

## ФОНОННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ В ГРАФЕНЕ

*Денис НИКА*

Кванты колебаний кристаллической решетки – фононы – участвуют в большинстве физических процессов в наноструктурах. Инженерия электропроводящих и теплопроводящих свойств наноструктур путем целенаправленного изменения их фононных свойств получила название фононной инженерии [2]. Однородные слои и нанонити позволяют осуществлять инженерию фононов только посредством изменения размеров структуры или качества внешних поверхностей. Композитные многослойные структуры, составленные из слоев с различными фононными свойствами, с этой точки зрения выглядят более перспективными. В таких структурах возникают общие гибридные фононные моды, которые могут проявлять как фононные свойства отдельных слоев, так и их усредненные свойства. Меняя толщины и материал входящих слоев, можно достигать гибридизации фононных мод различной степени и, тем самым, менять в широком диапазоне теплопроводящие свойства наноструктур [2]. Появление графена – моноатомной пленки атомов углерода, который впервые был получен механическим расслоением графита, открыло новые возможности для фононной инженерии. Представим краткий обзор теплопроводящих свойств графена и графеновых лент, интенсивно исследуемых в мире, начиная с 2007 года. Описаны основные теоретические и экспериментальные результаты, полученные в этом направлении, и обсуждаются способы управления фононной теплопроводностью в этих материалах.

Первые измерения решеточной теплопроводности свободно подвешенного графена, проведенные в 2007 г., показали, что этот материал обладает рекордной теплопроводностью 3000 – 5000 Вт/мК при комнатной температуре [3-4], что, примерно, в 10 раз больше, чем у меди и, примерно, в 2 раза больше, чем в лучшем объемном теплопроводнике – алмазе. Теоретические и экспериментальные исследования решеточной теплопроводности в графене и графеновых лентах показывают, что теплопроводность сильно зависит от (1) качества границ и пространственных размеров образца, (2) концентрации дефектов кристаллической решетки и примесей [2, 4-7]. Необычная зависимость теплопроводности от пространственных размеров связана, в первую очередь, с большой средней длиной свободного пробега фонона в подвешенном графене  $\Lambda \sim 800$  нм [4], которая в десятки раз превышает среднюю длину свободного пробега фононов в кремнии. Поэтому даже в образцах с размерами  $\sim 10$  микрометров проявляется эта необычная зависимость [4-5]. На приводимом рисунке представлена зависимость решеточной

теплопроводности графена от линейных размеров образца. Как видно из данного рисунка, теплопроводность сильно зависит от размеров образца и варьирует в широких пределах – от 1700W/mK до 5700 W/mK при комнатной температуре.

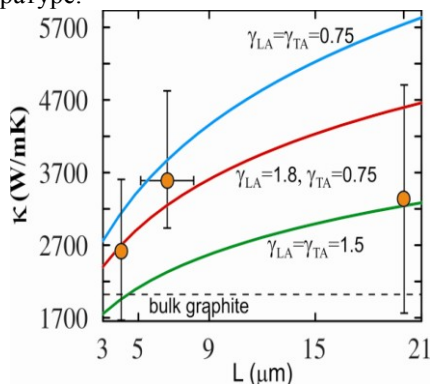


Рис. Зависимость решеточной теплопроводности однослойного графена от линейного размера монослоя.

Линии соответствуют теоретическим результатам, полученным в работе [8]. Экспериментальные точки из работ [3-4, 6-7] показаны кружками

#### **Литература:**

1. STROSCIO, M.A., DUTTA, M. *Phonons in nanostructures*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
2. BALANDIN, A.A. and NIKA, D.L. Phononics in low-dimensional materials. In: *Materials Today*. 2012, vol. 15, p.266.
3. BALANDIN, A.A. et al. Superior thermal conductivity of single layer graphene. In: *Nano Lett.* 2008, vol.8, p.902.
4. GHOSH, S. et al. Extremely high thermal conductivity in graphene: prospects for thermal management application in nanoelectronic circuits. In: *Appl. Phys. Lett.* 2008, vol.92, 151911.
5. NIKA, D.L., POKATILOV, E.P., ASKEROV, A.S. and BALANDIN, A.A. Phonon thermal conduction in graphene: Role of Umklapp and edge roughness scattering. In: *Phys. Rev. B*, 2009, vol.79, 155413.
6. CAI, W. et al. Thermal transport in suspended and supported monolayer graphene grown by chemical vapor deposition. In: *Nano Lett.* 2010, vol.10, p.1645.
7. JAUREGUI, L.A. et al. Thermal transport in graphene nanostructures: experiments and simulations. In: *ECS Trans.* 2010, vol.28, p.73.

Автор выражает благодарность за частичную финансовую поддержку в рамках исследовательских проектов Республики Молдова 11.817.05.10F, 14.819.16.02F и 14.820.18.02.012 STCU.A/5937 и фонда STCU (Project #5937).