

L'ELETTRONICA DI DOMANI: DISPOSITIVI SPINTRONICI PER LO SVILUPPO DELLE TECNOLOGIE DEL FUTURO

Emanuele Longo

Riassunto

Rinnovare l'industria dell'elettronica con il fine di creare dispositivi elettronici sempre più veloci e poco energivori è diventato, ai giorni nostri, un bisogno sempre più stringente. Negli ultimi decenni, sono nate nuove branche dell'elettronica proprio per rispondere a questa necessità. Tra queste, la spintronica sta riscuotendo particolare interesse da parte della comunità scientifica.

In questo articolo, vengono affrontati alcuni dei temi più importanti riguardanti questa transizione tecnologica, fornendo un quadro generale delle sfide energetiche e ambientali che la nostra generazione deve affrontare. Successivamente, i concetti alla base della spintronica e dei dispositivi ad essa correlati sono brevemente discussi con l'obiettivo di preparare il lettore all'ultima parte del testo, in cui vengono presentati i risultati ottenuti all'interno della tesi di dottorato vincitrice dell'XI edizione del Premio Celluprica.

Abstract

Nowadays, the renewal of the electronic industry became of central interest to produce faster and more efficient electronic devices for the everyday life. In the last decades, new branches of electronics emerged for such a need, being the spintronics one of the most intriguing. In the first part of this paper, a few of the most important topics dealing with this technological transition are introduced, with the aim to provide a general picture of the future energetical and environmental challenges that our generation has to face. Subsequently, some preliminary concepts at the base of spintronics are discussed to prepare the reader for the last part of the text, where the results obtained within the PhD thesis winner of the 11th edition of the "Premio Celluprica" award are reported.

Parole chiave: *Spintronica, Isolanti topologici, Efficienza energetica.*

Keywords: *Spintronics, Topological Insulators, Energy efficiency.*

1. Introduzione

Le tecnologie per l'informazione e per la comunicazione (dall'inglese Information and Communication Technologies - ICT) stanno rivoluzionando le nostre vite insieme alle nostre abitudini lavorative, aspetti divenuti ancor più tangibili durante la pandemia di COVID-19. Le agende dei diversi governi in Europa e nel mondo sono costantemente aggiornate per tenere conto del sempre più vasto utilizzo di prodotti ICT, e di servizi correlati, da parte di ogni individuo. Nel periodo 2005-2019, il numero di persone con accesso ad Internet è aumentato da 1.1 a circa 4 miliardi, rappresentando il 51% dell'intera popolazione mondiale. All'interno di questo scenario, il crescente impiego di prodotti ICT ha generato un enorme impatto in termini di consumo energetico^{2,3}. A riprova di ciò, nel 2020 i consumi di energia elettrica registrati relativamente al solo comparto ICT sono risultati pari a circa 3000 TWh, l'11% del totale nel mondo. A questi aspetti si

aggiungono le previsioni sulla richiesta energetica nel futuro a breve termine, con una stima di circa 8000 TWh entro il 2030 (vedi Fig. 1). Il costante aumento dei consumi potrebbe avere un impatto significativo sul cambiamento climatico, la cui mitigazione è annoverata tra le più grandi sfide del XXI secolo⁴.

La crisi climatica non è la sola ragione per cui si necessita di un maggior impegno legato all'efficientamento energetico dei dispositivi elettronici del futuro.

La necessità di gestire grandi quantità di dati (*big data*) e l'avvento di nuove forme di calcolo – come le reti neurali, il machine learning e, più in generale, lo sviluppo di intelligenze artificiali – richiedono uno sforzo ulteriore nella ricerca di nuove strategie per la computazione, la gestione e l'immagazzinamento di dati. Nel corso degli anni, l'evoluzione dell'industria della micro e della nano-elettronica è stata scandita da una legge empirica nota come *legge di Moore*: attraverso questa legge, è possibile prevedere l'aumento della potenza di calcolo dei dispositivi elettronici in

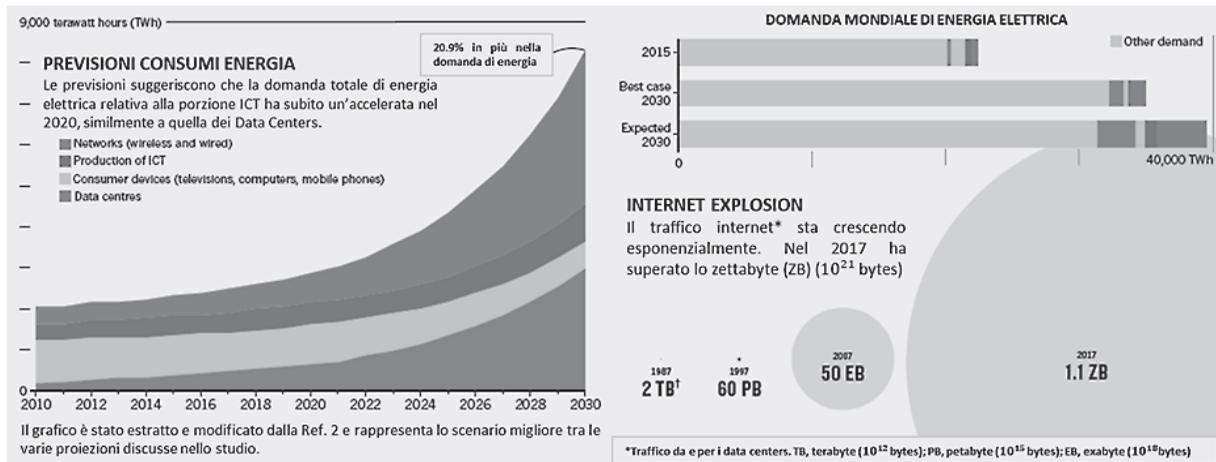


Fig. 1. Infografica sul consumo di energia elettrica mondiale. Immagine estratta e modificata dalle Ref. 2 e 3.

base ai progressi tecnologici dell'industria dei semiconduttori, nello specifico a ciò che viene chiamato *nodo litografico*.

Un particolare tipo di litografia è la tecnica di fabbricazione principale che permette la realizzazione di un chip. Attraverso processi litografici avanzati, si è in grado di produrre chip delle dimensioni sempre più ridotte, permettendo così la fabbricazione di computer sempre più potenti e compatti⁵. Al giorno d'oggi, abbiamo raggiunto un nodo litografico molto avanzato, al di sotto dei 10 nm (10^{-9} m), il che ci permette di creare oggetti in grado di immagazzinare informazioni che hanno le dimensioni di qualche decina di atomi. Viene da sé che nel prossimo futuro potremo passare dal nodo litografico da 10 nm a quello da 8 nm, e più avanti a quello da 5 nm, ma più in là nel tempo? Quanto avanti possiamo sperare di spingerci con questo approccio di miniaturizzazione "classico"? La comunità scientifica ha, quindi, una sfida da affrontare: quello che in gergo viene definito "*more than Moore scenario*", cioè tutto ciò che riguarda le tecnologie necessarie al superamento della legge di Moore. Per questo, dobbiamo chiederci: quando la legge di Moore avrà raggiunto il suo limite fisico, e quindi non potrà più essere applicata, saremo in grado di sfruttare tecnologie alternative? Come possiamo creare computer più potenti e veloci in grado far fronte alle nostre necessità?

La scienza dei materiali può venirci in aiuto per rispondere queste domande. Infatti, per garantire il corretto funzionamento di ogni dispositivo tecnologico, si sono resi necessari studi approfonditi riguardanti le proprietà chimico-fisiche dei materiali di cui tali dispositivi sono composti. Per capire meglio questo concetto, possiamo fare una similitudine con la scienza delle costruzioni. Ad esempio: se vogliamo che un

edificio sia in grado di resistere alle scosse provocate da un terremoto, dovremo compiere degli studi sulle proprietà elastiche e di rottura del calcestruzzo che intendiamo utilizzare; similmente, se vogliamo essere sicuri che i nostri telefoni, televisori o computer si accendano tutte le volte che ne abbiamo bisogno, e che svolgano le funzioni che il produttore ci garantisce, dobbiamo essere sicuri che i materiali alla base degli schermi o dei chip posseggano determinate proprietà.

Alla luce di ciò, per poter far fronte alle sfide future, lo sviluppo di nuovi materiali altamente tecnologici dalle funzionalità migliorate deve ricoprire un ruolo di importanza centrale, con lo scopo ultimo di aumentare l'efficienza complessiva di ogni dispositivo elettronico, riducendone così l'impatto. Valide strategie, volte al superamento delle limitazioni finora discusse, possono essere trovate all'interno in una branca dell'elettronica che negli ultimi anni ha riscosso un enorme interesse da parte della comunità scientifica, sia per quando riguarda lo sviluppo di nuovi prodotti industriali, sia dal punto di vista dello studio della fisica di base: la *spintronica*.

2. Spintronica e materiali del futuro in pillole

Il termine *spintronica* è stato coniato nel 1996 da S.A. Wolf durante un incontro al Defense Advanced Research Project Agency (DARPA), con l'intento di cercare un nome appropriato per un programma di ricerca sullo sviluppo di dispositivi elettronici basati sullo spin elettronico^{6,7}. Ma di cosa si tratta quando si parla di elettroni e del loro spin? Per i nostri scopi, possiamo limitarci a descrivere gli elettroni come delle particelle dalle dimensioni infinitesime (subatomiche), caratterizzate da una carica elettrica negativa.

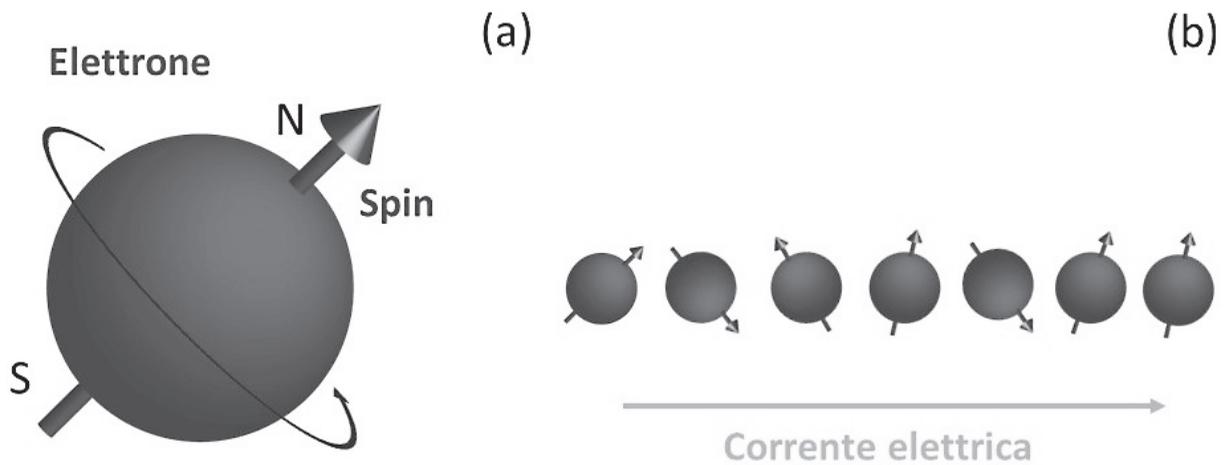


Fig. 2. (a) La sfera rappresenta un elettrone. La freccia diagonale indica la direzione dello spin elettronico che si genera in conseguenza della sua rotazione attorno al proprio asse (freccia nera). Similmente ad una calamita, N e S indicano idealmente il nord e il sud magnetici. (b) Rappresentazione di una corrente elettrica in cui le direzioni degli spin elettronici sono orientate in maniera casuale. La freccia lunga indica la direzione della corrente elettrica e sottintende che gli elettroni si stanno muovendo nello spazio.

Un flusso di elettroni in movimento all'interno di un materiale (ad esempio un filo metallico) è ciò che più comunemente chiamiamo corrente elettrica. Inoltre, gli elettroni possiedono anche un'altra proprietà fondamentale che conferisce loro determinate proprietà magnetiche: lo spin. Quest'ultimo è una proprietà intrinseca di una particella che, in maniera semplificata rispetto a una rigorosa trattazione quanto-meccanica e relativistica viene spesso correlata alla sua rotazione attorno al proprio asse.

Se consideriamo anche il suo spin, è possibile immaginare un elettrone come una calamita dalle dimensioni molto ridotte, caratterizzata quindi da un polo nord e un polo sud magnetici la cui direzione è solitamente indicata da una freccia (Fig. 2a). Detto ciò, nella normale corrente elettrica che scorre nei fili dell'impianto elettrico delle nostre case non vi è alcuna orientazione specifica di questa direzione; quindi, possiamo immaginarla come un flusso di elettroni con la direzione del loro spin distribuita in maniera casuale, come mostrato in Fig. 2b.

In breve, la spintronica ha come scopo ultimo quello di creare particolari dispositivi elettronici in cui è possibile controllare opportunamente la direzione dello spin degli elettroni che costituiscono le correnti elettriche in gioco, con l'obiettivo di immagazzinare o elaborare dati in maniera più efficiente di come avviene nei dispositivi convenzionali, cioè quelli in cui non vi è cura di tali proprietà magnetiche.

Ad oggi, senza alcun dubbio, il più importante risultato ottenuto nell'ambito della spintronica è da ricercarsi nel periodo dei tardi anni 80, quando – at-

traverso ricerche indipendenti – A. Fert⁸ e P. Grunberg⁹ scoprirono un effetto fisico noto come *giant magnetoresistance* (GMR), cioè magnetoresistenza gigante¹⁰. Grazie ai loro studi fondamentali, è stato possibile compiere una rivoluzione nell'ambito dell'immagazzinamento dei dati, poiché resero possibile un aumento considerevole della capacità degli hard-disk meccanici disponibili in quel periodo storico, passando da circa 1 Gbit/in² a circa 600 Gbit/in² di memoria, fatto che fece vincere ai due studiosi il premio Nobel nell'anno 2007¹¹. Nel contesto dei sistemi elettronici ultraveloci e ad alta efficienza energetica, lo studio di dispositivi che si basano sullo spin elettronico costituisce un'area molto florida e promettente per lo sviluppo della nanoelettronica del futuro.

Recentemente, materiali innovativi appartenenti alla classe dei cosiddetti *isolanti topologici* (IT) hanno riscosso un notevole interesse da parte dei ricercatori del settore, in particolare nel contesto di quella che viene chiamata *conversione carica-spin* (CCS). La CCS è un processo in cui la normale corrente elettrica Fig. 2 (b) si trasforma in ciò che viene chiamato una *pura corrente di spin*. Quest'ultima è un particolare tipo di corrente in cui non vi è alcun movimento da parte dell'elettrone, ma è solo il suo spin a cambiare direzione come conseguenza di una sollecitazione esterna (vedi Fig. 3a). Gli IT sono materiali innovativi in grado di opporre un significativo isolamento alla corrente elettrica nel loro volume, ma che allo stesso tempo ospitano degli stati altamente conduttivi solamente sulla loro superficie. Inoltre, la

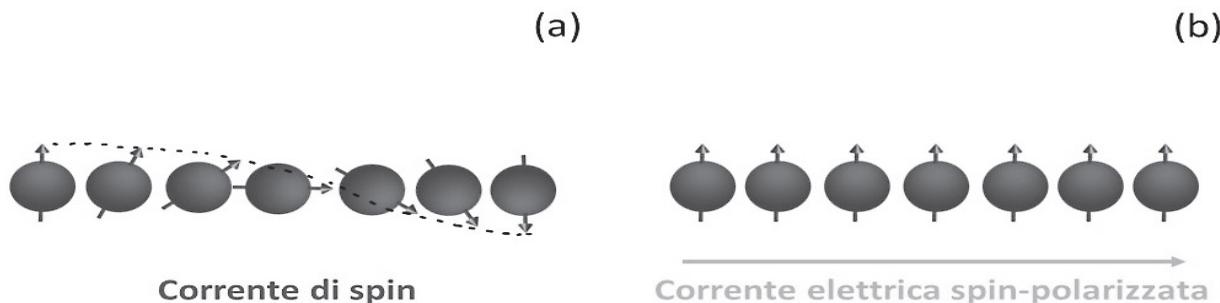


Fig. 3. (a) Seguendo la variazione degli spin elettronici (linea tratteggiata) si vede come il primo elettrone sulla sinistra ha lo spin diretto verso l'alto, mentre quello tutto a destra verso il basso. La progressiva e ordinata variazione della direzione dello spin da sinistra a destra è ciò che viene chiamato corrente di spin. In questo caso, gli elettroni sono idealmente fermi nello spazio, ma solo il loro spin si muove. (b) Rappresentazione di una corrente spin-polarizzata cioè in cui la direzione di tutti gli spin elettronici è uguale (vedi differenza con Figura 2(b)).

corrente che scorre attraverso questi stati possiede delle proprietà molto interessanti rispetto alla normale corrente elettrica Fig. 2(b). Infatti, gli elettroni che si muovono sulle superfici di un IT hanno due proprietà fondamentali: possiedono tutti la stessa direzione di spin, e non producono alcuna dissipazione termica. Le correnti elettriche in cui tutti gli elettroni hanno gli spin allineati lungo la stessa direzione si chiamano correnti spin-polarizzate, la cui rappresentazione è riportata in Fig. 3(b)¹². Possiamo dunque pensare che, attraverso il controllo della direzione di una corrente elettrica che scorre sulla superficie di un IT, abbiamo anche il controllo sulla direzione degli spin degli elettroni che la compongono.

3. Come possiamo sfruttare le proprietà degli IT per produrre un dispositivo elettronico o meglio spintronico?

Una strategia è quella di accoppiare questo materiale con uno ferromagnetico (FM). I FM sono materiali in grado di rispondere all'applicazione di un campo magnetico esterno attraverso il riposizionamento della direzione dei singoli spin degli elettroni in esso presenti lungo quella del campo applicato. Una volta che il campo magnetico esterno viene rimosso, il FM mantiene quindi la sua configurazione di spin. In una frase: la direzione del vettore magnetizzazione caratterizzante il FM è allineata con quella del campo magnetico esterno applicato, anche quando questo campo non è più presente. Nel nostro caso, le correnti di spin generate negli IT svolgono una funzione simile a quella del campo magnetico esterno. La creazione di strutture multistrato basate sull'accoppiamento di IT e FM ci permette di manipolare la configurazione magnetica dello strato di FM controllando la corrente che scorre in quello di IT, offrendo così la possibili-

tà di generare un *bit magnetico di informazione*. Per questioni legate alla fisica che risiede alla base di questi processi, l'approccio appena descritto si è rivelato molto promettente in termini di riduzione dei consumi energetici, di aumento della velocità di lettura e scrittura delle informazioni e di rimpicciolimento del singolo dispositivo¹³.

4. Scopo e risultati principali della ricerca svolta

Con la mia tesi di dottorato, mi sono occupato dello studio delle interazioni chimico-fisiche tra film ultrasottili di antimonio di tellurio, la cui formula chimica è Sb_2Te_3 , e diversi materiali ferromagnetici, come ad esempio il cobalto e il ferro. Sb_2Te_3 è un IT che fa parte della famiglia dei calcogenuri, come ad esempio il Bi_2Te_3 , il BiSb o il Bi_2Se_3 , tra gli altri. Grazie alle loro proprietà, alcuni materiali della stessa famiglia sono impiegati già da diverso tempo per produrre le cosiddette memorie a cambiamento di fase – già presenti sul mercato – fatto che ha prodotto un'ingente quantità di studi riguardanti le loro caratteristiche chimico-strutturali ed elettriche. Detto ciò, la natura topologica di questi materiali è emersa da relativamente poco tempo, aprendo nuove ed entusiasmanti linee di ricerca in svariati laboratori nel mondo, volte all'ottimizzazione di dispositivi in grado di essere utilizzati efficientemente nell'ambito della nanoelettronica.

Per questo motivo, abbiamo studiato film sottili di Sb_2Te_3 posti a contatto con vari FM attraverso diverse tecniche di misura, fornendo informazioni di natura chimica, strutturale e magnetica. Tra i diversi studi, abbiamo impiegato tecniche di diffrazione e riflettività a raggi X sulle diverse qualità di materiali prodotti, con l'obiettivo di migliorarne le proprietà. Successivamente, tecniche di risonanza ferromagnetica (FMR)

e FMR a pompaggio di spin sono state applicate per decretare l'efficienza in termini di CCS delle strutture ottimizzate, ottenendo molte informazioni riguardo la loro funzionalità.

In aggiunta all'ottimizzazione delle proprietà chimico-fisiche dei materiali e al miglioramento della loro efficienza, è stata posta particolare attenzione al potenziale trasferimento tecnologico dei risultati presentati. Infatti, la produzione degli IT e di alcuni FM ha visto impiegate tecniche di deposizione su larga scala, rispettivamente la Metal Organic Chemical Vapor Deposition e la Atomic Layer Deposition, in grado di depositare i materiali in maniera omogenea su wafer di silicio da 4 pollici^{14,15}.

Il risultato più rilevante emerso dal presente studio riguarda la produzione di particolari stratificazioni di materiali, come $Sb_2Te_3/Au/Co/Au$, in cui la presenza dello strato di Sb_2Te_3 si è rivelata determinante per migliorare l'efficienza di CCS rispetto alla struttura di riferimento $Au/Co/Au$. Infatti, abbiamo misurato un'efficienza record per questa classe di materiali, ottenuta oltretutto a temperatura ambiente, cosa che rende queste strutture verosimilmente sfruttabili all'interno dei dispositivi elettronici di tutti i giorni. In particolare, è emerso che la CCS avviene totalmente negli stati di conduzione superficiali dell' Sb_2Te_3 , il che ci ha permesso di quantificarne l'efficienza di conversione in termini del cosiddetto *effetto Edelstein inverso*, la cui figura di merito è la *lunghezza di Edelstein*, che si misura in nanometri e nel nostro caso vale 0.61 nm. Questo valore è il più alto mai registrato fino ad oggi in strutture composte da materiali topologici basate su calcogenuri^{16,17}.

I risultati ottenuti hanno dimostrato come l'uso dell'IT Sb_2Te_3 rappresenti una strategia molto promettente per migliorare la performance dei dispositivi spintronici dei nostri giorni, aprendo la strada verso la futura generazione di sistemi elettronici ultra efficienti.

Bibliografia

1. Commission E. (2022). Questions and Answers: EU action plan on digitalising the energy system. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA_22_6229.
2. Jones N. (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature* 561, 163-166.
3. Andrae A., Edler T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges* 6, 117-157.
4. Harris J., Jain S., Codur A.-M. (2022). Climate Conference COP27: Focus on Agriculture and Forests.
5. Sharma E. *et al.* (2022). Evolution in Lithography Techniques: Microlithography to Nanolithography. *Nanomaterials* 12, 1-34.
6. Mantovan R., Kampfrath T., Ciccarelli C. (2022). Interfaces in Spintronics. *Adv. Mater. Interfaces* 9, 2008-2009.
7. Interview of Stuart Wolf by Patrick McCray on 2006 March 23, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/30668. 30668 (2006).
8. Baibich M. N. *et al.* (1988). Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys. Rev. Lett.* 61, 2472-2475.
9. Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W. (1989). Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Phys. Rev. B* 39, 4828-4830.
10. Chang L., Wang M., Liu L., Luo S., Xiao P. (2014). A brief introduction to giant magnetoresistance.
11. Albert Fert - Nobel Lecture: The Origin, Development and Future of Spintronics.
12. Mellnik A. R. *et al.* (2014). Spin-transfer torque generated by a topological insulator. *Nature* 511, 449-451.
13. Barla P., Kumar Joshi V., Somashekara Bhat, Joshi V. K. (2021). Spintronic devices: a promising alternative to CMOS devices. *J. Comput. Electron.* 20, 805-837.
14. Rimoldi M. *et al.* (2020). Epitaxial and large area Sb_2Te_3 thin films on silicon by MOCVD. *RSC Adv.* 10, 19936-19942.
15. Longo E. *et al.* (2020). ALD growth of ultra-thin Co layers on the topological insulator Sb_2Te_3 . *Nano Res.* 13, 570-575.
16. Longo E. *et al.* (2021). Large Spin-to-Charge Conversion at Room Temperature in Extended Epitaxial Sb_2Te_3 Topological Insulator Chemically Grown on Silicon. *Adv. Funct. Mater.* 2109361.
17. Longo E. *et al.* (2021). Spin Charge Conversion in Fe/Au/Sb 2 Te 3 Heterostructures as Probed By Spin Pumping Ferromagnetic Resonance. *Adv. Mater. Interfaces* 2101244, 2101244.

EMANUELE LONGO

Assegnista di ricerca post-dottorato al Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) nell'Istituto per la Microelettronica e Microsistemi (IMM) Unità di Agrate Brianza. Dopo essersi laureato in fisica con lode nel 2017 presso l'Università degli Studi di Milano-Bicocca, nel 2021 E.L. discute con successo la sua tesi di dottorato nell'ambito della spintronica, acquisendo il titolo di dottore di ricerca in Scienza e Nanotecnologia dei Materiali nella stessa università. Attualmente è coinvolto nel progetto di ricerca europeo SKYTOP, in cui svolge attività di ricerca riguardanti principalmente lo studio di materiali topologici e magnetici per applicazioni in spintronica sotto la supervisione del Dr. R. Mantovan. E.L. ha collaborato con diversi gruppi di ricerca in Europa e nel mondo, pubblicando vari articoli scientifici su riviste internazionali soggette a peer review. Negli ultimi anni ha tenuto una serie di lezioni sulla spintronica nel corso di "Dispositivi elettronici" del Prof. M. Fanciulli (Università degli Studi di Milano-Bicocca).

Contatti:

CNR-IMM, Unit of Agrate Brianza (MB), Agrate Brianza (MB), Italy

Email: emanuele.longo@mdm.imm.cnr.it