

THE IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS (JAPANESE EDITION)

# 電子情報通信学会 論文誌

エレクトロニクス

VOL. J104-C NO. 9

SEPTEMBER 2021

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。

なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

## エレクトロニクスソサイエティ

一般社団法人  電子情報通信学会

THE ELECTRONICS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

# 生体第一窓での近赤外発光及びフレキシブルな有機発光ダイオード開発

森本 勝大<sup>†a)</sup> 鹿野 舜之<sup>††</sup> 高倉 廉<sup>††</sup> 中 茂樹<sup>†</sup>

Near Infrared Emission at First Optical Window and Flexible Organic Light-Emitting Diode

Masahiro MORIMOTO<sup>†a)</sup>, Yoshiyuki SHIKANO<sup>††</sup>, Ren TAKAKURA<sup>††</sup>, and Shigeki NAKA<sup>†</sup>

あらまし 近赤外領域の中でも生体第一窓 (700~900 nm) は生体深部計測などに幅広く利用されてきた。本研究では生体第一窓に発光波長を有する、近赤外有機発光ダイオード (Near Infrared Organic Light-Emitting Diode: NIR-OLED) を作製しデバイス特性を評価する。発光材料に boron-dipyrromethene (BODIPY) 誘導体を用いることで、発光ピーク波長 760 nm、近赤外域における見かけの外部量子効率 0.29%、近赤外域での発光強度割合が 92% と優れた特性の NIR-OLED を作製した。ホスト材料を変更することで発光波長が可視から近赤外域まで幅広くチューニング可能であり、BODIPY 誘導体の励起準位に対応するホスト材料を用いることで選択的に近赤外発光が得られた。また、基板材料として poly (vinylidene fluoride/trifluoroethylene) [P(VDF/TrFE)] フィルム上に OLED を作製することで、ultra-flexible (UltraFlex)-OLED として評価する。P(VDF/TrFE) フィルム厚みは 1~2  $\mu\text{m}$  と薄いため、作製した UltraFlex-OLED は皮膚貼付け状態で発光が可能であり、皮膚のシワに追従したまま発光が得られた。更に UltraFlex-OLED をやわらかい基板上に作製することで、湾曲状態や微細なシワ状構造を誘起し、デバイス特性を評価したところ平滑時と同様の発光特性が得られた。これらの二つの研究結果を組み合わせることで生体親和性の高いフレキシブル近赤外発光 OLED への応用が期待される。

キーワード 有機 EL, 近赤外, フレキシブル, BODIPY

## 1. ま え が き

近赤外波長領域の利用は我々の生活に欠かせないものとなっており、中でも水分の吸収領域を避けた光学窓における光・電子デバイスは幅広い分野で応用されている。生体内色素などの透過率が高い波長帯は生体の窓 [1]~[3] と呼ばれ、食品検査や血中酸素濃度計 [4], [5] などの生活に欠かせない応用がなされている。また近年では、生体深部計測やバイオイメーシング [1], [3] などの先端研究領域にも利用されている。

一方で、有機発光ダイオード (Organic Light-Emitting

Diode: OLED) は近年急速に研究開発が進められ、高コントラスト・自発光という特長から照明やディスプレイとして広く一般家庭に普及している。加えて、OLED は有機材料の特長を最大限に活かした、軽量性・フレキシブル性 [5]~[7] を有する次世代光源として注目されている。しかし、これまでの OLED 発光波長領域は可視光領域に関する報告が大半を占めており、近

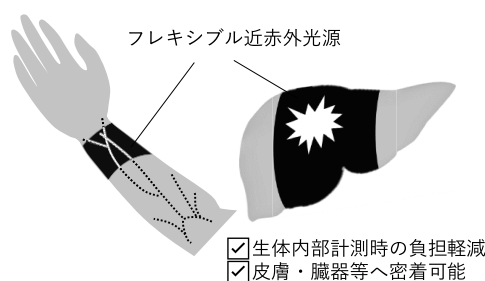


図1 フレキシブルな近赤外光源の応用例

<sup>†</sup> 富山大学学術研究部工学系, 富山市  
Academic Assembly Faculty of Engineering, University of Toyama, 3190  
Gofuku, Toyama-shi, 930-8555 Japan

<sup>††</sup> 富山大学大学院理工学教育部 (工学), 富山市  
Graduate School of Science and Engineering for Education, University of  
Toyama, 3190 Gofuku, Toyama-shi, 930-8555 Japan

a) E-mail: morimoto@eng.u-toyama.ac.jp

DOI: 10.14923/transcej.2020JC10026

赤外光領域における報告例[8]~[10]は限られてきた。

そこで我々は OLED の特長であるフレキシブル性に、近赤外発光特性を付与することで、高い生体親和性を有する OLED 開発を目指している。フレキシブルな近赤外光源は計測対象に密着可能であり、従来光源とは異なる生体計測への応用が期待できる。例えば、皮膚より薄い極薄状にすることで、皮膚や臓器、血管への貼付け時に負荷を軽減できる。また、光源を直接対象物に貼付けることで詳細な内部計測が期待できる(図 1)。

本論文では、近赤外領域の中でも生体第一窓(700~900 nm)における発光デバイスとして近赤外発光 OLED (NIR-OLED) を作製し、デバイス構造のチューニングに伴い発光波長を近赤外領域へと制御した。また、同様の OLED 構造を高分子フィルム上に成膜することで、総厚み 2  $\mu\text{m}$  以下の生体密着可能な ultra-flexible (UltraFlex) OLED を作製した[11]。

## 2. NIR-OLED

### 2.1 実験, 材料

近赤外発光材料として我々は boron-dipyrromethene (BODIPY) 誘導体に注目した。BODIPY は高い蛍光量子収率をもち  $\pi$  系共役の広がりが拡張できることから、様々な置換基を導入した材料が研究されている。近年では、BODIPY 誘導体による赤色~近赤外領域における受発光デバイスが報告[10],[12]~[15]されている。中でもビフェニル基を対称に導入し  $\pi$  共役系を拡張した BODIPY-Ph [14] は近赤外領域(767 nm)に吸収を示すことから、本研究における NIR-OLED の発光材料として選定した。BODIPY-Ph の化学構造を図 2(a) に示す。BODIPY-Ph の材料特性を評価するため、クロロ

ホルム希釈溶液を作製した。また、共蒸着薄膜としてガラス基板上に TPD をホスト材料として BODIPY-Ph 濃度 1 wt% で共蒸着法により成膜した。

次に透明電極としてインジウム錫酸化物 (ITO) 電極をパターニングしたガラス基板を洗浄し、NIR-OLED 層を真空蒸着法を用いて成膜した。発光層はホスト材料として TPD, Alq<sub>3</sub> を用い、BODIPY-Ph ゲスト濃度は 1 mol% のホストゲスト型発光層とした。ホスト材料に応じてホール輸送層として  $\alpha$ -NPD, 電子輸送層として BCP を成膜し、陰極には LiF (0.3 nm) と Al (70 nm) 成膜した。有機材料の化学構造と NIR-OLED 構造を図 2(a), (b) に示す。素子面積は 2 mm  $\times$  2 mm とした。

クロロホルム溶液の吸収スペクトル測定には紫外可視分光光度計 (UV-1650PC, SHIMADZU) を用いた。溶液や薄膜の蛍光発光 (PL) スペクトル測定には光ファイバ分光器 (Avaspec-UV/VIS/NIR, Avantes) を用いた。OLED 特性は電流密度-電圧 ( $J$ - $V$ ) 特性、EL スペクトル及び発光強度測定により評価した。 $J$ - $V$  特性は半導体パラメータ・アナライザ (B1500A, Keysight Technologies) を用いて測定した。EL スペクトルは光ファイバ分光器 (Avaspec-UV/VIS/NIR, Avantes) を用いて、定電流発光時に測定した。発光部を覆うようファイバー先端にコサインコレクターを取り付け(図 2(c)), 集光することで絶対強度 EL スペクトルとして測定した。発光強度は絶対強度 EL スペクトルを積分することで算出し、可視領域 (< 700 nm) と近赤外領域 (> 700 nm) に分けて見積もった。見かけ上の外部量子効率 (EQE) は発光強度と測定電流値から算出した。

### 2.2 結果と考察

BODIPY-Ph のクロロホルム希釈溶液の吸収・PL スペ

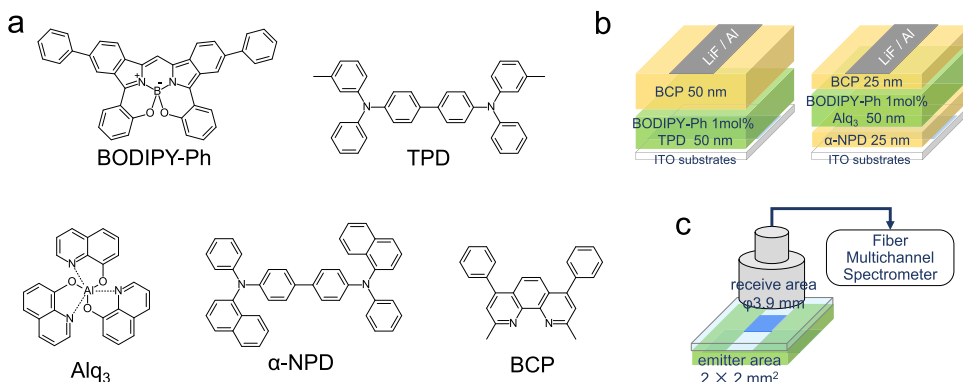


図 2 (a) 使用した材料の化学構造, (b) NIR-OLED デバイス構造, (c) 絶対強度 EL スペクトル測定概観図

クトルを図3(a)に示す。吸収スペクトルから短波長域(<450 nm)と長波長域(600-750 nm)に二つの吸収帯が確認できる。各吸収端波長からエネルギーギャップを2.66, 1.65 eVと見積もった。BODIPY-Ph 薄膜の大気中光電子収量分光測定から HOMO = -5.12 eV であったため、可視吸収帯に対応する LUMO<sub>vis</sub> = -2.46 eV、近赤外吸収帯に対応する LUMO<sub>NIR</sub> = -3.47 eV と算出した。PL スペクトルは吸収帯に対応した 350 nm と 650 nm の励起光源を用いた。いずれの PL スペクトルとも近赤外(700-850 nm)においてのみ発光を得た。励起光源 350 nm における PL スペクトルではベースラインの上昇が短波長領域において確認できるが、これは励起光源スペクトルと一致するため BODIPY-Ph 由来の発光ではない。BODIPY-Ph 溶液の吸収ピーク波長は 723 nm, PL ピーク波長は 730 nm であり、非常に小さいストークスシフト(7 nm)を示した。これは BODIPY-Ph 分子が強固な分子骨格を有していることを意味しており、 $\pi$  共役の広がり性を示唆している。そのため、BODIPY-Ph は強い濃度消光性を示し、単一材料の真空蒸着膜(neat 膜)では PL が観測されなかった。そこで、BODIPY-Ph の固体分散状態を形成するため、TPD ホスト材料との 1 wt% 共蒸着膜を作製した。共蒸着膜の PL スペクトルを図3(b)に示す。650 nm 励起光照射時は溶液同様に近赤外域に発光が得られたが、350 nm 励起光照射時は 500 nm 以下の可視領域においても発光が確認できた。これは BODIPY-Ph と

TPD の両方から発光している。共蒸着膜の PL スペクトルが溶液と同様であったことから、共蒸着膜中では BODIPY-Ph 分子は十分な分散状態を形成し、濃度消光や自己吸収の寄与が小さいことが示唆された。

次に TPD ホスト材料とした NIR-OLED の定電流測定 EL スペクトルを図4に示す。絶対強度 EL スペクトルから、電流密度増加に伴い発光強度の増加が確認できる。いずれの電流密度においても PL スペクトル同様に可視領域と近赤外領域の両方に発光を得た。発光強度を規格化したスペクトルから、全ての電流密度において近赤外域(700-900 nm)で同じスペクトルの発光が得られた。一方で、可視領域発光は電流密度により変化を生じた。可視発光帯(380-600 nm)のうち短波長域(<440 nm)は電流密度増加に伴い、発光強度が増加した。これは可視発光帯が TPD 由来(380-440 nm)と BODIPY-Ph 由来(440-600 nm)の発光から構成されており、電流密度増加により TPD 発光割合が増加したこと意味している。電流密度に伴う励起子生成の増加は、TPD から BODIPY-Ph へのエネルギー遷移効率を低下させ、余剰エネルギーにより TPD 由来の発光増加につながった。すなわち BODIPY-Ph 濃度増加により、TPD から BODIPY-Ph へのエネルギー移動効率向上が期待できる。一般にホスト-ゲスト型発光層ではホストの励起状態エネルギーはゲストへ遷移しゲスト分子内で輻射失活するか、ホスト分子内で輻射失活する。しかし、BODIPY-Ph 分子は可視・近赤外域での吸収に

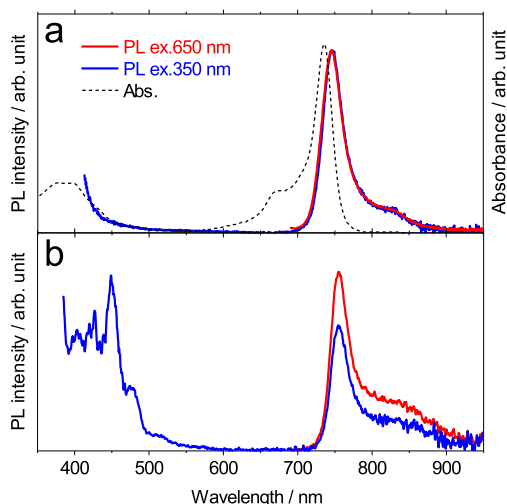


図3 BODIPY-Ph (a) クロロホルム希釈溶液と (b) TPD ホストにおける 1 wt% 共蒸着薄膜の PL スペクトル (実線) と吸収スペクトル (破線)

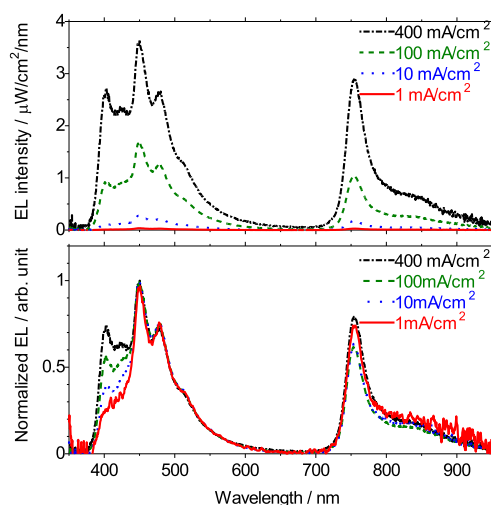


図4 BODIPY-Ph を用いた TPD ホスト NIR-OLED の定電流絶対 EL スペクトルと規格化 EL スペクトル

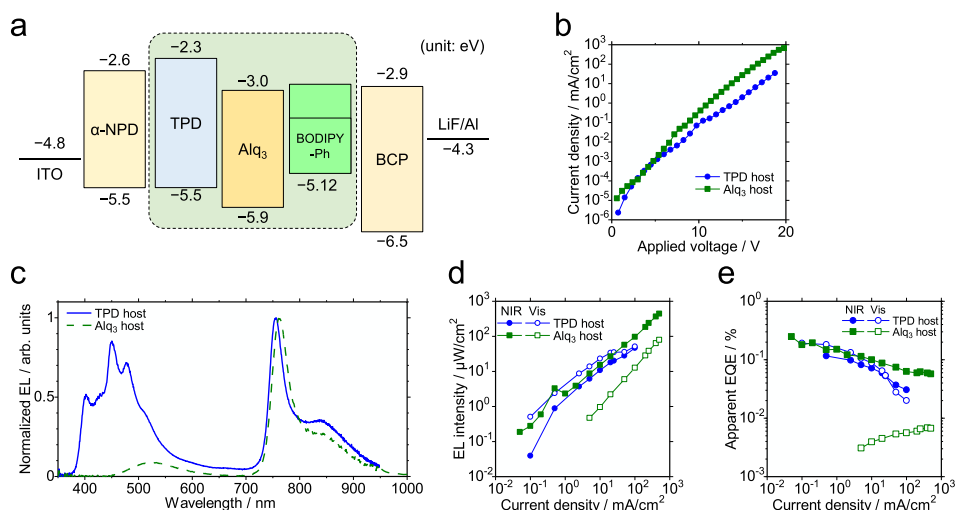


図5 TPD, Alq<sub>3</sub> をホスト材料とした NIR-OLED の (a) エネルギー状態図. (b)  $J$ - $V$  特性, (c) 規格化 EL スペクトル@100 mA/cm<sup>2</sup>, (d) 発光強度-電流密度特性, (e) 見かけの EQE-電流密度特性

対応する複数の励起状態を有するため、TPD ホストにおける大きな励起エネルギーが BODIPY-Ph 分子の複数励起単位へエネルギー移動を可能とし、広範囲な発光波長帯を得るに至った。そこで、BODIPY-Ph の発光波長帯から選択的に近赤外発光のみを取り出すため、異なる励起単位をもつホスト分子を用いた NIR-OLED 作製を試みた。

TPD の他に Alq<sub>3</sub> をホスト材料としたときの NIR-OLED を作製した。使用材料のエネルギー状態図及び NIR-OLED 特性を図 5 に示す。二つの NIR-OLED において  $J$ - $V$  特性は同様の結果が得られた一方で、EL スペクトルは大きく違う結果となった。TPD ホストが可視・近赤外域の両方で発光しているのに対し、Alq<sub>3</sub> ホストは近赤外発光の占める割合が多く得られた。可視域 (450-600 nm) において Alq<sub>3</sub> 由来の発光が若干確認できるものの、BODIPY-Ph 由来の可視発光は確認できなかった。これは BODIPY-Ph 分子の励起単位のうち近赤外吸収に対応する単位にのみ、Alq<sub>3</sub> ホストからのエネルギー移動が生じたことを意味する。EL スペクトルを可視領域 (< 700 nm) と近赤外領域 (> 700 nm) で積分することで発光強度とし、発光強度-電流密度特性として図 5 (d) に示す。可視領域での発光強度が TPD ホストに比べ Alq<sub>3</sub> ホストでは大きく減少していることが確認できる。また、発光強度全体に対する近赤外発光の割合は 100 mA/cm<sup>2</sup> 定電流時で TPD ホストは 59%, Alq<sub>3</sub> ホストは 92% と大幅に増加した。こ

こから、複数の発光波長帯を有する BODIPY-Ph ゲスト分子に対して、選択的発光を得るためのホスト分子の選定が重要であることを示唆している。見かけの NIR-EQE は TPD ホストでは 0.022% となり、Alq<sub>3</sub> ホストでは 0.044% @100 mA/cm<sup>2</sup> と微増に留まった。しかし、Alq<sub>3</sub> ホスト NIR-OLED は最大 NIR-EQE が 0.29% @0.05 mA/cm<sup>2</sup> と、ピーク波長 760 nm の近赤外発光として比較的高い値を得た。Alq<sub>3</sub> ホストの近赤外発光特性からは顕著なロールオフが確認でき、高い電流密度下では効果的なホスト-ゲスト遷移ができていない。一方で Vis-EQE が電流密度に伴い増加したことから、Alq<sub>3</sub> ホスト発光が誘起されたことを示唆する。

これらの結果から、複数の発光波長帯を有する BODIPY-Ph をゲスト材料として NIR-OLED を作製した場合、ホスト材料により発光波長帯が制御可能であることを示した。ホスト材料として Alq<sub>3</sub> は、選択的な近赤外発光を得るため有効に機能した。しかし、より高い NIR-OLED 特性を得るためにはホスト材料だけでなく、BODIPY-Ph 濃度などのデバイス構造最適化が必要となる。

### 3. UltraFlex-OLED

#### 3.1 実験, 材料

フレキシブル OLED の基板には一般にポリエチレンテレフタレートフィルムやポリエチレンナフタレート

フィルムが用いられる。これは薄膜デバイス作製上重要な平滑基板が得やすいことや、熱安定性に優れるといった特徴に起因している。しかし市販基材フィルムは  $6\sim 10\ \mu\text{m}$  以上のものが多く、皮膚貼付けを想定するとより薄いフィルムが好ましい。そこで本研究では基板材料として poly(vinylidene fluoride/trifluoroethylene) [P(VDF/TrFE)] に注目し、作製した P(VDF/TrFE) フィルム上に NIR-OLED 同様のデバイスを成膜することで UltraFlex-OLED として評価した。P(VDF/TrFE) は優れた絶縁性を有しており、wet プロセスにより平滑薄膜が容易に作製できる。また、生体親和性が高く [16] 皮膚貼付けを想定した場合にも有利に働く。P(VDF/TrFE) (Kureha, KF-W#2200) をメチルエチルケトンに 8 wt% で溶解し、ガラス基板及びポリジメチルシロキサン (PDMS) 基板上にスピンコート成膜した。成膜後は窒素雰囲気下  $130^\circ\text{C}$  で 2 時間アニール処理し、P(VDF/TrFE) フィルムの厚みは  $1\sim 2\ \mu\text{m}$  と皮膚貼付け可能な柔軟性を有していた (図 6(a))。P(VDF/TrFE) フィルム上に半透明陽極として Ag (50 nm)、ホール注入層として  $\text{MoO}_3$  (50 nm)、ホール輸送層として  $\alpha\text{-NPD}$  (50 nm)、発光層として  $\text{Alq}_3$  (50 nm)、陰極として LiF (0.3 nm) と Al (70 nm) を真空蒸着法により成膜した。Ag は一般的な陽極である ITO に比べ仕事関数が低いいため、ホール注入を促進するため  $\text{MoO}_3$  を挿入した。比較として ITO 電極基板上に、同様の OLED を成膜したものを作製した。

UltraFlex-OLED 特性は  $J$ - $V$  特性、発光輝度-電流密度 ( $L$ - $J$ ) 特性、EL スペクトルにより評価した。 $J$ - $V$  特性と EL スペクトルは NIR-OLED と同じ測定機器を用い、発光輝度は輝度計 (BM-9, Topcon) を用いて測定した。柔軟性評価として図 6(b) のように PDMS 基

板を湾曲・戻すことで、P(VDF/TrFE) フィルムにシワ状構造を誘起した後の OLED 特性を評価した。また、実際に皮膚貼付け時の UltraFlex-OLED の発光写真を図 6(c) に示す。デバイスが皮膚のシワに追従したまま発光していることが確認できる。

### 3.2 結果と考察

各基板上に作製した UltraFlex-OLED の  $J$ - $V$  特性を図 7(a) に示す。Glass/ITO と比較して Glass/UltraFlex-OLED は立上り電圧、電流密度ともに同様の結果となった。これは Ag 電極からのホール注入が ITO 電極と比較して遜色ないことを示しており、UltraFlex-OLED における半透明電極 Ag が電氣的に問題ないことを示

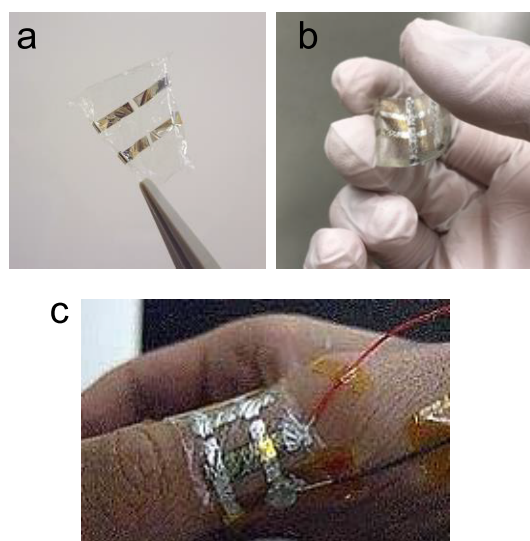


図 6 (a) 基板から剥離した P(VDF/TrFE) フィルムと (b) PDMS 基板上のシワ状構造の外観写真、(c) 皮膚貼付け時の UltraFlex-OLED 発光写真

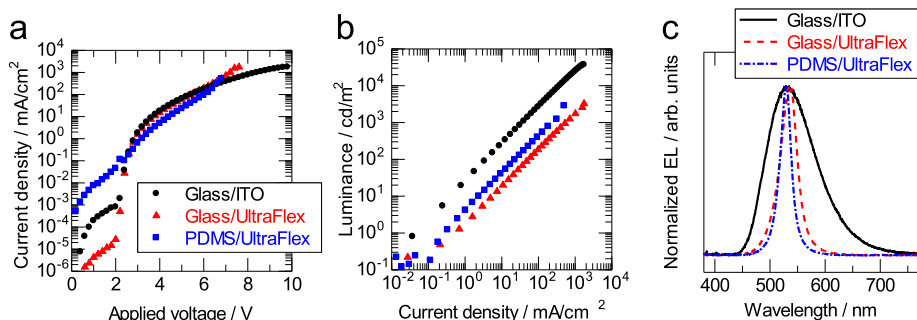


図 7 ガラス ITO 基板上 OLED、ガラス基板と PDMS 基板上 UltraFlex-OLED の (a)  $J$ - $V$  特性、(b)  $L$ - $J$  特性、(c) 規格化 EL スペクトル

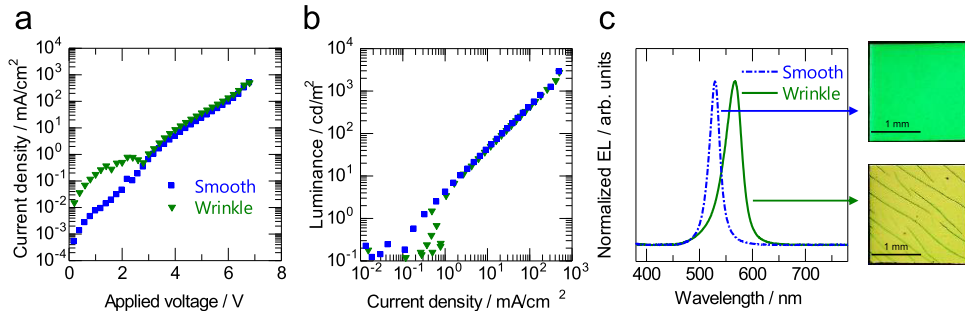


図8 PDMS基板上 UltraFlex-OLEDの平滑時とシワ状構造形成時の  
(a)  $J$ - $V$  特性, (b)  $L$ - $J$  特性, (c) 規格化 EL スペクトルと発光写真

す。しかし、 $L$ - $J$  特性 (図 7 (b)) からは特性低下が確認された。OLED 機能性層が同じであることから、 $L$ - $J$  特性低下は電気-光変換効率の低下ではなく、光取出効率の低下に起因する。厚み 50 nm の Ag 薄膜は波長 450 nm 以上において透過率 10% 以下、反射率 80% 以上であるため、光取出し効率を大きく低下させたと考えられる。また、Ag 電極の高い反射率は Ag と Al 電極に挟まれた OLED 機能層において光キャビティ効果を誘起しており、その結果として Glass/ITO の EL スペクトルと Glass/UltraFlex-OLED では大きな違いが確認された。

柔軟な PDMS 基板上に作製した UltraFlex-OLED の  $J$ - $V$  特性から、2 V 以下における高い電流密度が確認できる。低電圧印加時の電流密度はリーク電流に起因しており、PDMS 基板の表面平滑性や P(VDF/TrFE) フィルムの成膜状態がガラス基板に比べ悪いことを示唆する。P(VDF/TrFE) の溶媒であるメチルエチルケトンには PDMS 基板に浸透するため、ガラス基板表面とは異なる成膜状態が予想される。そのため、P(VDF/TrFE) 表面が粗くなり、デバイスリーク電流に繋がったと考えられる。一方で、 $L$ - $J$  特性からは Glass/UltraFlex-OLED に比べ PDMS/ UltraFlex-OLED は高い特性を得た。これは P(VDF/TrFE) フィルム (屈折率 1.4) からガラス基板 (屈折率 1.5) への光取出しに比べ、PDMS (屈折率 1.4) への光取出し効率が高いことに由来する。EL スペクトルからは PDMS 基板においても同様に、Ag-Al 電極間の光キャビティ効果が確認された。柔軟な PDMS 基板上においても、Ag-Al 電極が均一なキャビティ形成を示す結果となった。

次に、PDMS 基板上に作製した UltraFlex-OLED を一度湾曲させシワ状構造を形成した後の OLED 特性を図 8 に示す。シワ状 (Wrinkle) OLED の  $L$ - $J$  特性

(図 8 (b)) は平滑時 (Smooth) OLED と全く変化しない結果が得られた。一方で、 $J$ - $V$  特性 (図 8 (a)) は低電圧時の電流密度が増加した。Wrinkle OLED は発光写真 (図 8 (c)) から多くのシワ構造が確認でき、シワ構造での発光は平滑部に比べ弱くなった。局所的な湾曲状態であるシワ構造は OLED 層厚みの減少や構成層の破損要因であり、低電圧印加時のリーク電流や未発光部の原因となっている。また、その際の内部応力発生に伴い Ag-Al 電極間の厚みに変化が生じたことで光キャビティ効果に影響を与え、発光スペクトルが変化することが示唆される。

基板材料として P(VDF/TrFE) フィルムを用いた UltraFlex-OLED から、従来の固体基板上 OLED と遜色ないデバイス特性を得られた。また、柔軟な PDMS 上に作製した UltraFlex-OLED において、皮膚貼付け時の発光や、微細なシワ状構造の有無によるデバイス特性変化を議論できた。本論文では陽極に半透明な電極を使用し、無機半導体によるホール注入層としたが、より透過率の高い電極や有機半導体によるホール注入層へ置き換えることで、ITO 電極に匹敵した未発光部の少ない UltraFlex-OLED として期待できる。

#### 4. む す び

本論文では近赤外領域に発光特性をもつ BODIPY-Ph 分子を利用した NIR-OLED の近赤外発光特性を評価した。ホスト材料により発光波長域が可視から近赤外域まで選択可能であり、ホスト材料を Alq<sub>3</sub> とすることで近赤外域に選択的発光を得ることができた。Alq<sub>3</sub> ホスト時の NIR-OLED は発光ピーク波長 760 nm の発光を示し、NIR-EQE<sub>MAX</sub> = 0.29% @0.05 mA/cm<sup>2</sup>、近赤外域での発光強度割合が 92% と優れた特性を示した。

同様の OLED 構造を 1~2  $\mu\text{m}$  の P(VDF/TrFE) フィルム上に作製することで、UltraFlex-OLED として評価した。発光輝度は従来素子に劣るものの、皮膚貼付け状態で発光が得られるなど、OLED 特有の付加価値を付与することができた。また、PDMS 上に UltraFlex-OLED を作製することで微細シワ状構造の有無によるデバイス特性を評価した。これらは、今後のフレキシブル OLED における、一つの評価手法として利用可能である。

本論文で述べた NIR-OLED と UltraFlex-OLED を組み合わせることで、フレキシブルな近赤外発光 OLED 開発は実現可能である。しかし、社会実装のためにはデバイス性能向上に加え、波長調整、繰返し耐久性等の評価が必要となる。今後も生体親和性の高いフレキシブルデバイスや近赤外発光は一層注目されるため、より多くの研究開発が期待される。

**謝辞** 本研究で使用した近赤外発光材料 BODIPY-PH は、日本化薬株式会社にご提供いただきました。大気中光電子収量分光測定は理研計器株式会社製 AC-2 を用い、岩井義治様に測定いただきました。本研究の一部はタナカ財団、鈴久晴富山県内大学等研究助成基金及び JSPS 科研費 (19K04465) の助成を受けました。

## 文 献

- [1] T. Jin, "Non-invasive near-infrared fluorescence imaging in the second optical window," *Nippon Laser Igakkaishi*, vol.36, no.2, pp.195-200, 2015, DOI:10.2530/jslsm.jslsm-36\_0029
- [2] M.S. Patterson, B.C. Wilson, and D.R. Wyman, "The propagation of optical radiation in tissue I. Models of radiation transport and their application," *Lasers Med. Sci.*, vol.6, no.2, pp.155-168, 1991, DOI:10.1007/BF02032543
- [3] K. Soga and M. Kamimura, "Development of OTN-NIR bioimaging system," *Seibutsu Butsuri*, vol.57, no.2, pp.081-084, 2017, DOI:10.2142/biophys.57.081
- [4] A.K. Bansal, S. Hou, O. Kulyk, E.M. Bowman, and I.D.W. Samuel, "Wearable organic optoelectronic sensors for medicine," *Adv. Mater.*, vol.27, no.46, pp.7638-7644, Dec. 2015, DOI:10.1002/adma.201403560
- [5] T. Yokota, P. Zalar, M. Kaltenbrunner, H. Jinno, N. Matsuhisa, H. Kitanosako, Y. Tachibana, W. Yukita, M. Koizumi, and T. Someya, "Ultraflexible organic photonic skin," *Sci. Adv.*, vol.2, no.4, p.e1501856, April 2016, DOI:10.1126/sciadv.1501856
- [6] M.S. White, M. Kaltenbrunner, E.D. Głowacki, K. Gutnichenko, G. Kettlgruber, I. Graz, S. Aazou, C. Ulbricht, D.A.M. Egbe, M.C. Miron, Z. Major, M.C. Scharber, T. Sekitani, T. Someya, S. Bauer, and N.S. Sariciftci, "Ultrathin, highly flexible and stretchable PLEDs," *Nat. Photonics*, vol.7, no.10, pp.811-816, July 2013, DOI:10.1038/nphoton.2013.188
- [7] W.A.D.M. Jayathilaka, A. Chinnappan, J.N. Tey, J. Wei, and S. Ramakrishna, "Alternative current electroluminescence and flexible light emitting devices," *J. Mater. Chem. C*, vol.7, no.19, pp.5553-5572, 2019, DOI:10.1039/C9TC01267B
- [8] A. Zampetti, A. Minotto, and F. Cacialli, "Near-infrared (NIR) organic light-emitting diodes (OLEDs): Challenges and opportunities," *Adv. Funct. Mater.*, vol.29, no.21, p.1807623, May 2019, DOI:10.1002/adfm.201807623
- [9] R. Nagata, H. Nakanotani, and C. Adachi, "Near-infrared electrophosphorescence up to 1.1  $\mu\text{m}$  using a thermally activated delayed fluorescence molecule as triplet sensitizer," *Adv. Mater.*, vol.29, no.5, p.1604265, Feb. 2017, DOI:10.1002/adma.201604265
- [10] A. Zampetti, A. Minotto, B.M. Squeo, V.G. Gregoriou, S. Allard, U. Scherf, C.L. Chochos, and F. Cacialli, "Highly efficient solid-state near-infrared organic light-emitting diodes incorporating A-D-A dyes based on  $\alpha$ ,  $\beta$ -unsubstituted 'BODIPY' moieties," *Sci. Rep.*, vol.7, no.1, pp.1-7, 2017, DOI:10.1038/s41598-017-01785-2
- [11] 森本勝大, 鹿野舜之, 高倉 廉, 中 茂樹, "フレキシブルな近赤外発光ダイオードの開発," 2020 信学総大, CI-6-1, 2020.
- [12] S.B. Anantharaman, S. Yakunin, C. Peng, M.V.G. Vismara, C.F.O. Graeff, F.A. Nüesch, S. Jenatsch, R. Hany, M.V. Kovalenko, and J. Heier, "Strongly red-shifted photoluminescence band induced by molecular twisting in cyanine (Cy3) dye films," *J. Phys. Chem. C*, vol.121, no.17, pp.9587-9593, May 2017, DOI:10.1021/acs.jpcc.7b01412
- [13] S. Baysec, A. Minotto, P. Klein, S. Poddi, A. Zampetti, S. Allard, F. Cacialli, and U. Scherf, "Tetraphenylethylene-BODIPY aggregation-induced emission luminogens for near-infrared polymer light-emitting diodes," *Sci. China Chem.*, vol.61, no.8, pp.932-939, Aug. 2018, DOI:10.1007/s11426-018-9306-2
- [14] R. Fujioka, T. Fukushima, N. Oishi, Y. Koshiba, C. Takechi, S. Horike, H. Kaji, and K. Ishida, "Improving NIR sensor detectivity of BODIPY/C60 bulk heterojunction photodiode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.59, no.5G, p.SGGG04, April 2020, DOI:10.7567/1347-4065/ab641f
- [15] K. Ivaniuk, A. Pidluzhna, P. Stakhira, G.V. Baryshnikov, Y.P. Kovtun, Z. Hotra, B.F. Minaev, and H. Ågren, "BODIPY-core 1, 7-diphenyl-substituted derivatives for photovoltaics and OLED applications," *Dye. Pigment.*, vol.175, p.108123, April 2020, DOI:10.1016/j.dyepig.2019.108123
- [16] L. Marques and L. Holgado, "Subcutaneous tissue reaction and cytotoxicity of polyvinylidene fluoride and polyvinylidene fluoride-trifluoroethylene blends associated with natural polymers," *J. Biomed. Mater. Reserch*, 2013, DOI:10.1002/jbm.b.32941

(2020 年 12 月 11 日受付, 2021 年 3 月 17 日再受付,  
4 月 12 日早期公開)



森本 勝大

2009 静岡大・院物質工学専攻了。2009 東洋紡績（株）化成品事業部。2015 神戸大・院応用化学専攻了。2016 神戸大・特命助教。2017 富山大・助教。有機分子材料の光電子機能性発現とデバイス応用研究に従事。応用物理学会、高分子学会会員。博士

（工学）。



鹿野 舜之

2019 富山大学・工卒。2020 同大大学院修士課程在学中。現在、近赤外有機 EL デバイスの研究に従事。



高倉 廉

2019 富山大学・工卒。現在、社会貢献・サービス分野に従事。



中 茂樹 （正員）

1992 富山大・院電子工学専攻了。1992 富山大・工・助手。2007 同助教。2008 同准教授。2016 同教授。有機光デバイスの研究に従事。応用物理学会、映像情報メディア学会会員。博士（工学）。