

# 石墨烯片中的光致发声现象\*

赵继民<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室(筹) 北京 100190)

2015—07—24收到

<sup>†</sup> email: jmzhao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150908

光与凝聚态物质相互作用的许多种形式已经为人们所知晓,例如光致发光,基于固体的各种非线性光学现象(拉曼散射、二次谐波产生、空间自相位调制等),激光在晶体中产生相干态声子、磁振子,等等。虽然光与凝聚态物质相互作用的研究可以追溯到很久以前,激光的发明也已经有50多年的历史了,但是由于新材料的出现,仍然有新的现象被发现,这里介绍的光致发声就是这样一种新的物理现象。如同光致发光是在光的激发下固体发出光一样,光致发声是在光的激发下固体发出声音。

光致发声这一物理现象的发现与另一种物理现象——电致发声——有一定的关联。2008年,范守善、姜开利等利用碳纳米管长丝平行排列形成薄膜,发现该薄膜两端通电后可以发出音频声音<sup>[1]</sup>,这使得柔性的透明的扬声器这一梦想得以成真,并引起了广泛的关注和兴趣。2011年,任天令等在多层石墨烯片中首次观测到了二维材料体系的电致发声现象<sup>[2]</sup>,继而又在单层石墨烯中实现<sup>[3]</sup>,极大地拓展了传统声源器件的应用空间,引起了广泛的关注。基于这样的研究背景,赵继民等设想,如果能够实现光致发声,则是非接触的发声,是一种新的物理现象。但是,(1)光致发声在一般材料中很弱,此前很少有关于光致发声在固体材料中被观测研究的报道,也未在上述低维碳材料中被发现过;(2)关于光致发声的物理机制是光—声过程还是光—热—声过程尚不清楚,也没有任何实验证实;(3)在电致发声或光致发声实验中实现对声波的相干调控更加困难,此

前实验上还没能实现。

最近,经过深入研究,赵继民等在多层石墨烯片中发现了光致发声现象<sup>[4]</sup>:当采用几千赫兹重复频率的超快激光脉冲激发多层石墨烯片时,人耳能清晰地听到发出的音频声音(图1),该声音的强度随激光功率大小线性变化,这是国际上第一次在石墨烯材料中观察到这一现象,为光能转化成声能方面的应用开辟了道路。

为了深入研究光致发声的物理机制,他们需要设计一个能够区分热效应和光效应的实验。这并不容易,在很多研究中,热效应和光效应的区分都是一个关键的具有挑战性的物理问题<sup>[5,6]</sup>。赵继民等设想从时间尺度上进行区分:在固体中最先响应光的是电子等载流子而非晶格原子,它们带电荷,比原子轻,在飞秒量级的时间尺度(相干阶段)即可到达激发态<sup>[7]</sup>。在与超快激光作用下,电子的温度可以达到一千摄氏度以上,远远高于晶格的温度,这样的高温电子,冷却的途径主要有两种可能,将能量传递给晶格原子<sup>[8]</sup>或环境气

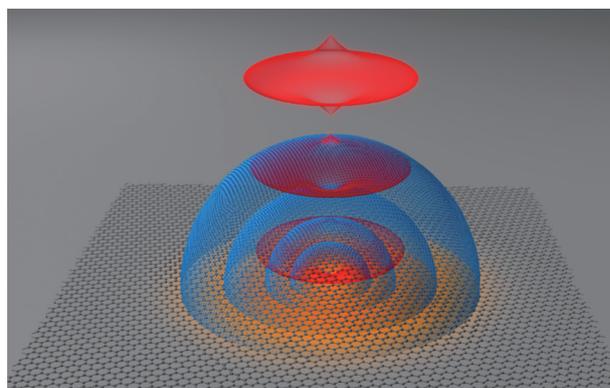


图1 光致发声现象的发现。激光脉冲在石墨烯片层上通过电子—声子相互作用产生热,热再传递给空气分子产生声波。红色代表激光脉冲,橙色代表热梯度,蓝色代表声波及其传播。光致发声的物理机制为光—热—声效应

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2012CB821402)、国家自然科学基金(批准号:11274372)资助项目;中国科学院对外合作重点项目(批准号:GJHZ1403)

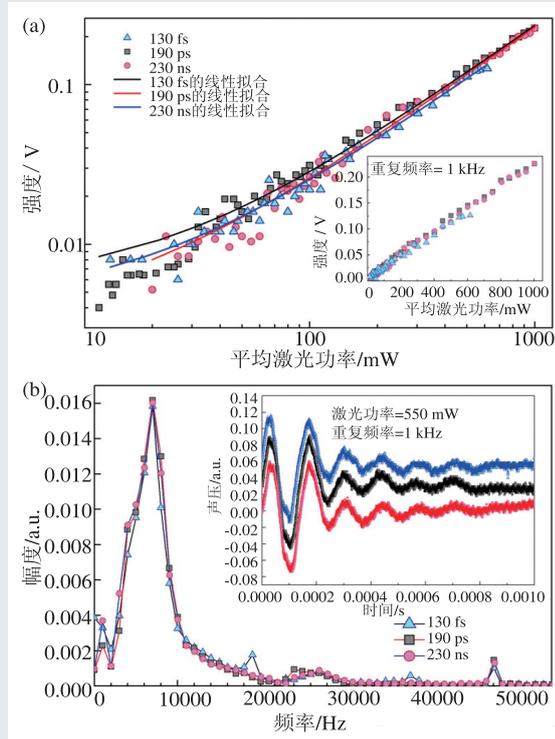


图2 光—热—声物理机制的验证：脉宽对比实验和时域—频域分析 (a)超快激光脉冲的时域宽度不同时对应的发声强度。蓝色、黑色、红色分别代表130 fs, 190 ps和230 ns激光脉宽的实验结果，实线为线性拟合结果。在很大的激光能流密度范围内，三个脉宽对应的发声效率是一致的；(b)不同脉宽激光激发的声波的频域图和时域图(插图)。在时域和频域均未见声波信号的明显差异

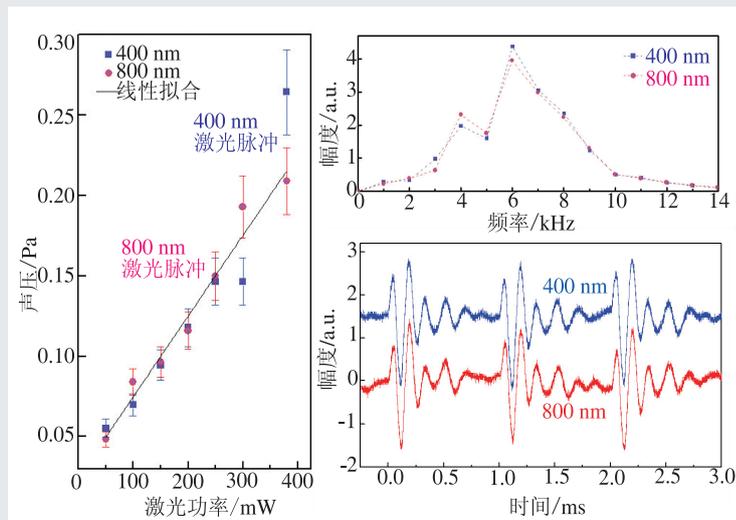


图3 石墨烯材料宽谱狄拉克锥体特性在光能转化方面的应用。左图为光子能量(波长)对比实验，右图为时域—频域联合分析。中心波长在400 nm和800 nm的超快激光脉冲有着近似相等的发声特性，其发声效率、时域波形、频域谱分量等均基本相同

体分子。如果是前者，先把能量通过电子—声子散射传递给热声子(即产生热效应)，再由这些热声子将能量传递给空气分子，则是光—热—声物理机制；如果是后者，直接把能量传递给空气分子，则是光—声物理机制。这两者可以从响应时间的尺度上加以区分：典型的电子—原子相互作用的时间尺度在皮秒量级<sup>[9]</sup>，而通常热效应中的热平衡、热扩散则在纳秒—微秒量级以上。于是他们采用飞秒(130 fs)、皮秒(190 ps)、纳秒(230 ns)三个不同的超快激光脉冲分别激发样品，两种机制应该有可区分的不同响应。通过对比三个实验结果(图2)，发现三者效率、时域、频域等方面均相同，这表明石墨烯片中的光致发声的物理机理是光—热—声过程，而非直接的光—声过程。据此，人们终于对于类似的发声现象得到了一个基于实验证实的清晰的物理机理图像。

这个现象首先在石墨烯<sup>[10]</sup>材料中被发现并非偶然，石墨烯材料中特有的强电—声子耦合<sup>[11,12]</sup>在光致发声现象中发挥了至关重要的作用。此前关于石墨烯的工作主要集中于研究狄拉克点附近的电子态的优越的迁移特性<sup>[13-15]</sup>，而其大能量范围的锥体上的狄拉克电子态使得其在很大的频率范围内具有很好的与光相互作用的特性<sup>[16,17]</sup>，例如可见光光能的利用即对应于狄拉克锥体部分，此前并未被充分利用。为此，赵继民等研究了在不同波长激光(800 nm和400 nm中心波长)激发下的光致发声行为(图3)，发现包括效率、频谱、时域强度在内的各种结果都几乎一致，这是非常优异的不随波长变化的性能，为基于石墨烯材料狄拉克锥体部分的光能应用开辟了新的途径，也第一次表明在类似应用中石墨烯片是比一般金属片等更具优势的材料，因为一般金属的光谱适用范围狭窄得多。

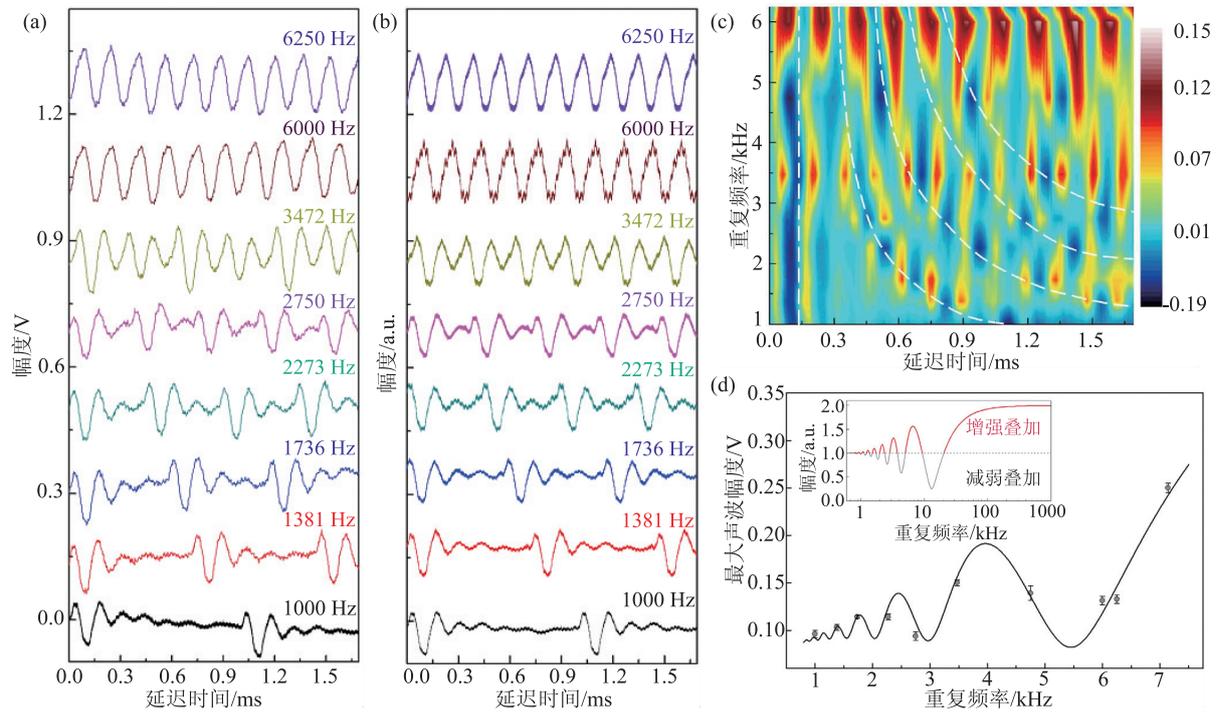


图4 光致发声的相干调控：通过改变光脉冲重复频率来调控声波相位差和强度 (a)石墨烯片在不同光脉冲重复频率下的时间域信号。为了清楚起见，图中所示曲线做了Y方向平移；(b)相干调控的数值模拟，由两个声波信号按照重复频率对应的时间差叠加得到，与(a)中的实测信号符合得很好；(c)由(a)的时间域信号做出的声波强度随时间和重复频率演化的二维彩图，白色虚线指示相干调控；(d)相干调控的数值分析结果：声波信号的增强和减弱可通过改变光脉冲的重复频率来调控。实心点提取自(a)的实验结果，实线是理论公式的拟合。插图显示保持激光功率不变的结果

有趣的是，在这项研究中，他们第一次发现了非简谐声波的存在(图2和图3的时域部分)，为了验证该非简谐声波是多层石墨烯片中的热声子与周围环境的气体分子碰撞所产生，他们制作了金属真空腔体，使用了无线实验装置，进行了氦气环境下的观测，发现当空气分子变成氦气分子时，该发声的频谱明显不同，可见声波(包括其非简谐分量)是热声子与气体分子相互作用所产生(图1)。这是人们第一次对非简谐声波有了深入的认识，也进一步验证了光—热—声过程中的热—声部分。

更进一步地，基于非简谐波这一发现，赵继民等运用超快激光脉冲技术实现了光对声波的相干调控。光与凝聚态物质相互作用的一个重要研究内容是，如何将光的相干性传递给凝

聚态物质<sup>[18]</sup>，例如传递给电子以调控电子的相干性，或者传递给晶格形成相干态声子以研究特定模式声子的作用，或者传递给其他自由度的集体元激发，等等。声波的相干性调控是基于热效应的调控，无论是在电致发声还是光致发声中，此前均没有被研究过。基于对非简谐波的新认识，他们设想如何对该热效应实现相干调控。实验中他们改变超快激光脉冲的重复频率，相邻脉冲的周期间隔随之改变，此时非简谐声波出现了叠加，其强度发生了增强或减弱的周期性变化(图4)，最终发出的声波的相位差和强度可由激光脉冲的重复频率精确控制，从而在光致发声中实现了对声波的相干调控。

赵继民等的这项工作<sup>[4]</sup>不但第一次发现了一

## 美国Time 封面刊登 D-Wave量子计算机： 选用Bluefors & Cryomech低温制冷机



BF-LD BF-SD BF-Horizontal  
无液氮稀释制冷机



氮回收及液化系统、脉管制  
冷机、GM制冷机、氮再液化  
器、低温恒温槽、液氮系统

### Cryomech和Bluefors中国 唯一销售及技术服务商

提供覆盖各主要温区（最低至几  
毫K）的低温设备及系统。敬请  
随时联系我们，我们可以提供各  
类定制化设计的低温解决方案。

赛浩（上海）仪器有限公司

[www.scikro-instru.com](http://www.scikro-instru.com)

+86-21-69133626

info@scikro-instru.com



种新的物理现象——光致发声，提出并实验证实了该现象的物理机制是光—热—声效应，同时还实现了在光致发声中对声波的相干调控。这帮助人们认识了一种新的光与凝聚态物质相互作用的形式，同时也为石墨烯材料在光能利用、光学扬声器、无接触声学装置等方面开辟了新的应用前景。

#### 参考文献

- [1] Xiao L, Chen Z, Feng C *et al.* Nano Lett., 2008, 8: 4539
- [2] Tian H, Ren T L, Xie D *et al.* ACS Nano, 2011, 5: 4878
- [3] Tian H, Xie D, Yang Y *et al.* Nanoscale, 2012, 4: 2272
- [4] Tian Y C, Tian H, Wu Y L *et al.* Sci. Rep., 2015, 5: 10582
- [5] Xu X D, Gabor N M, Alden J S *et al.* Nano Lett., 2010, 10: 562
- [6] Gabor N M, Song J C W, Ma Q *et al.* Science, 2011, 334: 648
- [7] Shah J. Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures. Springer, 1999
- [8] Bistrizter R, MacDonald A H. Phys. Rev. Lett., 2009, 10: 206410
- [9] Strait J H, Wang H N, Shivaraman S *et al.* Nano Lett., 2011, 11: 4902
- [10] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* Science, 2004, 306: 666
- [11] Yan J, Zhang Y B, Kim P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 166802
- [12] Castro Neto A H, Guinea F. Phys. Rev. B, 2007, 75: 045404
- [13] Han M Y, Özyilmaz B, Zhang Y B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 206805
- [14] Winnerl S, Orlita M, Plochocka P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 107: 237401
- [15] Yao W, Yang S Y A, Niu Q. Phys. Rev. Lett., 2009, 102: 096801
- [16] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E *et al.* Nature, 2011, 474: 64
- [17] Wu R, Zhang Y L, Yan S C *et al.* Nano Lett., 2011, 11: 5159
- [18] 赵继民. 物理, 2011, 40(3): 184

### 标准光学元件库存---供您随时选用

总量多达10万片，  
超过700个品种规格的透镜，  
棱镜，反射镜，窗口，  
滤光片等常用光学器件；  
涵盖紫外，可见，  
近红外，  
红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



可见光学元件



红外元件



颜色滤光片



窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司  
Beijing Golden Way Scientific Co.,Ltd

地址：北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段  
电话：010-88096218/88096099 传真：010-88096216  
邮箱：optics@goldway.com.cn