



**Università Politecnica delle Marche**  
**Facoltà di ingegneria**

**Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Informatica e di Automazione**  
Dipartimento di ingegneria dell'informazione

**“Fitting di modelli compatti per transistori organici da curve analitiche”**

**“Fitting of compact models for organic transistors from analytical curves”**

*Relatore*

**Prof. Paolo Crippa**

*Tesi di Laurea di:*

**Maringlen Mucalla**

**ANNO ACCADEMICO 2021/2022**

# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>2</b>
<b>CAPITOLO 1</b> .....	<b>3</b>
1.1 I transistor.....	3
1.2 Tipi di transistor .....	4
1.3 Transistor ad effetto di campo .....	5
1.4 Le caratteristiche di transistor ad effetto di campo.....	6
1.5 La struttura dei transistor ad effetto di campo .....	6
1.6 Il funzionamento .....	7
1.7 Applicazione e CMOS .....	8
<b>CAPITOLO 2</b> .....	<b>10</b>
2.1 Transistor organici ad effetto di campo .....	10
2.2 La struttura di OFET .....	10
2.3 Storia .....	10
2.4 Transistor a film sottile(OTFT) .....	11
<b>CAPITOLO 3</b> .....	<b>14</b>
3.1 Scenario.....	14
3.2 Materiali e programmi utilizzati .....	14
3.3 Figura 1 .....	16
3.4 Figura 2 .....	23
3.5 Figura 3 .....	31
3.6 Figura 4 .....	36
<b>Conclusioni</b> .....	<b>41</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>42</b>

## Introduzione

I FET organici sono alla base dell'elettronica organica che negli ultimi anni ha coinvolto diversi gruppi di lavoro, sia a livello accademico che industriale. Tale interesse è motivato dal desiderio di realizzare un'elettronica a basso costo, leggera, flessibile e indossabile, per perfezionare le sue numerose applicazioni.

I FET organici sono stati studiati in particolare negli ultimi 20 anni per l'uso nell'elettronica che richiede flessibilità, leggerezza e facilità di progettazione. La flessibilità è uno dei vantaggi più significativi dei FET organici

In questa Tesi, l'obiettivo principale non è quello di studiare in modo dettagliato i FET organici ma quello di considerare alcuni grafici che fanno riferimento ai transistor organici ad effetto di campo.

Come accennato sopra l'obiettivo di questa tesi è quello di descrivere il lavoro svolto durante il periodo di tirocinio sui grafici di transistor organici ad effetto di campo con caratteristiche diverse . Come vedremo in seguito, il lavoro consiste nell'estrarre i dati da questi grafici per poi costruire dei grafici simili a quelli di partenza utilizzando MATLAB. A partire da questi ultimi grafici ricavo il fitting delle loro curve. I grafici utilizzati durante il tirocinio sono stati presi dall'articolo "Fabrication of flexible high-performance organic field-effect transistors using phenacene molecules and their application toward flexible CMOS inverters".

I grafici utilizzati per estrarre i dati fanno riferimento ai transistor organici ad effetto di campo.

La realizzazione del fitting dei grafici è stata strutturata in questo modo:

Nel primo capitolo parleremo in generale di transistor e successivamente di transistor ad effetto di campo.

Una volta introdotti i transistor ad effetto campo, nel secondo capitolo ci concentreremo sui transistor organici ad effetto di campo e soprattutto sui transistor organici ad effetto di campo a film sottile poiché i grafici che sono stati utilizzati fanno riferimento a questo tipo di transistor.

Nel terzo capitolo andremo ad analizzare il lavoro svolto durante il tirocinio, l'obiettivo del lavoro, i materiali utilizzati e soprattutto i risultati ottenuti. Il capitolo tre è suddiviso in quattro sotto capitolo intitolati: "Figura 1" "Figura 2" "Figura 3" "Figura 4". In questi sotto capitoli saranno descritti tutti i passaggi eseguiti per arrivare al risultato finale. Per quanto riguarda il sotto capitolo "Figura 1" è stato spiegato in maniera molto dettagliata ogni passaggio, invece per gli altri sotto capitoli i passaggi sono stati spiegati in maniera meno dettagliata perché il lavoro svolto è simile per tutti i grafici con l'unica differenza del grafico di partenza.

# CAPITOLO 1.

## 1.1 I transistor

Il nome transistor deriva dalla parola inglese transconductance ed è un componente elettronico realizzato con materiali semiconduttori come silicio e germanio. Questo tipo di dispositivo è molto usato nell'elettronica analogica. Al corpo del transistor sono collegati tre terminali che sono utilizzati per connettere il dispositivo al circuito esterno. Applicando una tensione elettrica a due dei tre terminali è possibile regolare il flusso di elettroni che attraversa il transistor stesso, ovvero fare sì che la tensione o la corrente elettrica in uscita sia superiore a quella di entrata.

Come accennato prima il transistor è composto da un materiale semiconduttore al quale sono applicati tre terminali che lo collegano al circuito esterno. I semiconduttori sono caratterizzati da una conduttività (o resistività) intermedia tra materiali conduttori e isolanti. Pur non ostacolando completamente il flusso di elettroni al loro interno, non ne consentono il transito libero come accade per esempio all'interno di un cavo di rame. Il funzionamento del transistor è basato sulla giunzione P-N.

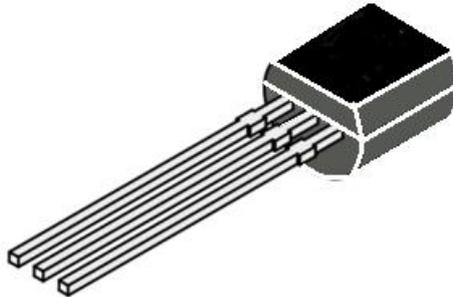


fig 1.1- transistor: [2]

Date le sue caratteristiche, i transistor vengono impiegati in ambito elettronico, principalmente, come amplificatori di segnali elettrici o come interruttori elettronici comandati da segnali elettrici, sostituendo quasi del tutto i tubi termoionici. Per quanto riguarda il primo caso, il dispositivo può amplificare il segnale in ingresso o annullarlo. Invece, per quanto riguarda il secondo caso, può trasformare la corrente (o la tensione) in ingresso in un segnale dotato di maggior potenza. Come interruttore, il transistor permette o impedisce il transito della corrente all'interno del circuito elettrico e quindi il sistema può assumere il valore binario di "0" o "1", permettendo di realizzare i circuiti elettrici digitali alla base della logica booleana.

## 1.2 Tipi di transistor

Dal punto di vista tecnologico esistono principalmente due tipi di transistor:

- Il transistor a giunzione bipolare (BJT)
- Il transistor ad effetto di campo (FET)

Il transistor a giunzione bipolare, anche chiamato con l'acronimo BJT, è una tipologia di transistor a giunzione bipolare usata nel campo dell'elettronica analogica principalmente come amplificatore di corrente e interruttore, ed è formato da semiconduttori drogati. Il BJT è in grado di offrire una maggiore corrente in uscita con lo svantaggio di non avere il terminale di controllo ovvero il gate.

Il BJT è composto da tre strati di materiale semiconduttore drogato, solitamente silicio, in cui lo strato centrale ha drogaggio opposto agli altri due, in modo da formare una doppia giunzione P-N. Il transistor BJT è composto da tre terminali: Emittitore(E), Base(B) e Collettore(C).

Per quanto riguarda i transistor ad effetto di campo FET, si tratta di transistor costruiti con materiale semiconduttore con silicio al quale sono applicati quattro terminali: gate, ovvero la porta; source, ovvero la sorgente; drain, ovvero pozzo; e bulk ovvero il substrato che solitamente è connesso al source. Questi transistor sono chiamati così perché sono comandati in tensione invece che in corrente come i BJT.

Nella figura 1.2 possiamo osservare il BJT di tipo PNP, invece nella figura 1.3 possiamo notare il transistor ad effetto di campo a canale N.

Come andremo a vedere i seguito, i transistor ad effetto di campo saranno oggetto di maggior interesse e di conseguenza anche i transistor organici ad effetto di campo.

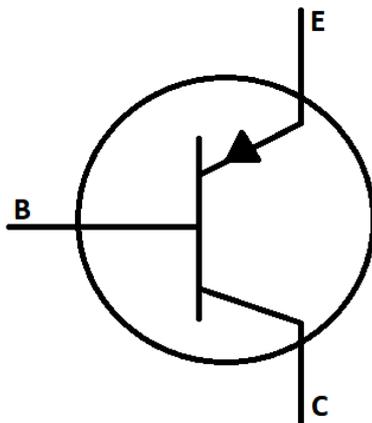


Fig 1.2-BJT

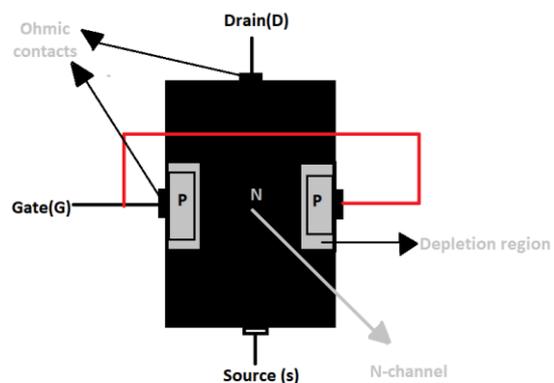


Fig 1.3-FET

### 1.3 Transistor ad effetto di campo.

Come accennato sopra, i transistor che saranno oggetto di studio sono i transistor ad effetto di campo.

I transistor a effetto di campo, o meglio FET, sono dei dispositivi a semiconduttore in cui il flusso della corrente viene controllato dal campo elettrico prodotto da una tensione di ingresso. Usati nel campo di elettronica digitale, sono diffusi in maniera minore nell'elettronica analogica. Il dispositivo FET fa parte di una famiglia di dispositivi che includono i Mosfet, i MesFET, i JFET, che sono i dispositivi più utilizzati in elettronica e, in particolare, all'interno dei circuiti integrati. Nella figura 1.3 possiamo vedere un tipo di transistor che in questo caso è un JFET a canale N.

I FET sono composti da materiale a semiconduttore drogato, solitamente in silicio al quale sono applicati tre terminali: Il Gate, il source, il drain. il funzionamento di FET è basato sulla possibilità di controllare la conduttività elettrica e quindi la corrente elettrica che lo attraversa. La corrente elettrica che attraversa il dispositivo è data dalla formazione di un campo elettrico al suo interno per questo motivo i Transistor sono chiamati anche Transistor a effetto di campo. Il processo di conduzione coinvolge solo i portatori di cariche, se quest'ultimi sono elettroni si parla di FET a canale N, se sono lacune si parla di FET a canale P.

Come accennato prima, i transistori ad effetto di campo possono raggrupparsi in tre grandi famiglie.

- FET a struttura metallo-ossido-semiconduttore o MOSFET. Questo tipo di Mosfet è chiamato anche IGFET (insulated Gate Field Effect Transistor) per la loro struttura in cui il "gate" metallico è isolato dal semiconduttore da un sottile film di biossido di silicio.
- FET a giunzione P-N o JFET (Junction Field Effect Transistor), in cui il gate è realizzato con una giunzione p-n polarizzata inversamente. Hanno struttura fisica e caratteristiche del tutto analoghe, variano solo i portatori di carica elettrica, elettroni nel tipo N e lacune per il tipo P.
- FET a giunzione metallo-semiconduttore o MESFET (Metal-Semiconductor Field Effect Transistor), in cui il gate è realizzato con una giunzione rettificante metallo-semiconduttore polarizzato inversamente.

Nella figura 1.4 possiamo vedere una sezione di un JFET a canale N, mentre e nella figura 1.5 una di un MOSFET a canale P.

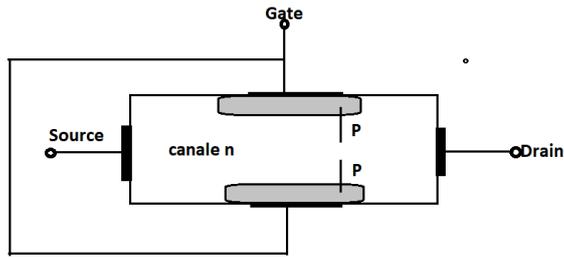


fig-1.4

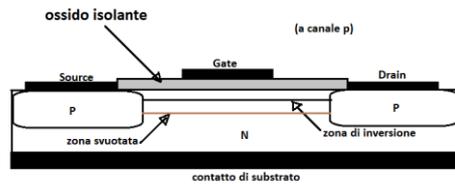


fig-1.5

## 1.4 Le caratteristiche di Transistor ad effetto di campo

- 1 Il loro funzionamento dipende dal flusso dei soli portatori maggiorati e pertanto sono dei dispositivi unipolari.
- 2 Sono più semplici da realizzare e nelle forme integrate occupano meno spazio.
- 3 Presentano una elevata impedenza di ingresso ( $M\Omega$ )
- 4 Possono funzionare molto bene come interruttori.

Uno degli svantaggi dei FET consiste nel fatto che l'amplificazione ottenibile con questi dispositivi è in generale più bassa di quella che tipicamente si ottiene con i transistori bipolari.

## 1.5 La struttura dei transistor ad effetto di campo

Come accennato sopra i transistor ad effetto di campo sono costituiti da quattro terminali: Gate, Source, Drain, e Bulk. Il terminale di gate viene affiancato da due regioni di silicio drogate in maniera opposta al bulk che costituiscono i terminali di drain e source. Tali diffusioni costituiscono una giunzione di tipo P-N. Ai lati della giunzione vi è una differenza di potenziale costante chiamata tensione built-in.

La regione di substrato compresa tra i due terminali Drain e Source è detta regione di canale ed è caratterizzata da una lunghezza di canale  $L$  e da una larghezza di

canale W. Tale regione fornisce un percorso conduttivo tra i due terminali ed è separata dal gate da un sottile strato composto da biossido di silicio (Fig1.6).

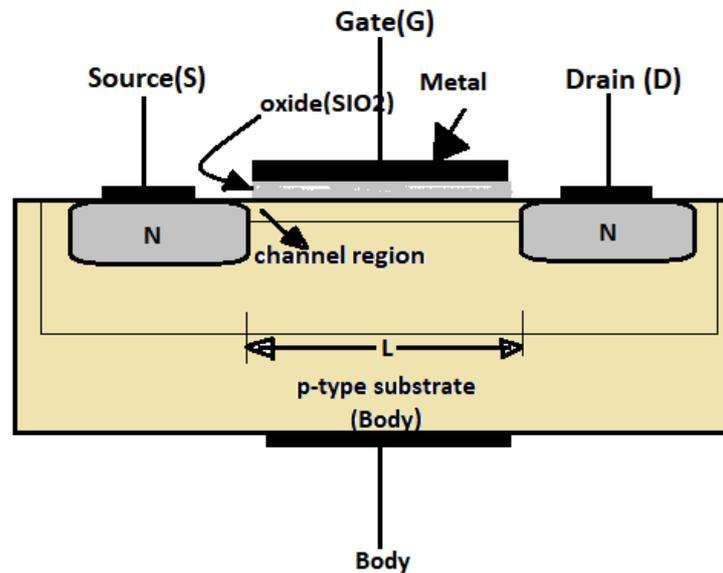


Fig 1.6

## 1.6 Il funzionamento

I transistor ad effetto di campo sono chiamati così perché a differenza di transistor a giunzione bipolare BJT che sono comandati in corrente, i transistor ad effetto di campo FET sono comandati in tensione. Quindi nei FET l'effetto transistor si ottiene tramite il campo elettrico indotto dalla tensione che si applica tra il terminale di gate e l'estremità opposta del semiconduttore, detto bulk, che generalmente è posto al potenziale di source. Questa differenza di potenziale di source crea un canale di conduzione nel silicio attraverso il quale i portatori di carica si spostano dal source al drain nel caso di un FET a canale N, e dal drain al source nel caso di un FET a canale P. Quando si applica una tensione al gate si permette quindi di controllare il passaggio di cariche tra il source e il drain e quindi il passaggio della corrente elettrica che attraversa il dispositivo.

Andiamo a vedere in generale il funzionamento di uno delle tre tipologie di transistor ad effetto di campo ovvero il Mosfet e di conseguenza il CMOS. Come sappiamo i transistori MOSFET sono costituiti da un substrato di materiale semiconduttore, che sarebbe il silicio e uno strato di metallo che separa l'ossigeno.

Questi strati possono essere indicati con tre terminali chiamati: gate, source e drain. La tensione viene applicata alla fonte, di solito sullo strato metallico, mentre lo strato di ossigeno funge da cancello o canale che permette all'elettricità di fluire tra gli altri due strati. L'energia elettrica viene dissipata nello strato semiconduttore e trasferita in una pletora di dispositivi che regolano le funzioni logiche.

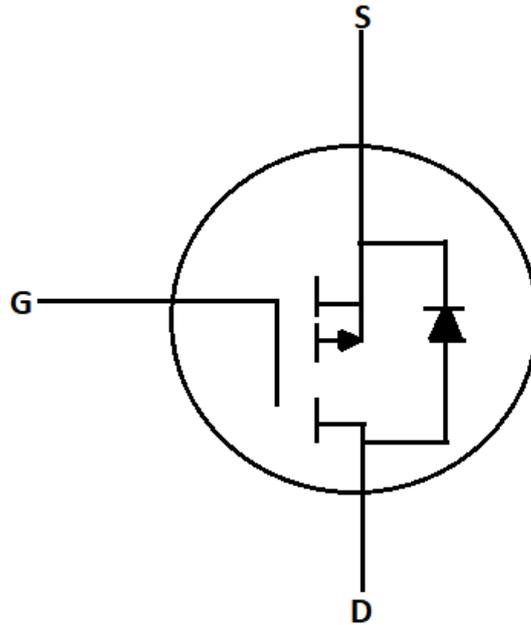


Fig 1.7-MOSFET

## 1.7 Applicazione e CMOS

La tecnologia MOSFET viene utilizzata in un'ampia varietà di applicazioni. Il più notevole utilizzo lo si trova nei circuiti integrati, come per esempio in ogni sistema di computer, perché possono essere realizzati con dimensioni molto inferiori a quella di un BJT. Lo sviluppo delle tecnologie digitali ha portato alla supremazia del MOSFET rispetto ad ogni altro tipo di transistor basato sul silicio e la ragione di tale successo è stata lo sviluppo della logica digitale come CMOS. Memorie, microprocessori, microcontrollori per telefoni e computer sono realizzati con tecnologie MOS e CMOS.

La tecnologia CMOS è utilizzata per la progettazione di circuiti integrati, alla cui base è l'uso dell'invertitore a MOSFET. Nella figura 1.8 possiamo vedere un circuito invertitore a tecnologie CMOS.

Per quanto riguarda la parte strutturale il CMOS è costituito dalla serie di una rete di pull-up e di pull-down. Il pull-up s'incarica di replicare correttamente il livello logico alto, mentre la seconda è destinata alla gestione del livello basso. La rete pull-up è formata da pMOSfet, che si accendono solo se la tensione presente al gate, misurata rispetto al source, è minore della tensione della soglia. La rete pull-down è costituita da soli nMOSfet, che si accendono solo se la tensione presente al gate è maggiore della tensione di soglia. A partire dall'invertitore si costruiscono le porte logiche e quindi i circuiti integrati.

Il CMOS funziona tramite un meccanismo d'alternanza tra due transistor, un MOSFET a canale P e un MOSFET a canale N. Quando il MOSFET a canale N conduce, il MOSFET a canale P si blocca e quando il MOSFET a canale P conduce il MOSFET a canale N si blocca. Grazie alla tensione minima in entrata, la corrente trasversale rimane zero.

Il CMOS è caratterizzato da due peculiarità che ne hanno permesso la rapida diffusione. Questa tecnologia di circuito è immune al rumore elettronico e inoltre il CMOS consuma una quantità minima di corrente e per questo motivo il calore prodotto da questo componente rispetto ad altre componenti del computer è praticamente nullo.

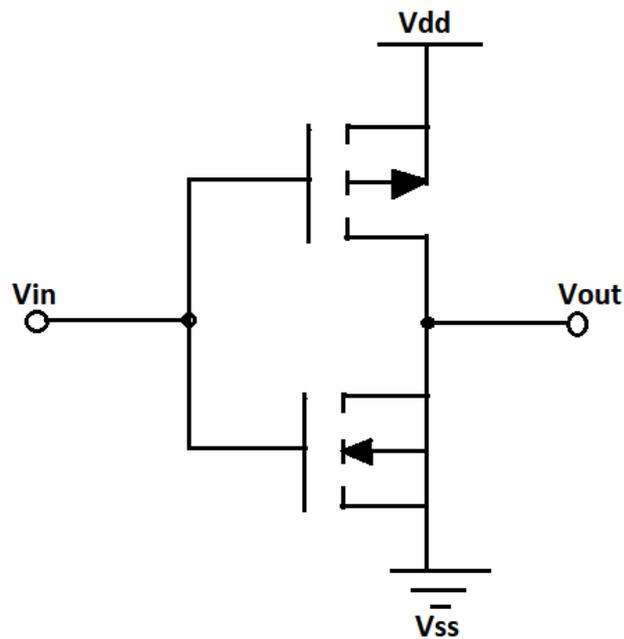


Fig 1.8

## CAPITOLO 2

### 2.1 Transistor organici ad effetto di campo

In questo capitolo andremo a parlare dei transistor organico ad effetto di campo meglio OFET. I transistor organico ad effetto di campo ha attirato molto interesse nelle aree della chimica, fisica, dei materiali e della microelettronica sin dalla prima scoperta degli OFET basati su semiconduttori organici. Per quanto riguarda la parte tecnologica, gli OFET sono considerati una componente molto importante per quanto riguarda i circuiti integrati organici.

Oltre a fornire una buona base per comprendere alcune questioni di base nell'elettronica, gli OFET hanno dimostrato le loro numerose potenzialità del segnale.

### 2.2 La struttura di OFET

La struttura di OFET più comunemente utilizzata è il gate inferiore con gli elettrodi di drain e source superiori, poiché questa geometria è simile al transistor al silicio a film sottile (TFT) che utilizza SIO conosciuto come dielettrico di gate e come dielettrico possono essere utilizzati anche polimeri organici.

Invece per quanto riguarda i materiali, gli OFET impiegano molti materiali di strato semiconduttore attivo, come rubrene, tetracene, tetracianochinodimetano e polimeri come politiofene e pentacene. Questi materiali si differenziano uno dall'altro in base alla mobilità del portatore. Per esempio, il rubrene ha una mobilità di 20-40  $\text{cm}^2$ , invece il pentacene ha una mobilità inferiore da 10 a 100 volte inferiore rispetto al rubrene. Mentre il tetratriafulvalene policristallino determina una mobilità nell'intervallo 0,1-1,4  $\text{cm}^2$ . Questi dispositivi sopra menzionati si basano su una conducibilità di tipo P.

### 2.3 Storia

Nel 1986 i ricercatori di Mitsubishi Electric hanno fabbricato il primo transistor organico ad effetto di campo con un materiale organico chiamato politiofene ovvero un polimero di molecole di tiofene. Nella figura 2.1 è riportato la composizione del politiofene. Questo polimero è in grado di condurre la carica eliminandola nei semiconduttori a ossido di metallo.

Molti OFET sono progettati sulla base del modello a transistor a film sottile (TFT). Questo modello sarà oggetto di studio nel paragrafo successivo.

I FET organici sono stati studiati in particolare negli ultimi anni per l'uso nell'elettronica che richiede flessibilità, leggerezza e facilità di progettazione. La flessibilità è uno dei vantaggi più importanti dei FET organici flessibili ad alte prestazioni. Invece per quanto riguarda i FET a film sottile e a cristallo singolo con molecole di fenacene hanno mostrato valori di mobilità molto elevati e funzionamento a bassa tensione.

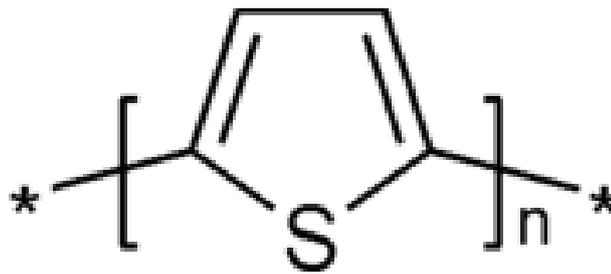


Fig 2.1

## 2.4 Transistor a film sottile (OTFT)

Un OTFT (organic thin film transistor) è un transistor a film sottile composto da materiali organici. Questi materiali organici sono dei polimeri che hanno la proprietà di comportarsi come dei veri e propri semiconduttori. Normalmente il substrato di un transistor è il materiale semiconduttore del transistor stesso. Nel caso dei transistor a film sottile il substrato è non conduttivo e serve solo per supportare i film che costituiscono la struttura fisica dei transistor. Di solito questi substrati sono realizzati in vetro o in plastica. In questo studio è stato fatto riferimento a due tipi di substrati in plastica: il polietilene tereftalato (PET) e il polietilene naftalato (PEN). Questi due tipi di substrati si differenziano per spessore e colore.

Nella figure 2.2 possiamo vedere il dispositivo di FET a film sottile (C<sub>14</sub>H<sub>29</sub>)<sub>2</sub>-piceni con un dielettrico di gate SiO<sub>2</sub> e nella figura 2.3 possiamo vedere un FET a film sottile organico fabbricato su PET.

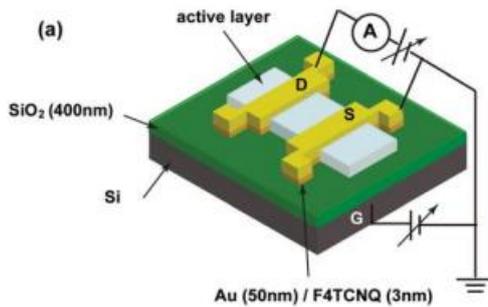


Fig 2.2: [1]

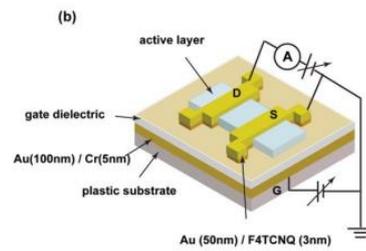


Fig 2.3: [1]

Le figure 2.4 e 2.5 mostrano le caratteristiche di trasferimento e di uscita per il FET a film sottile(C14H29)2-piceni formato su un substrato SIO2/SI. La tensione di drain VD è stata fissata a 80 e la corrente di drain aumenta applicando la tensione di gate negativa. Invece la mobilità è stata fissata a 3.4cm<sup>2</sup>. Inoltre, la capacità dell'area C0 per SiO2 di 400 nm di spessore era di 8,34 nF cm<sup>2</sup>.

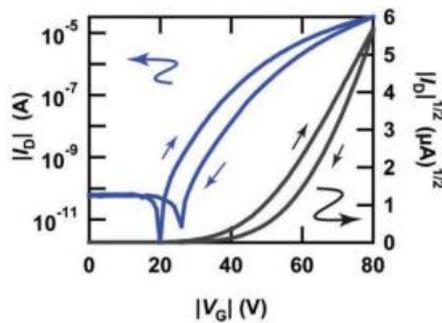


Fig 2.4: [1]

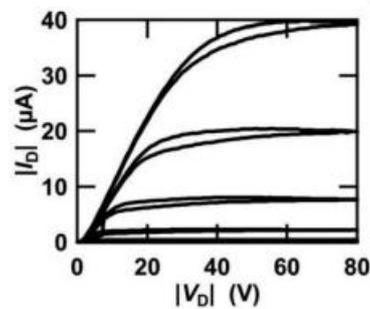


Fig 2.5: [1]

Nella figura 2.6 e 2.7 possiamo vedere le caratteristiche di trasferimento e di uscita per il FET a film sottile (C14H29)2-picene con un dielettrico di gate parilene formato su PET di spessore di 500nm. La VD tensione di drain è stata fissata a 100V e la corrente di drain assoluta aumenta la tensione di gate negativa VG. La

mobilità è stata fissata a  $7\text{cm}^2$ . Inoltre, la capacità dell'area C0 per SiO<sub>2</sub> di 1 nm di spessore era di  $2.98\text{nF cm}^2$ .

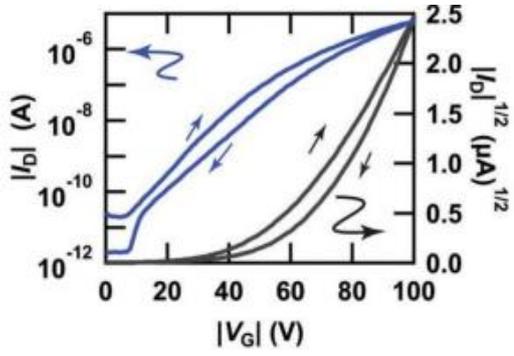


Fig 2.6: [1]

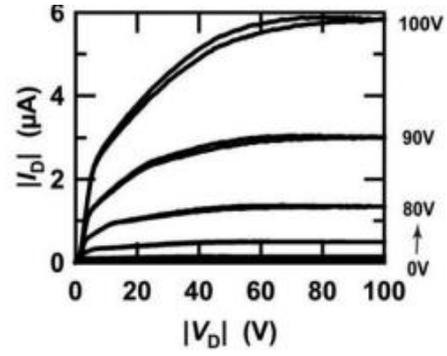


Fig 2.7: [1]

## CAPITOLO 3

### 3.1 Scenario

In questo capitolo verrà presentato il lavoro svolto durante il periodo di tirocinio. Il lavoro prevede il fitting dei modelli compatti per transistor organico da curve analitiche. Per il fitting delle curve ho preso in considerazione l'articolo DOI: 10.1039/c8tc05824e <https://doi.org/10.1039/C8TC05824E>, intitolato "Fabrication of flexible high-performance organic field-effect transistors using phenacene molecules and their application toward flexible CMOS inverters". Questo articolo studia in particolare i transistor organici ad effetto di campo, la loro composizione e il loro uso. Di questo articolo ho preso in considerazione alcuni grafici che rappresentano le caratteristiche generali dei transistor organici ad effetto di campo e da questi ho realizzato il fitting delle curve.

Cos'è il fitting delle curve o curve fitting? Il curve fitting non è altro che il processo di costruzione di una curva o di una funzione matematica che abbia la miglior corrispondenza ad una serie di punti assegnati. Le curve approssimanti possono essere usate come aiuto per visualizzare i dati, per rappresentare i valori di una funzione dove non sono disponibili i dati.

Durante il lavoro ho utilizzato diversi tipi di fitting come curve fitting polinomiale, curve fitting esponenziale e curve fitting gaussiana.

### 3.2 Materiali e programmi utilizzati

Prima di vedere il lavoro svolto andiamo a vedere i materiali utilizzati e programmi. Come accennato sopra, i grafici con cui ho lavorato sono stati presi dall'articolo "Fabrication of flexible high-performance organic field-effect transistors using phenacene molecules and their application toward flexible CMOS inverters".

Invece per quanto riguarda i programmi utilizzati sono:

- WEBPLOTDIGITIZER
- EXCEL
- MATLAB

WEBPLOTDIGITIZER è fondamentale perché permette di estrarre i dati numerici a partire dalla decodificazione delle immagini di grafici. Questo programma supporta grafici XY e gli algoritmi di estrazione automatica rendono molto facile l'estrazione di dati in modo rapido e preciso da un gran numero di punti. Nella figura 3.1 possiamo vedere meglio WEBPLOTDIGITIZER

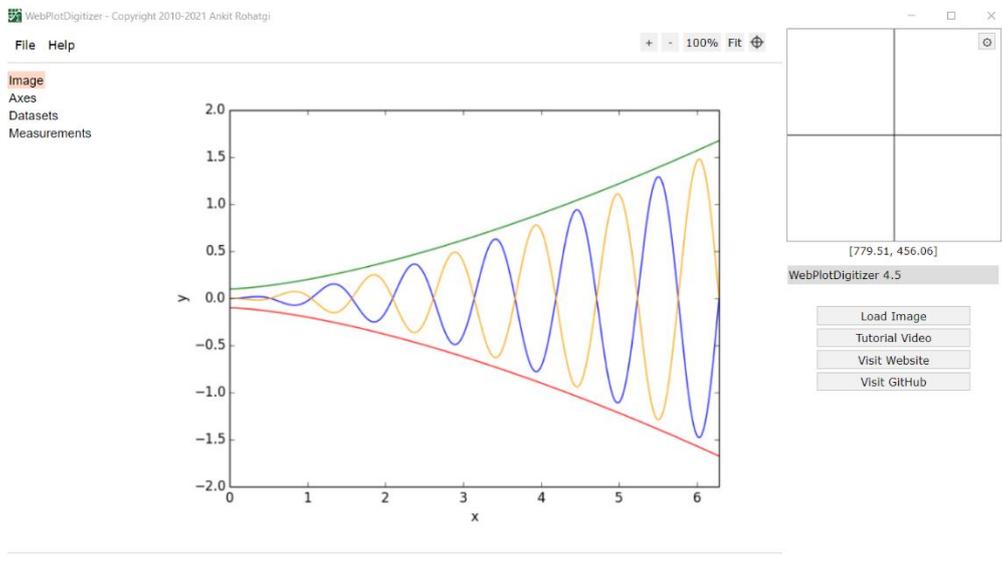


Fig 3.1

EXCEL è stato importante per il salvataggio e organizzazione dei dati numerici di grafici estratti da “WEBPLOTDIGITIZER”

L'utilizzo di MATLAB è stato importante perché grazie ai dati estratti sono riuscito a costruire delle curve molto simili alle curve di partenza dell'articolo che ho preso in considerazione, e a partire da queste curve sono riuscito a fare il fitting con diversi tipi di fitting.

Nel paragrafo successivo verrà mostrato lo svolgimento del lavoro, partendo dall'estrazione dei dati fino ad arrivare al fitting delle curve.

All'inizio vedremo i grafici che sono stati oggetto di lavoro, l'estrazione dei dati a partire da questi grafici e il loro salvataggio nel file Excel. Il passo successivo mostrerà la costruzione delle figure a partire dai dati estratti da WEBPLOTDIGITIZER salvati su Excel e alla costruzione dei grafici utilizzando MATLAB.

### 3.3 Figura 1

Passo 1.

Il primo passo consiste nel prendere in considerazione alcuni grafici da cui estrarre i dati. I grafici che ho preso in considerazione sono quattro tipi di grafici con ognuno caratteristiche diverse.

Quando parliamo di caratteristiche diverse parliamo di come è stato costruito il dispositivo FET organico. Come caratteristiche possiamo considerare la mobilità del dispositivo, la lunghezza (L), la larghezza (W) e la tensione VD.

Nella figura 3.2 possiamo vedere il primo grafico utilizzato. Questo grafico rappresenta la curva di trasferimento del FET a film sottile (C14H29)2-picene con il dielettrico di gate SIO2, con tensione VD a 80V, mobilità di 3.4 cm<sup>2</sup> e spessore SIO2 di 8.34nf cm.

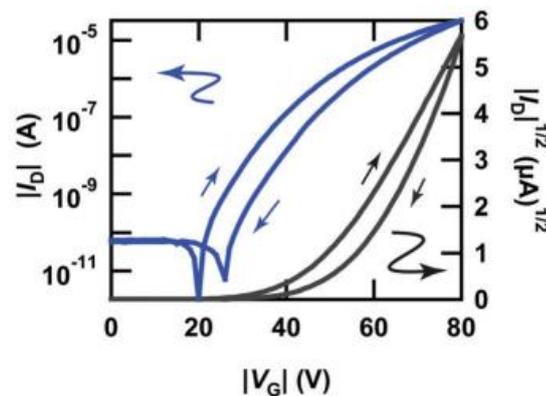


Fig 3.2: [1]

Passo 2.

Una volta deciso su quale grafico andremo a lavorare, il passo successivo consiste nell'estrarre i dati a partire dal grafico della Fig-3.2. Come accennato, sopra per estrarre i dati numerici dalle curve del grafico della figura (Fig-3.2) è stato utilizzato il programma "WEBPLOTDIGITIZER".

Prima di tutto ho salvato l'immagine del grafico nel formato PNG per poi caricarla e successivamente elaborarla su "WEBPLOTDIGITIZER". Una volta caricata l'immagine del grafico della figura 3.2, il passo successivo è quello di stabilire gli assi XY. Nel nostro caso l'asse X va da 0 a 80 e l'asse Y va da 10<sup>-11</sup> a 10<sup>-5</sup>. Nella figura 3.3 possiamo vedere l'allineamento degli assi.

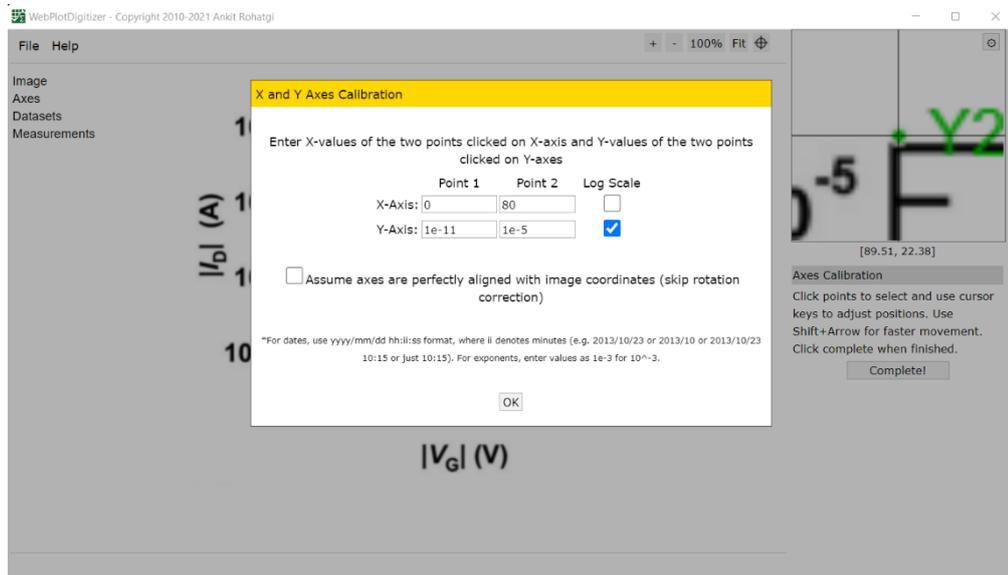


Fig 3.3

Come possiamo vedere nella figura 3.4, l'estrazione dei dati si basa sull'allineamento dei punti nelle curve d'interesse. L'estrazione si può fare in due modi: Automatico o Manuale. Durante il lavoro ho utilizzato l'estrazione manuale perché più semplice per lavorare su EXCEL.

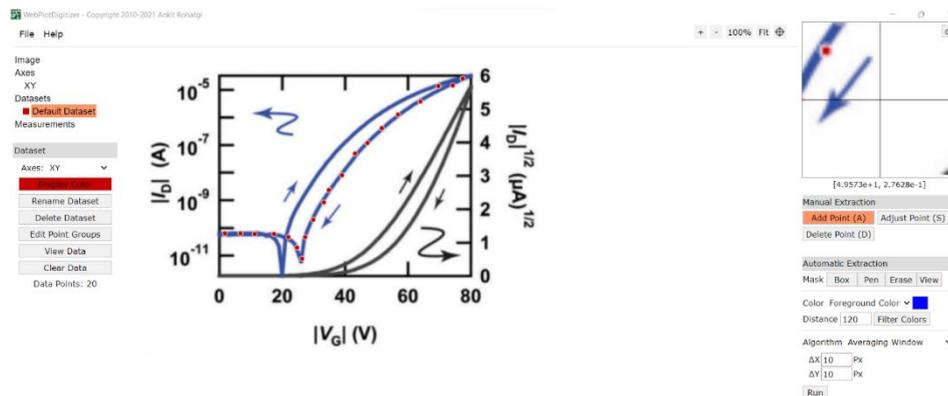


Fig 3.4: [1]

Passo 3.

Dopo aver allineato i punti nella figura 3.4, possiamo notare il risultato dell'estrazione manuale riportato su EXCEL (fig 3.5).

Le colonne A-B rappresentano i dati per quanto riguarda la prima curva della FIG 3.2 partendo dall'alto verso basso.

Le colonne C-D rappresentano i dati per quanto riguarda la seconda curva della FIG 3.2 partendo dall'alto verso basso.

Le colonne E-F rappresentano i dati per quanto riguarda la terza curva della FIG 3.2 partendo dall'alto verso basso.

Le colonne G-H rappresentano i dati per quanto riguarda la quarta curva della FIG 3.2 partendo dall'alto verso basso.

Invece VG rappresenta l'asse X e ID rappresenta l'asse Y.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	VG	ID	VG2	ID2	VG3	ID3	VG4	ID4
2	0.3960396039603893	3.97993736762082e-11	0.3960396039603893	3.97993736762082e-11	0.559978	0.04983	0.27714	0.03811
3	1.9801980198019749	4.210960698619324e-11	1.9801980198019749	4.210960698619324e-11	2.38113	0.05040	2.23769	0.01344
4	3.5643564356435604	4.2061633861577e-11	3.5643564356435604	4.2061633861577e-11	3.78217	0.05084	4.33295	0.03939
5	4.950495049504951	4.201970221229024e-11	5.148514851485146	4.4503184535463573e-11	5.46342	0.05136	6.01508	0.00199
6	6.53465346534653	4.44588188807145e-11	6.53465346534653	4.44588188807145e-11	7.42488	0.05197	8.24891	0.04063
7	8.514851485148512	4.191206981931202e-11	8.118811881188115	4.440816943012381e-11	9.24591	0.06495	10.90745	0.02882
8	10.297029702970292	4.696584908091238e-11	10.297029702970292	4.4338620638883854e-11	11.20769	0.05314	13.00786	0.00420
9	12.475247524752476	4.426918076972752e-11	12.079207920792072	4.4281798106518974e-11	13.16977	0.02892	15.24555	0.00491
10	14.85148514851484	3.938754486670675e-11	14.257425742574249	4.4212447228656625e-11	16.11196	0.02983	17.75781	0.05628
11	17.227272727272725	2.783660947159817e-11	16.237623762376238	4.414949523080003e-11	18.07341	0.03044	19.30008	0.01883
12	18.415841584158407	1.6567044908898558e-11	18.217821782178206	3.929225290213469e-11	20.45550	0.01876	20.97577	0.04465
13	19.009909909909905	9.312352478492343e-12	20.59405940594059	3.300383114004429e-11	22.55642	0.04425	22.23833	0.00712
14	19.2079207920792	4.943078696868963e-12	22.772727272727268	2.3328330709197322e-11	25.07829	0.04503	23.35461	0.03276
15	19.405940594059402	2.7793013832167995e-11	23.960396039603957	1.557802427424906e-11	26.89901	0.07043	24.61331	0.03316
16	19.80198019801979	1.753120956228443e-12	24.95049504950495	8.26424093909732e-12	28.99962	0.10832	26.00929	0.05888
17	19.999999999999993	9.85711900900621e-13	25.94059405940594	3.907451213653883e-12	30.96045	0.13376	27.40785	0.05933
18	20.39603960396039	1.3919583405732788e-12	26.138613861386133	9.264706872641084e-12	32.78117	0.15916	29.08869	0.03457
19	20.39603960396039	2.4752908566734086e-12	26.534653465346523	1.5549195385966937e-11	35.02220	0.18469	30.48467	0.06030
20	20.59405940594059	4.154936170876522e-12	26.930693069306926	2.928088226936359e-11	37.82206	0.27246	32.16680	0.02290
21	20.59405940594059	7.388637442695682e-12	27.92079207920792	5.838143323230641e-11	40.34109	0.38498	34.40192	0.04889
22	20.990099009900987	1.3913634610690787e-11	29.108910891089103	1.0987615803822313e-10	43.42021	0.51009	36.77560	0.08757
23	20.990099009900987	2.2051624776875218e-11	30.09900990099009	1.9525135632231675e-10	45.37851	0.63485	38.73358	0.08819
24	21.386138613861384	4.15256875299536e-11	30.891089108910883	3.6757548137406793e-10	47.33648	0.77203	40.40928	0.11401
25	21.782178217821773	7.819753611278769e-11	32.47524752475247	9.222559911098866e-10	49.15499	0.88433	42.36211	0.16520
26	22.772727272727268	1.6515193382295257e-11	34.059405940594054	1.7352275553588313e-9	50.13192	1.03362	44.17509	0.21635
27	23.564356435643553	2.9351894557785834e-11	36.03960396039603	3.081325824492315e-9	51.53043	1.13338	45.56722	0.28001
28	24.95049504950495	5.214383517077353e-10	37.42574257425742	5.473995744412876e-9	52.78757	1.28275	47.38020	0.33116
29	25.94059405940594	9.815073685362838e-10	38.6138613861386	9.181912891594901e-9	53.90524	1.40725	48.90704	0.44543
30	26.930693069306926	1.7441513096989659e-9	39.8019801980198	1.5401459607433264e-8	55.16238	1.55662	50.85473	0.54720
31	28.136813681368131	3.0984963586177526e-9	41.188118811881175	2.43853342513735e-8	56.55931	1.71846	52.24171	0.66140
32	29.7029702970297	5.504499312060554e-9	42.574257425742566	3.860962153640387e-8	57.95624	1.88029	53.63126	0.75037
33	30.891089108910883	8.716588313763866e-9	43.96039603960394	6.11311233144314e-8	59.35222	2.07937	55.01825	0.86461
34	31.88118811881187	1.5489490360352768e-8	45.14851485148514	1.0253947490027872e-7	60.32852	2.25349	55.98566	0.97870
35	32.26732673267326	2.4524714504223438e-8	46.732673267326724	1.532484319944777e-7	62.14481	2.45270	56.95436	1.08016
36	34.85148514851485	3.882477172236985e-8	48.118811881188115	2.4264026481494015e-7	62.84099	2.62673	58.20277	1.18170
37	36.43564356435643	6.146301515699793e-8	49.900990099009896	3.8406606922338155e-7	64.09804	2.77610	59.02648	1.33369
38	37.623762376237615	9.732907014309878e-8	51.48514851485148	6.080102364224378e-7	65.21508	2.92543	59.71547	1.43506
39	38.8118811881188	1.5412436032828937e-7	53.06930693069307	9.08690194278311e-7	66.19075	3.12438	61.09730	1.59986
40	40.396039603960396	2.439923655613452e-7	54.45544554455444	0.0000014387411766952008	67.16768	3.27367	62.34186	1.73933
41	41.98019801980198	3.862612913715628e-7	56.237623762376224	0.000002149937042986476	68.00451	3.42291	63.02699	1.87863
42	43.56435643564355	5.77279504312082e-7	58.01980198019802	0.0000032126899289994053	69.40144	3.58475	63.71084	2.03057
43	45.34653465346535	9.137538249616656e-7	59.2079207920792	0.0000042805297990496845	69.95774	3.74632	64.53840	2.14463
44	47.52475247524752	0.0000015316111342609	60.396039603960308	0.000005083071721939372	70.65510	3.87069	65.77909	2.32203
45	49.1089108910891	0.0000024267461323069	61.78217821782176	0.000006771627644833446	71.63203	4.01998	66.46422	2.46133
46	51.28712871287127	0.0000030477039104365	63.36633663366336	0.000008515262094149542	72.32970	4.13193	67.14936	2.60062
47	52.87128712871286	0.0000043000917565278	64.75247524752476	0.00001070939288722104	72.88759	4.23143	68.11420	2.74001
48	54.65346534653464	0.0000057269157226614	65.94059405940592	0.000013470805462573036	73.58400	4.39304	69.20732	2.99323
49	56.83168316831682	0.00000807681432229511	67.12871287128712	0.00001694424714093907	74.13999	4.56703	70.03103	3.14521
50	59.405940594059395	0.000012062453260781	68.51485148514848	0.000022572991025335295	75.39744	4.70399	71.27172	3.32262
51	61.18811881188119	0.0000151662675398916	69.70297029702968	0.000026805124072713134	75.81491	4.81586	72.50213	3.60117
52	62.970297029702955	0.000020198623877372	71.08910891089107	0.000031826190169241936	76.65363	4.89061	73.73125	3.89236
53	64.95049504950492	0.0000239719283135098	72.27272727272727	0.000042406438611386966	77.21152	4.99010	74.54852	4.10756
54	66.73267326732673	0.0000319261124957955	73.86138613861385	0.00005034059180670959	77.77004	5.06477	75.36451	4.33540
55	69.70297029702968	0.0000424832586659185	75.24752475247524	0.000056426764486268	77.90793	5.15172	76.45506	4.61391
56	77.02970297029702	0.0000751498672614954	77.02970297029702	0.00007514986726149544	78.74634	5.23889	77.13248	4.82907
57	78.41584158415839	0.0000892267448630225	78.41584158415839	0.00008922674486302251	79.16475	5.31351	78.36289	5.10762
58	79.80198019801978	0.00010001424968530121	79.80198019801978	0.00010001424968530128	80.00253	5.42551	79.59201	5.39881

fig. 3.5

Passo 4.

Una volta organizzati i dati in un file EXCEL, il passo successivo consiste nell'utilizzare "MATLAB" per costruire i grafici simili ai grafici di partenza. Nella figura 3.6 possiamo vedere il grafico ottenuto a partire dai dati della fig 3.5. In questo grafico si possono notare quattro curve ben distinte ottenute a partire dalle colonne EXCEL A-B, C-D, E-F, e G-H.

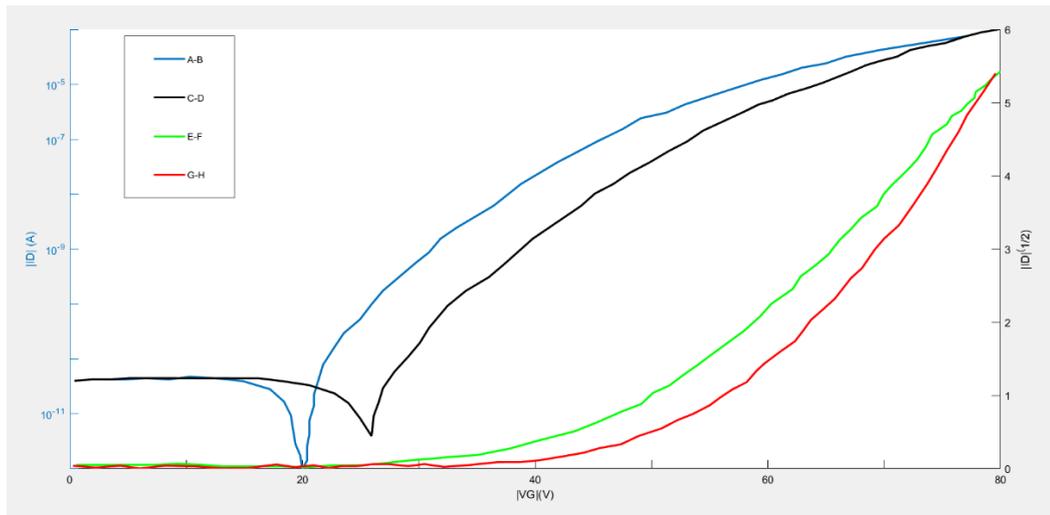


FIG 3.6

Passo 5.

L'ultimo passo consiste nel fitting delle curve a partire dal grafico costruito con i dati estratti. La figura a cui facciamo riferimento per eseguire il fitting è la FIG 3.6. Il fitting è stato fatto per ogni curva e il tipo di fitting utilizzato è stato il "curve fitting polinomiale".

In seguito, sarà dimostrato il fitting di tutte le quattro curve. Prima di procedere, è utile specificare che per le curve A-B e C-D non è stato possibile il fitting perché queste due curve richiedono funzioni personalizzate che non sono implementate di default nel fitter. Il risultato delle curve A-B e C.D è visibile nella figura 3.7

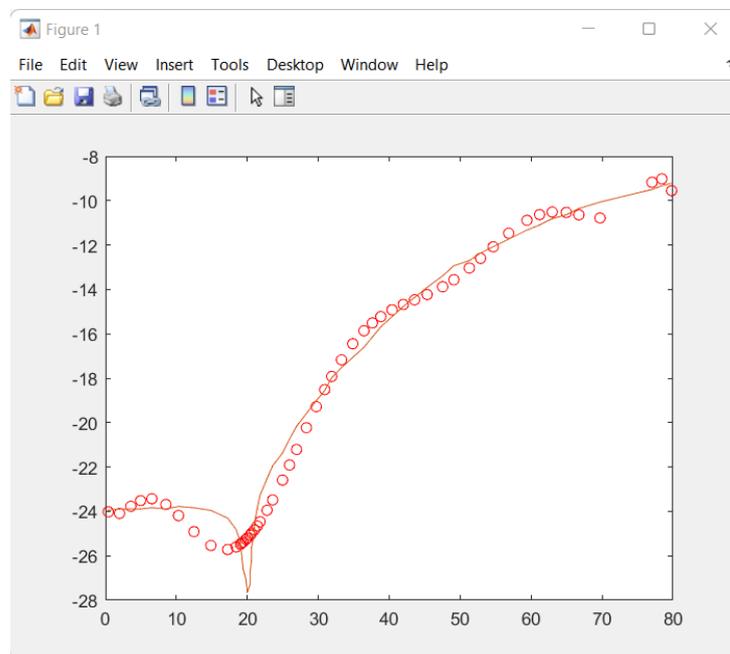


FIG 3.7

Per le curve E-F e G-H, il fitting è stato eseguito facendo uso della funzione polinomiale.

Nella figura 3.7 possiamo notare il fitting della curva G-H utilizzando il fitting polinomiale. In questo caso il grado del polinomio è di quinto grado e quindi avremo 6 coefficienti (P1, P2, P3, P4, P5, P6). Nella figura 3.8 possiamo notare la funzione e il risultato finale di fitting

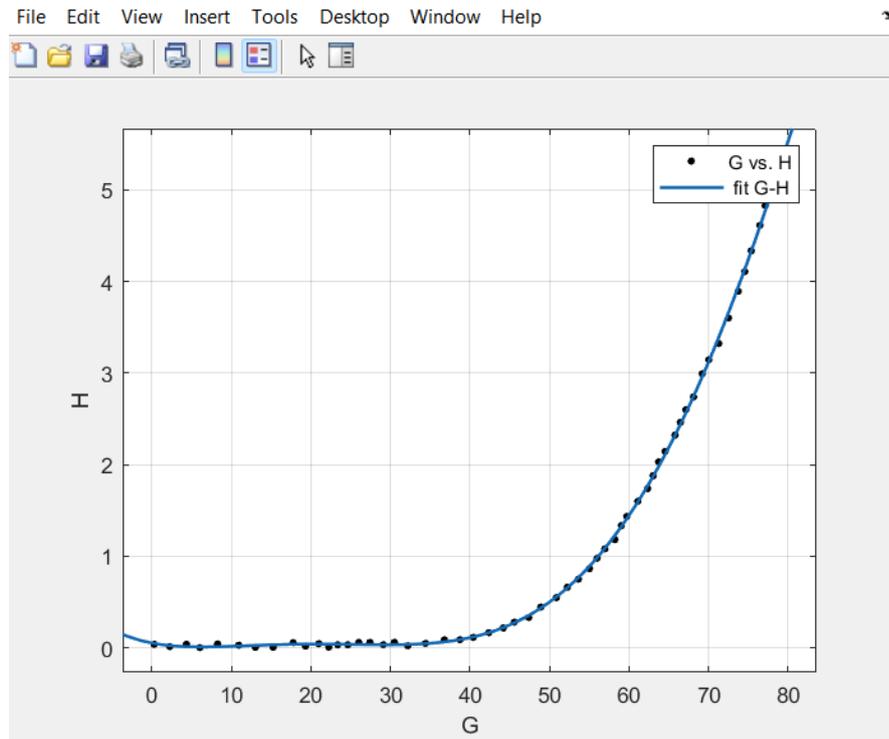


Figura 3.7

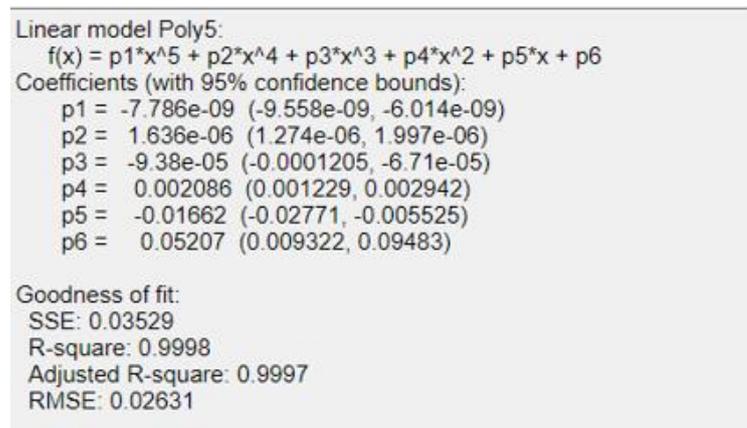


Figura 3.8

Stessa cosa possiamo vedere con la curva E-F

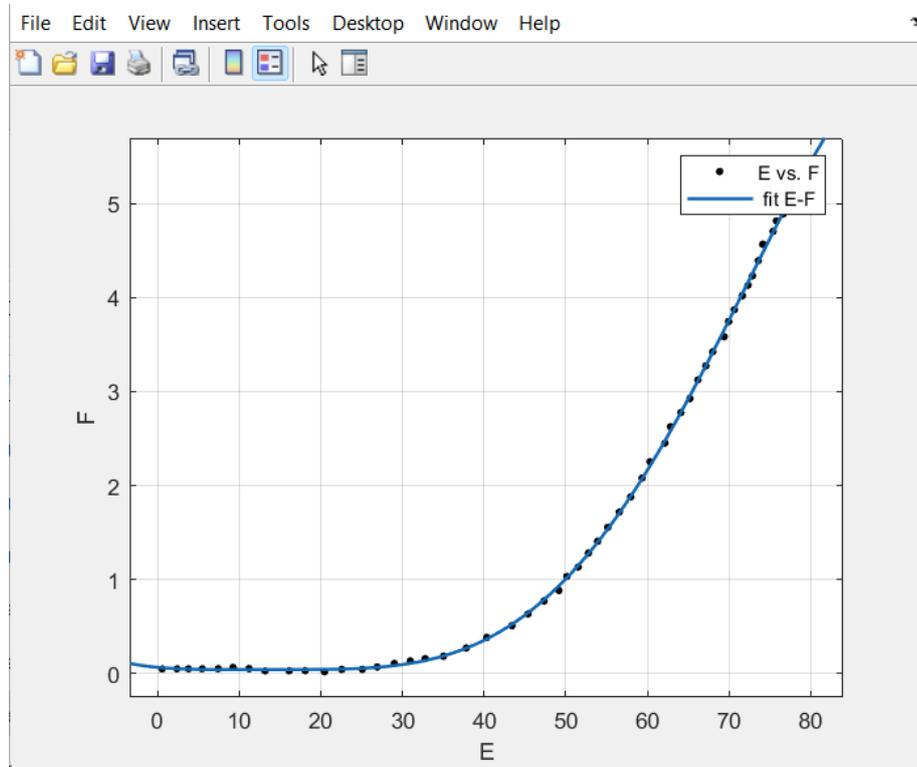


figura 3.9

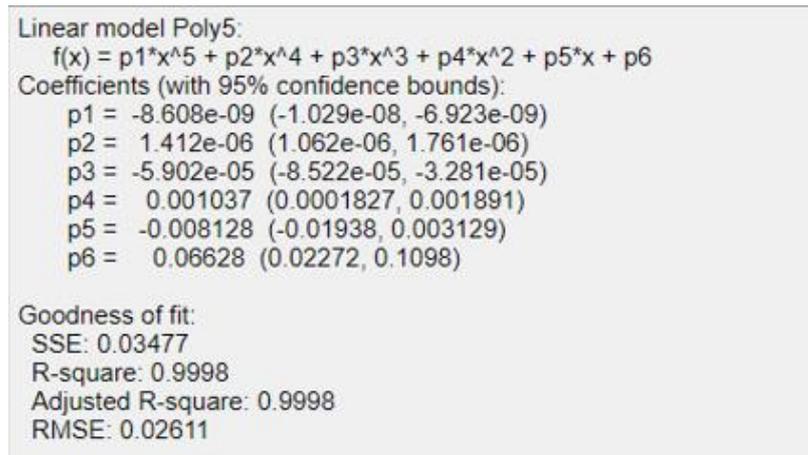


figura 3.10

### 3.4 Figura 2

In questo caso la figura rappresenta la curva di uscita del FET a film sottile(C14H29)2-picene con dielettrico di gate SIO<sub>2</sub>.

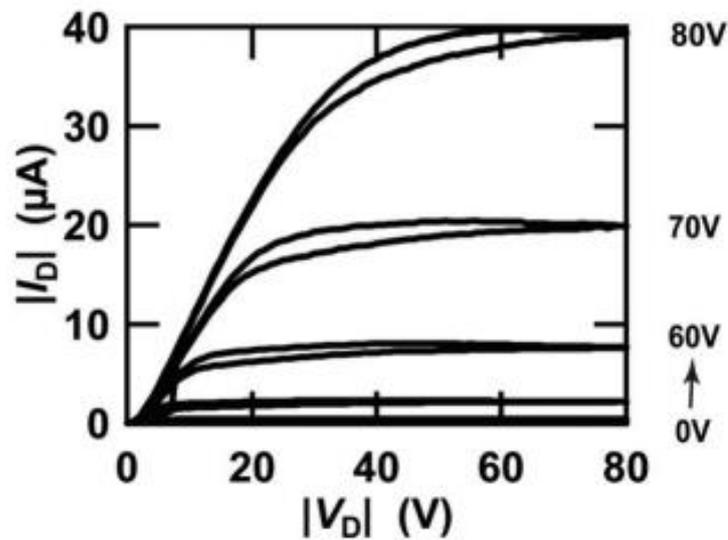


figura 3.11: [1]

Nella figura 3.12 possiamo vedere l'organizzazione dei dati numerici di ciascuna curva della figura 3.11.

Le colonne A-B rappresentano i dati per quanto riguarda la prima curva della FIG 3.11 partendo dall'alto verso basso.

Le colonne C-D rappresentano i dati per quanto riguarda la seconda curva della FIG 3.11 partendo dall'alto verso basso.

Le colonne E-F rappresentano i dati per quanto riguarda la terza curva della FIG 3.11 partendo dall'alto verso basso.

Le colonne G-H rappresentano i dati per quanto riguarda la quinta curva della FIG 3.11 partendo dall'alto verso basso.

Le colonne I-J rappresentano i dati per quanto riguarda la quarta curva della FIG 3.11 partendo dall'alto verso basso.

Le colonne U-V rappresentano i dati per quanto riguarda la sesta curva della FIG 3.11 partendo dall'alto verso basso.

Le colonne W-X rappresentano i dati per quanto riguarda la settima curva della FIG 3.11 partendo dall'alto verso basso.

VD rappresenta l'asse X e ID rappresenta l'asse Y.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	U	V	W	X
1	VD	ID	VD2	ID2	VD3	ID3	VD4	ID4	VD5	ID5	VD6	ID6	VD7	ID7
2	0.13490	0.08333	0.13378	0.08333	0.26756	0.08306	0.93926	0.33501	0.53568	0.00084	0.00000	0.10693	0.34707	0.32386
3	0.93981	0.41834	1.20737	0.41890	2.14551	0.67086	1.74473	0.75335	1.20905	0.66891	1.39738	0.65691	1.38829	0.64677
4	2.14774	1.00419	2.28097	0.92114	3.48667	1.17365	2.95266	1.33920	1.88074	1.08697	2.44541	1.31264	2.77657	1.07733
5	3.08756	1.50615	3.22134	1.50643	4.02681	1.92478	3.75813	1.75755	2.68733	1.67199	3.49345	1.75215	4.16486	1.39978
6	3.76036	2.09089	3.89582	2.34117	4.56695	2.67590	4.16394	2.42506	3.22580	2.17311	4.01747	2.40434	5.20607	1.61459
7	4.56695	2.67590	4.83897	3.34313	5.10598	3.26036	4.96997	2.92674	3.89916	2.84118	5.24017	3.06125	6.07375	1.82963
8	5.10598	3.26036	5.51234	4.01120	6.04802	4.09565	5.50900	3.51120	4.57364	3.67592	6.28821	3.71698	7.28850	2.04420
9	5.91368	4.01204	5.91759	4.59538	6.85684	5.01401	6.04691	3.92898	5.51457	4.34454	7.68559	4.26697	8.32972	2.15091
10	6.45271	4.59650	6.99452	5.59763	7.66510	5.84902	6.85071	4.09733	6.45884	5.51318	8.90830	5.03198	9.37093	2.36571
11	6.72362	5.09706	7.26766	6.43153	8.60770	6.76765	7.38918	4.59845	7.40088	6.34847	10.65502	5.47622	10.93275	2.25550
12	7.12830	5.59790	7.94270	7.34960	9.41485	7.43600	8.32843	5.01707	8.47671	7.18405	12.40175	5.81235	11.97397	2.25409
13	7.66845	6.34903	8.61773	8.26767	9.82009	8.02018	9.13391	5.43542	9.28274	7.68573	13.79913	5.82175	13.18872	2.25245
14	8.20970	7.26682	9.29389	9.35242	10.89536	8.77242	10.07428	6.02071	10.08877	8.18741	15.54585	6.04981	14.40347	2.25081
15	8.74984	8.01795	10.23481	10.02104	11.70195	9.35743	11.28109	6.43989	10.89703	9.02242	17.11790	6.16854	15.44469	2.35751
16	9.69300	9.01991	10.90818	10.68911	12.37587	10.1088	12.62225	6.94268	11.97174	9.69133	18.68996	6.17916	16.48590	2.35610
17	10.36692	9.77132	11.44776	11.35690	13.31680	10.7774	13.82739	7.11186	12.64622	10.52607	20.08734	6.29671	17.87419	2.35422
18	10.90985	10.93912	11.98790	12.10803	13.85638	11.4452	15.16688	7.36465	13.72093	11.19497	21.31004	6.52118	19.08894	2.35258
19	11.58489	11.85719	12.52637	12.60915	14.66353	12.1136	16.37091	7.36716	14.52807	11.86332	22.18341	6.52706	20.30369	2.35094
20	12.52693	12.69248	13.06596	13.27694	15.20255	12.6980	17.57494	7.36967	15.73768	12.69917	23.05677	6.53295	21.34490	2.34953
21	13.06930	13.77695	13.60610	14.02807	15.87592	13.3661	18.91275	7.37246	16.81294	13.45141	24.10480	6.64818	22.38612	2.34813
22	13.61056	14.69474	14.14735	14.94586	16.55151	14.3675	19.58166	7.37385	17.61953	14.03643	26.02620	6.66116	23.42733	2.34672
23	14.55148	15.36337	14.95506	15.69754	17.22488	15.0356	20.92002	7.45997	18.96125	14.62256	27.59825	6.77982	24.64208	2.34508
24	15.49910	17.03201	15.49520	16.44867	18.16469	15.5375	21.72271	7.46164	19.90162	15.20785	28.82096	6.78815	25.68330	2.34367
25	16.71038	18.11787	16.16968	17.28341	19.50696	16.2070	22.52540	7.46331	21.64300	15.54481	30.39301	6.90688	27.07158	2.34180
26	17.38542	19.03594	16.97794	18.11842	20.31411	16.8753	23.32976	7.71499	23.25172	16.04816	31.79039	7.02445	28.28633	2.34015
27	17.92444	19.62040	17.78676	19.03678	21.11992	17.2103	24.40001	7.71722	24.85876	16.30151	33.17737	7.14198	29.15400	2.33898
28	18.72992	20.03874	18.72992	20.03874	22.46018	17.7131	25.20269	7.71889	25.79746	16.63680	34.23581	7.04095	30.54230	2.33711
29	19.59329	21.04043	19.59329	21.04043	24.20268	18.2168	26.27294	7.72112	27.26961	16.72320	35.28384	7.15614	31.58351	2.33570
30	20.07943	21.79155	20.61623	22.04267	25.94462	18.6371	27.34319	7.72335	28.47476	16.89238	36.15721	7.16204	32.79826	2.44216
31	20.75391	22.62629	21.29182	23.04408	27.15088	18.9729	28.01265	7.80808	29.67934	16.97822	37.37991	7.27841	34.01302	2.44052
32	21.56273	23.54464	22.36876	24.04632	28.62359	19.1426	29.08290	7.81031	30.88449	17.14740	38.25328	7.28431	35.22777	2.43888
33	22.33833	24.54605	23.44570	25.04857	29.69495	19.3115	30.15315	7.81254	32.08963	17.31657	39.47598	7.29258	36.26898	2.32937
34	23.04714	25.46440	24.12074	25.96664	30.76632	19.4804	30.82206	7.81393	33.29422	17.40242	40.87336	7.30216	37.48373	2.32772
35	24.25675	26.30026	25.33034	26.80249	32.50603	19.5674	31.75853	7.81588	34.36503	17.48798	42.27074	7.31148	38.35141	2.32655
36	25.19768	26.96888	26.27183	27.55445	34.11196	19.6541	33.36390	7.81923	35.57017	17.65716	43.14410	7.42547	39.73970	2.34089
37	26.40895	28.05474	27.34765	28.39003	35.85223	19.8244	34.16603	7.73757	36.90854	17.74328	44.36681	7.43375	41.30152	2.43067
38	27.21721	28.88976	28.69048	29.14283	37.19171	20.0772	34.97039	7.98924	38.11369	17.91246	45.76419	7.55128	43.03688	2.42833
39	27.62413	29.72394	29.90120	30.14535	38.79708	20.0805	36.04175	8.15814	39.85396	18.08275	47.33624	7.56196	45.11931	2.42551
40	28.43351	30.72562	31.37781	30.89842	40.40246	20.0838	37.11144	8.07704	41.45933	18.08609	48.90830	7.57252	46.68113	2.31530
41	29.64144	31.31147	32.58630	31.56761	42.00895	20.2539	38.58303	8.08010	42.93259	18.33916	50.65502	7.80054	48.41649	2.52917
42	30.71559	31.89704	33.12421	31.98540	43.61432	20.2572	40.05518	8.16650	44.80720	18.59307	51.70306	7.80767	49.63124	2.41942
43	31.38784	32.39844	33.79479	32.23679	44.81835	20.2597	41.52622	8.08623	46.67958	18.51364	52.57642	7.92165	51.36659	2.30896
44	32.32932	33.15041	34.59914	32.48847	46.42428	20.3464	43.26705	8.33986	48.15284	18.76671	53.44978	7.43375	52.58134	2.41543
45	33.13480	33.56875	35.53840	32.90709	48.16399	20.4334	45.00564	8.26015	49.35688	18.76921	54.67249	8.15201	53.44902	2.41426
46	34.07461	34.07071	36.20842	33.07515	49.76937	20.4367	46.87914	8.34738	50.42935	19.10478	55.37118	8.15673	54.31670	2.41309
47	35.01387	34.48933	37.20900	33.41072	50.70583	20.4386	47.94883	8.26628	51.63338	19.10729	56.24454	8.16265	55.53145	2.30334
48	35.68612	34.99073	38.48772	33.82990	51.77608	20.4409	49.41931	8.10268	52.70363	19.10952	57.64192	7.95586	57.09328	2.30123
49	36.75971	35.49297	39.42753	34.33186	52.71255	20.4428	50.48956	8.10491	53.90766	19.11203	59.03930	7.96530	58.30803	2.29958
50	38.10142	36.07910	40.76757	34.66799	53.78280	20.4451	51.96115	8.10797	55.64793	19.28232	59.56332	8.07695	59.69631	2.29771
51	39.17390	36.41467	42.10705	34.92078	54.98683	20.4476	53.56652	8.11132	56.85252	19.36816	60.78603	8.08521	61.25813	2.40371
52	40.51394	36.75079	43.31387	35.33996	56.05708	20.4498	55.03811	8.11438	58.32411	19.37123	61.65939	8.09111	62.81996	2.40159
53	41.98888	37.25386	44.25201	35.59191	56.99355	20.4517	56.37592	8.11717	59.66248	19.45735	62.53275	8.09701	64.20824	2.29161
54	43.19514	37.58971	45.32393	35.84414	57.93002	20.4537	57.57940	8.03634	60.46517	19.45902	63.23144	8.20984	65.07592	2.29044
55	44.80219	37.84306	46.52852	35.92999	59.13405	20.4562	58.51587	8.03829	61.40219	19.54431	63.93013	8.21456	66.29067	2.39690
56	45.87411	38.09529	47.46833	36.43195	60.73942	20.4595	59.58667	8.12386	62.33866	19.54626	64.97817	8.22165	67.33189	2.39550
57	46.94659	38.43086	48.53858	36.43418	62.74558	20.3804	60.25558	8.12525	63.40891	19.54849	65.67686	8.22633	68.19957	2.28622
58	48.01739	38.51642	49.74428	36.68669	64.61796	20.3010	61.19205	8.12720	64.34538	19.55044	66.72489	8.23345	68.72017	2.28551
59	49.49177	38.93616	50.81676	37.02226	65.82087	20.1368	62.26229	8.12943	65.01484	19.63517	67.42358	8.34628	69.41432	2.28458
60	51.63338	39.10729	52.15680	37.35838	67.15868	20.1396	63.33143	7.96499	66.08621	19.80407	68.12227	8.13476	69.93492	2.39198
61	52.83909	39.35980	53.76162	37.27839	68.09515	20.1415	64.13412	7.96667	66.88889	19.80574	68.64629	8.13833	70.80260	2.39081
62	55.51527	39.44871	55.50189	37.44868	68.89784	20.1432	64.93680	7.96834	67.55724	19.72380	69.51965	8.14422	71.49675	2.38987
63	57.12287	39.78539	57.10838	37.61870	69.83375	20.0618	65.87271	7.88695	68.22559	19.64186	70.74236	8.15248	72.36443	2.28059
64	60.33362	39.79208	58.31296	37.70454	70.36887	20.0629	66.94240	7.80585	69.16150	19.56047	71.09170	8.15484	73.05857	2.27965
65	62.20822	40.04599	60.05268	37.79150	71.03722	19.9810	68.01265	7.80808	70.09852	19.64576	71.61572	8.05028	73.7527	

Dopo aver organizzati i dati in un file EXCEL, il passo successivo è stato quello di costruire il grafico di partenza utilizzando MATLAB. In questo grafico si possono notare sette curve ben distinte ottenute a partire dalle colonne EXCEL A-B, C-D, E-F, G-H, I-J, U-V, W-X.

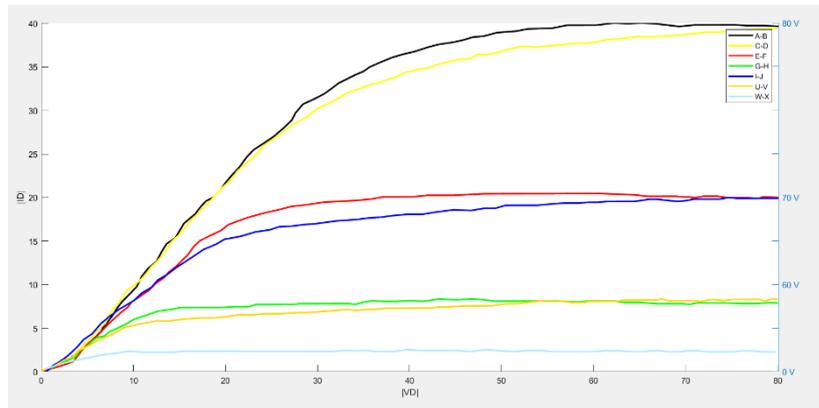


figura 3.13

Il prossimo passo è quello di trovare il fitting di tutte le curve. In questo caso ho utilizzato il “curve fitting polinomiale e esponenziale”.

Per il fitting della curva A-B è stato utilizzato “curve fitting polinomiale” di quinto grado (figura 3.14). Il risultato della funzione polinomiale di questa curva è visibile nella figura 3.15

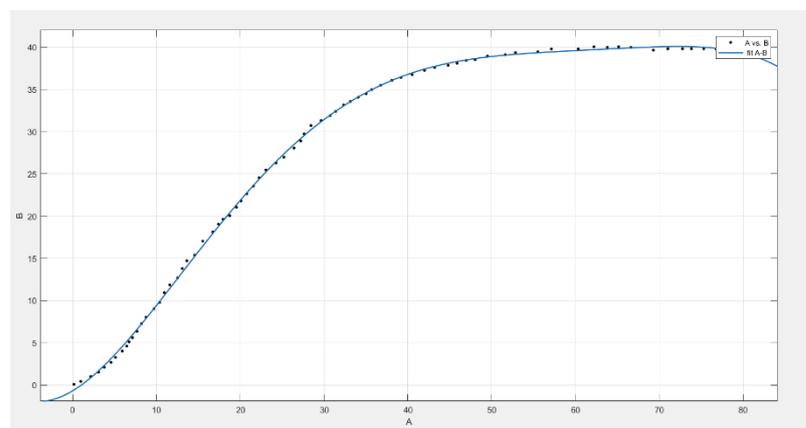


figura 3.14

```

Linear model Poly5:
f(x) = p1*x^5 + p2*x^4 + p3*x^3 + p4*x^2 + p5*x + p6
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = -1.245e-07 (-1.411e-07, -1.078e-07)
p2 = 2.84e-05 (2.512e-05, 3.169e-05)
p3 = -0.002257 (-0.002491, -0.002024)
p4 = 0.06129 (0.05412, 0.06845)
p5 = 0.5973 (0.5073, 0.6873)
p6 = -0.6827 (-1.034, -0.3315)

Goodness of fit:
SSE: 5.968
R-square: 0.9996
Adjusted R-square: 0.9995
RMSE: 0.2941

```

figura 3.15

Nella figura 3.16 è mostrato il fitting della curva C-D con “curve fitting polinomiale” utilizzando una funzione polinomiale di quinto grado e il risultato della funzione di questa curva è visibile nella figura 3.17

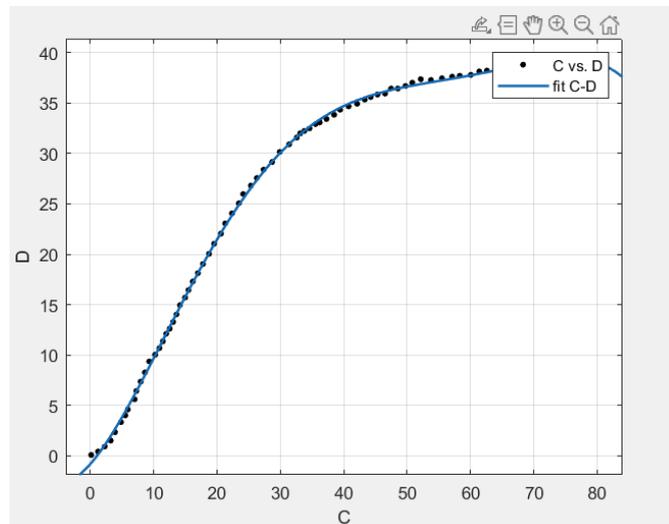


figura 3.16

```

Linear model Poly5:
f(x) = p1*x^5 + p2*x^4 + p3*x^3 + p4*x^2 + p5*x + p6
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = -1.259e-07 (-1.407e-07, -1.111e-07)
p2 = 2.767e-05 (2.475e-05, 3.059e-05)
p3 = -0.002086 (-0.002293, -0.00188)
p4 = 0.05152 (0.04521, 0.05784)
p5 = 0.716 (0.637, 0.795)
p6 = -0.8084 (-1.121, -0.4953)

Goodness of fit:
SSE: 4.501
R-square: 0.9996
Adjusted R-square: 0.9996
RMSE: 0.2554

```

figura 3.17

Nella figura 3.18 è mostrato il fitting della curva E-F con “curve fitting polinomiale” utilizzando una funzione polinomiale di quinto grado e il risultato della funzione polinomiale di questa curva è visibile nella figura 3.19

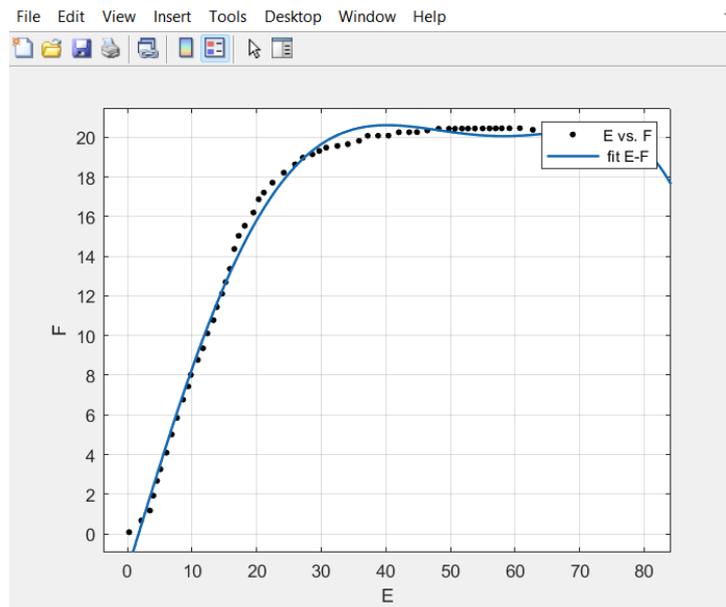


figura 3.18

```

Linear model Poly5:
f(x) = p1*x^5 + p2*x^4 + p3*x^3 + p4*x^2 + p5*x + p6
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = -7.978e-08 (-1.053e-07, -5.423e-08)
p2 = 1.536e-05 (1.018e-05, 2.053e-05)
p3 = -0.0008888 (-0.001266, -0.0005111)
p4 = 0.003854 (-0.008107, 0.01581)
p5 = 1.05 (0.8952, 1.205)
p6 = -1.828 (-2.462, -1.193)

Goodness of fit:
SSE: 14.12
R-square: 0.995
Adjusted R-square: 0.9947
RMSE: 0.4523

```

figura 3.19

Nella figura 3.2 è mostrato il fitting della curva con “curve fitting polinomiale” utilizzando una funzione polinomiale di quinto grado e il risultato della funzione polinomiale di questa curva è presente nella figura 3.21

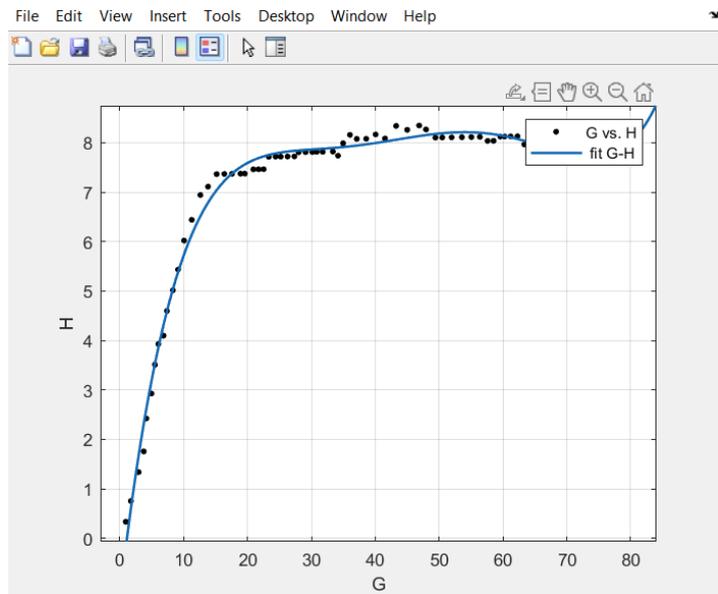


Figura3.20

```
Linear model Poly5:  
f(x) = p1*x^5 + p2*x^4 + p3*x^3 + p4*x^2 + p5*x + p6  
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
p1 = -2.453e-08 (-4.112e-08, -7.947e-09)  
p2 = 3.711e-06 (3.227e-07, 7.1e-06)  
p3 = -3.735e-05 (-0.0002876, 0.0002129)  
p4 = -0.01959 (-0.02765, -0.01153)  
p5 = 1.181 (1.075, 1.288)  
p6 = -1.866 (-2.284, -1.447)  
  
Goodness of fit:  
SSE: 5.901  
R-square: 0.9977  
Adjusted R-square: 0.9976  
RMSE: 0.2924
```

Figura 3.21

Nella figura 3.22 è mostrato il fitting della curva I-J con “curve fitting polinomiale” utilizzando una funzione polinomiale di quinto grado e il risultato finale della funzione polinomiale di questa curva è presente nella figura 3.23

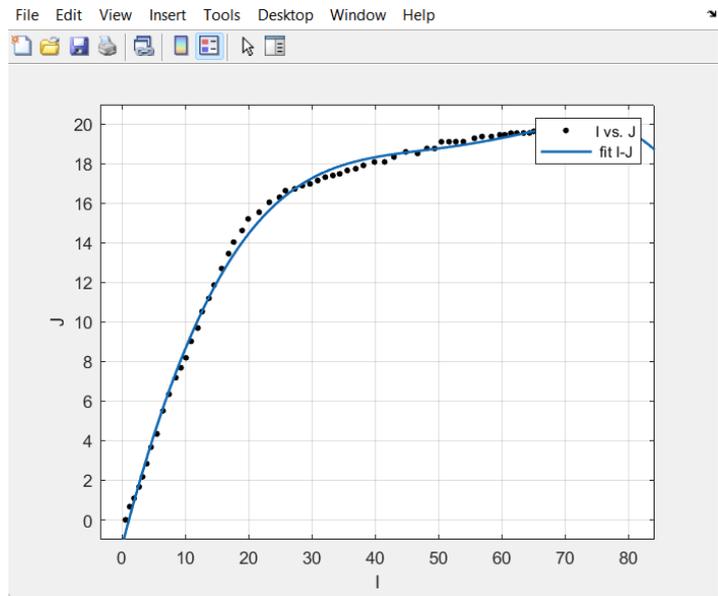


Figura 3.22

```

Linear model Poly5:
f(x) = p1*x^5 + p2*x^4 + p3*x^3 + p4*x^2 + p5*x + p6
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = -2.367e-08 (-4.024e-08, -7.107e-09)
p2 = 2.959e-06 (-3.692e-07, 6.288e-06)
p3 = 6.945e-05 (-0.0001711, 0.00031)
p4 = -0.0245 (-0.032, -0.01699)
p5 = 1.231 (1.136, 1.325)
p6 = -1.303 (-1.657, -0.95)

Goodness of fit:
SSE: 5.978
R-square: 0.9977
Adjusted R-square: 0.9975
RMSE: 0.2943

```

Figura 3.23

Nella figura 3.24 è mostrato il fitting della curva I-J con “curve fitting esponenziale” utilizzando una funzione esponenziale di secondo grado e il risultato finale di questa curva è presente nella figura 3.25

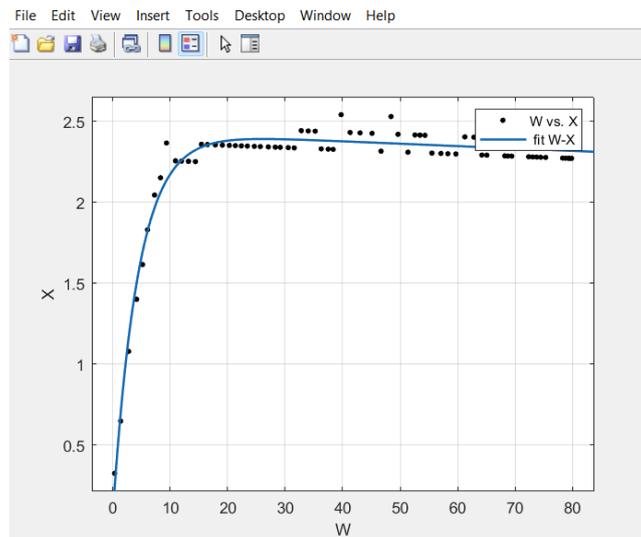


Figura 3.24

```

General model Exp2:
f(x) = a*exp(b*x) + c*exp(d*x)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a = 2.437 (2.386, 2.488)
b = -0.00063 (-0.001, -0.0002599)
c = -2.383 (-2.509, -2.257)
d = -0.2255 (-0.2479, -0.203)

Goodness of fit:
SSE: 0.3165
R-square: 0.9681
Adjusted R-square: 0.9667
RMSE: 0.06677

```

Figura 3.25

3.5 Figura 3

Questo grafico rappresenta il guadagno V-in per inverter CMOS fenace/PTCDC8 formato su un PEN spessa di 125mm. Invece Zro2 è stato utilizzato come dielettrico di gate. Le curve blu e rosse si riferiscono rispettivamente ai grafici avanti e indietro.

Il fitting utilizzato per questo tipo di grafico è diverso rispetto ai grafici precedenti. In questo caso abbiamo usato il “curve fitting gaussiana”.

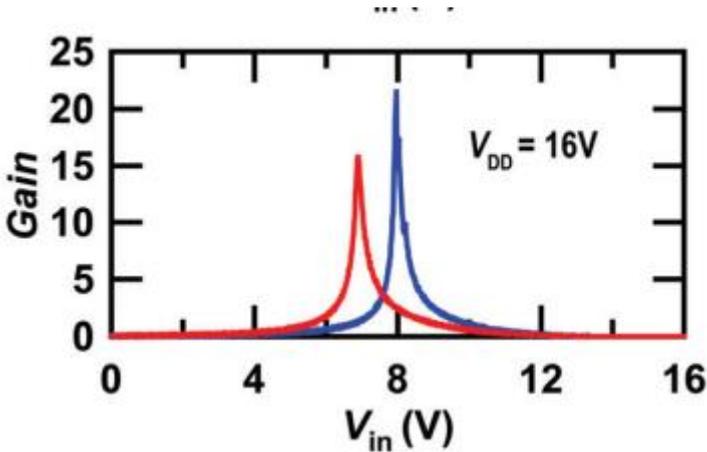


Figura 3.26: [1]

Dopo aver svolto lo stesso tipo di lavoro per l'estrazione dei dati dal grafico, abbiamo ottenuto i dati della figura 3.27

	A	B	C	D
1	Vin	Gain	Vin2	Gain2
2	0.16283	0.22181	2.32686	0.08726
3	0.56284	0.21762	2.56306	0.14072
4	0.94483	0.15768	2.83596	0.08192
5	1.41774	0.09880	3.18110	0.19016
6	1.81742	0.20446	3.41764	0.13175
7	2.25380	0.19989	3.70872	0.07277
8	2.69001	0.25124	4.01765	0.12546
9	3.18078	0.30202	4.36328	0.06591
10	3.70790	0.35242	4.69056	0.06248
11	4.28941	0.45818	4.96281	0.22741
12	4.79771	0.73249	5.25357	0.28029
13	5.30567	1.11867	5.54416	0.38910
14	5.74124	1.39374	5.88914	0.55326
15	6.12111	2.06090	6.19775	0.71781
16	6.37241	3.17683	6.47016	0.82681
17	6.51511	4.12612	6.74208	1.10360
18	6.60909	5.13191	7.01400	1.38039
19	6.65389	6.41773	7.26725	1.82516
20	6.74171	7.47945	7.44696	2.55035
21	6.75664	8.59786	7.53657	2.99684
22	6.78927	9.88387	7.67829	4.28170
23	6.80403	11.05821	7.71238	5.06435
24	6.81912	12.12069	7.76448	5.90272
25	6.81587	13.23929	7.81545	7.13262
26	6.79443	14.33809	7.82957	8.53068
27	6.86374	15.53186	7.84319	10.09653
28	6.94135	13.85319	7.85617	11.88610
29	6.94493	12.62273	7.86768	14.17905
30	7.02092	11.50336	7.88082	15.91269
31	7.02450	10.27290	7.87561	17.70245
32	7.08279	8.98594	7.88891	19.38017
33	7.14059	7.86676	7.90156	21.28160
34	7.21657	6.74740	7.96425	18.48452
35	7.32941	5.45986	8.04267	16.52621
36	7.44159	4.39604	8.10503	13.84099
37	7.64453	3.38720	8.09254	11.88362
38	7.91938	2.65725	8.15229	10.09329
39	8.28465	2.09414	8.20928	9.25377
40	8.57687	1.64365	8.34355	6.84744
41	8.97835	1.13608	8.49389	5.16801
42	9.45191	0.85147	8.56923	4.27236
43	9.96117	0.79020	8.68027	3.60006
44	10.41704	0.33800	8.79116	2.98368
45	10.92582	0.44452	8.99246	2.53414
46	11.39888	0.32770	9.19361	2.14053
47	11.79955	0.09978	9.44963	1.63449
48	12.21742	0.20726	9.75987	1.23974
49	12.58155	0.03566	10.03293	1.12502
50	13.09082	-0.02561	10.37904	0.89768
51	13.58174	-0.03076	10.76136	0.72588
52	14.10903	-0.03629	11.07062	0.66671
53	14.61798	0.01430	11.41625	0.60716
54	15.12725	-0.04697	11.74402	0.43594
55	15.63635	-0.05231	12.14420	0.37581
56	16.05487	-0.16855	12.61792	0.03527

Figura 3.27

Le colonne A-B rappresentano i dati per quanto riguarda la curva di colore rosso della FIG 3.26.

Le colonne C-D rappresentano i dati per quanto riguarda la curva di colore blu della FIG 3.26.

Dopo aver organizzati i dati in un file EXCEL, il passo successivo è stato quello di costruire il grafico di partenza utilizzando MATLAB. . In questo grafico si possono notare due curve ben distinte ottenute a partire dalle colonne EXCEL A-B e C-D.

Vin rappresenta l'asse X e Gain rappresenta l'asse Y

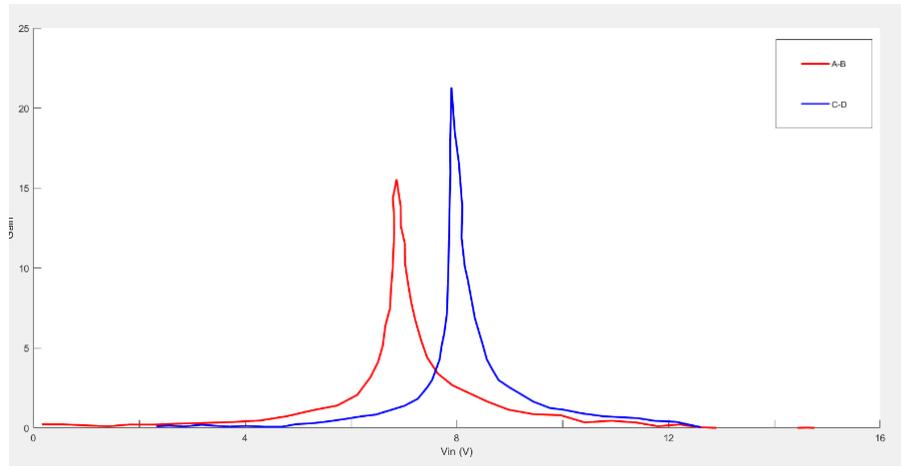


Figura 3.28

A partire dalla fig 3.28 si può trovare il fitting delle due curve. Come ho accennato all'inizio, in questo caso è stato utilizzato il “curve fitting gaussiana”.

Per il fitting della curva A-B è stato utilizzato curve fitting gaussiana di quattro termini (figura 3.29). il risultato finale della funzione gaussiana di questa curva è presente nella figura 3.30

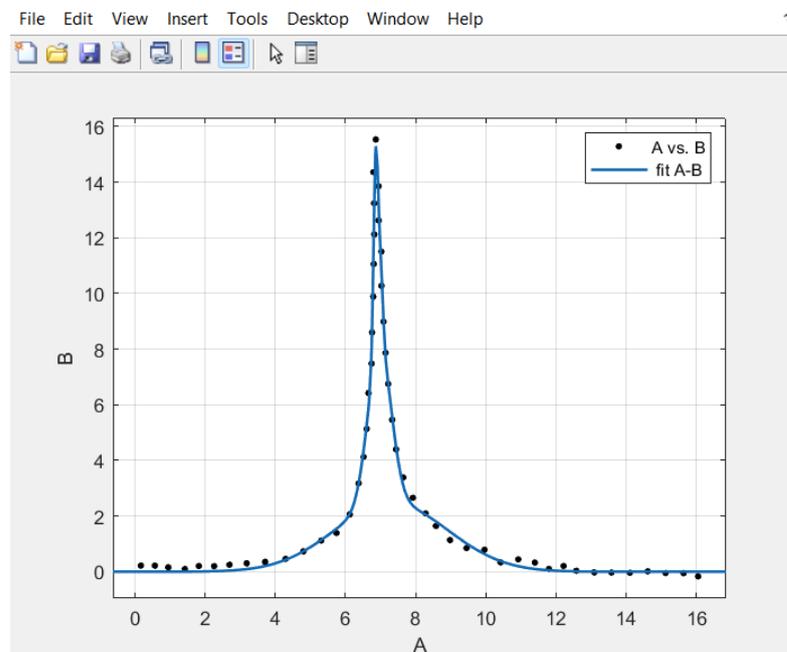


Figura 3.29

```

General model Gauss4:
f(x) =
  a1*exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2*exp(-((x-b2)/c2)^2) +
  a3*exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4*exp(-((x-b4)/c4)^2)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a1 = 7.213 (0.7172, 13.71)
b1 = 6.864 (6.781, 6.948)
c1 = 0.09198 (0.0326, 0.1514)
a2 = 2.574 (-3.039, 8.188)
b2 = 7.002 (6.749, 7.255)
c2 = 0.09681 (-0.08089, 0.2745)
a3 = 5.662 (3.848, 7.476)
b3 = 6.971 (6.916, 7.025)
c3 = 0.4654 (0.308, 0.6227)
a4 = 2.46 (1.447, 3.473)
b4 = 7.305 (6.83, 7.78)
c4 = 2.282 (1.486, 3.078)

Goodness of fit:
SSE: 15.38
R-square: 0.9876
Adjusted R-square: 0.9845
RMSE: 0.598

```

Figura 3.30

Anche per il fitting della curva C-D è stato utilizzato “curve fitting gaussiana” di quattro termini (figura 3.31). Il risultato finale della funzione gaussiana di questa curva è presente nella figura 3.32

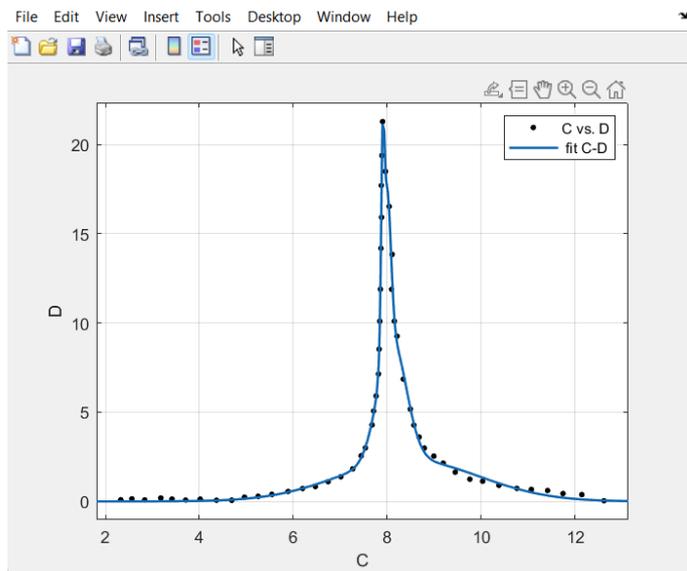


Figura 3.31

General model Gauss4:  
f(x) =  
a1\*exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2\*exp(-((x-b2)/c2)^2) +  
a3\*exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4\*exp(-((x-b4)/c4)^2)  
Coefficients (with 95% confidence bounds):  
a1 = 8.878 (5.39, 12.37)  
b1 = 7.906 (7.897, 7.915)  
c1 = 0.04682 (0.03256, 0.06108)  
a2 = 8.965 (6.477, 11.45)  
b2 = 7.993 (7.965, 8.021)  
c2 = 0.1174 (0.09289, 0.1418)  
a3 = 2.306 (1.652, 2.959)  
b3 = 8.466 (8.148, 8.783)  
c3 = 2.111 (1.595, 2.626)  
a4 = 6.694 (5.467, 7.921)  
b4 = 8.105 (8.067, 8.143)  
c4 = 0.4269 (0.3567, 0.4971)  
  
Goodness of fit:  
SSE: 9.638  
R-square: 0.9952  
Adjusted R-square: 0.994  
RMSE: 0.4734

Figura 3.32

### 3.6 Figura 4

Anche nell'ultimo grafico che andiamo a vedere abbiamo eseguito gli stessi passaggi dei grafici precedenti per arrivare al risultato finale cioè il fitting.

Questo grafico rappresenta il guadagno  $V_{in}$ - $V_{out}$ , per inverter CMOS fenace/PTCDC8 formato su un PEN spessa di 125mm. Invece Zro2 è stato utilizzato come dielettrico di gate. Le curve blu e rosse si riferiscono rispettivamente ai grafici avanti e indietro.

In questo grafico abbiamo usato il "curve fitting gaussiana".

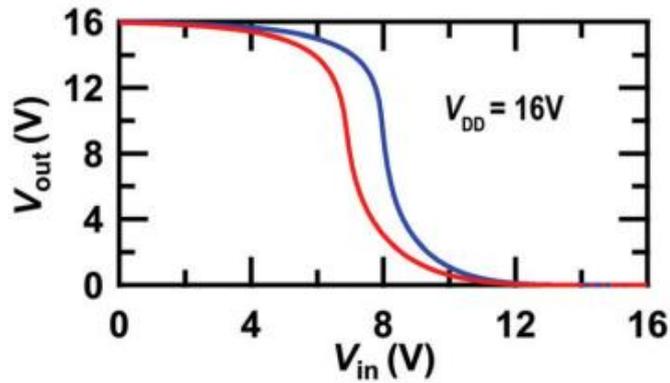


Figura 3.33: [1]

I dati estratti della figura 3.33 sono presenti nel foglio EXCEL di figura 3.34

	A	B	C	D
1	Vin	Vout	Vin2	Vout2
2	0.06194	15.91817	2.04124	16.08802
3	0.43355	15.83932	2.28866	16.08865
4	0.70194	15.80075	2.51546	16.08924
5	1.01161	15.72126	2.76289	15.96585
6	1.32129	15.84850	2.96907	15.84235
7	1.63097	15.72767	3.13402	15.84278
8	1.96129	15.68974	3.40206	15.80213
9	2.29161	15.61046	3.62887	15.76137
10	2.62194	15.53119	3.85567	15.67927
11	2.91097	15.49283	4.08247	15.67985
12	3.17935	15.45426	4.35052	15.51517
13	3.48903	15.37478	4.63918	15.43323
14	3.86065	15.37862	4.88660	15.43387
15	4.25290	15.13461	5.13402	15.39316
16	4.58323	15.05534	5.42268	15.18719
17	4.93419	14.81090	5.64948	15.18778
18	5.26452	14.56625	5.93814	15.02315
19	5.59484	14.32161	6.24742	14.77589
20	5.90452	13.99406	6.57732	14.61136
21	6.11097	13.45872	6.84536	14.32265
22	6.33806	13.00629	7.07216	14.03383
23	6.48258	12.42897	7.23711	13.66216
24	6.62710	11.76897	7.44330	13.29060
25	6.77161	10.98493	7.56701	12.83614
26	6.81290	10.40655	7.73196	12.29910
27	6.85419	9.78682	7.81443	11.80319
28	6.91613	9.04327	7.87629	11.26588
29	6.93677	8.29930	7.91753	10.72852
30	6.99871	7.63844	7.93814	10.02573
31	7.06065	6.93624	7.93814	9.52961
32	7.16387	6.31715	7.97938	8.90956
33	7.26710	5.65672	8.00000	8.24812
34	7.34968	5.03742	8.06186	7.58678
35	7.49419	4.54279	8.06186	7.00797
36	7.61806	4.04795	8.14433	6.59474
37	7.82452	3.51261	8.22680	6.14017
38	7.98968	3.05954	8.26804	5.68550
39	8.21677	2.60711	8.39175	5.06567
40	8.40258	2.07156	8.47423	4.52841
41	8.60903	1.86697	8.55670	4.07384
42	8.79484	1.49680	8.70103	3.61944
43	9.12516	1.08678	8.82474	3.24766
44	9.43484	0.96595	8.92784	2.75180
45	9.72387	0.80356	9.15464	2.46299
46	9.93032	0.55763	9.29897	2.13261
47	10.19871	0.43638	9.50515	1.80239
48	10.46710	0.43915	9.67010	1.47207
49	10.71484	0.23499	9.89691	1.26594
50	10.94194	0.23734	10.14433	0.97717
51	11.25161	0.24054	10.43299	0.77120
52	11.54065	0.16084	10.70103	0.60652
53	11.91226	0.08199	11.05155	0.48339
54	12.22194	0.04385	11.46392	0.36043
55	12.59355	-0.03500	11.95876	0.19633
56	13.02710	0.09352	12.65979	0.15680
57	13.44000	-0.06759	13.38144	0.11732
58	13.74968	-0.02305	13.91753	-0.00533
59	14.26581	0.06498	14.41237	0.11998
60	14.63742	-0.01387	14.88660	0.12121
61	14.88516	0.07138	15.48454	0.12275
62	15.15355	0.07415	15.97938	0.08269

Figura 3.34

Le colonne A-B rappresentano i dati per quanto riguarda la curva di colore rosso della FIG 3.33.

Le colonne C-D rappresentano i dati per quanto riguarda la curva di colore blu della FIG 3.33

Dopo aver organizzati i dati in un file EXCEL, il passo successivo è stato quello di costruire il grafico di partenza utilizzando MATLAB. Dalla figura 3.28 possiamo notare benissimo le curve A-B e C-D, costruite a partire dai dati del file EXCEL della figura 3.33. Quando parliamo di curve A-B e C-D stiamo facendo riferimento alle colonne A-B e C-D cioè la curva A-B corrisponde alle colonne A e B e la curva C-D corrisponde alle colonne C e D. Invece  $V_{in}$  rappresenta l'asse X e  $V_{out}$  rappresenta l'asse Y

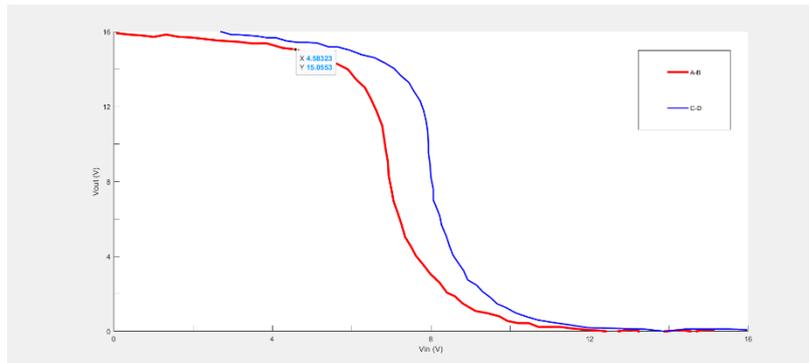


Figura 3.35

Per il fitting della curva A-B è stato utilizzato curve fitting gaussiana di quattro termini (figura 3.36). Il risultato finale della funzione gaussiana di questa curva è presente nella figura 3.37

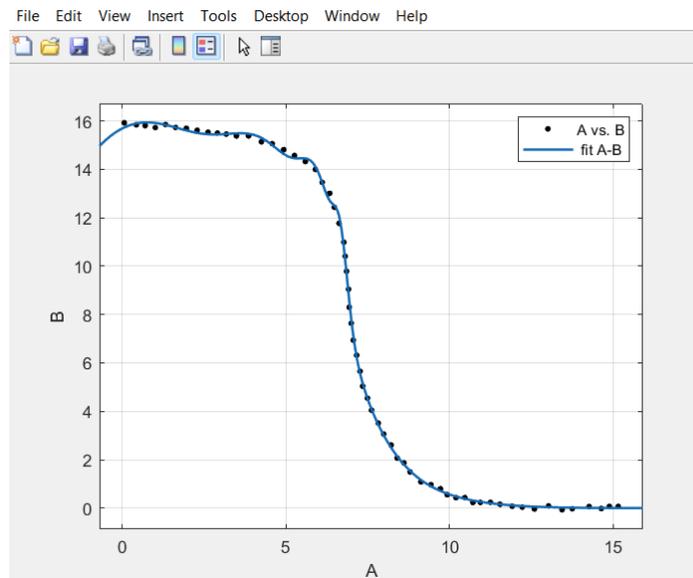


Figura 3.36

```

General model Gauss4:
f(x) =
a1*exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2*exp(-((x-b2)/c2)^2) +
a3*exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4*exp(-((x-b4)/c4)^2)
Coefficients (with 95% confidence bounds):
a1 = 15.8 (15.66, 15.94)
b1 = 0.5172 (0.2453, 0.789)
c1 = 5.141 (4.956, 5.325)
a2 = 6.711 (6.121, 7.301)
b2 = 5.014 (4.889, 5.138)
c2 = 2.21 (2.071, 2.349)
a3 = 3.296 (2.779, 3.813)
b3 = 6.083 (5.975, 6.191)
c3 = 0.7792 (0.6503, 0.9082)
a4 = 2.317 (1.71, 2.924)
b4 = 6.677 (6.653, 6.7)
c4 = 0.3051 (0.246, 0.3642)

Goodness of fit:
SSE: 0.816
R-square: 0.9997
Adjusted R-square: 0.9996
RMSE: 0.129
    
```

Figura 3.37

Per il fitting della curva A-B è stato utilizzato curve fitting gaussiana di quattro termini (figura 3.38). Il risultato finale della funzione gaussiana di questa curva è presente nella figura 3.39

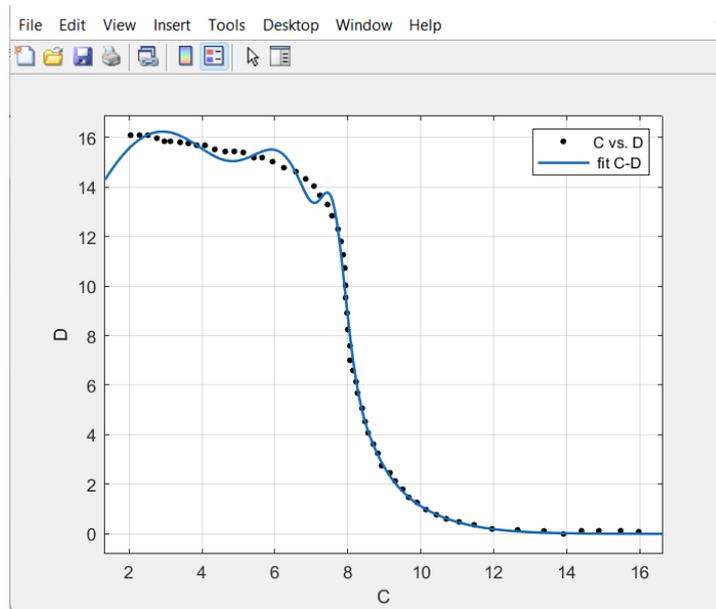


Figura 3.38

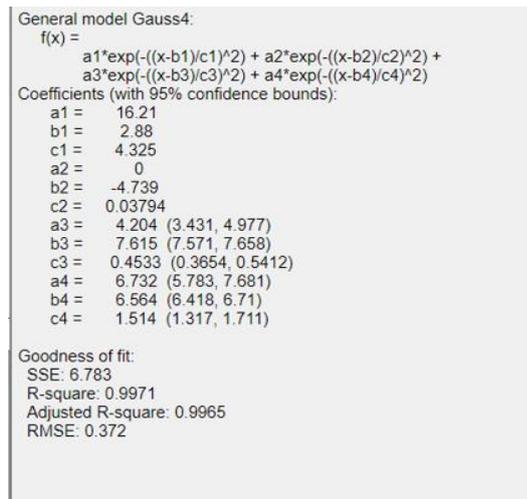


Figura 3.39

## Conclusioni

In questo lavoro, l'obiettivo principale era quello di estrarre dati da alcuni grafici che facevano riferimento ai transistor organici ad effetto di campo. Per quanto riguarda l'estrazione non sono stati affrontati dei problemi in quanto il programma utilizzato (WEBPLOTDIGITIZER) è stato facile da usare e molto utile per lavori futuri.

Mentre l'utilizzo di MATLAB è stato fondamentale per la costruzione dei grafici a partire dai dati estratti con il programma citato sopra. Il MATLAB non solo ci ha permesso la costruzione dei grafici ma anche quello di sfruttare il "CURVE FITTING" ovvero il fitting delle curve che è stato il nostro oggetto di studio e lavoro.

Per quanto riguarda il fitting delle curve abbiamo riscontrato dei problemi per quanto riguarda il grafico della figura 1 ovvero il grafico della figura 3.5. Per le curve A-B e C-D non è stato possibile il fitting perché queste due curve richiedono funzioni personalizzate non implementate di default nel fitter di MATLAB.

Un possibile sviluppo di questo lavoro sarà lo studio delle funzioni di default nel fitter di MATLAB che ci consentirà di eseguire il fitting delle curve A-B e C-D (fig 3.5) non analizzate durante il tirocinio.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Emanuela Pompei, Claudio Turchetti, Shino Hamao, Akari Miura, Hidenori Goto, Hideki Okamoto, Akihiko Fujiwara, Ritsuko Eguchi and Yoshihiro Kubozono., *“Fabrication of flexible high-performance organic field-effect transistors using phenacene molecules and their application toward flexible CMOS inverters”*
- [2] Com'è fatto e come funziona un transistor ., “ <https://www.fastweb.it/fastweb-plus/digital-magazine/com-e-fatto-e-come-funziona-un-transistor/>”
- [3] Transistor., “<https://www.andreaminini.org/elettronica/transistor>”
- [4] Transistor cos'è e a cosa serve  
“<https://doc.studenti.it/appunti/elettronica/5/transistor.html>”
- [5] FET., “<https://www.leonardocanducci.org/wiki/ee4/fet>”
- [6] Il transistor ad effetto di campo (FET)  
“<http://www.dieet.unipa.it/tfl/text/electronics/chaptersFE/CAPITOLO%207.pdf>”
- [7] Transistor ad effetto di campo  
“<https://www.edutecnica.it/elettronica/jfet/jfet.htm>”
- [8] MOS., “<https://www.edutecnica.it/elettronica/mosfet/mosfet.htm>”
- [9] Che cos'è un Mosfet., “<https://www.drogbuster.it/mosfet.htm>”
- [10] OFET., “<https://systemscue.it/ofet-transistor-organici-come-funzionano/36696/>”