

第7章 有機薄膜太陽電池の基礎

目次

第7章 有機薄膜太陽電池の基礎.....	15
7.1 有機薄膜太陽電池の原理.....	15
7.2 有機薄膜太陽電池の構造.....	16
7.3 有機半導体活性層.....	16
7.3.1 半導体.....	17
7.3.2 有機半導体と活性層.....	18
7.4 太陽電池特性.....	20
7.5 最近の研究動向.....	22
7.5.1 低バンドギャップポリマーへの取り組み.....	22
7.5.2 光吸収領域の長波長化への取り組み.....	23
7.5.3 界面構造に関する取り組み.....	23
7.5.4 半透明太陽電池の開発.....	23
7.6 ウェットプロセスでの有機薄膜太陽電池.....	23
7.6.1 ウェットプロセスの重要性.....	23
7.6.2 ウェットプロセス有機薄膜太陽電池の研究動向.....	23
7.6.3 ウェットプロセス太陽電池における課題.....	24

7.1 有機薄膜太陽電池の原理

有機薄膜太陽電池は、基本的には光吸収により励起され電子を与える有機材料(p型半導体材料)と p 型半導体材料との界面・接合面から電子を受け取る有機材料(n型半導体材料)の接合により形成される pn 接合型太陽電池である。

発電原理は以下の通りである。

1. 太陽光が ITO 電極を通じて照射される。
2. 光吸収することによって p 型半導体が励起され、HOMO にあった電子が LUMO に上がり、励起子が生成される。
3. 励起子が p 型半導体内を拡散し pn 界面に移動(界面に達しなかった励起子は再結合)する。
4. pn 界面で励起子が電荷分離する。電子が LUMO に励起される。
5. 電荷分離により生成した電子はエネルギー準位に従って n 型半導体内を移動し ITO 電極へ、正孔は p 型半導体内を移動し Ag 電極へ流れる。
6. 外部回路により電極として取り出す。

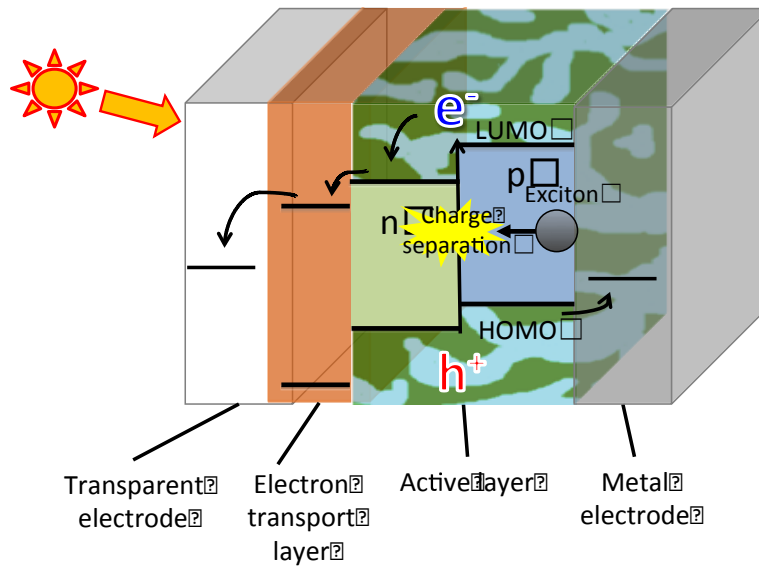


Figure. 7-1 The principle of power generation

7.2 有機薄膜太陽電池の構造

有機薄膜太陽電池の構造はノーマル型、逆型に分類される。(Figure. 7-1)

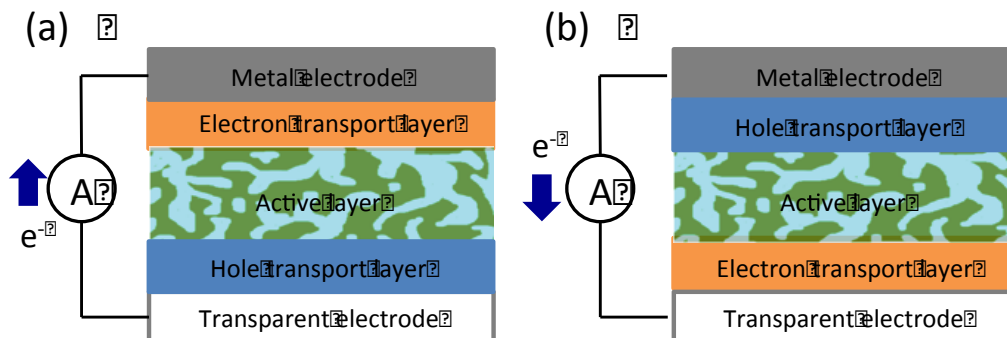


Figure. 7-1 The structure of normal and inverted polymer-based solar cells

ノーマル型と逆型は階段上のエネルギー準位が逆であり、そのため電子の移動方向が異なる。ノーマル型は透明導電層、正孔輸送層、有機半導体活性層、電子輸送層、裏面電極という構造をとる。正孔輸送層に PEDOT:PSS, V_2O_5 , MoO_3 、電子輸送層として LiF や n 型半導体の TiO_2 などを用いる。また裏面電極として仕事関数の低い Al や Ca を用いる。

それに対し、逆型は正孔輸送層と電子輸送層の配置が逆であり、裏面電極に非腐食性金属である Ag や Au を用いている。そのため逆型は電極の腐食を抑えられるため、劣化性に強い。¹ また空気の侵入も抑えられ活性層の劣化も防ぐことができるという報告もある。² 本研究では逆型構造に注目した。

7-3 有機半導体活性層

有機薄膜太陽電池の発電に直接的に寄与する層が有機半導体活性層である。ここでは無機半導体、有機半導体について説明する

7.3.1 半導体

固体は、原子やイオンが規則正しくならんだ結晶であることがほとんどであり、結晶のなかではそれぞれの原子の中にあつた電子の一部はもとの原子の近くだけでなく結晶全体に広がって存在する。原子や分子の電子エネルギーの準位は本来とびとびの値をとるが、これを結晶状態にすると、Figure. 0-2のように1つの原子の電子エネルギーの準位が別の原子によって影響を受けてエネルギーの幅をもったバンドを形成する。

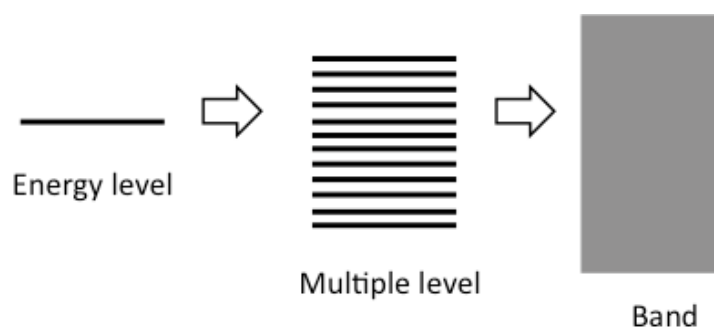


Figure. 0-2 Formation of band

また、バンドとバンドの間には電子がそのエネルギーをもつことができない領域であるバンドギャップが存在する。このバンドの中で最大のエネルギーをもつ電子の入っているものを価電子帯、価電子帯よりも1つ準位の高い電子が空のバンドを伝導帯と呼ぶ。金属などでは、価電子帯中に電子が一部のみ存在するため、電子はこのバンド中を自由に動くことができる。すなわち導体となる。一方価電子帯に最大数の電子が詰まっている場合、電子は移動することができない。そのためほとんど電気伝導性がない。このような物質を絶縁体とよぶ。しかし、絶縁体のなかでも伝導帯とのバンドギャップが非常に狭い場合は熱エネルギーにより価電子帯中の電子が伝導帯へと励起され電流がある程度流れる。このような固体が半導体である (Figure. 0-3)。

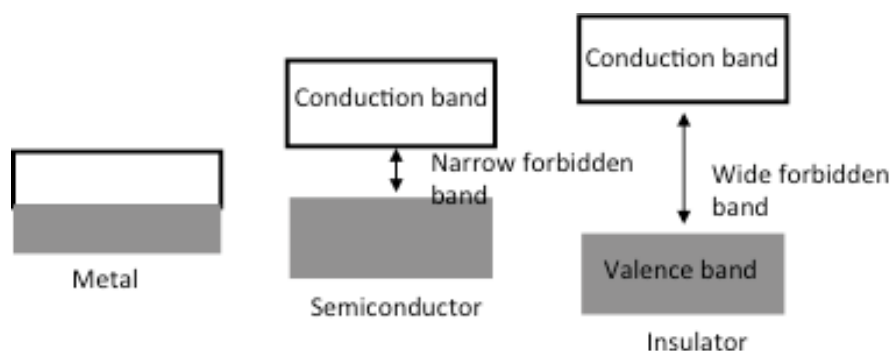


Figure. 0-3 Energy level of metal, semiconductor, and insulator

半導体の励起は熱エネルギーに限らず、光や電気などバンドギャップに相当するエネルギーをもつものなら可能である。

7.3.2 有機半導体と活性層³

有機半導体は無機のバンド構造と考え方が少し異なる。有機半導体中で伝導する電子は共役 π 電子である。この共役 π 電子はC原子の単結合、二重結合が交互に存在する分子中に存在する。二重結合を持つC原子は sp^2 混成軌道を取り、それら同士による強い σ 結合と残りの p_z 軌道同士が π 結合という結合によって二重結合を形成している。 π 結合は電子雲が分子面の上下でかぶっているため、弱い相互作用を示す。このため分子が重なり合うことによりある特定のC原子の π 電子が分子全体に渡り移動可能となる。また分子が重なり合うことで結合性軌道同士、反結合性軌道同士がバンドのようなものを形成する。一番内側の π 結合性軌道をLUMO(最低空準位, Lowest unoccupied molecular orbital)、 π 反結合性軌道をHOMO(最高被占準位, Highest occupied molecular orbital)と呼ぶ。無機半導体では伝導帯と価電子帯の準位差がバンドギャップであったが、有機半導体でのバンドギャップはHOMOとLUMOの差がバンドギャップに相当する。

(a)

(b)

Figure. 0-4 (a): σ bond and π bond of C_2H_4 , (b): Formation of band of organic molecules

無機分子は結合が規則正しく無限に広がっている。しかし有機半導体分子は多くの場合ファンデルワールス力で弱く凝集して、分子性固体を形成しているため、分子ごとに結合が切れている。そのため分子同士の間にはエネルギー障壁がある。価電子準位の波動関数は固体中で広がってはならず、個々の分子中に局在化しているため、キャリア移動度が小さいのである。

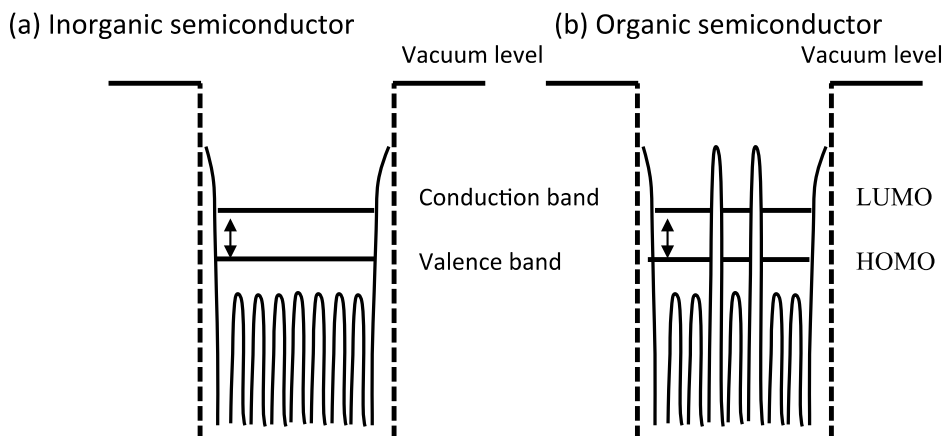


Figure. 7-5 Energy level of (a):inorganic, (b):organic molecules

このように有機半導体は結晶構造が不規則であるため、有機半導体中の電子の伝導は外部電界を駆動力として電子が準位間をホッピング移動することにより起こると考えられている。局在化された準位間を格子振動によるエネルギーを受け取った電子がホッピングして移動し、温度の上昇とともに移動度が増加する。

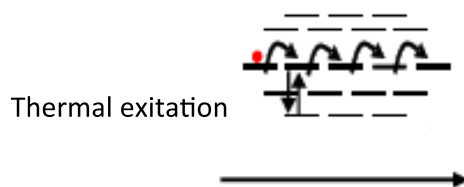


Figure. 7-6 Hopping conduction

有機薄膜太陽電池の活性層は二種類の有機半導体からなり、無機系太陽電池と同様に、正孔をキャリアとして伝導する p 型半導体と、電子をキャリアとして伝導する n 型半導体とで構成されている。有機薄膜太陽電池で用いられる代表的な材料を示す。

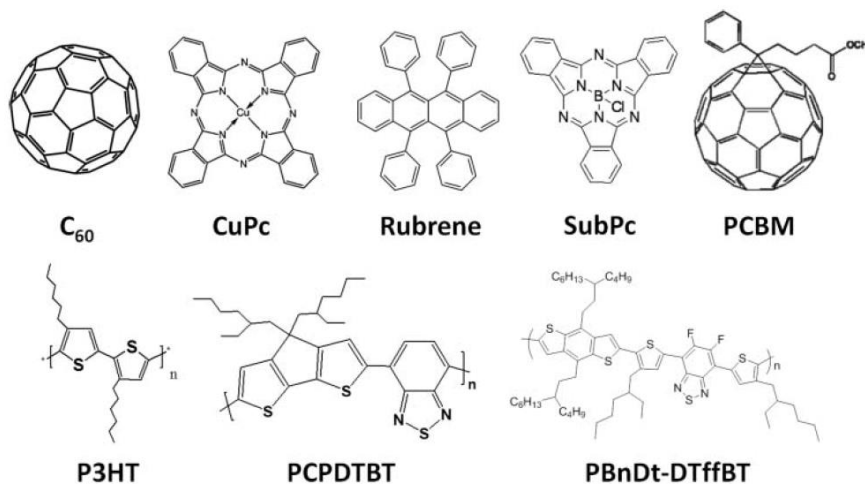


Figure. 7-7 Organic semiconductor

ドナー層とアクセプター層の接合を大まかに分類すると、ドナー層とアクセプター層で組み合わせるヘテロ接合型と、ドナーとアクセプターを一層に混ぜ合わせるバルクヘテロ接合型がある。ヘテロ接合型は Figure. 7-8 のように p 型半導体として働く導電性ポリマーと n 型半導体との半導体界面が 2 次元的である。このため大きな pn 界面を得られないため、電荷分離界面が大きくなりにくい。しかし、p 型、n 型ともに電極への直接的な経路を持っているため、電荷輸送効率は高いといえる。アクセプター層としては電子移動度が高く、内部抵抗の少ない材料が用いられる。

バルクヘテロ接合型は有機ポリマー層に p 型ポリマーと n 型アクセプターを混合させ、3 次元的な界面を作る。すると活性層(混合層)内では、ヘテロ接合型に比べ、ドナー/アクセプター界面への距離が短いため、大きな pn 接合界面が得られ、電荷分離の効率向上につながる。しかし、電極への直接的な経路を持たないことから、電荷輸送経路が複雑となり、ドナー分子、アクセプター分子がそれぞれ電子、正孔のトラップサイトとなるので、ヘテロ接合型に比べると電荷輸送効率は低下する。そのため、バルクヘテロ接合におけるマイクロ相分離条件の制御は必要である。

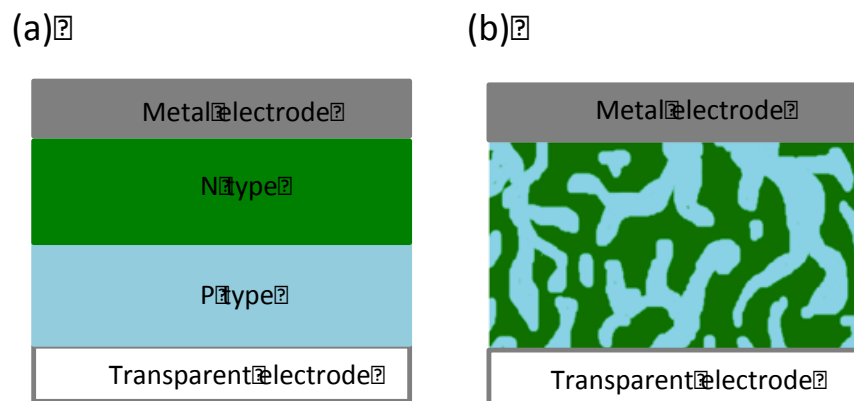


Figure. 7-8(a): Hetero junction, (b): Bulk hetero junction

7.4 太陽電池特性

pn 接合型太陽電池の等価回路を Figure. 0-9 に示す。各部分の界面の抵抗を直流抵抗 R_s 、電子の再結合の漏れ電流を決定する並列抵抗を R_{sh} と仮定する。

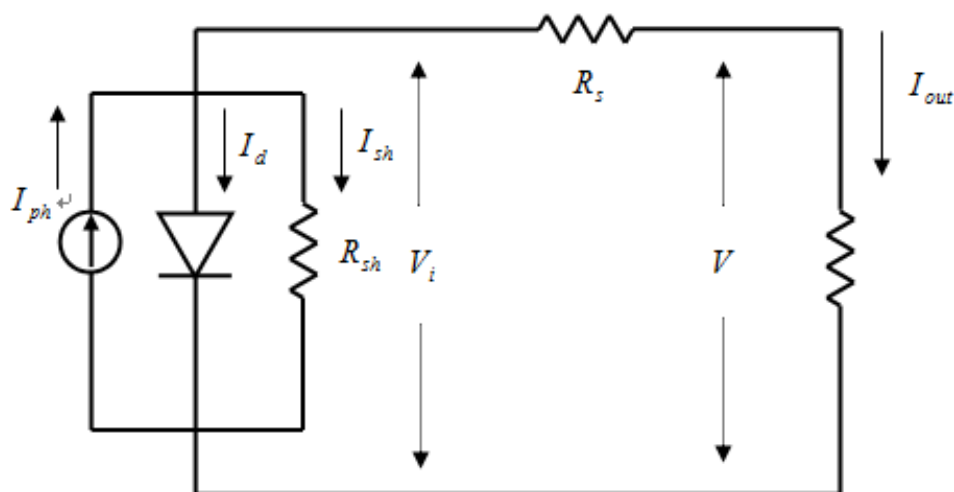


Figure. 0-9 Equivalent circuit of solar cell.

このモデルは定電流源を I_{ph} 、ダイオードの理想因子を n 、素子の直列抵抗を R_a 、再結合などによる漏れ電流を決定する抵抗成分を R_{sh} とする。

まず外部回路を流れる電流 I_{out} は

$$I_{out} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \dots (1)$$

(I_{ph} :光発生電流、 I_d :ダイオードの順方向電流、 I_{sh} :漏れ電流)

また I_d はダイオードのかかる電圧 V_i を用いて

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_i}{nkT}\right) - 1 \right] \quad \dots (2)$$

(I_0 : 逆方向の飽和電流、 q : 素電荷、 k : ボルツマン定数、 T : 絶対温度)と表せる。

漏れ電流 I_{sh} は以下のように表せる。

$$I_{sh} = \frac{V_i}{R_{sh}} \quad \dots (3)$$

と書ける。また、ダイオードにかかる電圧 V_i は外部回路にかかる電圧と直列の抵抗成分にかかる負荷電圧の和で表されるので(4)式のように表せられる。

$$V_i = V + I_{out} \cdot R_s \quad \dots (4)$$

以上、(1)式に(2)、(3)式を代入し V_i を(4)式によって消去すると、(5)式のようになる。

$I_{out} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{nkT}(V + I_{out} \cdot R_s)\right) - 1 \right] - \frac{V + I_{out} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad \dots (5)$ (5)式が太陽電池の I-V 特性曲線を表す式となり、I-V はエラー! 参照元が見つかりません。のような挙動をとる。

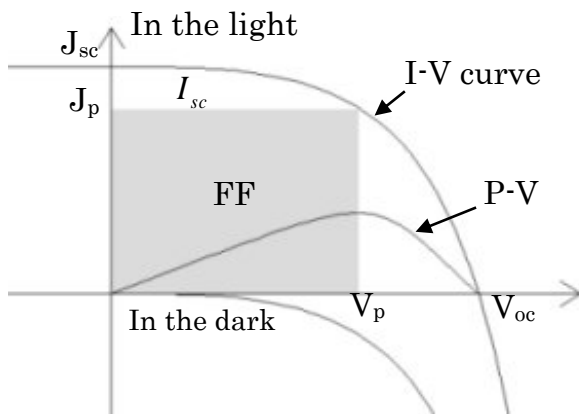


Figure. 7-10 J-V characteristics

Figure. 7-10 において I_{sc} は短絡電流(Short Circuit Photo-current)、 V_{oc} は開放電圧 (Open Circuit Voltage)、 I_{max} は最大出力点電流、 V_{max} は最大出力点電圧をそれぞれ表している。

もしも色素増感太陽電池が理想的な状態、漏れ電流がなし即ち漏れ電流抵抗 $R_{sh} = \infty$ 、各界面での抵抗 $R_s = 0$ と仮定すると(5)式は

$$I_{out} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{nkT}V\right) - 1 \right] \quad \dots (6)$$

となり、 $V = 0$ の時短絡電流は、

$$I_{sc} = I_{ph} \quad \dots (7)$$

$I_{out} = 0$ の時開放電圧は、

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad \dots (8)$$

となる。

太陽電池の光電変換効率の測定は、擬似太陽光 AM1.5、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ の基準光を使用して行われる。ここで AM(Air Mass)は太陽光が通過した大気量を表す単位であり、標高ゼロ地点、標準気圧時に太陽光が入射したときを基準の1としている。基準光のスペクトル分布を Figure 3.8.に示す。この基準光で測定したとき、有効受光面積を S 、入射光のエネルギー密度を P_m とすると太陽電池の光電変換効率 η は次式で表される。

$$\begin{aligned} \eta(\%) &= \frac{I_p \cdot V_p}{P_{in} \cdot S} \times 100 \\ &= \frac{J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{100 \left(\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2} \right)} \times 100 \\ &= J_{sc} \left(\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \right) \cdot V_{oc}(\text{V}) \cdot FF \quad \dots (9) \end{aligned}$$

ただし、

$$FF = \frac{I_p \cdot V_p}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad \dots (10)$$

であり、FF(fill factor)は曲線因子と呼ばれ、太陽電池の性能を表す指標の1つとされている。

7.5 最近の研究動向⁴

7.5.1 低バンドギャップポリマーへの取り組み

P3HTはHOMO-LUMO準位間のエネルギー差(バンドギャップ E_g)が 1.9eV あり、 650nm 以下の波長しか吸収することができない。光電変換に利用可能な光子数を増やし、短絡電流を向上させるためにも、 E_g が小さく太陽光スペクトルとの整合性が高いローバンドギャップポリマーの開発が近年盛んである。有機薄膜太陽電池の開放電圧はドナーのHOMO準位とアクセプターのLUMO準位の差に比例すると考えられており、短絡電流と開放電圧が共に高い有機薄膜太陽電池を得るためには、HOMO準位とLUMO準位をチューニングする必要がある。

ローバンドギャップ化のために電子豊富な芳香族ユニット(D)と電子欠乏性の芳香族ユニット(A)を交互に共重合して得られるD-A型ポリマーが多数開発されている。⁵⁶⁷また、ホール輸送能を高めるために強固な π - π スタッキングが期待できる平面性の高いユニットをポリマー主鎖骨格に組み込むことで分子鎖を高密度にパッキングするアプローチもある。平面性の高いDユニットとして五つの芳香環を縮環したインダセノジチオフエン indacenodithiophene (IDT)を用いたバンドギャップポリマーが数件報告されている。⁸⁹

7.5.2 光吸収領域の長波長化への取り組み

長波長領域の光吸収を示す有機材料の開発も盛んに行われている。植物が光合成の際に利用しているポルフィリン、そのメソ位炭素を窒素に置き換えたフタロシアニンは有名な長波長吸収低分子である。ここから派生したポルフィリノイド構造をとるサブフタロシアニン、サブナフタロシアニン、ボロンジピロメタンなどの低分子材料の研究例が報告されている。¹⁰

他にもカルコゲナジアゾール類、スクアリン系化合物、フェニレンビニレン及びアゾ化合物など多くの長波長吸収材料が研究されている。^{11,12}

7.5.3 界面構造に関する取り組み

有機薄膜中における励起子拡散長は多くの場合、10nm 前後と非常に短い。このため効率よく p/n 界面に励起子を到達させるための界面構造の取り組みがなされている。今日、励起子失活の抑制、アクセプター層への励起子閉じ込め効果を得るために、Bathocuprione (BCP)などの励起子ブロッキング層をアクセプター陰極界面に用いる研究がなされている。¹³陽極には PEDOT:PSS などのバッファ層を用い、リーク電流の低減による開放電圧の向上¹⁴、積層させたドナー層のモフォロジー構造制御¹⁵やバッファ層からのエネルギー移動による増感作用¹⁶など様々な取り組みがなされている。

7.5.4 半透明太陽電池の開発

有機薄膜太陽電池は軽量、フレキシブル、低コストであると同時に、薄膜を利用しデバイス透過性を高めることが可能である。それによって窓へ応用したり、タンデム太陽電池を作製することができる。アプローチ方法は主に二つある。一つ目はデバイスの透過率を下げる金属電極の透過率を向上させる方法で、二つ目は有機半導体の吸収領域を変化させる方法である。一つ目に関しては、金属電極の薄膜化を利用しているもの¹⁷、金属薄膜と金属酸化物の複合膜を利用しているもの¹⁸、銀ナノワイヤを利用しているもの¹⁹などが挙げられる。二つ目に関しては活性層として UV、NIR に吸収領域のあるポルフィリン系の低分子材料を用いている研究が報告されている。^{20,21}

7.6 ウェットプロセスでの有機薄膜太陽電池

7.6.1 ウェットプロセスの重要性

有機薄膜太陽電池は他の太陽電池と比べて低コストに作製できるという利点がある。それは有機薄膜太陽電池では電子輸送層、活性層を溶液プロセスにより塗って作るということが可能であるためである。しかしながら、金属電極作製には真空蒸着やスパッタなどの真空プロセスを用いることが主流である。そのため製膜コストは依然として高いことが現状である。低コストという有機薄膜太陽電池の特性をさらに伸ばすために、ウェットプロセスで作製するという取り組みが近年なされてきた。

7.6.2 ウェットプロセス有機薄膜太陽電池の研究動向

有機薄膜太陽電池作製方法としてウェットプロセスを用いている研究は近年増えている。多くは roll to roll 法での作製を目指し、真空蒸着を用いる金属電極を用いず、導電性高分子を塗布することで電極を作製する。しかし導電性高分子を活性層へ塗布する場合、工夫が必要である。それは電極を製膜する表面である有機半導体活性層表面が疎水性を示し、水溶性の導電性高分子を

製膜することができないためである。この課題を解決するために、様々な研究がなされている。

一つは活性層表面を改質する研究である。活性層表面に酸素プラズマ処理を施して活性層を親水化し、導電性高分子をスピコートして製膜したり²²、プラズマ処理時間を調整してグラビア印刷により製膜した²³という報告がなされている。この方法はプラズマ処理時間が長ければ活性層の劣化につながるという問題がある。また PAH-D という絶縁性のポリマー膜を活性層表面に製膜し、活性層表面を親水化させたという報告もある。²⁴これは絶縁性の膜をデバイスの中に組み込むため、性能向上には限界があると考えられる。これらの活性層表面改質は性能とトレードオフであると考えられることができる。

このような性能とトレードオフとなってしまう表面改質を用いずに導電性高分子を製膜している研究もいくつか報告がある。一つはスプレー法により活性層表面に導電性高分子を製膜する方法である。²⁵²⁶²⁷またゴムのように柔軟な Dimethylpolysiloxane(PDMS)を用いてスタンプ塗布により製膜しているものも報告されている。²⁸また導電率を改質し、導電率は低い活性層との相性の良い PEDOT:PSS をまず活性層にスピコートし、その上に従来の導電率の高い PEDOT:PSS を製膜するといった手法も研究されている。²⁹³⁰さらに、水溶性である導電性高分子ではなく、Ag ナノワイヤや Graphene など新規金属材料を開発し、活性層表面に塗布している研究も近年報告されている。³¹³²

7.6.3 ウェットプロセス太陽電池における課題

このようなウェットプロセスによる有機薄膜太陽電池には大きな問題が存在する。それは性能と耐劣化性である。導電性高分子は金属に比べて導電率が低く、金属を蒸着したデバイスよりも高い性能を示すことが困難である。また、耐久性に関しては Seemann らによると、金属電極の代わりに導電性高分子をウェットプロセスにより製膜したデバイスは、二時間大気暴露することで性能が 60% 以上低下するという報告がある。³³その理由としては、導電性高分子が吸湿性を示すため、活性層に水分が侵入すること、また導電性高分子が酸性であるためカソードの劣化を促進する、などといったことが考えられる。これらの問題を解決することがこれからの課題となるだろう。

参考文献

- ¹ Bettignies, R.; Leroy, J.; Firon, M.; Sentein, C.; *Synthetic Metals*, **2006**. 156. 510-513
- ² Norrman, K.; Madsen, M. V.; Gevorgyan, S. A.; Krebs, F. C.; *J. Am. Chem. Soc.* **2010**. 132. 16883-16892
- ³ Myers, J.; Xue, J.; *Polymer Reviews*, **2012**. 52. 1-37
- ⁴ 松尾豊, 有機薄膜太陽電池の研究最前線, シーエムシー出版 (2012)
- ⁵ Blouin, N.; Michaud, A.; Leclerc, M.; *Adv. Mater.* **2005**. 19. 2295
- ⁶ Park, S. H.; Roy, A.; Beaupre, S.; Cho, S.; Coates, N.; Moon, J. S.; Moses, D.; Leclerc, M.; Lee, K.; Heeger, A. J.; *Nat. Photonics*, **2009**. 3. 297
- ⁷ He, A.; Huang, X.; Wong, W. Y.; Wu, H.; Chen, L.; Su, S.; Cao, Y.; *Adv. Mater.* **2011**. 23. 4636.
- ⁸ Chen, Y. C.; Yu, C. Y.; Fan, Y. L.; Hung, L. I.; Chen, C. P.; Ting, C.; *Chem. Commun.* **2010**. 46. 6503.
- ⁹ Zhang, Y.; Zou, J.; Yip, H. L.; Chen, K. S.; Zeigler, D. F.; Sun, Y.; Jen, A. K. Y.; *Chem. Mater.* **2011**. 23. 2289.

-
- ¹⁰ Verreet, B.; Schols, S.; Cheyns, D.; Rand, B. P.; Gommans, H.; Aernouts, T.; Haremans, P.; Genoe, J.; *J. Mater. Chem.*, **2009**, 19, 5295.
- ¹¹ Mikroyannidis, J. A.; Tsagkournous, D. V.; Sharma, S. S.; Vijay, Y. K.; Sharma, G. D.; *J. Mater. Chem.* **2011**, 21, 4679.
- ¹² Alem, S.; Bettignies, R.; Nunzi, J. M.; Cariou, M.; *Appl. Phys. Lett.* **2004**, 84, 2178.
- ¹³ Peumans, P.; Yakimov, A.; Forrest, S. R.; *J. Appl. Phys.* **2001**, 93, 3693.
- ¹⁴ Li, N.; Latssiter, B. E.; Lunt, R. R.; Wei, G.; Forrest, R.; *Appl. Phys. Lett.* **2009**, 94, 023307.
- ¹⁵ Yu, B.; Huang, L.; Wang, H.; Yan, D.; *Adv. Mater.* **2010**, 22, 1017.
- ¹⁶ Ichikawa, M.; Suto, E.; Jeon, H. G.; Taniguchi, Y.; *Org. Electron.* **2010**, 11, 700.
- ¹⁷ Chen, K. S.; Salinas, J. F.; Yip, H. L.; Huo, L.; Hou, J.; Jen, A. K. Y.; *Energy Environ. Sci.* **2012**, 5, 9551-9557.
- ¹⁸ Winkler, T.; Schmidt, H.; Flügge, H.; Nikolayzik, F.; Baumann, I.; Schmale, S.; Weimann, T.; Hinze, P.; Johannes, H. H.; Rabe, T.; Hamwi, S. Riedl, T.; Kowalsky, W.; *Org. Electron*, **2011**, 12, 1612-1618.
- ¹⁹ Chen, C. C.; Dou, L.; Chung, C. H.; Song, T. B.; Zheng, Y. B.; Hawks, S.; Li, G.; Weiss, P. S.; Yang, Y; *ACS Nano*. **2012**, 6, 7185-7190.
- ²⁰ Koppe, R.; Hoeglinger, D.; Troshin, P. A.; Lyubovskaya, R. N.; Razumov, V. F.; Sariciftci, N. S.; *ChemSusChem*, **2009**, 2, 309-313.
- ²¹ Lunt, R. R.; Bulovic, V.; *Appl. Phys. Lett.*, **2011**, 98, 113305_1-3.
- ²² Baiel, D. Fabel, B.; Gabos, P.; Pancheri, L.; Lugli, P.; Scarpa, G.; *Org. Electron*, **2010**, 11, 1199-1206.
- ²³ Voigt, M. M.; Mackenzie, R. C. I.; Yau, C. P.; Atienzar, P.; Dane, J.; Keivanidis, P. E.; Bradley, D. D. C.; Nelson, J.; *Sol. Energy. Mater. & Sol. Cel.* **2011**, 95, 731-734.
- ²⁴ Dong, Q.; Zhou, Y.; Pei, J.; Liu, Z.; Li, Y.; Yao, S.; Zhang, J.; Tian, W.; *Org. Electron*. **2010**, 11, 1327-1331.
- ²⁵ Lim, Y. F.; Lee, S.; Herman, D. J.; Lloyd, M. T.; Anthony, J. E.; Malliaras, G. G; *Appl. Phys. Lett.* **2008**, 93, 193301_1-3.
- ²⁶ Peh, R. J.; Lu, Y.; Zhao, F.; Lee, C. L. K. Kwan, W. L; *Sol. Energy. Mater. & Sol. Cel.* **2011**, 95, 3579-3584.
- ²⁷ Kang, J. W.; Kang, Y. J.; Jung, S. You, D. S.; Song, M.; Kim, C. S.; Kim, D. G.; Kim, J. K., Kim, S. H.; *Org. Electron*. **2012**, 13, 2940
- ²⁸ Chen, F. C.; Chuang, M. K.; Chien, S. C.; Fang, J. H.; Chu, C. W.; *J. Mater. Chem.* **2011**, 21, 11378-11382.
- ²⁹ Zhou, Y. Li, F.; Barrau, S.; Tian, W.; Inganäs, O.; Zhang, F.; *Sol. Energy. Mater. & Sol. Cel.* **2009**, 93, 497-500.
- ³⁰ Zhou, Y.; Cheun, H.; Choi, S.; Potscavage, J.; *Appl. Phys. Lett.* **2010**, 97, 153304_1-3.
- ³¹ Gaynor, W.; Lee, J. Y.; Peumans, P.; *ACS Nano*. **2010**, 4, 30-34.
- ³² Chen, C. C.; Dou, L.; Chung, C. H.; Song, T. B.; Zheng, Y. B.; Hawks, S.; Li, G.; Weiss, P. S.; Yang, Y; *ACS Nano*. **2012**, 6, 7185-7190.
- ³³ Seemann, A.; Egelhaaf, H. J.; Brabec, C. J.; Hauch, B. A.; *Org. Electron*. **2009**, 10, 1424-1428.