



Title	有機量子井戸構造の電子光物性と電界発光特性
Author(s)	大森, 裕; 藤井, 彰彦; 吉田, 正義 他
Citation	電気材料技術雑誌. 1994, 3, p. 27-36
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/81550
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

有機量子井戸構造の電子光物性と電界発光特性

大森 裕、藤井 彰彦、吉田 正義、吉野 勝美

大阪大学工学部電子工学科

〒565 吹田市山田上 2-1

Optical and electrical characteristics of organic multiple-quantum-well structure and its application for electroluminescent diodes

Yutaka Ohmori, Akihiko Fujii, Masayoshi Yoshida and Katsumi Yoshino

Faculty of Engineering, Osaka University

2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka, 565 Japan

Abstract

Organic electroluminescent (EL) diodes have been extensively investigated. In this paper, electrical and optical characteristics of some kinds of organic multiple-quantum-well (MQW) structure utilizing organic dye materials have been investigated. The organic MQW structure has been fabricated by organic molecular beam deposition technique (OMBD). Organic EL diode with organic MQW structure has also been fabricated. We found that the PL emission peak has been shifted to shorter wavelength as the layer thickness decreases. Spectral narrowing and the shift of peak emission wavelength have been observed in the EL diode with thin multilayer structure with Alq_3 /TPD system. Unique polarization characteristics of EL diode with MQW structure with both Alq_3 /TPD and PPCP/TPD systems has also been clarified. Quantum size effects of the MQW structure with Alq_3 /TPD and PPCP/TPD systems have been investigated.

キーワード：有機電界発光素子、有機量子井戸構造、有機色素、アルミニウムキノリン、量子サイズ効果、偏光特性

1. はじめに

近年、有機物を用いた電界発光素子 (EL 素子)¹⁻⁴⁾の研究は盛んに行われ、さらに導電性高分子を用いた発光素子についても青色から赤色まで作製が試みられている。発光素子に用いる有機物質も多岐に亘っており、有機色素を用いた電界発光 (EL) 素子は、無機半導体を用いた発光ダイオード (LED) では発光効率の悪い青色の発光を容易にし、フルカラーの薄膜ディスプレイへの応用も期待できる。色素分子を用いた発光素子のなかで高輝度の得られる色素の一つに Kodak 社の

Tang 等¹⁾の開発した色素分子 (8-hydroxyquinoline aluminum; Alq_3) が挙げられ、正孔輸送層とのヘテロ構造により高輝度の EL 素子が得られている。発光効率の良い色素の開発と薄膜作製技術の進歩による薄膜素子の作製、更にキャリアの輸送層とのヘテロ構造化により乾電池レベルの低電圧で駆動する発光効率の良い有機 EL 素子の研究開発が行われている。

無機半導体では原子層レベルで薄膜形成可能な結晶成長技術が開発され量子井戸構造を用いた HEMT (高移動度電界効果トランジスター)、MQW (量子井戸) レーザーをはじめとした電子・光子

が開発され優れた特性を持つ素子として実用化している。

一方、有機量子井戸構造の研究も近年活発に研究されはじめ結晶性を持つ有機分子⁵⁾、色素⁶⁾、高分子⁷⁾を用いた量子井戸構造の作製、評価をはじめとして量子サイズ効果の検証が行われている。

ここでは電子輸送性の色素であるキノリノールアルミ錯体 (Alq_3) と正孔輸送性の色素であるジアミン誘導体 ($\text{N, N}'$ -diphenyl- $\text{N, N}'$ -(3-methylphenyl)-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine; TPD) を用いた量子井戸構造⁸⁾及びシクロペンタジエン誘導体 (1,2,3,4,5-pentaphenyl-1,3-cyclopentadiene; PPCP) とジアミン誘導体 (TPD) 量子井戸構造にみられる特異な電子・光物性⁹⁾と電界発光素子¹⁰⁾としての特性について述べる。

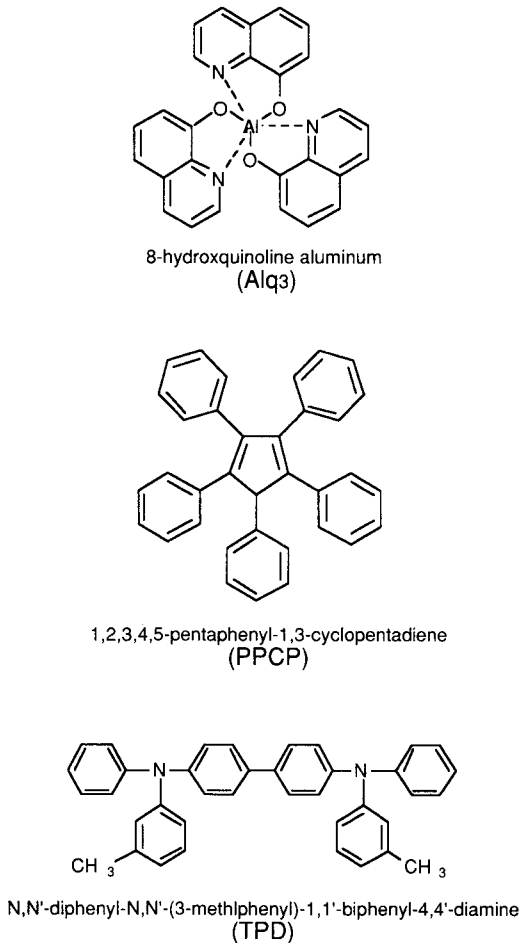


図1. Alq_3 、PPCP、TPD の分子構造

2. 有機量子井戸構造の作製評価

本研究で量子井戸構造作製に用いた色素分子 (Alq_3 、PPCP、TPD) の分子構造を図1に示す。EL 素子作製にはITO 透明電極基板上に、さらに光学的特性を求めるためには石英基板上に有機分子線蒸着法 (organic molecular beam deposition: OMBD) により作製した。

Knudsen セルにそれぞれ Alq_3 、PPCP、TPD を満たし、蒸着速度が約0.1nm/秒になるように加熱し、機械的なシャッターを交互に開閉する事により量子井戸構造を作製した。蒸着時の真空度は 10^{-4} Pa 以下、TPD の蒸着温度は125–145°C、PPCP は100–120°C、 Alq_3 は160–185°Cとした。成長時の膜厚及び成長速度は水晶振動子を用いた膜厚計でモニターした。電界発光素子作製の場合は最後に負側の電極として Mg と In を 10^{-4} Pa 以下の真空中で共蒸着した。発光面積は $2 \times 2 \text{ mm}^2$ で、ITO を負にバイアスしたときを順バイアスとする。作製した EL 素子の構造を模式的に示すと図2のようになる。

この様にして作製した量子井戸構造が所望の超格子構造に成っている事は低角X線回折により確認した。本実験に用いた分子は結晶構造を持たないため、それぞれの物質が単独のバルクの状態ではX線回折のピークは現れない。しかし、超格子構造にすることによりはじめて層構造による回折が低角にピークが現れる。図3にそれぞれ同じ膜厚 ($\text{Alq}_3/\text{TPD}=10.9\text{nm}/10.9\text{nm}$ 、6周期) になるように作製した Alq_3/TPD 超格子のX線回折パターンの一例を示す。6周期毎に強い回折が観測されているが、これは1周期に対応するサテライト回折である。

また、PPCP、TPD 量子井戸構造においても同

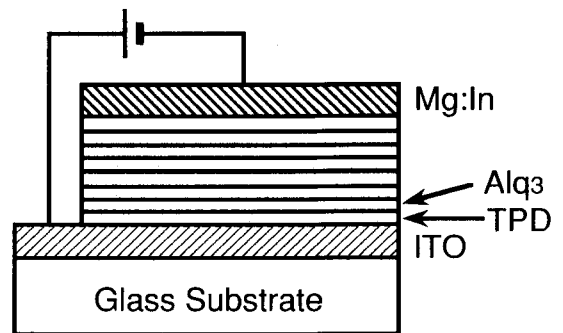


図2. 有機量子井戸構造を持つ電界発光素子の模式図

様のX線回折が観測され、繰り返し周期構造が確認された。

III-V族化合物半導体超格子においてはすでにX線回折により超格子構造の構造パラメータを決定する手段として一般的に用いられているが、有機物、特に結晶構造を持たない有機物に於いてもX線回折パターンから量子井戸構造の周期を求めることが出来た。半導体超格子と同様、膜厚により回折角が変化し、回折角から一周期の膜厚及び全膜厚が求まる。図3に示す回折パターンで比較的弱く、周期的に現れる回折は全膜厚による回折であり、強く現れている回折は1周期に相当する回折である。低角側が全体に高くなっているが、これはスリットで除去出来なかったX線源からのものが重畳されているためである。

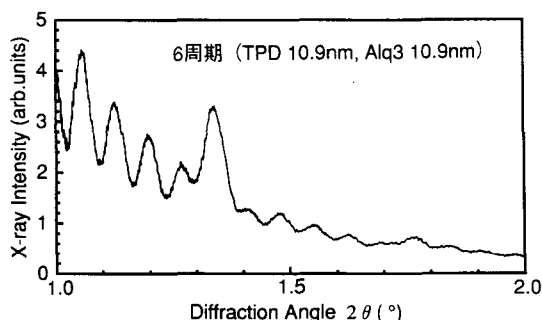


図3. Alq₃/TPD 超格子構造のX線回折パターンの一例

3. Alq₃/TPD 量子井戸構造の電子光物性

Alq₃/TPD 量子井戸構造の室温空气中で測定したフォトルミネッセンスパターンを図4に示す。励起波長は分光した300nmを用いTPD、Alq₃ともに励起される波長を選んだ。図4において400nm付近の発光はTPDからの発光で、520nm付近の発光はAlq₃からの発光に対応する。図4に示す様にAlq₃/TPD超格子構造のフォトルミネッセンスパターンは、それぞれTPD、Alq₃のフォトルミネッセンスパターンを重畳したパターンに等しい事が判る。しかしながら同一条件で励起をしているにもかかわらず量子井戸構造の周期を短くすると、TPDからの発光が減少し、Alq₃からの発光が増加する。このことはTPDで生成された励起子がAlq₃にエネルギー移動しより閉じ込め効果の大きなAlq₃層から発光することで説明される。

図4に示す様に520nm付近にAlq₃からの発光が見られるが、特にAlq₃の発光ピーク波長は膜厚が

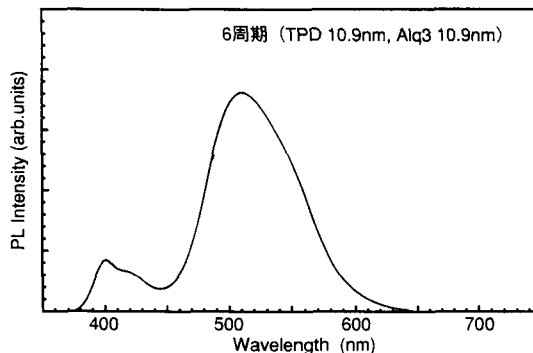


図4. Alq₃/TPD 超格子構造のフォトルミネッセンススペクトルの一例

薄くなるに従い、短波長側にシフトする。

Alq₃のPLピークエネルギーのシフト量の膜厚依存性を図5に示す。単純化したKronig-Pennyモデルにより高さ無限の障壁を仮定し、Alq₃層に閉じ込められた電子の有効質量 m^* をパラメータとし、実験的に得られた値と計算から得られたエネルギーシフト量のフィッティングを行うと $m^* = 1.5m_0$ とすると計算結果(実線)と実験結果は比較的よい一致を示す。400nm付近のTPDからの発光は膜厚の変化にとまらぬ発光波長のシフトは認められなかった。このことについてはTPDにおける正孔の有効質量を求めることにより理解できる。

Alq₃/TPD量子井戸構造のエネルギーバンド構造をそれぞれAlq₃、TPDの光吸収スペクトルの吸収端から求めたバンドギャップエネルギーとサイクリックボルタンメトリーから求めた価電子帯のエネルギー単位を用いて表すと図6に示す様になる。

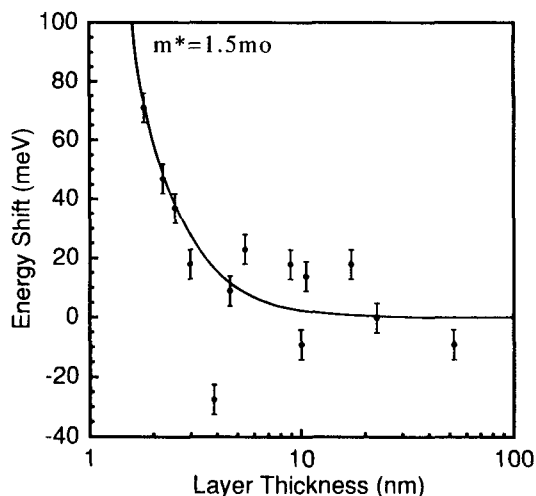


図5. PLエネルギーシフト量のAlq₃膜厚依存性

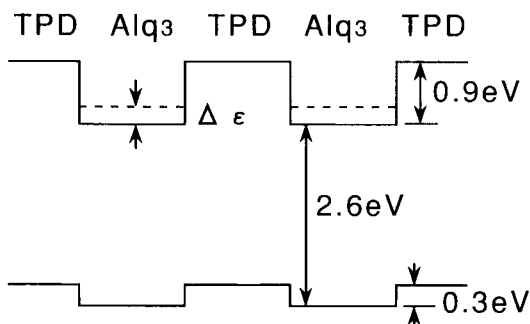


図6. Alq₃/TPD 量子井戸構造のエネルギーバンド模式図

図6はAlq₃/TPD超格子のエネルギーバンド構造を模式的に示したものであり、Alq₃、TPDそれぞれの界面におけるエネルギー障壁の量を示す。一般的に超格子構造のエネルギーバンド構造は大きく分けると2種類に分類されている。エネルギー状態の異なる2種類の物質の価電子帯、伝導帯それぞれのエネルギー準位が交差しないタイプI、それぞれの物質の価電子帯、伝導帯がエネルギー的に交差しているタイプIIである。従ってAlq₃/TPD超格子はタイプIに属すると考えられるが、それぞれの物質の伝導帯、価電子帯のみエネルギー障壁が存在し、量子化されるエネルギー構造になっているので特にタイプI'と呼ばれるタイプに属する量子井戸構造と考えられる。

従ってAlq₃のLUMOのエネルギー準位がTPDのエネルギー障壁により量子化されているものと考え、Alq₃の膜厚が薄くなるに従いAlq₃層に閉じ込められた電子のエネルギー準位が量子サイズ効果により高エネルギー側にシフトする事が理解できる。

TPDのHOMO準位は同様にAlq₃のエネルギー障壁により量子化されるものと考えられるが、フォトルミネッセンスの観測結果からは膜厚が薄い場合でもピーク位置の変化は観測されなかった。その理由については現時点では明かではないが、等価的にはTPDに閉じ込められた正孔の有効質量が大きいと仮定すると膜厚の変化によるエネルギーシフト量が極めて小さい事が理解できる。

4. Alq₃/TPD 量子井戸構造 EL 素子の発光特性

次に、Alq₃/TPD 量子井戸構造 EL 素子を作製した。EL 素子はITO 透明電極基板上にTPD、

Alq₃の順に有機分子蒸着法によりAlq₃/TPD超格子構造を形成し、最後にMg-Inの負電極を真空蒸着して作製した。従って、n型の電気伝導を示すAlq₃とp型の電気伝導を示すTPDが互いにサンドウィッチ構造になっている。

EL素子の電流-電圧特性は1周期のヘテロ構造も量子井戸構造もきれいな整流性の特徴を示し、負側にバイアスしたときのリーク電流は少ない。正側にバイアスしたとき12V程度の印加電圧により発光が観測される。印加電圧の増加にともない発光強度は増加するが、注入電流の増加に伴い発光強度は次第に飽和傾向になる。これは、注入電流の増加による接合界面の温度が増加し、非発光遷移確率が増加したものと考えられる。

EL素子を正側にバイアスする事により、図7に示す様に室温において520nm付近にピークをもつAlq₃層からのEL発光のみ観測される。PLではTPD層からの発光も観測されたが、EL素子ではTPD層からの発光は測定されなかった。これは、PLではキャリアがAlq₃層、TPD層の両層で光励起されているのに対し、ELでは電極から電子、正孔がそれぞれ注入されているためヘテロ界面をキャリアが通過しなければならず、特にAlq₃層に閉じこめられたキャリアの再結合が強くAlq₃層からの発光のみ観測されているものと考えられる。図7に示す発光スペクトルはAlq₃/TPD量子井戸構造をもつEL素子においてどの層厚に於いても同様なスペクトルが観測された。

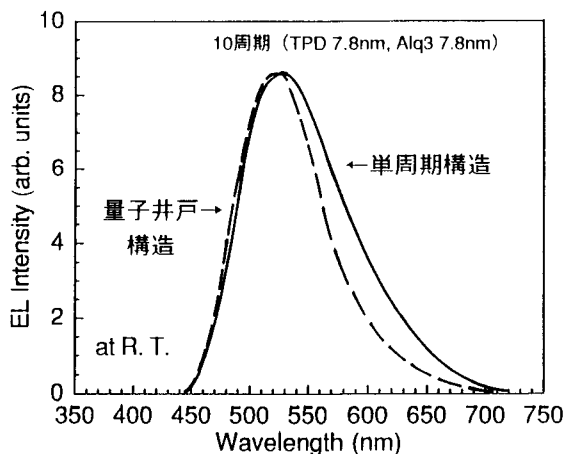


図7. 量子井戸構造を持つ発光ダイオードのELスペクトルの一例

(破線=Alq₃/TPD=7.8nm/7.8nm、10周期、
実線=Alq₃/TPD=53.6nm/53.6nm、1周期)

Alq₃層からの EL 発光スペクトルを量子井戸構造を持つ発光ダイオードと 1 周期のヘテロ構造の発光ダイオードと比較をすると、図 7 に示す様に量子井戸構造を持つ発光ダイオード（破線）ではヘテロ構造発光ダイオード（実線）に比べスペクトルの半値幅が狭くなりさらにピーク波長は短波長側にシフトしている事が判る。発光のピーク波長はヘテロ構造素子は 530nm、量子井戸構造素子は 520nm、半値幅は 113nm、超格子構造素子は 87nm である。

77K に於いても同様の EL 発光スペクトルが観測されるが、発光の半値幅は室温に比べると若干狭くなる事と、発光強度が増加する点を除けば同様の傾向にある事が判る。

エネルギー構造の異なる 2 種類の有機分子を周期的に積層する事により、そのヘテロ界面でエネルギー障壁が出来、キャリアあるいは励起子を量子井戸中に閉じ込めることが出来る。吸収スペクトルとサイクリックボルタンメトリーの測定から求めたエネルギーギャップと HOMO の位置を求めた Alq₃ のエネルギーギャップは 2.6eV、一方 TPD のエネルギーギャップは 3.2eV である。エネルギーギャップと HOMO の位置から、電子に対する量子井戸は Alq₃ 層に、正孔に対する量子井戸は TPD に出来るタイプ 1' の量子井戸構造になって。

図 6 に示す様に電子に対する量子井戸の障壁は 0.9 eV、正孔に対する量子井戸の障壁は 0.3eV である。従ってエネルギー障壁の高さの違いから電子は Alq₃ 層に強く閉じこめられているのに対し、正孔は比較的障壁が浅いために弱く閉じ込められている。図 8 に示す様に単周期のヘテロ構造素子の Alq₃ 層のエネルギー状態密度のモデルを(a)、超格子構造のエネルギー状態密度のモデルを(b)の様 に仮定する。量子井戸構造素子では Alq₃ 層で強く閉じ込められているためより高いエネルギー状態まで電子が詰まっていることになる。高いエネルギー準位では状態密度のより大きいために、高エネルギー状態からの光学遷移が増し電界発光のスペクトルは短波長にシフトしさらに発光のスペクトルはシャープになる。

次に量子井戸構造電界発光素子の偏光特性について述べる。今までは面に垂直な発光について議論してきたがつぎに、端面から発光する光の電界発光スペクトルの偏光特性について検討を行った。図 9 に面発光スペクトルと端面から発光する偏光スペクトルを示す。TE 偏波光（薄膜の界面に平行

な電界ベクトルを持つ偏波光）と TM 偏波光（薄膜の界面に垂直な電界ベクトルを持つ偏波光）とで発光スペクトルに違いが認められた。TE 偏波光の発光スペクトルは TM 偏波光に比べ発光強度が強くさらにスペクトル幅が狭い。

1 周期の膜厚が等しく全膜厚の異なる EL 素子の発光スペクトルを比べると、膜厚の変化に従いピーク波長が変化することから Mg : In 電極と ITO

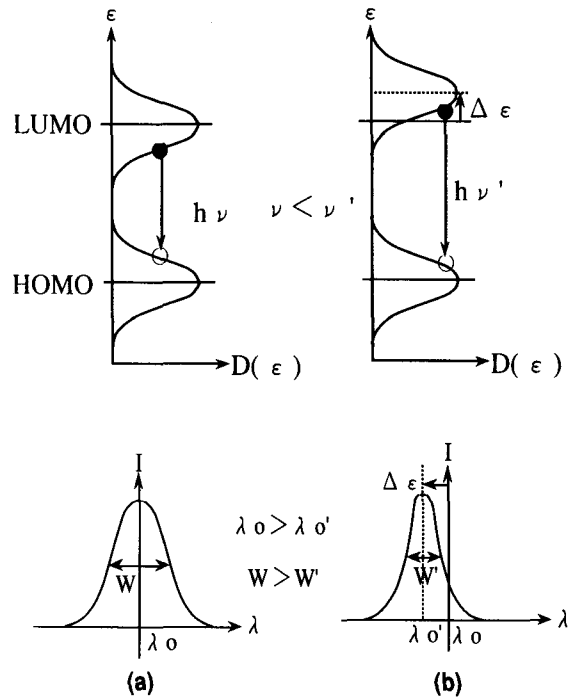


図 8. ヘテロ構造素子と量子井戸構造素子のエネルギーバンドダイアグラム。

縦軸：エネルギー、横軸：状態密度 (a)ヘテロ構造素子、(b)量子井戸構造素子

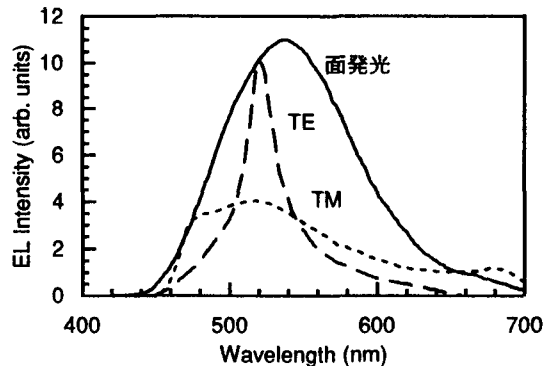


図 9. 量子井戸構造素子の EL スペクトルの比較（面発光特性と偏光特性）

との間の電極間で干渉し強めあった波長の発光と思われる。

また、全体の膜厚を一定とした場合、TE 偏波光と TM 偏波光の強度の差は膜厚に依存して変化し、1 周期の膜厚が薄くなるに従い小さくなる。TE 偏波光と TM 偏波光では金属電極における伝搬損失が異なるために発光強度に違いが生じているものと考えられる。量子井戸構造をとることにより TM 偏波光の伝搬損失が抑制されているものと考えられる。図10に異なる膜厚に対する TE 偏波光と TM 偏波光の強度比を示す。

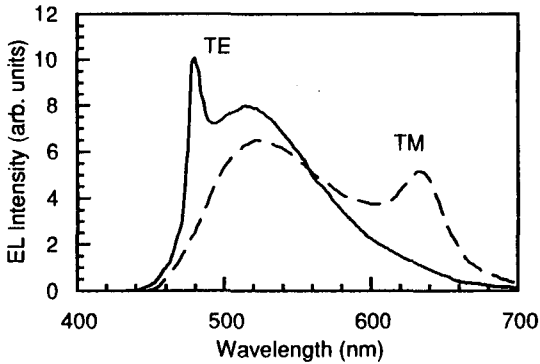


図10. 量子井戸構造素子の端面発光の偏光特性
(Al_3 : 15.9nm、TPD: 15.9nm、3周期)

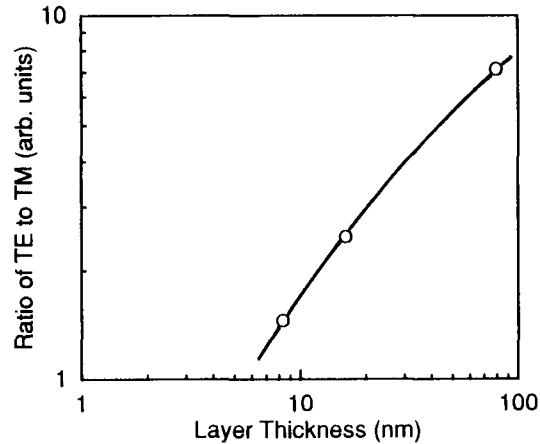


図11. 量子井戸構造の膜厚に対する TE 偏波光と TM 偏波光の強度比

5. PPCP/TPD 量子井戸構造の電子光物性

PPCP/TPD 量子井戸構造¹⁰⁾の光吸収スペクトルを図12に示す。PPCP/TPD 量子井戸構造の光吸収スペクトルは基本的には PPCP、TPD のそれぞれの吸収スペクトルの和で表され、特に構造の変化によるスペクトルの変化は見られない。図12に

TPD80nm、PPCP100nm、短周期構造量子井戸として15周期構造の PPCP: TPD=5.5nm: 5.5nm、及び長周期構造量子井戸として5周期構造の PPCP: TPD=22nm: 22nm の2種類を示している。TPD は300-400nm 付近に、PPCP は350nm と300nm 以下に吸収がある。

次に、PPCP/TPD ヘテロ構造と量子井戸構造のフォトルミネッセンス (PL) スペクトルについて述べる。図13には PPCP: TPD=55nm: 55nm のヘテロ構造の種々の波長の励起光の PL スペクトルを示す。TPD で吸収される波長300nm で励起した場合には TPD の発光に相当する400nm 付近の発光が強く観測されるが PPCP の吸収が大きい260nm の波長で励起した場合には PPCP の発光が強くなり460nm に発光が強く観測される。一方、図14に示す様に PPCP/TPD 量子井戸構造では励起波

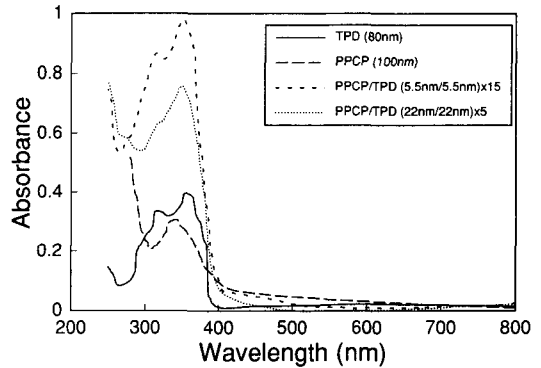


図12. PPCP、TPD 及び PPCP/TPD 量子井戸構造の光吸収スペクトル。

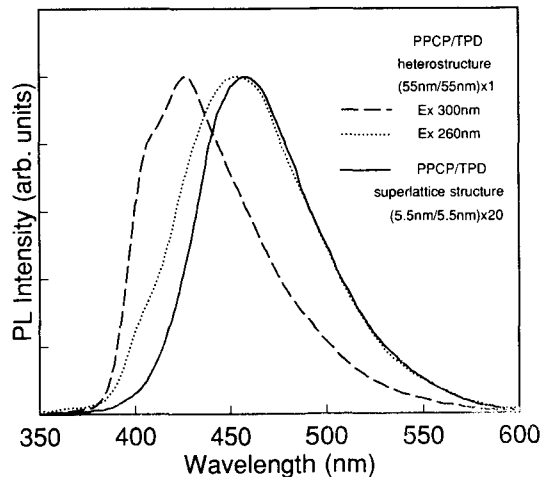
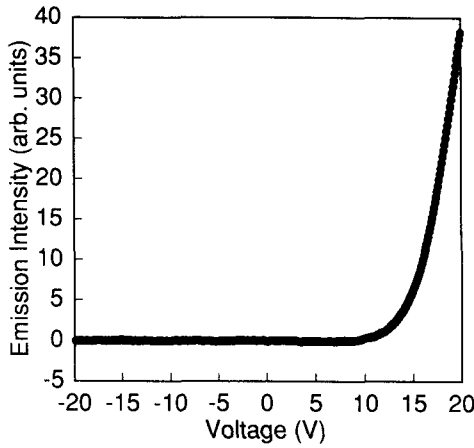
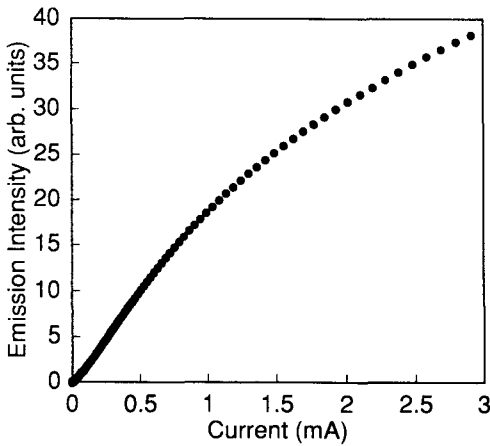


図13. PPCP/TPD ヘテロ構造及び量子井戸構造の PL スペクトルの一例



(a)



(b)

図14. PPCP/TPD 量子井戸構造 EL ダイオードの(a)電流－電圧特性及び(b)電流－発光特性

長に依らず PPCP からの発光のみ観測され TPD からの発光は観測されない。図14には20周期構造の PPCP : TPD = 5.5nm : 5.5nm 量子井戸構造の励起波長300nm における PL スペクトルを示す。

PPCP/TPD 量子井戸構造の PL スペクトルはその層構造に依らず同様の発光が観測され PL のピーク波長もほとんど変化しない。先に述べたが Alq₃/TPD 量子井戸構造では、量子井戸の周期が短くなることにより発光の波長は短波長側にシフトすることを見出したが PPCP/TPD の量子井戸ではその変化はみられない。このことは PPCP に閉じ込められた電子の有効質量が等価的に大きくエネルギー変化が小さいものと考えられる。

6. PPCP/TPD 量子井戸構造 EL 素子の発光特性

PPCP/TPD 量子井戸構造発光ダイオードの層

構造は図2に示す Alq₃/TPD 量子井戸構造 EL 素子と同様の層構造を持つ。PPCP 単独では基板に対する付着力が弱く、ITO 基板上に TPD、PPCP の順に蒸着する事により素子構造を形成することが出来る。

PPCP/TPD ヘテロ構造 EL 素子、量子井戸 EL ともにその電流－電圧特性は強い整流性を示し、ITO 側を正にバイアスしたときに指数関数的に電流が増加し、順バイアスとなる。

印加電圧に対する発光強度、及び印加電流に対する発光強度の関係の一例を図14に示す。図に示す量子井戸構造は40周期構造の PPCP : TPD = 2.8nm : 2.8nm であり、他の周期の量子井戸構造も同様の特性を示す。12V 程度の印加電圧から発光が急激に増加し、印加電流に対しては比例関係にあるが電流の増加に伴い飽和傾向になる。

次に、PPCP/TPD 発光ダイオードの EL スペクトルについて述べる。EL スペクトルは PPCP/TPD ヘテロ構造素子、量子井戸構造素子ともに PPCP からの発光波長に相当する460nm にピークを持つ発光が観測されるが図15に示す様に量子井戸構造の周期が短い短周期の量子井戸構造では600nm 付近の長波長側に発光が現れる。周期が短くなるに従い600nm 付近の発光は増加する。このことについては後の節で議論する。

次に端面から発光する EL 発光の偏波光スペクトルについて述べる。ここで TE 偏波光は層構造に平行な電界ベクトルを持つ偏波光で TM 偏波光は層構造に垂直な電界ベクトルを持つ偏波光である。図16に示す PPCP : TPD = 55nm : 55nm のヘテロ構造素子では TE 偏波光が強く TM 偏波光が弱い

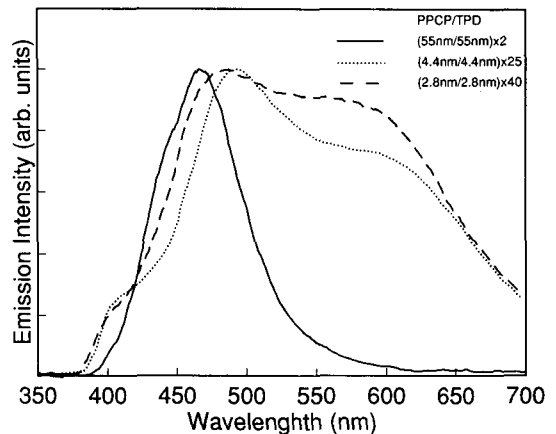


図15. 種々の PPCP/TPD 量子井戸構造を持つ EL 素子の発光スペクトル

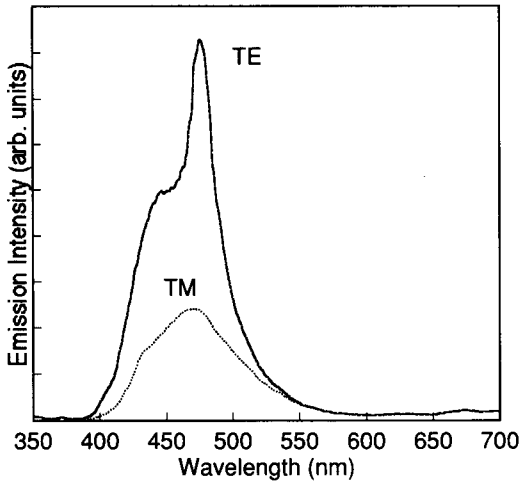


図16. PPCP/TPD ヘテロ構造素子の EL スペクトルの偏光特性

発光を示しているが、電極間で干渉する為にある波長で共振により発光波長が強め合うために図16に示すスペクトルでは TE 偏波光に鋭いピークが現れている。

次に、短周期構造の PPCP/TPD 量子井戸構造 (PPCP : TPD = 5.5nm : 5.5nm, 20周期構造) の EL スペクトルの偏光特性を図17に示す。TE 偏波光と TM 偏波光とでは発光のピーク波長が異なり TM 偏波光が TE 偏波光よりも長波長側になっている。また TE 偏波光の方が TM 偏波光に比べ発光強度が強くなっている。

以上の結果を説明するために PPCP/TPD 量子井戸構造のエネルギーバンドダイアグラムを用いて説明する。光吸収スペクトル及びサイクリックボルタメトリにより求めたエネルギー準位からエネルギーバンド構造を求めると図18に示す様にな

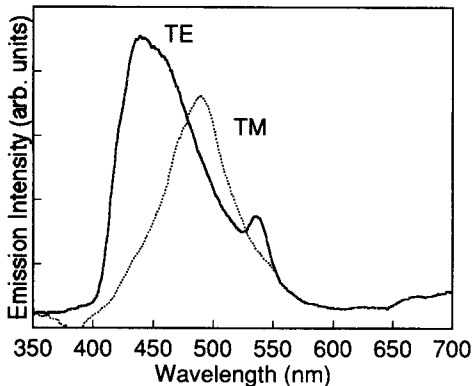


図17. PPCP/TPD 量子井戸素子の EL スペクトルの偏光特性

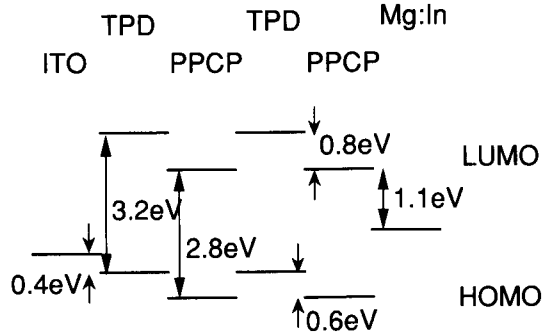


図18. PPCP/TPD 量子井戸構造のエネルギーバンドダイアグラム

る。PPCP は電子の井戸層となり TPD は正孔の井戸層として働く。電子に対する井戸の深さは0.8eV、一方正孔に対する井戸の深さは0.6eV である。PPCP はP型の電気伝導を示し、また電子の井戸層として作用しているので PPCP 層に電子が注入されると量子井戸の閉じ込め効果により PPCP 層に形成されたエキシトンが閉じ込められ、再結合により発光するものと考えられる。PL では PPCP 層、TPD 層それぞれで励起された電子-正孔対がエキシトンを形成しその再結合により発光すると考えられるが、EL の場合は電極から注入された電子、正孔が PPCP 層、TPD 層を通り抜けて励起子を形成する事になるので井戸が深く閉じ込めの強い PPCP 層に閉じ込められた励起子の発光が強く観測されるものと考えられる。

さらに、特に短周期の量子井戸構造においてみられる長波長側の発光は PPCP/TPD の界面で形成される新たな準位によるもので、Alq₃/TPD の量子井戸構造ではみられなかったものである。これは PPCP/TPD の材料系ではとくに短周期の量子井戸構造にみられるように界面の影響を大きく受けるために見られるものと考えられる。

また、TE 偏波光と TM 偏波光のスペクトルの違いから、短周期の量子井戸構造に形成される長波長側に発光する準位は TM 偏波光の成分を持つものと考えられる。図19に TE 偏波光と TM 偏波光の遷移過程のエネルギー状態を模式的に示す。PPCP/TPD 短周期量子井戸構造に形成された新たな準位により長波長側に発光するがこの発光の偏波光成分は TM 偏波光成分が大きく、TM 偏波光の発光のピーク波長は TM 偏波光成分に比べ長波長にある。

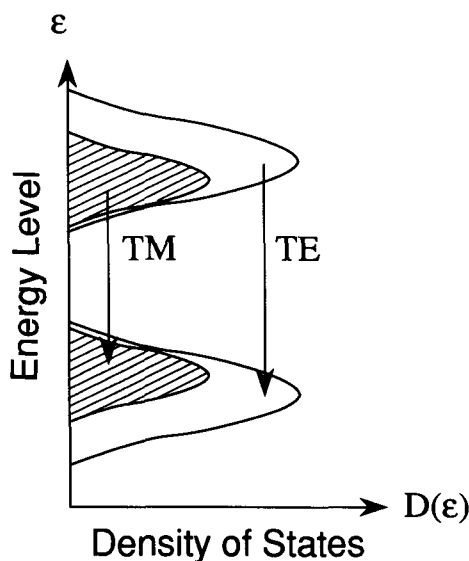


図19. TE 偏波光、TM 偏波光の遷移過程のエネルギー状態図

7. まとめ

以上の結果をまとめると Alq_3/TPD 、 PCCP/TPD 量子井戸構造についてそれぞれ次のようになる。

- 1) 有機分子線蒸着法により Alq_3/TPD 量子井戸構造を作製し、超格子構造の確認を低角X線回折により行った。 Alq_3/TPD 量子井戸構造において Alq_3 の膜厚が薄くなるに従いフォトルミネッセンスの発光ピークは短波長側にシフトし、有機色素における量子サイズ効果を見出した。
- 2) Alq_3/TPD 量子井戸構造を持つ電界発光ダイオードは、単周期構造の発光ダイオードに比べ、量子井戸構造を持つ EL 素子では発光のピーク波長が短波長側にシフトし、さらに発光のスペクトルの半値幅が減少する。このことはエネルギーバンドモデルを用いて説明される。
- 3) Alq_3/TPD 量子井戸構造の電界発光の偏光特性は TE 偏波光に対し TM 偏波光は発光強度が弱い。しかしながら、膜厚が薄くなるに従い TE 偏波光と TM 偏波光の発光強度の差が小さくなる。また、量子井戸構造の等価的な屈折率は TE 偏波光と TM 偏波光とで異なる。
- 4) PCCP/TPD 量子井戸構造では励起波長に依らずに PCCP 層の PL がみられ TPD から PCCP 層へのエネルギー移動が行われる。しかしながら Alq_3/TPD 量子井戸構造でみられた層厚の減

少による発光波長の短波長側へのシフトは観測されず、 Alq_3/TPD 量子井戸構造に比べ極めて小さい。

- 5) PCCP/TPD 量子井戸構造の EL スペクトルは短周期構造になるに従い長波長側の発光が増加する。さらに、TE 偏波光に比べ TM 偏波光では強度が弱く、さらに長波長側に発光のピークが観測される。これらは模式的なエネルギーバンドモデルで説明される。

参考文献

- 1) C. W. Tang and S. A. VanSlyke: Appl. Phys. Lett., 51 (1987) 913.
- 2) J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burns and A. B. Holmes: Nature, 347 (1990) 539.
- 3) Y. Ohmori, M. Uchida, K. Muro and K. Yoshino: Jpn. J. Appl. Phys., 30 (1991) L1938.
- 4) Y. Ohmori, M. Uchida, K. Muro and K. Yoshino: Jpn. J. Appl. Phys., 30 (1991) L1941.
- 5) F. F. So, S. R. Forrest, Y. Q. Shi and W. H. Steier: Appl. Phys. Lett. 56 (1990) 674.
- 6) Y. Ohmori, A. Fujii, M. Uchida, C. Morishima, and K. Yoshino: Appl. Phys. Lett. Vol. 62 (1993) 3250.
- 7) M. Fujitsuka, R. Nakahara, T. Iyoda, T. Shimidzu and H. Tsuchiya: J. Appl. Phys. 74 (1993) 1283.
- 8) Y. Ohmori, A. Fujii, M. Uchida, C. Morishima, and K. Yoshino: Appl. Phys. Lett. Vol. 63 (1993) 1871.
- 9) Y. Ohmori, M. Yoshida, C. Morishima, A. Fujii and K. Yoshino: Jpn. J. Appl. Phys., 33 (1994) L1232.
- 10) A. Fujii, Y. Ohmori, C. Morishima and K. Yoshino: Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) L348.

(1994年6月30日受理)



大森 裕

昭和24年6月27日生まれ。昭和47年3月大阪大学工学部電気工学科卒業大阪大学大学院工学研究科博士過程修了。工学博士。昭和52年日本電信電話公社（現日本電信電話株式会社）電気通信研究所入

社。平成元年大阪大学工学部電子工学科助教授。高分子、分子を用いた電子光素子、EL素子の研究に従事。電子情報通信学会、応用物理学会、日本物理学会、IEEE、APS学会各会員。



藤井 彰彦

昭和44年12月3日生まれ。平成5年3月大阪大学工学部電子工学科卒業。大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻博士過程前期課程在籍中。色素分子を用いたEL素子の研究に従事。応用物理学会、日本物理学会、電子情報通信学会各会員。

本物理学会、電子情報通信学会各会員。



吉田 正義

昭和47年2月4日生まれ。平成6年3月大阪大学工学部電子工学科卒業。大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻博士過程前期課程在籍中。高分子、色素分子を用いたEL素子の研究に従事。



吉野 勝美

昭和16年12月10日生まれ。昭和39年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。大阪大学大学院工学研究科博士過程修了。昭和44年大阪大学工学部電気工学科助手。

講師、助教授を経て昭和63年大阪大学工学部電子工学科教授。主に導電性高分子、光機能性高分子、強誘電性液晶、フラーレン等の有機機能性材料に関する研究に従事。著書；「高速液晶技術」（シーエムシー、1986）、「導電性高分子の基礎と応用」（講談社、1991）、「分子とエレクトロニクス」（産業図書、1991）、「液晶とディスプレイ応用の基礎」（コロナ社、1994）、その他多数。昭和59年応用物理学会賞、平成2年大阪科学賞授賞。日本物理学会、電気学会、応用物理学会、高分子学会、電子情報通信学会、レーザー学会、日本材料学会各会員。