

鵜飼育弘のテクテク見聞録

# 凸版反転印刷電極で有機CMOS回路を高速動作

応用物理学会春季学術講演会報告

鵜飼 育弘 = Ukai Display Device Institute 代表



# 1. はじめに

第65回応用物理学会春季学術講演会が早稲田大学西早稲田キャンパスで3月17日～20日に開催された。その中から筆者が興味を持った講演を報告する。第4回は、山形大学 有機エレクトロニクス研究センター（ROEL）、DICおよび宇部興産による「凸版反転印刷電極を用いた相補型有機オペアンプと発振器の開発」と題した発表について報告する（発表番号：18p-D102-6）。

# 2. 研究の背景と目的

インク化が可能な有機半導体材料を用いた有機薄膜トランジスタ（OTFT）は、大面積、低コスト化が容易である。しかし、全印刷法による相補型集積回路（CMOS集積回路）の実現に向けて様々な課題を解決する必要がある（図1）。

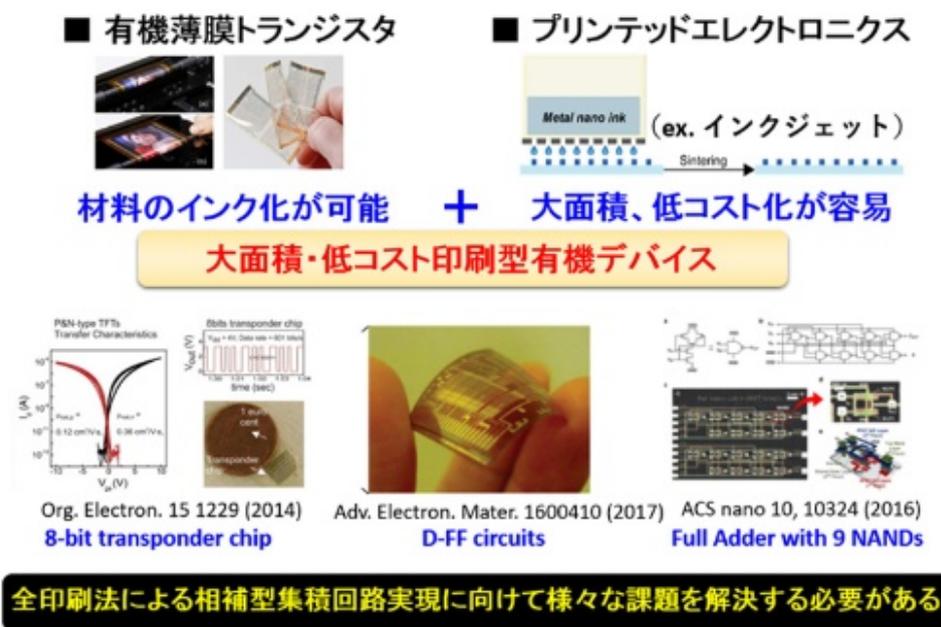


図1 研究背景

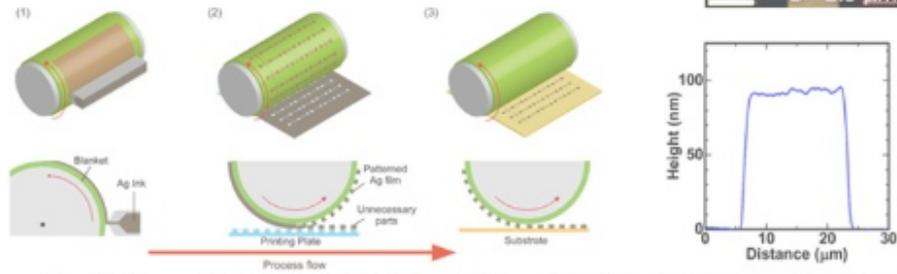
[画像のクリックで拡大表示]

オフセット印刷の一種である凸版反転印刷法は、平坦でフォトリソグラフィー法に近い微細なパターンが形成可能な印刷法として、プリンテッドエレクトロニクスへの応用が期待されている。山形大学らは、その高精細な印刷性能に着目し、高集積化が求められる電子回路への応用に焦点を合わせて、凸版反転印刷電極と塗布型有機半導体を用いた印刷型OTFTの作製と集積回路応用に関する研究を進めてきた。既に、OTFTの作製と相補型インバーター回路の作製に成功している。本研究では、リングオシレーターとオペアンプの作製と評価、およびインクジェット印刷の場合との動特性比較について報告した（図2）。

## ■インクジェット印刷と凸版反転印刷の比較

	チャンネル長	線幅
インクジェット	10 - $\mu\text{m}$	150 - 200 $\mu\text{m}$
凸版反転	0.6 - $\mu\text{m}$ ※	15- $\mu\text{m}$

※K. Fukuda et al., Adv. Electron. Mater, 2015, 1, 1500145



インクジェット印刷法と比べて、短チャンネル化、高集積化を実現可能

### 【目的】

凸版反転印刷電極を用いた相補型インバータ回路の特性改善と  
リングオシレータとオペアンプの実現

図2 目的

[画像のクリックで拡大表示]

### 3. 有機半導体の構造とデバイスの作製

図3に、実験に用いた有機半導体の構造と、デバイス（素子）の作製プロセスを示す。p型OTFTはBGBC（ボトムゲート・バックコンタクト）構造、n型OTFTはTGBC（トップゲート・バックコンタクト）構造とし、各OTFTのソース・ドレイン電極を別々の層に形成する積層構造とした。回路を構成する全ての電極は、銀（Ag）ナノ粒子インクを凸版反転印刷法によりパターニングし、膜厚100nmの銀電極を形成した。

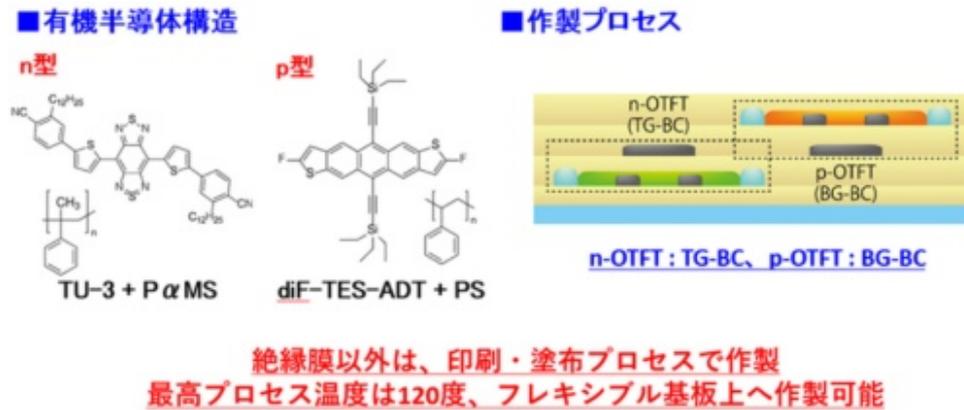


図3 デバイス作製工程  
[画像のクリックで拡大表示]

有機半導体にはdiF-TES-ADT（p型：インクジェット印刷）とTU-3（n型：ディスペンサー印刷）を用い、疎水性バンクにより塗布領域を決定した。また、電極表面処理として、p型OTFTにはPFBT（Pentafluorobenzenethiol）、n型OTFTには4-MBT（4-Methylbenzenethiol）を浸漬法により処理した（図4）。絶縁膜には気相法によりパリレン（KISCOのdiX-SR）を成膜し、他のプロセスは溶液法で行った。

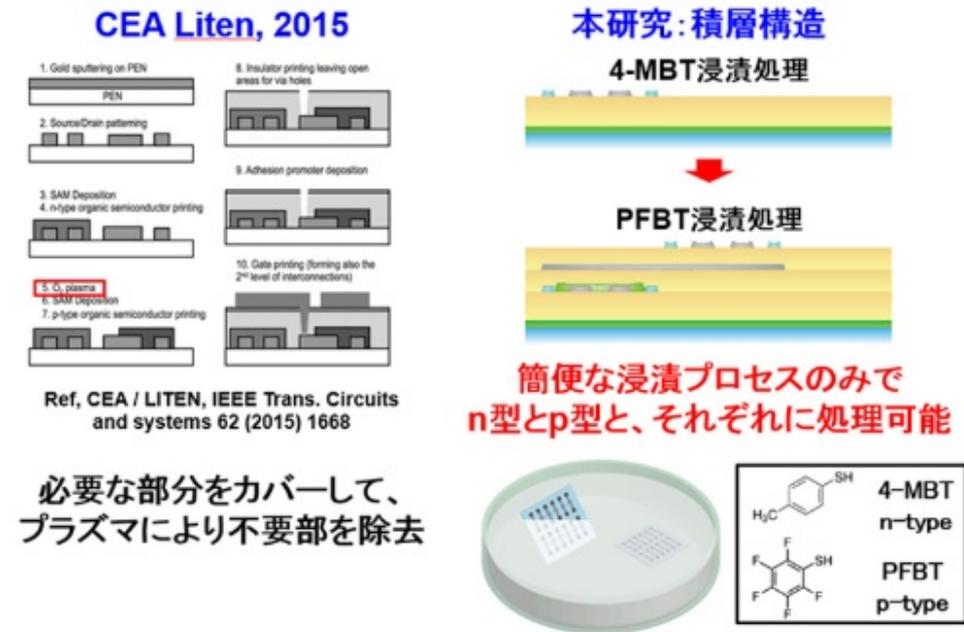


図4 相補型集積回路のSAM処理  
[画像のクリックで拡大表示]

## 4. 印刷型OTFTで発振器とオペアンプを作製、特性を評価

### 4.1 OTFTの特性を評価

図5に光学・偏光顕微鏡写真を示す。チャンネル長 $10\mu\text{m}$ 、線幅 $30\mu\text{m}$ 、オーバーラップ $10\mu\text{m}$ の印刷型OTFTを再現性良く作製することができた。同図にTFTの特性を示した。p型OTFTの移動度は $0.05\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、しきい値電圧は $1.0\text{V}$ 。n型OTFTの移動度は $0.03\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、しきい値電圧は $-0.6\text{V}$ である。

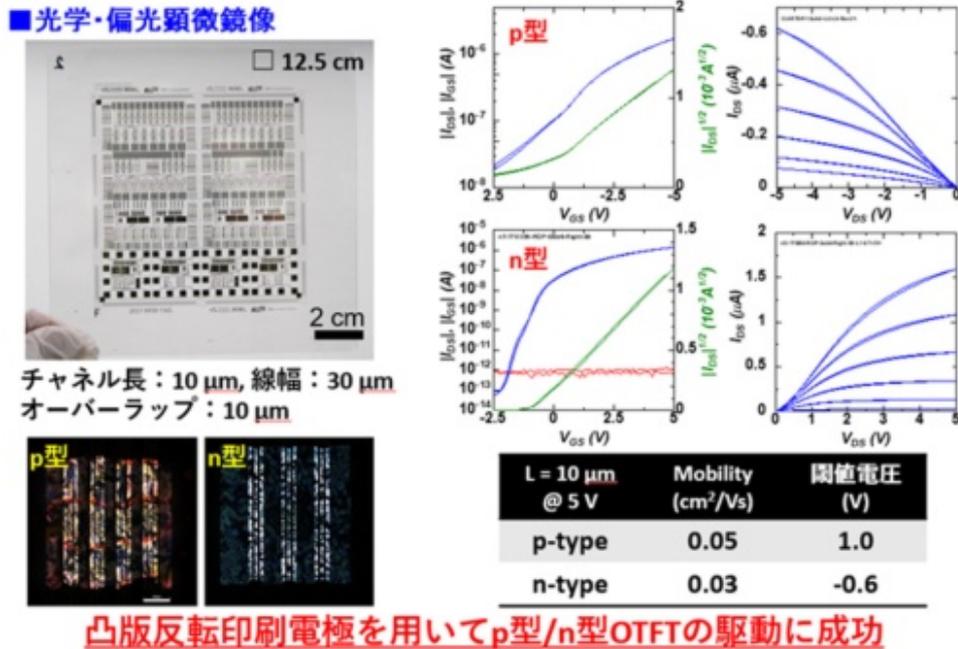


図5 印刷型OTFTの特性  
[画像のクリックで拡大表示]

## 4.2 低電圧駆動の相補型インバーターを実現

印刷型有機相補型インバーターの特性を図6に示す。入出力特性およびゲイン特性を示した。また、同図の表には、 $V_{DD}$ とノイズマージン (V) を示した。凸版反転印刷電極を用いて、低電圧駆動の相補型インバーターを実現できたことが分かる。

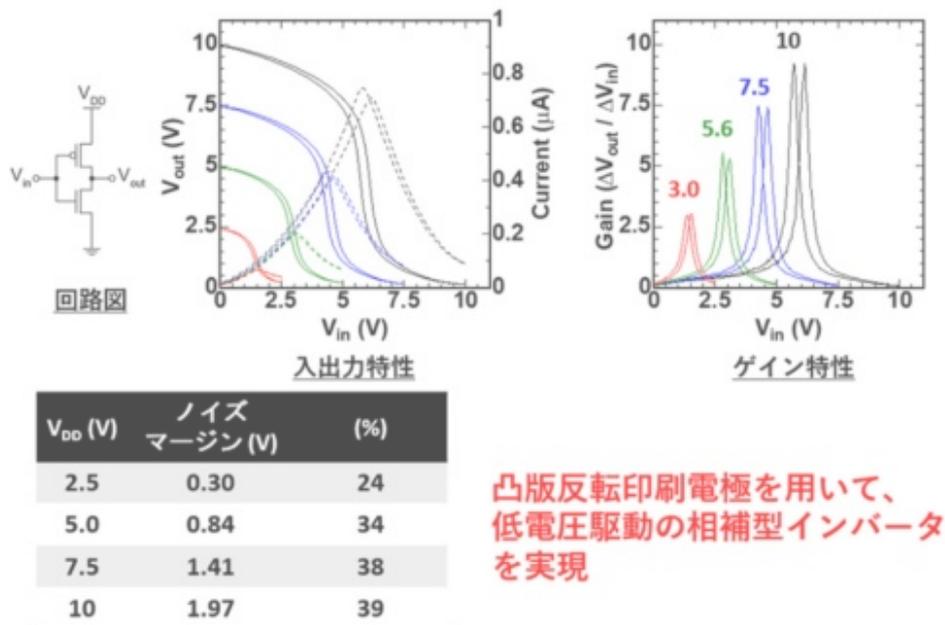


図6 印刷型OTFTによる相補型インバーターの特性

[画像のクリックで拡大表示]

### 4.3 印刷型リングオシレーターとオペアンプの特性

9段の発振器（リングオシレーター）は1.25Vの駆動電圧で発振し、発振周波数は96Hzだった（図7）。5段のリングオシレーターでは7.5Vで1kHzを超える発振周波数を得た。

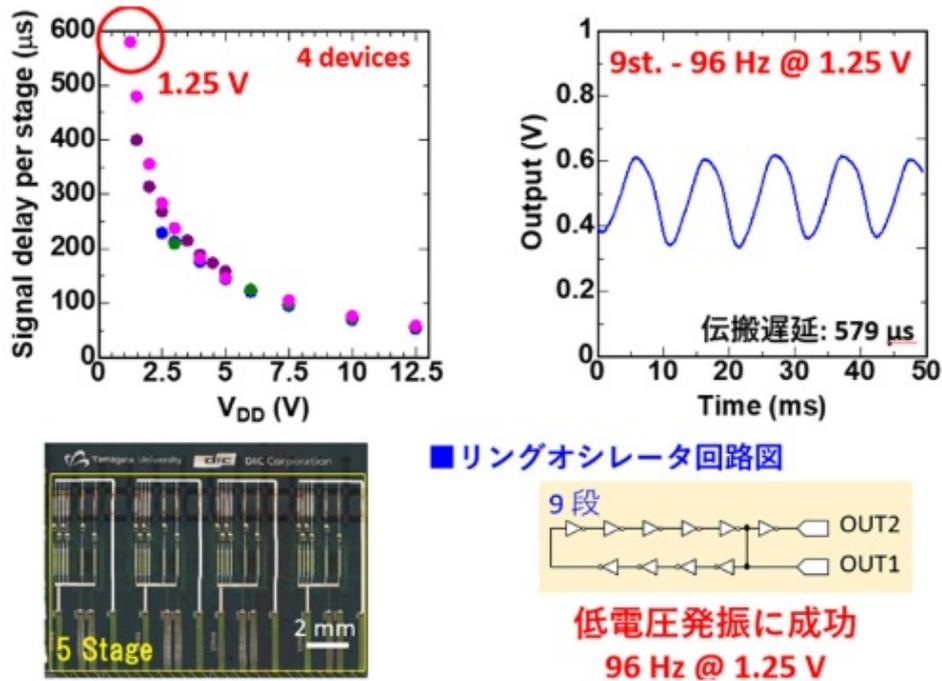


図7 印刷型OTFTによるリングオシレーターの特性  
[画像のクリックで拡大表示]

図8に過去の研究例との比較を示す。動作電圧、遅延時間ともに、過去の研究例に比べて良好な結果が得られたことが分かる。同図に、凸版反転印刷とインクジェット印刷によるチャンネル長とオーバーラップ長の比較を示した。電極の微細化とオーバーラップの低減により、動作の高速化を実現できた。

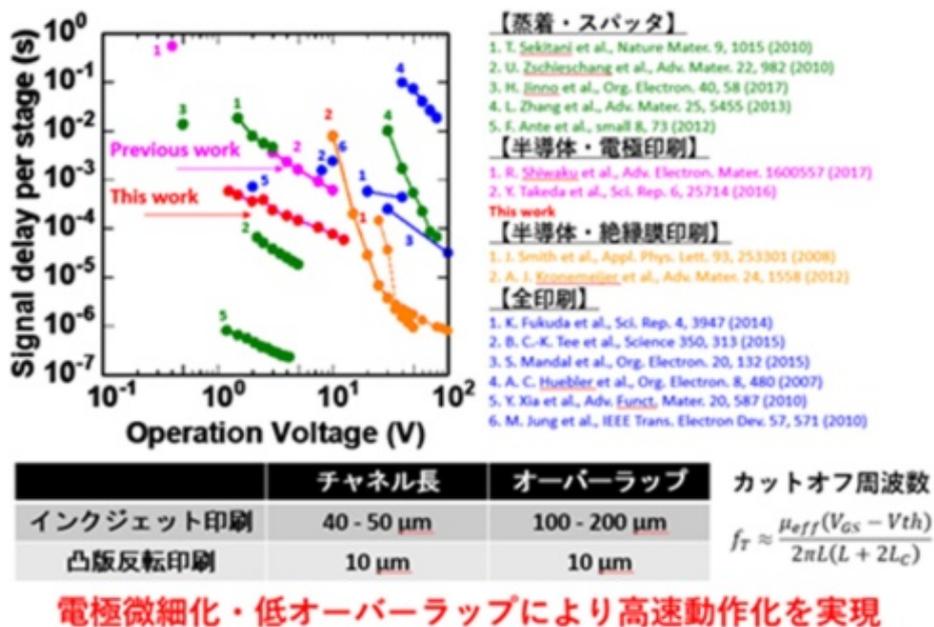
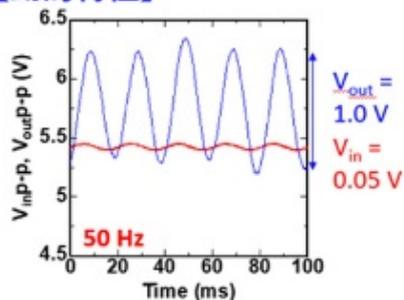


図8 過去の研究例との比較  
[画像のクリックで拡大表示]

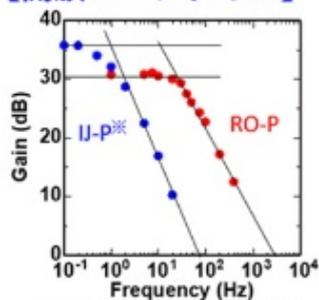
また、p型OTFTを5個、n型OTFTを3個集積したオペアンプを作製した。その結果、駆動電圧10Vにおいて開放利得30dBを得ることに成功した。その周波数特性から、約2kHzで利得が0dBとなることが予想される。この値は、インクジェット印刷電極で作製したオペアンプの開放利得と比べて40倍程度に高速化できたことを示す（図9）。

■オペアンプ：信号を増幅するためのアナログ回路  
配線・抵抗素子を加えることで様々な回路を実現

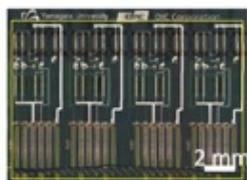
【動的特性】



【開放ループゲイン】



※松井ら、2017春応用物理学会 17p-302-8



インクジェット印刷:  $L = 40 - 50 \mu\text{m}$   
凸版反転印刷:  $L = 10 \mu\text{m}$   
インクジェット印刷と比較し  
約40倍高速化

図9 印刷型OTFTによるオペアンプの特性

[画像のクリックで拡大表示]

## 4.4 まとめ

凸版反転印刷電極を用いて相補型集積回路の作製に成功した。以下にまとめる。

### \*有機トランジスタ

チャンネル長10 $\mu$ m、p型/n型トランジスタ特性を得た

### \*相補型インバーター回路

低電圧駆動 (2.5~10V) に成功

### \*リングオシレーター

発振開始電圧 : 1.25~12.5 V

伝搬遅延時間 : 52 (12.5V) ~579 $\mu$ s (1.25V)

印刷系リングオシレーターでは高速

### \*オペアンプ

インクジェット印刷電極と作製した場合比べて、40倍の高速動作に成功

山形大学らは、今後の研究開発では以下に注力する予定である。

- トランジスタ特性の高性能化
- プロセス数の低減
- 塗布型絶縁材料の適用