

## 2層発光層型白色有機EL素子における電子正孔再結合領域

平成23年4月18日受付

坪井泰住  
京都産業大学コンピュータ理工学部  
岸本匡史、若生一広  
液晶先端技術研究センター（青森県八戸市）

### 1. はじめに

白色発光する有機エレクトロルミネッセンス（EL）素子は、軽量、超薄型、省エネなディスプレイや平面照明に利用できる基盤として注目されている。白色発光を有機EL素子から得るには、赤色発光層、緑色発光層、青色発光層の3層を積層し発光3原色を作り出す方法 [1-3] や、補色の2発光層を積層する方法 [4] が通常用いられる。積層された発光層では、各層や素子全体での電子移動度や正孔移動度の違いや、電極からの注入されるキャリア数の違い、さらに各層間の HOMO エネルギーギャップ（gap）および LUMO エネルギー gap などにより、電子正孔再結合領域の場所および分布が大きく変化する [5-8]。

発光層を厚くし、さらに電子と正孔との再結合領域を発光層の内部にまで広げることにより、耐久性に優れた有機EL素子が可能となる。一般に、発光層の正孔移動度は電子移動度に比べて小さいため、正孔は発光層と正孔輸送層との界面（interface）近くに蓄積される。一方、電子輸送層から発光層に注入された電子は、正孔輸送層との界面に達するが正孔輸送層の LUMO 準位が高いため正孔輸送層には達しない。従って電子と正孔の密度は、正孔輸送層/発光層の界面の発光層側が高くなる。電子密度分布と正孔密度分布とがどのようになっているかや、電子正孔再結合領域が素子全体でどの位置にあるかを調べることは、素子の高効率化を図る上で重要となる。なぜなら、素子の発光は励起子が形成される再結合領域から起るからである。再結合領域が発光層の内部にまで広がっているとわかった場合、発光層を厚くすることにより、耐久性に優れた有機EL素子が可能となる。逆の場合、発光層を狭くする必要が生じる。

本研究では、赤色発光層と青色発光層の2層からなる白色有機EL素子について再結合領域を調べる。そのために、膜厚の異なる interlayer（中間層）を両層の間に挿入する。さらに、2層の積層配列順序を変えた素子を作製した。

## 2. 実験方法

試作した有機EL素子の層構造は、次の2種類である。

BR素子：

ITO透明電極 / 正孔注入層 / 正孔輸送層 / 青色発光層 / 中間層 / 赤色発光層 / 電子輸送層 / 電子注入層 / Al電極

および

RB素子：

ITO透明電極 / 正孔注入層 / 正孔輸送層 / 赤色発光層 / 中間層 / 青色発光層 / 電子輸送層 / 電子注入層 / Al電極

BR素子とRB素子の違いは、前者では青色発光層が正孔輸送層に接近しているのに対し、後者では赤色発光層が正孔輸送層に接近して発光層の配置が前者と逆転している点である。

中間層は通常、積層された2つの発光層（例えば青発光層と赤発光層）の間に両層間のエネルギー伝達（青発光層から赤発光層へのエネルギー伝達）を避けるために挿入される [3, 4, 9]。ここでは、それ以外に再結合領域を調べるために、膜厚の異なる中間層を挿入した。

各層の膜厚は、BR素子およびRB素子いずれの場合も、正孔注入層が70 nm、正孔輸送層が20 nm、青色発光層が10 nm、赤色発光層31 nm、Alq<sub>3</sub>電子輸送層が10 nm、LiF電子注入層が0.5 nmである（図1）。中間層は、BR素子では、0.3 nm、0.4 nm、1.0 nmの3種類、RB素子では0.2 nm、0.5 nm、1.0 nmの3種類のものを用いた。これらの素子は、有機EL素子製造会社において真空蒸着法で作製された。青色発光層での青色発光ドーパントの濃度は2%であり、赤色発光層での赤色発光ドーパントの濃度は約4.5%である。

赤色発光ドーパント材料として、fused aromatic ring（縮合芳香族環）のRD-001（別名：P1）[10-17]を用いた。青色発光ドーパント材料として、BD-102 [10, 14-20]を用いた。赤色発光層および青色発光層のホスト材料は同一の有機分子BH-140 [10, 14, 16, 17, 20, 21]を用い、その材料は中間層にも用いた。中間層はこのBH-140単一材料でのみできている。電子輸送層にはAlq<sub>3</sub>、電子注入層にはLiFを用いた。

BR素子での中間層の膜厚が、0.3 nm、0.4 nm、1.0 nmの素子を、それぞれDevice BR-3、BR-4、BR-10と呼び、RB素子での中間層の膜厚が、0.2 nm、0.5 nm、1.0 nmの素子を、それぞれDevice RB-2、RB-5、RB-10と呼ぶことにする。

発光材料BD-102およびRD-001の分光特性を調べるために、石英板に真空蒸着した膜厚10 nmのBH-140ホスト分子に青色発光ドーパントを少量混ぜた薄膜（青色発光膜と呼ぶ）および膜厚30 nmのホスト分子に赤色発光ドーパントを少量混ぜた薄膜（赤色発光膜と呼ぶ）を作製した。青色発光膜でのドーパントの濃度は1.0%、2.0%、4.7%の3種類、赤色発光膜でのドーパ

ントの濃度は 2.3 %、4.8 %、9.1 % の 3 種類である。

有機 EL 素子の V-I-L<sub>v</sub> (印加電圧—電流—輝度) 特性は、コニカミノルタ CS1000 分光放射輝度計とケースレイ 2400 電圧電流ソースメータを用いて測定した。この場合、素子表面から垂直に発する光の輝度および発光スペクトルを測定した。薄膜の吸収スペクトルは島津 UV3100 分光光度計、光励起発光 (フォトルミネッセンス (PL)) スペクトルは Spex FluoMax-P 分光光度計、発光量子効率 は 浜松 ホトニクス 絶対量子収率測定装置を用いて室温で測定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1. 有機 EL 素子

BR 素子と RB 素子の 8V での EL スペクトルを **図 2** に示す。BR 素子の 3 種類の Device BR-3、BR-4、BR-10 は、それぞれ同じような EL スペクトルを示す。RB 素子についても、膜厚の違いによるスペクトルの大きな違いはない。BR 素子では、青色ドーパント BH-140 による 472 nm にピーク波長をもつ発光強度が、赤色ドーパント RD-001 による 588 nm にピーク波長をもつ発光強度より大きい。従って、白色発光が得られる。しかし、RB 素子では青色発光が微弱なため白色発光ではない。青色発光帯および赤色発光帯には、vibronic 構造がはっきりと現れている。青色発光分子 BH-140 では、472 nm および 498nm のピークが、それぞれ 0 - 0 および 0 - 1 振動準位遷移による発光に対応し、赤色発光分子 RD-001 では、588 nm にピークをもつ発光および 632nm 付近に shoulder をもつ発光が、それぞれ 0 - 0 および 0 - 1 振動準位遷移に対応する。

いろいろな印加電圧のもとでの Device BR-3、BR-4、BR-10 の EL スペクトルを **図 3** に示す。図では、EL 強度が log 表示されている。青色ドーパントによる 472 nm 発光と赤色ドーパントによる 588 nm 発光のほかに、440 nm 付近にピークをもつ微弱な発光が log 表示により現れる。この 440 nm 発光は、後に述べるホスト BH-140 からの発光と思われる。ホストからドーパントへのエネルギー伝達が 100 % ではなく、ホストに励起されたエネルギーの一部が、ホスト分子の発光遷移に使われたことを示している。青色発光層での青色発光ドーパントの濃度が 2% であり赤色発光層での赤色発光ドーパント濃度の 4.5 % よりも小さいので、青色発光層のホストからの発光の可能性が高い。

いろいろな印加電圧のもとでの Device RB-5、RB-10 の EL スペクトルを **図 4** に示す。BR 素子とは違って、青色発光は赤色発光に比べ 2 桁ほど強度は小さい。440 nm 付近にピークをもつ微弱な発光が RB 素子でも現れている。

青色発光強度と赤色発光強度が電圧を変えても同じ比率で現れるかどうかを調べるために、472 nm での発光強度と 588 nm での発光強度の比を電圧に対しプロットした (**図 5** および **図 6**)。 **図 5** からわかるように、BR 素子すべての素子で中間層の膜厚に関係なく、その赤色強度に対する青色強度の比が電圧増加するとともに大きくなる。Device BR-3、BR-4 と BR-10 とを比べる

と、BR-10がその強度比が最も大きく、BR-4が最も小さい(図5)。一方、RB-5素子とRB-10素子では、両者の強度比は中間層の膜厚に依存しない(図6)ことが注目される。BR素子RB素子ともに、3Vから4Vにかけて強度比は急激に大きくなっている。

青色発光帯と赤色発光帯のvibronic構造が電圧の増加により変化するかどうかを調べるために、0-1振動準位遷移による発光ピーク強度(0-1振動発光強度と呼ぶ)に対する0-0振動発光強度の比を印加電圧に対してプロットした。BR素子では電圧の増加により変化しない。しかし、RB素子では、赤色発光帯のvibronic構造に変化がないが青色発光帯のvibronic構造には3.5Vから5Vの領域で電圧増加に伴い大きな変化が見られた(図7)。青色発光帯の形状の低電圧と高電圧での違いは、図8からもわかる。RB素子の青色発光帯になぜこのような変化が起るかは不明であるが、microcavity効果と再結合領域の電圧依存性との共存や自己吸収に起因していると考えられる。

電圧の変化に伴う色度座標CIEの変化を図9に示す。電圧が3Vから8Vに高くなると、矢印で示すようにCIE座標は変化する。例えば、BR-4素子のCIE座標は、3, 4, 5, 6, 7Vでは、それぞれ(0.391, 0.387), (0.333, 0.367), (0.324, 0.365), (0.319, 0.363), (0.314, 0.361)となり、RB-10素子のCIE座標は、それぞれ(0.552, 0.411), (0.581, 0.412), (0.581, 0.412), (0.580, 0.413), (0.578, 0.415)となる。

3Vのとき、Device BR-3とBR-4においては、赤色強度は青色強度より大きい。Device BR-10ではほぼ同じである。図3からも明らかである。4V以上ではBR素子すべてにおいて青色強度は赤色強度より大きく現れていることと比べると、逆の傾向にある。これは、低電圧では、赤色発光層および青色発光層の両層に再結合領域が存在するが、高電圧になるにつれて再結合領域が青色発光層側にシフトし赤色発光層での再結合が低下することを示している。即ち、高電圧では赤色発光層における電子と正孔のバランスが悪くなることを示している。高電圧では正孔輸送層とそれに接する青色発光層とのinterfaceに電子分布が集中するためである。正孔輸送層と青色発光層とのLUMOエネルギーgapが大きいと、陰極から注入された電子は正孔輸送層によってブロックされ発光層側に留まるが、高電界のもとで移動してきた電子はそのinterface付近に集まったと考えられる。中間層の膜厚が大きくなると、赤色強度に対する青色強度の比が大きくなる、即ち、赤色強度が青色強度より大きく減少する。これは、再結合領域が正孔輸送層寄りに局在していることを裏付けている。

RB素子では、BR素子の場合と異なり赤発光と青発光の強度比は中間層の膜厚に依存しない(図6)。その理由は、赤色発光層の膜厚が31nmと青色発光層膜厚の10nmに比べて大きいことであると考えられる。再結合領域が正孔輸送層とのinterfaceから測って10nmより越えた範囲にあるが、31nmまでは到達しないとすると、RB素子およびBR素子での赤青発光強度比の実験結果が矛盾無く説明できる。

再結合領域が、発光層と正孔輸送層とのinterfaceの狭い領域にあることはいろいろな素子で

見つけられている [5-7]。今回の結果はそれと矛盾しない。

再結合領域が印加電圧即ち印加電流の増加に伴い広がることは、他の有機 EL 素子でも見つけられている [8] が、高電圧印加での BR 素子ではそれとは逆のことが起っている。高電圧（即ち、高電界）のもとでの発光層における電子移動度が正孔移動度に比べて高いためと思われる。3 V 付近の低電圧（即ち、低電界）では、電子移動加速度と正孔移動加速度との間にほとんど違いは起らず、青色発光層と赤色発光層に共通で用いたホスト材料がほぼ同程度の電子移動度と正孔移動度をもつバイポーラ性が大きく寄与するため、BR 素子では正孔輸送層との interface から青色発光層よりも離れた赤色発光層からの赤色発光強度が、青色発光層からの青色発光強度と同じになった。

発光のパワー効率 ( $\text{lm/W}$ ) は、BR 素子では図 10 (a) に示すように、 $1 \text{ mA/cm}^2$  以下の電流密度において BR-3 が他の素子よりわずかに高い。しかし  $1 \text{ mA/cm}^2$  以上では、3 つの BR 素子はほとんど同じである。一方、電流効率 ( $\text{cd/A}$ ) は、 $0.01\text{-}15 \text{ mA/cm}^2$  の全領域において、BR-3 が他の素子より高い (図 10 (b))。  $0.3 \text{ mA/cm}^2$  で  $11 \text{ cd/A}$  の最大値が得られた。パワー効率の場合と同じように、BR-4 と BR-10 素子の電流効率はほぼ同じである。

RB 素子については、パワー効率および電流効率ともに、RB-2 素子が最も大きく、RB-5 および RB-10 がそれに続く (図 11)。パワー効率の最大値は、 $0.2 \text{ mA/cm}^2$  のとき  $8.5 \text{ lm/W}$ 、電流効率の最大値は  $0.8 \text{ mA/cm}^2$  のとき  $11 \text{ cd/A}$  である。中間層膜厚が大きくなると効率が低下することが、BR 素子よりも RB 素子においてははっきりと得られた。

一方、輝度の低電圧化は、BR-3, RB-4 よりも RB-10 で得られ、BR-10  $\rightarrow$  BR-4  $\rightarrow$  BR-3 へと変るとともに高電圧駆動になる (図 12 (a))。中間層膜厚が大きいほど低電圧駆動になることは、RB 素子においても得られた (図 12 (b))。

### 3. 2. 石英板に蒸着された薄膜

#### 3. 2. 1. PL スペクトル

石英板に真空蒸着された膜厚  $10 \text{ nm}$  の青色発光膜における青色発光ドーパント濃度が  $1.0\%$ 、 $2.0\%$ 、 $4.7\%$  の  $260 \text{ nm}$  光励起での発光スペクトルを、図 13 に示す。  $467 \text{ nm}$  にピークをもち  $438 \text{ nm}$  と  $535 \text{ nm}$  付近にフォノンサイドバンドをもつ強い発光がある。  $467 \text{ nm}$  発光ピークは、素子で得られた  $472 \text{ nm}$  ピークからずれている。  $438 \text{ nm}$  にピークをもつ微弱な発光がすべての薄膜で現れる。  $438 \text{ nm}$  発光は EL 素子で現れた発光と一致する。この発光は、  $467 \text{ nm}$  発光強度と比べて、濃度が高くなるとその強度が小さくなる。これは、ドーパント濃度が高くなるにつれてホストからドーパントへのエネルギー伝達が効率よく行われていることを示している。

$30 \text{ nm}$  の膜厚の赤色発光膜は、赤色発光ドーパントが  $586 \text{ nm}$  のピーク波長と  $630 \text{ nm}$  にフォノンサイドバンドをもつ発光帯とホストによる  $438 \text{ nm}$  発光を呈する (図 14)。この場合も、ドーパント濃度が高くなるにつれてホストからドーパントへのエネルギー伝達が大きくなるため、

438 nm 発光強度は減少する。ELの588 nm 発光に比べてドーパントのPLピークは短波長側にシフトしている。同じようなPLのブルーシフトが青色発光膜でも起っている。

### 3. 2. 2. 発光量子効率

青色発光膜の発光量子効率の励起波長依存性を図15(a)に示す。青色発光膜の吸収スペクトルと青色ドーパントBD-102のPLスペクトルも載せた。3種類のドーパント濃度のなかで、1.0%のときに最も効率が小さく、2.0%のときに最も大きい。

赤色発光膜の場合、9.1%のときに最も効率が小さく、2.3%のときに最も大きい(図15(b))。励起波長 $\lambda$ が、ホストの吸収領域( $\lambda < 420$  nm)にあるよりも赤色発光ドーパントの吸収領域( $\lambda > 430$  nm)にあるときの方が高い効率を示す。これはすべての濃度について見られた。ホストからのエネルギー伝達によるドーパントの発光よりもドーパント分子を直接励起する方が、効率が高くなっている。

410nm励起での効率のドーパント濃度依存性を青色発光膜と赤色発光膜についてまとめたのが図16である。同じ濃度の場合、赤色発光分子の方が青色発光分子に比べて、ほぼ2倍効率が高くなっている。その理由のひとつとして、次のことが考えられる。2つの発光膜では同じ種類のホスト分子を用いている。ホスト発光に寄与する $S_1$ 準位エネルギーはその発光ピーク波長の438 nmから、2.83 eVとみなされる。一方、青色発光ドーパントの $S_1$ エネルギーはその発光ピーク波長の467 nmから2.65 eVとみなされ、赤色発光ドーパントの $S_1$ エネルギーはその発光ピーク波長の568 nmから、2.11 eVとみなされる。前者の場合のホストとドーパントの $S_1$ エネルギー差は0.18 eV、後者の場合の $S_1$ エネルギー差は0.72 eVである。青色ドーパントの場合のそのエネルギー間隔は狭く、熱エネルギーによりドーパントからホストへの逆エネルギー移動[22, 23]が可能となる。一方、赤色ドーパントの場合、そのエネルギー間隔は大きいので逆エネルギー移動は不可能であり、ホストからドーパントへの一方方向のエネルギー伝達となる。そのため、赤色発光膜で高い効率が得られた。

青色発光膜と赤色発光膜の両者ともに、濃度が3%を越えて高くなると効率が低下する傾向が見られる(図16)。これは、濃度消光が起っていることを示している。青色発光膜の場合、1%よりも2%の濃度の方が高い効率になっているが、濃度が1%のように極端に低い場合、ホストからの青色発光ドーパントへのエネルギー伝達が有効に働かないため、青色発光効率が低い値を示したと解釈される。

## 4. まとめ

赤色発光層と青色発光層との2層間に膜厚の異なる中間層を挿入した白色有機EL素子の発光特性と、2層の積層配列を変えた素子の発光特性から、電子正孔再結合発光領域を調べた。

EL スペクトルにおいて赤色発光強度と青色発光強度の比率から、再結合発光領域は印加電圧によって変化し、高電圧になると電子と正孔のバランスが崩れて正孔輸送層と発光層との界面付近に集中することが判明した。また、再結合領域はその界面からおおよそ 10nm ~ 30nm の範囲にあると推定された。さらに、界面から遠ざかるとともに電子正孔密度が減少することがわかった。

中間層の膜厚の小さい素子よりも大きい素子が、低い電流効率およびパワー効率を示した。これは、膜厚を大きくすると、正孔の密度分布が正孔輸送層 / 発光層の界面寄りに局在することにより発光層全体におけるキャリアバランスが悪くなったためと考えられる。一方、中間層の膜厚が大きい素子で低電圧駆動が得られた。これは、キャリアバランスが界面寄りに局在することにより、また BR 素子の場合青色発光層から赤色発光層へのエネルギー伝達が減少することにより、界面寄りの青色発光層での励起子密度が向上したためと考えられる。

ドーパント濃度を変えた赤色発光層を石英板の蒸着した薄膜およびドーパント濃度を変えた青色発光層を石英板の蒸着した薄膜の発光量子効率から、(1) ドーパント濃度が増加するとホストからドーパントへのエネルギー伝達が大きくなる、(2) 濃度が 3% を越えると濃度増加とともに効率が減少する、(3) 赤色発光膜の場合、ホストからのエネルギー伝達によるドーパント発光よりもドーパント分子を直接励起する方が発光効率は高い、(4) 同一濃度のとき、赤色発光分子は青色発光分子と比較してほぼ 2 倍の発光効率となる、ことが明らかになった。(4) の場合、ホストとドーパントにおける  $S_1$  準位エネルギー間隔が原因していると考えられた。

## 謝辞

本研究は、平成 20 - 22 年度文部科学省「地域産学官連携科学技術振興事業（むつ小川原八戸エリア）」からの助成金を受けてなされた。京都産業大学 [特定課題研究] 研究費助成金からも援助を得た。

## 参考文献

- [1] G. Schwartz, M. Pfeiffer, S. Reineke, K. Walzer, K. Leo, *Adv. Mater.* 19 (2007) 3672.
- [2] Y. Sun, N. C. Giebink, H. Kanno, B. Ma, M.E. Thompson, S.R. Forrest, *Nature* 440 (2006) 908.
- [3] G. Schwartz, S. Reineke, K. Walzer, K. Leo, *Appl. Phys. Lett.* 92 (2008) 053311.
- [4] K.S. Yook, S.O. Jeon, C.W. Joo, J.Y. Lee, *J. Indust. Engin. Chem.* 15 (2009) 420.
- [5] M. Matsumura, K. Furukawa, Y. Jinde, *Thin Solid Films* 331 (1998) 96.
- [6] J. Yang, J. Shen, *J. Phys. D Appl. Phys.* 33 (2000) 1768.
- [7] C.-H. Hsiao, Y.-H. Chen, T.-C. Lin, C.-C. Hsiao, J.-H. Lee, *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 163511.
- [8] J.W. Kang, S.H. Lee, H.D. Park, W.I. Jeong, K.M. Yoo, J.J. Kim, *Appl. Phys. Lett.* 90 (2007) 223508.
- [9] G. Zhou, W.-Y. Wong, S. Suo, *J. Photochem. Photobio. C: Photochem. Rev.* (2011), doi:10.1016/j.jphotochemrev.2011.01.001.

- [10] H. Kanno, Y. Hamada, K. Nishikawa, K. Okumoto, N. Saito, K. Nameno, K. Shibata, *Jpn. J. Appl. Phys.* 45 (2006) L947.
- [11] C. Li, B. Wei, K. Kawaguchi, T. Saito, H. Kimura, M. Ichikawa, Y. Taniguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46 (2007) 7487.
- [12] C. Li, H. Kimura, T. Saito, K. Sakurai, B. Wei, M. Ichikawa, Y. Taniguchi, *Opt. Express* 15 (2007) 14422.
- [13] T. Iwakuma, T. Arakane, Y. Hironaka, K. Fukuoka, H. Ikada, C. Hosokawa, T. Kusumoto, *SID02 Int. Symp. Digest Tech. Paper* 33 (2002) 598.
- [14] H. Tokairin, T. Arakane, M. Funahashi, H. Kuma, K. Fukuoka, K. Ikeda, H. Yamamoto, F. Morikawa, C. Hosokawa, "High performance fluorescent OLED materials", <http://displaybk.korea.ac.kr/Upload/bb/pds/1405.pdf>
- [15] 細川地潮:「長寿命の低分子赤色、白色材料」*Flat-Panel Display 2003 戦略編* (日経 BP 出版 2003) Part.8-2, p.194.
- [16] 細川地潮: 月刊ディスプレイ 10 巻 9 号 (2004) p.48.
- [17] 酒井俊男:「出光興産の素子材料」、*有機ELハンドブック* (筒井哲夫編、リアライズ社 2004) 第4章 第1節3 (2) p.376.
- [18] L.J. Chen, H.L. Hsu, *United States Patent Application* 20080171228 (2007), <http://www.freepatentsonline.com/20080171228.pdf>
- [19] 寺門正倫, 加藤真一, 松崎永二, *特許特開* 2006-32010 (2006). <http://www.j-tokkyo.com/2006/H05B/JP2006-032010.shtml>
- [20] H. Kanno, Y. Hamada, K. Nishimura, K. Okumoto, N. Saito, H. Ishida, H. Takahashi, K. Shibata, K. Nameno, *Jpn. J. Appl. Phys.* 45 (2006) 9219.
- [21] S.M. Lee, J.W. Park, S.W. Pyo, M.J. Jung, D.Y. Kim, D.H. Kim, H.Y. Kim, *United States Patent Application* 20100055343 (2009). <http://www.freepatentsonline.com/y2010/0055343.html>
- [22] Z. Y. Jiang, X. A. Cao, *Appl. Phys. Lett.* 97 (2010) 203304.
- [23] T. Tsuboi, N. Aljaroudi, *J. Lumin.* 122-123 (2007) 597.



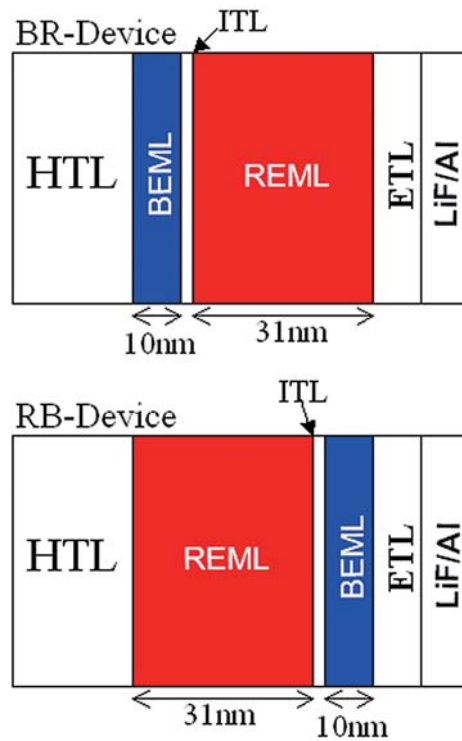


図 1 BR 素子および RB 素子における正孔輸送層から LiF 電子注入層 /Al 電極までの層構造（横幅は各層の膜厚に対応）。青色および赤色の部分は、それぞれ青色発光層および赤色発光層を示す。ETL: 電子輸送層、HTL: 正孔輸送層、ITL: 中間層、BEML: 青色発光層、REML: 赤色発光層

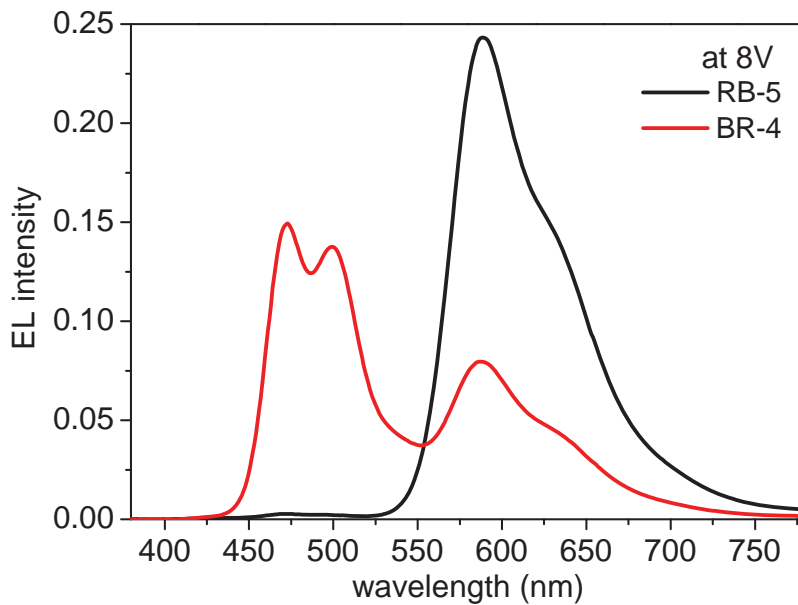


図 2 BR-4 素子および RB-5 素子の 8V での EL スペクトル

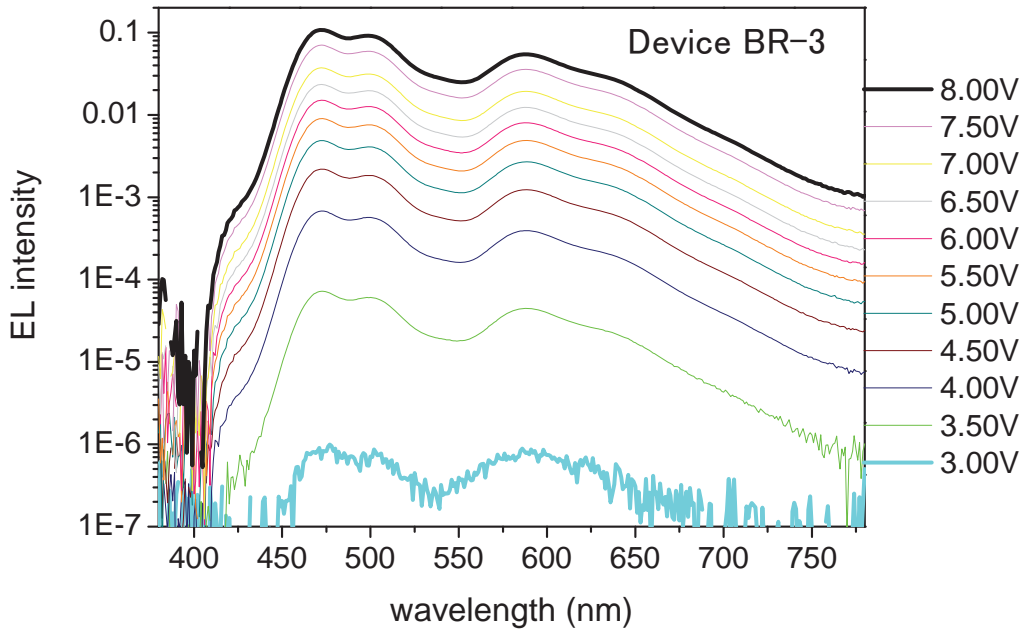


図3 (a) BR-3素子におけるELスペクトルの印加電圧依存性

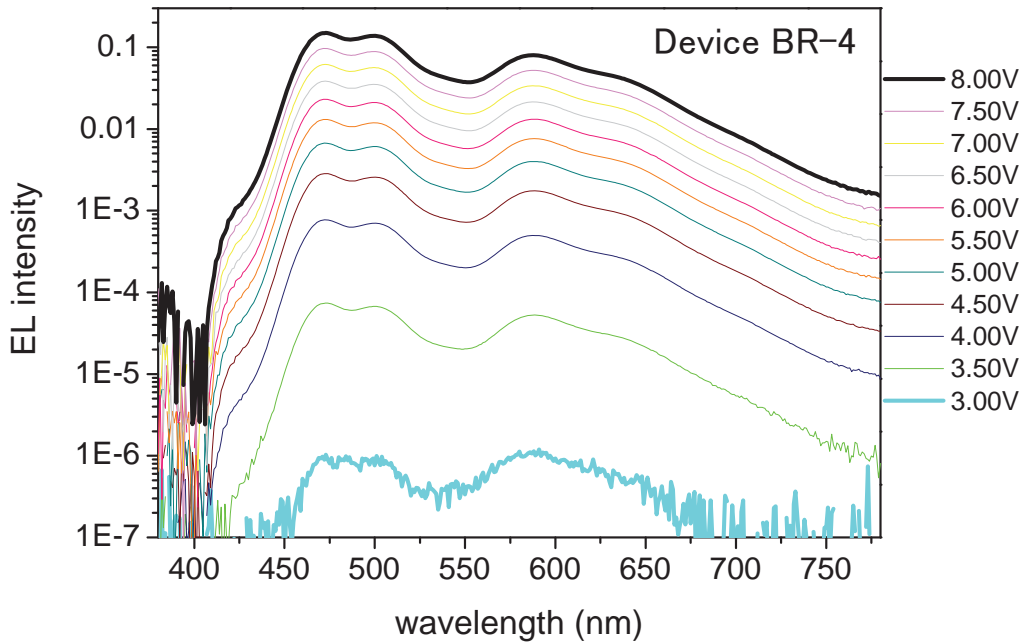


図3 (b) BR-4素子におけるELスペクトルの印加電圧依存性

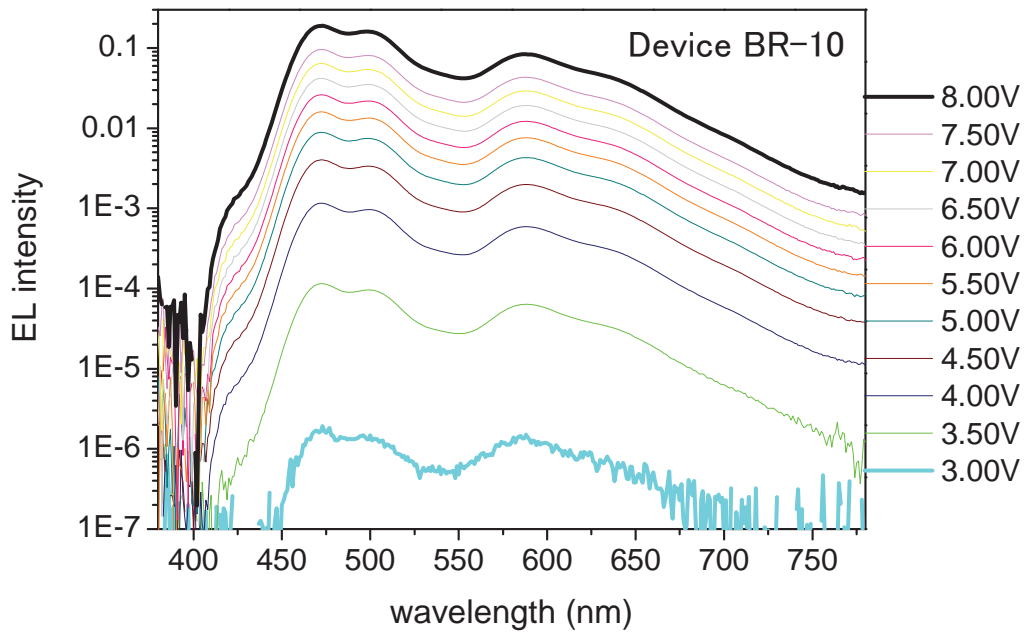


図 3 (c) BR-10 素子における EL スペクトルの印加電圧依存性

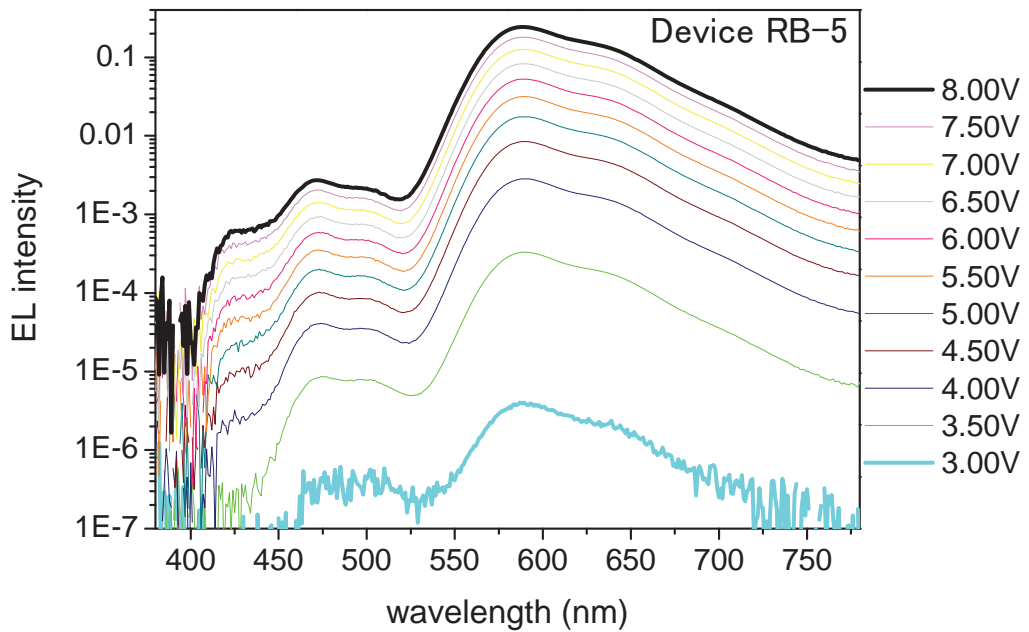


図 4 (a) RB-5 素子における EL スペクトルの印加電圧依存性

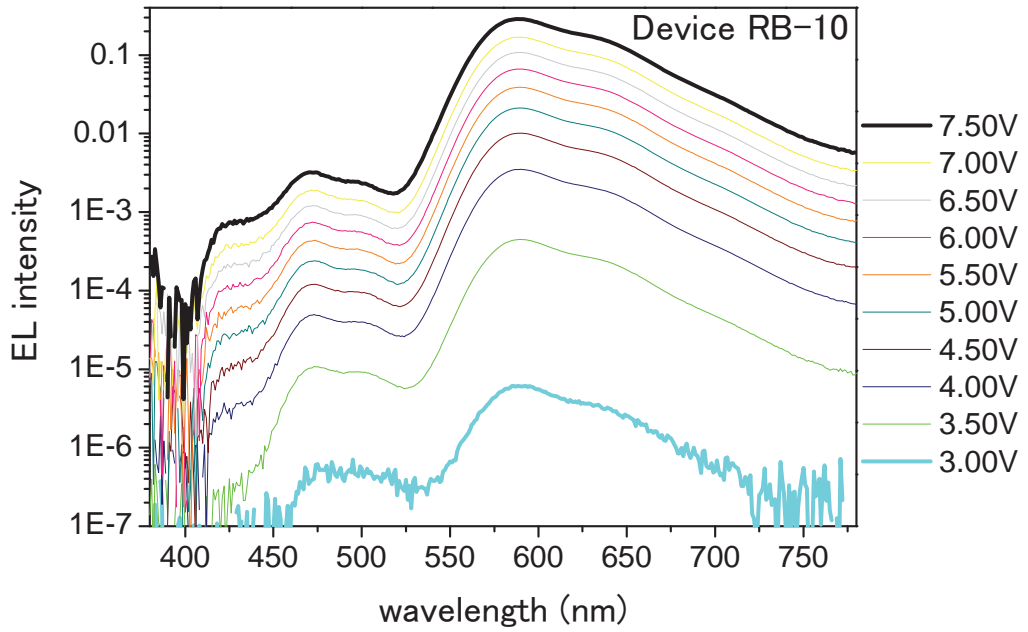


図4 (b) RB-10素子におけるELスペクトルの印加電圧依存性

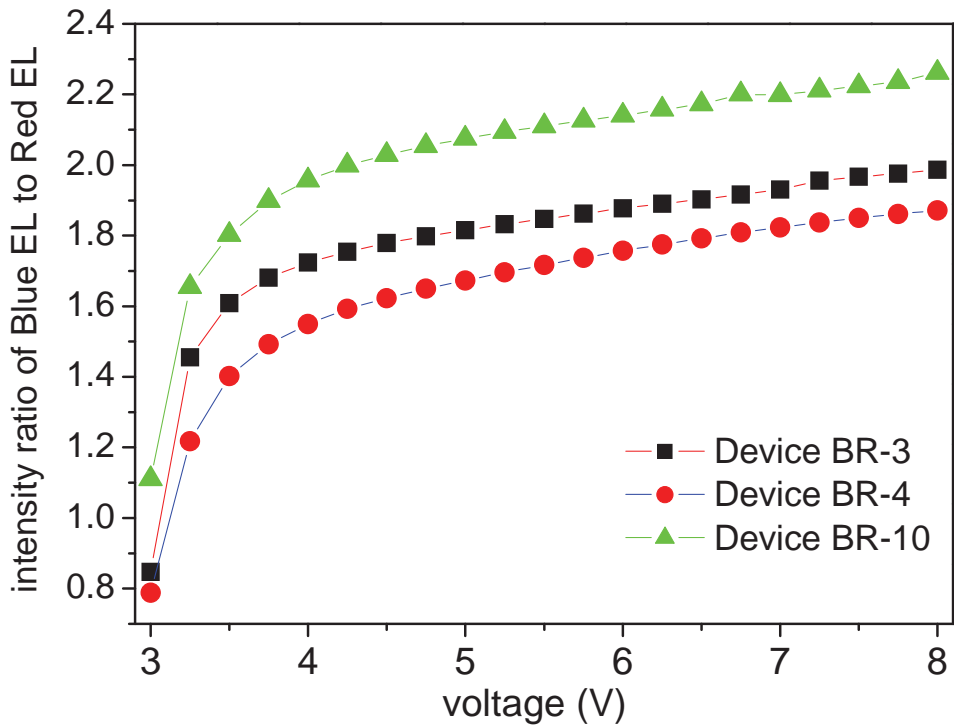


図5 BR素子における472nm発光強度と588nm発光強度との比の印加電圧依存性

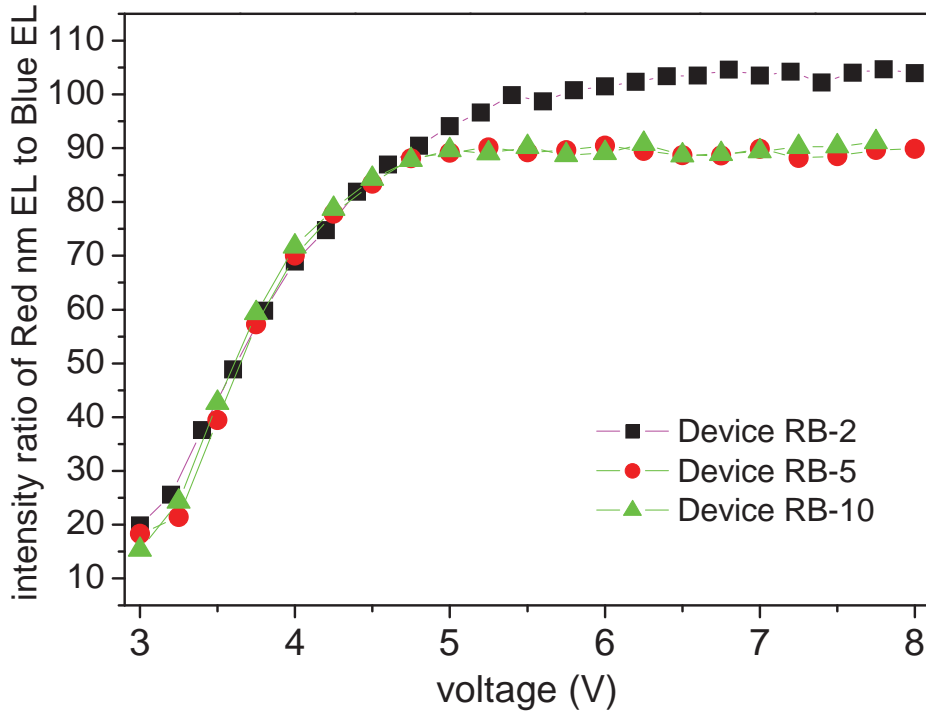


図6 RB素子における588nm発光強度と472nm発光強度との比の印加電圧依存性

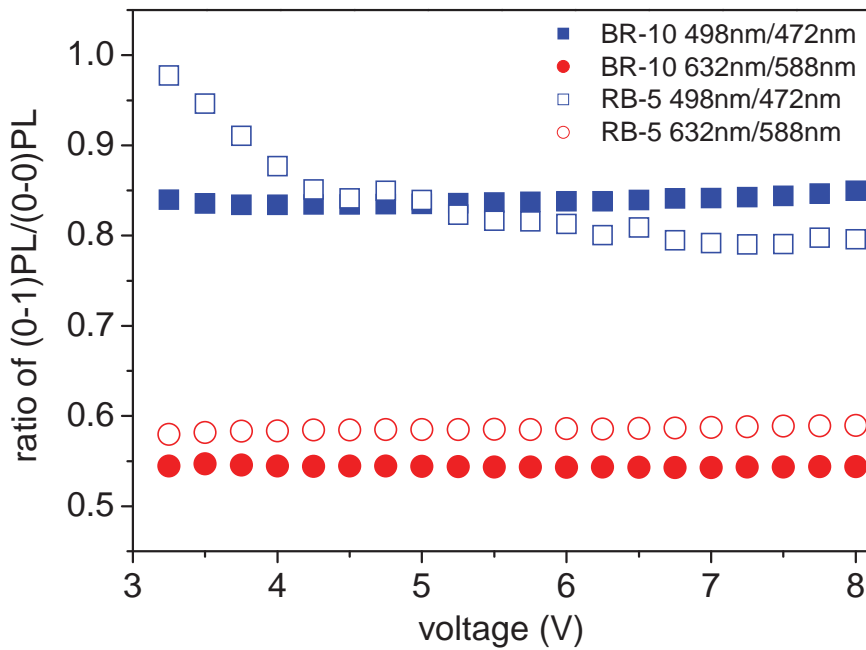


図7 BR-10素子およびRB-5素子における青色EL発光帯の498nm0-1振動発光強度に対する472nm0-0振動発光強度の比の電圧依存性、および赤色EL発光帯の632nm0-1振動発光強度に対する588nm0-0振動発光強度の比の電圧依存性。

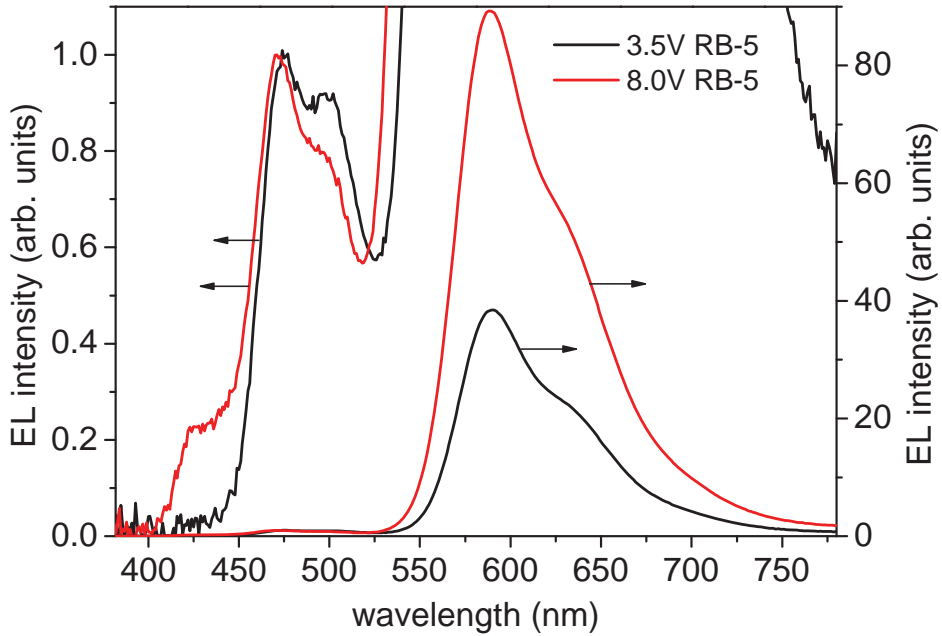


図8 RB-5素子における472nm青色EL発光ピークで規格化された3.5Vおよび8.0VでのELスペクトル。

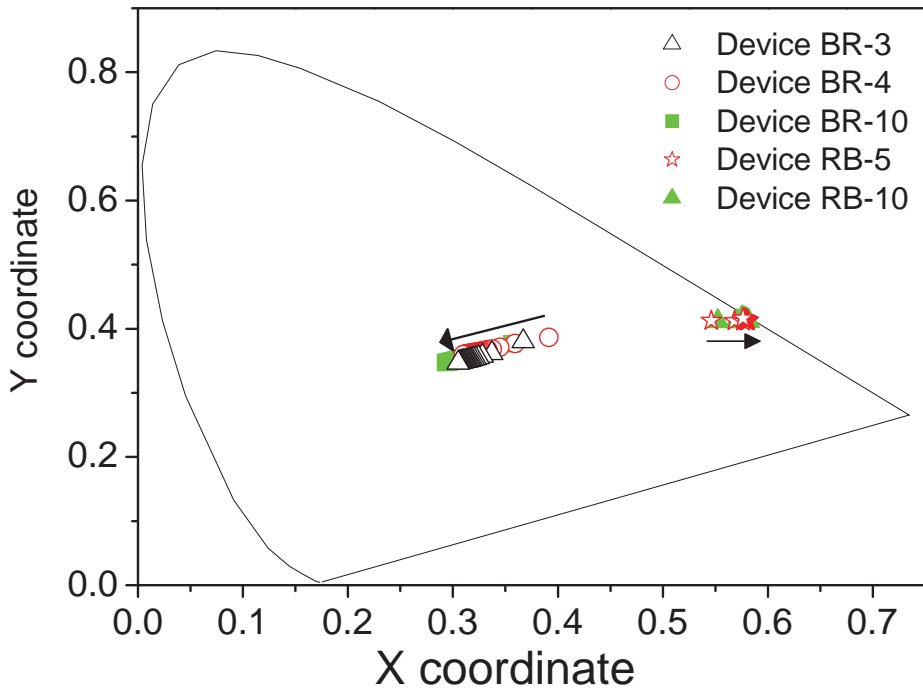


図9 3Vから8Vまで印加電圧を増加したときのBR素子およびRB素子におけるCIE色度座標の変化。矢印の方向は3Vから8Vへと増加した場合を示す

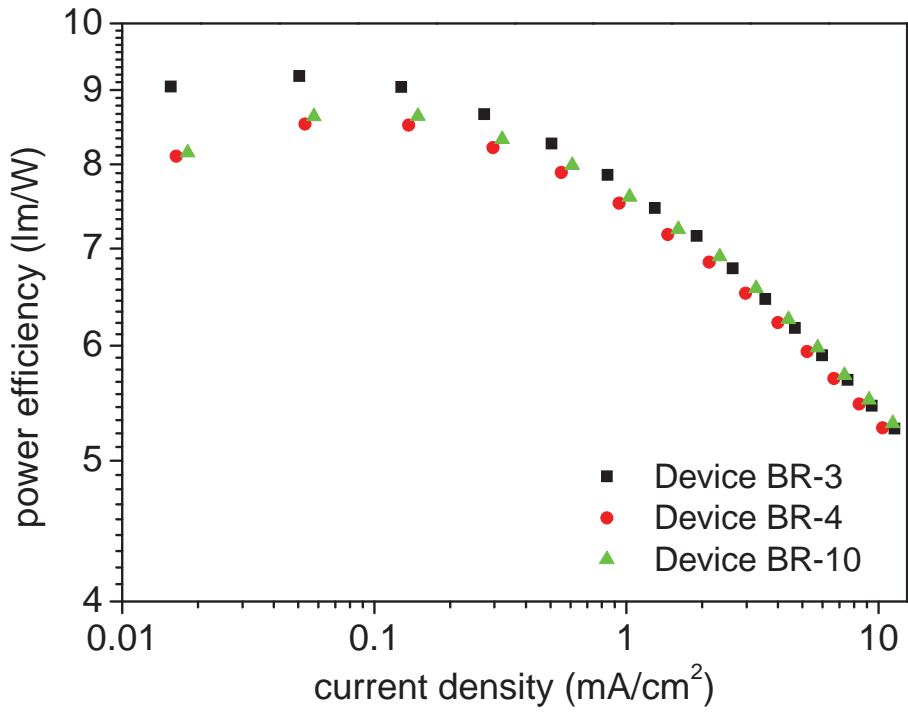


図 10 (a) BR 素子のパワー効率の電流密度依存性

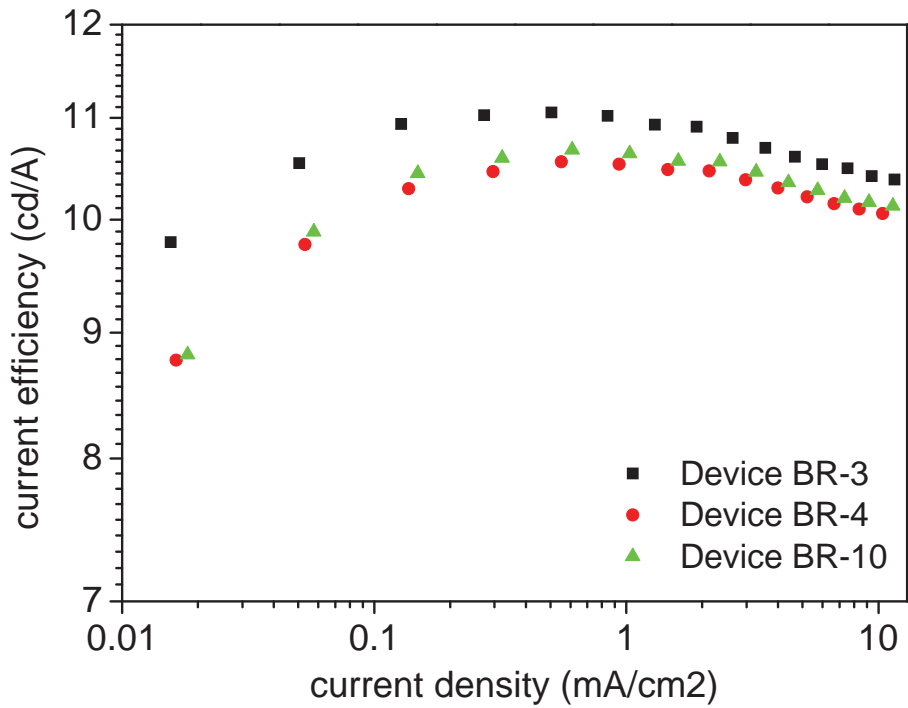


図 10 (b) BR 素子の電流効率の電流密度依存性

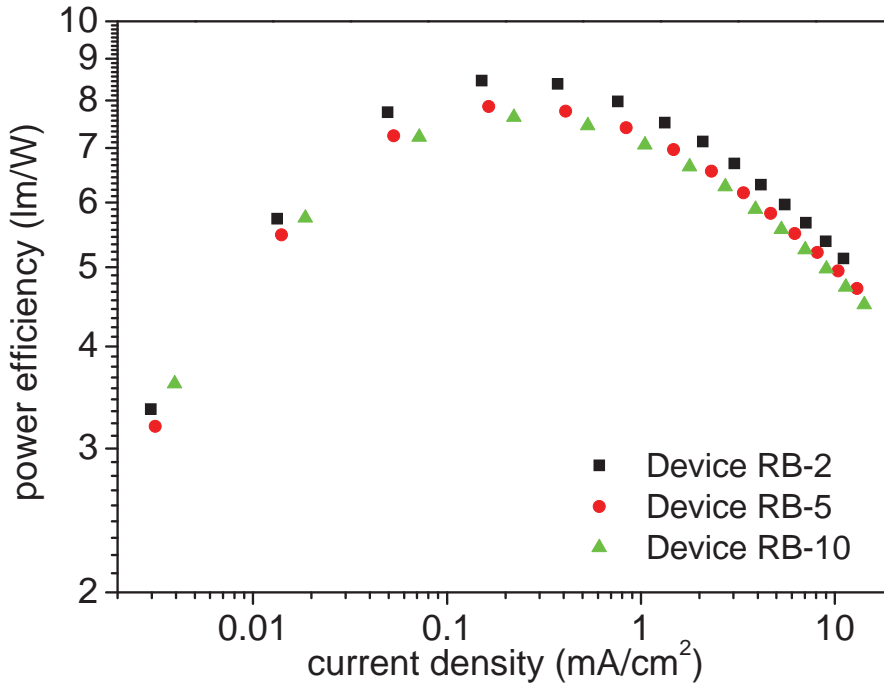


図 11 (a) RB 素子のパワー効率の電流密度依存性

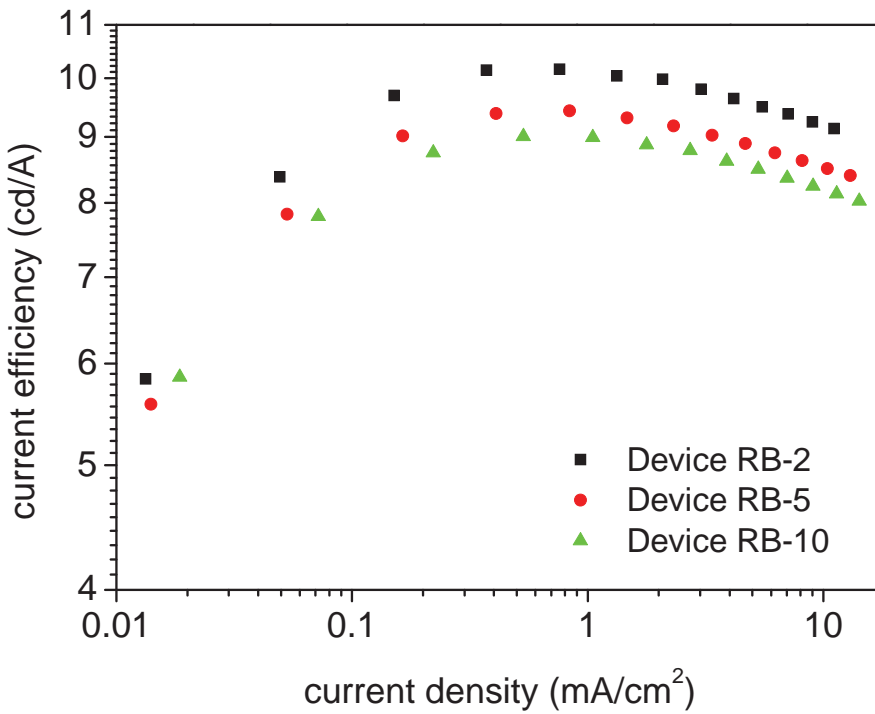


図 11 (b) RB 素子の電流効率の電流密度依存性



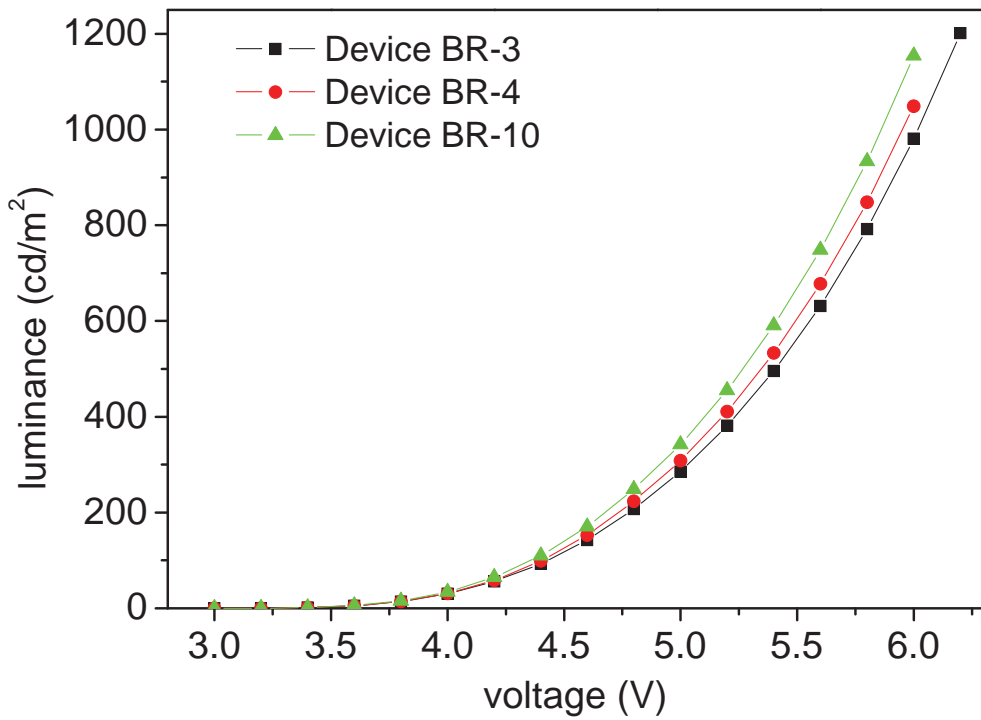


図 12 (a) BR 素子の輝度の印加電圧依存性

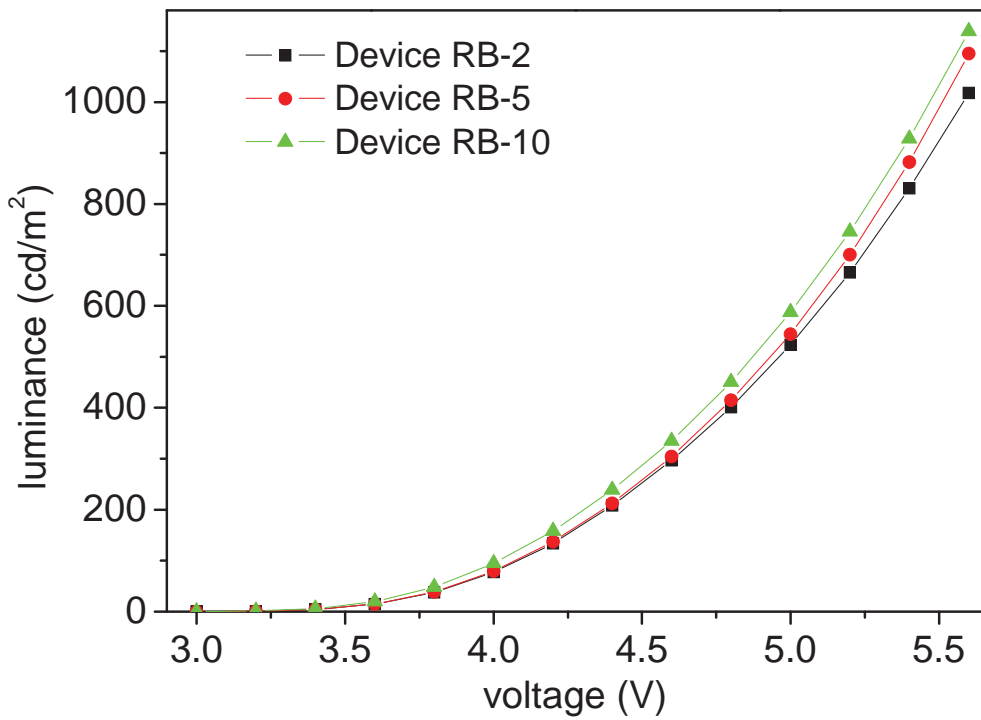


図 12 (b) RB 素子の輝度の印加電圧依存性

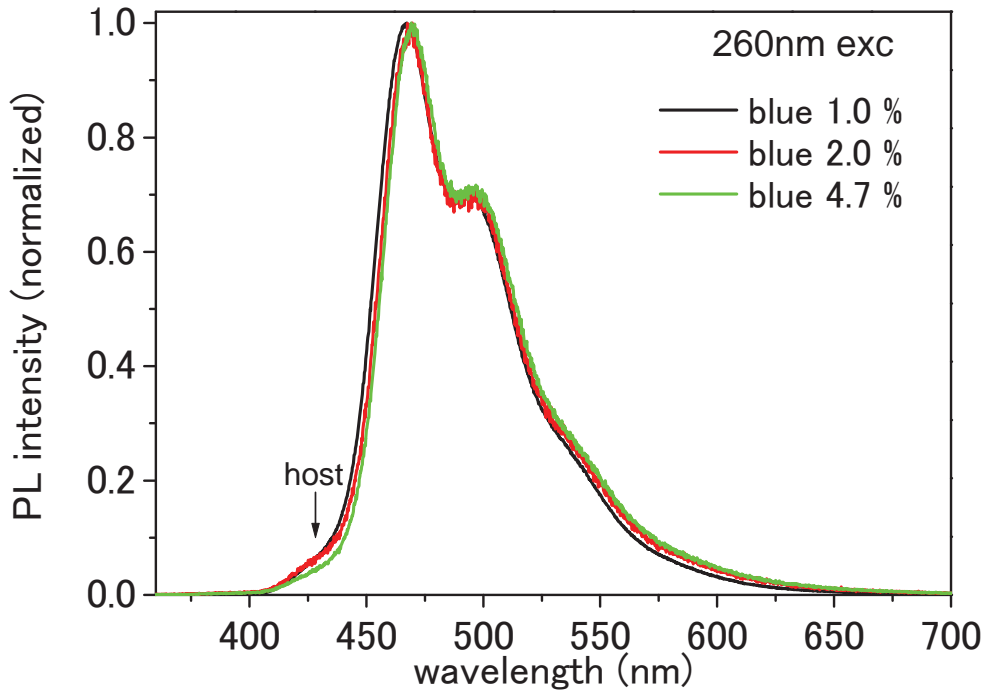


図 13 ドーパント濃度の異なる青色発光膜の PL スペクトル

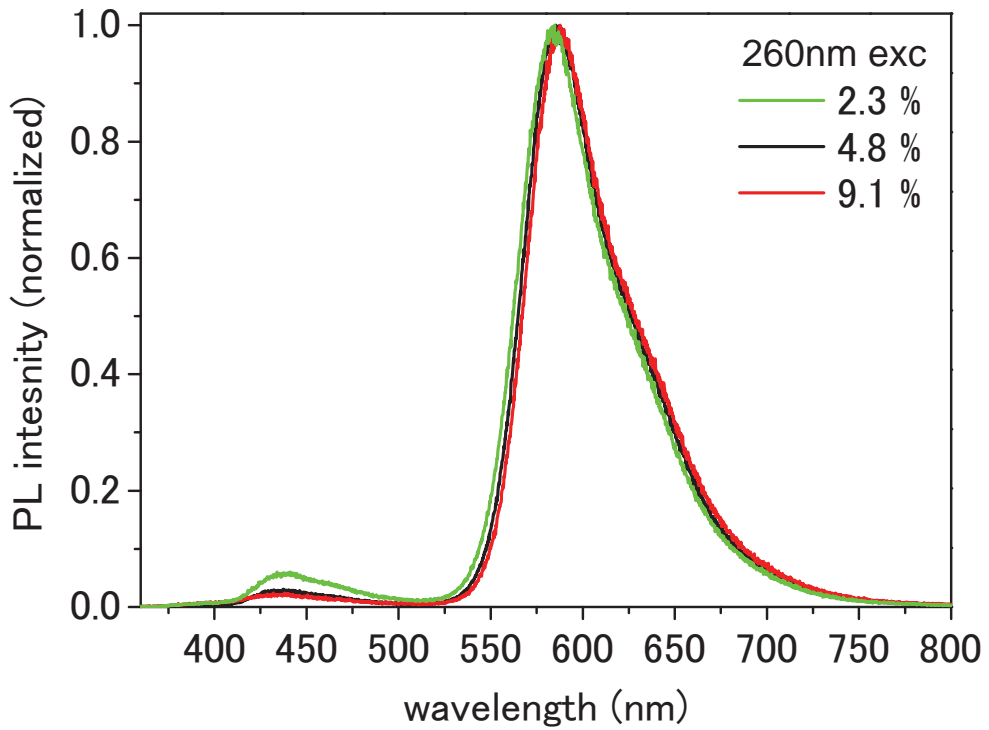


図 14 (a) ドーパント濃度の異なる赤色発光膜の PL スペクトル

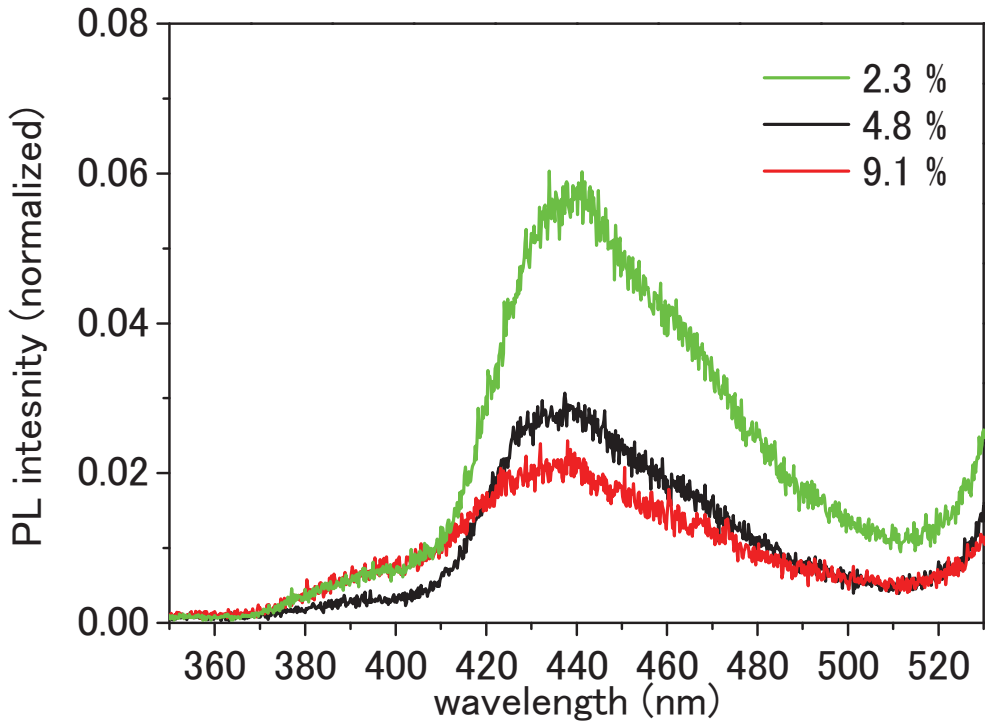


図 14 (b) ドーパント濃度の異なる赤色発光膜の PL スペクトル (図 14 (a) の拡大図)

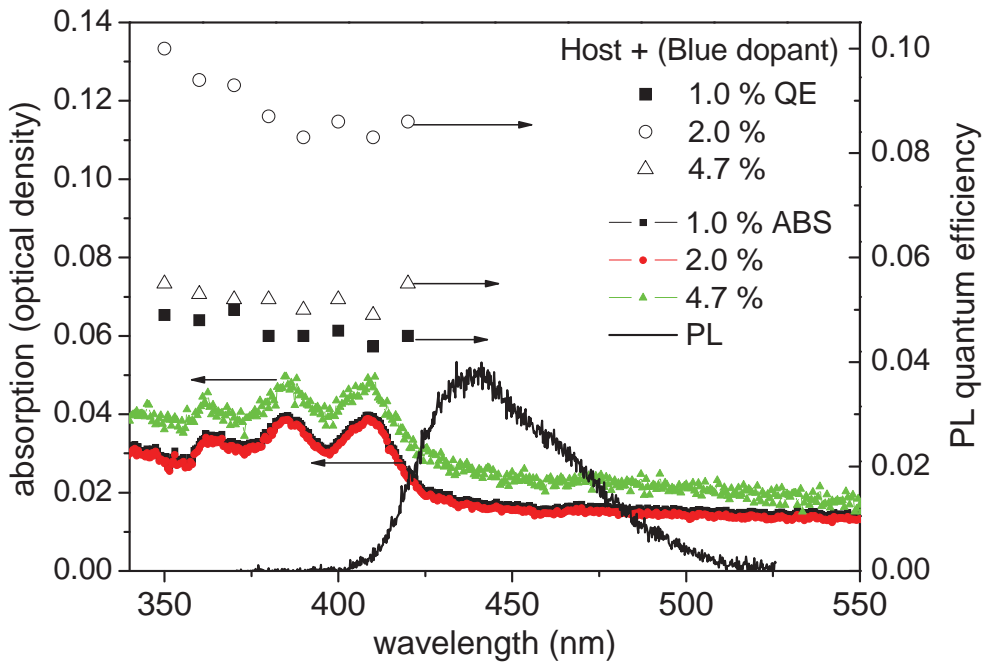


図 15 (a) 3 種類のドーパント濃度をもつ青色発光膜の励起波長の違いによる発光量子効率と吸収スペクトル (測定温度: 室温)

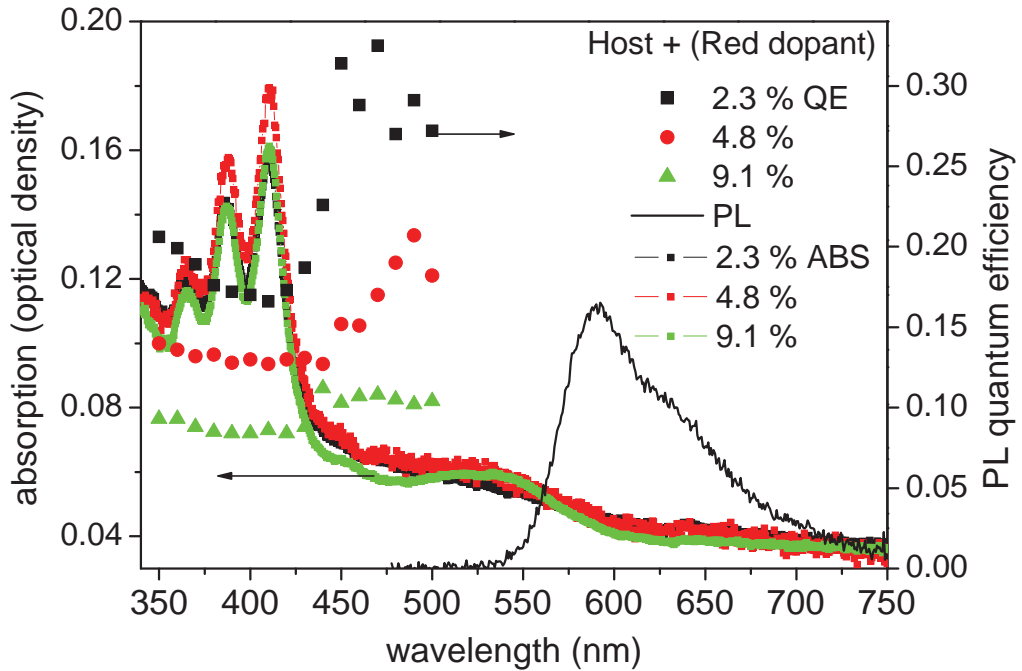


図 15 (b) 3種類のドーパント濃度をもつ赤色発光膜の励起波長の違いによる発光量子効率と吸収スペクトル (測定温度: 室温)

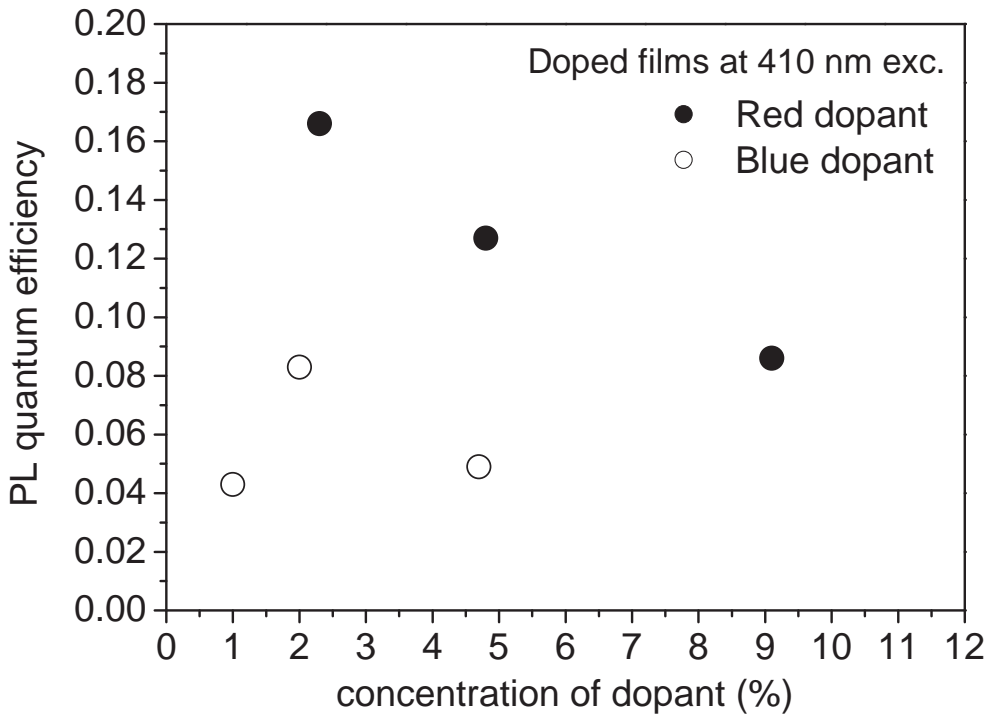


図 16 青色および赤色発光膜における 410nm 励起での発光量子効率のドーパント濃度依存性。