

氏 名	なかむら としたか 中 村 年 孝
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 4 0 4 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規程第 3 条第 3 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 機能科学専攻
学 位 論 文 題 目	Study on Coupling-out Method for the Light Confined in Organic Electroluminescent Devices (有機 EL 素子内に閉じ込められた損失光の取り出し方法に関する研究)
審 査 委 員	(主査) 教授 堤 直人 教授 堀田 収 教授 板谷 明

論文内容の要旨

有機EL素子はフラットパネルディスプレイのみならず、液晶ディスプレイ用バックライトや各種表示板をはじめとする平面照明用途としても大いに期待されている固体発光素子である。これまでの研究成果により、その発光効率は白熱電球をしのぐまでに向上しているが、現在広く用いられている無機 LED や蛍光灯に比べると、まだ劣っており、本格的な実用化への課題となっている。この大きな原因の1つが、光の全反射現象に起因した、発光光の素子内部への閉じ込めによる無効発光の存在である。理論計算では、この発光光の外部取り出し効率は僅か20%程度と見積もられているにもかかわらず、研究対象としてあまり取り上げられておらず、有効かつ低コストな実用的手法は見出されていないのが現状である。従って本研究では、この外部取り出し効率の向上方法を研究テーマに取り上げ、本論文をまとめた。

第1章では、有機EL素子の基本構造と動作原理を述べ、外部発光に到るまでの発光プロセスを、既存の報告例をもとに概要した。また、これらをもとに、本論文の研究テーマの意義を明確に位置付けた。

第2章では、本研究に用いた基本的な素子作製方法等の実験方法を説明した。

第3章では有機EL素子の導波光を取り出す方法として、拡散層の概念を導入し、その有効性についてまとめた。有機EL素子是有機層の膜厚が100nm前後であり、ちょうど光の波長の $1/4$ 程度に相当するため、これらの厚さにより、発光光が顕著な干渉効果を示すことが知られている。しかしながら、これら干渉効果と外部取り出し効率との関係はこれまでに報告例がなく、これらの現象を解明することは工学上極めて重要である。著者らはマトリックス樹脂中に拡散粒子を分散させた非常にシンプルな拡散層が、導波光の取り出しに有効に働き、かつ、その効果は干渉により外部発光強度が低下するほど大きくなることを見出した。結果として、拡散層を用いることで、有機EL素子の膜厚のばらつきによる発光強度、発光色、角度分布の不均一化が改善でき、実際の照明用途に有効であることを示した。

第4章ではさらに取り出し効率を向上させるため、透明電極／有機層内を伝播する薄膜モードの導波光取り出し方法について検討した。理論的には発光層の屈折率より低い屈折率を有する層が存在する場合にこの薄膜モードが発生する。そこで、高屈折率を有する樹脂をマトリックスとして用いた、拡散性高屈折率基板の概念を導入した。同時に、光線追跡法によるシミュレーションを実施し、本手法の妥当性を確認した。その結果、取り出し効率は、第3章の結果同様、干渉効果の影響を顕著に受け、その値は素子構成により1.3倍から6.8倍まで変化した。しかしながら、得られた値は、理論計算から期待される効

果に比べ小さく、十分に本手法の効果が引き出されたものではなかった。

第5章では、第4章の結果をより詳細に調べるため、基板の屈折率を変化させ、これまでに報告されていないフォトダイオードを用いる方法により、薄膜モードの導波光の直接測定を試みた。また、薄膜モードの導波光は、数百ナノメートル程度の薄膜層の厚さ変化により、増加したり減少したりする現象が報告されており、これらの影響についても詳細に検討した。その結果、いかなる場合においても、理論的に予測される高屈折率材料による顕著な薄膜モードの導波光の取り出し効果は見られず、本手法は必ずしも有効でないことを始めて報告した。本章で得られた結論は、実用上は必ずしも有用ではないが、理論との差を明確に実験で示した点で、工学上極めて意味深いものである。

第6章では、有機EL素子の液晶ディスプレイ用バックライトへの応用に注目し、導波光を単に取り出すだけでなく、偏光光として取り出す方法について検討した。具体的にはマトリックス中に液晶ポリマーからなる異方性散乱粒子を分散させた異方性散乱素子の概念を導入し、有機EL素子に適用した。その結果、導波光の取り出し効率とその偏光度は、第3章の結果同様、干渉効果の影響を顕著に受け、特定の条件下では、液晶バックライトとしての光の利用効率を更に引き出すことが出来ること明らかにした。

最後に本論文で得られた結論を第7章で総括した。

論文審査の結果の要旨

本論文は有機エレクトロルミネッセンス（EL）素子の素子内に閉じ込められている光の効率的な取り出しに関する研究である。光学理論に基づく有機EL素子からの全発光の20%しか外部光として取り出せず、35%はガラス基板内に、45%は酸化インジウム（ITO）透明電極と有機薄膜導波路内に閉じ込められている。さらに有機EL素子においては有機層が100 nm前後であり、これが光の波長の1/4程度に相当するため、発光する光が干渉の効果を敏感に受けることとなる。

本論文では、マトリックス樹脂中に拡散粒子を分散させた拡散層を用いてガラス基板内に閉じ込められている光を有効に取り出し、さらには干渉により弱めあっていた発光を弱めあうことなく取り出せることに成功している。これにより、有機EL素子の発光の強度、発光色、発光の角度分布の不均一性が改善でき、照明用途等への有用であることを示した。

さらに取り出し効率を改善することを目的として、ITO透明電極と有機薄膜導波路内を伝播する薄膜モードの光を取り出すことを試みた。光学理論的には、発光層の屈折率より低い屈折率を有する層が存在する場合にこの薄膜モードが発生する。高屈折率の有機薄膜マトリックスを用いることにより導波路内に閉じ込められており光の取り出しを試み、あらゆる反射ロス最小限に抑えるなどをした検出方法を用いて測光したが、いかなる場合においてもこの光を取り出すことは不可能であった。このことは、有機EL素子内では光学理論でいわれるところの薄膜モードの光が存在しないことを示唆しており、現在の有機EL素子の根源的な限界を示す非常に重要な結果を示

している。

有機 EL 素子の液晶ディスプレイ用バックライトへの応用を念頭に、マトリックス樹脂中に液晶ポリマーからなる光学異方性散乱粒子を分散させた光学異方性散乱偏光素子を用いて有機 EL 偏光光として取り出せることに成功した。

本論文の内容は全て申請者を筆頭著者とする次の 4 報の論文に報告されている。

- 1) Toshitaka Nakamura, Naoto Tsutsumi, Noriyuki Juni, and Hironaka Fujii, “Improvement of coupling-out efficiency in organic electroluminescent devices by addition of a diffusive layer.” *J. Appl. Phys.*, Vol. 96, pp. 6016-6022 (2004).
- 2) Toshitaka Nakamura, Noriyuki Juni, Hironaka Fujii, and Naoto Tsutsumi, “Enhanced coupling of light from organic electroluminescent device using diffusive particle dispersed high refractive index resin substrate”, *Opt. Rev.* in press
- 3) Toshitaka Nakamura, Naoto Tsutsumi, Noriyuki Juni, and Hironaka Fujii, “Thin-film waveguiding mode light extraction in organic electroluminescent device using high refractive index substrate”, *J. Appl. Phys.*, vol. 97, pp. 054505 (2005) (6 pages).
- 4) Toshitaka Nakamura, Hironaka Fujii, Noriyuki Juni, Sadahiro Nakanishi, Minoru Miyatake, and Naoto Tsutsumi, “Extraction of waveguided light by anisotropic scattering polarizer in organic electroluminescent devices”, *Opt. Rev.*, vol. 11, No. 6, pp. 370-377 (2004).