

ITO に替わるナノエレクトロニクス材料（抄訳）

Technology Analyst : Robert Thomas, SRI Consulting Business Intelligence

インジウム・スズ酸化物 (ITO) は有力な透明導電材料で、フラットパネルディスプレイや一部の太陽電池(テルル化カドミウムや有機太陽電池など)有機発光ダイオード(OLED)の陽極用材料として多用されているが、昨今、これを代替するナノエレクトロニクス材料の探索が活発になっている。産業統計によると、採鉱されるインジウム(実際には、鉛や亜鉛採鉱の副産物)の45%はITOの生産に向けられており、ITOの最も一般的な処理方法は真空スパッタリングによるものである。

ITOを置き換えようとする三つの大きな要因がある。まずは材料コスト:他の希少鉱物同様、インジウムの価格は大幅に変動することがあり、02年以降、およそ\$100/kgから\$900/kg近くまで上昇している。二つ目は材料の処理可能性:フラットパネルディスプレイに使用されるITOの素材コストはわずか\$1程度であるが、真空スパッタリングのコストが高い。スピコーティングや他の溶体処理ができれば安くなるだろう。三つ目はスパッターITOの脆さ:材料やプロセスに柔軟性のあることが、ロール・ツー・ロール処理やフレキシブルディスプレイには欠かせない。

スパッターITOを代替しようとする多くの材料があるが、低シート抵抗と高透明性を併せ持つITOの品質に並ぶものは、現状、見当たらない。しかしながら、導電性ポリマーの中には、OLEDの正孔注入層として一定の評価が得られているものもあり、ITOのマーケットシェアを徐々に侵食していくのではないかとと思われる。

ITO-Free OLEDs

典型的なOLEDの構造は、金属の陰極層とガラス上に形成されたITOの陽極層とで挟まれた発光ポリマーを使っている。OLEDの性能特性の中でもターンオン電圧、低電圧での最高輝度および効率、正孔の移送を促進する正孔注入層を加えることによって格段に向上した。代表的な正孔注入層は、PEDOT:PSS〔poly(3,4-ethylenedioxythiophene)poly(styrenesulfonate)〕、またはPEDOT単体であり、PEDOTはBayerグループのH.C.Starck(独)が商品化している。即ち、OLEDの代表的なデザインでは、ITOを陽極に、そして、発光ポリマーへの正孔の注入を促進させるためにPEDOT層を使っている。導電性ポリマー業界は、今を、有機ポリマーがITO陽極層を代替していく絶好の機会とみており、この分野の研究を重視している。

EUがスポンサーであるOLLAプロジェクトは、一般的な照明用途へのOLEDの適用性を実証しようとするもので、長寿命かつ高エネルギー効率を有する高輝度の白色OLED照明タイルを08年までに実現することを目標にしている。06年4月、OLLAは、輝度1000cd/m²、効率が10lm/W以上で数千時間の稼働に耐える白色光OLEDを開発した。しかし、この効率は一般的な照明用途に比べるとまだ低く(蛍光灯の効率は10倍)、一般的なバックライト用途の少し上を行く程度のレベルでしかない。

同様に重要なOLLAの開発品として、輝度1000cd/m²で効率が18.7lm/WのITO層がない緑色OLED(サイズ:1cm²)があげられる。これには、H.C.StarckがPEDOT:PSSを改質したPH500を、ITO層と在来の正孔注入層との代替として使用した。PH500を使用すると、OLEDのアクティブ層と光学特性面での相性が良くなり、OLEDの効率はITOを使った場合よりさらに高くなると研究者は指摘している。

多くの材料が透明電極用途を求めて競っている:導電性ポリマーは、ITOだけでなくCNT(carbon nanotube)などを使った無機ナノ粒子素材とも競合することになる。Regroupement Quebecois sur les Matériaux de Pointe(カナダ)は最近の発表で、ITOが単層CNTに置き換えられることを示唆している。パルスレーザー蒸着法で生成した単層

CNTを使った OLED の特性を、ITO を同様に生成したガラス基板を使った OLED と比較したところ、CNT ベースの OLED の輝度効率 $は 1.4\text{cdA}$ で、ITO ベースの OLED の 1.9cdA の 70% に相当した。この結果からみて、相対的に高価な素材とプロセスよりなるスパッターITO を、レーザー蒸着による単層 CNT に置き換える方が望ましいと考えられる。溶体処理による CNT フィルムはより好ましいが、光学的・電気的特性がそれほど良くなると思えない。しかしながら、同グループは、ITO 代替フィルムの特性最適化に力を注いでおり、その動向から目を離せない。

ITO-Free Solar Cells

ITO 層を使った他のデバイスとして、アモルファスシリコン、テルル化カドミウム、銅・インジウム・ガリウム・セレン (CIGS) などの薄膜太陽電池があげられる。これらの用途では、金属格子コンタクトと組み合わせて ITO 層を前面に配置し、光が通過して励起電流が流れるようにしている。これらのタイプの太陽電池、特に、安価な有機またはフレキシブル太陽電池にとって、スクリーン印刷ができる前面透明電極を使うことが価格優位性を確保することになる。

Eikos Inc. (米) は、透明導電電極用 ITO を代替する CNT 分散体の主な開発者の一つである。同社が開発した素材 Invisicon は、米国陸軍だけでなく、新しいタッチスクリーンを開発するために多くの企業で使われている。

最近、Eikos は、ITO の代わりに自社の CNT 分散体を使って新しい太陽電池を開発するために、National Renewable Energy Laboratory (米) と提携した。同チームは、スパッター酸化亜鉛透明電極の代わりに CNT を使って CIGS 太陽電池を作製した。その効率は、酸化亜鉛の最高値 19.5% に対して 13% であった。同チームは、また、ITO 層の代わりに PEDOT 層と Eikos の CNT 分散体を採用した有機太陽電池を作製した。スパッターITO 層を持つ一般的な有機太陽電池の効率は 3~4% (現状の最高値は 5%) であるが、CNT 透明電極層を持つ同チームの有機太陽電池の効率は 2.6% であった。PEDOT 層を省くと、効率は 1.5% まで低下した。即ち、太陽電池/OLED とともに、PEDOT 層が他の活性有機層と隣り合わせることで、電気輸送層としての重要な役割を果たしていることを再確認した。

有機/CNT 太陽電池の開発からは目が離せず、今後、プロセス層の削減を図り、低コストの溶体プロセスを導入していくことになるだろう。スパッターITO 層を置き換える方向性に理解はできるが、OLED や太陽電池における PEDOT の役割は、単に透明導電体としてではなく、正孔の移動に影響をおよぼすことから、PEDOT の置き換えを単純に判断することはできない。

Summary

透明導電体の代替材料として複数の競合材料が共存する：在来のスパッターITO、導電性ポリマー、CNT の分散体や ITO ナノ粒子などである。(ITO を溶体処理すれば、インジウム自体の高コストはやむをえないが処理コストはかなり削減できる)

シート抵抗と透明性の観点から、現状では CNT 分散体が導電性ポリマーに優っているようだが、PEDOT の正孔輸送層としての性質は、OLED や有機太陽電池にとって重要なものである。従って、一定の用途において ITO との競合を考えると、PEDOT の方が CNT に優るといっても差し障りはないだろう。

実用面からみて、高効率で信頼性のあるデバイスを生産するには、材料特性に注目するより溶体処理に力点を置くほうが賢明であろう。即ち、有機電子デバイスにとって CNT と PEDOT の組み合わせによる湿式処理は、開発の価値があり目が離せない領域である。

以上