



Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos

Aula 8 - OTFT: Organic Thin Film Transistors
(Transistores de Filme Fino Orgânico)

Marco Roberto Cavallari e
Fernando J. Fonseca

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos

PRINCIPAIS VANTAGENS DOS OTFT

Não é para substituir o silício (as características eletrônicas do Si são muito melhores)

Tecnologia compatível com os pixels das telas de OLED

➡ *All plastic screen*

Deposição dos materiais a **baixa temperatura**
e sobre **substratos flexíveis**

➡ *RFID*

Expectativa de **baixo custo** e possível de ser depositado
sobre **grandes áreas**

➡ *e-paper*

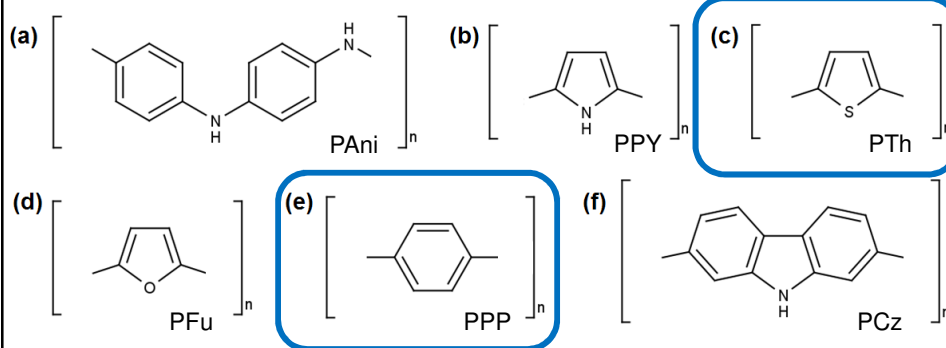
Texto baseado na aula *Transistores Orgânicos (I)* do Curso *Eletrônica e Semicondutores Orgânicos*, Marco Sampietro, Politécnico de Milano, 2009)

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos

2

PRINCIPAIS VANTAGENS DOS OTFT

Vasta disponibilidade de semicondutores: polímeros amorfos de baixa mobilidade ($\approx 10^{-5} - 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) principalmente dos anos 80 e 90



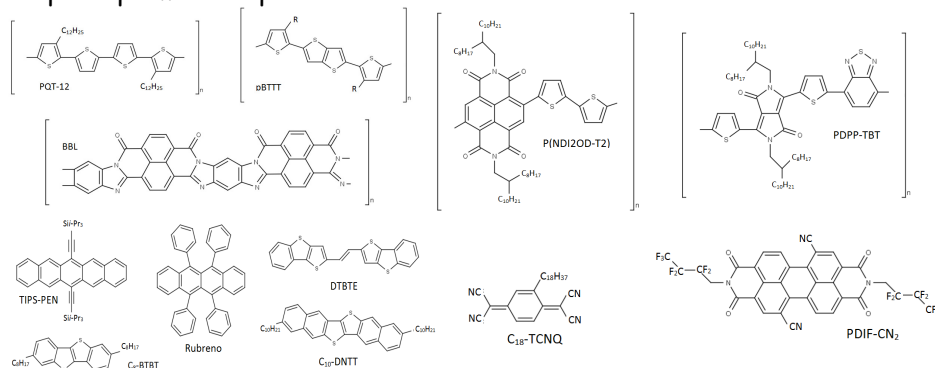
Texto baseado na tese de doutorado de Marco Roberto Cavallari, Eng. Elétrica, Escola Politécnica da USP (2014)

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos

3

PRINCIPAIS VANTAGENS DOS OTFT

Vasta disponibilidade de semicondutores: polímeros e pequenas moléculas cristalinos de alta mobilidade ($\approx 10^{-2} - 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) principalmente a partir dos anos 2000



Texto baseado na tese de doutorado de Marco Roberto Cavallari, Eng. Elétrica, Escola Politécnica da USP (2014)

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos

4

HISTÓRIA DOS FETS EM ESTADO SÓLIDO

1930 e 1933 - Patentes de Lilienfeld sobre transistor de efeito de campo (MES- e MISFET) em estado sólido

Semicondutor sulfeto de cobre (CuS) e dielétrico alumina (Al₂O₃)

1947 - Primeiro transistor bipolar de junção (TBJ)

Junção p-n de monocristal de germânio

1960 - Atalla e Kahng primeiro MOSFET de Si e SiO₂

Junção p-n do semicondutor monocristalino de silício (Si) e dielétrico dióxido de silício (SiO₂)

1962 - Weimer publica o transistor de filmes finos (TFT)

Semicondutor policristalino de sulfeto de cádmio (CdS) e dielétrico monóxido de silício (SiO)

M. Schulz, Nature 399, 729, 1999; E. Fortunato, P. Barquinha, R. Martins, Adv. Mater. 24, 2945, 2012

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos

5

HISTÓRIA DOS OTFT

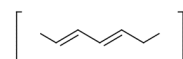
1970 - A primeira crise mundial de energia gera interesse pela eletrônica orgânica (para células solares)

1977 - Primeiro polímero condutor: trans-poliacetileno

Condutividade superior a semicondutores altamente dopados, porém duas ordens de grandeza inferior a metais ($\approx 10^3$ S/cm)

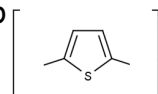
1983 - Primeiro OTFT fabricado com poliacetileno

Sensível ao ar, baixa mobilidade (10^{-5} cm²/V.s)



1986 - Primeiro OTFT fabricado com politiofeno

Sensível ao ar, tipo p, baixa mobilidade (10^{-5} cm²/V.s)



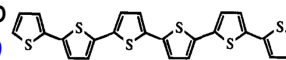
Texto baseado na aula Organic Thin Film Transistori do Curso Introduction to Organic Electronic, Fang-Chung Cheng, NCTU, 2009

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos

6

HISTÓRIA DOS OTFT

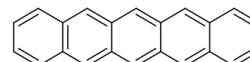
1990 - OTFT fabricado com sexitiofeno
Mobilidade ~ 0,1 cm²/V.s (comparável ao a-Si:H)



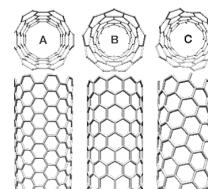
1995 - OTFT fabricado com fulereno
Sensível ao ar, tipo n, mobilidade ~ 0,1 cm²/V.s



1997 - OTFT fabricado com pentaceno
Sensível ao ar, tipo p, mobilidade ~ 1 cm²/V.s (superado o silício amorfo)



1998 - Primeiro OTFT fabricado com único nanotubo de carbono
Ambipolar, mobilidade ~ 20 - 200 cm²/V.s (difícil processamento para produção de circuitos)

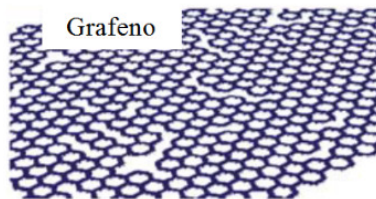


Texto baseado na aula Organic Thin Film Transistori do Curso Introduction to Organic Eletronic, Fang-Chung Cheng, NCTU, 2009

HISTÓRIA DOS OTFT

2000 - Prêmio Nobel de Química a Heeger, McDiarmid e Shirakawa

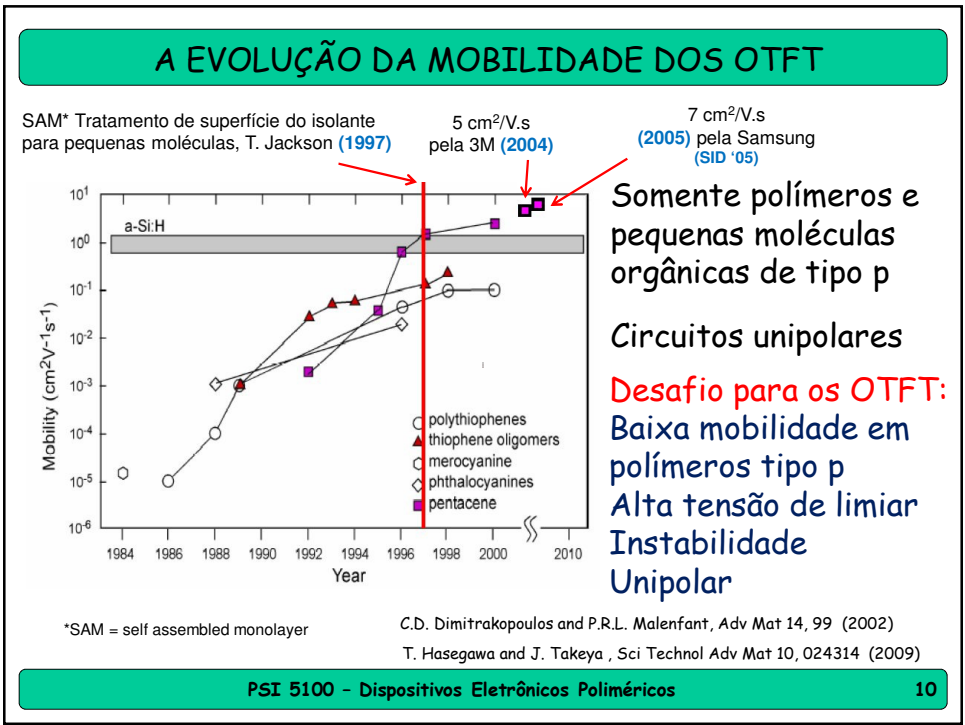
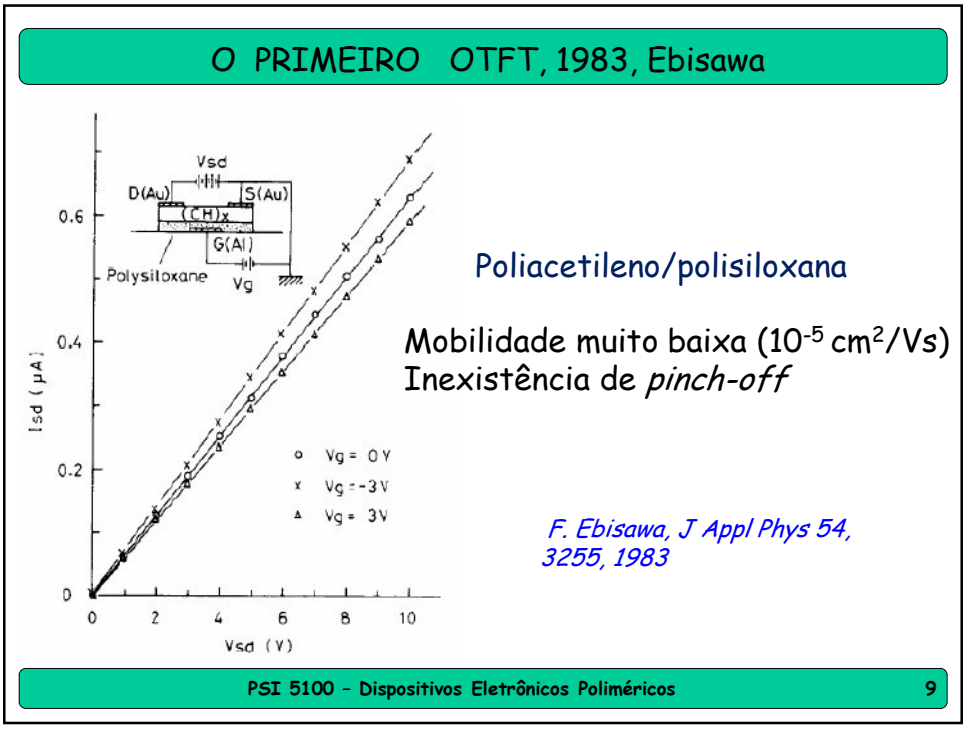
2004 - OTFT fabricado com única folha de grafeno
Ambipolar, mobilidade ~ 10000 cm²/V.s, baixa modulação de corrente (~ 10)



2010 - Prêmio Nobel de Física a Geim e Novoselov

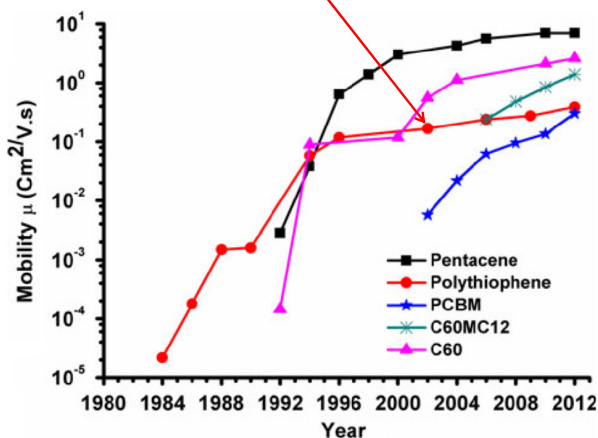
2011 - Primeiro processador flexível a partir de OTFTs fabricados com pentaceno sobre PEN
3381 TFTs, 6 pol., 10 V, 40 operações/s, 8 bits

Texto baseado na aula Organic Thin Film Transistori do Curso Introduction to Organic Eletronic, Fang-Chung Cheng, NCTU, 2009



A EVOLUÇÃO DA MOBILIDADE DOS OTFT

Tratamento de superfície do isolante para polímeros, R.A. Street (2002)



B. Kumar, B.K. Kaushik, Y.S. Negi, J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 25, 1 (2014)

Polímeros e pequenas moléculas orgânicas de tipo p

Fulerenos de tipo n: C60MC12 e PCBM solúveis

Circuitos CMOS

Desafios:

Baixa mobilidade em polímeros tipo p e fulerenos tipo n
Instabilidade

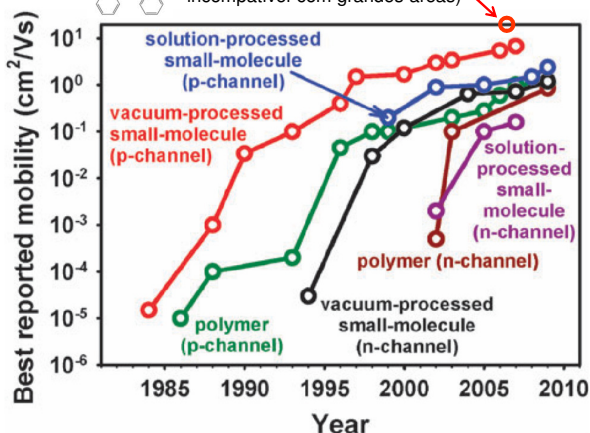
PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos

11

A EVOLUÇÃO DA MOBILIDADE DOS OTFT



Rubreno -> 20 a 40 cm²/V.s
(pequenos monocristais de ~1 cm, incompatível com grandes áreas)



Semicondutores orgânicos de tipo p, n e ambipolares

Desafios:

Baixa mobilidade em polímeros tipo p e semicondutores tipo n

Instabilidade

Baixa frequência de operação CMOS (< 100 Hz)

H. Klauk, Chem. Soc. Rev. 39, 2643 (2010)

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos

12

APLICAÇÕES DE OTFT

Circuitos Flexíveis

Sensores

OLETs

RFIDs

AMOLEDs

Circuitos Integrados

PLASTIC LOGIC

SONY

Cavallari, 2014

13

Do a-Si ao TFT orgânico

Os transistores de filme fino (TFT) em **silício** tem **temperatura MÉDIA** de fabricação compatível com os substratos de vidro das telas de cristal líquido (LCD):

α -Si:H 300°C
Si policr. 500-600°C
Orgânico 20-150°C

Suporta até:
Vidro 1100°C
Corning 1735 - 650°C
Plástico 200°C

Os semicondutores orgânicos apresentam temperatura compatível com substratos plásticos (*leve, robustos e flexíveis*).

↓
Novas aplicações

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos
14

ESTRUTURAS DE OTFT

(a)

(b)

bottom-gate
 (a) top-contact (staggered)
 ou
 (b) bottom-contact (coplanar).

(c)

(d)

top-gate
 (c) bottom-contact e
 (d) top-contact.

T.B. Singh, N.S. Sariciftci, Annu. Rev. Mater. Res. 36: 199–230, 2006.

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos
15

ESTRUTURAS DE OTFT

**BOTTOM CONTACTS
BOTTOM GATE
(coplanar)**

**TOP CONTACTS
BOTTOM GATE
(staggered)**

**TOP GATE
BOTTOM CONTACTS**

**TOP GATE
TOP CONTACTS**

Complexidade crescente de fabricação

Possibilidade crescente e utilização em circuitos

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos
16

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO OTFT

Staggered or Top-contact (TC) Device

(a)

Coplanar or Bottom-contact (BC) device

(b)

TC OTFT R_c < BC TFT R_c

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos
17

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO OTFT

1) Triodo

C.D. Dimitrakopoulos et al.,
Science 283, 822 (1999)

2) Saturação

Modelo de corrente por tensão do transistor MOS de Si:

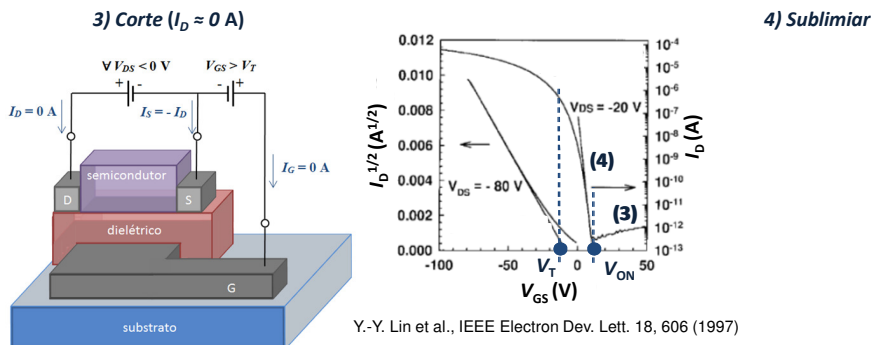
$$I_D \approx \mu C_i \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) V_{DS}, \quad \text{se } |V_{DS}| \ll 2|V_{GS} - V_T| \qquad I_D = \frac{1}{2} \mu C_i \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

Modelo de corrente por tensão do transistor MIS orgânico: $\mu = k(V_{GS} - V_T)^\gamma$

$$I_D \approx C_i \frac{W}{L} k (V_{GS} - V_T)^{\gamma+1} \cdot V_{DS}, \quad \text{se } |V_{DS}| \ll 2|V_{GS} - V_T| \qquad I_D = C_i \frac{W}{L} k \frac{1}{\gamma+2} (V_{GS} - V_T)^{\gamma+2}$$

PSI 5100 - Dispositivos Eletrônicos Poliméricos
18

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO OTFT



Modelo de corrente por tensão do transistor MOS de Si:

$$I_D \approx 0$$

$$S = \ln(10) \frac{dV_{GS}}{d \ln I_D}$$

Não-idealidades: corrente de fuga ($J_{leakage}$), histerese (HF)

D. Natali et al., J. Appl. Phys. 101, 014501 (2007)

J.A. Martino, M.A. Pavanello, P.B. Verdonck, Caracterização elétrica de tecnologia e dispositivos MOS (2003)

ETAPAS CRÍTICAS

- Mobility
- On/Off Ratio
- Contact Resistance
- Dielectric Compatibility
- (Solvent Compatibility)

