用于引力波探测器的衬底转移GaAs/AlGaAs晶体镀膜：技术现状综述

G. D. Cole,[1, a)] S. Ballmer, [2] G. Billingsley, [3] S. B. Cataño-Lopez, [1] M. Fejer, [4]P.

[1]Thorlabs Crystalline Solutions，美国加利福尼亚州圣巴巴拉，93101，美国[2]雪城大学物理系，美国纽约州锡拉丘兹，13244，美国[3]加州理工学院LIGO实验室，美国加利福尼亚州帕萨迪纳，91125，美国[4]斯坦福大学，美国加利福尼亚州帕洛阿尔托，94309，美国。[5]麻省理工学院LIGO实验室，美国马萨诸塞州剑桥，02142，美国。[6]恩布里-里德尔航空大学物理系，美国亚利桑那州普雷斯科特，86301，美国[7]美国大学物理系，美国华盛顿特区，20016，美国[8]JILA、美国国家标准与技术研究院、科罗拉多大学博尔德分校，美国科罗拉多州博尔德，80309，美国[9]德国联邦物理技术研究院，德国布伦瑞克，38116[10]霍巴特与威廉·史密斯学院物理系，美国纽约州日内瓦，14456，美国[11]马斯特里赫特大学，6200 MD 马斯特里赫特，荷兰[12]Nikhef，1098 XG 阿姆斯特丹，荷兰

在这篇观点文章中，我们概述了用于干涉式引力波（GW）探测器的大面积、低噪声、基底转移式砷化镓/砷化铝镓（AlGaAs）

†本观点文章总结了于202年8月15日至17日在美国华盛顿特区美国大学举行的AlGaAs研讨会

a) 作者的通信地址。电子邮件：gcole@thorlabs.com。

2.

高反射率光学干涉镀膜中的热噪声，是精密干涉系统的一种限制性噪声源。Callen 和 Greene 关于热噪声的开创性理论研究[1] 由 Saulson[2,3], 以及 Braginsky 及其合作者[4]介绍给引力波研究界。1998年，Yuri Levin[5] 指出，涂层热噪声（CTN）可能是引力波探测器的一种限制性噪声源。Harry 等人[6] 测量了初代LIGO镀层的弹性损耗，并证实涂层热噪声会限制先进激光干涉引力波天文台的灵敏度[7]。锡拉丘兹、格拉斯哥、斯坦福大学和LIGO实验室组成的合作组确定，损耗源是高折射率材料[8] ，并设计了先进激光干涉引力波天文台所用的镀层[9] ，使其首次直接探测到时空中的这些涟漪[10]。

过去20年来，研究人员持续致力于通过寻找光学损耗和弹性损耗均较低的镀膜材料来降低涂层热噪声。相关工作的第一个十年总结见参考文献11。在先进LIGO干涉仪中，涂层布朗噪声限制了最敏感频段（约100赫兹）内可达

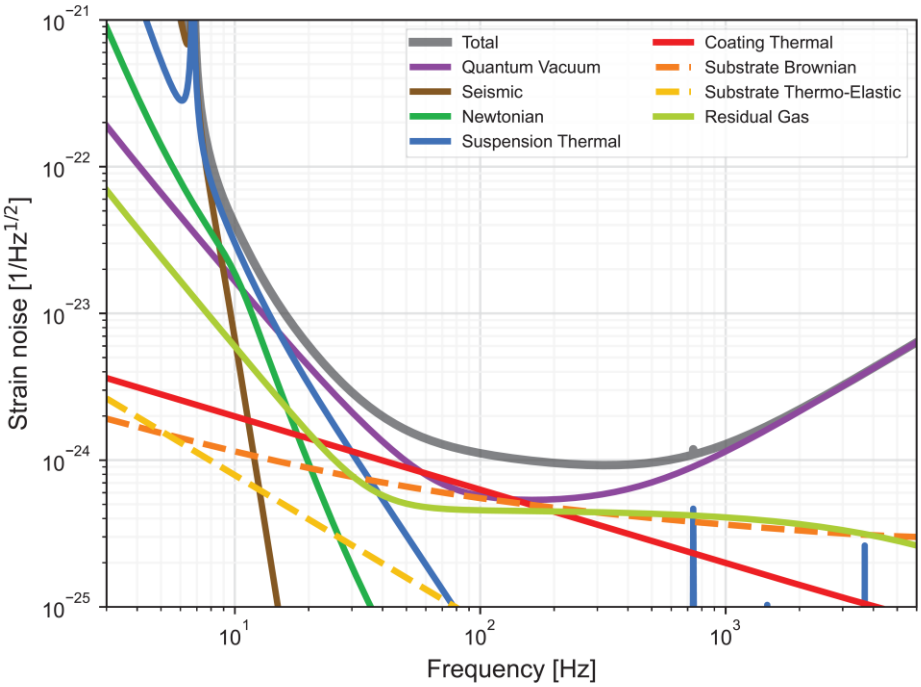


图1. 对于一种可能的 LIGO 干涉仪升级方案，采用 AlGaAs晶体涂层并在室温下运行时，受基本噪声源限制的目标应变灵敏度。涂层热噪声曲线（红色）采用 6.2×10^{-6} 的机械损耗角计算，依据麻省理工学院*[1], 的直接热噪声测量结果；末端测试质量块和输入测试质量块上的光束曲率半径分别为 5.5 厘米和 4.5 厘米；这些光束尺寸适用于直径为 30 厘米的 AlGaAs 镀层。测试质量为 100 千克的熔融石英（基底噪声），由熔融石英纤维悬挂（悬挂热噪声）。量子真空噪声源于每个臂腔中的 1.5 兆瓦激光功率（波长为 1.06 微米），并结合所有频率下 10 分贝的有效真空压缩；这是通过窄线宽滤波腔实现的，该滤波腔会根据频率适当旋转压缩角。真空系统中的残余气体所致噪声，在低于 50 赫兹的频率下源于悬挂测试质量的阻尼，在高于 50 赫兹的频率下则源于激光束在 4 千米臂腔中的散射。牛顿噪声由测试质量附近地面的密度扰动引起，并会产生波动的引力。相比之下，地震噪声是通过地震隔离系统和测试质量块悬挂系统耦合进来的地面振动。

在这篇观点文章中，我们将详细介绍基于AlGaAs的晶体镀膜作为解决涂层布朗噪声问题的方案的现状。我们首先简要回顾~2007-2012年腔光力学实验中晶体多层膜的发展历程。随后，我们将讨论这项技术如何随着用于超稳定

*[1] 私人通信，S. Gras 和 N. Demos，麻省理工学院。

我们介绍直径最大达 10 cm 的晶体镜初步成果，并讨论将其扩展至 20 cm 及更大尺寸的相关问题，同时从吸收、散射、双折射和表面均匀性等方面介绍这些单晶薄膜的光学特性。鉴于 AlGaAs 涂层在可见光范围内不透明，必须

基于AlGaAs的单晶多层膜最初被用于开发高性能微机械谐振器，以开展腔光力学实验。这种化合物半导体材料平台过去主要用于微波器件和基于微腔的光电子器件。直到2008年，人们才测量了砷化镓的本征弹性损耗，并发现

这些悬置微镜的低噪声潜力推动了基于衬底转移AlGaAs多层膜的厘米级反射镜的开发 [26]。这些新型镀层的生产考量已在其他文献中作了详细介绍 [27]。由于外延（晶体）生长受到晶格匹配限制，无法直接沉积，因此必须分

对缺陷的贡献最大。自2012年以来，直径通常为5–20 mm的晶体涂层已转移至平面和曲面块状熔融石英基底上。此外，还成功采用了其他基底材料，包括用于低温参考腔的硅和Al_2O_3（蓝宝石），以及用于高功率激光系统的碳化

在时间与频率计量领域，采用晶体涂层的高精细度参考腔日益普及，AlGaAs 多层结构的噪声已得到深入研究，并与理论结果进行了比较。采用这些涂层的室温腔稳频激光器已被证明能够在接近热噪声底的水平下运行[31,32]

两项独立研究使用带有晶体涂层的硅腔（长度为 1.5 μm），开创了低温下的晶体涂层表征。在这两套系统中，技术噪声以及间隔件和基底热噪声的预期贡献都远低于预期的涂层热噪声（一套腔长 21 cm，工作温度为 124 K

如果同时激发两种模式，就可以对反相关频率涨落取平均并加以抑制[35,36]，，如图2所示。抵消后的残余噪声不再随腔内光强变化，但仍高于预期的热噪声水平。TEM_{10} 和 TEM_{00} 光束之间存在相干的噪声源，这表明其空间相关长

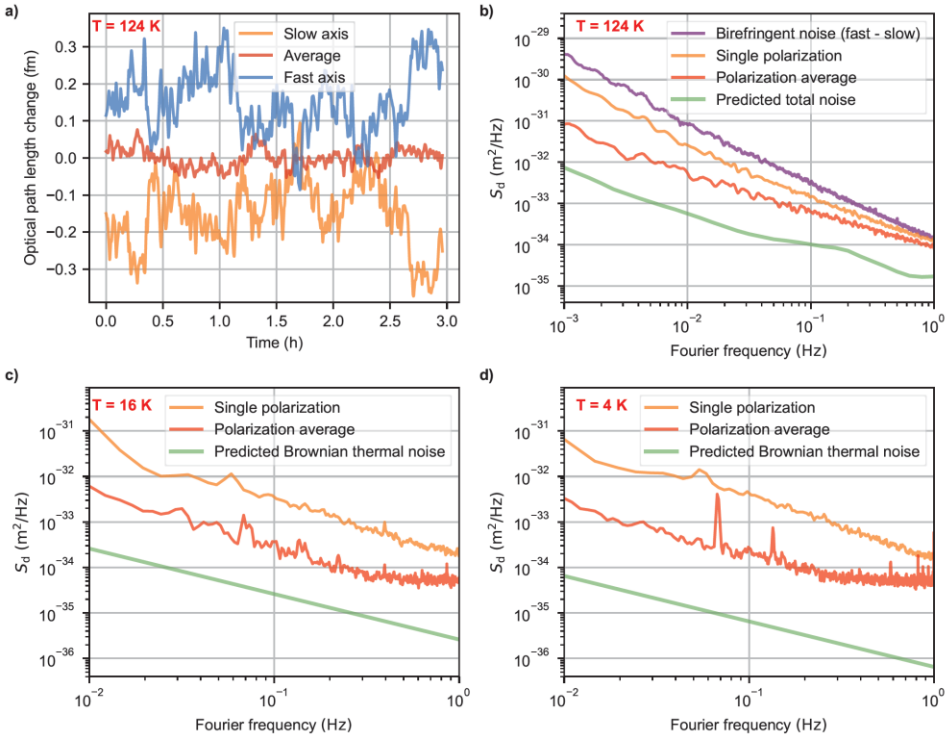


图2. 在采用 AlGaAs 涂层的超稳低温硅参考腔中观测到的潜在非布朗涂层热噪声。(a) 测量21厘米长硅腔的光程长度涨落，分别对应TEM_{00} 共振的两个偏振本征模（蓝色、橙色）。(b) 腔长涨落的功率谱密度 S_d。该图中包括双折射噪声（紫色）、单个偏振本征模的噪声（橙色），以及两个偏振的平均值（红色）。此外，还绘出了TEM_{00} 模的技术噪声与实测布朗热噪声极限之和（绿色），以供比较。(c) 和 (d) 分别为16开尔文 (c) 和4开尔文 (d) 下，6厘米长硅腔的长度涨落功率谱密度。图中显示了单个偏振本征模的频率稳定性（橙色）、两个偏振本征模的平均值（红色）以及预测的布朗热噪声（绿色）。如正文所述，虽然可以利用平均偏振抑制双折射涨落，但这些系统中的剩余噪声仍高于预期的涂层热噪声水平。图片转载自参考文献35。

需要指出的是，晶体涂层中观测到的双折射是一种“外在”效应，因为〈100〉取向的砷化镓在光学上具有对称性。目前的推测是，从生长温度冷却时，应变弛豫不均匀会导致对称性破缺[37]。涂层在较高温度下生长（~600 °C）

除了研究双折射的静态和动态（波动）分量外，还需要考察潜在的热致效应。由于 AlGaAs 涂层具有各向异性，径向热梯度会在晶体中引起剪切应变。假设反射镜是平坦的半无限圆盘，且镀层表面平行于 [001] 晶面，如果选择

目前正在解决大面积反射镜生产所面临的挑战，以将晶体镜的应用从先进参考腔扩展到引力波探测。对直径为 2 英寸和 3 英寸（50.8–76.2 mm）的测试镜进行的研究得到以下结果：i）平均吸收 < 1 ppm；ii）平均总积分散射

干涉仪产生不同的影响。同样，对较大点缺陷进行双向反射分布函数分析，将有助于估算稀少但较大的散射体与频繁但较小的散射体对干涉仪散射噪声的影响。

加州理工学院近期公布了首面直径为 10 cm 的 AlGaAs 镜的表面图和散射数据（该镜转移至一块厚 10 mm 的平面合成熔融石英基底上）。详情见图3的面板 a。分别在镀层前对裸基底以及在镀层完成后对最终镀膜镜进行了表

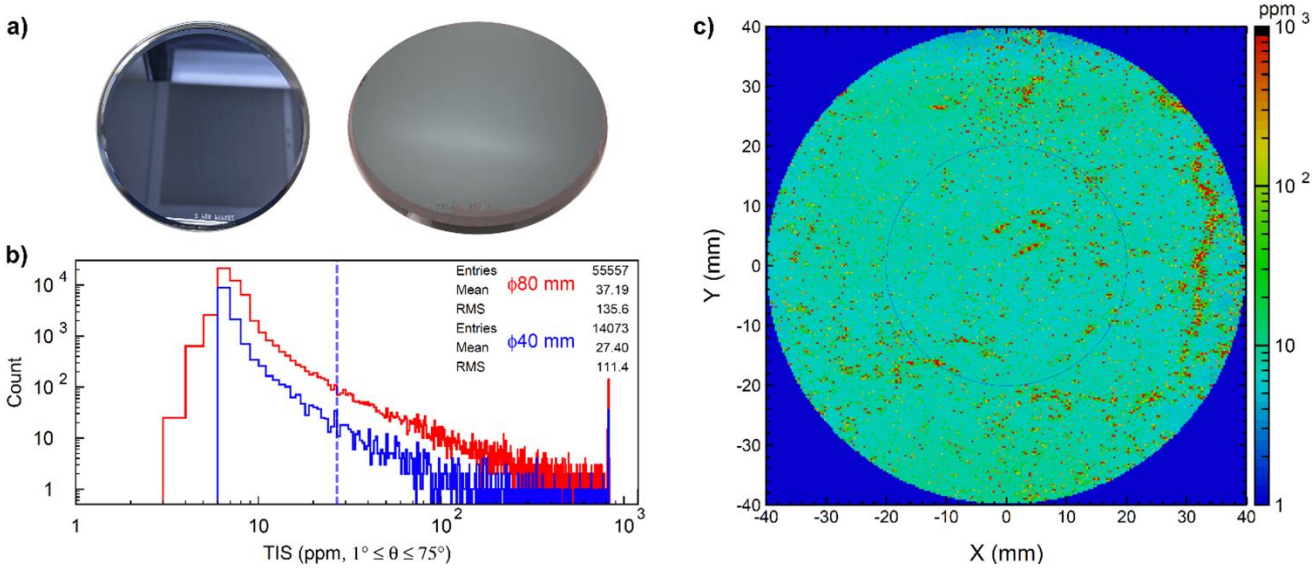


图 3. 首个直径 10 cm、采用基底转移砷化铝镓镀层的测试镜的光学表征。a）测试镜镜面背侧的照片（左），透过厚度为 10 mm 的熔融石英基底观察键合界面；以及在去除基底和刻蚀停止层后，测试镜镜面正面的照片（右），此时熔融石英基底上仅保留砷化镓/砷化铝镓多层膜。b）直径为 40 mm（蓝色）和 80 mm（红色）孔径的总积分散射直方图。竖直虚线表示直径 40 mm 孔径的平均总积分散射值。图例给出了两个直方图的均值和标准差。c）通过在镜面表面上进行栅格扫描的积分球获得的散射图。细蓝色圆圈表示图 b）中所指的直径 40 mm 内部孔径。

鉴于市面上缺乏可供选择的产品，要将 AlGaAs 镀层直径扩大到 20 cm 以上，就需要生长定制的 GaAs 晶锭以进行晶圆化。若沿用传统晶圆几何尺寸，直径 30 cm 显然是下一步的理想选择。在多层外延方面，量产型分子束外

如果能够制备出尺寸足够大且性能指标符合要求的反射镜，接下来就有必要探索其对整体系统运行的影响。例如，鉴于高折射率 GaAs 层的带隙较窄，传统的使用倍频至 532 nm 光的腔臂锁定已不可行[43]；因此，必须开发

若将 AlGaAs 镀层用于升级现有的 4 km 先进LIGO干涉仪中的输入和末端测试质量块（输入测试质量块和末端测试质量块），为使镀层热噪声优于现行要求，涂层直径至少需要达到 21–22 cm。因此，若不进行大幅改造，就

与尖端超稳激光器研究一样，爱因斯坦望远镜（ET）等第三代引力波探测器也计划引入低温技术。为兼容现有生长衬底，ET 低频干涉仪可能会采用类似的混合镜面设计，包括使用光束直径为 13 cm、配有直径为 70 cm 的

未来引力波探测器中与 AlGaAs 相关的未解问题，可能超出桌面实验所能回答的范围。这些问题包括：(a) 对涂层噪声进行准确的窄频带（频密）测量；(b) 成功制造大于“实验室规模”的反射镜，涵盖基底采购、抛光和键合，并

i) 位于德国汉诺威 AEI 的 10 m 原型装置 [45], 在 1064 nm 波长和室温下运行。其一项关键目标是研究并克服标准量子极限 [25]，并已提出使用低噪声 AlGaAs 镀层反射镜，镜面直径为 4.8 cm。ii) 位于西澳大利亚的金金

这些平台将有助于验证 AlGaAs 涂层在这些独特天文仪器中的可行性。

我们概述了基于AlGaAs的晶体镀膜早期研发的历史背景、当前进展以及未来可能的发展方向。这类独特的镀膜具有良好的光机械性质，有望提升引力波探测的灵敏度，因此值得进一步研究。最后，我们说明，实现上述大直径

致谢

本研究获得美国国家科学基金会通过以下项目资助：美国大学（PHYS-2012017、PHYS-2011787）、加州理工学院（PHY-1764464）、霍巴特与威廉·史密斯学院（PHY-1912699、PHY-2011688、PHY-2208079）、麻省理工学院（PHY-1764464）、恩布里-里德尔航空大学（PHY- 2110598）、雪城大学（PHY-2011723、PHY- 2207640）。J. Steinlechner 感谢 ETpathfinder（弗兰德斯-荷兰 Interreg 计划）、E-TEST（默兹-莱茵欧洲区域 Interreg 计划）和林堡省的支持，并感谢荷兰科学研究组织人才计划 Vidi 2020 的资助，项目编号 VI.Vidi.203.062。D. Kedar 和 J. Ye 感谢美国国家科学基金会 PHY-1734006、美国国家标准与技术研究院和美国空军研究实验室的支持。T. Legero、U. Sterr 和 J. Yu 感谢 20FUN08 NEXTLASERS 项目的支持。该项目获得了由参与国共同资助的 EMPIR 计划以及欧盟地平线 2020 研究与创新计划的资金支持。本研究的部分工作在加州大学圣巴巴拉分校纳米加工设施（一家开放式实验室）完成。

数据可用性

支持本研究结论的数据可应合理请求向通讯作者获取。

参考文献

[1] H. B. Callen 和 R. F. Greene, 《不可逆热力学的一个定理》, Phys. Rev. 86, 702（1952）。[2] P. R. Saulson, 《机

E. Oelker、R. B. Hutson、C. J. Kennedy、L. Sonderhouse、T. Bothwell、A. Goban、D. Kedar、C. Sanner、J. M. Robinson、G. E. Marti、D. G. Matei、T. Legero、M. Giunta、R. Holzwarth、F. Riehle、U. Sterr 和 J. Ye, 《展示两台独立光学钟在1秒时的4.8×10^{-17} 稳定性》, Nat. Photonics 13, 714（2019）。[15] K. Numata、A. Kemery 和 J. Camp, 《刚性腔中激光频率稳定的热噪声极限》, Phys. Rev. Lett. 95, 173602（2004）。[16] L.-S. Ma、A. D. L

高反射率、高Q值微机械振荡器的单晶$Al_xGa_{1-x}As$异质结构》, Appl. Phys. Lett. 92, 261108（2008）。[19] G. D. Cole、

N. Aggarwal、K. Lalitha、A. Libson、R. Singh、T. Heu、D. Follman、G. D. Cole、N. Mavalvala 和 T. Corbitt, 《在室温音频频段测量量子反作用》, Nature 568, 364（2019）。[25] T. Cullen、R. Pagano、J. Cripe、S. Sharifi、M. Lollie、S. Aronson、H. Cain、P. Heu、D. Follman、N. Aggarwal、G. D. Cole 和 T. Corbitt, 《利用光学弹簧超越标准量子极限》, 预印本 arXiv:2210.12222。[26] G. D. Cole、W. Zhang、M. J. Martin、J. Ye 和 M. Aspelmeyer, 《高反射率光学涂层中布朗噪声的十倍降低》, Nature Photonics 7 644（2013）。

[27] G. D. Cole, W. Zhang, B. J. Bjork, D. Follman, P. Heu, C. Deutsch, L. Sonderhouse, J. Robinson, C. Franz, A. Alexandrovski, M. Notcutt, O. H. Heckl, J. Ye 和 M. Aspelmeyer, 《高性能近红外和中红外晶体涂层》, Optica 3, 647 (2016)。[28] G. Winkler, L. W. Perner, G.-W. Truong, G. Zhao, D. Bachmann, A. S. Mayer, J. Fellinger, D. Follman, P. Heu, C. Deutsch, D. M. Bailey, H. Peelaers, S. Puchegger, A. J. Fleisher, G. D. Cole 和 O. H. Heckl, 《超额光学损耗低于 10 ppm 的中红外干涉涂层》, Optica 8, 686 (2021)。[29] G.-W. Truong, L. W. Perner, G. Winkler, S.

》,

《高反射晶体镜面涂层中的超额噪声》, 预印本 arXiv: 2210.15671。[36] D. Kedar, J. Yu, E. Oelker, A. Staron, W. R. Milner, J. M. Robinson, T. Legero, F. Riehle, U. Sterr 和 J. Ye, 《采用半导体晶体涂层的低温硅腔频率稳定性》, 预印本 arXiv: 2210 14881 。M. Bückle,

(2012)。[46] C. Zhao 等, 《金金高光功率测试设施》, J. Phys.: Conf. Ser. 32, 368 (2006)。[47] A Utina 等, 《ETpathfinder：用于干涉式引力波探测器的低温测试平台》, Class. Quantum Grav. 39, 215008 (2022)。[48] K. D. Skeldon, D. A. Clubley, B. W. Barr, M. M. Casey, J. Hough, S. D. Killbourn, P.W. McNamara, G. P. Newton, M. V. Plissi, D. I. Robertson, N. A. Robertson, K. A. Strain 和 H. Ward, 《在 λ=1064 nm 下运行的格拉斯哥 10 米引力波探测器原型的性能》, Phys. Lett. A 273, 277 (2000)。[49] F. Matichard 等, 《先进激光干涉引力波天文台两级十二轴振动隔离与定位平台。第 1 部分：设计与制造概述》, Precis. Eng. 40, 273 (2015)。[50] E. Oelker, G. Mansell, M. Tse, J. Miller, F. Matichard, L. Barsotti, P. Fritschel, D. McClelland, M. Evans 和 N. Mavalvala, 《用于引力波探测器的超低相位噪声压缩真空源》, Optica 3, 682 (2016)。[51] S. Hild 等（爱因斯坦望远镜合作组）, 《第三代引力波观测站的灵敏度研究》, Classical Quant. Grav. 28, 094013 (2011)