

# La materia ai raggi X

Stage EsperimenEstate presso l'Istituto per la  
Microelettronica e Microsistemi (IMM) del CNR di  
Bologna

Studente: Elena Galetti

Scuola: Liceo Augusto Righi di Bologna

Studente: Francesco Malaguti

Scuola: Liceo Istituto Istruzione Superiore "Bassi-Burgatti"

Supervisore: Dr.ssa Fabiola Liscio



# Indice

<b>Introduzione</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Elettronica organica</b> .....	<b>4</b>
1.1 Transistori ad effetto di campo.....	<b>5</b>
1.2 Correlazione tra proprietà elettroniche, morfologiche e strutturali .....	<b>5</b>
<b>2 Metodi di indagine sperimentale</b> .....	<b>6</b>
2.1 I raggi X.....	<b>6</b>
2.2 Riflettività di raggi X.....	<b>9</b>
2.2.1 Teoria.....	<b>9</b>
2.2.2 Misure.....	<b>11</b>
2.2.3 Analisi dati .....	<b>12</b>
<b>3 Tecniche di preparazione di strati molecolari</b> .....	<b>14</b>
3.1 Semiconduttori polimerici.....	<b>14</b>
3.2 N2200 e IIDDT.....	<b>15</b>
<b>4 Risultati sperimentali</b> .....	<b>15</b>
4.1 Semiconduttori polimerici .....	<b>15</b>
4.1.1 N2200 e IIDDT.....	<b>15</b>
4.1.2 Misure.....	<b>16</b>
4.1.3 Analisi dati.....	<b>19</b>
4.1.4 Conclusioni.....	<b>20</b>
4.2 Semiconduttori molecole piccole.....	<b>21</b>
4.1.1 N1400.....	<b>21</b>
4.1.2 Analisi dati.....	<b>22</b>
4.1.3 Risultati.....	<b>22</b>
4.1.4 Conclusioni.....	<b>23</b>
<b>5 Conclusioni generali</b> .....	<b>24</b>

## Introduzione

“La materia ai raggi X” è il titolo dello stage che si è svolto presso il laboratorio di raggi X dell’Istituto per la Microelettronica e Microsistemi (IMM) del CNR di Bologna, all’interno del progetto formativo “EsperimEstate”, in cui studenti del quarto anno delle scuole superiori partecipano ad un progetto di ricerca sperimentale.

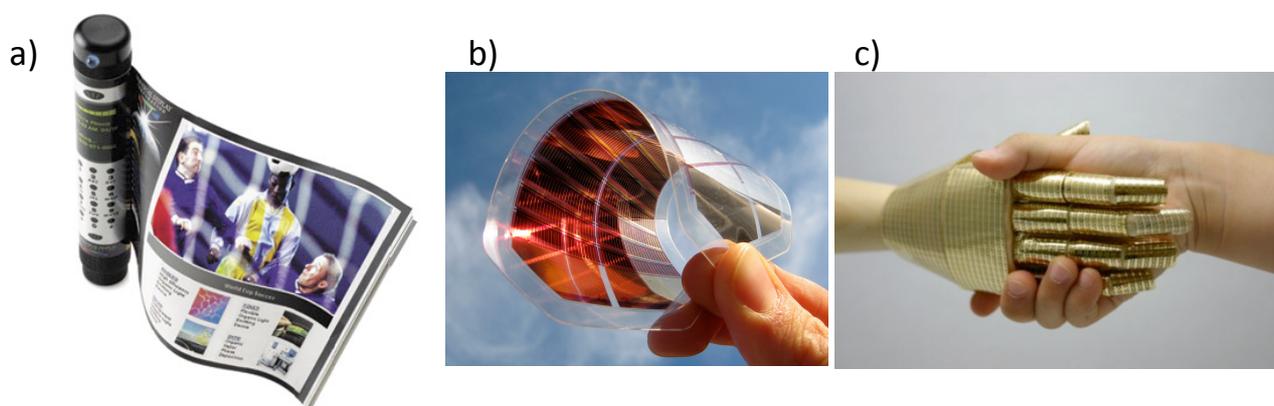
Questa esperienza è stata utile non solo per ampliare le conoscenze sulla scienza e sulle tecnologie, ma anche per entrare per la prima volta in contatto con il mondo della ricerca e del lavoro in modo da poter vedere e provare come si lavora in uno dei più importanti centri di ricerca in Italia.

In questa tesina verrà riportato il resoconto delle tematiche affrontate e degli esperimenti di riflettività di raggi X effettuati, sotto la supervisione della dottoressa Fabiola Liscio, su film di materiali organici utilizzati per lo sviluppo di nuovi dispositivi elettronici.

## 1 L’elettronica organica

L’elettronica organica è una piattaforma tecnologica emergente che cerca di sfruttare le molecole organiche come alternativa alle attuali tecnologie a base di silicio policristallino che sono altamente dispendiose ed inquinanti.

I principali vantaggi di tale tecnologia sono: 1) la facilità di variare le proprietà funzionali dei materiali organici attraverso delle semplici reazioni chimiche e 2) la facilità di processare il materiale organico attraverso tecniche di produzione economiche, veloci, attuabili su larga scala e basse temperature, rendendole compatibili per la fabbricazioni di dispositivi elettronici di plastica, di carta o in tessuto.

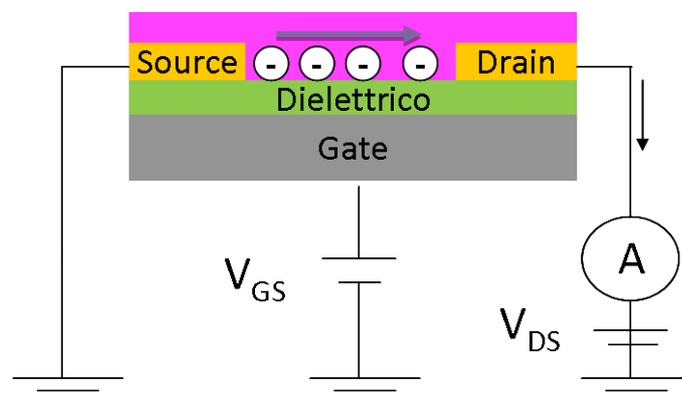


**Figura 1:** Esempi di alcuni dispositivi elettronici basati su materiali organici: a) display flessibili, b) celle solari flessibili e c) sensori.

Alcuni esempi di prodotti derivanti dall'elettronica organica, alcuni dei quali sono già in commercio, sono: gli imballaggi intelligenti, i dispositivi a Radio Frequenza (RFID), i display flessibili (**Figura 1a**) le celle solari flessibili (**Figura 1b**), l'illuminazione a basso consumo, i dispositivi diagnostici, le batterie stampabili, le smart card, i sensori (**Figura 1c**).

### 1.1 Transistori ad effetto di campo

L'elemento base di numerosi dispositivi elettronici organici è il transistor ad effetto di campo (OFET).



**Figura 2:** Rappresentazione schematica di un tipo di OFET.

L'architettura di un tipo di OFET di tipo dispositivo, come riportato in Figura 2, è composto da:

- il "gate": uno strato di base conduttore, formato da silicio, o materiale polimerico conduttore;
- il dielettrico: uno strato formato da un materiale dielettrico, quindi isolante;
- gli elettrodi "source" e "drain": due contatti metallici tipicamente in oro;
- il semiconduttore organico: strato più superficiale a contatto sia con il dielettrico che con gli elettrodi.

Applicando una tensione al contatto del gate si forma uno strato di accumulazione di cariche nel semiconduttore organico all'interfaccia con il dielettrico. Applicando successivamente una differenza di potenziale tra source e drain, tali cariche circoleranno all'interno del dispositivo generando un flusso di corrente.

### 1.2 Correlazione tra proprietà elettroniche, morfologiche e strutturali

Il passaggio di corrente tra "source" e "drain" dipende da come interagiscono le molecole che costituiscono il materiale organico. Quindi le proprietà elettriche del dispositivo e le proprietà

morfologiche e strutturali del film organico sono strettamente interconnesse fra loro. Infatti la morfologia di un materiale dipende dalla struttura che hanno assunto le molecole che lo costituiscono, a loro volta le proprietà elettriche dipendono dalla morfologia del materiale. Per esempio, un buon film di semiconduttore organico non deve essere troppo rugoso, in quanto altrimenti il flusso di cariche troverebbe difficoltà nello scorrimento.

## 2 Metodi di indagine sperimentale

### 2.1 I raggi X

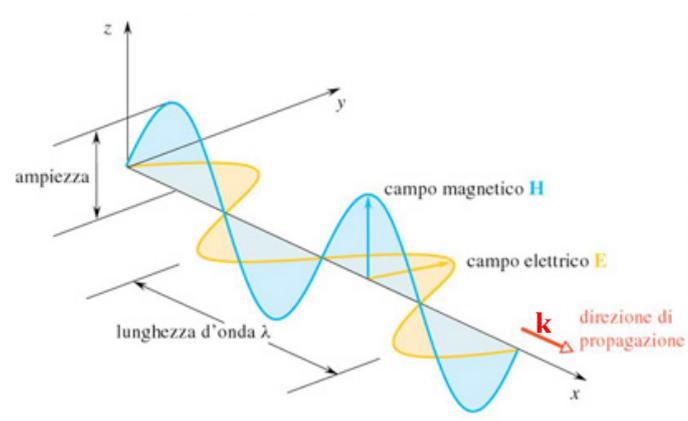
I raggi X furono scoperti per caso da Wilhelm Röntgen nel suo laboratorio nell'edificio di fisica dell'Università di Würzburg (in Baviera). Egli giunse alla scoperta dei raggi X, nel corso di esperienze con tubi a raggi catodici, osservando che dall'anodo di tali tubi venivano emesse radiazioni, di natura per allora misteriosa (per questo il nome di raggi "X"), capaci di impressionare le lastre fotografiche.

Röntgen approfondì successivamente lo studio delle proprietà di tali raggi, dimostrando che essi non venivano deviati da campi elettrici e magnetici, che sono capaci di ionizzare i gas e di suscitare la fluorescenza di particolari sostanze (per es., il platinocianuro di bario) e che sono dotati di un elevato potere penetrante. Quel che più colpì, sin dall'inizio, nella scoperta di Röntgen fu che mettendo oggetti sulla traiettoria dei raggi, una loro immagine restava impressa sulla lastra fotografica. La materia mostrava una certa trasparenza ai raggi e l'immagine che si veniva a formare era quella del contenuto degli oggetti e della loro struttura interna. Quest'ultima osservazione lo portò ad acquisire diverse immagini, tra cui quella delle ossa della mano di sua moglie Anne Berthe (**Figura 3**). Questa famosissima immagine viene ritenuta il primo esempio di radiografia.



**Figura 3:** La famosissima immagine ottenuta da W. C. Röntgen investendo con raggi X una mano della moglie, posta davanti a una lastra fotografica. Visibile anche l'anello.

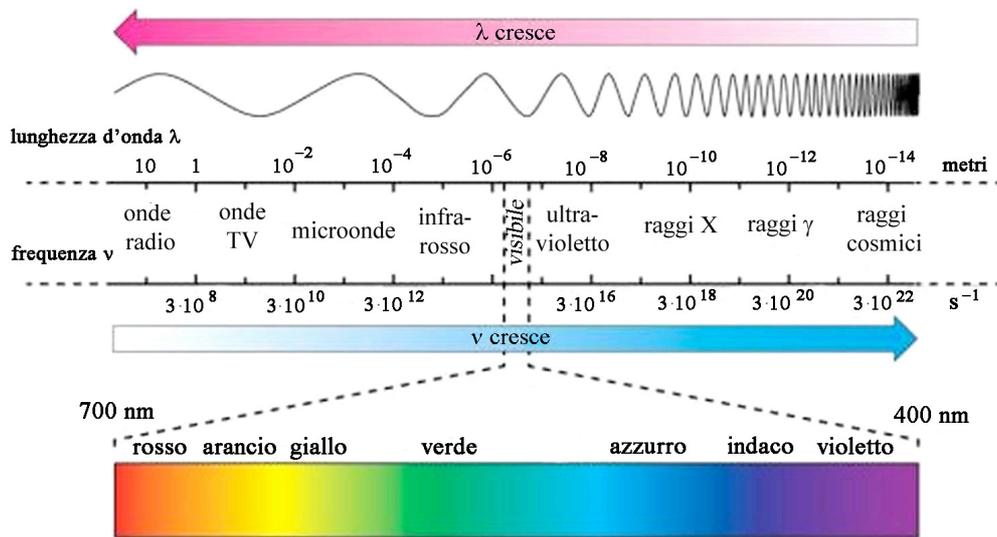
I raggi X sono onde elettromagnetiche sinusoidali che si propagano alla velocità della luce ( $c = 3 \times 10^8$  m/s), dove il vettori di campo elettrico (**E**) e magnetico (**B**) sono ortogonali alla direzione di propagazione (**k**) (vedi **Figura 4**). Definita la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) come la distanza tra due creste, la frequenza è uguale al rapporto  $c/\lambda$ .



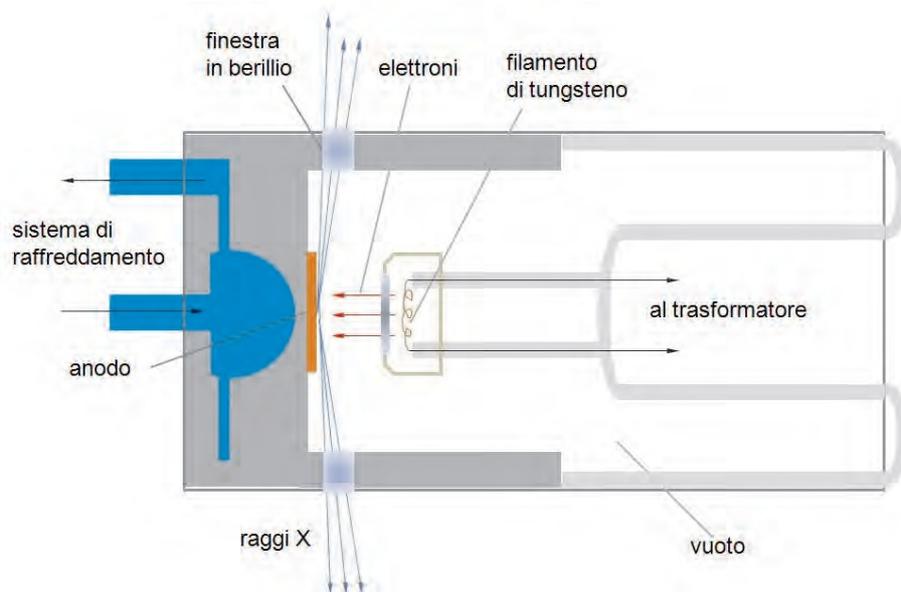
**Figura 4:** Rappresentazione dei vettori campo elettrico e magnetico di una radiazione elettromagnetica.

In **Figura 5** è riportato lo spettro elettromagnetico della luce, dove i raggi X appartengono alla fascia di frequenza compresa fra  $10^{16}$ - $10^{20}$  Hz ed una lunghezza d'onda compresa fra 0.01-10 nm.

Raggi X con una lunghezza d'onda superiore a 0,1 nm sono chiamati raggi X “mollini”. A lunghezze minori, sono chiamati raggi X “duri”.



**Figura 5:** Spettro elettromagnetico



**Figura 6:** Rappresentazione schematica di un tubo catodico utilizzato in laboratorio

La sorgente convenzionale di raggi X è il tubo catodico (**Figura 6**). Quando viene applicata una differenza di potenziale adeguata tra catodo e anodo, il catodo (tipicamente un filamento di tungsteno) emette elettroni per effetto termoionico. Gli elettroni colpiscono l'anodo (tipicamente in molibdeno o in rame), con conseguente emissione di raggi X da parte dell'anodo stesso. I raggi X lasciano il tubo attraverso delle finestre in berillio, trasparenti a questa radiazione. Il processo

provoca un intenso riscaldamento dell'anodo che va pertanto raffreddato costantemente, tipicamente mediante la circolazione forzata di acqua.

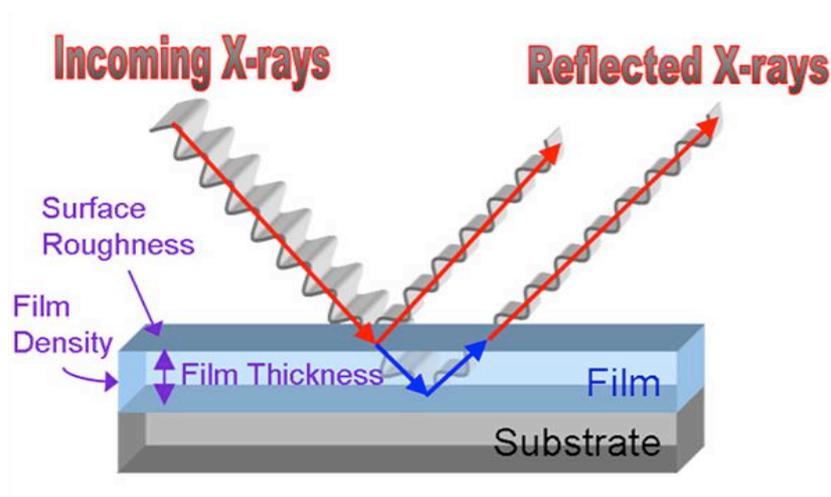
## 2.2 Riflettività di raggi X (XRR)

### 2.2.1 Teoria

La riflettività dei raggi X usata per la determinazione dello spessore e della densità del film, e della rugosità delle interface aria/film e film/substrato. Queste informazioni risultano fondamentali per completare la conoscenza del materiale, in quanto molte proprietà elettroniche degli OFET dipendono dai parametri suddetti.

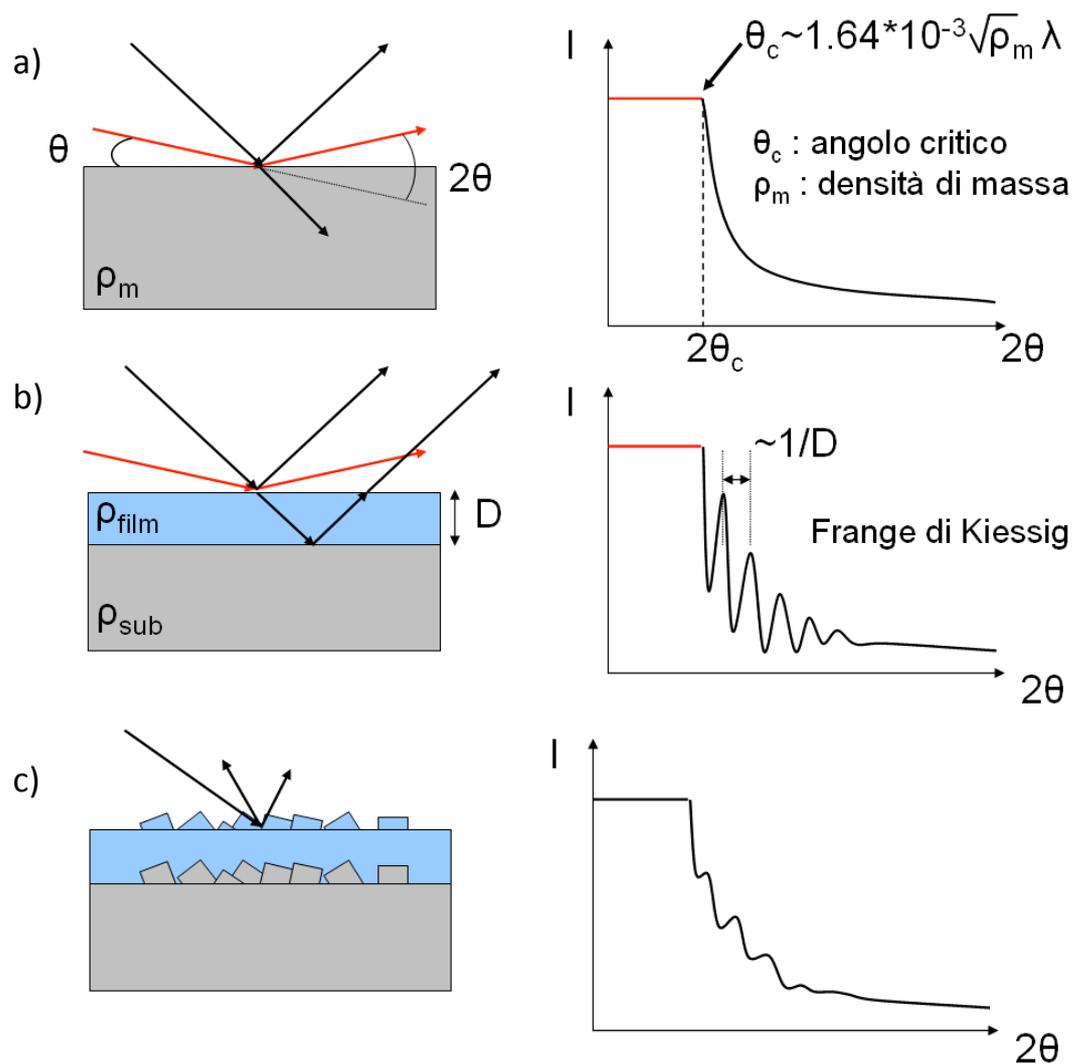
L'XRR è una tecnica d'indagine non distruttiva e permette di sondare spessori tra 2 e 200 nm con una precisione di circa 1-3Å; l'XRR è sensibile solo al profilo di densità del campione e non dipende dalle simmetrie cristalline, né dall'orientazione delle molecole: ciò la rende anche uno strumento per lo studio dei film amorfi.

In **Figura 7** è riportato uno schema rappresentativo del fenomeno della riflettività.



**Figura 7:** Rappresentazione schematica della riflettività.

Quando un fascio di raggi X collide con una superficie di un materiale con un certo angolo di incidenza  $\theta$ , questo può essere assorbito ed interagire con il materiale, oppure può essere riflesso con la medesima angolazione (**Figura 7**). La riflettività è la misura dell'intensità del fascio riflesso al variare di  $\theta$ .



**Figura 8:** Fenomeno della riflettività di raggi X nei casi di a) singolo materiale, b) materiale composto da due strati di densità diversa, c) materiale rugoso.

A di sotto di un angolo critico ( $\theta_c$ ) il fascio incidente viene totalmente riflesso (**Figura 8a**).  $\theta_c$  è proporzionale alla radice della densità di massa del materiale colpito e dalla lunghezza d'onda del fascio di raggi X. Quindi  $\theta_c$  varia a seconda del materiale investigato.

Quando  $\theta > \theta_c$  il fascio viene assorbito dal materiale ed l'intensità del fascio riflesso diminuisce.

Se il materiale è composto da due materiali con densità diversa sovrapposti, il fascio penetrante riflette sia sulla superficie del primo strato che su quella del secondo strato. L'interferenza costruttiva e distruttiva tra le onde riflesse genera le cosiddette "frange di Kiessig" (**Figura 8b**). Il periodo di oscillazione di tali frange è inversamente proporzionale allo spessore del film.

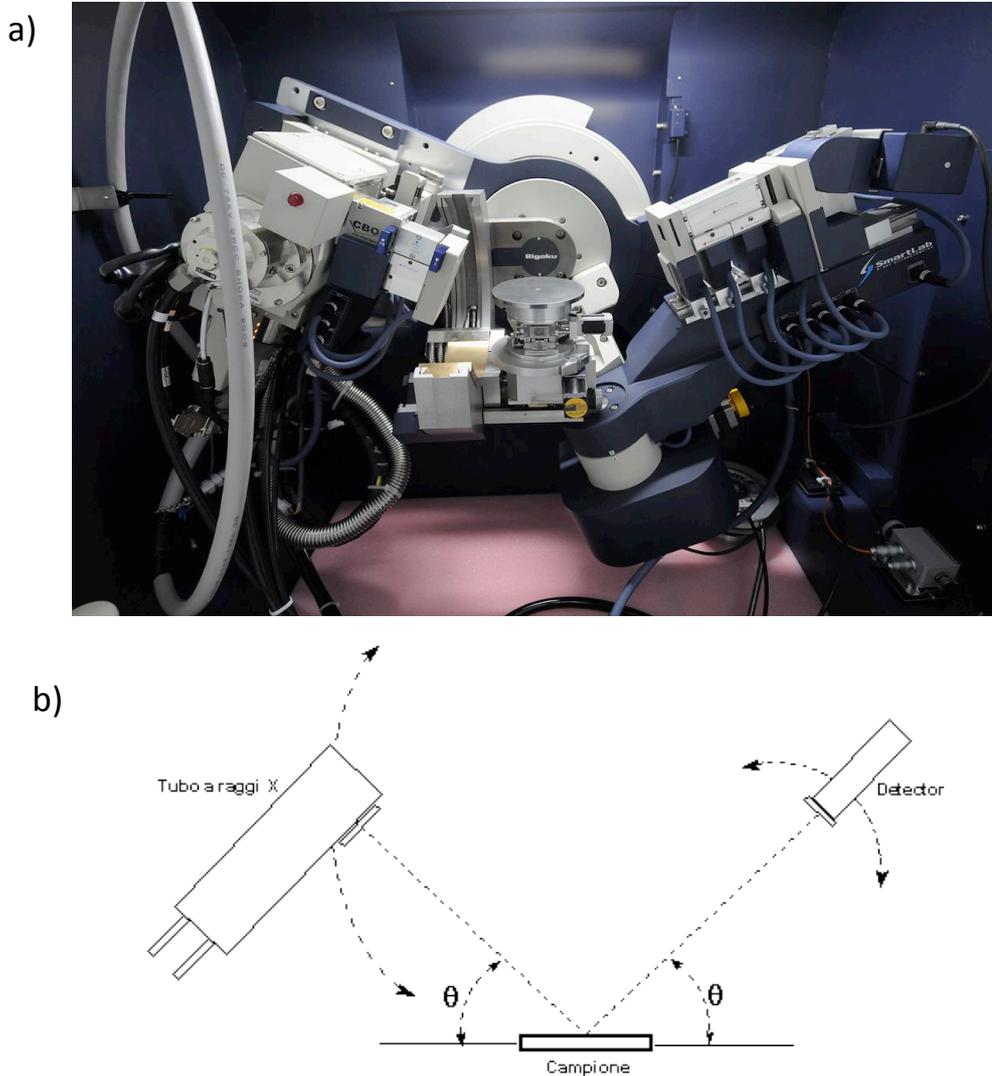
Da notare che i raggi X riescono a penetrare lo strato superficiale del campione senza variare il loro angolo di incidenza. Questo è dovuto al fatto che i raggi X interagiscono a livello molecolare, dunque non si ha mai il fenomeno della rifrazione è trascurabile.

Quando la superficie dei singoli strati è rugosa, il fascio incidente si diffonde sulla superficie scabra, portando a diminuire l'intensità del fascio riflesso e quindi ad attenuare le oscillazioni delle frange di Kiessig (**Figura 8c**).

Attraverso lo studio dei raggi riflessi si ottengono le curve di riflettività, cioè la trasposizione grafica su un piano cartesiano dei dati ottenuti. Dallo studio di tali grafici si possono ricavare diverse informazioni riguardanti la morfologia del materiale investigato, quali lo spessore, la rugosità e la densità di ciascuno strato che compone il materiale.

### 2.2.2 Misure

Lo strumento utilizzato per realizzare le XRR è stato il diffrattometro SmartLab "Rigaku" (**Figura 9a**).



**Figura 9:** a) Strumentazione SmartLab Rigaku. b) geometria del set-up sperimentale.

Questo strumento è composto da (**Figura 9b**):

- tubo a raggi X con anodo ruotante: la rotazione dell'anodo permette di aumentare la superficie di contatto tra elettrone e anodo e quindi di aumentare l'intensità del fascio di raggi X emesso.
- porta campioni: piattaforma su cui viene riposto il film da studiare (campione) da analizzare;
- rivelatore (detector): Diodo che misura l'intensità del fascio riflesso dal materiale investigato.

Una volta acceso lo strumento, il tubo di raggi X viene allineato otticamente in modo che quando sia il fascio incidente che il rivelatore sono disposti parallelamente ( $\theta=0$ ), quest'ultimo registra il massimo di intensità del fascio di raggi emessi.

Successivamente viene inserito il campione che viene allineato rispetto al fascio incidente. Questa operazione è molto importante affinché si possa ottenere una buona misura XRR.

Per realizzare le curve XRR, si fanno muovere contemporaneamente il tubo di raggi X, che colpisce il campione con un angolo  $\theta$ , ed il rivelatore che misura il fascio riflesso ad un angolo  $2\theta$ , rispetto alla direzione d'incidenza. La misura è detta scansione  $\theta/2\theta$ .

I parametri che definiscono la misura XRR sono:

- $2\theta$ , che definisce la lunghezza della scansione;
- $\Delta 2\theta$ , ovvero lo "step", cioè lo spostamento angolare della scansione;
- $\Delta t$ , ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra l'acquisizione di un punto e il suo successivo;
- IS, fenditura che definisce il fascio incidente verticalmente;
- ISL, fenditura che definisce il fascio incidente orizzontalmente;
- RS1, fenditura che definisce l'accettanza angolare del rivelatore e diminuisce la divergenza del fascio;
- RS2, fenditura che diminuisce ulteriormente la divergenza del fascio come RS1;
- $\Delta\alpha$ , l'accettanza, ovvero la porzione della radiazione incidente effettivamente accettata in ingresso dal rivelatore che ci definisce la risoluzione sperimentale della misura.

Una volta definiti i parametri, si fa partire la scansione  $\theta/2\theta$  ed l'intensità del fascio registrato dal rivelatore vengono convertiti grazie ad un apposito programma in un grafico cartesiano dove l'intensità del fascio registrato è riportato in funzione di  $2\theta$ .

### **2.2.3 Analisi dati**

Se la superficie del campione e, nel caso di un film, le eventuali interfacce tra uno strato e l'altro sono piate, l'intensità riflessa sarà confinata lungo una direzione simmetrica rispetto a quella d'incidenza: in questo caso parliamo di geometria speculare. L'intensità della riflessione speculare è convenzionalmente definita come:

$$R(\theta) = \frac{I(\theta)}{I_0} \quad (1)$$

dove  $I(\theta)$  è l'intensità riflessa ad un angolo  $\theta$  e  $I_0$  è l'intensità del fascio incidente. Possiamo trattare questo problema classicamente, ottenendo la relazione di Fresnel a partire dalle equazioni di continuità del campo elettrico e magnetico all'interfaccia aria-superficie del campione:

$$R^{piatto}(\theta) = \left| \frac{\theta - \sqrt{\theta^2 - \theta_c^2 - 2i\beta}}{\theta + \sqrt{\theta^2 - \theta_c^2 - 2i\beta}} \right|^2 \quad (2)$$

dove  $i$  è l'unità immaginaria e  $\beta$  è il coefficiente di assorbimento del materiale che dipende dalla densità del materiale.

Considerare piatta la superficie di uno strato di materiale è solo un artificio semplificativo, soprattutto nel caso della riflettività a raggi X, che è molto sensibile ai difetti superficiali. Quindi risulta necessaria l'introduzione della rugosità,  $\sigma$ , definita come la variazione quadratica media dell'altezza del singolo strato. L'effetto della rugosità è quello di ridurre la riflessione speculare di un fattore esponenziale. Nel caso dell'interfaccia aria-substrato si ottiene:

$$R^{rugoso}(\theta) \approx R^{piatto}(\theta) \exp\left(-\frac{D}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

Nel caso di un campione formato da diversi strati le equazioni (1-2) vengono applicate per ciascuno strato. Il modello teorico che descrive completamente le XRR non viene qui riportato poiché la sua complessità va oltre le conoscenze degli stagisti.

L'analisi quantitativa della curva XRR viene effettuata tramite il metodo di massima verosimiglianza, o comunemente chiamato "fitting". Questo metodo, implementato nel programma GXRR3 utilizzato in questo stage, consiste nel far variare i parametri sperimentali  $P$  (ossia  $D$ ,  $\sigma$  e  $\rho_m$ , relativi a ciascuno strato costituente il materiale in esame) in modo da minimizzare la differenza tra il dato sperimentale e la curva teorica descritta in modo semplificato dalle equazioni (1-2).

Il parametro che quantifica la bontà del fit è chiamato "chi quadro",  $\chi^2$ , definito come:

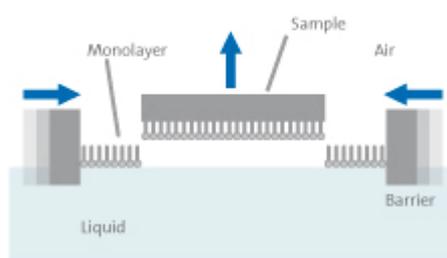
$$\chi^2 = \sum_n \frac{(I_n - I(2\theta_n; P))^2}{n}, \quad (4)$$

dove  $n$  è il numero dei punti sperimentali,  $I_n$  è il valore sperimentale della riflettività in corrispondenza dell' $n$ -esimo punto e  $I(2\theta_n; P)$  è il valore teorico di riflettività definito dai parametri  $P$  per l' $n$ -esimo punto. Il fit è buono quanto più  $\chi^2$  tende a zero.

### 3 Tecniche di preparazione di strati molecolari

#### 3.1 Langmuir Shaefer

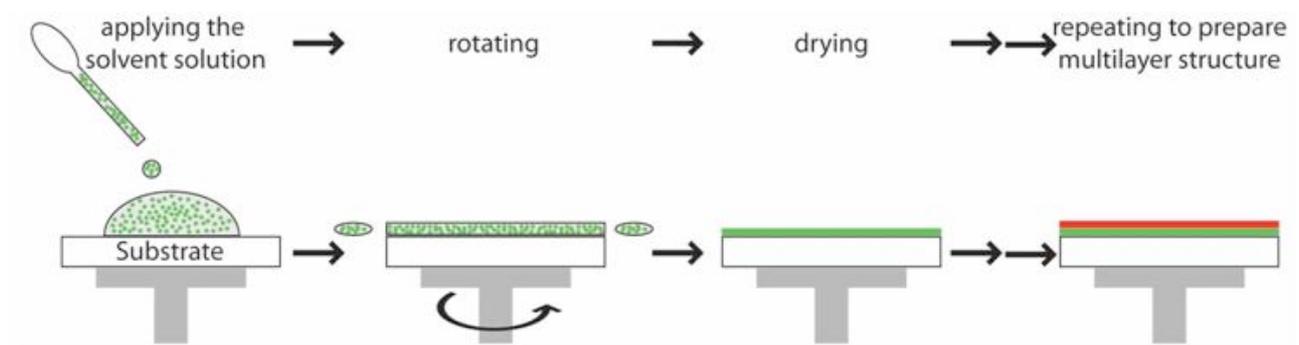
Il metodo di deposizione “Langmuir Shaefer” (vedi **Figura 10**) di strati molecolari consiste nel depositare su una soluzione acquosa delle molecole. A questo punto, per compattare le molecole, si esercita una pressione orizzontale per mezzo di barriere poste su entrambi i lati. Fatto ciò, basterà appoggiare il campione sopra lo strato molecolare per far sì che quest’ultimo si attacchi e possa essere staccato dalla soluzione.



**Figura 10:** Metodo di deposizione Langmuir Shaefer

#### 3.2 Spin coating

Il rivestimento per rotazione (in inglese Spin Coating), è un metodo utilizzato per applicare uno strato sottile e uniforme (ad esempio, un polimero) ad un substrato solido piano [vedi Immagine 6]. Dopo aver preparato una soluzione fluida, nella quale è diluita la sostanza che si vuole analizzare, la si pone sul substrato solido, che è successivamente messo in rapida rotazione tramite un apposito rotore, al fine di spargere il fluido sul substrato per effetto della forza centrifuga. I solventi utilizzati sono di solito molto volatili (es. clorobenzene), dunque il film si assottiglia durante il processo anche per effetto dell'evaporazione del solvente. La rotazione viene fermata non appena si raggiunge lo spessore desiderato.



**Figura 11:** Metodo di deposizione per spin coating.

## 4 Risultati sperimentali

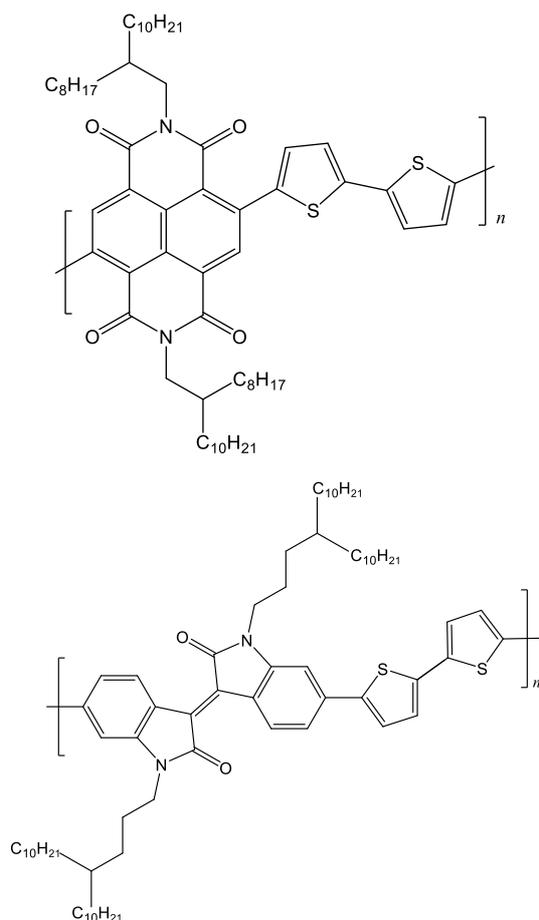
### 4.1 Semiconduttori polimerici

#### 4.1.1 N2200 e IIDDT-C3

La prima parte dello stage ha visto lo studio di due materiali polimerici N2200 e IIDDT-C3 che sono due semiconduttori organici di ultima generazione con altissime prestazioni di conduzione di carica.

Un polimero (dal greco "che ha molte parti") è una macromolecola, ovvero una molecola dall'elevato peso molecolare, costituita da un gran numero di gruppi molecolari (detti unità ripetitive) uguali o diversi (nei copolimeri), uniti "a catena" mediante la ripetizione dello stesso tipo di legame (covalente).

Sotto sono riportate le strutture chimiche che caratterizzano l'unità ripetitiva dei polimeri N2200 e IIDDT-C3 [vedi **Figura 12**].



**Figura 12:** Struttura chimica dell'unità ripetitiva dei polimeri N2200 (in alto) e IIDDT-C3 (in basso).

#### 4.1.2 Misure

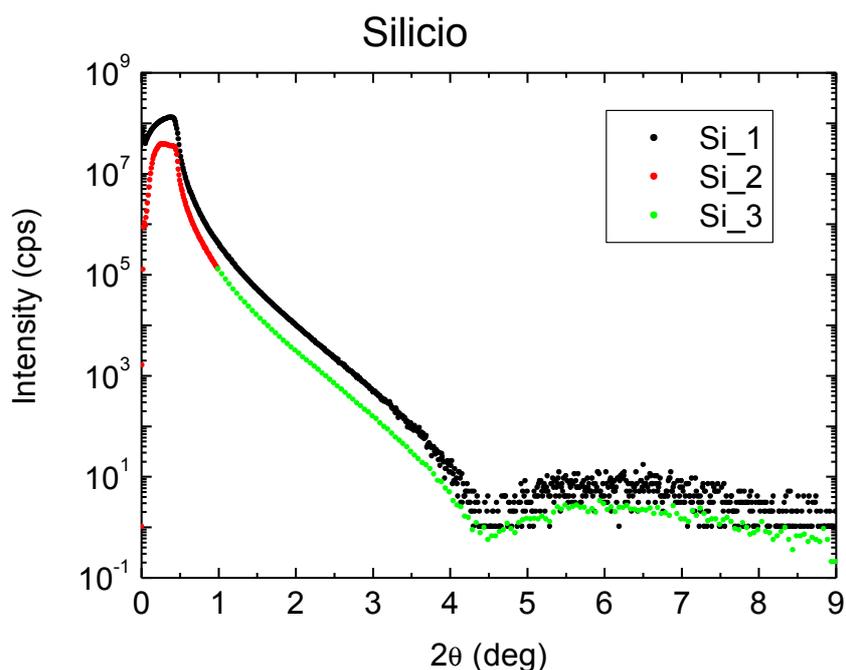
Per i campioni che seguono è stata utilizzata la tecnica di misurazione descritta nel punto 2.2.2

Prima di esaminare i polimeri N2200 e IIDDT-C3 è stato studiato il substrato di silicio. I parametri sperimentali sono riportati in **Tabella 1**.

Silicio			
	Si_1	Si_2	Si_3
IS (mm)	0.174	0.03	0.03
2θ (deg)	[0°÷9°]	[0°÷1°]	[1°÷9°]

$\Delta 2\theta$ (deg)	0.05	0.01	0.05
$\Delta t$ (s)	20	20	20
RS1 (mm)	0.07	0.07	0.07
RS2 (mm)	0.1	0.1	0.1
$\omega$ (deg)	0.2	0.2	0.2

**Tabella.1:** parametri utilizzati per le misure XRR del substrato di silicio



**Figura 13:** Curve XRR ottenute per lo stesso campione di silicio effettuate utilizzando parametri sperimentali diversi.

Siccome il campione esaminato è formato solo dal substrato di silicio non si notano oscillazioni, fatta eccezione per quelle generato dal rumore di fondo.

La seconda misura Si\_2 è stata eseguita per rendere più preciso il risultato ottenuto da Si\_1. Infatti sono stati cambiati i parametri IS,  $2\theta$  e  $\Delta 2\theta$ .

Si+SiO<sub>2</sub>+OTS+N2200

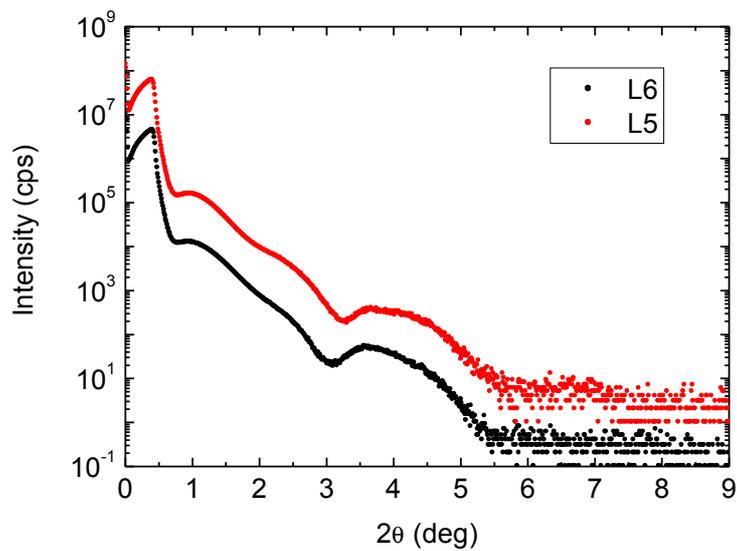
Per questo polimero sono stati creati due diversi campioni polimerici:

-il primo, L5, scaldato a 150°;

-il secondo, L6, non scaldato.

Campione	IS (mm)	2θ (deg)	Δ2θ (deg)	Δt (s)	RS1 (mm)	RS2 (mm)
L5	0.03	[0°÷9°]	0.01	1	0.07	0.1
L6	0.174	[0°÷9°]	0.1	1	0.07	0.1

**Tabella.2:** parametri utilizzati per l'analisi dei due polimeri L5 e L6



**Figura 14:** curve XRR ottenute sui campioni L5 e L6.

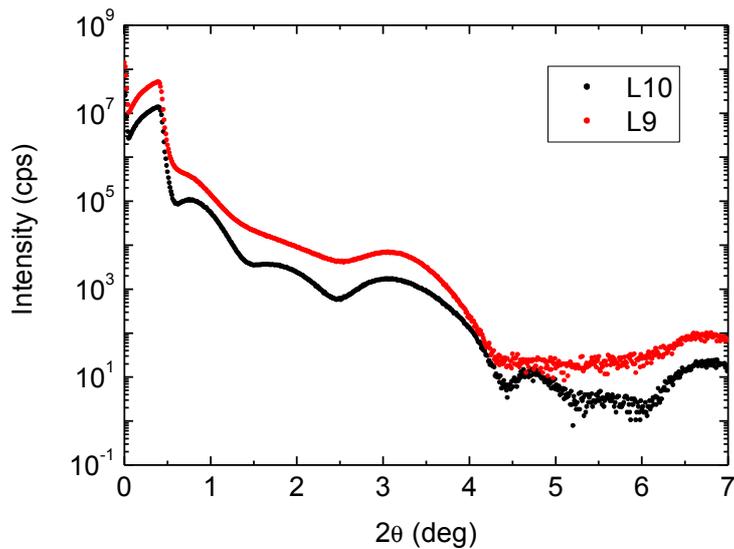
1) Si+SiO<sub>2</sub>+OTS +IIDDT-C3

2) Si+SiO<sub>2</sub> +IIDDT-C3

Il primo polimero [1] è il campione L9, mentre il secondo [2] è il campione L10. I due polimeri differiscono tra loro per la presenza o meno di OTS.

Campione	IS (mm)	2θ (deg)	Δ2θ (deg)	Δt (s)	RS1 (mm)	RS2 (mm)
L9_10	0.174	[0°÷7°]	0.01	1	0.07	0.1

**Tabella.3:** parametri utilizzati per i polimeri L9 e L10.



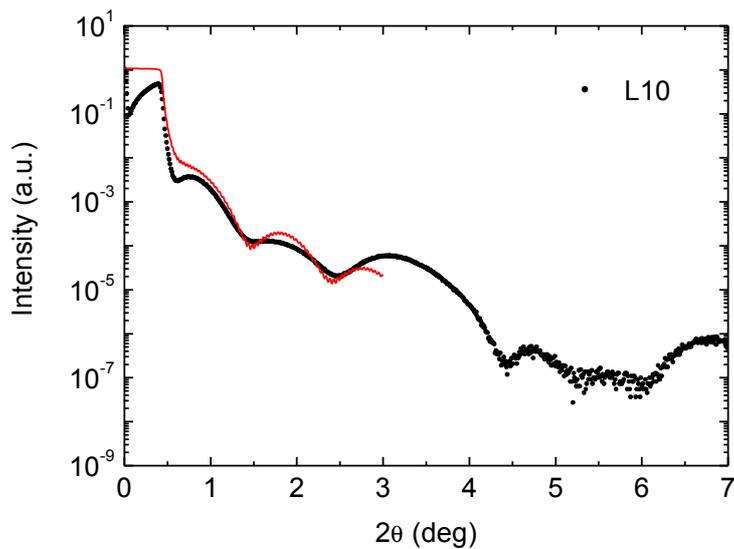
**Figura 14:** Curve XRR ottenute sui campioni L9 e L10.

Si può notare che il campione L9 presenta oscillazioni meno evidenti ed in minore quantità rispetto a L10. Si intuisce quindi che la presenza di OTS nel campione tende ad aumentare la rugosità del film polimerico.

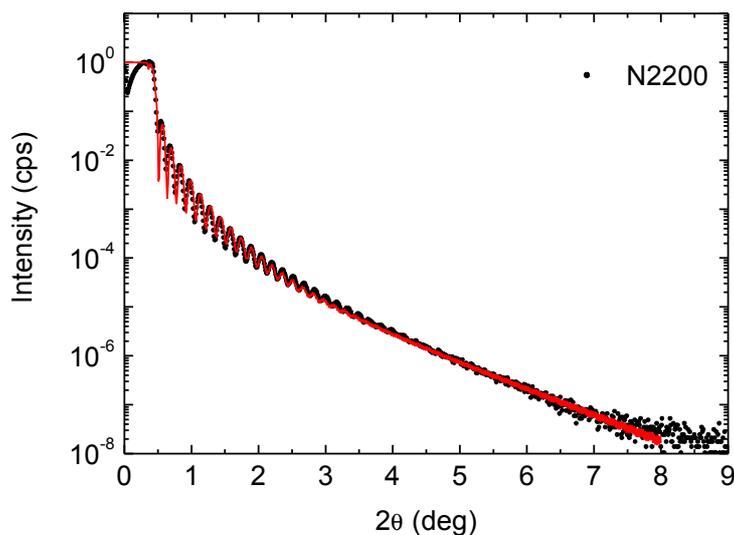
#### **4.1.3 Analisi dati**

E' stato impossibile per i campioni L5, L6, L9, L10 riprodurre la loro curva teorica partendo da quella sperimentale, in quanto i campioni polimerici erano troppo complessi per essere rappresentati da una curva con solo tre parametri ("t", "σ", "ρ").

Nella **Figura 15** viene dimostrata infatti questa impossibilità.



**Figura 15:** caso del campione L10 in cui non è stato possibile far assomigliare la curva teorica (rossa) a quella sperimentale (nera).



**Figura 16:** caso del campione N2200 preparato con la tecnica di spin coating.

In questo caso invece in cui il campione N2200 è stato preparato con la tecnica di spin coating, si è riusciti a far combaciare le due curve.

#### 4.1.4 Conclusioni

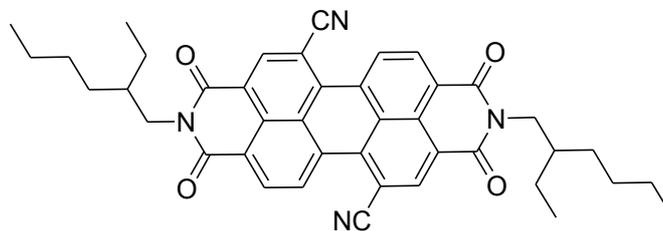
Da questi campioni si è riusciti, grazie agli studi sulla riflettività dei raggi X, a tracciare una curva sperimentale da cui intuire ed estrapolare, quando possibile, alcune caratteristiche del polimero.

Tuttavia non è stato possibile creare una curva teorica che riproducesse quella sperimentale a causa dell'alta complessità del polimero.

## 4.2 Semiconduttori molecolari

### 4.2.1 N1400

Il secondo sistema investigato durante lo stage è stato un materiale costituito da piccole molecole chiamate N1400, la cui formula chimica è riportata in **Figura 17**.



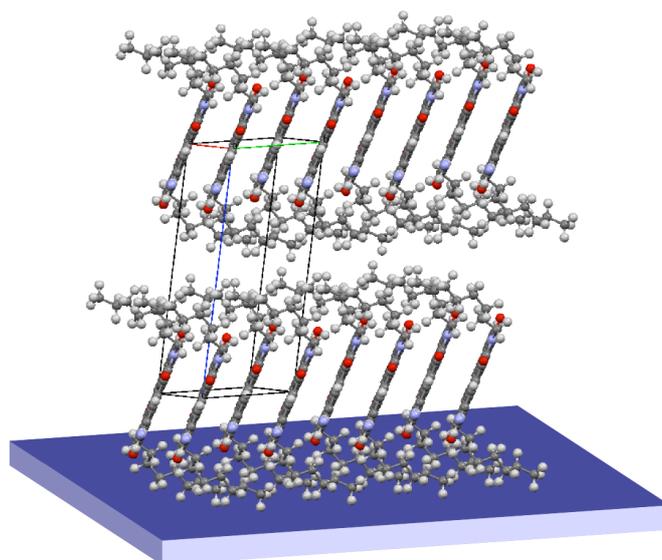
**Figura 17:** Formula chimica della molecola N1400.

L'N1400 è una molecola costituita da una parte centrale di anelli benzenici, detta "core", e due catene alchiliche laterali diramante.

Anche questo materiale è un semiconduttore organico di ultima generazione la cui principale caratteristica è l'elevata solubilità, derivata dalla presenza delle catene alchiliche diramate, che gli permette di essere facilmente processabile tramite tecniche di fabbricazione a basso costo.

Quando la molecola viene depositata su un substrato di silice tramite spin coating, essa si dispone in modo tale che tra i "core" interagiscano lungo la direzione parallela al piano superficiale del film (vedere **Figura 18**).

Le misure relative a questo campione erano già state eseguite in precedenza da terzi.



**Figura 18:** Struttura cristallina di un film di N1400 depositato per spin coating sopra la superficie di silice.

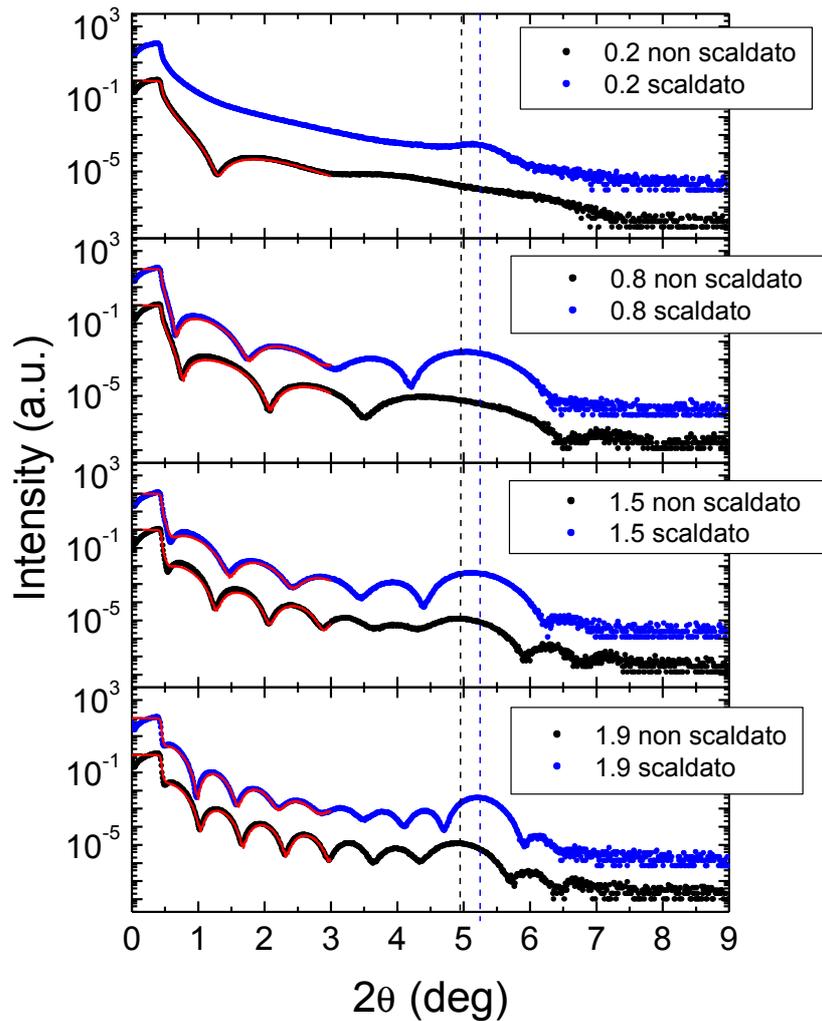
#### 4.2.2 Analisi dati

Sono stati analizzati le curve XRR misurate su diversi film di N1400 preparati per spin coating a diversa concentrazione (C), sia vergini che scaldati a 100°C per 5 ore successivamente alla deposizione.

#### 4.2.3 Risultati

C (mg/mL)	trattamento	$t_{N1400}$ (nm)	$\sigma_{N1400}$ (nm)	$\rho_{N1400}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$t_{SiO_2}$ (nm)	$\sigma_{SiO_2}$ (nm)	$\rho_{SiO_2}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\chi^2$
0.2	Non scaldato	3.51±0.02	0.5±0.2	1.08±0.07	229.7±0.5	0.8±0.2	2.25	0.03
	Scaldato	-	-	-	-	-	-	-
0.8	Non scaldato	6.46±0.02	0.44±0.03	1.28±0.01	231.7±0.3	0.1±0.7	2.25	0.26
	Scaldato	7.62±0.02	0.73±0.03	1.13±0.01	233.1±0.3	0.2±0.3	2.25	0.04
1.5	Non scaldato	10.74±0.03	0.1±0.5	0.90±0.02	230.5±0.5	0.3±0.2	2.25	0.35
	Scaldato	9.18±0.03	0.53±0.05	0.92±0.2	230.2±0.4	0.2±0.5	2.25	0.22
1.9	Non scaldato	13.41±0.02	0.44±0.03	0.96±0.01	230.2±0.2	0.21±0.03	2.25	0.14
	Scaldato	14.12±0.02	0.82±0.02	1.073±0.009	230.2±0.2	0.34±0.02	2.25	0.10

**Tabella.4:** parametri ottenuti dal fitting delle curve sperimentali di riflettività, dove “C” è la concentrazione; “t”, “ $\sigma$ ”, “ $\rho$ ” sono rispettivamente lo spessore, la rugosità e la densità del singolo materiale.



**Figura 19:** sono riportate le curve di riflettività ottenute dai vari campioni, divise in base alle diversa concentrazione. La linea rossa indica la curva teorica di ogni campione, mentre le linee blu e nere quelle sperimentali.

#### 4.2.4 Conclusioni

Per il campione con concentrazione 0.2 mg/mL si nota che mancano i dati relativi al campione scaldato. Questo perché il campione dopo essere stato scaldato era diventato troppo rugoso e tridimensionale per essere analizzato con le tecniche utilizzate. Infatti non è stato possibile far assomigliare la curva sperimentale con quella teorica come invece è accaduto per tutti gli altri campioni. Allora questo campione non può essere funzionale come dispositivo.

Per tutti i restanti campioni si è potuto raccogliere i dati. Si può infatti vedere come i parametri variano in funzione o della temperatura o della concentrazione:

-all'aumentare della concentrazione aumenta anche lo spessore del film di N1400;

-riscaldando il campione si nota che la rugosità aumenta in modo significativo.

L'unico parametro che non subisce variazioni sostanziali è la densità.

## **5 Conclusioni generali**

Questo stage ha visto due momenti: il primo in laboratorio in cui, utilizzando la macchina a raggi X, sono stati analizzati molti campioni; il secondo momento riguardante lo studio e l'analisi al computer, grazie a programmi specialistici, dai dati raccolti.

In laboratorio è stato imparato il funzionamento di base della macchina a raggi X in dotazione, e come impostare scansioni ed analisi di vari campioni, capendo come i vari parametri della macchina vadano ad influire, a volte in modo significativo, sul risultato dell'analisi.

Ho anche imparato come riprodurre i dati raccolti dalla macchina in maniera grafica e precisa al computer, ed analizzare le curve sperimentali dei campioni e da lì intuirne la morfologia e le sue caratteristiche.