

Progettazione controllata di elettronica stampata con materiali 2D

*Original*

Progettazione controllata di elettronica stampata con materiali 2D / Piatti, Erik; Torrisi, Felice. - In: SIF PRIMA PAGINA. - ELETTRONICO. - (2022).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2953812 since: 2022-01-27T18:39:16Z

*Publisher:*

Società Italiana di Fisica

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

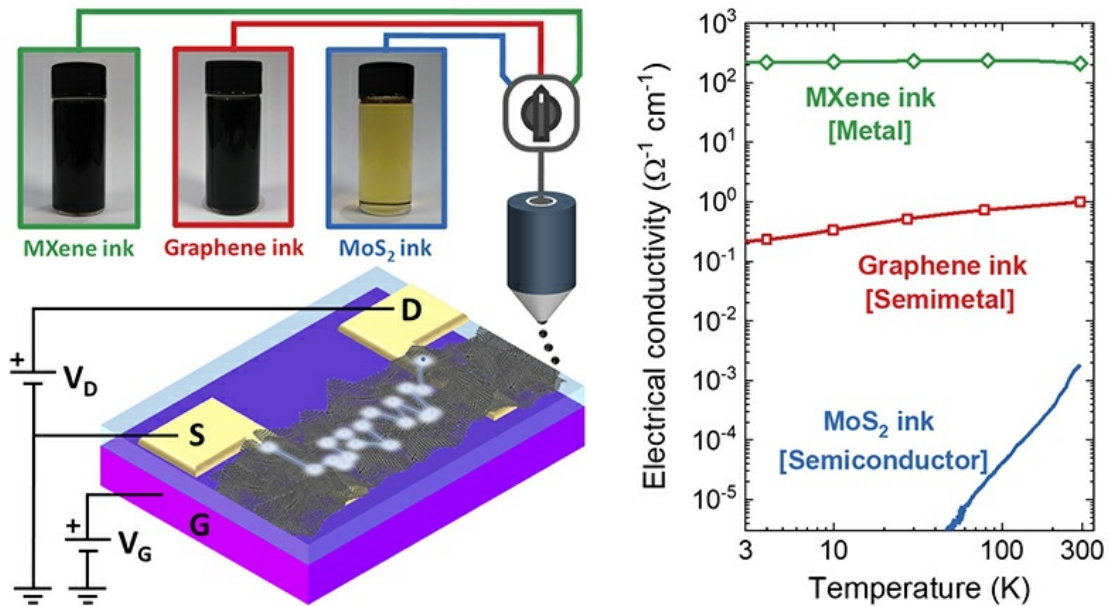
(Article begins on next page)

# Progettazione controllata di elettronica stampata con materiali 2D

✉ E. Piatti, F. Torrisi 📅 26-01-2022 🔗 <http://www.primapagina.sif.it/article/1437>

L'elettronica stampata si sta affermando quale tecnologia cardine per la realizzazione di dispositivi su larga scala e flessibili, promettendo di trasformare radicalmente l'elettronica come la conosciamo e consentendo lo sviluppo di applicazioni nell'ambito della salute digitale, dispositivi indossabili, città intelligenti, sistemi per l'energia distribuiti, industria automobilistica e Internet delle Cose. Il grafene e altri materiali bidimensionali (2D) offrono una piattaforma ideale per l'elettronica stampata ad alte prestazioni. Tuttavia, la complessità delle formulazioni degli inchiostri, la disposizione di materiali 2D in film tridimensionali e la natura policristallina dei film sottili stampati hanno finora reso difficile esaminare il trasporto di carica in tali strutture, impedendo quindi una progettazione accurata e controllabile di dispositivi elettronici. Il trasporto di carica in questi film dipende da un'interazione tra la propagazione della carica all'interno di ciascun cristallo di materiale 2D (trasporto intra-flake) e la propagazione da un cristallo ai cristalli circostanti (trasporto inter-flake). I film di materiali 2D stampati con tecnica a getto d'inchiostro, infatti, sono un ottimo esempio di conduttori granulari con materiali 2D, il cui trasporto potrebbe differire rispetto al trasporto nella singola unità cristallina.

In un articolo pubblicato di recente su Nature Electronics, abbiamo identificato le caratteristiche dei film di materiali 2D stampati che devono essere ottimizzate per realizzare dispositivi elettronici performanti, consentendo la progettazione di una nuova classe di elettronica flessibile e stampata ad alte prestazioni. Utilizzando tre esempi tipici di materiali 2D, il grafene (un semimetallo costituito da un singolo strato di atomi di carbonio), il disolfuro di molibdeno (o  $\text{MoS}_2$ , un semiconduttore) e il carburo di titanio (o MXene  $\text{Ti}_3\text{C}_2$ , un metallo), abbiamo studiato il meccanismo di trasporto della carica elettronica in diversi film stampati di materiali 2D, mostrando come questo dipenda da variazioni di temperatura, campo magnetico, e campo elettrico.



Charge transport mechanisms in inkjet-printed thin-film transistors based on two-dimensional materials. Erik Piatti, Adrees Arbab et al., Nature Electronics, 4 (12) 893 - 905 (2021).

Ciò ha permesso di comprendere che il trasporto di carica nei dispositivi con MXene e MoS<sub>2</sub> è dominato dal meccanismo di trasporto intrinseco del materiale 2D corrispondente, ovvero i film di MXene mostrano un comportamento metallico 2D con localizzazione debole a qualsiasi temperatura, mentre quelli di MoS<sub>2</sub> si comportano come degli isolanti con un comportamento che varia da variable-range hopping 3D a nearest-neighbour hopping a bassa temperatura. Il trasporto di carica nei dispositivi stampati con grafene è invece dominato dal meccanismo intra-flake, di tipo variable-range hopping 3D a qualsiasi temperatura.

I nostri risultati hanno un grande impatto sulla comprensione del trasporto in network di materiali 2D, consentendo non solo il design controllato e la progettazione di elettronica stampata basata su materiali 2D, ma anche lo sviluppo di nuove tipologie di dispositivi elettronici flessibili.

La comprensione di come le cariche si muovono all'interno di network di materiali 2D è alla base del modo in cui produciamo i componenti elettronici stampati. Conoscendo i meccanismi responsabili di tale trasporto elettronico, saremo in grado di ottenere la progettazione ottimale di elettronica stampata ad alte prestazioni.

## Controlled design of printed electronics with 2D materials

Printed electronics has emerged as a pathway for large scale and flexible devices promising to unlock a transformational change in the electronics as we know it, and enabling applications such as Digital Health, Wearable Systems, Smart Cities, Distributed Energy, Automotive and Internet-of-Things. Graphene and related two-dimensional (2D) materials offer an ideal platform of novel materials for high performance printed electronics. However, the complexity of the ink formulations, the three-dimensional assembly of the 2D flakes and the polycrystalline nature of the resulting thin films, have made it difficult to examine charge transport in such devices so far, therefore impeding an accurate and controllable design of electronic devices. As a result, charge transport in these structures depends on an interplay between charge-carrier propagation within each flake (intra-flake transport) and propagation from one flake to the surrounding flakes in the network (inter-flake transport). This makes inkjet-printed films of 2D materials a prime example of granular conductors with 2D material units, and inevitably introduces additional disorder with respect to that found in isolated flakes.

In a recent article in Nature Electronics, we identified what properties of 2D material films need to be tweaked to make electronic devices to order, allowing rational design of a new class of high-performance printed and flexible electronics. This was done by studying the charge transport mechanisms of surfactant- and solvent-free inkjet-printed thin-film devices of representative few-layer graphene (semi-metal), molybdenum disulphide ( $\text{MoS}_2$ , semiconductor) and titanium carbide MXene ( $\text{Ti}_3\text{C}_2$ , metal), showing how these are controlled by changes in temperature, magnetic field, and electric field.

We find that charge transport in printed few-layer MXene and  $\text{MoS}_2$  devices is dominated by the intrinsic transport mechanism of the constituent flakes: MXene exhibits a weakly-localised 2D metallic behaviour at any temperature, whereas  $\text{MoS}_2$  behaves as an insulator with a crossover from 3D variable range hopping to nearest-neighbour hopping at low temperature. Charge transport in printed few-layer graphene devices is dominated by the transport mechanism between different flakes, which exhibit 3D variable range hopping conduction at any temperature.

Our results have an impact on the way we understand the transport through networks of two-dimensional materials, enabling not only the controlled design and engineering of future printed electronics based on 2D materials, but also new types of flexible electronic devices.

The fundamental understanding of how the electrons are transported through networks of 2D materials underpins the way we manufacture printed electronic components. By identifying the mechanisms responsible for such electronic transport, we will be able to achieve the optimum design of high-performance printed electronics.



**Erik Piatti** - Ricercatore post-doc in Fisica dello Stato Solido presso il Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia del Politecnico di Torino, studia le proprietà fisiche di materiali avanzati a basse temperature quando sottoposti a campi elettrici ultralti. Attualmente, la sua ricerca è focalizzata sul controllo della superconduttività e di altre fasi elettroniche esotiche tramite drogaggio di carica elettrostatico ed elettrochimico.

*Postdoctoral researcher in condensed matter physics at the Department of Applied Science and Technology of Politecnico di Torino, he is studying the physical properties of advanced materials at low temperatures and under the application of ultrahigh electric fields. Currently, his research focuses mainly on the control of superconductivity and other exotic electronic phases by means of electrostatic and electrochemical charge doping.*



**Felice Torrisi** - Professore Associato di Fisica della Materia all'Università di Catania, è Senior Lecturer in 2D Materials and Wearable Electronics presso Imperial College London. È membro del Comitato Esecutivo del Centre for Processable Electronics e dell'Institute for Digital Molecular Design and Fabrication. I suoi interessi di ricerca riguardano il grafene e i relativi materiali bidimensionali per l'elettronica stampata e la fotonica. Ha ricevuto numerose borse di studio e premi, come la Schlumberger Research Fellowship e il Parmee Prize for Entrepreneurship and Enterprise. È co-fondatore di tre start-up nell'area del grafene, dell'elettronica stampata - Cambridge Graphene Platform Ltd, Cambridge graphene ltd e Grapholymer Ltd - e ha contribuito allo sviluppo della roadmap scientifica e tecnologica per il grafene.

*Associate Professor of Solid State Physics at University of Catania, he is Senior Lecturer in 2D Materials and Wearable Electronics at Imperial College London. He is a member of the Executive Board of the Centre for Processable Electronics and of the Institute for Digital Molecular Design and Fabrication. His research interests cover graphene and related two-dimensional materials for printed electronics and photonics. He received several fellowships and awards, such as the Schlumberger Research Fellowship and the Parmee Prize for Entrepreneurship and Enterprise. He is the co-founder of three start-ups in the area of graphene, printed electronics and electronic textiles - Cambridge Graphene Platform Ltd, Cambridge graphene ltd and Grapholymer Ltd, and contributed to the development of the Science and Technology roadmap for graphene.*