

기술 특 집

AMOLED 재료 기술

육경수¹, 이준엽¹, 김성현², 장정식² (¹단국대학교 고분자공학과, ²서울대학교 화학생물공학부)

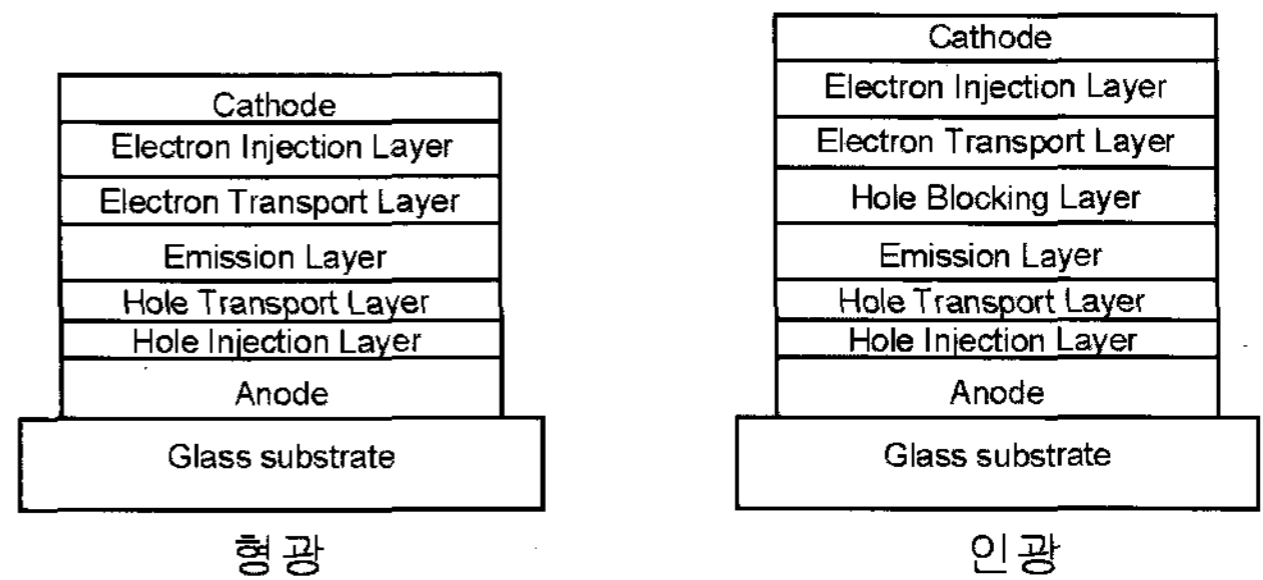
I. 서 론

Organic light-emitting diode(OLED)는 1982년 최초로 전기적인 발광현상을 발견한 이후 빠른 속도로 발전하고 있으며, 초창기에 제품화되었던 passive matrix OLED를 시작으로 현재는 thin film transistor(TFT)를 이용하여 구동하는 active matrix OLED(AMOLED)를 중심으로 제품개발이 진행되고 있다.^[1] AMOLED는 현재 휴대폰 및 MP3의 디스플레이를 중심으로 향후에는 TV 등으로 응용 분야를 확장해 갈 것으로 예상된다.

AMOLED는 PMOLED와 비교하여 기본적인 OLED 소자 구조 측면에서는 유사한 구조를 채용하고 있으나, duty 구동 방식을 적용하여 높은 순간 휘도를 요구하는 PMOLED와는 달리 active 구동 방식을 적용하여 저휘도 영역에서 구동이 되기 때문에 소자 요구 특성에 차이점이 있다. 또한 기존에 PMOLED에서는 배면 발광 구조의 OLED 구조를 채용하고 있는 반면에 AMOLED에서는 TFT의 면적에 의한 개구율 감소의 문제가 있기 때문에 배면발광보다는 전면 발광을 채용하는 구조가 사용되고 있다. 따라서 소자 구조의 차이로 인하여 소자의 특성을 확보하기 위한 재료의 요구사항도 배면발광과는 다르며 소자 특성을 개선하기 위한 새로운 재료들이 적용되고 있다. 본 논문에서는 전면 발광을 비롯한 AMOLED 구조에서 적용하고 있는 저분자 재료에 대해서 살펴 보고자 한다.

II. 저분자 OLED 소자 구조

저분자 OLED 소자는 크게 양극(anode), 정공수송층(hole transport layer, HTL), 발광층(emission layer, EML), 전자수송층(electron transport layer, ETL) 및 음극(cathode)의 다층 박막 구조로 이루어져 있으며, 효율적인 정공(hole)과 전자(electron)의 주입을 위하여 양극과 정공수송층 사이에 정공주입층(hole injection layer, HIL)이 추가적으로 도입되고, 전자수송층과 음극 사이에는 전자



[그림 1] 형광 및 인광 소자의 대표적인 소자구조

주입층(electron injection layer, EIL)이 사용되기도 한다. 발광 물질로 인광 물질을 사용하는 인광 소자의 경우에는 추가적으로 발광 물질과 전자수송층 사이에 정공방지층(hole blocking layer, HBL) 또는 엑시톤 방지층으로 불리는 유기막층이 사용되기도 한다. [그림 1]에 형광 및 인광 소자의 대표적인 소자구조를 나타내었다. 현재 형광물질을 발광에 사용하는 형광소자의 경우에는 전극을 포함하여 7층의 박막을 사용하는 경우가 가장 일반적이며, 인광물질을 발광에 사용하는 인광소자의 경우에는 전극을 포함하여 8층의 박막을 사용하는 것이 일반적이거나, 최근에는 인광소자의 경우에도 정공방지층을 제거한 7층의 박막을 사용하는 구조가 개발되었다.

1. 양 극

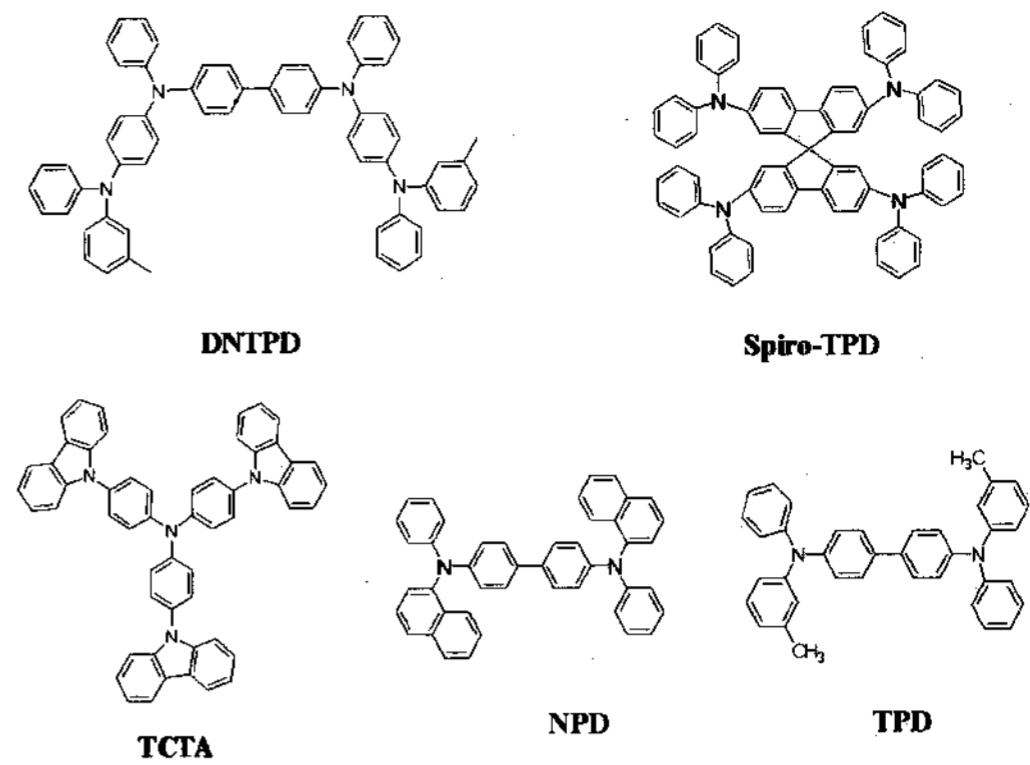
OLED 소자의 양극으로는 배면 발광(bottom-emitting OLED, BOLED)의 경우 내부에서 발생한 빛이 기관 외부로 효율적으로 발광될 수 있도록 투과도가 높은 투명전극인 ITO(indium tin oxide)가 널리 사용되며, 최근에는 우수한 투과도를 갖는 IZO(indium zinc oxide) 등도 투명전극으로 사용된다. 빛의 진행방향이 음극 방향인 전면 발광(top-emitting OLED, TOLED)의 경우에는 반사율이 높은 반사전극으로서 Ag, Al, Ni, Pt, Cr 등의 전극이 사용된다.^[2-13] 그러나 금속 반사 전극의 경우 Ni, Cr 등의 전극은

유기물과 에너지 준위가 유사하여 정공 주입이 우수한 장점이 있는 반면 반사율이 저하되는 단점이 있고, Ag, Al 등의 전극의 경우 반사율은 우수한 반면에 유기물과의 에너지 준위의 차이가 커서 정공주입이 저하되는 단점이 있다. 따라서 최근에는 반사율이 우수한 Ag, Al 등의 금속과 에너지 준위가 유기물과 유사한 ITO, IZO 등의 투명전극을 이층 구조로 적용하여 사용하는 Ag/ITO 또는 Al/ITO 등의 전극 구조가 사용되고 있다. 이층 구조의 전극을 적용할 경우 반사율도 우수하며 정공주입 특성도 우수한 장점이 있다. 양극전극은 정공주입층 또는 정공전달층 등의 유기물층으로의 정공의 주입을 원활하게 하기 위하여 산소 플라즈마 처리 또는 UV/오존 등의 방법을 이용하여 전극의 일함수와 유기물의 HOMO(highest occupied molecular orbital) 사이의 에너지 장벽을 최소화한다. 산소플라즈마 처리시 ITO의 일함수는 4.7~4.8eV에서 5.1eV로 변화하게 되어, 정공주입층 물질의 일함수(5.1~5.3eV)와 유사한 수준이 되어 에너지 장벽이 감소하게 된다.

2. 정공주입층 및 정공수송층

정공주입재료는 일반적으로 양극으로부터 발광층으로의 정공주입을 원활하게 해주는 재료로 전극으로부터 정공 주입을 용이하게 하기 위하여 양극전극의 일함수와 HOMO 준위가 유사하고 전극과의 계면 특성이 우수해야 한다. 또한 발광 효율을 향상시키기 위해서는 가시광선 영역에서의 흡수가 적을 것이 요구되며, 고온에서의 안정성을 위하여 유리 전이온도가 높아야 한다. AMOLED에 사용되는 정공주입층 재료로는 방향족 아민 구조의 정공주입층 재료가 널리 사용되고 있으며, 방향족 아민 중 4개의 방향족 아민 단위를 포함하는 구조의 정공주입층 물질이 우수한 특성을 보이고 있다. 현재 상용화되어 적용되고 있는 대표적인 물질은 Chemipro사의 DNTPD 및 Idemitsu사의 HI406 등으로 전류 주입 및 소자 안정성 등에서 우수한 특성을 보이는 것으로 보고되어 있다. 정공수송층 물질도 방향족 아민 계열의 물질이 널리 적용되고 있으며, 일반적으로 HOMO 에너지를 조절하기 위하여 방향족 아민 단위를 2개 포함하는 구조의 방향족 아민 화합물이 적용되고 있다. 정공수송층 물질의 경우 높은 정공의 이동도 및 열안정성을 필요로 하므로 최근에 사용되는 정공수송층 물질들은 강직한 구조로 이루어진 방향족 아민 화합물이 사용되고 있다. 기존의 정공수송층 물질과 함께 인광 발광 물질을 적용하고 있는 인광 소자의 경우에는 발광층으로부터의 삼중항 엑시톤의 누설을 방지하여 높은 효율을 구현하기 위하여 높은 삼중항 에너지를 갖는 정공수송층이 추가적으로 요구된다. TCTA, CBP 등의 물질이 인광 소자용 정공수송층으로 적용이 가능하나, 열안정성 등이 저하되어, 안정성이 우수한 새로운 인광용 정공수송층 물질의 개발이 요구되고 있다. 최근에 적용되고 있는 대표적인 정공주입층 및 정공수송층 물질의 구조를 [그림 2]에 나타내었다.

전면발광 구조의 경우 배면 발광 구조와는 달리 광학 특

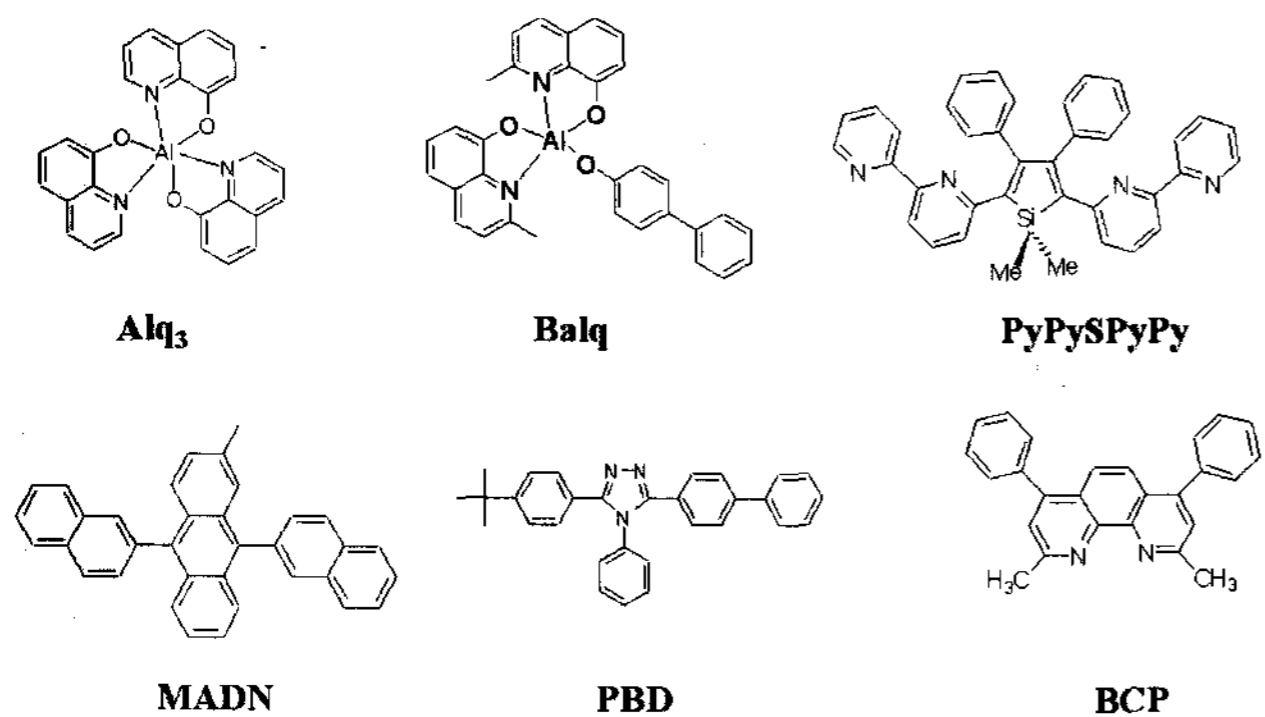


[그림 2] AMOLED용 정공주입층 및 정공수송층 재료

성을 조절하기 위하여 정공주입층 또는 정공수송층을 RGB 칼라별로 다른 구조를 적용하고 있으며, 이 경우 주로 정공 주입층 또는 정공수송층을 두겹게 적용하고 있다. 정공주입층 또는 정공수송층의 두께가 두꺼워질 경우 구동전압이 상승하는 문제점이 발생하며, 따라서 구동전압을 낮추기 위한 정공수송층 구조의 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 대표적으로 P형 도핑 구조 및 무기산화물을 이용한 버퍼 구조 등이 낮은 구동전압을 얻기 위한 소자 구조로서 적용되고 있다. P형 도핑 물질로서는 F₄-TCNQ 구조를 기초로 한 유기 화합물이 우수한 특성을 보이고 있으나, 공정 특성이 불안정하여 적용하기 어려운 실정이다. F₄-TCNQ 이외의 다른 화합물도 알려져 있으나, 상용화에는 문제점이 있으며, 최근에는 WO₃, MoO₃, V₂O₅ 등의 무기 산화물이 정공수송층 물질에 도핑시 우수한 전압 특성을 보이는 것으로 보고되었다.^[14-19] 도핑하는 방법과 함께 버퍼층을 도입하는 방법도 낮은 구동전압을 위하여 적용되고 있으며, C₆₀, MoO₃ 등의 버퍼층 구조가 낮은 구동전압을 얻기 위하여 적용되고 있으며,^[20-21] LG화학의 LG101 버퍼층도 구동 전압을 낮추는데 효과적인 물질로 알려져 있다.

3. 정공방지층 및 전자수송층

정공방지층 재료는 인광 소자에서 생성된 엑시톤 및 홀의 확산에 의한 소자의 특성 감소를 억제하고자 개발되었으며, 따라서 전자수송층으로의 홀의 주입을 막기 위하여 발광층 재료의 HOMO 준위에 비하여 0.5eV 정도 큰 HOMO 준위를 가질 것이 요구되며, 또한 전자수송층으로부터 주입된 전자를 발광층으로 전달해야 하므로 발광층 및 전자수송층 재료의 LUMO 준위와 유사한 LUMO값을 가져야 한다. 이와 함께 삼중항 엑시톤의 소광에 의한 효율 감소를 억제하기 위하여 높은 삼중항 에너지를 가져야 한다. 정공방지층 재료로는 Balq가 정공방지 능력이 우수하고 수명 안정성이 우수하여 널리 사용되고 있으나, 낮은 삼중항 에너지로 인하여 녹색 및 청색 인광 소자에서는 사용하기 어려운 단점이 있다. 이 밖에도 4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline(DPA) 및 perfluorinated phenylene 등도 정공 방지층 재료로 효율적으로 사용될 수 있으나, 최근에는 인광 소자의 발광층을



[그림 3] AMOLED용 정공방지층 및 전자수송층 재료

전자수송특성이 강한 발광층 구조를 적용하고 있기 때문에 정공방지층을 적용하지 않는 추세이다.

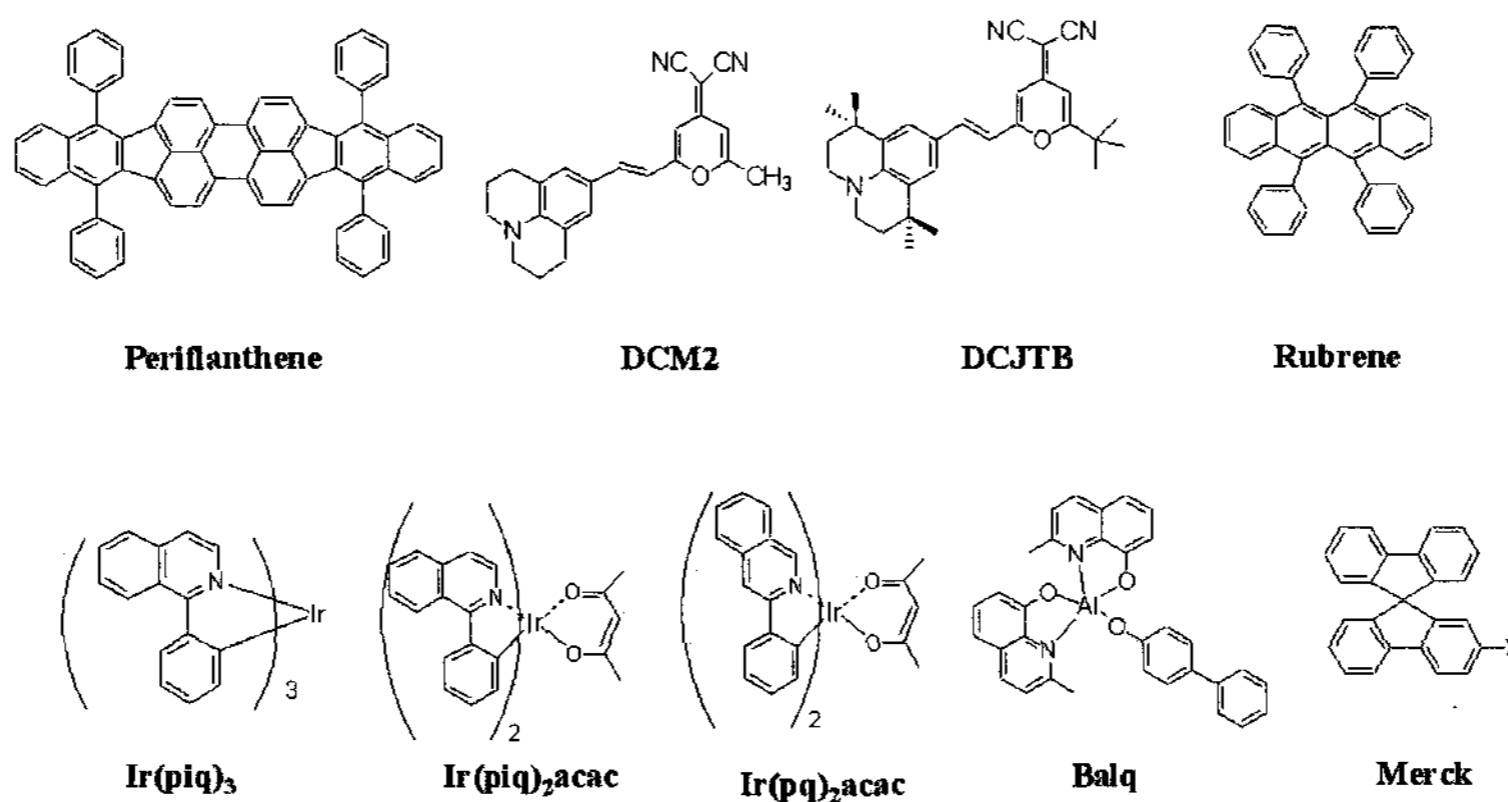
전자수송층 재료는 음극으로부터 주입된 전자를 발광층으로 효과적으로 전달하는 역할을 하며, 전자이동도가 크고 음극과 발광층의 중간정도의 LUMO 준위를 가져야 한다. Alq₃가 전자이동도가 우수하고, 안정성이 우수하기 때문에 전자전달재료로 가장 널리 사용되어 왔으나, 최근에는 낮은 구동전압을 얻기 위하여 AMOLED 소자에서는 oxadiazole, triazole, phenathroline, imidazole, silole 등의 재료가 전자전달재료로 사용되고 있다. 특히 Chisso에서 개발된 silole 재료의 경우 전자이동도가 우수하여 전자전달재료로 사용시 구동전압을 낮출 수 있는 것으로 알려져 있으며, LG 화학의 LG201도 낮은 구동전압 및 우수한 수명 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 최근에는 MADN 구조도 전자수송층으로 적용이 가능한 것으로 알려져 있다. [그림 3]에 대표적인 정공방지층 및 전자수송층 물질을 나타내었다.

4. 발광층

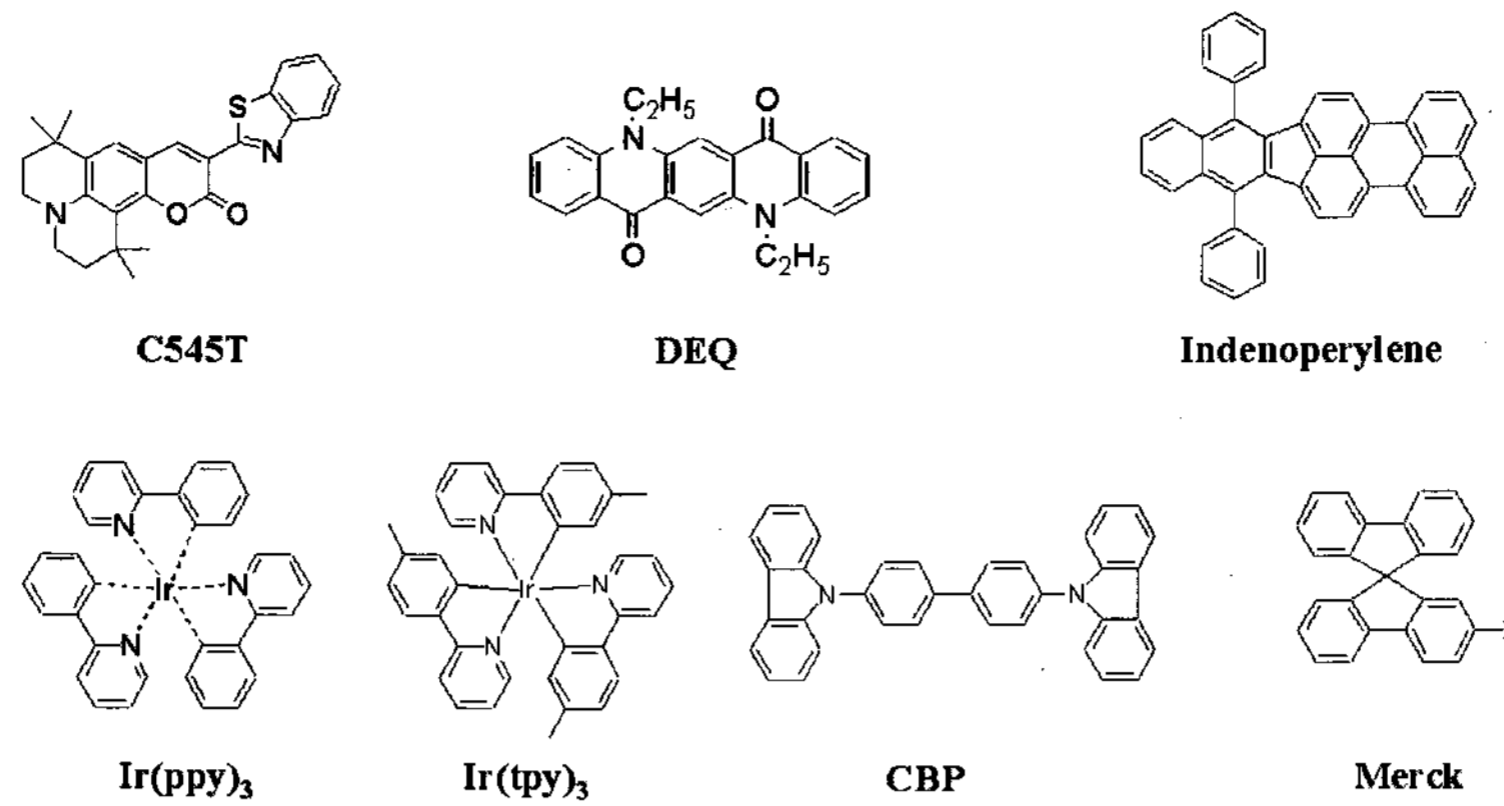
저분자에서의 발광층은 일반적으로 고효율, 고휘도 및 장수명을 얻기 위하여 호스트 및 도펀트를 사용하는 도핑 시스템으로 구성되어 있다. 호스트 또는 도펀트의 단일 물질로 발광층을 구성하는 것도 가능하지만 이 경우 효율 및 휘도가 매우 낮으며 호스트 또는 도펀트 물질 사이의 상호작용

에 의하여 각 분자의 고유한 특성이 아닌 excimer에 의한 특성이 나타나기 때문에 바람직하지 않다. 호스트는 정공수송층 및 전자수송층으로부터 주입된 홀과 전자를 받아서 엑시톤을 형성하고 형성된 엑시톤을 도펀트로 전달하는 역할을 하며, 도펀트는 호스트로부터 전달된 엑시톤을 흡수하여 발광하는 역할을 한다. 호스트의 발광을 도펀트가 흡수해야 하므로 효율적인 에너지 전달을 위해서는 호스트의 발광 영역이 도펀트의 흡수영역과 중첩이 되어야 한다. 에너지 전달에 의하여 발광특성이 결정되므로 소자의 색특성, 효율, 안정성 등은 호스트 및 도펀트 물질에 의하여 크게 좌우되게 되며, 소자의 특성은 주로 도펀트의 특성에 의존하게 된다. 호스트 및 도펀트의 발광 기구에 따라서 일중항 상태의 에너지 전달 및 발광을 이용하는 형광재료와 삼중항 상태의 에너지 전달 및 발광을 이용하는 인광재료로 구분할 수 있다. 일반적으로 여기 상태에서의 일중항 상태와 삼중항 상태의 비율은 1:3으로 형성되게 되며, 형광재료의 경우 일중항 상태만 발광에 이용하고, 인광 재료의 경우 일중항 상태와 삼중항 상태를 모두 발광에 이용할 수 있기 때문에 이론적인 발광 효율의 비율은 형광 재료와 인광 재료가 1:4의 비율이 된다. 인광 도펀트 재료들은 삼중항 상태를 발광에 이용하기 위하여, spin-orbit coupling이 큰 중금속을 포함하는 Pt 또는 Ir계의 유기-금속 착체 화합물이며, 리간드의 종류에 따라서 발광 특성이 결정된다. 현재는 Ir계의 효율 및 수명의 안정성이 우수하여 Ir계의 인광화합물이 널리 사용되고 있다. AMOLED 소자에서는 고효율을 구현하기 위하여 기존에 주로 형광재료를 이용하던 PMOLED 소자와는 달리 적색에서는 인광 발광 물질을 채용하는 구조를 적용하고 있으며, 향후에는 녹색 발광 물질도 인광 물질로 대체하기 위하여 개발을 추진하고 있다.

AMOLED 소자의 적색 발광 물질은 기존에는 형광 물질인 DCJTb(4-(dicyanomethylene)-2-t-butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl))가 Alq₃ 호스트에 도핑된 구조로 널리 사용되었으나, 효율이 낮고 색특성이 저하되는 단점으로 인하여 새로운 물질이 개발되었으며, 새로운 적색 형광 물질로서 12cd/A의 높은 효율 및 (0.67, 0.33)의 색좌표를 갖는 적색 형광 물질이 idemitsu사에 의하여 보고되었다. 최근에는 고효율을 위하여 형광물질보다는 인광물질을



[그림 4] AMOLED용 적색 호스트 및 도펀트 재료



[그림 5] AMOLED용 녹색 호스트 및 도펀트 재료

적색 발광재료로서 적용하고 있으며, 대표적인 적색 발광 물질은 우수한 색좌표 특성 및 수명 특성을 갖는 Ir(piq)₃ 및 Ir(piq)₂acac이다. 상기 도펀트의 경우 (0.67, 0.33)의 색 특성을 나타내며 Ir(piq)₂acac의 경우 공정 안정성도 우수한 것으로 알려져 있다. 이 외에도 Ir(pq)₂acac 등의 도펀트가 알려져 있으나, 색특성이 저하되는 단점을 갖는다. 적색 인광 발광 물질의 호스트 재료로서는 기존에 알려져 있는 CBP 계열의 호스트의 경우 밴드갭이 넓어 전하의 trapping에 의한 구동전압 상승의 문제점이 있으므로 CBP에 비해 밴드갭이 작고 전자주입 및 수송특성이 우수한 호스트 재료가 적색 인광 발광층에 적용되고 있다. Balq의 유도체가 저전압 및 고효율 특성을 보이는 것으로 알려져 있으며, Merck사의 spirobifluorene 계열의 호스트 물질도 우수한 특성을 보이는 것으로 보고되었다. [그림 4]에 대표적인 형광 및 인광 적색 발광물질을 나타내었다.

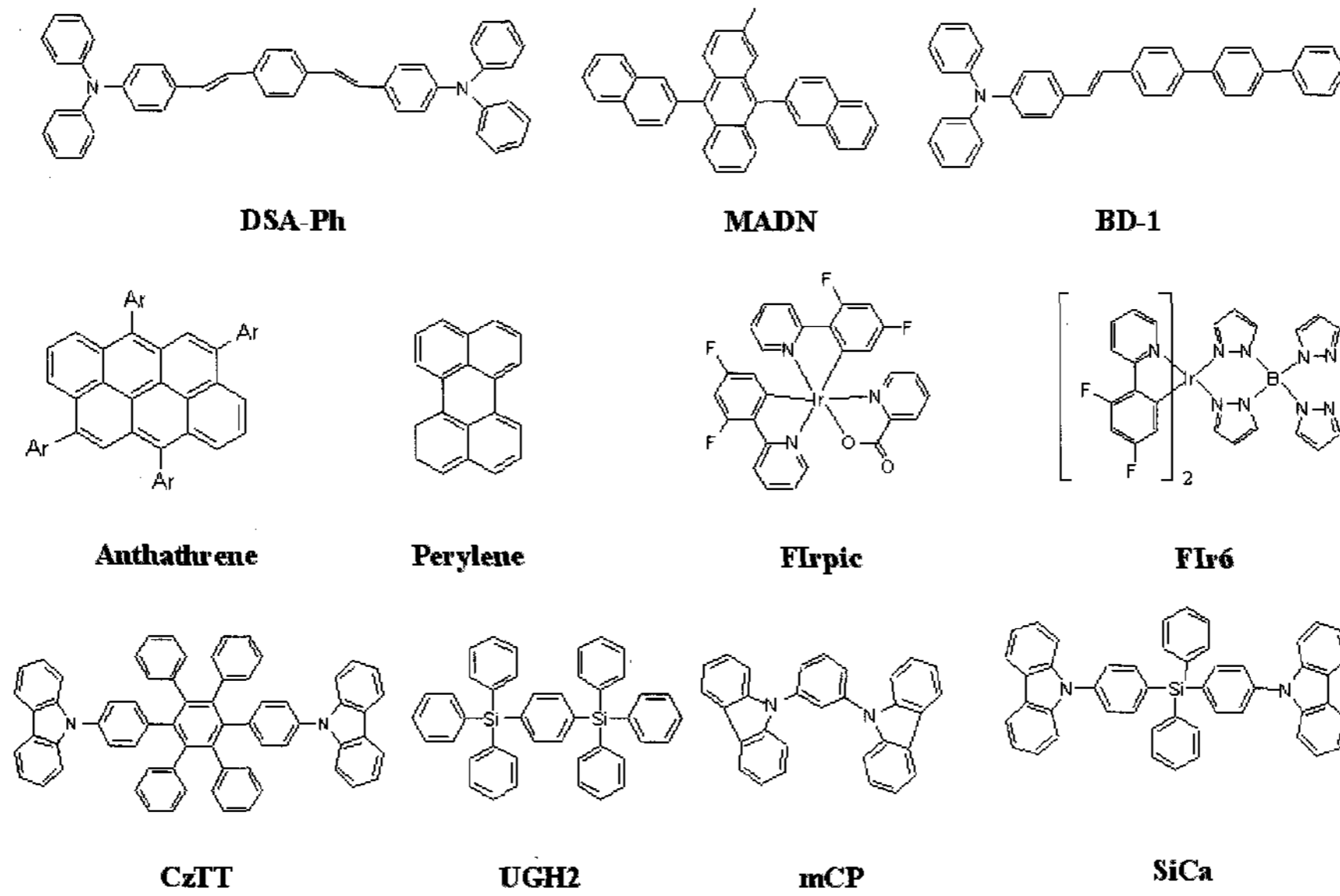
녹색 발광 물질은 인광 물질의 경우 수명이 짧은 단점이 있기 때문에 인광 물질보다는 형광 물질이 널리 적용되고 있다. 형광 녹색 물질은 기존에 큐마린 계열의 도펀트인 C545T(10-(2-benzothiazolyl)-1, 1, 7, 7-tetramethyl-2, 3, 6, 7-tetrahydro-1H, 5H, 11H-benzo-pyrano[6, 7, 8]quinolizin-11-one)와 quinacridone 계열의 DEQ(N,N'-diethylquinacridone) 등이 알려져 있으나, 최근에는 idemitsu 및 그라셀 등에서 새로운 녹색 도펀트 물질들이 개발되어 30cd/A 이상의 고효율을 구현하고 있다. 녹색 형광 소자의 호스트 물질은 기존에는 Alq₃가 주로 사용되었으나, 최근에는 anthracene을 기반으로 하는 MADN과 같은 호스트들이 녹색 형광 소자에서 우수한 특성을 보이는 것으로 보고되었다. 인광 물질의 경우에는 현재 대표적인 녹색 인광 도펀트인 fac-tris(2-phenylpyridine)iridium(Ir(ppy)₃)의 유도체들이 주로 개발되고 있으며, phenylpyridine 단위에 치환체들을 적용함에 의하여 효율이 개선되고 수명이 증가하는 결과가 보고되었다. 녹색 인광용 호스트로서는 기존의 CBP의 경우 열적 안정성이 저하되고, 수명이 짧으며, 정공방지층을 사용해야 하는 단점이 있기 때문에 이를 개선하여 전자주입 및 이동 특성이 우수한 Merck사의 spirobifluorene 계열의 호스트 및 신일철화학의 호스트들이 개발되어 사용되고 있다. [그림 5]에 대표적인 녹색 형

광 및 인광 물질을 나타내었다.

청색 발광 물질로서는 기존에 주로 styrylamine 계열의 도펀트 물질이 적용되어 사용되어 왔으며, 분자 구조를 다양하게 변화시켜 6cd/A 이상의 높은 효율을 보고하였다. 최근에는 청색 발광 구조로서 styrylamine 구조와 함께 anthracene을 포함하는 amine 구조의 물질들도 알려져 있으며, 청색 발광 물질로서 indenofluorene 계열의 방향족 아민 물질도 보고되었다. 이 밖에 pyrene 계열의 화합물도 청색 발광 물질로 적용이 가능하며, TBPe(tetrakis(t-butyl)perylene)과 같은 물질이 알려져 있다. 청색 호스트 물질은 anthracene 유도체들이 널리 사용되고 있으며, MADN은 우수한 필름 특성을 보이는 것으로 알려져 있으며, 비대칭 형태의 anthracene 유도체들이 우수한 특성을 보인다고 보고되었다.

청색 인광재료는 FIrpic(fac-tris[2-(4,5'-difluorophenyl)pyridine-C²,N]iridium)이 대표적으로 보고되어 있으며, 42cd/A의 효율이 보고되었으나, 색특성이 (0.17, 0.32) 수준으로 색특성이 저하되는 단점이 있으며, 안정성이 매우 떨어지는 단점이 있다. 최근 UDC에서 FIrpic 도펀트에 대하여 200cd/m²에서 15,000 시간의 수명 데이터를 보고하였으나, 저분자 형광재료에 비해서는 수명 측면에서 크게 저하되어 실용화를 위해서는 수명의 대폭 향상이 요구된다. 색특성 측면에서는 청색 인광 재료에서도 순청색 수준인 (0.15, 0.15)의 데이터가 보고되고 있으며, 따라서 수명 안정성 측면에서 개선되면 청색 인광도 곧 실용화될 수 있을 것으로 기대된다. [그림 6]에 대표적인 청색 호스트 및 도펀트 물질을 나타내었다.

이와 같은 다양한 발광 물질들은 기본적으로는 배면 발광과 전면 발광 구조에 모두 적용될 수 있으나, 전면 발광 구조에 사용되는 발광층 재료들은 색특성 뿐 아니라 발광 스펙트럼도 고려해야 한다. 색특성이 우수하더라도 스펙트럼이 넓은 파장 영역에서 관찰될 경우 공진 현상에 의한 빛의 간섭을 이용하는 전면 발광 소자에서는 스펙트럼의 범위가 넓을 경우 간섭 효과에 의한 빛의 손실이 커지기 때문에 효율이 저하되는 문제점이 있다. 따라서 높은 효율을 구현하기 위해서는 스펙트럼의 폭이 좁아야 하며, 적색 발광의 경우 장파장에서의 발광을 최소화하고, 청색 발광의 경우 UV 영



[그림 6] AMOLED용 청색 호스트 및 도펀트 재료

역에서의 발광을 줄여야 한다.

5. 음극

OLED 소자의 음극 전극으로는 일함수가 낮아서 전자수송층의 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital, 2.8~3.2eV)로 전자주입이 용이한 Ca(2.9eV), Li(2.9 eV), Ba(2.7eV), Mg(3.7eV) 등의 알칼리 금속 또는 알칼리 토금속이 사용될 수 있으나, 상기 금속 전극의 경우 수분과 산소에 매우 취약한 단점으로 인하여 단일 물질로 전극으로 사용되기 어렵다. 따라서 이를 개선하기 위하여 Li:Al, Mg:Ag 등의 합금 구조가 음극 전극으로 개발되었으며, 또한 Li/Al, Ca/Ag 등의 다층 구조의 전극도 개발되었다. 또한 최근에는 절연물질인 LiF, CsF, NaF, BaF₂ 등의 물질을 전자주입층으로 사용하고 음극전극으로 Al을 사용하는 구조가 개발되어 소자에 적용되고 있다.^[22-27] 여러 전극들 중 현재 배면발광 구조에서는 LiF/Al을 사용하는 전극 구조가 낮은 구동전압 및 높은 효율 등의 장점으로 인하여 가장 널리 적용되고 있다. 반면 전면발광 소자에서는 음극을 통하여 빛이 발광하게 되므로 음극의 전자주입 특성 뿐 아니라 투과율이 중요한 특성이 된다. 따라서 금속 전극들 중 투과율이 우수한 Mg:Ag 전극이 전면발광 소자의 음극전극으로 가장 널리 사용되며, 배면발광 소자에서 사용되는 Al의 경우 투과율이 저하되어 전면발광 소자에서는 음극으로 적용하기 어렵다. 최근에는 Ca/Ag의 이층 전극 구조가 우수한 투과율을 보이는 것으로 알려져 있다.

III. 맺음말

지금까지 저분자 소자의 구조와 저분자 소자의 특성 향상 기술에 대하여 소개하였다. 현재 저분자 소자는 재료 및 소

자 기술의 개발과 함께 소비전력과 수명 측면에서의 특성이 빠른 속도로 개선되어 휴대용 기기에서의 응용을 위한 특성의 수준은 확보되어 있는 실정이다. 그러나, 아직까지 모니터, TV 등 중대형 디스플레이의 응용을 위한 특성 수준에 도달하기 위해서는 수명 측면에서의 많은 개선이 요구된다. 특히 모니터 등에서 정지화상, 구동시 나타나는 image sticking 문제 해결을 위해서는 절대 수명의 개선이 필수적으로 요구되므로 이를 해결하기 위한 기술이 개발되어야 한다. 또한 소비전력 측면에서도 경쟁 상대인 TFT-LCD와 경쟁하기 위해서는 현재의 약 50% 수준의 소비전력을 달성해야 하며, 이를 위하여 재료적인 측면과 소자 측면에서의 효율 향상 기술이 개발되어야 한다. 재료 측면에서는 청색 인광 재료의 개발을 통한 소비전력 개선이 필요하며, 소자 측면에서는 저전압 구동 기술 및 외광 효율 향상 기술이 개발되어야 한다. 이러한 재료 측면에서의 기술 개발이 진행된다면 소자 기술과 접목하여 수년내에 OLED가 휴대용 기기에서부터 중대형 디스플레이까지 TFT-LCD를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] C. W. Tang, US patent 4356429(1982).
- [2] G. Gu, V. Bulovic, P. E. Burrows, S. R. Forrest, M. E. Thompson, Appl. Phys. Lett., 68, 2606(1996).
- [3] P. E. Burrows, V. Khalfin, G. Gu, S. R. Forrest, Appl. Phys. Lett., 73, 435(1998).
- [4] G. Partharathy, P. E. Burrows, V. Khalfin, V. G. Kozlov, S. R. Forrest, Appl. Phys. Lett., 72, 2138(1998).
- [5] G. Gu, V. Khalfin, S. R. Forrest, Appl. Phys. Lett., 73, 2399(1998).

- [6] G. Gu, G. Partharathy, P. E. Burrows, P. Tian, I. G. Hill, A. Kahn, S. R. Forrest, J. Appl. Phys., 86, 4067(1999).
- [7] P. E. Burrows, G. Gu, S. R. Forrest, E. P. Vicenzi, T. X. Zhou, J. Appl. Phys., 87, 3080(2000).
- [8] A. Yamamori, S. Hayashi, T. Koyama, Y. Taniguchi, Appl. Phys. Lett., 78, 3343(2001).
- [9] M-H. Lu, M. S. Weaver, T. X. Zhou, M. Rothman, R. C. Kwong, M. Hack, J. J. Brown, Appl. Phys. Lett., 81, 21(2002).
- [10] H. Riel, S. Karg, T. Beierlein, B. Ruhstaller, W. Ries, Appl. Phys. Lett., 82, 466(2003).
- [11] S. Han, X. Feng, Z. H. Lu, D. Johnson, R. Wood, Appl. Phys. Lett., , 82, 2715(2003).
- [12] C. Chen, P. Hsieh, H. Chiang, C. Lin, H. Wu, C. Wu, Appl. Phys. Lett., 83, 5127(2003).
- [13] S. Son, S.-H. Yoon, J.-G. Jang, M.-S. Kang, S.-Y. Jeon, SID digest, 52(2004).
- [14] M. Pfeiffer, K. Leo, X. Zhou, J. S. Huang, M. Hofmann, A. Werner, J. Blochwitz, Org. Electronics, 4, 89(2003).
- [15] M. Pfeiffer, S. R. Forrest, K. Leo, M. E. Thompson, Adv. Mater. 14, 1633(2002).
- [16] J. Blochwitz, M. Pfeiffer, T. Fritz, K. Leo, Appl. Phys. Lett. 73, 729(1998).
- [17] M. Pfeiffer, A. Beyer, T. Fritz, K. Leo, Appl. Phys. Lett. 73, 3202(1998).
- [18] J. Blochwitz, T. Fritz, M. Pfeiffer, K. Leo, D. M. Alloway, P. A. Lee, N. R. Armstrong, Org. Electronics, 2, 97(2001).
- [19] J. Endo, T. Matsumoto, J. Kido, Jpn. J. Appl. Phys. 41, L358(2002).
- [20] J. Y. Lee, Appl. Phys. Lett. 89, 253501(2006).
- [21] J. Meyer, S. Hamwi, T. Bulow, H.-H. Johannes, T. Riedl, and W. Kowalsky, Appl. Phys. Lett. 91, 113506(2007).
- [22] L. S. Hung, C. W. Tang, and M. G. Manson, Appl. Phys. Lett. 70, 152(1997).
- [23] S. Shi, and D. Ma, Appl. Surf. Sci. 252, 6337(2006).
- [24] H. Heil, J. Steiger, S. Karg, M. Gastel, H. Ortner, H. von Seggern, M. Stoßel, J. Appl. Phys. 89, 420(2001).
- [25] M. G. Mason, C. W. Tang, L.-S. Hung, P. Raychaudhuri, J. Madathil, D. J. Giesen, L. Yan, Q.

- T. Le, Y. Gao, S.-T. Lee, L. S. Liao, L. F. Cheng, W. R. Salaneck, D. A. dos Santos, J. L. Brédas, J. Appl. Phys. 89, 1756(2001)
- [26] Y. Park, J. Lee, S. K. Lee, D. Y. Kim, Appl. Phys. Lett. 79, 105(2001).
- [27] J. Lee, Y. Park, S. K. Lee, E.-J. Cho, D. Y. Kim, H. Y. Chu, H. Lee, L. M. Do, T. Zyung, Appl. Phys. Lett. 80, 3123(2002).

저자 소개



육경수

2007 단국대학교 공과대학 고분자공학과 학사, 2007~현재 : 단국대학교 공과대학 고분자공학과 석사과정



이준엽

1993 서울대학교 공업화학과 학사, 1995 서울대학교 공업화학과 석사, 1998~1999: Postdoc, Rensselaer polytechnic institute, 1998 서울대학교 공업화학과 박사학위 1999~2005: 삼성 SDI 중앙연구소 AMOLED팀 책임연구원, 2005~현재 : 단국대학교 공과대학 고분자공학과 조교수



김성현

2002~2004 서울대학교 공과대학 화학학생물공학부 석박사통합과정 수료, 2005~현재 : 서울대학교 공과대학 화학학생물공학부 박사과정 연구생



장정식

1988~1991 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원, 2001 Visiting professor, UC Santa Barbara, 1991~현재 : 서울대학교 공과대학 화학학생물공학부 교수