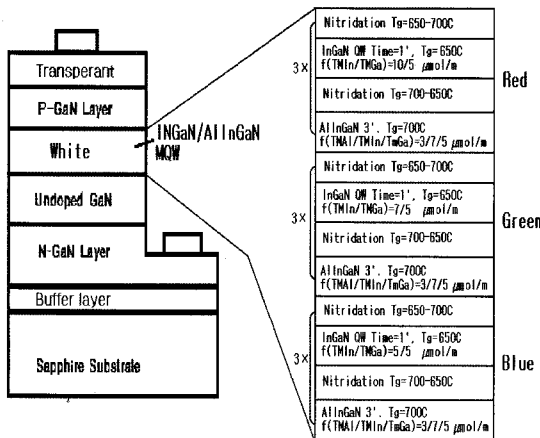


Fig. 2. Schematic diagram of epitaxial LED structure.

에서 500 Torr 가스압력으로 GaN 완충층을 350 Å 두께로 증착한다. 이때 사용되는 주요가스는 TMGa와 NH₃이며 반송가스로는 H₂를 사용하였다. 완충층은 1130°C의 고온에서 성장하는 GaN 에피층의 결정구조를 안정화시키는 역할을 한다. 완충층 위에 Si 도핑된 N형 오믹접촉층인 N-GaN층을 1130°C의 온도에서 2 μm의 두께로 성장시키고, 다시 그 위에 도핑이 되지 않은 GaN층을 1130°C에서 150 Å로 성장한다. 또한, 상기층 위에 삼원색 발광 활성층인 In_xGa_{1-x}N/Al_{0.2}In_{0.3}Ga_{0.5}N 다중 양자우물 구조(Multi-Quantum Well structure)를 3주기씩 9주기를 700°C정도에서 성장하였다.

각 삼원색 발광층은 양자우물/장벽을 20/120 Å 두께로 3주기씩 성장하였으며, 청색양자우물의 In의 성분비는 X=0.25, 녹색성분비는 0.35, 적색성분비는 0.50으로 순차적으로 성장하였다. 삼원색 양자우물구조를 성장한 다음, P형 오믹접촉층으로 Mg이 도핑된 GaN을 1020°C, 200 Torr에서 2000 Å두께로 성장하였다. 이러한 Mg도핑된 GaN층을 정기적으로 활성화시키기 위하여 800°C에서 10분 동안 급속열처리(rapid thermal annealing: RTA)하였다.

또한 이러한 에피박막구조의 P-GaN층위에 Ni/Au 금속 박막층을 전자빔 금속 증착장비를 이용하여 50/50 nm의 투명 금속 박막층을 형성하고, 그 위에 P형 전극을 Ni/Au 금속으로 증착 형성하며, N형 전극은 N-GaN층을 플라즈마 건식식각한 다음, 그 위에 Ti/Al 금속을 증착하여 형성한다.

집적 칩을 제작하는데 필요한 포토마스크는 Fig. 3에서처럼 4.5×4.5 in² 크기를 갖는 7종을 설계하였다. 먼저 에피 성장된 박막을 사파이어기판 표면까지 식각하는 에피식각 마스크 1과 N형 GaN층을 오믹접촉층으로 표면에 노출시키기 위한 에피식각 마스크 2, P형 GaN 표면에 오믹 형성과 발광특성(휘도)를 좋게 하기 위해 형성된 투명전극 증착 마스크 3, N형 전극 형성을 위한 금속 증착 마스크 4, P형 전극 형성을 위한 금

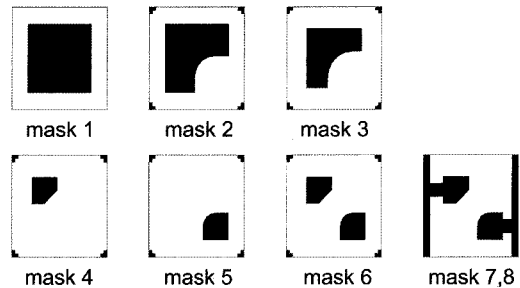


Fig. 3. Photomask patterns for the processes of integrated LED.

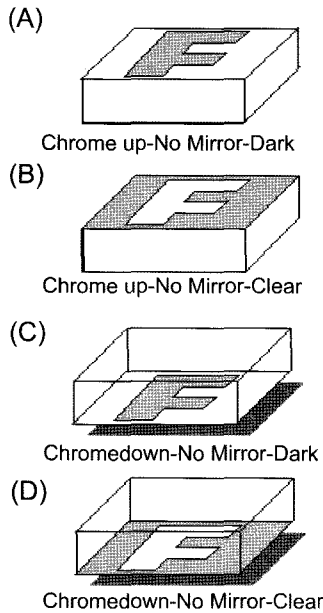


Fig. 4. Various types of photomasks for the light exposure. A and B are proximity types and C and D are contact types. In this work, the type C of Chrome down-No Mirror-Dark has been designed.

속 증착 마스크 5, N형 전극과 P형 전극을 증착된 절연막으로부터 들어내는 식각 마스크 6, N형 전극과 P형 전극을 직 · 병렬로 연결하는 금속배선 증착 마스크 7로 구성 되어진다.

AutoCAD로 패턴이 형성된 포토마스크 .dwg 파일을 DXF파일로 변환하여 Ion Laser에 입력하여 장비를 구동하게 된다. Soda Lime 유리판 위에 크롬을 증착하고 그 위에 감광제인 포토레지스트를 도포하여 레이저 빔 장비에 의해 원하는 부분에 직접 노광을 한 후 현상액을 통해 필요한 패턴을 형성하게 된다. 크롬과 반응하는 화학 용액에 담구어 노출된 크롬부분을 식각한 후 불필요한 포토레지스트를 제거한다. 크롬의 pitch(line & space)나 CD(Critical Dimension) 및 거리를 체크한 다음 결함이나 입자를 확인한 후 세정을 한다. 본 연구에서 설계된 포토마스크는 Fig. 4의 C type 경우로 웨이퍼와 접촉되는 형태를 갖는 Chrome down-no mirror-dark 타입으로 제작하였다.

2.2. 백색 LED칩 제조공정

제작된 포토마스크를 이용하여 백색 LED조명 광원용 반도체 제조공정을 수행하였다. 먼저 직렬로만 회로

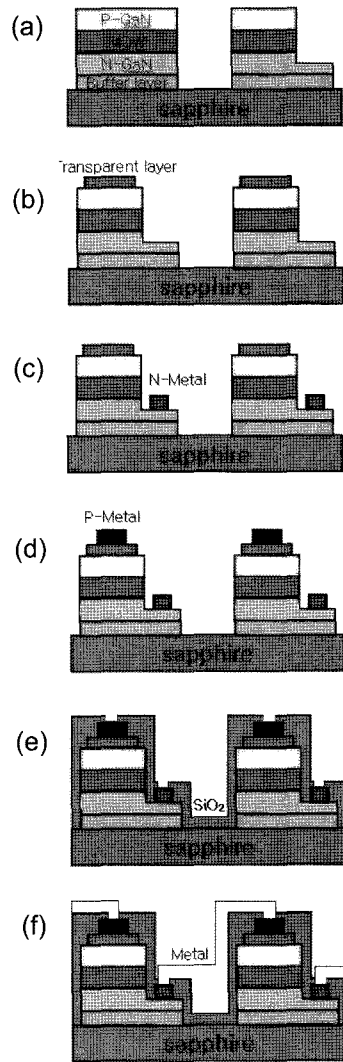


Fig. 5. The fabrication process of LED lamp: (a) Sapphire & GaN etching process. (b)Transparent cladding process. (c) N-metal cladding process. (d) P-metal cladding process. (e) Insulator cladding process. (f) Metal-Interconnection.

를 구성했을 경우 칩을 연결하는 금속 배선이 끊어지면 다른 모든 칩들에 전기가 걸리지 않아 빛이 나오지 않게 된다. 반대로 병렬로만 연결했을 때 P전극과 N전극 사이의 임의의 칩 하나가 단락(short)될 경우 다른 칩에 전기가 걸리지 않아 빛이 나오지 않게 된다. 따라서 이런 문제점을 보완하여 직 · 병렬을 회로를 구성하였다.

Fig. 5는 포토리소그래피, 증착 및 식각공정이 결합된 LED 칩 제조공정 순서이다. MOCVD에 의해 에피층이

성장된 웨이퍼를 LED 램프로 만들기 위해 먼저 에피층을 사파이어기판까지 식각하는 공정과 N전극을 형성하기 위해 N-GaN까지 에피층을 식각하는 공정, 투명전극 증착공정, N-형 전극 증착공정, P-형 전극 증착공정, 금속배선에 필요한 절연용 SiO₂막 증착공정, N형과 P형을 연결하는 금속배선 증착 공정이 수행되었다.

Fig. 5(a)는 에피 식각공정으로 사파이어기판 표면까지 식각하여 개별 칩으로 분리하는 식각공정과 N전극용 N-GaN 에피층을 노출시키는 식각공정, 두 개 공정이 수행된다. 직·병렬 회로를 구현하기 위해 직렬일 경우 하나의 독립된 패터이어야 하기 때문에 에피 박막층이 성장된 기판 위에 SiO₂ 절연막을 증착시킨 후 포토공정을 거쳐 원하는 부분에 사파이어 기판이 노출될 때까지 4 μm의 에피층을 건식 유도결합형 고밀도 플라즈마로 식각하였다. 또한 N형 전극 형성을 위해 에피 에칭 마스크를 사용해 N-GaN층이 노출될 때까지 8000 Å의 에피층 두께를 플라즈마를 이용하여 식각한다. 후속 포토공정에서 정확한 마스크 정렬(align)을 할 수 있게 각 패터마다 일정한 +자 모양의 키를 두었다.

식각공정은 먼저 박막표면을 아세톤과 메탄올 및 순수로 초기세정을 한 다음 불산용액에서 10분간 전처리하고 양성 포토레지스트(P-P/R)를 코팅하고 노광시켜 현상하였다. 그 다음, Cl₂/BCl₃(30/15 sccm) 가스분위기에서 플라즈마 식각공정을 수행한 다음 P/R를 제거하였다.

Fig. 5(b)는 투명전극 형성 공정으로 P-GaN층 위에 Ni/Au의 금속을 50/50 nm의 나노 두께로 E-Beam으로 증착한다. 금속박막이 광 투과율을 약간 저하시키지만 발광에 필요한 전류 분산효과(current spreading effect)를 제공하기 때문이다. 투명전극 패턴은 P-GaN층의 면적보다 약간 작게 하여 N층과의 전기적 단락(short)을 방지하였다.

투명전극공정에서는 에피박막의 식각공정에서와 같은 초기 세정과 끓는 왕수로 전처리한 다음, lift-off 공정에 필요한 음성 포토레지스트(N-P/R)을 이용한 포토공정을 수행하였다. 특히 lift-off 공정에서 필요한 N-P/R의 over-hang 구조를 형성하였다. 제거된 N-P/R영역을 불산(HF:H₂O=1:200) 및 초순수 온수처리(50°C)를 한 후에 Ni/Au층을 e-beam으로 증착하였다. 다시 아세톤, DPS-1000N 및 IPA치환하는 lift-off공정을 수행하였다. 또한 후속 오믹 열처리(post-annealing)를 550°C에서 N₂ 분위기에서 1분간 수행하였다.

Fig. 5(c)는 N형 전극 형성공정으로 N-GaN층까지 식각된 부분에 Ti/Au금속을 200/5000 Å의 높이로 E-

Beam 증착하였다. P-GaN층과 MQW층의 측면과의 접촉단락을 방지 하기 위해 식각된 부분으로부터 약간 거리를 두어 증착하였다. N-형 전극 증착공정은 초기 세정 및 포토공정을 수행하고 불산 및 온수처리를 수행한 다음, Ti/Au (200/5000 Å) 합금을 열증착(thermal evaporation)하였다. Lift-off공정으로 금속패턴 이외의 부분에 있는 N-P/R 을 들어내어 제거한 다음, 형성된 N-전극 패턴을 550°C에서 30 sec동안 오믹 열처리를 수행하였다.

Fig. 5(d)는 P형 금속 형성공정으로 P-GaN층 위에 Ni/Au의 금속을 150/1000 Å의 높이로 E-Beam 증착하였다. P-형 전극 증착공정에서는 초기 세정후 N-P/R포토공정과 금속 증착전 불산 및 온수처리를 수행하였다. 다음 Lift-off공정 및 500°C에서 30 sec동안 오믹 열처리공정을 수행하였다.

Fig. 5(e)는 SiO₂ 절연막 증착공정으로 표면 단차(step coverage)를 줄이기 위해 칩 분리 부위의 절연막 증진과 금속배선 형성을 위해 P 전극과 N 전극이 형성된 웨이퍼 전체 위로 SiO₂ 절연막으로 절연시키게 된다.

절연층 증착 공정은 아세톤, 메탄올 및 온수처리를 포함하는 초기 세정후, SiO₂ 층을 sputtering 증착방법으로 3 μm의 후막을 증착하였다. P전극과 N전극이 노출 되도록 N-P/R 포토 공정을 통해 패턴화 한 다음, HF로 N-P/R이 제거된 부위의 절연막을 제거하였다. 노출시킨 두 전극 부분은 실제 전극 부분보다 약간 작은 사이즈로 절연막을 패턴화하여 식각하였다.

P/R이 접착 후 제거가 용이하도록 HMDS [hexamethyldisilazane : {(CH₃)₂Si₂NH}] 를 코팅하고 소프트 베이킹한 다음, P/R을 코팅하여 노광 및 현상을 하였다. P/R를 제거하고 절연막을 300°C에서 2분 동안 열처리를 수행하였다.

Fig. 5(f)는 금속배선 증착공정으로 노출된 P형 N형 두 전극들을 직·병렬 형태로 E-Beam 증착공정을 통하여 Ni/Au를 50 nm/0.5 μm 두께로 금속증착 하였다. Lift-off공정을 통하여 금속배선을 패턴화 함으로써 조명램프를 제작하였다. 제작된 램프의 전기적, 광학적 소자특성을 측정하였다.

Fig. 6은 N형 P/R로 제작한 over-hang 구조이다. lift-off 공정을 수행하기 위해 Clariant(사) AZ5214 P/R로 웨이퍼를 아세톤과 메탄올로 초음파 세정하여 순수로 린스한 다음, 탈수 베이킹을 105°C에서 수행하고 P/R 코팅후 105°C에서 소프트 베이킹하여 포토리소그래피 웨이퍼 정렬하여 하고 다시 105°C에서 리버스 베이킹을 수행하여 전면 노광을 수행하였다. 현상액으로 현상하여 SEM으로 관찰 하였다.

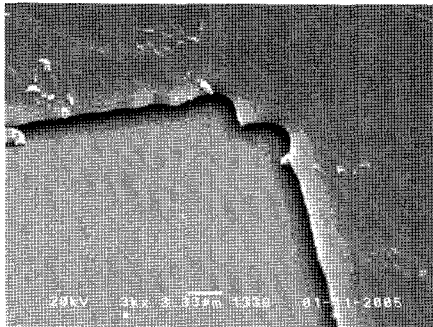


Fig. 6. The over-hang structure of n-P/R for lift-off process.

3. 결과 및 고찰

백색광원의 중요한 연구현안은 색상의 연색성을 높이기 위한 시도와 휘도특성을 높이는 문제이다. 색좌표는 형광물질을 도포한 형광백색 LED에서는 형광체의 도핑에 매우 민감하며, 색변환을 시도하거나, 발광활성층에 희토류(GaN-based $\text{Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}$)를 도핑하여 발광형 결합을 형성함으로써 색변화를 구현하기도 한다^[9-11]. 휘도를 높이기 위해서는 광 양자효율을 높이는 것으로 에피박막 결정성 및 내부양자구조를 최적화하는 것과 외부양자효율을 높이는 것으로 시도되고 있다^[12-14].

이러한 백색광원의 연구 일환으로, 본 연구에서 제작한 3원색 에피층이 적층된 양자우물구조의 LED램프에 대한 소자특성을 평가하기 위해 electroluminescence (EL), L-I-V 발광특성을 단일칩에 대해 특성을 측정하였다. Fig. 7은 제작된 2인치 크기의 백색 LED 램프의 사진으로 웨이퍼 상의 LED 칩에 대한 금속배선 모양을 광학현미경으로 관찰하였다.

Fig. 8은 백색 LED칩의 전기발광 스펙트럼 특성으로 450 nm의 청색파장 피크가 주피크로 나타나며 넓은 파장대의 560 nm에 위치한 녹색파장 피크가 보인다. 또한 600 nm 파장에서 매우 날카로운 피크가 위치하

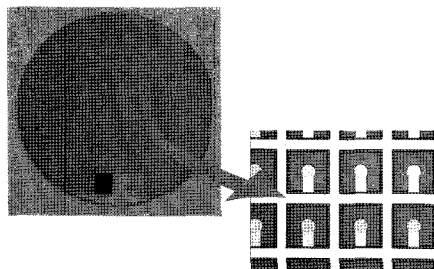


Fig. 7. The fabricated to 2"-size LED lamp with the serial-parallel integration of LED chips.

여 3원색의 백색과장을 형성하였다. 색좌표(chromatographic coordinates)는 $(x, y)=(0.315, 0.340)$ 을 나타낸다.

Fig. 9는 전류-전압-발광전력(optical power)의 관계를 나타내는 소자특성으로 동작전류 $I=20\text{ mA}$ 에서 순방향 동작전압은 $V_f=4.25\text{ V}$, 광전력은 $P=0.7\text{ }\mu\text{W}$ 를 나타낸다. 소자의 문턱전압(threshold voltage)은 $V_{th}=2.75\text{ V}$ 이며 전류증가에 따라 광전력이 선형적으로 증가하여 70 mA에서는 $P=2.0\text{ }\mu\text{W}$ 를 나타낸다. 칩 내의 에피층의 전기적 저항 특성을 나타내는 정적 저항(static resistance)은 20 mA의 구동전류에서 $212.5\text{ }\Omega$ 을 나타내며, 또한 N-형 및 p-형 오믹접촉 특성에 연관된 곡선의 기울기를 나타내는 동적 저항(dynamic

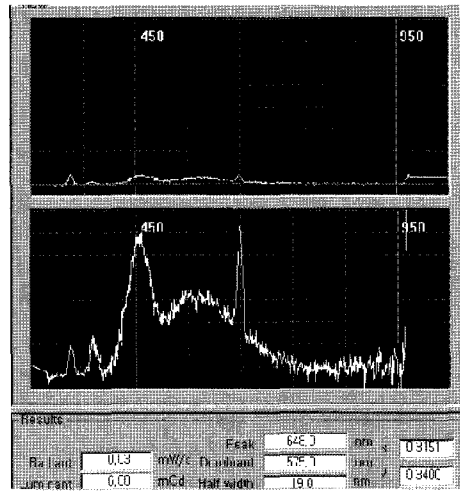


Fig. 8. The electroluminescence spectrum of a white LED chip with the chromatographic coordinates $(x, y)=(0.315, 0.340)$.

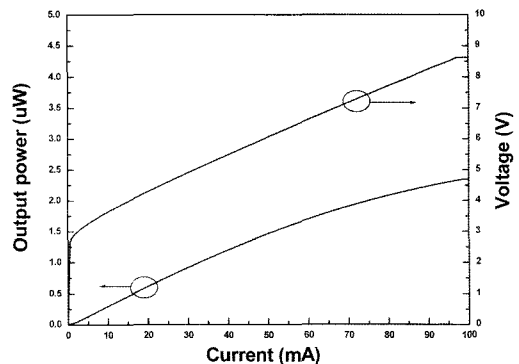


Fig. 9. The L-I-V measurement from an white LED chip on-wafer. For the current operation at 20 mA, the forward voltage was measured as 4.25 V and the output power was 0.7 μW .

resistance)은 65 Ω 로 비교적 작은 저항값을 갖는다. 이러한 큰 정적저항은 청색, 녹색 및 적색의 MQW층의 계면들에서 전류의 흐름에 큰 저항을 느끼게 하며, 비교적 적은 동적저항은 전류를 소자 속으로 인가하는데 있어 옴전극의 접촉특성이 양호함을 의미한다.

이러한 동작전압 주위의 I-V특성이 양호하여 prototype의 LED램프특성으로부터 금속배선의 집적화 공정이 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 백색 LED조명램프로 활용할 수 있는 청색, 녹색 및 적색 양자우물층이 순차적으로 적층된 에피박막을 MOCVD방법으로 성장하였으며, 금속배선을 포함하는 칩 집적공정을 수행하였다. 직·병렬 회로의 백색LED 조명램프를 제작하기 위하여 본 연구를 통해 $4.5 \times 4.5 \text{ in}^2$ 크기를 갖는 7장의 포토 마스크를 설계하였다. 포토마스크는 웨이퍼와 접촉되는 Chrome down-no mirror-dark 타입으로 제작하였다. 백색발광 조명광원을 제작하기 위하여 LED 개별 칩을 일단 웨이퍼 상에 제작한 다음 이러한 개별 칩들의 전극을 금속배선화하는 집적 칩 개념을 도입하였다. 특히 각 공정에 따른 복잡한 공정을 7장의 마스크공정으로 세분화하였다. 제작된 백색LED소자의 단일칩에서 전기발광을 확인하였으며, 450 nm, 560 nm 및 600 nm에서 발광피크가 관찰되었다. 동작전압은 20 mA의 전류에서 4.25 V이며, 광 전력은 0.7 μW 를 나타내었다. 본 연구를 통하여 발광 다이오드 칩을 고밀도 집적화시킴으로써 고휘도 백색램프를 구현할 수 있는 가능성을 확보하였다.

감사의 글

이 연구는 2003년도 한국에너지관리공단 학술진흥사업(2003-E-EL03-P-01-0-000)의 지원연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Nakamura, S. and Fasol, G. "The Blue Laser Diode", (Springer, Berlin, 1997) p. 216.
2. Schubert, E. F. and Kim, J. K., "Solid-state light source getting smart", Science, Vol. 308, 1274 (2005)
3. Nakamura, S. Mukai, T. and Senoh, M. "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes", Appl. Phys. Lett., Vol. 64, pp. 1687-1689, 1994.
4. Gardner, N. F., Chui, H. C., Chen, E. I., Krames, M. R., Huang, J.-W., Kish, F. A., Stockman, S. A., Kocot, C. P., Tan, T. S. and Moll, N., "1.4 \times efficiency improvement in transparent-substrate $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ light-emitting diodes with thin ($\leq 2000 \text{ \AA}$) active regions", Appl. Phys. Lett., Vol. 74, pp. 2230-2232, 2000.
5. Xiao, D., Kim, K. W., Bedair, S. M. and Zavada, J. M., "Design of white light-emitting diodes using InGaN/AlInGaIn quantum-well structures", Appl. Phys. Lett., Vol. 84, pp. 672-674, 2004.
6. Damilano, B., Grandjean, N., Semond, F., Massies, J. and M. Leroux, "From visible to white light emission by GaN quantum dots on Si(111) substrate", Appl. Phys. Lett. Vol. 75, 962-964, 1999.
7. Kim, K. and Yang, J. J., "A study on the III-nitride light emitting diode with the chip integration by metal interconnection", J. Semicon. & Display Equip. Technol. Vol. 3, pp. 31-35, 2004.
8. Kim, K. and Lee, K. H., "White light emitting diode with the parallel integration of InGaN-based multi-quantum well structures", J. Semicon. & Display Equip. Technol. Vol. 3, pp. 39-43, 2004.
9. Park, J. K., Lim, M. A., Kim, C. H., Park, H. D., Park, J. T. and Choi, S. Y., "White light-emitting diodes of GaN-based Sr_2SiO_4 : Eu and the luminescent properties", Appl. Phys. Lett. Vol. 82, pp. 683-685, 2003.
10. Zukauskas, A., Vaicekauskas, R., Ivanauskas, F., Gaska, R. and Shur, M. S., "Optimization of white polychromatic semiconductor lamps", Appl. Phys. Lett. Vol. 80, pp. 234-236, 2002.
11. Koedam, M. and Opstelten, J. J., "Measurement and computer-aided optimization of spectral power distributions", Lighting Res. and Technol., vol. 3, pp. 205-210, 1971.
12. Timon, V., Brand, S., Clark, S. J., Gibson, M. C. and Abram, R. A., "First-principles calculations of 2×2 reconstructions of GaN(0001) surfaces involving N, Al, Ga, In, and As atoms", Phys. Rev. B Vol. 72, pp. 035327-035333, 2005.
13. Semiconductors and Semimetals: High Brightness Light Emitting Diodes, ed. by G. B. Stringfellow and M. G. Craford (Academic, New York, 1997), Vol. 48.
14. Chhajed, S., Xi, Y., Li, Y.-L., Gessmann, Th. and Schubert, E. F., "Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes", J. Appl. Phys., Vol. 97, 054506-054513, 2005.