

# 大気下における化学ドーピング技術と 有機半導体デバイスの開発

SATテクノロジー・ショーケース2025

## ■ はじめに

集積回路、太陽電池、センサなど現代社会を支える半導体デバイスにはシリコンが主に用いられている。シリコン半導体では、キャリア密度制御するドーピング技術が確立されており、これは高性能デバイスに必須の技術である。近年、Internet of Things (IoT) センサネットワーク等に向けて低コスト印刷プロセスにより作製されるフレキシブルデバイスが注目されている。複数の次世代半導体がその候補材料として研究されているが、ドーピング技術がシリコンに比べて未成熟な問題がある。様々な半導体材料に対して適用可能なドーピング技術の一つとして、電子移動反応に基づく化学ドーピングが挙げられる。産業応用に向けてはプロセス環境(グローブボックス)や、ドーピングの安定性に問題があった。本研究は大気下において水溶液を用いる簡単かつ安定なドーピング技術の開発に取り組み、有機半導体材料におけるドーピング量の精密制御を実証した。こうしたドーピング技術がセンサやダイオード等の高性能化に結び付くことも示した。

## ■ 活動内容

### 1. 大気下における化学ドーピングの実証

電子移動反応を用いる化学ドーピングでは、p型では半導体から電子を奪う酸化剤、n型では電子を渡す還元剤が用いられる。こうした材料は大気安定性やドーピング後の安定性が高くない場合が多く問題となっていた。

ドーピング後の安定性を高める手法として、イオン交換ドーピング[1]を開発した。ここでは酸化剤によって半導体から電子を奪いながら、安定なアニオン分子を半導体膜へと導入する。導入するアニオンを自在に選択可能であることが特徴の一つである。従来はグローブボックス中での評価が一般的であったが、本手法により、大気下100℃における耐久性試験などを実施する段階に至っている。

ドーピングプロセス中は酸化剤等を失活する水を避けるためにグローブボックスを用いることが常識であった。一方、本研究では、水溶液pH制御を実施することによって水に由来する材料失活を抑制することに成功した。水による劣化を抑えるために水溶液中でドーピングを実施する逆転の発想である。生化学でよく知られるpHによって酸化力の変化する材料を組み合わせると、水溶液中における精密なドーピング手法が誕生した。本手法でも半導体の酸化に伴って安定なアニオン分子を導入しており、ドーピング後の高い安定性が期待できる。

### 2. ドーピング技術のデバイス応用

ドーピング技術の活用例としてpH・イオンセンサおよびダイオード開発に取り組んだ。開発したドーピング手法ではpH制御によって半導体の抵抗値が再現性良く変化しており、この原理を用いると薄膜型のpHセンサを実現可能である。本方式では銀/塩化銀といった通常は試験管形状を有する参照電極が不要となるため、小型・薄膜化に有利である。縦型ダイオードは太陽電池、発光素子、整流素子などの基本構造であり、その作製に半導体と電極界面におけるドーピング処理を用いて取り組んだ。ドーピング処理により電極から半導体へと効率的な電子注入が生じることで、1 GHzまで、mW級のDC電力を生じる有機高速整流ダイオードが実現した。これは従来の有機ダイオードより数桁優れた特性である。

## ■ 参考文献

- [1] Y. Yamashita *et al.*, *Nature* **572**, 634 (2019).
- [2] M. Ishii, Y. Yamashita *et al.*, *Nature* **622**, 285 (2023).
- [3] 有機半導体材料の製造方法、半導体デバイスの製造方法、水溶液、pH測定方法、pH測定装置、及び、センサ素子 (特開2023152759号)。

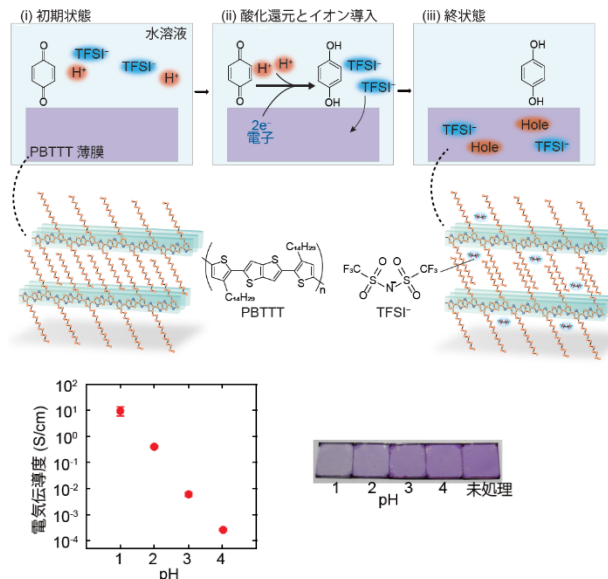


図. 大気下・水溶液中でのドーピング技術の模式図、および、ドーピング量と電気伝導率のpH依存性。

代表発表者 山下 侑(やました ゆう)  
所 属 国立研究開発法人  
物質・材料研究機構 (NIMS)  
ナノアーキテクトニクス材料研究センター  
問合せ先 〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1  
TEL: 029-860-4412  
yamashita.yu@nims.go.jp

■キーワード: (1)ドーピング  
(2)有機半導体  
(3)導電性高分子