

In primo piano:

- Francesco Rossella ci parla della ricerca TE al NEST di Pisa
- Qualche nota sull'ultimo *stint* H2020 e su quello che ci attende in FP 9
- Termoelettrico per gioco dalla Corea

L'Editoriale

Nanofili di semiconduttore: la via *bottom-up* al termoelettrico

di *Francesco Rossella**

Nell'ambito delle nanoscienze e nanotecnologie applicate al campo della termoelettricità, una strada assai esplorata e in continua evoluzione consiste nello sfruttare la nanostrutturazione e l'ingegnerizzazione dei materiali per controllare indipendentemente i parametri termici ed elettrici al fine di massimizzare la figura di merito ZT. Una via forse più recente e meno battuta vede i metodi e le tecniche delle nanotecnologie trovare applicazione nello sviluppo di piattaforme per il benchmarking completo delle proprietà termoelettriche di nanosistemi. In un approccio pionieristico ed esplorativo, alcune fenomenologie "esotiche" esibite nel trasporto elettrico o termico da opportuni sistemi nanostrutturati, riconducibili ad esempio ad effetti quantistici, non lineari o a multicorpi, forniscono un

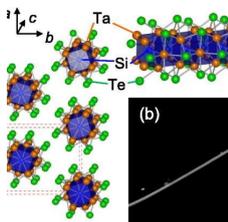
formidabile terreno di gioco e di scoperta per ricerche di carattere fondamentale nell'ambito della termoelettricità (e della termodinamica) alla nanoscala.

Presso il laboratorio NEST [1] della Scuola Normale Superiore di Pisa è attiva una linea di ricerca sulla termoelettricità alla nanoscala, che si basa su nanostrutture cristalline di semiconduttore aventi elevato *aspect ratio* (nanofili) cresciute dal gruppo di Lucia Sorba (CNR-NANO@NEST) mediante una tecnica nota come epitassia a fasci chimici (CBE). Durante un'unica crescita i nanofili si autoassemblano sopra un substrato a partire da "semi" di catalizzatori, tipicamente costituiti da nanoparticelle di Au [2]. Il controllo delle condizioni di crescita e dei materiali utilizzati (semiconduttori di tipo III-V) permette di otte-

nerne svariate combinazioni di elementi e geometrie delle nanostrutture, realizzando ad esempio eterostrutture radiali [3] o, grazie al rilassamento dello strain, assiali [4]. Inoltre, la disposizione dei nanofili sul substrato di crescita può essere controllata sfruttando tecniche di nanolitografia per definire il pattern di nanoparticelle metalliche che catalizzano la crescita dei nanocristalli. I nanofili di semiconduttore di tipo III-V esibiscono eccellenti proprietà di trasporto elettrico, offrono la possibilità di sfruttare l'effetto di campo per il controllo del riempimento delle bande e di controllare le proprietà termiche grazie alla scelta opportuna della geometria, delle dimensioni e degli elementi utilizzati. Per studi termoelettrici, i nanofili vengono usualmente rimossi dal substrato di

(Continua a pagina 4)

Bollettino dell'Associazione Italiana di Termoelettricità



Un tellururo 1D con fattori di potenza elevati nella regione criogenica

Un mini-tutorial= sul termoelettrico aprirà l'ECT 2017

Segnalazioni dalla letteratura

Apriamo le segnalazioni con un lavoro di scuola californiana sui polimeri per la termoelettricità apparso su [Science](#): *Morphology controls the thermoelectric power factor of a doped semiconducting polymer*.

Si occupa di problematiche più fondamentali *Enhancing Thermoelectric Performance Using Nonlinear Transport Effects*, pubblicata recentemente su [Phys. Rev. Applied](#).

Sperimentale ma in ogni caso di natura fondamentale

lo studio riportato dal [J. Phys. Chem. Lett.](#) sulle proprietà termoelettriche di giunzioni van der Waals—Schottky; mentre si occupa di giunzioni molecolari metallo-porfirine il lavoro pubblicato su [Phys. Chem. Chem. Phys.](#) da una collaborazione anglo-irakena.

Una ampia collaborazione internazionale firma invece un [Nano Letters](#) sullo *spin Seebeck effect* in materiali ferrimagnetici compensati; cui risponde un [AIP Advances](#) a firma ispano-giapponese focalizzato su

multilayers $[\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Pt}]_n$.

Certamente merita una lettura un lavoro a cavallo tra termoelettrico e nanofotonica apparso su [Nat. Nanotech.](#) che discute la generazione locale di differenze di temperatura ad opera di nanostrutture irraggiate.

Concludiamo con un [APL](#) tutto giapponese che riporta elevati *power factor* a basse temperature in un tellururo 1D, Ta_4SiTe_4 .

Convegni e scuole

Ormai alle porte l'[ICT 2017](#) di Pasadena, di cui daremo ampio conto nel prossimo numero del bollettino, si avvicina l'[IUMRS 2017](#) e il suo [Simposio A5](#) sulla termoelettricità, che sarà anche il congresso continentale della *Asian Thermoelectric Association* (Kyoto, 27 agosto - 1 settembre).

Procede invece l'organizzazione dell'[ECT 2017](#) di Padova (25—27 settembre 2017). Per la strada l'ECT si arricchisce di una nuova iniziativa, quella di una [mini-scuola](#) sulla termoelettricità.

Prorogata al 15 luglio la deadline per la early registration dell'[EUROMAT 2017](#) di Salonicco (17—22 /9), che annovera una sessione (la E3) su *"Materials for Energy harvesting"*. Da segnalare anche il [232nd Electrochemical Society Meeting](#) (National Harbor, MD USA, 1—6/10) che ospita una sessione (la G04) sul termoelettrico; e la [53rd International Conference on Microelectronics, Devices and Materials](#) che si terrà a Lubiana (Slovenia) dal 4 al 6/ ottobre e che prevede un Workshop su *"Materials for Energy*

Conversion and their Applications: Electrocalorics and Thermoelectrics".



Francesco Rossella firma l'editoriale di questo numero

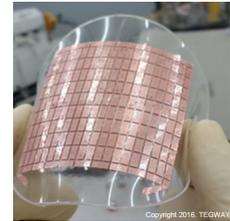
Anno 4, Numero 3

Industria e dintorni

Tutti conosciamo bene i due principali impieghi dei materiali termoelettrici, come generatori di potenza elettrica e come pompe di calore. La TEGWay, spin-off del *Korea Advanced Institute of Science and Technology* (KAIST), propone un originale riutilizzo dell'effetto Peltier nella realtà aumentata/virtuale, realizzando una

“pelle artificiale” in grado di trasmettere all'utilizzatore sensazioni di caldo e freddo con tempi di risposta di pochi millisecondi. Il dispositivo è ovviamente flessibile ed integrabile in guanti o altri manipolatori virtuali. [ThermoReal®](#) si propone quindi ad un mercato ampio e in continua crescita, riutilizzando la stessa tecnologia

che TEGWay aveva proposto qualche anno fa per la [generazione termoelettrica](#).



Sensazioni termiche nella realtà virtuale con ThermoReal®

Bandi

Qualche novità a livello europeo, anche se non strettamente (o univocamente) focalizzata sul termoelettrico. L'APRE segnala con un certo risalto la definizione dell'agenda 2018-2020 di H2020, che viene presentata in questi giorni attraverso una serie di [webinars](#). Tra le call di interesse più diretto, ormai quasi completamente assestato il programma per [ICT](#) mentre appare un po' più nebulosa l'agenda delle call su [Nanotechnologies, Advanced materials, Biotechnology, Advanced manufacturing and processing](#). Molta attesa anche per le nuove finestre dedicate a [Secure, clean and efficient energy](#).

Per le aziende, torna l'opportunità delle [Fast Track to Innovation](#), che dovrebbero riaprire i battenti nel 2018 dopo un anno di stasi.

Prosegue inoltre la definizione dell'FP9, per il quale cominciano a circolare documenti di indirizzo, come quello della [LERU \(League of European Research Universities\)](#).

Complessivamente, H2020 (e FP9) sembrano confermare il focus sulla manifattura digitale, con importanti investimenti nell'ICT e nelle tecnologie (anche dei materiali) abilitanti il paradigma *Industria 4.0*. Questo apparentemente anche a discapito dell'attenzione che H2020 aveva riservato alle tematiche energetiche, a partire da quelle sul solare e sulle tecnologie ad esse sussidiarie. Anche nella ricerca di base, se è tutto da capire il lancio su grande scala del programma [ERC Synergy](#), l'attenzione sembra dirottata fortemente sugli aspetti di modellazione, con

meno enfasi che in passato verso la ricerca sperimentale esplorativa.

Il quadro appare quindi in forte movimento, anche se non necessariamente in senso positivo. Sarà bene tenere gli occhi aperti, condividendo le informazioni che ognuno di noi riesce a raccogliere.

Dato che non di sola Europa si vive, c'è una certa attesa per i nuovi PON FES-FESR che, pur non interessando necessariamente tutte le regioni italiane, potrebbero offrire opportunità di collaborazioni con le sedi interessate primariamente dai bandi.

Attesa per i
PON FES-
FESR

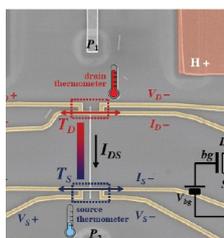


ICAM-IUMRS a Kyoto



Il NEST alla Normale di Pisa

Aperto l'invito del NEST alle collaborazioni con la comunità TE italiana



Nanofili di InAs su SiO₂/Si

L'Editoriale

(Continua da pagina 1)

crescita e trasferiti su un substrato (tipicamente SiO₂/Si⁺⁺) adatto per la fabbricazione di nanodispositivi che permettano di sfruttare il *field-effect*. A questo scopo, si utilizzano le facilities di fabbricazione disponibili presso la camera pulita (classe ISO 6) del NEST.

Diciamo subito che lo sviluppo di materiali nanostrutturati, basati su nanofili III-V, che possano servire come piattaforme ad alta efficienza termoelettrica per applicazioni su larga scala, rappresenta per noi un obiettivo a lungo termine. La nostra esperienza di fabbricatori, unita al nostro *background* di fisici sperimentali sulle proprietà di trasporto elettrico e termico in nanodispositivi, ci porta ad esplorare soprattutto nuove architetture di dispositivi, insieme a metodi di fabbricazione e tecniche di caratterizzazione innovativi per lo studio del termoelettrico alla nanoscala. Sfruttando al massimo la versatilità della crescita epitassiale, i nostri sforzi sono rivolti anche alla realizzazione di nanogeneratori termoelettrici e nano-termocoppie ottenute a partire da singoli nanofili eterostrutturati

ad esempio di tipo *core-shell*.

In questo contesto, abbiamo realizzato un dispositivo a singolo nanofilo che permettesse di sfruttarne le ottime caratteristiche elettriche e di generare termovoltaggi dell'ordine del mV, sviluppando un transistor a effetto di campo che, mediante un riscaldatore sepolto nel substrato [5], permette di indurre al contempo un bias termico $\Delta T > 10$ K e una robusta modulazione della conducibilità elettrica σ nella stessa nanostruttura [6]. Abbiamo così mappato l'evoluzione del coefficiente di Seebeck S con la temperatura e in funzione di σ modulata dal *field-effect*, fornendo inoltre un metodo innovativo per la stima e della mobilità elettronica. Per misurare accuratamente e simultaneamente il gradiente di temperatura e il flusso di calore nella stessa nanostruttura, abbiamo progettato architetture di dispositivo a filo sospeso che, sfruttando la combinazione di tecniche ottiche ed elettriche, permettessero di determinare tutti i parametri termoelettrici di nanofili singoli e di quantificare la figura di merito ZT dei dispositivi [7]. Abbiamo poi sviluppato

dispositivi via via più complessi per la misura simultanea di ciascun parametro termoelettrico con metodo "tutto-elettrico" (sfruttando la tecnica 3-omega [8]), affinando i protocolli di fabbricazione e implementando nello stesso dispositivo termometri locali, riscaldatori sospesi ed elettrodi metallici che possono fungere da gate locali. Questa attività, tuttora in corso, ci permetterà di investigare nuovi regimi di trasporto termico-elettrico e di studiare la fattibilità di dispositivi avanzati, quali ad esempio rettificatori termici a nanofilo.

Un aspetto di assoluta rilevanza per le applicazioni termoelettriche, nell'ambito dell'*energy harvesting* e dell'*heat management* in nanoelettronica, riguarda la manipolazione di configurazioni locali fuori dall'equilibrio in nanostrutture. Ciò è possibile ad esempio utilizzando set di *probes* locali per misurare le fluttuazioni spontanee della corrente (rumore). In questo contesto, abbiamo sfruttato la tecnica dello *shot-noise* [9] per caratterizzare il trasporto elettrico e termoelettrico in singoli nanofili di InAs a temperature criogeniche,

(Continua a pagina 5)

Anno 4, Numero 3

(Continua da pagina 4)

misurando il termovoltaggio, calibrando il *bias* termico applicato lungo il nanofilo, e realizzando uno schema di riscaldamento per contatto molto più efficiente rispetto a quello convenzionale via substrato [10].

Per concludere, vorrei osservare che gli approcci, le tecniche e le architetture di dispositivo che abbiamo sviluppato per i nanofili possono essere adattate ed ottimizzate anche per altri tipi di nanostrutture. Mi permetto perciò di invitare a contattarci tutti coloro che intravedono prospettive di collaborazione in tal senso, ricordando anche che presso il NEST, come Scuola Normale Superiore o in convenzione con CNR-NANO, vi sono opportunità di svolgere progetti di dottorato, tesi di laurea e *internship* post-laurea su tematiche affini al termoelettrico.

* Scuola Normale Superiore di Pisa e Laboratorio NEST — Pisa

- [1] Il laboratorio NEST, *National Enterprise for nanoScience and nanoTechnology*, è un centro interdisciplinare di ricerca e di formazione sulla nanoscienza dove operano fisici, chimici e biologi (circa 140 persone). Il NEST comprende quattro diverse istituzioni: la Scuola Normale Superiore, il CNR (Istituto Na-
- noscienze), l'IIT (*Center for Nanotechnology Innovation*) e la Scuola Superiore Sant'Anna (centro Nanoplant). Le attrezzature e le attività di ricerca sono strettamente coordinate e i ricercatori collaborano sui comuni obiettivi scientifici specifici indipendentemente dalla propria affiliazione. Le conoscenze sviluppate sono utilizzate per realizzare nuovi strumenti nanobiologici, dispositivi e architetture di tipo nano-elettronico e fotonico e nanotermoelettrico.
- [2] U P Gomes, et al., Controlling the diameter distribution and density of InAs nanowires grown by Au-assisted methods, *Semicond. Sci. Technol.* 30 (2015) 115012.
- [3] F. Rossella, et al., Nanoscale spin rectifiers controlled by the Stark effect, *Nature Nanotech.* 9, 997–1001 (2014) and ref therein.
- [4] M. Rocci, et al., Tunable Esaki Effect in Catalyst-Free InAs/GaSb Core-Shell Nanowires, *Nano Lett.*, 2016, 16 (12), 7950–7955
- [5] S. Roddaro, et al., Large thermal biasing of individual gated nanostructures, *Nano Res.* 7: (2014) 579.
- [6] S. Roddaro, et al., Giant Thermovoltage in Single InAs Nanowire Field-Effect Transistors, *Nano Lett.*, 2013, 13 (8), 3638–3642
- [7] S. Yazji, et al., Complete thermoelectric benchmarking of individual InSb nanowires using combined micro-Raman and electric transport analysis, *Nano Res.* 8 (2015) 4048.
- [8] G. Pennelli, et al., Indirect measurement of thermal conductivity in silicon nanowires, *J. Appl. Phys.* 115, 084507 (2014).
- [9] E. S. Tikhonov, et al., Local noise in a diffusive conductor, *Scientific Reports* 6, 30621 (2016).
- [10] E S Tikhonov, et al., Noise thermometry applied to thermoelectric measurements in InAs nanowires, *Semicond. Sci. Technol.*, 31 (10), 2016

Associazione Italiana di Termoelettricità

Presidente: Dario Narducci

associtalte@gmail.com

Segretario Generale: Monica Fabrizio

Twitter: @AIT_ItTS

Comitato Esecutivo: Stefano Boldrini, Carlo Fanciulli, Giovanni Pennelli

Sito web: ait.ieni.cnr.it

Consiglio Direttivo: Umberto Anselmi-Tamburini, Simone Battiston, Alberto

AIT è anche su [Facebook](#) e su

Castellero, Bruno Lorenzi, Antonella Rizzo

[LinkedIn](#)

L'Associazione Italiana di Termoelettricità

Dallo Statuto dell'AIT:

“La Associazione ha lo scopo di promuovere lo studio e la ricerca nel settore dei fenomeni termoelettrici e delle loro applicazioni e in particolare (a) di favorire e incrementare la ricerca scientifica nel settore della termoelettricità; (b) di divulgare la conoscenza dei fenomeni termoelettrici e l'importanza delle loro applicazioni nel quadro del benessere e del progresso nazionale, europeo e mondiale; (c) di attivare e mantenere relazioni con associazioni, società ed organizzazioni nazionali di altri paesi aventi analoghi scopi e con la European e la International Thermoelectric Society; (d) di promuovere e favorire lo studio dei fenomeni termoelettrici nelle università e nelle scuole di ogni ordine e grado.”

AIT su Internet:

ait.icmate.cnr.it

Come iscriversi all'AIT

Il modulo di iscrizione è [scaricabile](#) dalla rete.

Sono disponibili tre livelli di associazione:

- socio junior, riservato a chi ha fino a 35 anni e a quanti, indipendentemente dall'età, non abbiano un lavoro né fisso né temporaneo al momento dell'iscrizione (la borsa di dottorato *non* è un lavoro -- né temporaneo né tanto meno fisso). La quota di iscrizione è di 25 €;
- socio attivo, con una quota di iscrizione pari a 50 €;

- socio sostenitore, con una quota di iscrizione di 100 € — una forma associativa pensata per chi volesse (e potesse) sostenere con uno sforzo speciale la crescita dell'AIT.

Tutti i soci (juniores, attivi e sostenitori) partecipano alla attività dell'Associazione con gli stessi diritti e doveri.

Come meglio specificato nel modulo di iscrizione, la quota associativa può essere saldata con bonifico bancario. Su richiesta verrà rilasciata una ricevuta di

pagamento oltre ovviamente alla tessera associativa.