

Come controllare il rilassamento degli elettroni del grafene

✍ G. Cerullo, E. Pogna 📅 29-03-2022 🔗 <http://www.primapagina.sif.it/article/1480>

Impulsi di luce ultrabreve eccitano i portatori di carica del grafene, inizialmente disposti su livelli energetici rappresentati dai coni di Dirac. A seconda del campo elettrico esterno, il numero dei portatori iniziale è tale da occupare il cono di Dirac fino a livelli a bassa energia (cono di sinistra) o fin dentro alla banda di conduzione (cono di destra). Nei due casi, i portatori eccitati seguiranno una diversa dinamica di rilassamento, più veloce (caso a sinistra) o più lenta (caso a destra), come viene rappresentato da scivoli di diversa pendenza.

Ultrafast light pulses photoexcite graphene charge carriers lying on different energetic levels represented by the Dirac cones, which, depending on the applied electric field, are occupied up to low energy states (left cone) or well up to into the conduction band (right cone). In the two cases, the photoexcited charge carriers relax with faster (left) or slower (right) dynamics as represented by slides of different steepness.

Il grafene è il materiale più sottile esistente, con lo spessore di un singolo strato di atomi, inferiore a un milionesimo di metro. Nonostante il suo spessore infinitesimo, il grafene è in grado di assorbire efficacemente la luce visibile e infrarossa tramite l'eccitazione dei suoi portatori di carica. A seguito dell'assorbimento di luce, le cariche eccitate tornano rapidamente allo stato iniziale di equilibrio, rilasciando l'energia acquisita attraverso una serie di processi di rilassamento. Tutto avviene nell'intervallo di tempo di pochi picosecondi, ovvero pochi milionesimi di milionesimi di secondo. La notevole velocità di questo processo rende il grafene particolarmente promettente per una serie di applicazioni tecnologiche atte alla rivelazione, alla generazione e alla modulazione della luce.

In un lavoro recentemente pubblicato sulla rivista ACS Nano, è stato mostrato come sia possibile, tramite un campo elettrico esterno, modificare in modo significativo il tempo di rilassamento dei portatori di carica nel grafene, ottenendo un livello di controllo senza precedenti delle sue proprietà ottiche. La ricerca è stata condotta dall'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IFN) e dal Politecnico di Milano, in collaborazione con il Graphene Center di Cambridge, l'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT), l'Università di Pisa e il Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology (ICN2) di Barcellona, ed è stata supportata dal progetto europeo Graphene Flagship.

Per realizzare l'esperimento, è stato cruciale realizzare un dispositivo in grado di variare il numero dei portatori di carica nel grafene tramite l'applicazione di un campo elettrico. Il dispositivo è stato ottenuto utilizzando un transistor a liquidi ionici, una tecnologia all'avanguardia ideata per lo studio dei superconduttori. Il transistor a base di grafene è stato quindi studiato mediante un esperimento di spettroscopia ultraveloce che ha permesso di osservare la variazione della dinamica di rilassamento dei portatori di carica in funzione del campo elettrico applicato. Con un unico materiale, il grafene, è stato quindi possibile ottenere un'ampia variabilità della capacità di assorbire la luce e della velocità del processo di rilassamento. La modellizzazione teorica del fenomeno ha permesso infine di spiegare tale variabilità con la saturazione di uno specifico canale di rilassamento dei portatori di carica che coinvolge l'interazione con il reticolo cristallino.

Questo lavoro apre la strada allo sviluppo di dispositivi che sfruttano il controllo del tempo di rilassamento dei portatori di carica per ottenere nuove funzionalità. Per esempio, se il grafene viene utilizzato come assorbitore in una cavità laser per generare impulsi di luce ultrabrevi, variando il tempo di rilassamento dei portatori è possibile controllare la durata degli impulsi generati. Ci possono essere risvolti in diversi settori applicativi, dalla fotonica, per la produzione di sorgenti laser impulsive o di limitatori ottici che prevengono il danneggiamento da eccessiva illuminazione, alle comunicazioni, per la realizzazione di nuove piattaforme per la trasmissione ottica di dati ad alta velocità.

Controlling the cooling dynamics of electrons in graphene

Graphene is the thinnest material ever produced, with the thickness of a single atomic layer, thinner than a billionth of a meter. Despite its vanishing thickness, it is able to efficiently absorb light from the visible to the infrared range through

the photoexcitation of its charge carriers. After light absorption, its photoexcited charge carriers cool down to the initial equilibrium state releasing their excess energy via a number of different relaxation steps. The complete relaxation is accomplished in a few picoseconds, corresponding to a few millionths of a millionth of a second. The remarkable speed of this process makes graphene particularly promising for a number of technological applications, including light detectors, sources and modulators.

A recent study published in ACS Nano has shown that the relaxation time of graphene charge carriers can be significantly modified by applying an external electric field. The research was conducted within an international collaboration between the Institute for Photonics and Nanotechnologies of the Italian National Research Council (CNR-IFN), the Polytechnic University of Milan (Politecnico di Milano), the Italian Institute of Technology (IIT), the University of Pisa, the Cambridge Graphene Center (UK) and the Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology (ICN2) of Barcelona (Spain) and it was supported by the Graphene Flagship.

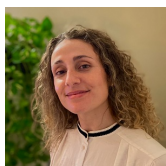
The specific device used to study graphene proved to be crucial to observe the strong tunability of its optical properties with the external electric field, allowing to change the number of charge carriers over a broad range by exploiting ionic liquid gating, which is a state-of-the-art technology introduced to study superconductors. The graphene-based transistor has been studied by ultrafast optical spectroscopy, which allowed to monitor the large variation of the relaxation time of the charge carriers as a function of the applied field. Graphene thus shows a large variety of different behaviors in terms of both light absorbance and response speed. The comparison with theoretical modeling enabled to identify the underlying physical mechanism in the saturation of a specific relaxation channel of the charge carriers, involving the interaction with the lattice.

This work paves the way to the development of devices that exploit the control of the relaxation time of charge carriers to support novel functionalities. For example, if graphene is used as saturable absorber in a laser cavity to generate ultrashort light pulses, by changing the relaxation time of the charge carriers, we can control the duration of the output pulses. This discovery is of broad interest for several technological applications, ranging from photonics, for pulsed laser sources or optical limiters that prevent damage of optical components, to optical communications, for improving the data transfer rate.



Giulio Cerullo - Professore ordinario di Fisica presso il Politecnico di Milano, vi dirige il laboratorio di spettroscopia ottica ultraveloce. La sua attività di ricerca, di natura sperimentale, riguarda la generazione di impulsi laser a femtosecondi accordabili e la loro applicazione allo studio di processi fotoindotti in biomolecole e materiali nanostrutturati.

Full Professor of Physics at Politecnico di Milano, he is the head of the local ultrafast optical spectroscopy laboratory. His research activity is focused on the generation of tunable femtosecond laser pulses and their application to the investigation of photo-induced processes in bio-molecules and nanostructured materials.



Eva Pogna - Ricercatrice presso l'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IFN), si occupa dello studio delle proprietà optoelettroniche di materiali a bassa dimensionalità per lo sviluppo di dispositivi innovativi per manipolare la luce dal visibile al lontano infrarosso, utilizzando tecniche di spettroscopia ultraveloce e microscopia in campo prossimo.

Researcher at the Institute of Photonics and Nanotechnologies of the Italian National Research Council (CNR-IFN), her work focuses on the investigation of the optoelectronic properties of low dimensional materials for the development of novel platforms for the manipulation of electromagnetic radiation from the visible to the far-infrared range, using ultrafast spectroscopy and near-field microscopy