

碳纳米管-聚二甲基硅氧烷的光声特性

吴然然^{1,2}, 夏慧^{2*}, 张晶晶¹, 寻丽娜^{1*}, 孙直申³, 李元园²

1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601
2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190
3. 北京工业大学信息学部信息与通信工程学院, 北京 100124

摘要 碳纳米管-聚二甲基硅氧烷(CNT-PDMS)是一种新型的激光超声换能器(LIU-T)复合材料,具有高频率、宽带宽、高振幅的特性。该复合薄膜可作为高效、鲁棒的超声发射器用于诊断和治疗。纳米复合材料的固有结构提供了独特的热、光学和机械性能,这不仅有利于能量转换,而且对脉冲激光烧蚀具有很好的鲁棒性。PDMS聚合物具有高热弹性系数有利于材料的伸缩从而产生超声。研究了几种不同复合薄膜产生的光声信号特性,测试了不同衬底和水介质条件下的光声信号特性。利用碳纳米材料的高吸光性和PDMS聚合物的高膨胀性制作激光超声换能器,不但降低了材料的厚度,还有望产生高频高强度超声信号。实验用硬玻璃衬底厚度约为1 mm,软薄膜衬底厚度在微米级,水介质条件下的厚度为3 mm。在脉冲激光激励下,水介质下软薄膜条件、硬玻璃衬底、软薄膜衬底涂层端面超声压力分别为2.0, 3.9和5.2 MPa。通过一系列的研究得出了结论:(1)软薄膜衬底(3×3)比硬玻璃衬底(3×3)更具有良好的负脉冲,更适合用在光声空化治疗方面;(2)水介质条件下不利于产生高强度光声信号。总而言之,采用激光超声换能器比压电换能器更具有产生高振幅,带宽宽的超声信号的潜力,而且提供了一种没有电子等干扰结构的超声激励新方法,有望成为替代压电换能器的新一代激光超声换能器。这种新方法应用在磁声电成像领域可以大大减少超声激励源的干扰。同时,相对于将CNT混入PDMS中的方法,该方法更具有简单方便节省材料等优点。对于硬玻璃传统型衬底,实现的软薄膜衬底能产生较高的声压5.2 MPa,并且中心频率在5 MHz, -6 dB超声带宽也相对较宽接近5 MHz,相比于早在2014年实现的CNT-PDMS激光超声换能器产生的4.5 MPa声压,本文方法更具有临床应用前景,应用在磁声电成像等方面具有很好的避免电磁干扰效果。

关键词 碳纳米管;聚二甲基硅氧烷;光声效应;激光超声换能器

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)07-2079-08

引言

传统的超声传感器多数是基于压电效应的,它在特定应用场合比如与磁场耦合应用中存在电磁干扰等问题。基于光声效应的超声传感器具有非接触性、非破坏性等特点,在医学、工业等领域的成像和传感中具有广阔的应用前景^[1-2]。它的原理为脉冲激光照射在碳纳米复合材料上,通过材料瞬时吸热膨胀产生高频高压超声信号,产生的超声信号将在生物医学物理治疗、无损检测等领域发挥重要作用。基于碳纳米复合材料的光声传感器最关注的两个指标是声压和频率。

为了获得高振幅的光声信号,通常是选择具有良好吸光性和高热膨胀系数的复合材料,或者是增加入射激光的强度。对于给定的材料,它们的光致损伤系数决定了可产生的光声信号的上限,因此有必要对光声特性进行详细研究。

近年来,光学超声换能器得到飞速发展,它弥补了压电换能器的局限性。激光-超声换能器(laser induced ultrasonic transducer, LIU-T)是利用激光脉冲激励碳纳米复合材料产生超声信号,其中碳纳米材料包括碳黑(CB)^[4]、碳纳米管(CNT)^[5]、碳纳米纤维(CNF)^[6]、蜡烛烟灰(CS)^[7]、还原氧化石墨烯(GO)^[8]等等,这些与金属吸收剂(如Cr金属薄膜(100 nm thickness))^[9-10]、微尺度吸光材料复合而有更高的

收稿日期: 2019-06-21, 修订日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771448, 61427806), 中国科学院青年创新促进会人才项目(2017179), 院级重大研制项目(ZDKYYQ20190002)资助

作者简介: 吴然然, 1994年生, 安徽大学电气工程与自动化学院硕士研究生 e-mail: wuranran163@mail.iee.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: xiahui@mail.iee.ac.cn; xunlina@126.com

吸光性能。

聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 因有较大的热膨胀系数被生物医学、人造皮肤等领域作为弹性元件广泛应用。基于聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 的激光超声换能器具有高振幅和高频率的特性, 使得光声成像、光声空化成为可能, 在各个领域的应用具有很大的潜力^[10]。Lee 等在 CNT-PDMS 光声材料方面不仅详细的分析了如何提高光声转换效率, 还提到了碳纳米管是一种理想的光吸收材料, 同时由于它的很好的阻抗匹配特性, 将形成一种有前景的新型光声器件^[11]。2006 年, Hou 等报道了二维金纳米结构与 PDMS 复合产生 1.5 MPa 高频超声^[10]。2014 年, Colchester 等使用 CNT-PDMS 复合实现了 4.5 MPa 的声压^[5]。2015 年, Chang 等利用纳米碳纤维与 PDMS 复合成功产生了压力为 12.15 MPa 的超声^[6]。2018 年, Chen 等展示了一种新型平面形状的 LIU-T, 利用 PDMS/Au-CNT yarn-PDMS 制作了一种新型的光声传感器, 它可以产生 33.6 MPa 高光声压力和光声能量转换效率 2.74×10^{-2} ^[12]。

Huang 等在 2016 年提出较大的负脉冲在超声波治疗和非破坏性检查应用中更有利, 尤其是在高强度聚焦超声治疗和以气泡空化为主要机制的药物递送^[13-14]方面。为了实现微米级碳纳米复合膜薄的高频、高压超声信号, 同时考虑负脉冲超声信号在生物治疗中的作用, 我们采用高吸光材料碳纳米管 (CNT) 和具有高膨胀系数的材料 PDMS (约为 $310 \times 10^{-6} \mu\text{m} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$) 聚合物^[8]复合产生高频、高压超声。提出旋涂 PDMS 与 CNT 制作微米级复合薄膜型 LIU-T 的方法, 并对超声性能进行表征。通过对不同旋涂比例的 LIU-T 进行声学特性表征, 设计出最优复合 LIU-T。同时考虑到 LIU-T 的生物兼容性应用, 设计了柔性激光超声换能器 (laser ultrasonic transducer of soft film, LIU-TF), 这种新型的 LIU-TF 能产生声压 5.2 MPa, 将在医疗设备、光声空化、无创超声治疗方面具备很大的发展空间, 尤其是优异的负脉冲超声特性将在物理治疗等领域发挥重要作用。

1 实验部分

复合 LIU-T 的实现原理如图 1 所示, 激光经过玻璃衬底后被吸光材料吸收转换成热, 热膨胀产生瞬时声压。在我们的设计中, 吸光材料采用高吸光比的碳纳米管水分散液 TNWDM-15 (中国科学院成都有机化学有限公司), 为了获得更好的均匀性, 使用前需超声 5 min。热膨胀材料采用高热膨胀系数的 PDMS 溶液, PDMS 溶液采用 PDMS 基料 (Sylgard184 型, 美国 Dow Corning 公司) 和固化剂以 10:1 的体积比混合均匀, 然后置于真空室中脱气 30 min, 再超声处理 5 min。将光学玻璃基底经过丙酮和酒精的清洗后自然风干。首先利用匀胶机 (KW-4A/5 型, 中国科学院微电子研究所) 将碳纳米管水分散液旋涂到光学玻璃基底上, 控制旋涂速度分别为 4 500, 4 000, 3 500, 3 000 和 2 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 旋涂时间均为 2 min, 然后将光学玻璃基底放入 80 °C 的恒温箱中, 2 h 后取出。再利用匀胶机将 PDMS 溶液以 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度均匀的旋涂在已经涂有碳纳米管水分散液的玻

璃基底上。最后放入 80 °C 的恒温箱中, 2 h 后取出, 做好标签。通过对不同旋涂速度下的 LIU-T 的超声特性进行表征和分析选出最优的旋涂比例的 LIU-T。

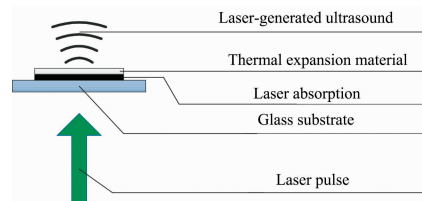


图 1 LIU-T 的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the LIU-T

1.1 CNT 旋涂速度对 LIU-T 的声学特性影响规律研究

实验装置示意图如图 2 所示。激光光源为 Nd:YAG 脉冲激光器 ($\lambda=532 \text{ nm}$, $\tau=20 \text{ ns}$, 激光束直径约为 10 mm, 脉冲孔径为 7 mm, 光斑尺寸为 7 mm)。将 LIU-T 固定在光学窗口的卡槽内。脉宽为 20 ns 且重复频率为 10 Hz 的 532 nm 脉冲激光通过中性密度滤波片、光圈和扩束器后照射到光学窗口, LIU-T 放在 1.2 英寸水浸式压电换能器焦点处。产生的声信号经过水介质到达超声探头处被接收, 同时通过光电探测器作为参考信号和激光诱导的超声信号一起传输到示波器。

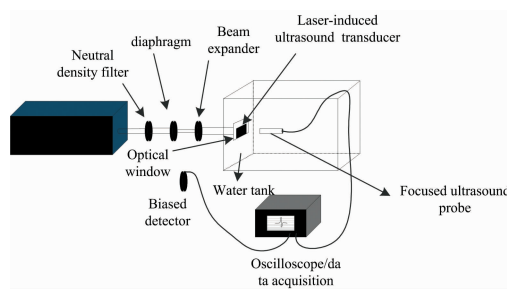


图 2 光声信号产生的实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental device for photoacoustic signal generation

实验中, 首先保证 PDMS 的旋涂量和旋涂速度保持不变, 观察 CNT 在相同的旋涂量的情况下, 旋涂速度对声学特性的影响。即: 每一组 LIU-T 都是由 PDMS 溶液以 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度均匀旋涂, CNT 溶液在相同旋涂量下分别以 4 500, 4 000, 3 500, 3 000 和 2 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度旋涂得到的, 控制激光能量在 $55 \text{ mJ} \cdot \text{pulse}^{-1}$, 测量每一组 LIU-T 的超声特性并进行 FFT 变换, 得到的频谱如图 3 所示, 图中 -6 dB 带宽的中心频率和频宽如表 1 所示。结合图 3 和表 1 可以看出, 对于相同比例和相同比重的 CNT 溶液, 随着 CNT 溶液旋涂速度的逐渐减小, -6 dB 带宽宽度逐渐减小, 转速从 4 500 减小到 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 中心频率增加 1.2 MHz, 带宽宽度减小 0.3 MHz, 声压增加 0.3 MPa; 与 3 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速相比, 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的中心频率减小 0.2 MHz, 带宽宽度增加 0.6 MHz, 声压增加 1 MPa。变化的原因是 LIU-T 膜的厚度, 膜的厚度不仅影响激光的吸收, 还影响超声的传输, 膜越厚激光的吸收越大, 但超声传输的损耗

也会增大,因此膜的厚度直接影响产生的超声信号,而旋涂速度直接影响膜的厚度。通过优化分析可知,当 CNT 转速 4 000 r · min⁻¹,得到的激光超声信号最佳。

1.2 PDMS 旋涂速度对 LIU-T 的声学特性影响规律研究

LIU-T 制备时固定 CNT 旋涂量,旋涂转速为 4 000 r · min⁻¹,PDMS 转速分别取 4 500, 4 000, 3 500, 3 000 和 2 500 r · min⁻¹,控制激光能量在 55 mJ · pulse⁻¹,同样对得到的光声信号进行 FFT 变换,得到的频谱如图 4 所示。对图 4 进行分析,得到-6 dB 带宽下的中心频率和带宽宽度如表 2 所示,结合图 4 和表 2 可以看出,对于相同比例和相同比重的 PDMS 溶液,随着旋涂速度的逐渐减小,-6 dB 带宽宽度产生变化,相对于转速 4 500 r · min⁻¹,4 000 r · min⁻¹ 转

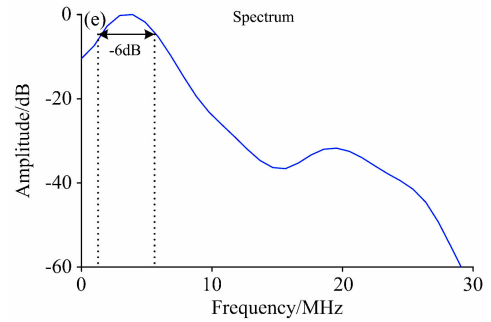
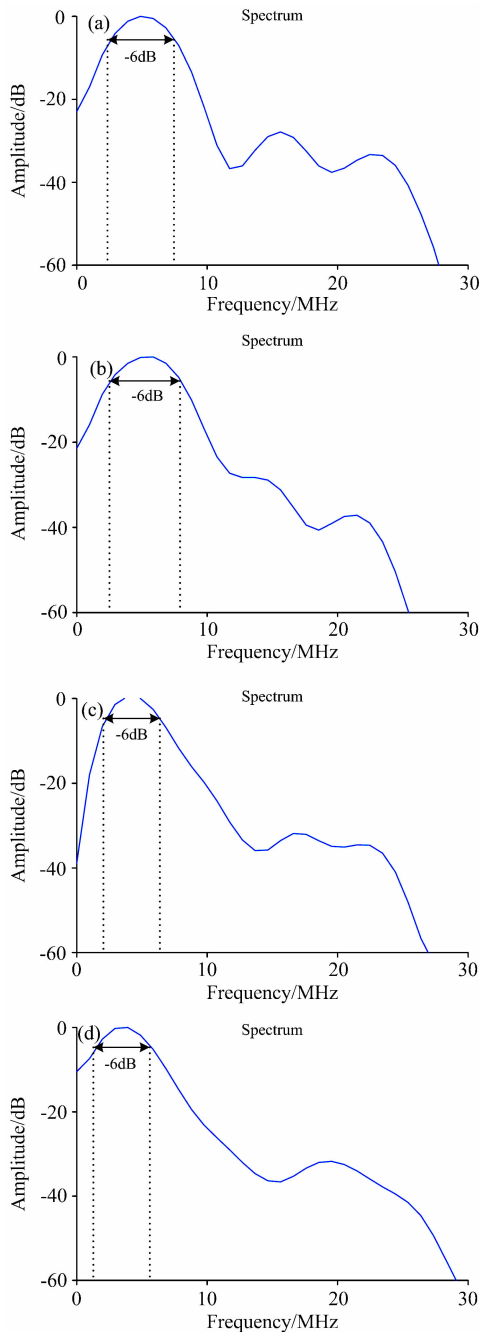


图 3 不同 CNT 转速产生的光声信号
(a): 4 500 r · min⁻¹; (b): 4 000 r · min⁻¹; (c): 3 500 r · min⁻¹; (d) 3 000 r · min⁻¹; (e): 2 500 r · min⁻¹

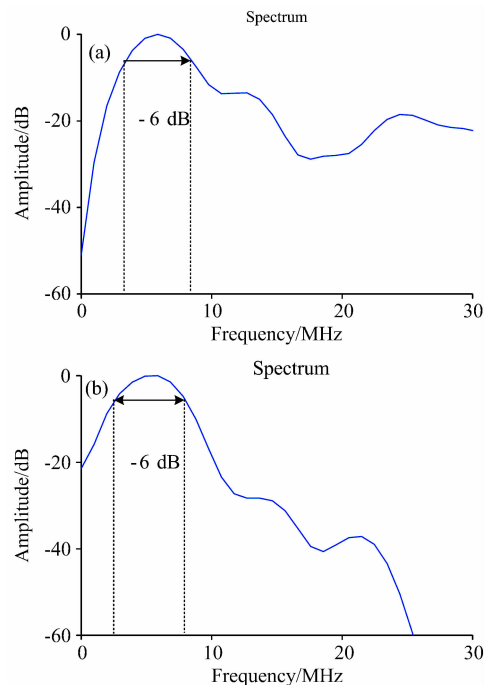
Fig. 3 Photoacoustic signals generated by the different rotation speed of CNT

(a): 4 500 r · min⁻¹; (b): 4 000 r · min⁻¹; (c): 3 500 r · min⁻¹; (d) 3 000 r · min⁻¹; (e): 2 500 r · min⁻¹

表 1 不同 CNT 转速下的 FFT 变换频谱分析
Table 1 FFT spectrum analysis at different CNT rotational speeds

CNT 测试转速 / (r · min ⁻¹)	中心频率 / MHz	带宽宽度 / MHz	声压 / MPa
4 500	3.3	5.5	4.9
4 000	4.5	5.2	5.2
3 500	4.7	4.6	4.2
3 000	4.2	4.0	3.8
2 500	4.0	2.5	3.1

速下的中心频率增加 1.1 MHz,带宽宽度增加 0.2 MHz,声压增加 1 MPa; 3 500 r · min⁻¹ 相比 4 000 r · min⁻¹ 转速下的中心频率减少 0.8 MHz,带宽宽度减小 0.6 MHz,声压减小



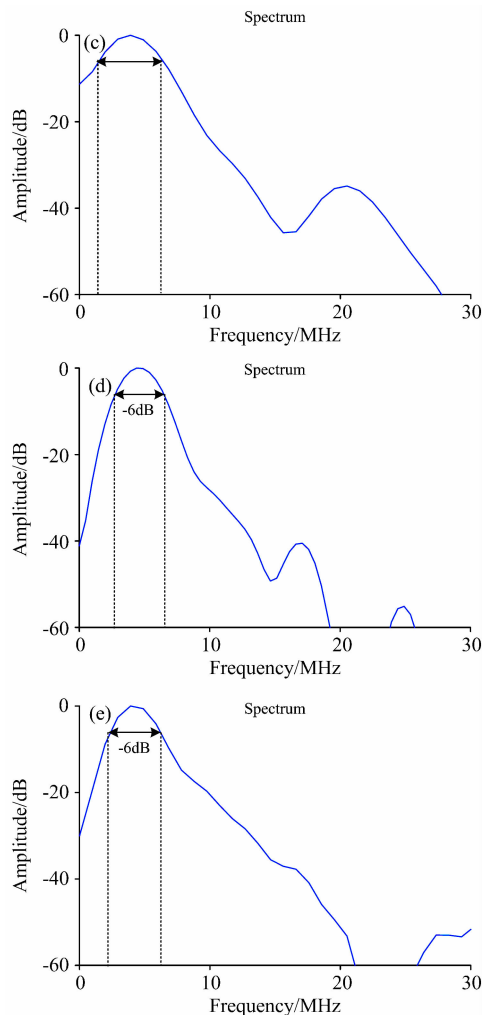


图 4 不同 PDMS 转速产生的光声信号的频谱

(a): $4\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (b): $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (c): $3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$;
(d): $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (e): $2\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 4 Photoacoustic signals generated by different PDMS speeds

(a): $4\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (b): $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (c): $3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$;
(d): $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (e): $2\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

1.3 MPa。综合比较图 3 和图 4，当 PDMS 和 CNT 旋涂速度都为 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，得到的激光超声信号最佳。

表 2 不同 PDMS 转速下的 FFT 变换频谱分析
Table 2 FFT spectrum analysis at different PDMS rotational speeds

PDMS 测试转速 / ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	中心频率 / MHz	带宽宽度 / MHz	声压 / MPa
4 500	3.4	5.0	4.2
4 000	4.5	5.2	5.2
3 500	3.7	4.6	3.9
3 000	3.6	4.0	3.5
2 500	3.5	4.0	3.2

2 LIU-T 声学性能表征

2.1 不同激光能量对 LIU-T 的声学特性影响规律研究

采用最佳旋涂速度配比获取的复合型 LIU-T 在图 2 所示的实验装置中进行实验。利用压电换能器接收 LIU-T 产生的超声信号，LIU-T 在水浸式压电换能器的焦点处，水浸式压电换能器 (OLYMPUS V317, 频率 20 MHz) 将接收到的超声信号通过数字示波器 (型号 MSO7104A) 记录。调节激光器的出射激光功率，保持 LIU-T 与水浸式压电换能器的位置不变，不同激光能量下激光超声换能器产生的声压如图 5。可以看出，当激光能量小于 $55\text{ mJ}\cdot\text{pulse}^{-1}$ 时，产生的超声信号会随着激光能量的增大而增大，在 $55\text{ mJ}\cdot\text{pulse}^{-1}$ 时达到最大，声压接近 5.2 MPa。这是由于材料本身具有一定的热弹性系数，当激光能量进一步增大时，会产生对材料的烧蚀效应。

2.2 LIU-T 空间声场特性分析

利用最佳配比获得的 LIU-T，在激光能量 $55\text{ mJ}\cdot\text{pulse}^{-1}$ 下对 LIU-T 声场特性进行测试。测试装置的示意图如图 6 所示，脉冲激光通过中性密度滤片、光圈和扩束器后照射到光学窗口，激光沿换能器轴线移动针式水听器。换

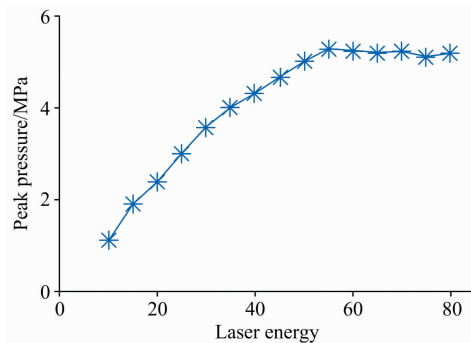


图 5 不同激光能量的产生的声压信号

Fig. 5 Photoacoustic signals generated by different laser energies

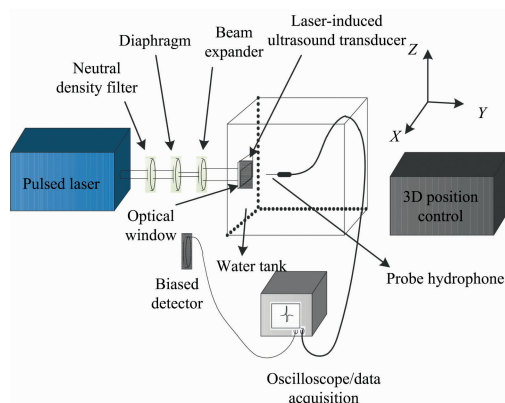


图 6 沿 LIU-T 轴线方向激光超声声压信号特性的实验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus for laser ultrasonic photoacoustic signal characteristics along the axis of LIU-T

能器与针式水听器之间的距离与测量的声压之间关系曲线如图 7 所示,可以看出随着针式水听器与 LIU-T 两者之间距离的增大产生的声压信号随之减小。

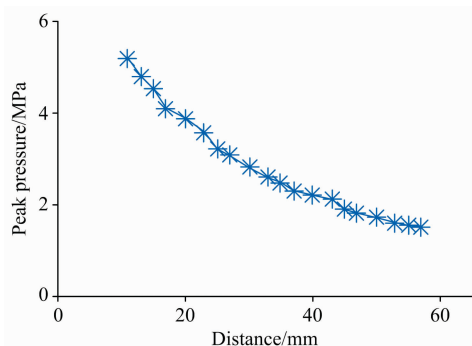


图 7 y 方向上的声压信号特性

Fig. 7 Photoacoustic signal characteristics in y directions

2.3 LIU-T 不同衬底条件下声场特性分析

为了全面了解 LIU-T 的声学特性,有必要分析 LIU-T 衬底材料对声学特性的影响规律,为了保证激光能量的穿透性,衬底材料分别选择透光性能优异的石英玻璃、柔性透明塑料薄膜。超声信号产生和测量的实验装置示意图如图 8 所示,脉冲激光通过中性密度滤光片和光圈,扩束器后经过光学镜片反射到 LIU-T,通过与仿体耦合用水浸式压电换能器接收信号。实验示意图如图 9 所示,分别为硬玻璃衬底(a)、软薄膜衬底(b)、水介质下的软薄膜(c),CNT 和 PDMS 均为 $4\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速,激光能量 $55\ \text{mJ} \cdot \text{pulse}^{-1}$ 。换能器固定在水浸式压电换能器的焦点。照射在换能器的激光束直径为 $7\ \text{mm}$ 。直径 $7\ \text{mm}$ 的光斑保证了激光光斑全部在镜面反射和能量最小程度的削减。

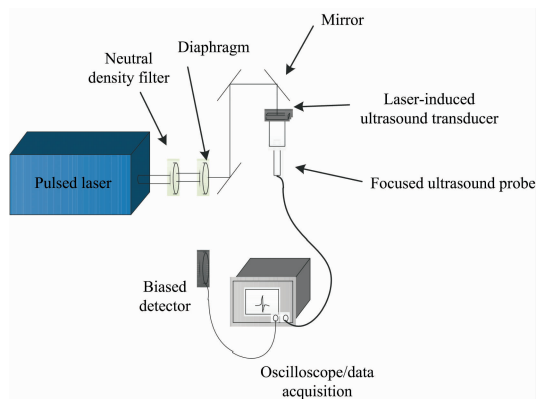


图 8 不同衬底实验装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of different substrate experimental devices

2.3.1 硬玻璃衬底声学特性分析

通过如图 8 所示的装置示意图,激光选择经过硬玻璃衬底 LIU-T,由能量为 $55\ \text{mJ} \cdot \text{pulse}^{-1}$ 激光通过位于水浸式压电换能器焦点处的 LIU-T 后,输出的光声信号如图 10(a)所示,可以看出从触发信号到第一次接收到信号时间为 $21\ \mu\text{s}$,超声波在仿体里的传播速度为 $1\ 500\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,所以计算

的距离为 $31.5\ \text{mm}$,与实际距离相吻合。图 10(b)是图 10(a)的放大信号,接收到的信号经换算得到正负向声压分别为 3.9 和 $-2.3\ \text{MPa}$ 。经过数据处理得到的 $-6\ \text{dB}$ 带宽分析如图 10(c)所示,超声的频率范围为 $2.5 \sim 7.9\ \text{MHz}$ 。

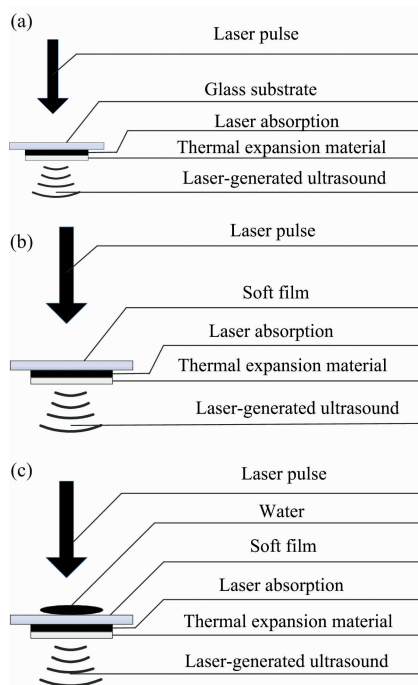
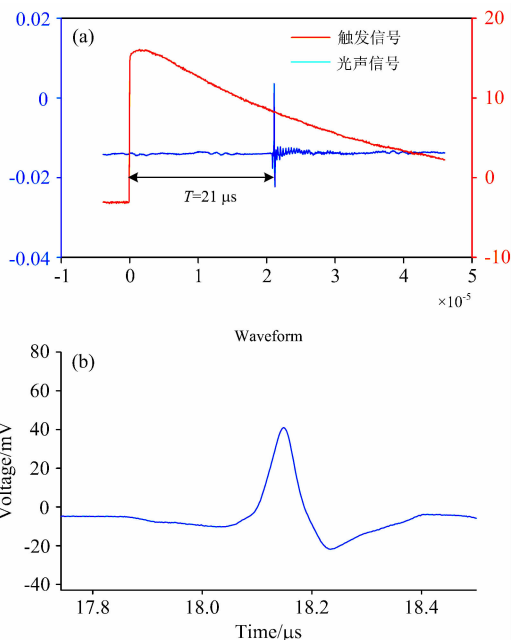


图 9 不同底材用于不同边界条件的试样

Fig. 9 Samples of different substrates for different boundary conditions

2.3.2 软薄膜衬底光声信号特性分析

同样通过如图 8 所示的装置示意图,由能量为 $55\ \text{mJ} \cdot \text{pulse}^{-1}$ 激光通过位于水浸式压电换能器焦点处的换能器后,



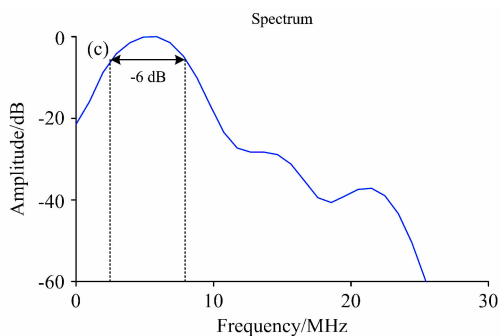


图 10 硬玻璃衬底作用下(a)触发和接收信号, (b)放大的光声信号, (c) -6 dB 带宽频谱图

Fig. 10 (a) Trigger and received signals; (b) Enlarged signal; (c) -6 db bandwidth spectrum for hard glass substrate

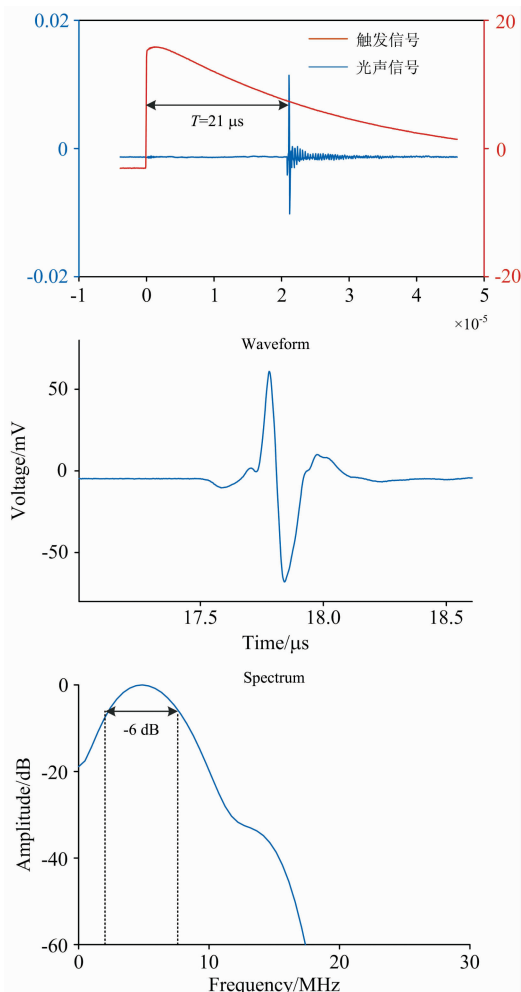


图 11 软薄膜衬底衬底作用下(a)触发和接收信号, (b)放大的光声信号, (c) -6 dB 带宽频谱图

Fig. 11 (a) Trigger and received signals; (b) Enlarged signal; (c) -6 db bandwidth spectrum for soft film substrate

输出的光声信号如图 11(a)所示, 同样的计算方法, 实际距离与实验测得的距离相吻合。图 11(b)是图 11(a)的放大信

号, 接收到的信号经过换算得到正负向声压分别为 5.2 和 -5.3 MPa。经数据处理得到的一 6 dB 带宽分析如图 11(c)所示, 超声的频率范围为 2~7.8 MHz 频宽比硬玻璃衬底宽, 有很好的负脉冲, 在光声治疗方面有很大的潜力。

2.3.3 水介质下的软薄膜光声信号特性分析

同样通过如图 8 所示的装置示意图, 由能量为 $55 \text{ mJ} \cdot \text{pulse}^{-1}$ 激光通过位于水浸式压电换能器焦点处的换能器后, 输出的光声信号如图 12(a)所示, 同样的计算方法, 实际距离与实验测得的距离相吻合。图 12(b)是图 12(a)的放大信号, 接收到的信号经过换算得到正负向声压分别为 2.0 和 -2.1 MPa。经数据处理得到的一 6 dB 带宽分析如图 12(c)所示, 超声的频率范围为 2.8~6.8 MHz 频宽比硬玻璃衬底和软薄膜介质都窄。

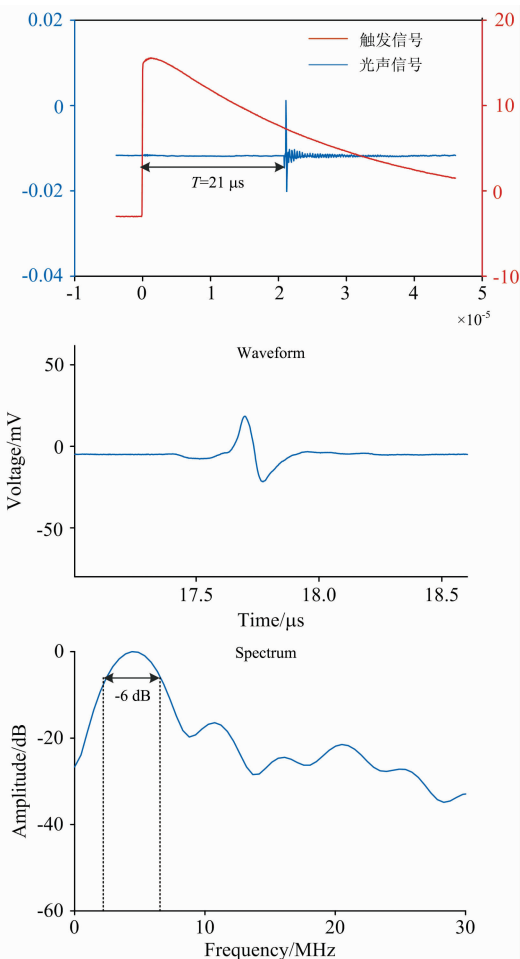


图 12 水介质下的软薄膜作用下(a)触发和接收信号, (b)放大的光声信号和(c) -6 dB 带宽频谱图

Fig. 12 (a) Trigger and received signals; (b) Enlarged signal; (c) -6 db bandwidth spectrum for soft film substrate under the water

当在水介质条件下, 滴入水滴的厚度为 3 mm 时, 两次光声信号差为 3.4 微秒即单次在水里传播的时间为 $1.7 \mu\text{s}$, 如图 13 所示, 计算出距离为 2.55 mm, 与实验距离相吻合良好。

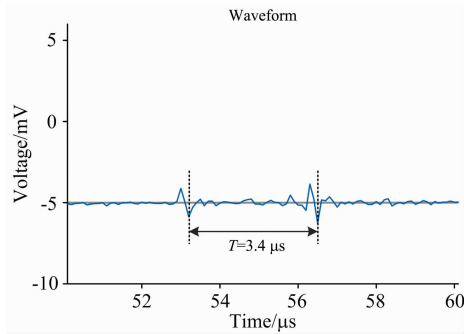


图 13 水厚 3 mm 产生的光声信号

Fig. 13 Photoacoustic signals generated by water (thicknesses of 3 mm)

CNT-PDMS 复合材料优异的光声性能在很大程度上归功于其纳米结构的特殊性。特别是纳米尺度的碳颗粒和树枝状的结构对于热扩散和光吸收具有良好的性能。同时 PDMS 具有比水更低的声阻抗, 导致界面声波反射约 20%^[15]。将激光脉冲的傅里叶变换与声压的频率响应相乘, 再进行傅里叶反变换, 得到时域的压力输出。将测量到的时域电压输出进行傅里叶变换得到声压信号。虽然目前的硬玻璃衬底设置很容易获得高的正声压, 但柔性膜衬底获得的大的负压在各种应用中更有利, 包括高强度聚焦超声治疗和以气泡空化为主要机制的药物递送^[15]。为了从 LIU-T 获得较大的负声压, 制备了具有最佳吸光系数值的复合材料。在今后的工作中, 我们将研究一种通过改变复合材料中 CNT 的

浓度比来调节复合材料的光吸收系数的方法。

研究发现 LIU-TF 相对于玻璃硬衬底可以产生很好的负脉冲。用在光声空化方面有很好的潜在用途。下一步会针对光声空化治疗方面做研究。声波的热弹性可以通过热传导方程和声压方程得到, 激光诱导的超声压强为^[14]

$$P(r, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{3B^2 \alpha L}{\rho c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial I}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中: B 为复合膜的体积模量; αL 为复合膜的线性热膨胀系数; ρ 为复合膜的密度; c 为介质中的声速; r 为被测点到 LIU-T 表面的距离; t 为时间; I 为照射到复合膜上的总激光能量(高斯波形是最常见的情况)。由式(1)可知, 激光诱导的超声压强与入射脉冲激光的导数成比例。基于 CNT-PDMS 复合材料的 LIU-TF 由于其高效的光吸收和传热性能而表现出优异的性能。

3 结 论

PDMS 是一种可用于产生光致超声的材料, 但仍有许多有待优化的研究。目前基于 CNT-PDMS 分层旋涂的方法, 产生的超声声压和带宽等于或优于传统的超声换能器。这种方法有如下优点: 制作方法简单、成本低、减少纳米材料和涂层厚度的浪费, 激光损伤阈值很大, 拥有较好的鲁棒性等。本工作使用 CNT-PDMS 复合材料获得了 LIU-TF。实验发现 LIU-TF 不仅具有良好的光声转换性能, 可产生高强度超声, 而且可以产生高强负脉冲, 为将来新一代光学超声换能器在生物医学方面的应用奠定基础。

References

- [1] Zhou Y, Ma Q Y, Guo G P, et al. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2017, 65(5): 1086.
- [2] le Jeune L, Robert S, Lopez Villaverde E, et al. Ultrasonics, 2016, 64: 128.
- [3] Richard J Colchester, Charles A. Mosse Applied Physics Letters, 2014, 104: 173502.
- [4] Buma T, Spisar M, O'Donnell M. Appl. Phys. Lett., 2001, 79: 548.
- [5] Colchester R J, Mosse C A, Bhachu D S, et al. Appl. Phys. Lett., 2014, 104: 173502.
- [6] Hsieh B Y, Kim J, Zhu J, et al. Appl. Phys. Lett., 2015, 106: 021902.
- [7] Chang W Y, Huang W B, Kim J, et al. Appl. Phys. Lett., 2015, 107: 161903.
- [8] Lee S H, Park M A, Yoh J J, et al. Appl. Phys. Lett., 2012, 101: 241909.
- [9] Yang H, Kim J S, Ashkenazi S, et al. Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 093901.
- [10] Baac H W, Lee T, Ok J G, et al. Appl. Phys. Lett., 2013, 103: 234103.
- [11] Lee Taehwa, Baac Hyoung Won, Li Q C, et al. Optical Mater, 2018, 6: 1800491.
- [12] Chen Zeyu, Wu Yue. Nano Energy, 2018, 46: 314.
- [13] Huang W B, Chang W Y, Kim J, et al. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2016, 15(3): 395.
- [14] Hindley J, Gedroyc W M, Regan L, et al. American Journal of Roentgenology, 2004, 183: 1713.
- [15] Hou Y, Ashkenazi S, Huang S W, et al. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(3): 682.

Photoacoustic Properties of Carbon Nanotubes-Polydimethylsiloxane

WU Ran-ran^{1,2}, XIA Hui^{2*}, ZHANG Jing-jing¹, XUN Li-na^{1*}, SUN Zhi-shen³, LI Yuan-yuan²

1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. College of Information and Communication Engineering, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Carbon nanotubes-polydimethylsiloxane (CNT-PDMS) is a new type of laser ultrasonic transducer (LIU-T) composite material with high frequency, wide width and high amplitude. The composite film can be used as an efficient and robust ultrasonic emitter for diagnosis and treatment. The intrinsic structure of nanocomposites provides unique thermal, optical and mechanical properties, which are not only conducive to energy conversion but also robust to pulsed laser ablation. PDMS polymers have high thermoelastic coefficients that allow materials to stretch and produce ultrasound. In this paper, the characteristics of photoacoustic signals produced by several kinds of composite films are studied, the photoacoustic signal characteristics under the different substrate and water boundary conditions were tested. Photoacoustic transducers made of carbon nanomaterials with high light absorption and PDMS polymers with high expansibility not only reduce the thickness of materials but also are expected to generate high frequency and high intensity ultrasonic signals. The thickness of the hard glass substrate realized in this paper is about 1mm, the thickness of the soft film substrate is at the micron level, and the thickness of water boundary conditions are 3 mm. Under pulsed laser excitation, the ultrasonic pressure at the end surfaces of water boundary conditions and hard glass substrates and soft film substrates was 2.0, 3.9 and 5.2 MPa, respectively. Through a series of studies, it is concluded that: (1) soft film substrate (3×3) has better negative pulse than hard glass substrate (3×3), which is more suitable for photoacoustic cavitation treatment; (2) water boundary conditions are not conducive to the generation of high-intensity photoacoustic signals. In a word, compared with piezoelectric transducers, laser-induced ultrasonic transducers have more potential to produce high-amplitude ultrasonic signals with a wide width and provide a new method of ultrasonic excitation without interference structures such as electronics, which is expected to be a new generation of laser ultrasonic transducers to replace piezoelectric transducers. The application of this new method in magneto-acoustic imaging can greatly reduce the interference of ultrasonic excitation sources. At the same time, compared with mixing CNT into PDMS, the method adopted in this experiment is more simple, convenient and material saving. For traditional hard glass substrate, the implementation of soft film substrate can produce high sound pressure 5.2 MPa, and center frequency in 5 MHz, and -6 dB ultrasound is relatively close to 5 MHz wide bandwidth, compared with the 4.5 MPa pressure produced by the early implementation of CNT-PDMS Photoacoustic transducer in 2014, this paper implementation has more clinical application prospect, applied in Magneto-acoustic electric imaging etc. to avoid electromagnetic interference has the very good effect.

Keywords Carbon nanotubes; Polydimethylsiloxane; Photoacoustic effects; Laser ultrasonic transducers

(Received Jun. 21, 2019; accepted Oct. 28, 2019)

* Corresponding authors