

Ultrasonically assisted preparation of graphene

Preparazione del grafene assistita da ultrasuoni



Kathrin Hielscher, Hielscher Ultrasonics GmbH

K. Hielscher

GRAPHENE

Graphite is composed of two dimensional sheets of sp²-hybridized, hexagonally arranged carbon atoms — the graphene — that are regularly stacked.

The graphene's atom-thin sheets, which form graphite by non-bonding interactions, are characterized by an extreme larger surface area. Graphene shows an extraordinary strength and firmness along its basal levels that reaches with approx. 1020 GPa almost the strength value of diamond.

Graphene is the basic structural element of some allotropes including, besides graphite, also carbon nanotubes and fullerenes. Used as additive, graphene can dramatically enhance the electrical, physical, mechanical, and barrier properties of polymer composites at extremely low loadings. (Xu, Suslick 2011).

By its properties, graphene is a material of superlatives and thereby promising for industries that produce composites, coatings or microelectronics. Geim (2009) describes graphene as supermaterial concisely in the following paragraph:

"It is the thinnest material in the universe and the strongest ever measured. Its charge carriers exhibit giant intrinsic mobility, have the smallest effective mass (it is zero) and can travel micrometer-long distances without scattering at room temperature. Graphene can sustain current densities 6 orders higher than copper, shows record thermal conductivity and stiffness, is impermeable to gases and reconciles such conflicting qualities as brittleness and ductility. Electron transport in graphene is described by a Dirac-like equation, which allows the investigation of relativistic quantum phenomena in a bench-top experiment."

Due to these outstanding material's characteristics, graphene is one of the most promising materials and stands in the focus of nanomaterial research.

ULTRASOUND

When sonicating liquids at high intensities, the sound waves that propagate into the liquid media result in alternating high-pressure (compression) and low-pressure (rarefaction) cycles, with rates depending on the frequency. During the low-pressure cycle, high-intensity ultrasonic waves create small vacuum bubbles or voids in the liquid. When the bubbles attain a volume at which they can no longer absorb energy, they collapse violently during a high-pressure cycle. This phenomenon is termed cavitation. During the implosion very high temperatures (approx. 5,000K) and pressures (approx. 2,000atm) are reached locally. The implosion of the cavitation bubble also results in liquid jets of up to 280m/s velocity. (Suslick 1998) The ultrasonically generated cavitation causes chemical and physical effects, which can be applied to processes

IL GRAFENE

La grafite è costituita da due fogli dimensionati di atomi di carbonio sp²-ibridizzati, disposti a esagono, sovrapposti in modo regolare. I sottili strati di atomi di grafene, che formano la grafite mediante interazioni non leganti, sono caratterizzati da un'area superficiale molto ampia. Il grafene presenta una forza e solidità straordinaria nei livelli di base che raggiunge approssimativamente i 1020 GPa, cioè una tenacità simile a quella del diamante.

Il grafene è l'elemento strutturale di base di alcuni allotropi fra cui, oltre alla grafite, anche i nanotubi di carbonio e i fullereni. Utilizzato come additivo, il grafene può potenziare grandemente le proprietà elettriche, fisiche, meccaniche e di barriera dei compositi polimerici con carichi estremamente ridotti (Xu, Suslick 2011).

Grazie alle sue proprietà, il grafene è un materiale superlativo e promettente per le industrie che producono i compositi, i prodotti vernicianti e le apparecchiature di microelettronica. Geim (2009) descrive il grafene materiale di primaria importanza nel seguente paragrafo:

"Si tratta del materiale più sottile e più resistente che sia mai stato misurato. I suoi componenti presentano una enorme mobilità intrinseca, hanno una massa effettiva minima (pari a zero) e possono percorrere distanze micrometriche senza diffondersi a temperatura ambiente. Il grafene può sopportare densità correnti di 6 ordini superiori del rame, presenta una conducibilità termica e una robustezza da record dei primati, è impermeabile ai gas e armonizza qualità fra loro contrastanti come la fragilità e la duttilità. Il trasporto degli elettroni nel grafene è stato descritto con l'equazione di Dirac, che consente di analizzare il quantum relativistico in un esperimento da laboratorio."

Grazie a queste sorprendenti qualità del materiale, il grafene è uno dei materiali più promettenti e si colloca al primo posto nell'ambito delle ricerche sui nanomateriali.

GLI ULTRASUONI

Quando i liquidi sono sottoposti a sonicazione ad alta intensità, le onde sonore che si propagano nel veicolo liquido determinano cicli alternati di alta pressione (compressione) e di bassa pressione (rarefazione), con valori che dipendono dalla frequenza. Durante il ciclo di bassa pressione, le onde di ultrasuoni di alta intensità creano piccole bolle o vuoti nel liquido, e quando queste raggiungono un volume tale per cui non possono più assorbire energia, collassano violentemente durante il ciclo di alta pressione. Questo fenomeno è definito cavitazione. Durante la fase di implosione si raggiungono localmente temperature (circa 5000 K) e pressioni (circa 2000 atm) molto elevate. L'implosione delle bolle

durante la cavitazione causa anche la formazione di getti di acqua che raggiungono una velocità di 280 m/s. (Suslick 1998). La cavitazione generata dagli ultrasuoni determina anche effetti chimici e fisici, che possono essere applicati ai processi.

La sonochimica indotta dalla cavitazione fornisce un'interazione unica fra l'energia e la materia, formando siti di alta temperatura all'interno delle bolle, pari a ~5000 K, pressioni di ~1000 bar e valori di raffreddamento pari a $>10^{10} \text{K s}^{-1}$; queste condizioni straordinarie permettono l'accesso a varie aree di reazioni chimiche normalmente non accessibili consentendo la sintesi di una grande varietà di materiali nanostrutturati inusuali (Bang 2010). (fig. 1).

PREPARAZIONE DEL GRAFENE CON L'AUSILIO DEGLI ULTRASUONI

Da quando sono note le straordinarie caratteristiche della grafite, sono state messe a punto varie tecniche per la sua realizzazione. Nella produzione chimica del grafene dagli ossidi di grafene mediante processi a più fasi, sono richiesti forti agenti ossido-riducenti; inoltre, il grafene preparato in queste condizioni contiene molti difetti anche dopo la riduzione, rispetto al grafene ottenuto con altri metodi. Tuttavia, l'ultrasuono rappresenta un'alternativa valida per la produzione di grafene di alta qualità e anche in grandi quantità. I ricercatori hanno sviluppato diverse tecniche fra loro differenti con l'ausilio degli ultrasuoni, ma in generale la produzione di grafene si basa su un semplice processo a fase unica. Si fornisce un esempio di una tecnica per la produzione del grafene: la grafite viene aggiunta in una miscela di acido organico diluito, alcol e acqua, per poi essere esposta all'irraggiamento degli ultrasuoni. L'acido agisce da "cuneo molecolare" che separa i fogli di grafene dalla grafite originaria. Con questo semplice processo si determina una grande quantità di grafene integro e di alta qualità disperso nell'acqua (An et al. 2010).

ESFOLIAZIONE DIRETTA DEL GRAFENE

Gli ultrasuoni consentono di preparare i grafeni nei solventi organici, soluzioni tensioattivo/acqua o liquidi ionici. Ciò significa che è possibile evitare di utilizzare forti agenti ossido-riducenti.

Stankovich et al. (2007) hanno prodotto il grafene mediante esfoliazione con l'ultrasonificazione. Le immagini AFM dell'ossido di grafene esfoliato con il trattamento agli ultrasuoni a concentrazioni di 1 mg/mL in acqua rivela sempre la presenza di fogli dallo spessore uniforme (~1 nm). Questi campioni ben esfoliati di ossido di grafene non contengono fogli con spessore superiore o inferiore a 1 nm, tale per cui l'esfoliazione completa dell'ossido di grafene fino ad ottenere fogli singoli di ossido di grafene è possibile a queste condizioni. (Stankovich et al. 2007).

PREPARAZIONE DEI FOGLI DI GRAFENE

Stengl et al. hanno dimostrato il successo della preparazione di fogli di grafene puro in grandi quantità nel corso del processo produttivo dei nanocompositi di grafene TiO_2 non-stoichiometrici mediante idrolisi termica della sospensione con nanofogli e complessi titanio-perossido. I nanofogli di grafene puro sono stati ricavati dalla grafite naturale mediante un campo di cavitazione ad alta intensità generato dal processore a ultrasuoni Hielscher UIP1000hd in un reattore agli ultrasuoni e ad alta pressione a 5 bar (fig. 1). I fogli di grafene così ottenuti, con ampia area superficiale specifica e proprietà elettroniche uniche possono essere utilizzati come supporto valido per il TiO_2 , favorendo l'azione fotocatalitica. Il gruppo di ricercatori ha concluso che la qualità del grafene preparato con l'ausilio degli ultrasuoni è di gran lunga superiore rispetto al grafene ottenuto con la tecnica Hummer, dove la grafite viene esfoliata e ossidata. Poiché le condizioni

Cavitation-induced sonochemistry provides a unique interaction between energy and matter, with hot spots inside the bubbles of ~5000 K, pressures of ~1000 bar, heating and cooling rates of $>10^{10} \text{K s}^{-1}$; these extraordinary conditions permit access to a range of chemical reaction space normally not accessible, which allows for the synthesis of a wide variety of unusual nanostructured materials. (Bang 2010) (fig. 1)



Fig. 1
Ultrasonic
cavitation
generated by
the UIP1500hd
(1.5 kW
ultrasound
power)
in water

Cavitazione
agli ultrasuoni
con l'ausilio
di UIP1500hd
(potere degli
ultrasuoni
pari a 1.5 kW)
in acqua

ULTRASONIC PREPARATION OF GRAPHENE

Since the extraordinary characteristics of graphite are known, several methods for its preparation have been developed. Beside to chemical production of graphenes from graphene oxide in multi-step processes, for which very strong oxidizing and reducing agents are needed. Additionally, the graphene prepared under these harsh chemical conditions often contain a large amount of defects even after reduction compared to graphenes obtained from other methods. However, ultrasound is a proven alternative to produce high quality graphene, also in large quantities. Researchers have developed slightly different ways using ultrasound, but in general the graphene production is a simple one-step process.

To give an example of a specific graphene production route: Graphite is added in a mixture of dilute organic acid, alcohol, and water, and then the mixture is exposed to ultrasonic irradiation. The acid works as a "molecular wedge" which separates sheets of graphene from the parent graphite. By this simple process, a large quantity of undamaged, high-quality graphene dispersed in water is created. (An et al. 2010)

GRAPHENE DIRECT EXFOLIATION

Ultrasound allows for the preparation of graphenes in organic solvents, surfactants/water solutions, or ionic liquids. This means that the use of strong oxidizing or reducing agents can be avoided.

Stankovich et al. (2007) produced graphene by exfoliation under ultrasonication.

The AFM images of graphene oxide exfoliated by the ultrasonic treatment at concentrations of 1 mg/mL in water always revealed the presence of sheets with uniform thickness (~1 nm). These well-exfoliated samples of graphene oxide contained no sheets either thicker or thinner than 1nm, leading to a conclusion that complete exfoliation of graphene oxide down to individual graphene oxide sheets was indeed achieved under these conditions. (Stankovich et al. 2007)

PREPARATION OF GRAPHENE SHEETS

Stengl et al. have shown the successful preparation of pure graphene sheets in large quantities during the production of nonstoichiometric TiO₂ graphene nanocomposit by thermal hydrolysis of suspension with graphene nanosheets and titania peroxo complex. The pure graphene nanosheets were produced from natural graphite using a high intensity cavitation field generated by Hielscher's ultrasonic processor UIP1000hd in a high-pressure ultrasonic reactor at 5 bar (see fig. 1). The graphene sheets obtained, with high specific surface area and unique electronic properties, can be used as a good support for TiO₂ to enhance the photocatalytic activity. The research group claims that the quality of the ultrasonically prepared graphene is much higher than graphene obtained by Hummer's method, where graphite is exfoliated and oxidized. As the physical conditions in the ultrasonic reactor can be precisely controlled and the assumption that the concentration of graphene as a dopant will vary in the range of 1 - 0.001%, the production of graphene in a continuous system on commercial scale is possible (fig. 2).

PREPARATION BY ULTRASONIC TREATMENT OF GRAPHENE OXIDE

Oh et al. (2010) have shown a preparation route using ultrasonic irradiation to produce graphene oxide (GO) layers. Therefore, they suspended twenty-five milligrams of graphene oxide powder in 200 ml of de-ionized water. By stirring they obtained an inhomogeneous brown suspension. The resulting suspensions were sonicated (30 min, 1.3 × 105J), and after drying (at 373 K) the ultrasonically treated graphene oxide was produced. A FTIR spectroscopy showed that the ultrasonic treatment did not change the functional groups of graphene oxide.

FUNCTIONALIZATION OF GRAPHENE SHEETS

Xu and Suslick (2011) describe a convenient one-step method for the preparation of polystyrene functionalized graphite. In their study, they used graphite flakes and styrene as basic raw material. By sonicating the graphite flakes in styrene (a reactive monomer), the ultrasound irradiation resulted in the mechanochemical exfoliation of graphite flakes into single-layer and few-layer graphene sheets. Simultaneously, the functionalization of the graphene sheets with the polystyrene chains has been achieved.

The same process of functionalization can be carried out with other vinyl monomers.

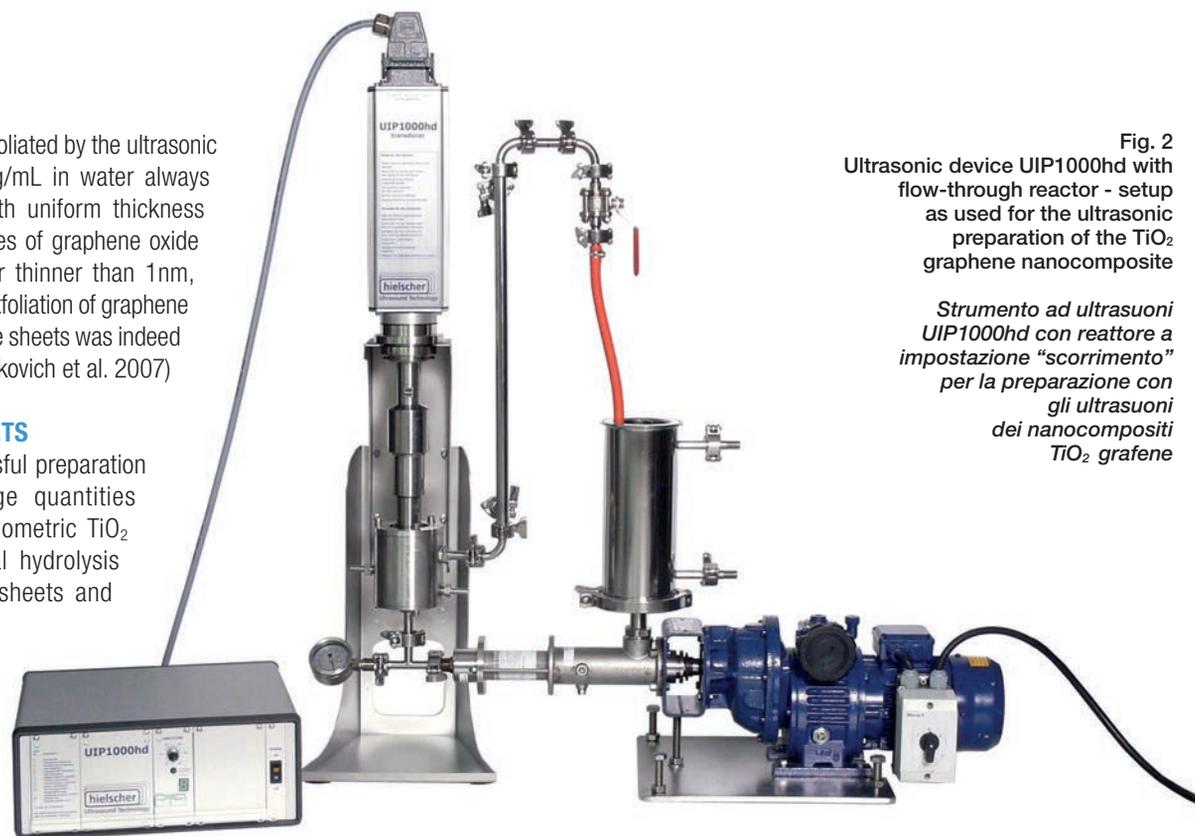


Fig. 2
Ultrasonic device UIP1000hd with flow-through reactor - setup as used for the ultrasonic preparation of the TiO₂ graphene nanocomposite

Strumento ad ultrasuoni UIP1000hd con reattore a impostazione "scorrimento" per la preparazione con gli ultrasuoni dei nanocompositi TiO₂ grafene

fisiche nel reattore agli ultrasuoni possono essere controllate precisamente, e la concentrazione di grafene come dopante varia nel range di 1 – 0.001%, è possibile produrre grafene in un sistema continuo su scala commerciale (fig. 2).

PREPARAZIONE DELL'OSSIDO DI GRAFENE CON TRATTAMENTO AGLI ULTRASUONI

Oh et al. (2010) hanno dimostrato un processo produttivo con l'ausilio degli ultrasuoni di strati di ossido di grafene (GO). Di conseguenza, essi hanno sospeso 25 milligrammi di polvere di ossido di grafene in 200 ml di acqua deionizzata. Mediante agitazione, essi hanno ottenuto una sospensione marrone non omogenea. Le sospensioni risultanti sono state poi sonicate (30 min., 1,3 x 105J) e dopo l'essiccazione (a 373 K), è stato prodotto l'ossido di grafene trattato con gli ultrasuoni. La spettroscopia FTIR ha dimostrato che il trattamento agli ultrasuoni non cambiava i gruppi funzionali dell'ossido di grafene.

FUNZIONALIZZAZIONE DEI FOGLI DI GRAFENE

Xu e Suslick (2011) hanno descritto una tecnica a una fase per la preparazione della grafite polistirene-funzionalizzata. Nel loro studio, essi hanno utilizzato le scaglie di grafite e lo stirene come materie prime di base. Mediante sonicazione le scaglie di grafite nello stirene (come monomero reattivo), l'irraggiamento a ultrasuoni ha causato l'esfoliazione meccanico-chimica delle scaglie di grafite nei fogli di grafene a strato singolo o multiplo. Simultaneamente, è stata raggiunta la funzionalizzazione dei fogli di grafene con le catene di polistirene. È possibile attuare lo stesso processo di funzionalizzazione con altri monomeri di vinile.

PREPARAZIONE DEI NANONASTRI

Il gruppo di ricerca di Hogjie Dai e colleghi della Stanford University hanno sviluppato la tecnica per la preparazione dei nanonastri. I nastri di grafene sono strisce sottili di grafene che possono essere dotate di proprietà più vantaggiose dei fogli

PREPARATION OF NANORIBBONS

The research group of Hongjie Dai and his colleagues from Stanford University found a technique to prepare nanoribbons. Graphene ribbons are thin strips of graphene that may have even more useful characteristics than graphene sheets. At widths of about 10 nm or smaller, the graphene ribbons behavior is similar to a semiconductor as electrons are forced to move lengthwise. Thereby, it could be interesting to use nanoribbons with semiconductor-like functions in electronics (e.g. for smaller, faster computer chips).

Dai et al. preparation of graphene nanoribbons bases on two steps: firstly, they loosened the layers of graphene from graphite by a heat treatment of 1000°C for one minute in 3% hydrogen in argon gas. Then, the graphene was broken up into strips using ultrasonication. The nanoribbons obtained by this technique are characterized by much 'smoother' edges than those made by conventional lithographic means. (Jiao et al. 2009)

PREPARATION OF CARBON NANOSCROLLS

Carbon Nanoscrolls are similar to multi-walled carbon nanotubes. The difference to MWCNTs is the open tips and the full accessibility of the inner surfaces to other molecules. They can be synthesized wet-chemically by intercalating graphite with potassium, exfoliating in water and sonicating the colloidal suspension. (cf. Viculis et al. 2003) The ultrasonication assists the scrolling up of the graphene monolayers into carbon nanoscrolls.

A high conversion efficiency of 80% has been achieved, that makes the production of nanoscrolls interesting for commercial applications.

di grafene. Con larghezze pari a circa 10 nm o inferiori, il comportamento dei nastri di grafene è simile a quello dei semiconduttori perché gli elettroni sono indotti a muoversi per tutta la lunghezza. Di conseguenza potrebbe rivelarsi interessante usare i nanonastri con funzioni semiconduttive negli elettroni (ad es. per chips di computer più veloci e più piccoli).

La preparazione di Dai et al dei nanonastri di grafene si basa su due fasi: in primo luogo, essi liberano gli strati di grafene dalla grafite mediante trattamento termico di 1000° C per un minuto nel 3% di idrogeno nel gas argon. In seguito, il grafene viene diviso in due strisce mediante ultrasonificazione. I nanonastri ottenuti con questa tecnica sono caratterizzati da contorni più "levigati" rispetto a quelli ottenuti con strumenti litografici convenzionali. (Jiao et al. 2009)

PREPARAZIONE DELLE NANOSPIRALI DI CARBONIO

Le nanospirali di carbonio sono simili ai nanotubi di carbonio a pareti multiple. La differenza con MWCNT è la presenza di punti aperti e la piena accessibilità delle superfici interne ad altre molecole. Esse possono essere sintetizzate chimicamente con l'umidità intercalando la grafite con il potassio, esfoliazione nell'acqua e sonicazione della sospensione colloidale (Viculis et al. 2003). L'ultrasonificazione assiste lo scorrimento dei monostrati di grafene nelle nanospirali di carbonio. È stata così ottenuta una elevata efficacia di conversione pari all'80%, che ha reso la produzione delle nanospirali interessante ai fini delle applicazioni commerciali.

GRAPHENE DISPERSIONS

The dispersion grade of graphene and graphene oxide is extremely important to use the full potential of graphene with its specific characteristics. If graphene is not dispersed under controlled conditions, the polydispersity of graphene dispersion can lead to unpredictable or nonideal behavior once it is incorporated into devices since the properties of graphene vary as a function of its structural parameters. Sonication is a proven treatment to weaken the interlayer forces and allows for an accurate control of the important processing parameters. "For graphene oxide (GO), which is typically exfoliated as single-layer sheets, one of the main polydispersity challenges arises from variations in the lateral area of the flakes. It has been shown that the mean lateral size of GO can be shifted from 400 nm to 20 μm by changing the graphite starting material and the sonication conditions." (Green et al. 2010)

The ultrasonic dispersing of graphene resulting in fine and even colloidal slurries has been demonstrated in various other studies. (Liu et al. 2011/ Baby et al. 2011/ Choi et al. 2010)

Zhang et al. (2010) have shown that by the usage of ultrasonication a stable graphene dispersion with a high concentration of 1 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ and relatively pure graphene sheets are achieved, and the as-prepared graphene sheets exhibit a high electric conductivity of 712 $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$. The results of Fourier transformed infrared spectra and Raman spectra examination indicated that the ultrasonic preparation method has less damage to the chemical and crystal structures of graphene.

POTENTIAL APPLICATIONS

Biological applications: An example for ultrasonic graphene preparation and its biological In the study "Synthesis of Graphene-Gold Nanocomposites via Sonochemical Reduction" by Park et al. (2011), a nanocomposite from reduced graphene oxide - gold (Au) nanoparticles was synthesized by simultaneously reducing the gold ions and depositing gold nanoparticles on the surface of the reduced graphene oxide simultaneously. To facilitate the reduction of gold ions and the generation of oxygen functionalities for anchoring the gold nanoparticles on the reduced graphene oxide, ultrasound irradiation was applied to the mixture of reactants. The production of gold-binding-peptide-modified biomolecules shows the potential of ultrasonic irradiation of graphene and graphene composites. Hence, ultrasound seems to be a suitable tool to prepare other biomolecules.

Electronics: Graphene is a highly functional material for the electronic sector. By the high mobility of the charge carriers within the graphene's grid, graphene is of highest interest for the development of fast electronic components in the high-frequency-technology.

Sensors: The ultrasonically exfoliated graphene can be used for the production of highly sensitive and selective conductometric sensors (whose resistance rapidly changes $>10\,000\%$ in saturated ethanol vapor), and ultracapacitors with extremely high specific capacitance (~ 120 F/g), power density (~ 105 kW/kg), and energy density (~ 9.2 Wh/kg). (An et al. 2010)

Alcohol: For alcohol production: A side application may be the usage of graphene in the alcohol production, there graphene membranes can be used to distill alcohol and to make thereby alcoholic beverages stronger.

As the strongest, most electrically conductive and one of the lightest and most flexible materials, graphene is a promising material for solar cells, catalysis, transparent and emissive displays, micromechanical resonators, transistors, as cathode in lithium-air batteries, for ultrasensitive chemical detectors, conductive coatings as well as the use as additive in compounds.

DISPERSIONI DI GRAFENE

Il grado di dispersione del grafene e dell'ossido di grafene è estremamente importante per utilizzare tutte le potenzialità del grafene con le sue caratteristiche specifiche. Se il grafene non viene disperso in condizioni controllate, la polidispersibilità delle dispersioni di grafene può causare un comportamento non ideale o imprevisto una volta che esso è stato incorporato negli strumenti, perché le proprietà del grafene variano in funzione dei suoi parametri strutturali. La sonicazione rappresenta un trattamento di provata validità per indebolire le forze interstrato e consente un controllo accurato di importanti parametri di processo. "Per l'ossido di grafene (GO), che è esfoliato tipicamente in fogli monostrato, una delle principali sfide della polidispersibilità nasce dalle variazioni nell'area laterale delle scaglie. Si è dimostrato che la dimensione media laterale di GO può essere convertita da 400 nm a 20 μm modificando il materiale iniziale di grafite e in condizioni di sonicazione (Green et al. 2010).

La dispersione ad ultrasuoni del grafene da cui deriva la formazione di fanghi colloidal fini e uniformi è stata dimostrata in altri studi (Liu et al. 2011/Baby et al. 2011/Choi et al. 2010).

Zhang et al. (2010) hanno dimostrato che usando l'ultrasonificazione si ottengono una dispersione di grafene stabile con un'alta concentrazione di 1 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ e fogli di grafene relativamente puro e i fogli di grafene così preparati presentano una conducibilità di 712 $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$. I risultati dello spettro degli infrarossi da Trasformata di Fourier e lo spettro Raman indicano che la preparazione mediante ultrasuoni produce un numero inferiori di difetti nella struttura cristallina del grafene.

APPLICAZIONI POTENZIALI

Applicazioni biologiche: da un esempio della preparazione del grafene agli ultrasuoni e biologia nello studio "Sintesi dei nanocompositi Grafene-Oro mediante riduzione sonochimica" di Park et al. (2011) è stato sintetizzato un nanocomposito dalle particelle per ossidoriduzione di grafene-oro (Au) riducendo simultaneamente gli ioni oro e per deposizione delle nanoparticelle di oro sulla superficie dell'ossido di grafene. Per facilitare la riduzione degli ioni oro e per dare luogo alle funzionalità dell'ossigeno per l'ancoraggio delle nanoparticelle di oro sull'ossidazione del grafene, è stata applicata la radiazione agli ultrasuoni alla miscela di reagenti. La produzione di biomolecole modificate con legame-oro-peptide dimostra le potenzialità dell'irraggiamento agli ultrasuoni del grafene e dei composti di grafene. Da ciò si deduce che gli ultrasuoni sembrano idonei alla preparazione di altre biomolecole.

Elettronica: il grafene è un materiale altamente funzionale per il settore dell'elettronica. Grazie alla elevata mobilità dei veicoli carica all'interno della griglia di grafene, esso riveste una grande importanza per lo sviluppo di veloci componenti elettronici nella tecnologia dell'alta frequenza.

Sensori: il grafene esfoliato con gli ultrasuoni può essere utilizzato per la produzione di sensori conduttometrici selettivi ad alta sensibilità (la cui resistenza varia rapidamente in $>10.000\%$ nei vapori di etanolo saturo) e di ultracapacitori con alta capacità specifica (~ 120 F/g), densità di potenza (~ 105 kW/Kg) e densità energetica ($\sim 9,2$ Wh/kg) (An et al. 2010).

Alcol: per la produzione di alcol – un'altra applicazione può consistere nell'utilizzo del grafene per la produzione di alcol dove le membrane del grafene possono essere utilizzate per distillare l'alcol intensificando le bevande alcoliche.

Come materiale estremamente forte e conduttivo e il più leggero e flessibile in assoluto, il grafene è un materiale promettente anche per celle solari, per catalisi, display trasparenti ad alta emissione, risonanza micromeccanica, transistor, ma anche come catodo nelle batterie al litio, per rilevatori chimici ultrasensibili, per prodotti vernicianti conduttivi e additivi nei composti.

REFERENCES

- An, X.; Simmons, T.; Shah, R.; Wolfe, C.; Lewis, K. M.; Washington, M.; Nayak, S. K.; Talapatra, S.; Kar, S. (2010): Stable Aqueous Dispersions of Noncovalently Functionalized Graphene from Graphite and their Multifunctional High-Performance Applications. *Nano Letters* 10/2010. pp. 4295-4301.
- Baby, T. Th.; Ramaprabhu, S. (2011): Enhanced convective heat transfer using graphene dispersed nanofluids. *Nanoscale Research Letters* 6:289, 2011.
- Bang, J. H.; Suslick, K. S. (2010): Applications of Ultrasound to the Synthesis of Nanostructured Materials. *Advanced Materials* 22/2010. pp. 1039-1059.
- Choi, E. Y.; Han, T. H.; Hong, J.; Kim, J. E.; Lee, S. H.; Kim, H. W.; Kim, S. O. (2010): Noncovalent functionalization of graphene with end-functional polymers. *Journal of Materials Chemistry* 20/ 2010. pp. 1907-1912.
- Geim, A. K. (2009): Graphene: Status and Prospects. *Science* 324/2009. pp. 1530-1534. <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0906/0906.3799.pdf>
- Green, A.A.; Hersam, M. C. (2010): Emerging Methods for Producing Monodisperse Graphene Dispersions. *Journal of Physical Chemistry Letters* 2010. pp. 544-549.
- Jiao, L.; Zhang, L.; Wang, X.; Diankov, G.; Dai, H. (2009): Narrow graphene nanoribbons from carbon nanotubes. *Nature* 458/ 2009. pp. 877-880.
- Liu, X.; Pan, L.; Lv, T.; Zhu, G.; Lu, T.; Sun, Z.; Sun, C. (2011): Microwave-assisted synthesis of TiO₂-reduced graphene oxide composites for the photocatalytic reduction of Cr(VI). *RSC Advances* 2011.
- Oh, W. Ch.; Chen, M. L.; Zhang, K.; Zhang, F. J.; Jang, W. K. (2010): The Effect of Thermal and Ultrasonic Treatment on the Formation of Graphene-oxide Nanosheets. *Journal of the Korean Physical Society* 4/56, 2010. pp. 1097-1102.
- Park, G.; Lee, K. G.; Lee, S. J.; Park, T. J.; Wi, R.; Kim, D. H. (2011): Synthesis of Graphene-Gold Nanocomposites via Sonochemical Reduction. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 7/11, 2011. pp. 6095-6101.
- Stankovich, S.; Dikin, D. A.; Piner, R. D.; Kohlhaas, K. A.; Kleinhammes, A.; Jia, Y.; Wu, Y.; Nguyen, S. T.; Ruoff, R. S. (2007): Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon* 45/2007. pp. 1558-1565.
- Stengl, V.; Popelková, D.; Vlácil, P. (2011): TiO₂-Graphene Nanocomposite as High Performance Photocatalysts. In: *Journal of Physical Chemistry C* 115/2011. pp. 25209-25218.
- Suslick, K. S. (1998): Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology; 4th Ed. J. Wiley & Sons: New York, 1998, Vol. 26, pp. 517-541.
- Viculis, L. M.; Mack, J. J.; Kaner, R. B. (2003): A Chemical Route To Carbon Nanoscrolls. *Science*, 299/1361; 2003.
- Xu, H.; Suslick, K. S. (2011): Sonochemical Preparation of Functionalized Graphenes. In: *Journal of American Chemical Society* 133/2011. pp. 9148-9151.
- Zhang, W.; He, W.; Jing, X. (2010): Preparation of a Stable Graphene Dispersion with High Concentration by Ultrasound. *Journal of Physical Chemistry B* 32/114, 2010. pp. 10368-10373.
- Zhang, R.Q.; De Sakar, A. (2011): Theoretical Studies on Formation, Property Tuning and Adsorption of Graphene Segments. In: M. Sergey (ed.): *Physics and Applications of Graphene – Theory*. InTech 2011. pp. 3-28.

Kathrin Hielscher is marketing manager at the Hielscher Ultrasonics GmbH, a family-owned company that is specialized in the development and manufacturing of high power ultrasonic devices. She is born in 1983 in Lauingen, Germany. After finishing her studies in 2009, she joined the company, founded by her father-in-law in 1992, for full-time.

Kathrin Hielscher è marketing manager presso Hielscher Ultrasonics GmbH, una società a gestione familiare specializzata nello sviluppo e produzione di dispositivi ad ultrasuoni ad alta potenza. È nata nel 1983 a Lauingen, Germania. Al termine degli studi nel 2009, ha intrapreso la sua carriera professionale full-time in questa società, fondata da suo suocero nel 1992.