

EOS

Proposta di Progetto Premiale 2012

EOS

Elettronica Organica per Strumentazione Innovativa di Ricerca

ἤμος δ' ἠριγένεια φάνη ῥοδοδάκτυλος Ἥως,
Quando apparve, figlia della luce, Eos, l'Aurora dalle dita di rosa...
Omero, Odissea V, 228

Progetto congiunto INFN - CNR

Indice

Scheda del Progetto	pag. 1
Abstract	pag. 5
Introduzione	pag. 6
Stato dell'arte	pag. 7
Obiettivi	pag. 12
Articolazione del Progetto	pag. 15
Attività già svolte	pag. 22
Risultati Attesi e criteri di valutazione	pag. 23
Costi del Progetto	pag. 24
Allegati	pag. 28

Scheda del Progetto

Titolo:	EOS: Elettronica Organica per Strumentazione Innovativa di Ricerca	
Ambito di Intervento:	ICT e Dispositivi Sensoriali	
Ambito di Progetti ERC:	Physical Science and Engineering (PE)	
Linea di Intervento:	2	
EPR coinvolti:	INFN, CNR	
Altri Enti coinvolti	Dipartimento di Fisica, Universita' di Napoli 'Federico II' Dipartimento di Fisica, Universita' di Roma 3 Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Universita' del Salento Dipartimento di Chimica, Universita' di Milano Bicocca	
Responsabile di Progetto:	Alberto Aloisio	– Universita' di Napoli 'Federico II' e INFN
Responsabile Scientifico:	Antonio Cassinese	– Universita' di Napoli 'Federico II' e CNR
Responsabili Amm.vi:	Fausta Candiglioti	– INFN Napoli
	Sabrina Poggi	– CNR-SPIN

Elenco dei Partecipanti

INFN

Sezione di Napoli

Vincenzo	Izzo	Tecnologo
Stefano	Mastroianni	Tecnologo
Paolo	Mastroserio	Dirigente Tecnologo
Maria Rosaria	Masullo	Primo Ricercatore
Antonio	Pandalone	Tecnico
Gennaro	Tortone	Tecnico

Sezione di RomaTre

Paolo	Branchini	Primo Ricercatore
Antonio	Budano	Tecnologo
Antonio	Passeri	Primo Ricercatore
Diego	Tagnani	Tecnico

CNR

Dipartimento di Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia

Mario	Barra (SPIN)	Ricercatore
Aldo Amore	Bonapasta (ISM)	Ricercatore
Renato	Buzio (SPIN)	Ricercatore
Arrigo	Calzolari (NANO)	Ricercatore
Luca	Floreato (IOM)	Ricercatore
Stefano	Lettieri (SPIN)	Ricercatore
Tullio	Toccoli (IMEM)	Ricercatore

EOS

Dipartimento di Scienze Chimiche e Tecnologie dei Materiali

Michele	Muccini (ISMN)	Dirigente di Ricerca
Anna	Borriello (IMCB/IRC)	Ricercatore
Patrizia	Minutolo (IMCB/IRC)	Primo Ricercatore

In veste di associati alle attività di ricerca INFN e/o CNR, partecipano inoltre al progetto:

Università di Napoli Federico II – Dipartimento di Fisica

Alberto	Aloisio	PO
Pasqualino	Maddalena	PO
Ruggero	Vaglio	PO
Antonio	Cassinese	RU
Gianpiero	Pepe	PA
Antonio	Perroni	RU

Università di Roma 3 – Dipartimento di Fisica

Paola	Gallo	P.A.
Fabrizio	Petrucci	RU

Università del Salento – Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione

Giuseppe	Gigli	PO
----------	-------	----

Università di Milano Bicocca – Dipartimento di Chimica

Antonio	Papagni	PA
---------	---------	----

Abstract

EOS e' un progetto che si propone di fornire ad una vasta comunita' di ricerca un concetto innovativo di elettronica immersa nella strumentazione di misura, sviluppando un approccio basato su semiconduttori organici.

Per ottenere questo risultato, saranno usati transistor organici a effetto di campo (OFET), fabbricati prima su supporti tradizionali e successivamente flessibili. Il notevole incremento di prestazioni ottenuto in questo settore di ricerca nell'ultima decade ha significativamente aumentato le attese che questa tecnologia possa aprire ad una serie di applicazioni caratterizzate da un uso non convenzionale e pervasivo dell'elettronica. La possibilita' di portare le funzionalita' di lettura, digitalizzazione e controllo di un sensore su un supporto leggero e flessibile – in forma adesiva o addirittura *stampato* su di esso – apre un nuovo orizzonte di applicazioni.

Veri e propri circuiti integrati organici saranno sviluppati impiegando dispositivi OFET a basse tensioni di alimentazione, con nuovi materiali semiconduttori e sperimentando processi di realizzazione su supporti flessibili. Per raggiungere i risultati attesi, saranno presi in esame semiconduttori organici ad alte prestazioni, in grado di realizzare dispositivi sia a canale p, sia n. In particolare, in questo progetto si intende investigare le proprieta' di una classe di oligomeri derivati dal Perylene diimide (PDI), che permetterebbe di realizzare dispositivi a canale n con ottime prestazioni anche in termini di stabilita' ambientale. Grazie ai loro valori di LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) relativamente bassi, i composti a base di PDI funzionalizzati attraverso l'aggiunta di gruppi ciano ($C\equiv N$) nelle posizioni di bay della molecola (PDI_CY) hanno dimostrato eccellenti caratteristiche di trasporto elettronico, esibendo anche una significativa robustezza nei confronti dell'instaurarsi di fenomeni di intrappolamento di carica dovuto ad agenti esterni quali O_2 and H_2O .

Con le tecnologie presentate verranno realizzati circuiti integrati in grado di svolgere le principali funzionalita' analogiche (tra cui specchi di corrente, amplificatori cascode, amplificatori differenziali) insieme a celle logiche di base (inverter, buffer, porte logiche NAND/NOR, flip-flop). I semiconduttori di tipo p piu' promettenti, come il Pentacene e il DNTT (Dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene), saranno utilizzati per lo sviluppo di circuiti logici in architettura complementare CMOS. I circuiti saranno ottimizzati per funzionare stabilmente in condizioni ambientali una volta montati sulla strumentazione di misura. Verranno inoltre attentamente presi in esame tutti i problemi legati al loro interfacciamento con i sensori e la catena di acquisizione dati tipicamente usata negli esperimenti di fisica fondamentale ed applicata e nei test di laboratorio.

Il progetto richiede una strategia di forte collaborazione tra competenze scientifiche e tecnologiche molto diversificate e complementari, tradizionalmente suddivise tra CNR e INFN. Esse includono, solo per citarne alcune, sintesi di nuovi materiali, sviluppo di modelli teorici e numerici avanzati, deposizione di film sottili, studio delle proprieta' di interfaccia tra materiali, progettazione e collaudo di circuiti integrati complessi, sviluppo di modelli di simulazione circuitale avanzati, acquisizione dati di sensori e rivelatori.

Parole chiave: Elettronica organica, OFET, semiconduttori organici n-type, circuiti integrati organici, elettronica embedded, acquisizione dati di sensori e rivelatori.

Introduzione

Il termine Elettronica Organica viene oggi usato comunemente per individuare una settore di ricerca multidisciplinare che studia i fenomeni di base, lo sviluppo di nuovi materiali ed i processi costruttivi per la realizzazione di sensori e componenti elettronici basati su semiconduttori organici. Il successo di tali ricerche si basa:

- sull'azione combinata di nuovi materiali organici ad alte prestazioni, anche sintetizzati in base a specifiche richieste funzionali;
- sullo sviluppo di processi di produttivi a bassa temperatura, economici e che permettano di realizzare dispositivi a film sottili, su grandi aree e supporti flessibili;
- sulla possibilità di integrare in un unico processo produttivo sensori, fotoemettitori e transistor a effetto di campo su supporti organici quali plastiche, carta, tessuti e materiali bio-compatibili.

L'Elettronica Organica sta aprendo strade non convenzionali all'impiego di componenti elettronici eterogenei, in forma di sistemi sottili, leggeri, flessibili e a basso costo. La possibilità di integrare su supporti organici una vasta gamma di nuove funzionalità rappresenta indubbiamente un'opportunità tecnologica e di ricerca di primaria importanza. Il tema dell'Elettronica Organica è oggi universalmente considerato di interesse strategico per le ricadute tecnologiche che sta determinando nei più svariati ambiti applicativi, dall'illuminazione alla produzione di energia fotovoltaica, dallo sviluppo di nuovi sensori alla realizzazione di elettronica bio-compatibile. Negli ultimi dieci anni, l'interesse nei confronti di queste applicazioni si è enormemente accresciuto, sia a livello di ricerca accademica sia industriale. Ad oggi, tali applicazioni costituiscono uno degli scenari più promettenti della ricerca applicata nell'intero panorama scientifico internazionale. L'Elettronica Organica non solo ha dato un impulso straordinario agli studi teorici e sperimentali di Fisica della Materia, ma coinvolge direttamente chimici, ingegneri e fisici di tutte le discipline, coprendo un panorama di competenze che spazia dalla sintesi di nuovi polimeri alle tecniche litografiche più avanzate, allo studio di transistor basati su semiconduttori organici e dei circuiti analogici e digitali con essi realizzabili.

Sebbene quella basata sul carbonio sia un' Elettronica dalle indubbe notevoli potenzialità, ancora molto studio e ricerca saranno necessari prima che si arrivi allo stesso livello di comprensione e sfruttamento delle tecnologie basate sul silicio. Il mercato di massa è vicino solo per particolari applicazioni (tra cui schermi e diodi emettitori di luce), mentre in generale servono ancora significativi passi in avanti nel campo dei materiali, dei dispositivi, dei processi di produzione e nella scelta dei substrati. Tali esigenze stimolano il dialogo e la collaborazione sia tra Enti di Ricerca, sia con le principali Aziende attive nei settori chimico, elettronico e dei polimeri, al fine di realizzare ed immettere sul mercato prodotti competitivi in termini di prestazioni, di affidabilità e anche di impatto ambientale.

In tale ambito nasce la proposta di Progetto Premiale 2012 'EOS: Elettronica Organica per Strumentazione Innovativa di Ricerca', presentata congiuntamente da CNR e INFN. La natura interdisciplinare di questo programma di ricerca non solo valorizza le diverse competenze delle strutture partecipanti, ma presenta il valore aggiunto di mettere in contatto e coinvolgere su un tema comune laboratori e ricercatori di livello internazionale, tradizionalmente impegnati in campi diversi. La componente CNR contribuisce al progetto con le proprie competenze sullo sviluppo di nuovi materiali e nella progettazione di sensori e dispositivi organici. La componente INFN completa il quadro di ricerca, proponendo lo sviluppo di modelli di simulazione di dispositivi

organici e la progettazione di circuiti analogici e digitali su di essi basati per applicazioni relative a sensori e, più in generale, a strumentazione di misura di nuova generazione.

La stretta interazione tra chi progetta circuiti e sistemi e chi sviluppa le conoscenze e le tecnologie alla base dei dispositivi organici apre certamente nuove prospettive di sviluppo ad entrambe le comunità di ricerca. La sinergia di esperienze e competenze diversificate si propone come uno dei punti di forza del progetto e promette un'analisi originale e innovativa dei tanti problemi teorici e sperimentali ancora da risolvere.

Viene di seguito illustrato il programma presentato. Dopo una rassegna sullo stato dell'arte dei dispositivi organici ad effetto di campo, sono presentati gli obiettivi del progetto e le specifiche attività proposte, inquadrata alla luce delle ricerche già condotte dai proponenti. Sono quindi discussi i risultati attesi e i criteri di valutazione proposti.

Stato dell'arte

Negli ultimi venti anni, i transistor organici ad effetto di campo (OFET) hanno riscosso l'interesse delle comunità scientifiche e industriali in tutto il mondo grazie al loro possibile impiego in diverse applicazioni, quali schermi a matrice attiva [1,2], sensori chimici [3] e biologici [4], matrici di attuatori [5], etichette di identificazione a radiofrequenza [6].

In tutti questi casi, per via della struttura chimica dei materiali organici e delle loro intrinseche proprietà meccaniche, può essere ottenuto un elevato livello di innovazione attraverso la combinazione di funzionalità circuitali, dell'uso di substrati flessibili e di processi di fabbricazione a basso costo.

Più recentemente, la sintesi di nuovi semiconduttori organici con migliorate capacità di trasporto di carica e l'ottimizzazione delle tecniche di fabbricazione hanno incoraggiato nuove attività di ricerca, focalizzate in particolare sulla fabbricazione di circuiti digitali e analogici avanzati basati sull'integrazione di transistor organici. Con riferimento ai dispositivi digitali, è stata già dimostrata la fattibilità di porte logiche, oscillatori ad anello, transponder RFID [7] e anche microprocessori [8]. D'altro canto, il numero attuale di pubblicazioni riguardanti la progettazione e realizzazione di circuiti analogici organici è ancora molto basso. Gli esempi più significativi finora pubblicati sono infatti un convertitore ADC $\Sigma\Delta$ integrato su un supporto plastico [9], un convertitore analogico-digitale a 6 bit su vetro [10], un convertitore DC-AC [11] e i blocchi funzionali per la realizzazione di un sistema basato su sensori organici intelligenti [12].

Lo sviluppo di circuiti organici analogici e digitali con prestazioni stabili richiede, in ogni caso, che la risposta elettrica dei transistor componenti sia opportunamente ottimizzata.

In primo luogo, è necessario far ricorso a semiconduttori organici con la più alta mobilità possibile per la realizzazione del canale attivo dei transistor. Ad oggi, la massima mobilità (μ) ottenibile con transistor a film sottile organico supera di poco il valore di $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (circa tre ordini di grandezza inferiore alla mobilità elettronica in silicio cristallino). Tale valore può essere ottenuto soltanto con un numero molto limitato di composti organici, molti dei quali oligomeri.

In secondo luogo, al fine di ridurre la dissipazione di potenza dei circuiti organici realizzati e renderli compatibili con l'elettronica tradizionale, è anche necessario progettare transistor in grado di lavorare con tensioni di alimentazione di pochi Volt. Un primo passo in questa direzione è costituito dall'impiego di barriere dielettriche molto sottili, capaci di garantire l'accumulazione di elevate densità dei portatori di carica anche con l'applicazione di piccole tensioni di gate (V_{GS}). Molti lavori sperimentali riportati in letteratura hanno evidenziato però le difficoltà di raggiungere tale obiettivo e oggi, nella fabbricazione di transistor, sono pochissimi i materiali dielettrici compatibili con la realizzazione di barriere isolanti con spessore inferiore a 10 nm [13].

Il terzo problema tecnologico importante da considerare per lo sviluppo di circuiti complessi organici affidabili è la necessità di realizzare un processo produttivo che garantisca la migliore riproducibilità della tensione di soglia (V_{th}) dei singoli transistori.

In generale, è molto difficile controllare la tensione di soglia di un transistor organico e le procedure di fabbricazione introducono solitamente variazioni non trascurabili di V_{th} anche per dispositivi nominalmente identici. Inoltre, in molti casi, la V_{th} ha dimostrato di essere il parametro circuitale maggiormente influenzato dalle condizioni ambientali. Il suo valore, infatti, tende a degradare con l'invecchiamento del dispositivo.

Infine, anche prescindendo da fenomeni di contaminazione ambientale, va tenuto in debita considerazione il fatto che il valore di tensione di soglia V_{th} può cambiare durante il funzionamento del dispositivo a causa del cosiddetto effetto di *bias stress* (BS) [14]. Il BS ha luogo quando un transistor organico è pilotato in regime di accumulazione con una tensione di polarizzazione fissa (V_{GS} , V_{DS}) e si manifesta attraverso un decadimento nel tempo della corrente che scorre tra il drain e l'elettrodo di source (I_{DS}). Questo decadimento è sostanzialmente legato ad una deriva della tensione di soglia del transistor verso la tensione di polarizzazione V_{GS} . Da un punto di vista fenomenologico, esso può essere spiegato dall'instaurarsi nel tempo di fenomeni di cattura

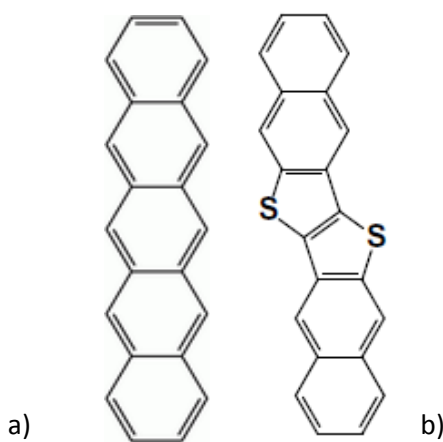


Fig.1: Pentacene (a) e DNTT (b)

progressiva dei portatori di carica liberi che, trasformandosi in carica spaziale, tendono a schermare il campo elettrico dovuto alla tensione esterna di gate. Per molte tipologie di transistor organici, in particolare quelle basate su barriere dielettriche di biossido di silicio (SiO_2), l'origine fisica del fenomeno di BS è stato attribuito al verificarsi di reazioni elettrochimiche in cui le cariche libere interagiscono con molecole di H_2O e O_2 assorbite all'interfaccia tra lo strato organico e la barriera dielettrica [15,16]. Come già menzionato, la criticità della V_{th} rispetto ai dettagli di processo, all'invecchiamento del dispositivo e alle condizioni di polarizzazione rende indispensabile adottare soluzioni circuitali e di architettura dei dispositivi che moderino gli effetti delle variazioni incontrollate della stessa V_{th} .

Con in mente questo scenario, è utile sottolineare che, fino ad oggi, le ricerche più avanzate sullo sviluppo di circuiti complessi organici sono state effettuate essenzialmente da due gruppi. Il primo è composto da ricercatori di IMEC (Lovanio, Belgio) in collaborazione con l'azienda Polymer Vision e con ricercatori dal centro HOLST/TNO (Eindhoven, Olanda). Questo gruppo ha realizzato transistor organici con doppio gate: uno primario, polarizzato con una tensione V_{GS} compresa tra -10V e 10V e uno secondario (*backgate*), che permette di compensare la tensione di soglia del transistor, senza modificare in modo significativo la mobilità. Il Pentacene (fig.1A), ad oggi il semiconduttore organico più utilizzato e studiato per la realizzazione di dispositivi a canale p, è stato usato da questo gruppo per fabbricare transistor con 5 μm di lunghezza del canale attivo (L), elettrodi d'oro e valori di mobilità di circa $0.15 \text{ cm}^2/Vs$ [17, 18]. Strati di polimero sono stati

utilizzati per la realizzazione delle barriere dielettriche sia in riferimento all'elettrodo di gate primario che a quello secondario. In questa architettura, inoltre, la struttura del gate secondario gioca anche il ruolo di incapsulante e schermo rispetto all'azione contaminante di umidità e ossigeno. Tale configurazione di transistor è stata impiegata con successo in un buon numero di circuiti digitali e analogici e attualmente può essere considerata come lo stato dell'arte in termini di complessità e capacità di integrazione [8, 12].

Il secondo gruppo di ricerca è costituito da ricercatori giapponesi dell'Università di Tokyo e da ricercatori tedeschi, provenienti in particolare dal Max Planck Institute di Stoccarda. In questo caso, sono stati realizzati circuiti organici operanti con tensioni di alimentazione comprese tra -3V e 3V e a bassissima potenza. L'isolamento di gate dei transistor è stato ottenuto tramite la combinazione tra una sottile barriera (pochi nm) di ossido di alluminio AlO_x , realizzata mediante l'esposizione ad un plasma di ossigeno di un strato di Al depositato in precedenza, e un monostrato molecolare auto-assemblato (SAM) depositato da soluzione [19, 20]. Questo approccio consente di ottenere una barriera isolante con spessore complessivo inferiore a 6 nm e capacità dielettrica per unità di area di molto superiore a 600 nF/cm^2 .

Varie molecole organiche sono state utilizzate per realizzare i canali attivi di questi transistori, ponendo un particolare accento sul Pentacene. Negli esperimenti più recenti, lo stesso gruppo ha adottato anche un nuovo semiconduttore organico, il Dinaphtho [2,3-b: 2', 3'-f] tieno [3,2-b] tiofene) DNNT (fig. 1b). In confronto con il Pentacene, il DNNT è caratterizzato da un maggiore potenziale di ionizzazione, cosa che ne migliora la stabilità elettrica in aria. Transistor con canale attivo a DNNT, di lunghezza compresa tra $10 \mu\text{m}$ e $50 \mu\text{m}$, realizzati con dielettrici di gate AlO_x/SAM (acido n-tetradecylfosfonico) e elettrodi di source-drain in oro possono essere considerati come l'attuale stato dell'arte tra i dispositivi di tipo p, a causa di una elevata mobilità (compresa tra 1.2 e $2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$), rapporto on/off di 10^8 e variazioni contenute della V_{th} . Tali dispositivi hanno mostrato di essere anche molto stabili, potendo essere conservati in condizioni ambientali per 8 mesi con un calo di mobilità limitato al 25% (contro la riduzione di oltre 1 ordine di grandezza misurata in quattro mesi per analoghi dispositivi basati sul Pentacene [20]).

Nella fabbricazione di circuiti complessi come sistemi organici a matrice attiva, sono state sviluppate nuove architetture di transistor, contraddistinte dall'introduzione di un gate ausiliario (*floating gate*), in posizione intermedia tra il canale attivo e il gate primario. Il *floating gate* è stato usato per programmare la tensione di soglia desiderata del transistor [21]. Questo approccio è stato sistematicamente utilizzato per compensare le variazioni V_{th} tra i vari transistori in modo da rendere possibile la realizzazione di sistemi di amplificazione con prestazioni sensibilmente migliori rispetto a quelle ottenute in precedenza da altri gruppi.

Da quanto fin qui discusso, emerge chiaramente che i circuiti organici più sofisticati sono stati finora realizzati nella maggior parte dei casi utilizzando solo dispositivi di tipo p. In pochi studi, infatti, semiconduttori di tipo n sono stati considerati in combinazione con quelli di tipo p per realizzare transistori complementari da applicare in architetture digitali complesse [10]. Ciò può essere sostanzialmente spiegato dal fatto che il numero di composti di tipo n con prestazioni elettriche accettabili in condizioni ambientali, è ancora oggi assai limitato. Tuttavia, negli anni più recenti, nuovi semiconduttori organici di tipo n, con migliori proprietà di trasporto di carica in aria, sono stati proposti per la realizzazione di transistor stabili e con risposta elettrica ottimizzata.

In questo contesto, le molecole della famiglia dei perileni diimidici (PDI) funzionalizzate con due gruppi ciano nella posizione di bay del nucleo molecolare (PDI_CY) sono oggi i composti più interessanti di tipo n, grazie alla loro capacità di garantire elevata mobilità di carica e stabilità di funzionamento in condizioni ambientali quando utilizzati per la realizzazione di OFET.

Queste caratteristiche sono principalmente dovute alle proprietà di auto-assemblaggio di queste molecole e ai loro bassi livelli LUMO (vale a dire il livello di energia associata al trasporto degli elettroni), che sono in genere inferiori a -4.0 eV. Tale caratteristica garantisce un'efficiente iniezione di portatori usando elettrodi ad alta funzione lavoro (tipicamente oro) [22] e rende inoltre

il trasporto di carica più stabile termodinamicamente nei confronti degli effetti di cattura legati alla presenza di gas ambientali [23, 24].

Tra le molecole PDI_CY, il PDI8-CN₂ (R₃ = C₈H₁₇, in fig.2) e PDIF-CN₂ (R₃ = CH₂C₃F₇, in fig.2)

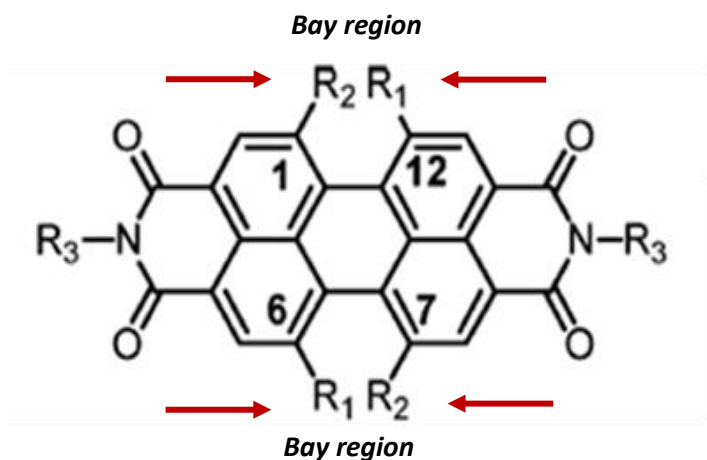


Fig.2: Molecole PDI_CY (R₁ =CN, R₂ =H)

sono i composti che stanno guadagnando maggiore popolarità nel mondo scientifico. Infatti, essi sono al centro di svariate ricerche, principalmente focalizzate sullo studio delle loro proprietà elettriche quando depositati in forma di film e cristalli. I composti PDI8-CN₂ e PDIF-CN₂ sono caratterizzati anche dalla capacità di assemblarsi in forma di film seguendo una modalità di crescita bidimensionale layer-by-layer su substrati isolanti, anche se con una diversa sensibilità rispetto al grado di idrofobicità della superficie.

OFET basati su film evaporati di PDI8-CN₂ mostrano in genere valori massimi di mobilità compresi tra 0.01 e 0.1 cm²/Vs [25]. I transistor basati sul PDIF-CN₂ presentano comunemente prestazioni migliori e, in molti casi, i valori di mobilità sono compresi tra 0.1 e 0.6 cm²/V*s [26]. Anche film di PDIF-CN₂ depositati da soluzione per *spin-coating* mostrano un pronunciato effetto di campo con mobilità fino a 0.1 cm²/Vs.

Nella pratica, le migliori prestazioni dei transistor con PDIF-CN₂ in confronto a quelli con PDI8-CN₂ sono state giustificate in base alla migliore capacità di auto-assemblaggio, con un aumento della sovrapposizione degli orbitali π - π, dovute alla presenza delle catene fluoro-alchiliche legate agli atomi di azoto laterali.

In seguito ai risultati di altri lavori [27], a questa stessa caratteristica è stata anche imputata la migliore stabilità ambientale di questo composto, dal momento che la struttura compatta dei film di PDIF-CN₂ può ostacolare in modo significativo la diffusione di O₂ atmosferico e H₂O, riducendo così drasticamente la relativa azione di cattura delle cariche libere.

Molto recentemente, la stabilità operativa dei transistor a PDI8-CN₂ e PDIF-CN₂ è stata studiata anche in termini di BS [16, 30]. È stato dimostrato che l'uso di strati di polimeri idrofobi come barriere dielettriche può fortemente ridurre il verificarsi di effetti BS in transistori di PDI_CY. Infatti, è stato verificato sperimentalmente che transistor a singolo cristallo di PDIF-CN₂, fabbricati sulla superficie dielettrica di un fluoropolimero altamente idrofobo (come il CytopTM), esibiscono prestazioni eccezionali in termini di scarsa sensibilità agli effetti di BS anche in aria, superiori a quelle di dispositivi simili basati su composti di tipo p [28]. Questo risultato è abbastanza sorprendente, in quanto i dispositivi di tipo n sono stati tradizionalmente considerati più fortemente influenzati dagli effetti di intrappolamento delle cariche [29].

La rilevanza tecnologica di queste molecole è anche dimostrata dal fatto che sono stati già impiegati per la realizzazione di porte logiche e dispositivi complessi come flip flop [30, 31] in grado di operare stabilmente in condizioni ambientali. In tutti questi casi, tuttavia, i circuiti sono stati

sviluppati usando barriere dielettriche con spessore maggiore di 200 nm e, per tali ragioni, essi potevano operare solo mediante l'applicazione di elevate tensioni di alimentazione, fino a 100 V.

E' opinione condivisa da tutta la comunità scientifica internazionale e dalle analisi di mercato che, nel giro di dieci anni, l'elettronica organica raggiungerà il livello di maturità necessario per utilizzi di massa nell'elettronica *consumer*.

Bibliografia

- [1] Z. Bao, J. Locklin, Organic field-effect transistors, Taylor & Francis, Boca Raton, USA 2007
- [2] Y. Nakajima, T. Takei, T. Tsuzuki, M. Suzuki, H. Fukagawa, T. Yamamoto, S. Tokito, J. Soc. Inf. Display 17 (2009) 629.
- [3] B. Crone, A. Dodabalapur, A. Gelperin, L. Torsi, H. E. Katz, A. J. Lovinger, and Z. Bao, Appl. Phys. Lett. 78, 2229 (2001)
- [4] P. Lin, F. Yan, Adv. Mater. 24, (2012) 34–51.
- [5] T. Sekitani, M. Takamiya, Y. Noguchi, S. Nakano, Y. Kato, T. Sakurai, T. Someya, Nat. Mater. 6 (2007) 413.
- [6] P. Baude, D.A. Ender, M.A. Haase, T.W. Kelley, D.V. Muyres, S.D. Theiss, Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 3964.
- [7] K. Myny, S. Steudel, S. Smout, P. Vicca, F. Furthner, B. van der Putten, A.K. Tripathi, G.H. Gelinck, J. Genoe, W. Dehaene, P. Heremans, Organic Electronics 11 (2010) 1176–1179
- [8] K. Myny, E. van Veenendaal, G. Gelinck, J. Genoe, W. Dehaene, and P. Heremans, IEEE Journ. Solid State Circuits 47 (2012) 284-291.
- [9] H. Marien, M. S. J. Steyaert, E. van Veenendaal, and P. Heremans, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 46, pp. 276–284, 2011
- [10] W. Xiong, Y. Guo, U. Zschieschang, H. Klauk, B. Murmann, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 45, pp. 1380–1388, 2010
- [11] H. Marien, M. Steyaert, E. van Veenendaal, and P. Heremans, Electron. Lett., vol. 47, pp. 278–280, 2011.
- [12] H. Marien, M. S. J. Steyaert, E. van Veenendaal, and P. Heremans, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 47, pp. 1712–1720 (2012)
- [13] A. Facchetti, M.H. Yoon, T. J. Marks, Adv. Mater. 17 (2005) pp. 1705-1725
- [14] H. Sirringhaus, Adv. Mater. 21, (2009) 3859.
- [15] P. A. Bobbert, A. Sharma, S. G. J. Mathijssen, M. Kemerink and D. M. De Leeuw, Adv. Mater., 24, (2012), 1146.
- [16] F. V. Di Girolamo, F. Ciccullo, M. Barra, A. Carella, A. Cassinese, Org. Electron. 13, (2012) 2281.
- [17] K. Myny, M.J. Beenhakkers, N.A.J.M. van Aerle, G. H. Gelinck, J. Genoe, W. Dehaene, P. Heremans, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 46, 2011, pp. 1223-1230
- [18] G. H. Gelinck, E. van Veenendaal, R. Coehoorn, Appl. Phys. Lett. 87, (2005) 073508
- [19] H. Klauk, U. Zschieschang, J. Pflaum, M. Halik, Nature 445, (2007) 745-748
- [20] U. Zschieschang, F. Ante, D. Kälblein, T. Yamamoto, K. Takamiya, H. Kuwabara, M. Ikeda, T. Sekitani, T. Someya, J. Blochwitz-Nimoth, H. Klauk, Organic Electronics 12, (2011) 1370-1375
- [21] T. Yokota, T. Sekitani, T. Tokuhara, N. Takei, U. Zschieschang, H. Klauk, K. Takamiya, T. C. Huang, M. Takamiya, T. Sakurai, T. Someya, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES VOL 59, (2012) 3434-3440
- [22] M. Barra, F.V. Di Girolamo, F. Chiarella, M. Salluzzo, Z. Chen, A. Facchetti, L. 702 Anderson, A. Cassinese, J. Phys. Chem. C 114, (2010) 20387–20393.
- [23] X. Zhan, A. Facchetti, S. Barlow, T. J. Marks, M. A. Ratner, M.R. Wasielewski, S.R. Marder, Adv. Mater. 23, (2011) 268-284.
- [24] R. Schmidt, J.H. Oh, Y.S. Sun, M. Deppisch, A.M. Krause, K. Radacki, H. Braunschweig, M. Konermann, P. Erk, Z. Bao, F. Wurthner, J. Am. Chem. Soc. 131, (2009) 6215.
- [25] F. Liscio, S. Milita, C. Albonetti, P. D'Angelo, A. Guagliardi, N. Masciocchi, R.G. Della Valle, E. Venuti, A. Brillante, F. Biscarini, Adv. Funct. Mater. 22, (2012) 943.
- [26] B.A. Jones, A. Facchetti, M.R. Wasielewski, T.J. Marks, Adv. Funct. Mater. 18, (2008) 1329–1339.
- [27] R.T. Weitz, K. Amsharov, U. Zschieschang, E.B. Villas, D.K. Goswami, M. Burghard, H. Dosch, M. Jansen, K. Kern, H. Klauk, J. Am. Chem. Soc. 130, (2008) 4637.
- [28] M. Barra, F.V. Di Girolamo, N. A. Minder, I. Gutierrez Letama, Z. Chen, A. Facchetti, A.F. Morpurgo, A. Cassinese, Very low bias stress in n-type organic single crystal transistors, Appl. Phys. Lett. 100, (2012) 133301.
- [29] L.L. Chua, J. Zaumseil, J.F. Chang, E.C.W. Ou, P.K.H. Ho, H. Sirringhaus, R.H. Friend, Nature 434, (2005) 194–199
- [30] B. Yoo, B.A. Jones, D. Basu, D. Fine, T. Jung, S. Mohapatra, A. Facchetti, K. Dimmler, M. R. Wasielewski, T.J. Marks, A. Dodabalapur Adv. Mater. 2007, 19, 4028–4032
- [31] B. Yoo, A. Madgavkar, B.A. Jones, S. Nadkarni, A. Facchetti, K. Dimmler, M. R. Wasielewski, T. J. Marks, and A. Dodabalapur, IEEE Electron Device Letters 27, (2006) pp. 737-739

Obiettivi

L'obiettivo fondamentale di questo progetto è la progettazione e la fabbricazione di circuiti organici avanzati che possano essere utilizzati come elementi di base per lo sviluppo di elettronica di lettura e di controllo per strumentazione di misura di nuova generazione. Gli sforzi vanno nella direzione di individuare la migliore combinazione tra materiali, configurazione dei dispositivi, regole di progettazione e processi di fabbricazione in grado di ottimizzare le prestazioni elettriche dei circuiti di interesse in condizioni ambientali, andando oltre il presente stato dell'arte.

Le attività saranno focalizzate sullo sviluppo di un certo numero di blocchi di base digitali (porte logiche, buffer, flip flop) e analogici (specchi di corrente, amplificatori cascode e differenziali, stadi di uscita) che, una volta ottimizzati, possano diventare la base per la realizzazione di circuiti avanzati come amplificatori, convertitori AD e DA, circuiti digitali di controllo, discriminatori.

La realizzazione di questi blocchi su substrati flessibili è vista come un requisito essenziale per permettere la loro futura semplice integrazione in sensori e apparati di misura.

Lo sviluppo di tutti i circuiti organici di interesse seguirà delle linee guida di carattere strategico:

- I circuiti saranno costruiti integrando transistor ad effetto di campo con prestazioni elettriche ottimizzate in termini di funzionamento a bassa tensione, mobilità del portatore di carica, stabilità elettrica in condizioni ambientali, presenza di effetti di *bias stress*.
- Le architetture complementari basate sulla combinazione di transistori a effetto di campo di tipo p e di tipo n sarà considerato come obiettivo primario, al fine di ottenere circuiti ad alta integrazione e basso consumo.
- La progettazione del dispositivo e del circuito adotterà configurazioni specifiche in grado di minimizzare gli effetti relativi alle variazioni dei parametri elettrici di base dei diversi transistor. Una particolare attenzione sarà rivolta al controllo delle fluttuazioni della tensione di soglia.
- Le temperature utilizzate durante le varie fasi di fabbricazione dovranno essere compatibili con l'uso di fogli di plastica come substrati. I processi a temperatura ambiente verranno sempre favoriti in assenza di un miglioramento significativo delle prestazioni elettriche dei dispositivi o circuiti ottenibili con l'uso di processi a temperature superiori.
- L'attività sperimentale sarà completata dallo sviluppo di modelli SPICE avanzati dei singoli dispositivi OFET e dei vari blocchi circuitali. Queste attività sono da ritenersi essenziali per creare una libreria di modelli da utilizzare in futuro per l'ulteriore sviluppo di circuiti organici di complessità crescente.

Gli obiettivi del progetto saranno raggiunti attraverso lo svolgimento di compiti specifici in cui il progetto stesso sarà suddiviso, come descritto nella successiva sezione. Sono qui di seguito elencati gli obiettivi (indicati come Ox) del progetto, corredati da una descrizione dei passi necessari per il loro conseguimento e del relativo Deliverable (indicato come Dx):

O1: Definizione di un protocollo di deposizione di film organici ad elevata qualità strutturale

I parametri di deposizione in grado di garantire il migliore possibile grado di cristallinità dei film depositati saranno identificati per qualsiasi combinazione di superficie semiconduttore

organico/dielettrico di interesse per il progetto. Due tecniche diverse e complementari (OMBD e SuMBE) saranno impiegate per questo scopo in associazione con un ampio numero di tecniche di caratterizzazione accurate.

D1: Report contenente una analisi dettagliata dei passi necessari per la realizzazione delle deposizioni di interesse.

- O2: Fabbricazione e caratterizzazione di transistor di tipo p ed n con mobilità $\geq 0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ su substrati rigidi

Saranno fabbricati transistor organici ad effetto di campo ed alta mobilità depositando semiconduttori organici di tipo p ed n su barriere dielettriche sottili di SiO₂ (40/50 nm) funzionalizzate con strati idrofobici. Per qualsiasi configurazione del dispositivo, la fabbricazione dei componenti (strato organico, superficie dielettrica, elettrodi source/drain) sarà ottimizzata in modo da ottenere valori di mobilità maggiore di $0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ in condizioni ambientali.

D2: Realizzazione di OFET su substrato rigido con le caratteristiche di mobilità indicate.

- O3: Fabbricazione e caratterizzazione di transistor di tipo p e n con mobilità $\geq 0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ su substrati flessibili

Saranno fabbricati OFET con alte prestazioni di mobilità (non inferiori a $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) a bassa tensione di alimentazione su fogli di plastica commerciali e flessibili (PET, PEN). Verranno dapprima presi in considerazione semiconduttori organici di tipo p ed n con il miglior rendimento selezionati per la fabbricazione di transistori su substrati rigidi.

D3: Realizzazione di OFET su substrato flessibile con le caratteristiche di mobilità indicate.

- O4: Fabbricazione di circuiti integrati

Saranno selezionati layout di transistor che mostrano le migliori prestazioni elettriche in termini di mobilità e riproducibilità della tensione di soglia V_{th} . Questi transistor saranno impiegati per la realizzazione di blocchi analogici e digitali complessi su substrati rigidi e flessibili. Per ogni blocco circuitale, la procedura di fabbricazione consisterà principalmente di processi di evaporazione e da soluzione e verranno utilizzati insieme di maschere specificamente disegnate.

D4: Report contenente una analisi dettagliata dei passi necessari per la realizzazione di circuiti integrati analogici (layout dei transistor, maschere e processi costruttivi).

- O5: Progettazione e Caratterizzazione di Amplificatori basati su OFET discreti

La risposta dinamica degli OFET discreti sarà accuratamente esaminata attraverso lo studio di amplificatori a componenti organici discreti. Larghezza di banda e la figura di rumore costituiranno i parametri di maggiore interesse. Saranno anche sviluppati modelli SPICE per la simulazione in transitorio ed in funzione della frequenza. Questa analisi getterà le basi per la progettazione di blocchi avanzati analogici e digitali.

D5: Realizzazione di circuiti complessi basati su OFET discreti con sviluppo di relativi modelli SPICE

- O6: Progettazione e test di blocchi analogici integrati: specchi di corrente, cascode e amplificatori differenziali

EOS

Saranno progettati 'building blocks' di uso comune per la realizzazione di amplificatori lineari. Saranno privilegiati schemi circuitali che mostrano prestazioni elettriche con sensibilità ridotta alla tensione V_{th} dei transistor singoli. La risposta dinamica di tutti i circuiti analogici sarà caratterizzata in condizioni ambientali. Le misure saranno confrontate con le simulazioni SPICE per migliorare la qualità dei modelli.

D6: Realizzazione di circuiti integrati organici per applicazioni analogiche di base

O7: Progettazione e test di inverter celle digitali integrate, buffer, porte logiche e flip-flop

Saranno progettate celle digitali in tecnologia complementare in grado di lavorare in aria, fabbricati su substrati rigidi e flessibili. La temporizzazione dei circuiti sarà studiata anche attraverso la realizzazione di oscillatori ad anello e di semplici circuiti sequenziali. Particolare attenzione sarà rivolta alla stabilità dei circuiti con reazione e alla moderazione di condizioni di azzardo potenzialmente introdotte dalla tecnologia impiegata

D7: Realizzazione di celle digitali combinatorie e sequenziali.

O8: Lettura e controllo di sensori e strumentazione di misura

Saranno analizzate le problematiche di interfacciamento dei circuiti organici con diverse tipologie di sensori e con strumenti tipicamente impiegati in applicazioni di misura. Sarà condotta una analisi dettagliata della compatibilità elettrica tra elettronica organica e dispositivi elettronici tradizionali. L'integrità del segnale e le massime correnti commutabili costituiranno due tra gli aspetti più critici da conciliare con la tecnologia organica e verranno affrontati fin dallo sviluppo dei circuiti integrati.

D8: Report contenente una analisi dell'interfacciamento dell'elettronica organica con sensori e sistemi di acquisizione dati.

Un altro obiettivo generale di questa proposta è quello di creare un gruppo interdisciplinare e sinergico composto da ricercatori INFN e CNR in grado di competere con altri Centri di Ricerca e Aziende che operano nel campo dell'elettronica organica. Il CNR sta promuovendo e sostenendo ricerca e attività di formazione in materia di dispositivi organici e ibridi organico-inorganici, ponendo grande attenzione alla creazione di una rete di competenze interdisciplinari necessarie per affrontare le sfide scientifiche collegate.

L'INFN ha una comprovata esperienza nello sviluppo di rivelatori e strumenti di misura innovativi, dotati di circuiti VLSI di ultima generazione. L'elettronica organica può fornire all'INFN uno strumento formidabile per la realizzazione un nuovo paradigma di integrazione tra elettronica e sensore. L'INFN è anche sempre più coinvolto nel trasferimento di soluzioni high-tech e di know-how nati in applicazioni di ricerca di base alle industrie locali e alle PMI. Questo processo porterà all'industria italiana innovazione e competenze in un settore di estrema importanza strategica. È utile evidenziare l'attitudine di questo progetto ad aggregare altri Centri di Ricerca e Aziende operanti nel settore in un panorama nazionale e regionale. In particolare, vale la pena di menzionare l'interesse per i semiconduttori organici di molti attori, tra i quali STMicroelectronics, l'ENEA, il Distretto Tecnologico sui Materiali Polimerici IMAST, SAES Getters, SCRIBA Nanotecnologie.

Articolazione del Progetto

EOS intende realizzare circuiti analogici e digitali avanzati basati sull'elettronica organica. I dispositivi ad effetto campo (OFET), sviluppati sia su substrati rigidi che flessibili dovranno operare a basse tensioni mostrando inoltre proprietà allo stato dell'arte. Data la natura del progetto, gli obiettivi proposti possono essere realizzati solo attraverso diverse competenze scientifiche e tecnologiche che vanno dalla sintesi dei composti organici specifici, alla crescita e realizzazione di film sottili di tali materiali in condizioni di ultra alto vuoto per mantenerne il giusto grado di purezza e ordine strutturale, dallo sviluppo di tecniche di modellizzazione delle proprietà delle molecole e dei dispositivi, alla funzionalizzazione chimico-fisica di interfacce e superfici, fino alla caratterizzazione con tecniche avanzate dei film e delle interfacce, all'uso di sistemi di micro-fabbricazione e alla progettazione e test di circuiti analogici e digitali complessi.

Lo sviluppo di circuiti integrati organici per applicazioni a strumentazione di ricerca costituisce l'aspetto principale dell'intero progetto. Su tale obiettivo convergono tutte le linee di ricerca prima illustrate. I dispositivi realizzati dovranno essere interfacciati con la strumentazione e con l'elettronica tradizionale, realizzando un ambiente di collaudo e verifica in grado di valutare i risultati ottenuti e guidare gli sviluppi futuri.

La tecnologia costruttiva dei singoli transistor organici deve essere caratterizzata ad un livello tale da poter sviluppare dei modelli SPICE per una affidabile simulazione analogica. E' poi necessario studiare l'effetto del layout sui dispositivi, individuando delle regole di disegno che permettano di unire ad una ragionevole resa di processo, il livello di prestazioni atteso dai singoli elementi circuitali. L'estrazione dei parametri parassiti distribuiti introdotti dal livello fisico di interconnessione pone delle difficoltà del tutto nuove nei confronti delle analoghe soluzioni sviluppate per l'elettronica tradizionale su silicio. Lo sviluppo di un circuito complesso prevede inoltre la distribuzione delle tensioni di alimentazioni e di segnali di temporizzazione, cosa che in dominio organico su supporti non convenzionali costituisce di per se un problema di non banale soluzione.

Lo sviluppo di circuiti integrati digitali richiede lo sviluppo e la validazione di celle base con funzionalità elementari (tipicamente porte logiche, inverter e buffer con diverse capacità di pilotaggio). Tra le celle standard, elementi sequenziali quali latch e flip-flop costituiscono un banco di prova fondamentale per l'avanzamento di questa tecnologia. Da una parte, essi rappresentano un caso di studio di essenziale importanza per l'integrazione di circuiti con percorsi critici e condizioni di azzardo; dall'altra questi permetterebbero di comporre una libreria ottimizzata per la successiva sintesi di architetture sincrone di complessità arbitraria. Dal punto di vista dei processi, un reale salto quantico nello sviluppo di circuiti digitali si potrà avere solo con la disponibilità di logica complementare sullo stesso substrato. In questa direzione, il progetto propone lo studio di materiali innovativi in grado di migliorare le prestazioni dei dispositivi a canale n.

La progettazione analogica richiede la modulazione di parametri costruttivi dei componenti base, sia passivi sia attivi, come il rapporto larghezza/lunghezza di canale di un transistor. L'approccio con celle standard, sebbene parametrizzabili, non permette di risolvere il problema con lo stesso livello di completezza raggiunto nelle applicazioni digitali. E' tuttavia possibile identificare un insieme di circuiti fondamentali per la realizzazione di un vero e proprio amplificatore operativo organico. Questo progetto intende quindi verificare la portabilità di tali architetture su tecnologie organiche, dai più semplici common source e common drain amplifiers, fino ai current mirrors più avanzati, ai folded cascode e differential amplifiers. L'analogia tra i dispositivi tradizionali e quelli organici e' significativa, ma ben lungi dall'offrire una completa dualità di comportamento. La fisica del dispositivo entra radicalmente nella definizione del suo comportamento analogico e impone l'adozione di soluzioni originali e punti di vista innovativi anche nella progettazione di circuiti considerati classici.

Lo sviluppo di circuiti integrati su supporti plastici apre la strada a una vera rivoluzione nell'equipaggiamento di strumenti di misura. Al contempo, pone dei seri problemi applicativi di

non banale soluzione. L'assenza di piani di massa impedisce una distribuzione delle alimentazioni con bassi valori di induttanza parassita; lo sviluppo di linee a impedenza caratteristica e controllata diviene problematico, con l'inevitabile presenza di riflessioni. Il crosstalk legato a ritorni di massa condivisi e all'assenza di schermi si propone come uno dei problemi più aggressivi da risolvere. Essendo relativo ai fronti di commutazione, il problema si presenta anche in applicazioni a frequenze di pochi Hz. Gli effetti dovuti al ground-bounce sono peraltro ben visibili nelle forme d'onda dei segnali catturate con l'oscilloscopio disponibili in letteratura. L'immunità e la compatibilità elettromagnetica di questi circuiti costituisce un elemento di studio a se stante. Se nella realizzazione di etichette a radio frequenza questi due aspetti sono esaltati nel verso di emettere e raccogliere la massima quantità di segnale, in applicazioni di misura si impone un comportamento totalmente opposto. Tutti questi aspetti sono oggi considerati minori rispetto allo sviluppo dei materiali e dei dispositivi e sono spesso ignorati. Essi tuttavia rischiano di divenire un forte elemento limitante per la diffusione di queste tecnologie e ricoprono un'importanza fondamentale nell'ambito di questo progetto.

Infine, lo sviluppo di elettronica organica per la strumentazione pone in modo evidente il problema del suo interfacciamento con il sensore, trasduttore o in generale con il dispositivo con cui interagisce. Non va tuttavia trascurato l'interfacciamento con l'elettronica tradizionale, inevitabilmente a valle di quella organica. Il paradigma di riferimento che si intende adottare in questo progetto è quello in cui la lettura dello strumento avviene in digitale, ma anche in questo caso particolarmente semplificato dal punto di vista elettrico sorgono problemi rilevanti. La logica sviluppata deve essere compatibile come livelli e capacità di pilotaggio con uno standard convenzionale. La pad di I/O deve essere in grado di pilotare un cavo e ricevere segnali con una sufficiente immunità al rumore.

Il raggiungimento degli obiettivi finali del progetto avverrà attraverso il superamento di diversi sotto-obiettivi intermedi. Ciò richiede un'accurata organizzazione del lavoro con l'attribuzione di ruoli e responsabilità specifici ai diversi gruppi di ricerca coinvolti.

Seguendo quest'idea il progetto è diviso in due principali attività (work package) fortemente interagenti fra di loro. La prima (WP1) sarà centrata sulla fabbricazione e il test di transistor ad effetto campo con funzionalità allo stato dell'arte sia per quanto riguarda materiali di tipo n sia di materiali di tipo p su substrati rigidi e flessibili. Importante sarà inoltre in tale contesto lo studio e la comprensione dei meccanismi fisici di base che regolano il funzionamento e le proprietà di tali dispositivi e materiali. La seconda attività (WP2) sarà centrata sulla modellizzazione tramite SPICE del comportamento di singoli OFET con la progettazione, fabbricazione e test di blocchi di circuiti analogici e digitali in grado di minimizzare le fluttuazioni tipiche delle proprietà elettroniche dei singoli dispositivi e i relativi comportamenti non ideali. Ogni singola attività è caratterizzata da diversi dettagliati task ai quali corrisponde un preciso set di risultati attesi legati ai diversi sotto-obiettivi del progetto. I gruppi del CNR sono principalmente attivi all'interno della prima attività mentre quelli di INFN sono leader nella seconda attività. In ogni caso lo sviluppo del progetto necessita una forte interazione fra i ricercatori coinvolti con scambi di idee e interazioni continue fra i diversi gruppi.

**WP1 (Leader M. Muccini):
Fabbricazione e caratterizzazione di transistor organici ad effetto campo.**

Si identificano 8 task riportati e descritti di seguito:

T1.1. Modellizzazione delle proprietà strutturali di interfaccia

- Mesi: 1-18
- Leader: Aldo Amore Buonapasta
- Gruppi coinvolti: SPIN, NANO, ISM, INFN-Roma3

L'attività teorica del gruppo CNR-Roma si focalizzerà sullo studio di microstrutture, di interazioni chimico/fisiche e delle proprietà elettroniche di interfacce organici/substrati (O-S) di interesse (e.g. DNNT e derivati del perilene su ossidi metallici), attraverso un approccio multiscala che permette di coprire diverse scale spaziali e temporali. Le simulazioni ab initio (basate su DFT) si combineranno con modelli semiempirici di dinamica molecolare (MD) studiati dal gruppo di UniRoma3. Allo stesso tempo, i risultati ab initio serviranno per la modellizzazione dei potenziali usati nella dinamica classica. Le simulazioni quantistiche includeranno gli effetti di contaminanti (H₂O, O₂, O₃), e dei difetti superficiali sulle prestazioni dei componenti organici. Inoltre daranno supporto agli esperimenti attraverso la simulazione di spettri XPS e NEXAFS. Questa attività è complementare ed integrata a quella svolta dal gruppo teorico CNR-Nano che userà i risultati strutturali come modelli iniziali per il calcolo del trasporto elettronico e termico attraverso le interfacce ibride.

Il gruppo di UniRoma3 si focalizzerà sulla simulazione di film sottili di semiconduttori organici - quali benzeni, tiofeni ad anello, oligomeri di pentatienoceni, DNNT e perilene (PD) - depositati su silice o ossidi metallici. I processi di crescita verranno simulati attraverso due approcci complementari, dinamica molecolare classica e Montecarlo, che forniranno una descrizione completa della dinamica e dei diagrammi di fase di campioni con milioni di atomi sulla scala dei nanosecondi.

T1.2 Sintesi e purificazione dei semiconduttori organici e dei substrati

- Mesi: 1-12
- Leader: Anna Borriello
- Gruppi coinvolti: IMCB/IRC, SPIN, ISMN

Questo task concerne la purificazione dei semiconduttori organici che verranno acquistati per la crescita dello strato attivo del transistor. Inoltre, si procederà alla sintesi del composto DNNT e di altri semiconduttori organici innovativi ottenuti con diverse tecniche, tra cui sintesi in fiamma, per la fabbricazione di transistor a effetto di campo (FET). In particolare, l'attenzione si focalizzerà su nuovi derivati di perylene di-imide ottenuti mediante funzionalizzazione del core perilenico con gruppi attrattori di carica non ancora studiati. Si procederà anche alla purificazione e funzionalizzazione dei substrati flessibili (PEN o PET).

T1.3 Realizzazione e funzionalizzazione di barriere dielettriche e di strati organici

- Mesi 1-12
- Leader: Tullio Toccoli
- Gruppi coinvolti: IMEM, SPIN, ISMN, NANO, IOM

In questo task l'attenzione sarà posta sul sistema AlO_x/monostrato autoassemblato (SAM) per la realizzazione delle barriere dielettriche sottili impiegate per la fabbricazione di transistor FET a

bassa tensione di lavoro. Le proprietà di questo sistema saranno investigate in funzione di diversi tipi di SAM appartenenti alla famiglia degli alkani-silani e degli acidi fosfonici. Parte dell'attività sarà anche dedicata alla funzionalizzazione di barriere dielettriche sottili di SiO₂ con monostrati idrofobici allo scopo di aumentare le prestazioni dei FET di tipo p- e n- su supporti rigidi.

La deposizione degli strati molecolari organici avverrà sia mediante tecniche di evaporazione convenzionale che tramite fasci molecolari supersonici (SuMBE). Mediante la tecnica SuMBE sarà possibile controllare il percorso termodinamico di crescita dei film selezionando i meccanismi microscopici accessibili (dal fisisorbimento alla reazione chimica) alle molecole depositate. La strategia poggia sull'uso della tecnica SuMBE per ottimizzare i processi termodinamici di superficie, in modo da determinare le migliori condizioni di crescita e il corrispondente miglioramento delle proprietà elettroniche dei film organici sottili.

T1.4 Caratterizzazione morfologica, ottica ed elettronica

- Mesi 1-18
- Leader: Stefano Lettieri
- Gruppi coinvolti: IMEM, IOM, SPIN, ISMN, NANO

In questa fase sarà svolta una completa caratterizzazione morfologica, strutturale, ottica ed elettronica dei film organici depositi e delle relative interfacce.

Tra le varie tecniche spettroscopiche, impiegheremo quelle STM, KPFM, EFM, AFM conduttivo e microscopia a forza atomica di tunnelling (TUNA). Tutte queste tecniche offrono il potenziale di fornire la correlazione tra le proprietà elettroniche e la struttura locale del film in condizioni ambientali.

Queste tecniche ci consentiranno di determinare: a) l'allineamento dei livelli energetici per il trasporto alle interfacce; b) la variazione locale della conducibilità all'interno dei domini e al limite dei domini; c) l'iniezione di carica, lo scambio di carica e la corrispondente densità degli stati (DOS) nel semiconduttore e alle interfacce. Parallelamente svolgeremo misure complementari volte all'identificazione delle impurezze chimiche presenti nel film (es. mediante fotoluminescenza risolta spazialmente e spettroscopia IR). Il funzionamento e la stabilità dei FET e dei relativi film organici sarà verificato misurando le loro proprietà di trasporto in diverse condizioni di esposizione all'ambiente e di illuminazione, utilizzando un intervallo di radiazione selezionabile dal vicino ultravioletto al vicino infrarosso (approssimativamente 350-800 nm). Questa analisi fornirà informazioni aggiuntive anche sulle proprietà fotoconduttive dei dispositivi per future applicazioni.

T1.5 Caratterizzazione delle interfacce (ossido/organico, metallo/organico)

- Mesi: 6-18
- Leader: Luca Floreano
- Gruppi coinvolti: IOM, SPIN, IMEM, NANO

Sarà condotta una caratterizzazione spettroscopica delle interfacce, anche fabbricate *in situ* e in funzione della temperatura, tra i diversi componenti dei dispositivi FET mediante tecniche di radiazione di Sincrotrone. La tecnica di spettroscopia fine di assorbimento a soglia, NEXAFS, ci consentirà di determinare la struttura elettronica degli orbitali molecolari non occupati e, insieme con la spettroscopia di fotoemissione dai livelli di core e della banda di valenza, anche il trasferimento di carica alle interfacce. Inoltre, sarà possibile determinare l'orientazione media delle molecole alle interfacce mediante la dipendenza dalla polarizzazione delle misure NEXAFS. La caratterizzazione spettroscopica delle interfacce sarà completata mediante la tecnica della generazione di seconda armonica (SHG). Sarà utilizzato il microscopio a forza atomica per studi nano-strutturali sistematici delle superfici dei film organici, volti a determinare la presenza di difetti strutturali negli strati attivi dei FET.

T1.6 Modellizzazione del trasporto elettronico e termico attraverso interfacce

- Mesi 3-18
- Leader: Arrigo Calzolari
- Gruppi coinvolti: SPIN, NANO, ISM, INFN-Roma3

L'attività teorica del gruppo CNR-NANO di Modena si focalizzerà sulle proprietà di trasporto elettronico e termico attraverso interfacce ibride composte da film molecolari organici (DNNT e perileni) su substrati di ossidi metallici, rappresentativi dei sistemi proposti dalla controparte sperimentale. Sia che i portatori siano elettroni che fononi, sarà usato un approccio unificato da principi primi (WanT, www.wannier-transport.org) per la risoluzione del problema di Landauer. Tale metodo si basa sulla combinazione di tecniche allo stato dell'arte per lo studio delle proprietà elettroniche e vibrazionali, quali la teoria del funzionale densità e la teoria perturbativa del funzionale densità. L'attività sarà svolta in collaborazione col gruppo CNR-Roma che fornirà modelli iniziali. L'approccio proposto permette di connettere le caratteristiche del dispositivo (e.g. resistenza di interfaccia, stabilità termica e dissipazione) alla dimensionalità e alla struttura atomica del sistema. Una volta note le conduttività elettriche e termiche sarà possibile ottenere anche le figure di merito termoelettriche ZT.

L'attività teorica dello gruppo CNR-Spin si baserà sullo studio del trasporto elettronico e termico in film sottili di DNNT e perileni, basato su modelli elettronici tight-binding, ottenuti da precedenti calcoli ab initio o dati sperimentali (in collaborazione con gli altri gruppi teorici). Le proprietà di trasporto verranno calcolate oltre il modello di Landauer, risolvendo il problema di Kubo attraverso il formalismo delle Funzioni di Green di Non-Equilibrio. Inoltre, utilizzando un approccio Montecarlo, si analizzeranno effetti di disordine strutturale, sempre presente nei campioni sperimentali. A tal proposito verranno considerati modelli elettronici in presenza di disordine, che caratterizzano la mobilità e le figure di merito termoelettriche ZT.

T1.7 Fabbricazione e caratterizzazione di OFET a bassa tensione di lavoro su substrati rigidi e flessibili

- Mesi: 6-20
- Leader: Giuseppe Gigli
- Gruppi coinvolti: NANO, SPIN, IMEM, ISMN, INFN-Napoli, INFN-Roma3

I transistor a bassa tensione di lavoro saranno fabbricati sia su substrati rigidi che flessibili. Per le strutture rigide, prenderemo in considerazione supporti multistrato composti da silicio ad alto drogaggio in funzione di elettrodo gate, strati dielettrici sottili (40/50 nm) di SiO₂ e film presagomati di oro come elettrodi source/drain. Le superfici di SiO₂ saranno anche funzionalizzate mediante monostrati idrofobici quali esametil-silazano (HDMS). I dispositivi flessibili saranno fabbricati con sistemi dielettrici del tipo AlO_x/SAM o polimeri su supporti di polietilene naftalato (PEN) o teraftalato (PET). Sarà valutata anche la realizzazione di dispositivi con un secondo elettrodo di gate flottante, dedicato al controllo del voltaggio di soglia del dispositivo. A questo scopo, saranno confrontate configurazioni di dispositivi con diverso posizionamento del gate flottante in termini di grado di controllo di V_{th} e fattibilità di fabbricazione. Saranno adottate diverse strategie per ottenere informazioni specifiche sulle impurezze chimiche e strutturali. Per questo scopo, sarà condotta inizialmente un'analisi comparativa del comportamento della tensione di soglia al variare della temperatura, misurata in OFET con diversi tipi di gate dielettrico.

T1.8 Fabbricazione di circuiti integrati

- Mesi: 12-20
- Leader: Mario Barra
- Gruppi coinvolti: SPIN, ISMN, INFN-Napoli, INFN-Roma3

Oltre alla fabbricazione e caratterizzazione dei singoli dispositivi a effetto di campo e di tutte le relative componenti, l'unita' CNR sarà anche responsabile della fabbricazione del prototipo analogico e dei blocchi digitali, secondo gli schemi circuitali sviluppati dall'unita' INFN. Per ogni blocco selezionato, progetteremo e fabbricheremo un set specifico di maschere. L'intero processo di fabbricazione sarà basato interamente su una sequenza di stadi di deposizione per evaporazione o precipitazione in soluzione dei diversi materiali impiegati (semiconduttore organico, barriera dielettrica, elettrodi metallici, eventuali strati di incapsulamento).

WP2 (leader P. Branchini)
Circuiti integrati organici ed applicazioni alla strumentazione di misura.

Il WP2 si articola nei tasks di seguito illustrati.

T2.1 Caratterizzazione statica degli OFET

- Mesi 1-12
- Leader: Vincenzo Izzo
- Gruppi coinvolti: INFN-Napoli, INFN-Roma3, SPIN, IMEM, ISMN

Verrà caratterizzata la risposta statica dei transistor organici a basse tensioni operative sia sotto vuoto, sia in condizioni ambientali. Le prestazioni statiche dei dispositivi p e n saranno analizzate rispetto alle curve di trasferimento e di uscita, al fine di stimare i parametri elettrici fondamentali come la mobilità, la tensione di soglia, il rapporto on-off, e l'andamento sotto-soglia. Gli effetti delle resistenze di contatto saranno studiati con la microscopia Kelvin Probe per la visualizzazione del profilo superficiale lungo il canale attivo delle tensioni applicate durante il funzionamento del dispositivo. A questo proposito, dispositivi con lunghezze di canale progressivamente minori saranno considerati. Per i dispositivi con l'elettrodo secondario di gate floating, tutti i parametri elettrici saranno analizzati in funzione dei due diversi segnali di gate.

T2.2 Caratterizzazione dinamica degli OFET ed estrazione dei modelli SPICE

- Mesi 3-18
- Leader: Antonio Passeri
- Gruppi coinvolti: INFN-Roma3, INFN-Napoli, SPIN

Uno degli scopi del progetto è quello di fornire uno strumento di simulazione circuitale di OFET organici analogo a quello esistente per i MOSFET tradizionali. La caratterizzazione dinamica permetterà di evidenziare l'effetto dei parassiti capacitivi e induttivi, legati ai materiali, alla struttura geometrica del dispositivo e alle condizioni di polarizzazione. Sarà possibile in questo modo costruire per approssimazioni successive una libreria SPICE che permetta una simulazione affidabile di circuiti e una valutazione preventiva di scenari *what-if*. Verranno sviluppati modelli allo stato dell'arte di dispositivi organici, sulla base di quanto disponibile in letteratura. L'accuratezza dei modelli verrà verificata dapprima a livello statico e successivamente in regime di piccoli e grandi segnali.

T2.3 Analisi e modeling dei fenomeni di deriva e di invecchiamento (*bias stress*, isteresi, effetti ambientali)

- Mesi 1-18
- Leader: S. Mastroianni
- Gruppi coinvolti: INFN-Napoli, INFN-Roma3

Lo studio dinamico degli OFET permetterà anche di studiare i fenomeni di deriva sotto polarizzazione (bias stress) che si manifestano sotto forma di incremento della tensione di soglia e diminuzione della mobilità. Anche questi effetti potranno essere modellati e riprodotti con analisi SPICE in transitorio.

T2.4 Amplificatori con OFET discreti: misura di guadagno, banda e rumore; confronto con modelli teorici e simulazioni

- Mesi: 6-18
- Leader: Maria Rosaria Masullo
- Gruppi coinvolti: INFN-Napoli, INFN-Roma3

Gli OFET discreti, realizzati con tecniche e materiali diversi, saranno usati per la costruzione di circuiti complessi, sia analogici, sia digitali. Sarà così possibile valutare le prestazioni dei circuiti in condizioni dinamiche e con differenti schemi di polarizzazione. Particolare accento sarà posto sulle misure di guadagno, banda e cifra di rumore. Questa fase costituisce un primo fondamentale avvicinamento alle problematiche della progettazione di circuiti integrati organici.

T2.5 Progettazione back-end di circuiti integrati: regole del layout ed estrazione dei modelli SPICE delle interconnessioni

- Mesi: 8-18
- Leader: Paolo Mastroserio
- Gruppi coinvolti: INFN-Napoli, SPIN

In questa fase, saranno studiate apposite regole di layout per individuare le geometrie migliori di posizionamento degli OFET in un circuito integrato. Le regole saranno derivate da misure effettuate su layout di test realizzati nel WP1 che permetteranno di studiare il cross-talk e la distribuzione della tensione di alimentazione e di segnali di sincronizzazione. Lo studio del layout sarà completato dallo sviluppo di modelli SPICE delle interconnessioni circuitali integrate.

T2.6 Progettazione front-end e caratterizzazione dinamica di circuiti integrati analogici: specchi di corrente, amplificatori cascode e differenziali

- Mesi: 12-18
- Leader: A. Budano
- Gruppi coinvolti: INFN-Napoli, INFN-Roma3

Sarà sviluppata la vista circuitale (front-end) di alcune configurazioni di uso comune nella progettazione di amplificatori lineari. I circuiti analogici di interesse sono i classici specchi di corrente, amplificatori cascode e differenziali, rivisitati alla luce delle caratteristiche degli OFET. Dalla vista circuitale si passerà al layout fisico del circuito secondo quanto descritto nel WP1. I prototipi saranno caratterizzati ed le misure saranno confrontate con le simulazioni SPICE. Sulla base di questi test, i modelli SPICE saranno ulteriormente migliorati, tenendo anche conto dell'impatto del layout fisico.

T2.7 Progettazione front-end e caratterizzazione dinamica di celle digitali: inverter CMOS, buffer, porte logiche, flip-flop

- Mesi : 14-24
- Leader: Vincenzo Izzo
- Gruppi coinvolti: INFN-Napoli, INFN-Roma3

Si intende sviluppare la vista logico-circuitale (front-end) di una libreria di celle standard composta da inverter, buffer e porte logiche quali NAND e NOR, a cui affiancare successivamente flip-flop

edge-triggered. In letteratura sono descritti flip-flop organici basati su latch di tipo D in configurazione Master-Slave con 16 transistor. Con una architettura complementare sarà possibile integrare architetture simili a quelle adottate sul silicio, con una drastica riduzione di area e consumi. Dalla vista circuitale si passerà al layout fisico del circuito secondo quanto descritto nel WP1. Sui prototipi sarà effettuata una accurata caratterizzazione dei principali parametri timing e della dissipazione di potenza statica e dinamica.

T2.8 Interfacciamento di circuiti organici con sensori e sistemi di acquisizione dati

- Mesi: 16-24
- Leader: Paolo Branchini
- Gruppi coinvolti: INFN-Napoli, INFN-Roma3, SPIN

L'impiego di circuiti organici in applicazioni reali richiede il loro interfacciamento con i sensori e con i sistemi di acquisizione dati usati in laboratorio e su esperimento. In questo task saranno studiate le architetture di lettura digitale più promettenti, con particolare riguardo alla compatibilità dei livelli logici, alle tensioni di alimentazione e alla potenza dissipata. Saranno anche studiati gli effetti di degrado del segnale (signal integrity) dovute alla lunghezza delle interconnessioni ed ai collegamenti sui supporti flessibili.

Attività già svolte

I partecipanti CNR al progetto, afferenti ai Dipartimenti di Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia e di Scienze Chimiche e Tecnologie dei Materiali, hanno acquisito nel corso degli anni ampia esperienza nel campo della realizzazione di transistor organici, dando un forte contributo alla relativa letteratura. In particolare, i ricercatori che partecipano alla presente proposta progettuale hanno focalizzato negli ultimi 5 anni i loro interessi scientifici sulla crescita e caratterizzazione morfologica ed elettrica di film sottili e singoli cristalli basati su molecole di: Perilene diimide (PDI) con particolare riguardo a composti funzionalizzati con gruppi ciano posizionati nella bay region (PDI_CY), Pentacene ed altri materiali p-type (basati su Picene e Tiofeni). I partecipanti hanno sviluppato notevole expertise nella deposizione di strati organici, sia tramite Organic Molecular Beam Deposition (OMBD) che tramite Supersonic Molecular Beam Deposition (SuMBE), dimostrando in particolare che quest'ultima tecnica consente la crescita di strati organici aventi un alto livello di ordine cristallografico, mentre la prima consente la realizzazione di eterostrutture di alta qualità.

Le caratteristiche di crescita delle sopramenzionate molecole è stata accuratamente investigata tramite tecniche di microscopia a scansione di sonda (SPM), includendo in particolare la microscopia a forza atomica (AFM), la microscopia a forza elettrostatica (EFM) e la microscopia tunnel a scansione (STM). Tecniche di Ballistic Electron Emission Microscopy (BEEM) sono state utilizzate da ricercatori SPIN per analisi delle barriere energetiche presenti tra interfacce oro/PDI8-CN2. I ricercatori coinvolti possiedono inoltre una vasta esperienza nella sintesi di molecole coniugate impiegate in diverse applicazioni in fotonica.

I proponenti hanno una consolidata esperienza nella realizzazione di differenti dispositivi basati su materiali organici, includendo OFET, OLET, memorie e biosensori, realizzati tanto su substrati rigidi che flessibili. Il team di fisici teorici possiede inoltre una esperienza di lungo termine nello sviluppo di metodi – basati su tecniche ab-initio e Montecarlo - per la descrizione degli stati elettronici in semiconduttori organici.

I partner INFN delle Sezioni di Napoli e Roma Tre completano le competenze dei partecipanti CNR, contribuendo al progetto con una solida conoscenza nel campo dell'elettronica embedded e dei sensori e portando una comprovata esperienza nella costruzione di strumentazione di misura e di sistemi di acquisizione dati. Negli ultimi 5 anni, essi sono stati fortemente coinvolti nella

progettazione di microprocessori custom, di collegamenti seriali ad alta velocità, di interconnessioni ottiche, di SoC (System-on-Chip) basati su circuiti FPGA e VLSI, applicati alla lettura e al controllo real time di rivelatori e apparati di misura complessi. Essi sono stati anche impegnati nella caratterizzazione di rivelatori innovativi a stato solido e nella progettazione di cavità a radiofrequenza per accelerazione di protoni. Essi hanno inoltre sviluppato codifiche per trasmissione dati in applicazioni critiche, ove sia richiesto basso rumore e limitata dissipazione di potenza.

I partner INFN coinvolti nel progetto hanno anche realizzato sistemi sofisticati di acquisizione dati per esperimenti di punta di Fisica delle Alte Energie attualmente in fase di presa dati al CERN di Ginevra, contribuendo alla progettazione di hardware allo stato dell'arte e allo sviluppo di framework software e sofisticati applicativi di analisi dati.

Risultati Attesi e criteri di valutazione

I risultati attesi del progetto sono ben definiti dalle liste di tasks e di deliverables indicati nelle precedenti sezioni. Tra i vari aspetti, bisogna rimarcare che l'utilizzo di due differenti tecniche di deposizione tra loro complementari darà un significativo contributo alla crescita di film organici con elevata qualità cristallina e, conseguentemente, con una ridotta influenza degli effetti di bordo di grano sulla risposta elettrica dei dispositivi ad effetto di campo con essi realizzati.

La correlazione tra le proprietà elettriche e quelle morfologiche, così come un'analisi approfondita delle interfacce, dovrebbe consentire di comprendere i meccanismi elementari che governano le proprietà di trasporto di carica nei materiali organici analizzati e lo specifico ruolo delle regioni interfacciali che separano i vari layers che compongono i transistor. In termini applicativi, saranno realizzati OFET con valori di mobilità comparabili con quelli dello stato dell'arte attuale, considerando sia substrati rigidi sia flessibili. L'obiettivo principale è quello di ottenere dispositivi con un'elevata stabilità in aria, in modo tale da consentire la fabbricazione di circuiti analogici e digitali di pratica applicazione come inverters, amplificatori cascode e flip flop.

Il risultato più ambizioso è legato alla capacità di interfacciare i circuiti organici che saranno sviluppati con strumenti di misura e monitoraggio attualmente utilizzati in esperimenti di fisica fondamentale. A questo riguardo, il progetto EOS contribuirà a definire un nuovo paradigma scientifico e tecnologico per lo sviluppo di specifiche architetture ibride organico-inorganico che potranno trovare applicazione in vari campi sperimentali.

Sia a livello nazionale che regionale, si ritiene che le attività progettuali rafforzeranno ulteriormente l'interesse verso l'elettronica organica, con conseguente promozione di attività di ricerca e formazione così come di attività di trasferimento tecnologico verso le PMI.

Gli strumenti principali per la verifica dei risultati ottenuti dal progetto saranno le pubblicazioni su riviste internazionali e/o i brevetti ottenuti dai partner coinvolti. Allo stesso scopo, potrà anche essere considerata la realizzazione di attività di trasferimento tecnologico verso le PMI.

Altri elementi di verifica potranno anche essere:

- La disponibilità di composti di tipo p e n con elevate prestazioni elettriche come il DNTT e i derivati del perilene diimide.
- La fabbricazione su substrati rigidi e flessibili di OFET di tipo p e n su con migliorata stabilità in aria e prestazioni elettriche confrontabili o migliori di quelle riportate in letteratura. In termini quantitativi, è attesa una mobilità μ superiore a $0.5 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$ e un rapporto on/off ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$) maggiore di 10^6 per dispositivi su substrati rigidi. Per dispositivi flessibili, sono auspicati mobilità più grandi di $0.1 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$ e rapporto on/off superiori a 10^4 .

- La fabbricazione di amplificatori integrati con guadagno di 10 db a frequenza di 1 Khz.
- Lo sviluppo di una libreria SPICE per la modellizzazione avanzata della risposta dinamica e dei fenomeni di bias stress negli OFET.
- La realizzazione di celle digitali in architettura complementare, compresi flip-flop edge-triggered e buffer open-drain capaci di pilotare correnti nel range dei mA;
- Gli schemi di interfacciamento tra dispositivi elettronici organici, sensori e circuiti basati sul silicio;
- La definizione di una catena di read-out dalla circuiteria organica al computer.

Costi del Progetto

I costi complessivi del progetto sono illustrati nelle tre tabelle riportate di seguito. Le prime due illustrano il piano economico biennale dettagliato sia per l'INFN, sia per il CNR. La terza riassume gli aspetti finanziari complessivi per macrovoci di spesa.

Il finanziamento del secondo anno di progetto si basa:

- su cofinanziamento del personale strutturato degli EPR, valorizzato in base alla percentuale di tempo dedicata al progetto e alla retribuzione media;
- sulle previsioni di finanziamenti imputabili a fondi di Ateneo, fondi generali di Istituti, fondi di Progetti e Contratti di Ricerca.

Le caratteristiche interdisciplinari e innovative che contraddistinguono il progetto richiedono un adattamento di alcuni laboratori alle specifiche necessità di ricerca e l'acquisizione di strumentazione allo stato dell'arte. I giovani ricercatori da reclutare in questo progetto costituiscono un elemento fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi previsti.

Tabella 1: Dettaglio dei costi per l'INFN

Descrizione Voci di Spesa INFN	I anno	II anno	Totale
Personale (KEuro)			
6 annualita' di Assegno di Ricerca	150		
Cofinanziamento Personale strutturato INFN		135	
Totale	150	135	285
Prestazioni di Terzi (KEuro)			
Progettazione di PCB	40	10	
Progettazione di una test box per interfacciamento dei campioni organici con la strumentazione di laboratorio	35		
Progettazione di una camera climatica per test in differenti condizioni ambientali	35		
Totale	110	10	120
Materiali (KEuro)			
Componenti Elettronici	35	20	
Cavi e connettori per misure con elettrometri	15		
Sistemi di calibrazione per misure di impedenza	30		
Meccanica per test box e camera climatica	30		
Totale	110	20	130
Attrezzature (k€)			
Analizzatore di Parametri di Semiconduttori	150		
Analizzatore di Reti Vettoriale	80		
Analizzatore di Spettro	90		
Elettrometri e Alimentatori a profilo programmabile	60		
Schede di acquisizione dati e di interfacciamento strumentazione da laboratorio	60		
Totale	440		440
Infrastrutture (k€)			
Ristrutturazione laboratori e creazione di sale sperimentali ad ambiente controllato	80		
Allestimento sistema di conservazione campioni sotto vuoto	20		
Ristrutturazione ambienti per camera climatica		50	
Totale	100	50	150
Spese Generali (k€)			
Spese di gestione e amministrazione	40	35	
Totale	40	35	75
Altre tipologie (k€)			
Missioni, conferenze, pubblicazioni	50		
Totale	50		50
Totale (KEuro)	1000	250	1250

Tabella 2: Dettaglio dei costi per il CNR

Descrizione Voci di Spesa CNR	I anno	II anno	Totale
Personale (KEuro)			
6 annualita' di Assegno di Ricerca	150		
Cofinanziamento Personale strutturato CNR		135	
<i>Totale</i>	150	135	285
Prestazioni di Terzi (KEuro)			
Subcontratto materiali innovativi, quantita > 1 grammo	50		
<i>Totale</i>	50		50
Materiali (KEuro)			
Materiali di consumo: deposizioni, gas di processo, substrati, reagenti chimici, materili organici , targets, componentistica elettrica , elettronica ed ottica	230	30	
Spese di calcolo	40	10	
<i>Totale</i>	270	40	310
Attrezzature (k€)			
Manipolatore sistemi ultra alto vuoto	110		
Implementazione sistemi di Calcolo	55		
Implementazione sistemi di deposizione per realizzazione circuiti integrati	40	10	
Implementazione sistemi di deposizione per spettroscopia in situ	40	10	
Sistema di misure elettriche sotto vuoto	40		
Implementazione sistemi di funzionalizzazione substrati	30	10	
Implementazione sistemi di misure ottiche	40		
<i>Totale</i>	355	30	385
Infrastrutture (k€)			
Ristrutturazione laboratori deposizioni e funzionalizzazione subtrati	50		
<i>Totale</i>	50	0	50
Spese Generali(k€)			
Overheads	55	25	
<i>Totale</i>	55	25	80
Altre tipologie (k€)			
Missioni, conferenze, pubblicazioni	70	20	
<i>Totale</i>	70		90
<i>Totale (KEuro)</i>	1000	250	1250

Tabella 3: Costo complessivo del progetto per macrovoci di spesa

Macrovoci di spesa INFN + CNR (WP2 + WP1)	Ammontare previsto	Fonte FOE7%	Cofinanziamento. Altre fonti di copertura	Incidenza percentuale (sul totale di 2500 k€)
Personale INFN + CNR (come da elenco dei partecipanti)	570 k€	300 k€	270 k€	23 %
Prestazione di terzi	170 k€	160 k€	10 k€	7 %
Materiali	440 k€	380 k€	60 k€	18 %
Attrezzature	825 k€	795 k€	30 k€	32 %
Infrastrutture	200 k€	150 k€	50 k€	8 %
Spese generali	155 k€	95 k€	60 k€	6 %
Altre tipologie (missioni, conferenze)	140 k€	120 k€	20 k€	6 %
Totale	2500 k€	2000 k€	500 k€	100%

Allegato A

Curriculum del Responsabile di Progetto

Alberto Aloisio è nato nel 1963. Si è laureato in Fisica a Napoli nel 1988. È professore straordinario presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Napoli, dove insegna Elettronica e Architettura degli Elaboratori. È associato alle attività dell'INFN dal 1989 e in tale ambito svolge attività di ricerca in Fisica delle Particelle e su temi di ricerca tecnologica e interdisciplinare. Dal 1989 al 2000 ha partecipato attivamente alla sperimentazione sul Large Electron Positron (LEP) collider al CERN di Ginevra, dove continua la sua attività nell'ambito del programma di ricerca al Large Hadron Collider. In tale ambito ha progettato e realizzato apparati innovativi per la rivelazione di particelle e sistemi di analisi per la selezione real-time e lo studio di canali di decadimento rari. Ha inoltre proposto e guidato attività di ricerca in elettronica finanziate dall'INFN, da programmi PRIN e da collaborazioni tra Aziende e Università. In tale ambito ha realizzato sistemi di calcolo embedded basati su microprocessori sviluppati *ad hoc*, architetture di trasmissione ottica per rivelatori sottomarini, sistemi riconfigurabili ad elevata affidabilità basati su FPGA e circuiti VLSI, link seriali nel dominio multi Gb/s per applicazioni real-time critical a latenza fissa. È attualmente impegnato nello sviluppo di sistemi Phase-locked loops (PLLs) completamente digitali.

È revisore di case editrici internazionali, riviste e conferenze IEEE. È revisore di progetti di ricerca per l'INFN e per il Ministero della Ricerca (PRIN, FIRB, Programma Montalcini, Valutazione della Ricerca). Ha fatto parte su invito di Comitati Scientifici di conferenze IEEE e di progetti di ricerca europei. È autore di oltre 300 pubblicazioni su riviste internazionali con h-index (SPIRES) di 68.

Curriculum del Responsabile Scientifico

Antonio Cassinese è nato a Napoli nel 1969. Si è laureato in Fisica nel 1992 e ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Fisica nel 1996, presso l'Università di Napoli Federico II. Durante il dottorato, ha trascorso periodi al CERN di Ginevra in qualità di "Research Associate". Successivamente ha trascorso due anni (1997-1999) all'Università di Wuppertal come post-doc con una borsa Madame Curie Individual Fellowship della Comunità Europea. Dal 1° Febbraio 2002 è ricercatore dell'Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Fisica. La sua attività di ricerca, a carattere sperimentale, è orientata allo studio delle proprietà di trasporto elettrico, d.c. e r.f., dei materiali superconduttivi, organici e ibridi organici inorganici (I/O), sia per la comprensione di meccanismi di fisica di base sia per possibili applicazioni nel campo dell'elettronica. Dal 2004 è impegnato nella realizzazione di dispositivi ad effetto di campo (FET) basati su film superconduttivi e lo studio di materiali e dispositivi elettronici organici o ibridi organici-inorganici (principalmente FET, Memorie, spin-valve). Ha anche partecipato alla realizzazione di microdispositivi ibridi I/O (Lab-on-chip) per lo studio delle patologie dei globuli rossi e alla realizzazione di altri dispositivi di interesse biosensoristico.

La sua attività di ricerca è svolta in collaborazione con prestigiosi Enti nazionali ed internazionali e avvalendosi di contratti/collaborazioni con industrie operanti nella telefonia mobile (Omnitel-Vodafone, Pirelli Lab, Telecom Lab.) e in elettronica (STmicroelectronics). È autore di più di 100 articoli su riviste internazionali (h-index 13), di due brevetti ed è revisore per riviste di Fisica dello Stato Solido (Applied Physics Letters, European Physics Journal B, Fisica C) di Ingegneria Elettronica della IEEE e Elettronica Organica. È stato inoltre Revisore per il MIUR di progetti PRIN e per la procedura di Valutazione della Qualità della Ricerca 2004-2010. Ha fatto parte su invito di Comitati Scientifici di conferenze Nazionali e Internazionali e di progetti di ricerca europei.

Lettera di manifestazione di interesse del CNR



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento di Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia

Prot. n.

Data: 06/02/2013

Oggetto: **Manifestazione di Interesse**

AMMCNT - CNR - Amministrazione Ce

Tit. Cl. F.

N. 0007433 06/02/2013



Al **Prof. Fernando Ferroni**
Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Piazza dei Caprettari, 70
00186, Roma

e p.c. **Prof. Luigi Nicolais**
Presidente del Consiglio Nazionale delle Ricerche
Piazzale Aldo Moro, 5
00185, Roma

p.c. **Dr. Carlo Ferdeghini**
Direttore dell'Istituto superconduttori, materiali innovativi e dispositivi
Corso F. Perrone
16152, Genova

p.c. **Prof. Alberto Morgante**
Direttore dell'Istituto officina dei materiali
Corso F. Perrone
16152, Genova

p.c. **Dr. Lucia Sorba**
Direttore dell'Istituto Nanoscienze
Piazza San Silvestro 12
56127, Pisa

p.c. **Dr. Dino Fiorani**
Direttore dell'Istituto di struttura della materia
Via del Fosso del Cavaliere, 100
00133, Roma

p.c. **Dr. Giuseppina Padeletti**
Direttore dell'Istituto per lo studio dei materiali nanostrutturati
Via dei Taurini, 19
00185, Roma



*Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento di Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia*

p.c. **Dott. Salvatore Iannotta**
Direttore dell'Istituto dei materiali per l'elettronica ed il magnetismo
Parco Area delle Scienze 37/A
43124, Parma

p.c. **Dr. Eugenio Amendola**
Direttore dell'Istituto per i materiali compositi e biomedici
Piazzale Vincenzo Tecchio, 80
80125, Napoli

p.c. **Dott. Anna Ciajolo**
Direttore ff. dell'Istituto di ricerche sulla combustione
Piazzale Vincenzo Tecchio, 80
80125, Napoli

In relazione al Progetto Premiale denominato “*Elettronica Organica per Strumentazione Innovativa di Ricerca*” il sottoscritto Prof. Massimo Inguscio, in qualità di Direttore del Dipartimento di Scienze Fisiche e Tecnologia della Materia del Consiglio Nazionale delle Ricerche, ritiene che il progetto coordinato dall’*Istituto di Fisica Nucleare*, abbia un elevato valore strategico dal punto di vista dello sviluppo scientifico e sia di interesse per gli Istituti CNR coinvolti, quali: SPIN, IOM, IMEM, NANO, ISM, ISMN, IMCB e IRC, pertanto conferma il desiderio di partecipare allo stesso.

La realizzazione di questo progetto permetterà di migliorare la competitività dei nostri Enti e rafforzerà le potenzialità già espresse in un settore strategico quale l’*ICT e i Dispositivi Sensoriali*, aumentando ulteriormente la sinergia già esistente tra gli Istituti CNR e l’INFN e sviluppando strumentazione innovativa basata sull’impiego dell’ *Elettronica Organica* con particolare riferimento alle applicazioni di diretto interesse per esperimenti di fisica fondamentale.

Cordialmente

Massimo Inguscio
Direttore del Dipartimento di
Scienze Fisiche e Tecnologia della Materia
Consiglio Nazionale delle Ricerche