

Abstract

발광 다이오드가 처음 만들어진 것은 100년 전으로 거슬러 올라간다. 이 글은 100년 전 발광 다이오드가 우연히 발견된 이후부터 현재 없어서는 안될 귀중한 고출력/고효율 대체 조명용 광원으로 인식되기까지의 역사를 돌아보고자 한다. 또한 앞으로 기대되는 발광 다이오드의 발전 가능성과 응용성에 대해서도 다루고자 한다.

1. 반도체 전장발광 발견과 해석 (1907~1950년대)

100여 년 전, 영국 출신의 라디오 엔지니어인 Henry Joseph Round는 비싼 진공 다이오드의 대체물로 유망한

금속-반도체 탄화규소 (SiC) 정류기의 전기적 특성을 조사하다 고체상 재료에서 빛이 방출되는 현상을 우연히 발견하게 되었다. Round는 비대칭적인 전류의 흐름(the unsymmetrical passage of current)이 있는 다이오드 구조에서 노란색, 녹색, 오렌지색, 또는 청색 빛이 방출되었다는 흥미로운 전장발광(electroluminescence) 현상을 두 문단으로 이루어진 짧은 글로 저널 *Electrical World*에 발표하였으며,¹ 이 글은 발광 다이오드 (Light-emitting diodes)에 관해 첫 번째로 출간된 논문으로 평가되고 있다. [Figure 1]

Round의 전장발광 현상의 발견은 현재 고체조명 혁명의 시작을 알리는 중요한 사건이었음에도 불구하고, 그 당시에는 별다른 주목을 받지 못하며 잊혀지는 듯 하다가, 1923년 20살의 러시아 과학자인 Oleg Vladimirovich Lossev에 의해서 재조명되었다. Lossev는 SiC 금속-반도

특집 ■ LED

반도체 발광 다이오드의 역사

김종규, E. Fred Schubert*

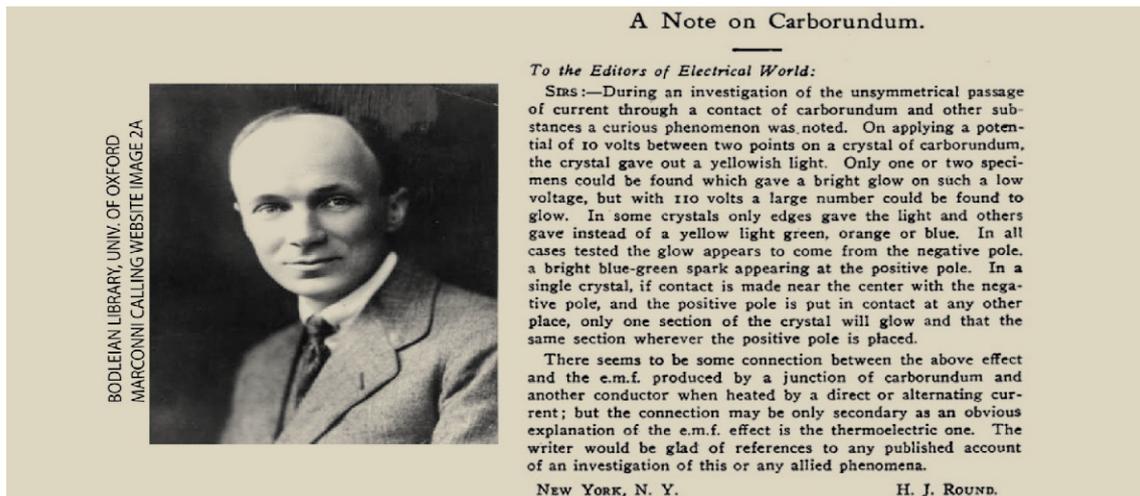


Figure 1: (a) Photograph of Henry Joseph Round. (b) 1907 publication of electroluminescence published in the journal *Electrical World* (after Round, 1907).

* 포항공대

반도체 발광 다이오드의 역사

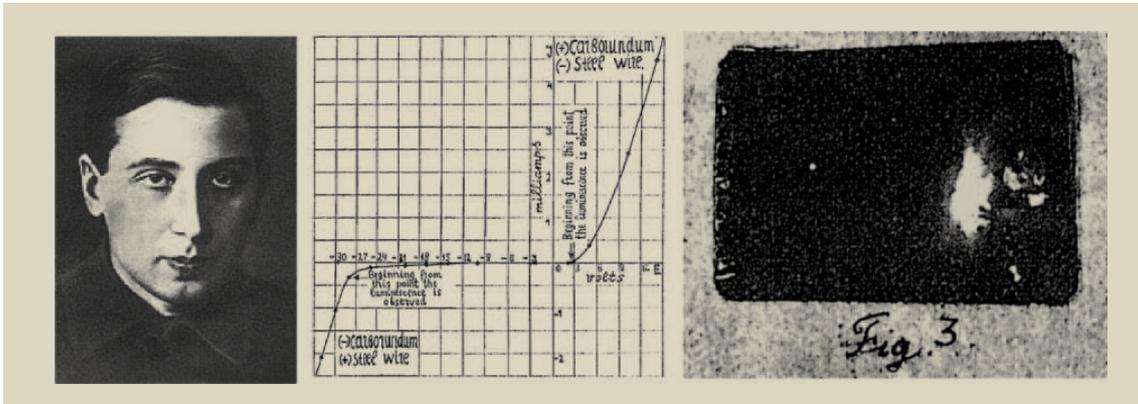


Figure 2: (a) Photograph of Oleg Vladimirovich Lossev. (b) Current-voltage characteristic of SiC LED. Lossev's labeling indicates that electroluminescence is found for the forward- as well as in reverse-bias direction (Lossev, 1928). (c) First photograph of electroluminescence emanating from a SiC light-emitting diode (after Lossev, 1924).

체 접합 (Metal-semiconductor contact) 다이오드의 전류-전압 특성 측정을 하였고 다이오드에 순방향 바이어스 (forward bias)를 가해주었을 때뿐만 아니라 역방향 바이어스(reverse bias)를 가해주었을 때에도 발광현상이 일어남을 관찰하였으며 [Figure 2(b)], 이 전장발광 현상을 최초로 촬영하였다.²⁻⁴ [Figure 2(c)]

현재의 발광 다이오드가 반도체 p-n 접합을 기본 구조로 하며 순방향 바이어스에서만 발광하는 것과는 달리, Round와 Lossev는 SiC 금속-반도체 접합 다이오드의 순방향과 역방향 바이어스 조건에서 모두 발광하는 현상을 발견하였다. 반도체 이론이 발달한 오늘날에는 초기의 전장발광 현상이 순방향 바이어스에서의 소수 캐리어 (minority carrier) 주입에 의한 발광 재결합과 역방향 바이어스에서의 충격이온화 (impact ionization) 현상에 의한 발광 재결합 기구에 의한 것으로 해석할 수 있으나, 그

당시 Lossev는 이를 알지 못한 채로 발광 현상에 대한 몇 가지 흥미로운 연구를 수행했다. 그는 발광하는 샘플의 표면에 벤젠을 떨어뜨린 후 증발 속도를 측정하는 방법으로 이러한 발광현상이 백열에 의한 고온 발광현상 (heat glow, incandescence)인지 실험하였다. 이 실험을 통해 벤젠의 증발 속도가 매우 느린 것을 확인하고, 이러한 발광 현상이 고온 발광 현상이 아니라 저온 방전 현상 (cold electronic discharge)과 매우 흡사한 과정에 의한 것이라고 설명하였다. 또한 그는 발광의 on/off 속도가 무척 빨라서 "light relay"에 적합한 소자, 즉, 광통신에 사용할 수 있는 광소자로 응용이 가능하다는 것을 예견했다. Lossev는 반도체의 전장발광 현상의 근원에 대해 매우 깊이있는 연구를 수행했으며, Ioffe Institute는 1938년에 그의 업적을 인정해서 정식 박사논문 없이 박사학위와 동등한 "Candidate" 학위를 수여하였다.

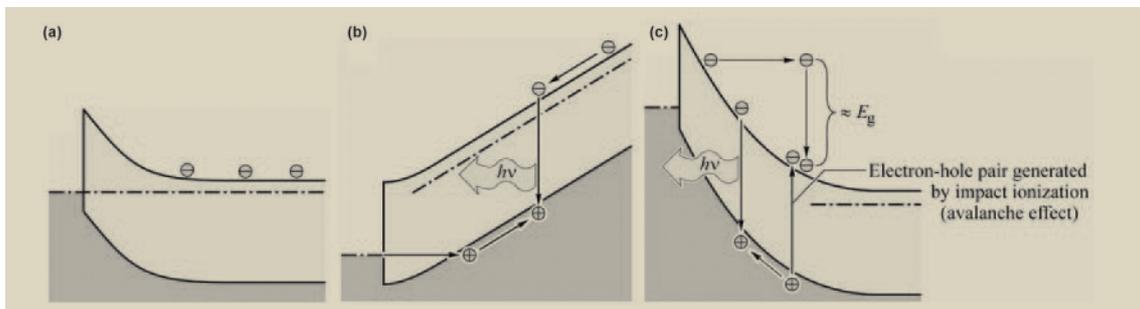


Figure 3: Energy band diagram of a Schottky diode under (a) thermal equilibrium conditions, (b) strong forward bias, where minority carrier injection occurs, making possible near-bandgap light emission, (c) strong reverse bias enabling light emission due to avalanche effect.⁵ (E. Fred Schubert, Light-Emitting Diodes, 2nd Edition)

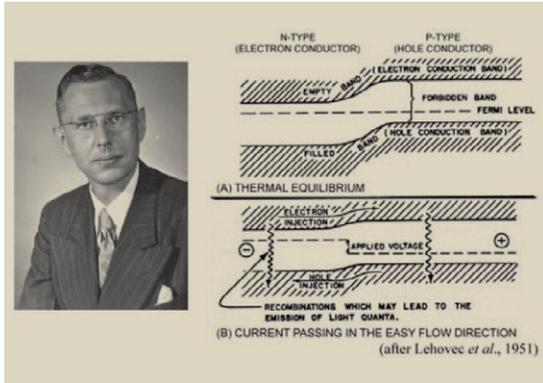
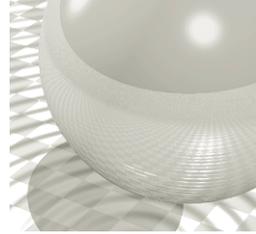


Figure 4: Photograph of Kurt Lehovec. Energy band diagram of a p-n junction diode under (a) thermal equilibrium conditions, (b) forward bias, which was referred to as the easy-flow direction. (Kurt Lehovec et al., *Physcal Review* 83, 603 (1951))

2. 가시광선 장파장 영역의 P-N 접합 발광 다이오드

1951년, 미국 New Jersey의 Signal Corps Engineering Laboratories에 있던 Kurt Lehovec과 그의 동료들은 반도체 발광현상에 대한 현대적인 해석을 내놓았다. 반도체 p-n 접합에 순방향 바이어스를 인가했을 때, 소수 캐리어가 p-n 접합의 경계를 지나 주입되고, 다수 캐리어와 발광재결합하면서 발광이 일어난다고 설명하였다.⁶ [Figure 4]

1950년대에 들어서면서 III-V 족 화합물반도체 성장 기술이 발달하면서 비효율적인 SiC를 대체하고, 이를 발광으로 발광소자 특성은 매우 급격하게 향상된다. 특히, III-V족 화합물 반도체 기반 광소자/전자소자의 이상적인 기판(substrate)으로 사용되는 GaAs 단결정의 구현(Welker, 1952)은 발광소자 성능의 획기적 향상의 발판이 되었으며, 특히 General Electric (GE), IBM, Lincoln Laboratories에 의해 주도된 GaAs LED와 반도체 레이저의 초기 개발에 결정적인 breakthrough 기술로써 사용되었다.

III-V족 화합물반도체에 기초한 첫 번째 가시광선영역의 발광소자는 오렌지색 GaP 금속-반도체 접합 다이오드로, 1955년 Signal Corps Engineering Laboratories의 Wolff와 그의 동료들에 의해 실현되었다. 그러나, 금속-반도체 접합구조에서 충격이온화 현상에 의한 발광 재결합

기구는 p-n 접합 발광 다이오드에 비해 효율이 극히 낮아서 상업화에는 적합하지 않았다.

1960년대와 70년대에는 적색, 노란색, 주황색, 녹색 등 다양한 파장의 발광을 하는 GaPAs, N-doped GaP, N-doped GaPAs, Zn- and O-doped GaP 와 같은 III-V족 화합물반도체의 개발을 통해 발광소자 성능이 Wolff의 금속-반도체 접합 다이오드에 비해 크게 향상되었다. 특히, Nick Holonyak Jr.는 다수의 연구자들이 적외선 영역의 발광소자에 집중해서 연구할 때에, 성분비 조절이 가능한 Ga(As_{1-x}P_x) 단결정을 성장하는 방법을 발명하고, 이를 가시광선 영역의 발광소자를 실현하는데 이용하였다. 그의 적색 발광 다이오드는 최초의 실용적인 발광소자로 인정받고 있다.⁷ 1980년대에 접어들면서 Hewlett-Packard와 Toshiba를 중심으로 고효율 발광 소재로써 AlGaInP 화합물반도체에 대한 활발한 연구가 진행되었으며, 이 AlGaInP는 현재까지 가시광선 장파장 영역 (적색~노랑색)의 고효율 발광소자로 널리 이용되고 있다.

3. GaInN 기반 청색 발광 다이오드

가시광선의 단파장 영역, 즉 청색~자색 발광소자에 대한 연구는 1960년대 후반 RCA에서 시작되었다. Paul Maruska는 최초로 단결정 GaN 박막을 실현하였으며, 이는 청색 발광소자의 연구 역사에 최초의 breakthrough로 인정되고 있다. 그러나, 성장된 GaN 박막은 결정결함에 의해 자연적으로 n-형 특성을 나타내었으며, p-형으로 도핑 하고자 하는 모든 시도는 실패하였다. Paul Maruska와 동료들은 p-n 접합 발광다이오드 대신에 금속-절연체-반도체 (metal-insulator-semiconductor, MIS) 다이오드를 제작하여 청색 발광을 실현하였으나 효율이 너무 낮았고, 그들의 프로젝트는 1970년대 초에 종료되었다.

그 후로 GaN의 p-형 도핑은 오랜 난제로 남아 있었으며, 많은 연구자들은 ZnSe 등의 II-VI 족 화합물반도체로 눈을 돌려 연구하기 시작했으나, ZnSe는 Reliability에 문제가 있는 것으로 알려지어서, 현재는 청색 발광소자로서 ZnSe에 대한 연구는 거의 중단되었다. 1989년 일본의 Isamu Akasaki와 공동 연구자들은 주사전자현미경으로 관찰한 Mg로 도핑된 GaN에서 p-형 전도성이 생긴다는 사실을 우연히 발견하였으며, 이 방법을 low-energy

반도체 발광 다이오드의 역사

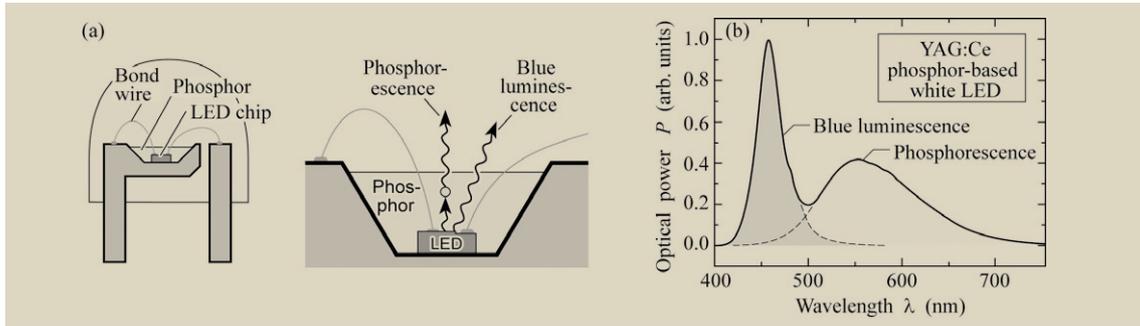


Figure 5: (a) and (b) Structure of white LED lamp consisting of a GaInN blue LED chip and a wavelength-converting phosphor introduced by Nichia Corporation (Anan, Tokushima City, Shikoku Island, Japan). (c) A spectrum of a white LED lamp consisting of GaInN blue LED chip and a wavelength-converting phosphor.

electron-beam irradiation (LEEBI)로 명명하였다. 이 연구는 p-형 GaN를 실현할 수 있다는 것을 보여준 것으로 발광소자 역사 상 가장 중요한 발견의 하나로 여겨진다. 이 팀은 3년 뒤에 1%의 효율을 나타내는 p-n 접합 발광 다이오드를 발표하였으나, 곧이어 일본 니치아 (Nichia)의 Shuji Nakamura가 열처리보다 손쉽게 Mg 도핑된 GaN에 p-형 전도성을 갖게하는 방법을 개발하였고, 이를 토대로 보다 효율적인 청색 발광 다이오드를 개발하였다.⁸ 그 이후 니치아는 고효율 청색-백색 발광 다이오드의 세계적인 리더로서 그 위치를 확고히 하고 있다.

4. 백색 발광 다이오드에 의한 고체조명 혁명 (Solid-state lighting revolution)

반도체 발광 다이오드는 기본적으로 단색광원이다. 가시광의 장파장 영역은 AlGaInP 계열, 단파장 영역은 GaInN 계열의 화합물 반도체를 발광원으로 사용함을 언급한 바 있다. 이러한 단색광원으로서의 LED는 주로 신호등, 전광판, 옥외 디스플레이 등 정보전달용으로 많이 사용되어 왔다. 근래에는 정보전달을 넘어서 조명용 백색광 LED에 대한 관심이 폭발적으로 증가하고 있다. 백색광 발광소자를 만들기 위한 방법 중 하나는 몇 가지 다른 색의 발광소자를 혼합하는 것이다. 그러나 현재 상업적으로 주된 흐름은 청색 발광소자와 노란색 인광물질 (phosphors)의 조합에 의한 백색광을 발생시키는 것으로 Nichia에 의해 개발 되었다. [Figure 5] 고연색성의 백색광을 얻기 위해 인광물질에 대한 연구도 활발하게 진행되

고 있다. 백색 발광 다이오드의 효율은 매년 급격하게 증가하고 있으며, 최근에는 미국의 Cree Lighting 사에서 208 lm/W (350 mA 입력전류, 연구실 결과), 일본의 Nichia 사에서 249 lm/W (20 mA 입력전류, 연구실 결과)라는 놀라운 결과를 발표한 바 있다. 그러나, 실제 발광 다이오드를 사용하는 등기구 (luminaire)의 효율은 열적/전기적/광학적 손실에 의해 다이오드 자체의 효율의 1/2 정도에 불과한 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 일반적인 백열전구 (15 lm/W)와 형광등 (~70 lm/W)과 비교할 때 보다 효율적이다.

5. 미래 지능형 광원: 대체조명을 넘어서

반도체 발광 다이오드가 기존의 광원 (백열등, 형광등)과 근본적으로 구별되는 중요한 특징 중 하나는 발광특성의 제어가 가능하다는 점이다.⁹ 제어가 가능한 발광특성으로는 스펙트럼, 편광, 색온도, on/off 모듈레이션, 그리고 공간적인 발광 패턴 등이다. [Figure 6] 고출력/고효율 발광소자의 발전과 함께, 기존의 광원에서는 불가능했던 발광 특성의 정확하고 효과적인 제어는 매우 중요한 기술로 인식되고 있다. 발광 다이오드의 발광 특성 제어성을 이용하여, 광원에 다기능성/지능성을 부가시켜 다양한 분야에 응용하는 소위 "smart lighting"에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Smart lighting의 예로는 (i) 액정 디스플레이(LCD)의 백라이트팅 소자로서 LCD의 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있는 편광 제어 발광 다이오드, (ii) 백색광의 색온도 조절을 통한 well-being/감성 조명, 치료용

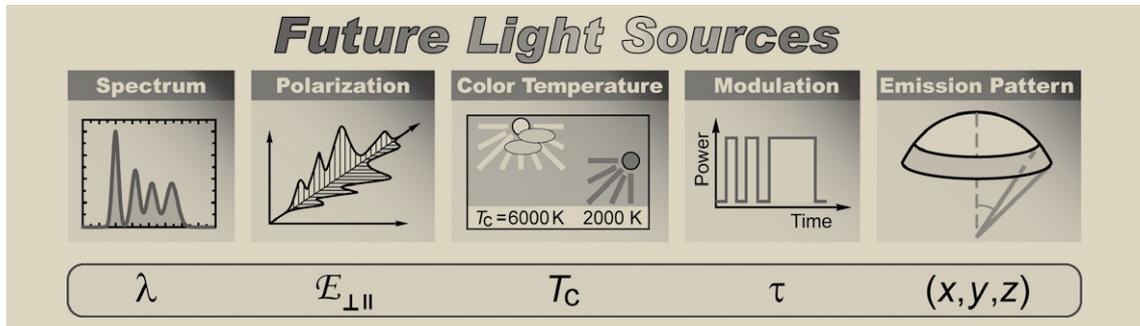
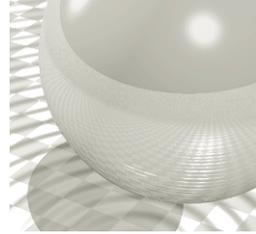


Figure 6: Controllable parameters of solid-state sources include the emission spectrum, polarization, color temperature, modulation, and far-field emission pattern

조명, (iii) on/off 모듈레이션을 이용한 가시광선 통신 등이다. 이러한 예는 smart lighting 개념의 수많은 적용 예 중 일부에 불과하며, 이 개념을 이용하여 농업, 어업, 바이오, 통신, 디스플레이 등의 넓은 분야에 유용한 다기능성/지능형 광원으로서는 반도체 발광 다이오드는 진보할 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. H. J. Round, *Electrical World* 19, 309 (1907)
2. O. V. Lossev, "Wireless telegraphy and telephony" *Telegrafia i Telefonía*, No. 18, page 61 (1923)
3. O. V. Lossev, *Wireless World and Radio Review* 271, 93 (1924)
4. O. V. Lossev, "Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals" *Philosophical Magazine* 6, 1024 (1928)
5. E. Fred Schubert, "Light-emitting diodes" 2nd Edition, Cambridge Press.
6. K. Lehovc, , C. A. Accardo and E. Jamgochian, *Physical Review* 83, 603 (1951)
7. N. Holonyak Jr et al., *Appl. Phys. Lett.* 1, 82 (1962)
8. S. Nakamura, G. Fasol, and S. J. Pearton *The Blue Laser Diode*, second edition (Springer, Berlin, 2000)
9. E. Fred Schubert and Jong Kyu Kim, *Science* 308, 1274 (2005)