



修士論文

高誘電率ゲート絶縁膜を有する有機薄膜トランジスタの
作製と評価

**Fabrication and analysis of organic thin-film transistors with
high dielectric constant gate insulators**

平成 19 年 2 月 2 日提出

指導教官 荒川泰彦 教授

東京大学大学院工学系研究科

電子工学専攻 56838

李 大一

目次

第一章 序論

第一節	研究の背景	4
第二節	有機薄膜トランジスタの高性能化	5
第三節	本研究の目的	7
第四節	本論文の構成	8

第二章 有機半導体材料

第一節	有機半導体材料の分類及び特徴	9
	第一項 高分子有機材料	9
	第二項 低分子有機材料	11
第二節	有機半導体の伝導機構	12
	第一項 単結晶	13
	第二項 多結晶	14
	第三項 アモルファス	14
第三節	有機薄膜トランジスタ構造と動作原理	14
	第一項 有機薄膜トランジスタの構造	14
	第二項 有機薄膜トランジスタの動作原理	15

第三章 高誘電率絶縁膜の作製

第一節	はじめに	18
第二節	絶縁膜作製装置	19
第三節	絶縁膜 TiAl_2O_3 の作製	20
	第一項 表面形状	21
	第二項 電気的特性	23
第四節	絶縁膜 $\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ の成膜	24

第一項	表面形状	25
第二項	電気的特性	29
第五節	まとめ	

第四章 $\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ 膜を有するペンタセン薄膜トランジスの作製

第一節	はじめに	41
第二節	材料の選択	41
第一項	チャンネル材料の選択	41
第二項	電極材料の選択	43
第三節	有機薄膜トランジスタの作製装置	44
第四節	作製プロセス	46
第五節	電気特性評価	49
第六節	まとめ	51

第五章 絶縁膜の表面処理によるペンタセン薄膜トランジスタの

高性能化

第一節	はじめに	52
第二節	化学的基板処理	52
第一項	表面エネルギーと接触角の関係	52
第二項	絶縁膜の表面処理	53
第三項	電極の表面処理	54
第三節	HMDS による表面処理	54
第一項	表面処理方法	55
第二項	トランジスタの表面処理方法依存性	56
第三項	絶縁膜、ペンタセン薄膜の AFM、SEM 観察	60
第四項	ペンタセン薄膜トランジスタの特性と表面エネルギーとの関係	63

第四節	電気特性評価	64
第一項	絶縁膜厚依存性	64
第二項	組成比依存性	67
第三項	ペンタセン膜厚依存性	70
第五節	まとめ	71

第六章 フレキシブル基板への展開

第一節	はじめに	72
第二節	フレキシブル基板	72
第三節	作製プロセス	73
第四節	電気特性評価	75
第五節	まとめ	78

第七章 結論

79

参考文献	81
------	----

本研究に関する発表	86
-----------	----

謝辞	87
----	----

付録	89
----	----

第一章 序論

本章では、本論文で述べられる研究の背景・目的について述べた後、本論文の構成について説明する。

第一節 研究の背景

有機半導体が示す有機溶媒への可溶性や発光の色など、その多くの特性を、合成化学的に巧みに制御することが出来ることから有機半導体に関心が寄せられている。その中、有機薄膜トランジスタ (OTFT) に関する研究は、1986 年三菱電機の研究グループから始まる^[1]。半導体層に polythiophene を使ったその薄膜トランジスタ (TFT) はきれいな飽和特性を示すものの、電界効果移動度は非常に小さく $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ であった。現在の様に有機 TFT が関心を集める切っ掛けとなったのが、1997 年のペンタセン(pentacene)を使い、移動度 $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える有機 TFT の報告である^[2]。この値は、アモルファスシリコン TFT の移動度に匹敵するかむしろそれより高い値である。これまでの移動度の最も大きな値としては、ペンタセン TFT で $7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ^[3]、ルブレン(rubrene)の単結晶 TET で $15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ^[4] である。

無機のトランジスタと比較した場合、有機 TFT には作製プロセスの柔軟性と材料の多様性という利点がある。前者は、有機薄膜が高温プロセスを必要しない、真空蒸着やスピコートやインクジェット^[4]などのウエットプロセスによって作製可能である事に起因する。このプロセスの柔軟性はエレクトロニクスに新しい応用の可能性をもたらすと期待されている。特に、高温プロセスを必要としないため、プラスチック基板の使用が可能となり、フレキシブルディスプレイに代表される、フレキシブルなデバイスへの応用が期待できる。また、ウエットプロセスの適用は、真空プロセスにかかるコストを削減でき、安価なデバイス作製への応用も期待できる。これらの特徴は、既存のシリコンを中心とした無機材料では適合でない、広範囲な分野かつ特殊な応用分野での応用を創出すると予想される。現在ではこのような応用に向けたプロセスや材料の特性を利用した応用研究も盛んにされており、ディスプレイ向けのスイッチング素子^[5]、RFID タグ^[6]、セン

サー^[7]、電子ペーパー^[31,32]などのデバイスが報告されている。

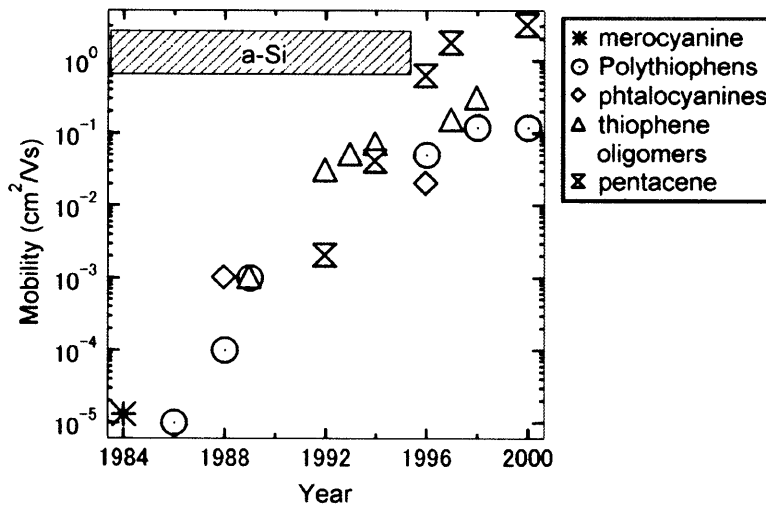


図 1.1 有機 TFT の移動度の移り変わり

第二節 有機薄膜トランジスタの高性能化

CMOS 回路や発光トランジスタへの応用上、両極性有機トランジスタの開発は重要である。P型の低分子として知られているペンタセンをトランジスタのソースとドレイン電極の物質を変えることにより、両極性を現す報告がある。この報告ではソースとドレイン電極の両方を Ca にすることによって、Ca からペンタセンの最低空軌道 (LUMO: the lowest unoccupied molecular orbital)への電子注入障壁は低くし、Ca から最高被占軌道(HOMO : the highest occupied molecular orbital)への正孔注入障壁は高くする。これによって両極性が現れ、飽和領域から電子移動度と正孔移動度はそれぞれ $2.7 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、 $4.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ が得られた^[8]。また、有機発光ダイオドを向けてヘテロ構造を利用して両極性を示す有機トランジスタの報告もある^[9]。この報告では正孔輸送層としてペンタセンを、電子輸送層として PTCDI-C13H27 を用いることによって P 型特性及び N 型特性を示した。その結果、電子移動度は $3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 正孔移動度は $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ が得られた。

有機半導体と絶縁層界面の制御はデバイスの特性と直結ため、安定性及び接着力を向上させる必要がある。最近、自己組織化単分子膜(SAM : self assembled

monolayers) は有機トランジスタにおいて重要な働きをする手法として知られている。有機薄膜トランジスタの絶縁膜として既存の SiO_2 絶縁膜、有機絶縁膜(ポリマ)の代わりに優れた絶縁性を持つ自己組織化分子膜を用いようとする試みがある^[10]。自己組織化単分子膜である alkytrichlorosilane を用いると低電圧で電荷が飽和領域にたどり、優れた on/off 比を示した報告がある^[11]。この報告のポイントは、絶縁膜が 2-3 nm 長さの分子だけでも優れた絶縁膜の役割が可能であることを示したことである。自己組織化単分子膜を有機トランジスタのしきい電圧の制御に利用した報告もある。有機トランジスタのしきい値電圧の制御は回路の応用上、極めて重要である。しきい値電圧の制御のため、色んな末端基を有する自己組織化単分子膜を絶縁層に入れる。それにより絶縁層の電荷密度が変わり、しきい値電圧が制御できる仕組みである。自己組織化単分子膜に被膜された絶縁層表面にペンタセンを蒸着した結果、絶縁層表面の状態によって電界効果移動度としきい値電圧が大きく変化することを示した^[11]。

有機トランジスタを微細化した報告もある。ナノインプリントリソグラフィを用いてチャンネルを $1\mu\text{m}$ から 70nm まで作製した後、高分子材料である P3HT をコートしたすることでトランジスタを作製し、その結果、チャンネル長の減少とともに駆動電流が増加することを示した^[12]。

また、有機トランジスタの作製方法も様々な角度から活発に研究されている。有機トランジスタを集積化するためには素子の大きさを微細化するリソグラフィとプリンティング技術が要求される。リソグラフィとは違い、プリンティング技術は光源を使わないため高価の露光装置を必要としないことが特徴である。プリンティング技術としては ink-jet, nanoimprint, microcontact などを挙げられる。有機トランジスタへの応用面で注目を浴びているのが ink-jet と microcontact である。特に ink-jet 技術は非接触印刷であるためデバイスの損傷が少なくなり、生産性が高くなる。電極材料に至るまで有機材料を利用したオール有機トランジスタ回路を作製した報告もある^[13]。この報告での作製方法はまず、ソースとドレイン部分の表面エネルギーを変化させた基板に噴射し、有機半導体を ink-jet や spin-coating で形成させる。その表面に絶縁層を spin-coating で塗布し、ゲート電極を ink-jet で噴射する。作製されたオール有機トランジスタの移動度は $0.02\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、40 V 駆動電圧で

on/off 比が 10^5 の性能を示した。この報告はすべてを有機物質で構成し、有機半導体の持つ印刷形成可能性を示した。

第三節 本研究の目的

有機薄膜トランジスタは移の動度に関しては、アモルファスシリコンに匹敵する値が得られているが、その一方、駆動電圧が20-100Vと高い場合が多いことが指摘されている。仮に、これが有機層に伝導キャリアを注入するのに大きな電界を必要とするためであれば、ゲート容量の大きい絶縁膜を利用することにより、低電圧駆動が可能となるはずである。有機薄膜トランジスタでは便宜的に熱酸化シリコンをゲート絶縁膜として利用することが多くある。厚み300nmの熱酸化膜の場合、比誘電率 $\epsilon_r = 3.9$ を用いるとキャパシタンスの容量は 11.5 nF/cm^2 である。これらの値は一つの目安になる。これより絶縁膜の厚みを薄くするか、誘電率の高い絶縁膜を用いることにより、大きな容量を得ることができる。

大きなゲート容量の絶縁膜を利用し、有機薄膜トランジスタの低電圧駆動を試みた例が数多く報告されている。高誘電率材料である Ta_2O_5 ^[14,26,27] や TiO_2 ^[15,28] をゲート絶縁膜を利用した報告がある。トランジスタは5V以下での動作を実現していたが、移動度は $1\text{cm}^2/\text{Vs}$ に達していない。一方、薄い絶縁膜を用いた例では、自己組織化単分子膜^[10,11] や高分子膜^[7,29,30,37] を利用し、2-3Vでの動作が報告されている。厚さ9 nm の polyvinyl alcohol (PVA) を用いた例では、移動度 $1.1 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ も得られている^[29]。しかし、絶縁膜の厚さが薄くなるとゲート電極へのリーク電流の増加や絶縁膜でのピンホールなど、トランジスタの性能を劣化する恐れがある。上記に述べた高誘電率材料^[16] のほかに LaAlO_3 ($\epsilon_r=15$ 、膜厚330nm)^[17] を用いた例もある。移動度は $1.4 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ が得られているが、動作電圧は40 Vと高く、低電圧駆動には至っていない。有機薄膜トランジスタの応用としては、液晶の駆動^[31]、有機 EL の駆動^[22]、センサー^[7]、RF タグ^[6]、ロジック回路^[13] が検討されている。実用化されているトランジスタ回路を参考にすれば、ロジック回路では駆動電圧 2-7V 程度、液晶駆動では 5-20 V 程度である。本研究では酸化チタンと酸化金属の混成膜がゲート絶縁膜として有望であると考え、それらを有機薄膜トランジスタに応用し、高性能化を試みた。

第四節 本論文の構成

本論文は全7章から構成されている。論文の構成を図2に詳しく示す。

第二章では、有機半導体材料を高分子有機材料と低分子有機材料に分け、説明する。その後、有機半導体の伝道機構を単結晶、多結晶、アモルファスの三つに分け、説明する。第二章の最後には有機薄膜トランジスタの動作原理を説明する。

第三章では、 TiAl_2O_3 $\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ の作製法及び電気的特性を述べ、有機薄膜トランジスタの絶縁膜としての可能性を検討する。

第四章では、幾何学的、電氣的に優位性が確認された $\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ を用いて有機薄膜トランジスタのゲート絶縁膜として用い、その電気特性評価を行う。

第五章では、さらに、高性能有機薄膜トランジスタを目指し、表面処理によるトランジスタの高性能化を検討する。

第六章では、絶縁膜 $\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ 、表面処理により、高性能フレキシブル有機薄膜トランジスタへの展開をする。

第二章 有機半導体材料

第一節 有機半導体材料の分類及び特徴

有機トランジスタには有機層、絶縁層、電極などそれぞれの構成要素に対する材料の開発が重要であるが中でも有機層を構成する有機材料の開発が何よりも重要である。有機材料は大きく分けると高分子材料と低分子材料に分けられる。これらの材料の薄膜作製プロセスには真空蒸着などのドライプロセスとスピノコートやインクジェットなどによるウエットプロセスがある。一般に高分子材料は分子量が大きいいため、真空蒸着などの薄膜作製プロセスによる成膜は困難であり、溶液からウエットプロセスにより成膜することが多い。一方、低分子材料は昇華性を示すものが多く、真空蒸着法による薄膜形成も可能である。真空プロセスを必要としないという点では、溶液プロセスが適応できる材料を利用することは有効である。しかしながら、多くの材料が、一般的な溶媒に可溶性を示す分けではなく、先駆体からの反応を使ったプロセスや、可溶性の束鎖を導入した誘導体なども用いられている。

トランジスタに応用する場合、成膜プロセスへの適応性だけでなく、キャリアの伝導性を示す必要がある。有機材料は、無機の半導体同様に正孔かつ（もしくは）電子の輸送性を示すものがある。必ずしも定義は明確ではないが、トランジスタ動作をさせた場合に、正孔をキャリアとするものをP型、電子をキャリアとする材料をN型と呼んでいる。

第一項 高分子有機材料

高分子材料の特徴としては分子の多様性、分子設計、新規材料合成による性能向上の可能性、機械的フレキシビリティ、薄膜形成方法がシンプルで製造装置が比較的安価、プラスチック基板への適用ができる低温プロセスなどを挙げられる。特に、機械的なフレキシビリティは、通常のプラスチック材料に見られるように高分子材料の大きな特徴である。図 2.1 に代表的な高分子材料を示す。高分子材料は、thiophenに見られるように主鎖が単結合のものと、PPVに見られるように、

主鎖に2重結合を含む π 共役材料とに分けられる。主鎖が単結合のものは、 π 軌道の主鎖方向への広がり小さく、キャリアの伝導は polythiophen を例にとれば、隣り合った高分子の thiophen 環 π 軌道の重なりによって起こるのが主である。キャリア移動（移動度）を向上させるためには、この π 軌道の重なりを大きくする必要があり、Regioregular poly(alkyl-thiophene) のアルキル鎖の導入は、可溶性を増やす事が一つの理由である。もう一つの理由は、アルキル鎖の向きがそろって(これを regioregular と呼んでいる)いるために起こる、成膜での高分子の配向性向上である。

高分子材料における問題は、低分子材料やアモルファスシリコンに比べ移動度が低い点である。移動度を増すためには、上で述べたように π 軌道の重なりを多くすることが必要であり、十分な材料設計と成膜プロセスの最適が求められる。また、材料の高純度化も大きな課題である。低分子材料では、昇華精製による不純物の除去が可能であるが、高分子材料では、溶液での精製が必要であり、溶媒を含めた高純度化が必要である。

ロジック回路(CMOS 回路)を構成する場合、高分子材料はほとんどが P 型であるので N 型半導体となる高分子材料の開発も課題になっている。最近では、既存の材料（例えば図 2.1 の MEH-PPV）でも両極性を示すとの報告もある^[5]。

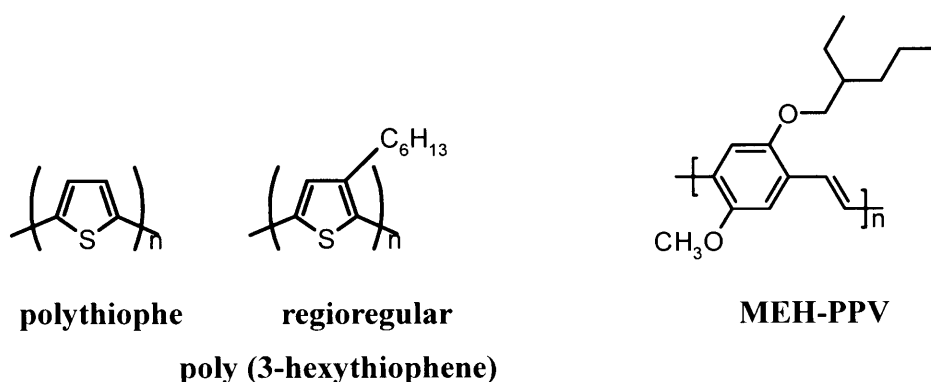


図 2.1 代表的な高分子有機材料

第二項 低分子有機材料

図 2.2 に代表的な低分子材料を示す。高分子材料同様に、2重結合をもつ分子である。低分子材料では構造の対称性の高いものが多い。低分子材料のなかには、高い性能（高移動度）を示す材料（例えばルブレン単結晶の場合 $15 \text{ cm}^2/\text{Vs}^{[4]}$ 、ペントセンの多結晶の場合 $7 \text{ cm}^2/\text{Vs}^{[3]}$ 以上）が見出されたい。このため、低分子材料は大きな期待が寄せられている。こうした優れた特性を示す低分子材料の多くは溶媒に難溶解性のため、薄膜化には一般に真空蒸着法が用いられる。プロセス優位性を活かすために溶液からの塗布成膜が試みられている。低分子材料の溶解性をあげるためには、高分子材料と同様にアルキル鎖などの束鎖を導入することが行われている。図 2.2 の PTCDI-R (R:アルキル鎖)はその一例である。

一般に、低分子材料についても、多くのものが P 型であり、N 型の材料は数が少なく、移動度が低い。既知の P 型材料に対し、アルキル鎖や水素部分をフッ素化することによって、N 型を示す材料を合成することがある。図 2.2 の PTCDI-R や F16CuPc のその例である。また、N 型は酸素に対するダメージが大きく P 型に比べて大気中での動作や取り扱いが極めて難しいことが知られている^[33,34]。

P 型低分子有機材料

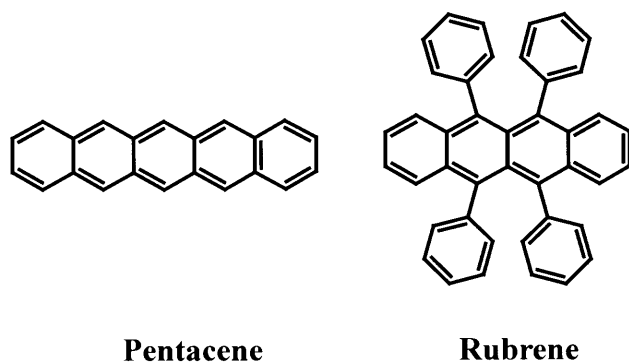


図 2.2 代表的なP型低分子材料

N型低分子有機材料

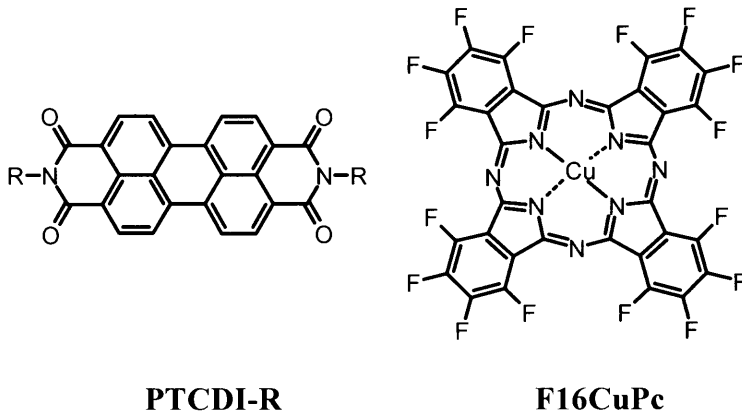


図 2.3 代表的な N 型低分子材料

第二節 有機半導体の伝導機構

有機物質は主たる構成原子は炭素であり、この炭素間の 1 重結合における σ 電子は炭素原子間には局在するが、一方で 2 重結合における π 電子は、 σ 電子と異なり炭素原子間を超える結合電子の拡がりを可能にする。その結果、分子全体に電子雲の拡がり、大きな π 共役結合軌道が形成され、電子の移動が可能となる。典型的な例が、図 2.3 に示した、polyethylene と polyacetylene である。Polyethylene は典型的なプラスチック材料であり、絶縁材料である。一方、 π 共役結合を有する polyacetylene はドーピングをすることにより伝導性を示すことは有名である。

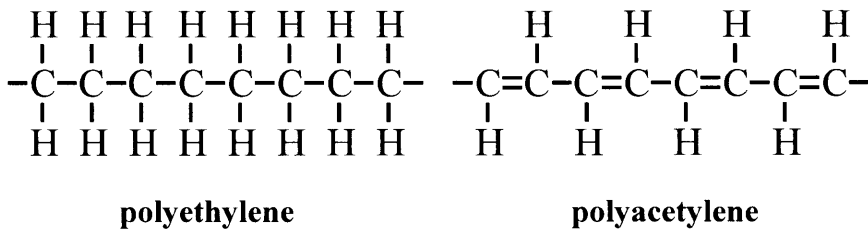


図 2.4 polyethylene と polyacetylene の分子構造

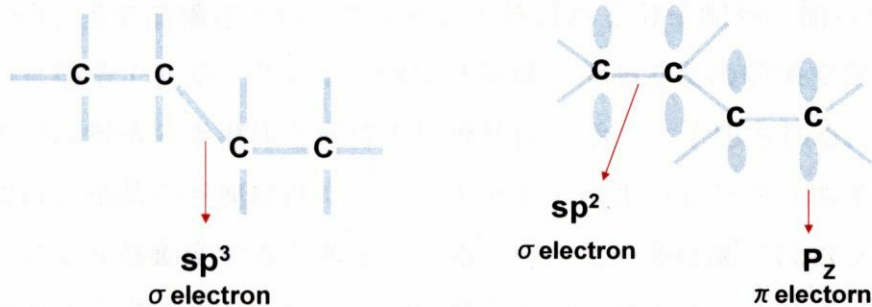


図 2.5 混成軌道での σ 電子と π 電子

特に π 共役系高分子の場合は、主鎖に π 軌道を含むため、分子鎖内全体に非局在した波動関数となる。そのため電子は主鎖方向に流れやすいことが予想される。一般的に高分子材料は低分子材料にくらべ移動度が低い。その理由は、薄膜とした場合、1 分子分子によって伝導特性が決まるのではなく、周囲の分子や環境の影響を強を受けるためと考えられる。もし、単一の π 共役系高分子の伝導度を測定できれば、非常に高い値が得られる可能性は残っている。しかしながら、ここでは、一般に、移動度が高いとされる低分子材料に注目し、話を進める。低分子材料の薄膜はグレイン構造を示す事が多い。X 線回折によると、分子間隔に匹敵するピークが得られる事から、グレイン内は結晶構造を形成していると考えら得ている。また、AFM 観察でも、その結晶の高さに匹敵するステップが観測されている。そこで、薄膜の構造を典型的な三つの構造に分類し、それぞれの場合について考える。

第一項 有機半導体単結晶の場合

薄膜トランジスタではないが、これまでに述べたように rubrene の単結晶トランジスタによって移動度 $15\text{cm}^2/\text{Vs}$ が達成されている^[4]。これは、単結晶であるため得られた値と考えられる。有機の単結晶については、無機の半導体同様に、エネルギーバンド構造をとるとの計算結果も示されている。つまり、有機の単結晶内でのキャリア移動は、無機の半導体同様に説明されると考えられる。

第二項 有機半導体多結晶の場合^[45]

ここでいう、多結晶構造とは、グレインと呼ばれる分子配列の揃った（結晶の）島が集まった構造である。グレイン内は結晶構造であるため前項で説明したように、この中では無機の半導体と同様の伝導特性を示すと予想される。一方、グレイン境界では、結晶の不連続性により、キャリアはホッピング（エネルギー障壁を越えて）により移動度すると考えられる。そのため多結晶ではホッピング伝導が支配的であると考えられている。言い換えれば、グレインサイズの増大によって、ホッピング伝導が減り、バンド内の伝道が支配的になる。そのためグレインサイズの増大は移動度の増加につながる。

第三項 アモルファス

アモルファスでは、多結晶のような伝導機構とは事なり、すべて、ホッピングによりキャリアは移動するものと考えられる。そのため、移動度は低い事が多い。そのため、OTFT に用いられる材料は、多結晶性のものが多く、アモルファス構造をとるものは少ない。アモルファス構造を示すものとしては、有機 EL 材料に見られる。

第三節 有機薄膜トランジスタの構造と動作原理

本節では有機薄膜トランジスタの構造および動作原理について説明する。

第一項 有機薄膜トランジスタの構造

有機電界効果トランジスタの構造はシリコン単結晶のトランジスタやポリシリコンやアモルファスシリコンの TFT と同様の構造である。大きく異なる点は、有機物が耐薬品性、耐熱性が乏しく、空気や水分により劣化することから、それを考慮したプロセス工程を採用することから、作製可能な構造がある程度制限される。

有機 TFT の構造は大きく分けて、Top contact 型と Bottom contact 型に分けられる。図 5 にそれぞれの構造を示す。両構造ともシリコンの TFT に見られる構造である。Top contact 構造の作製には、ドレイン-ソース電極のパターニングにはメタ

ルマスクを利用するため、素子の作製が簡便であるという利点がある。そのため、未知の有機材料物性を評価し、他材料と比較検討する意味から重要である。しかしながら、メタルマスクを用いるため、マスク合わせとマスクの加工性度によって集積度が制限される。そのため、高集積化の点では Bottom contact 構造が有利である。

一般的に Top contact 型が Bottom contact 型より優れた特性(大きな移動度)を示す事がある。その理由としては Bottom contact 型トランジスタは、絶縁膜と電極という異なる物質の上に有機半導体層を成膜することになり、電荷の注入障壁が大きくなり、また、有機半導体層のモフォロジーが電極上と絶縁膜上とで異なるという不均一性という原因から、Top contact 型がより良い特性を示す。

高集積化と高移動度化を同時に実現するためには、Bottom contact型の採用は避けられない。Bottom contact型においても、電極-有機界面で、Top contact と同様の特性を得ることができれば、両者を両立することができる。これは、今後の課題である。他に、電極の位置を有機層に挟んで立体的斜め配置した構造や縦方向に電流を流す電界効果トランジスタなど新型の素子構造が相次ぎで提案されている。

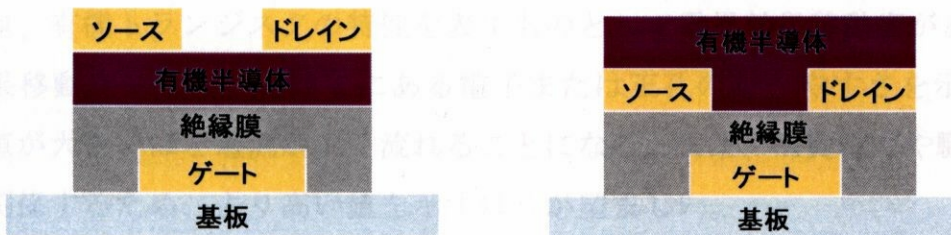


図 2.6 有機薄膜トランジスタの構造 (Top contact 型と Bottom contact 型)

第二項 有機薄膜トランジスタの動作原理

有機トランジスタと無機トランジスタの動作はほぼ同様であるが異なる点もあり、最も異なる点は反転層を有してないため、有機トランジスタでは蓄積層で電気伝導をすることである。

素子の動作原理は P 型有機半導体の場合、ゲートに負の電圧をかける (オン状態) と、このかけられた電圧による電界の効果で有機物質と絶縁体間に正の電荷

が蓄積され、絶縁体と近い領域(絶縁層表面から 5 nm)に電荷の量が多い層が形成される。この時、ソースとドレインの間に電圧をかけると電流(ドレイン電流という)が流れるようになる。即ち、ソースとドレイン間の電圧を掛けた状態でゲートに正の電圧と負の電圧を交互にかけることによってソースとドレイン間に流れる電流の量を制御できる。この電流量の比をオン/オフ比といい、VGS-IDSのグラフにおいて IDS の最大値を最小値で割ったものである。優れた性能のトランジスタを作成するためにはこの on/off 比を大きくするのが望ましい。

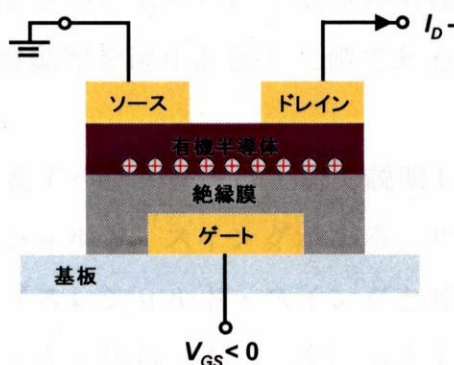


図 2.7 有機薄膜トランジスタの動作原理

その他、有機トランジスタの特性を表すものとして電界効果移動度がある。電界効果移動度は有機半導体中にある電子または正孔の動きやすさを示すものでこの値が大きいほど電流がよく流れることになる。また、消費電力や駆動周波数にも関係するため、より高い値を示すほうが望ましい。

線形領域、飽和領域でのドレイン電流とドレイン電圧、ゲート電圧の関係はそれぞれ次式で表される。

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu C_{OX} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

式 2.1 線形領域での電流式

$$I_{DS} = \frac{W}{2L} \mu C_{OX} (V_{GS} - V_T)^2$$

式 2.2 飽和領域での電流式

電界効果移動度を見積もるためには直線領域からは $V_D = \text{一定}$ のもとで I_D を V_G の関数としてプロットすることにより傾きから μ が算出される。飽和領域に

おいては I_D の平方根を V_G の関数としてプロットすることにより傾から μ が算出される。

$$\mu = \frac{L}{WC_i V_{DS}} \frac{\partial I_D}{\partial V_G}$$

式 2.3 線形領域での移動度

$$\mu = \frac{2L}{WC_i} \left(\frac{\partial \sqrt{I_D}}{\partial V_G} \right)^2$$

式 2.4 飽和領域での移動度

ここで注意したいことは、測定から求められる電界効果移動度は素子構造に強く依存した値であり、材料の移動度を過小評価した値である事を知っておく必要がある。

有機トランジスタの特性を表すパラメータは上記で説明したオン/オフ比、電界効果移動度の以外、サブスレシヨルド・スイングがある。サブスレシヨルド領域での電流の勾配の逆数は、サブスレシヨルド・スイングと呼ばれ、ドレイン電流に対するゲート電圧の制御性を表す係数であり、次に示すように電流が一桁変化するのに要するゲート電圧で定義される。スイッチング特性の観点からはサブスレシヨルド電流の勾配が急であること、すなわちS値が小さいことが重要である。

$$S = \left(\frac{\partial \log I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right)^{-1}$$

式 2.5 サブスレシヨルド・スイングの式

なお、有機薄膜トランジスタではないが、MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) の場合は、室温におけるS値の限界は、60mV/decadeである(付録を参考)と知られている。