制备与表征用于亚多普勒光谱学和激光稳频的碘光子微池

CLÉMENT GOÏCOECHÉA,[1,2] THOMAS BILLOTTE,[2] MATTHIEU CHAFER,[1,2] MARTIN MAUREL,[1,2] JENNY JOUIN,[3] PHILIPPE THOMAS,[3] DEVANG NAIK,[2] FRÉDÉRIC GÉRÔME,[1,2] BENOÎT DEBORD,[1,2] 和 FETAH BENABID[1,2,*]

[1]GLOphotonics SAS，法国利摩日 Albert Thomas 大道 123 号，邮编 87060[2]GPPMM研究组，Xlim研究所，法国国家科学研究中心 UMR 7252，利摩日大学，法国利摩日[3]IRCER UMR CNRS 7315，欧洲陶瓷中心，法国利摩日 Atlantis 街 12 号，邮编 87068*f.benabid@xlim.fr*

摘要：我们报告了全光纤独立式碘填充光子微池的开发成果，该微池在室温下实现了创纪录的吸收对比度。微池所用光纤由抑制耦合导引空芯光子晶体光纤制成。我们在10^{-1}-10^{-2}mbar 蒸气压下，采用一种新型气体歧管为光纤芯充填碘；该歧管以金属真空部件为基础，内表面覆有陶瓷涂层，以提高耐腐蚀性。随后，我们将光纤封住两端，并安装到 FC/APC连接器上，以便更好地与标准光纤器件集成。独立式微型气室在633纳米波长范围内呈现的多普勒谱线对比度最高达 73%，插入损耗为 3 至 4 dB。借助锁相放大，我们在室温下通过基于可饱和吸收的亚多普勒光谱学，分辨出 P(33)6-3 谱线的超精细结构；b4分量的半高全宽为 24 MHz。此外，我们还展示了在室温下无需采用任何信噪比增强技术，即可分辨 R(39)6-3谱线的超精细分量。

1. 引言

过去20年间，随着新型技术设备的出现，人们一直致力于实现频率标准的小型化，例如基于微机电系统 (MEMS) 的时钟 [1], 、安装在硅芯片上的平面器件，采用空芯反谐振反射光波导 (ARROW) [2], 或紧凑型工程化圆形多通池 [3]。 在这些设备中，空芯光子晶体光纤 (HCPCF) 技术显示出巨大潜力，可作为笨重气室的出色替代方案，适用于便携式、小占地面积的应用：将原子或分子蒸气填充并密封在其纤芯内 [4], ，最终形成光子微池 (PMC)——一种原子光子学组件，可集成到任何光学装置中，并利用现有光纤连接器实现低插入损耗连接 [5]。通过将原子/分子与光限制在仅数 μm^2，的模场面积内，同时使其在远超瑞利长度数百万倍的距离上保持相互作用，增强的原子-激光相互作用效率即使在气体密度和光强较低的情况下也能产生强吸收，因此与其他技术相比，信噪比得以提高。HCPCF 独特的光学特性使其具有多种纤芯尺寸和长度，并兼具低损耗、低功耗等优点；其微结构包层还能提供多样的模式组成，从而实现横向光场整形 [6]。

空芯光子晶体光纤的导光性能在宽广的光谱范围内持续提升，其损耗水平已可与电信波段的标准实芯光纤相媲美，C波段的损耗低至 0.174 dB/km [7]。在可见光范围内也可实现较低损耗，在 558 nm 时低至 0.9 dB/km [8]。

自光子器件——光子微腔问世以来，关于其封装气体种类和密封技术的研究层出不穷。光子微腔制造技术的发展，主要取决于用作气体容器的光纤类型以及气体的性质。事实上，实芯单模光纤（SMF）的熔接技术适用于光子带隙（PBG）光纤[9,10]，其纤芯直径范围为 5–20 μm；但由于抑制耦合导光空芯光子晶体光纤（IC-HCPCF）的纤芯尺寸较大（通常为 20–100 μm），该技术已不再适用，并会造成严重的模式失配损耗。因此，人们引入了模场适配器，使抑制耦合导光光纤技术与 SMF 兼容：一种方法是像 Wheeler 等人 [11] 报道的那样对空芯光子晶体光纤进行拉锥，另一种方法则是采用渐变折射率光纤[12,13]。另有研究报道了一种方案：将玻璃池粘接在光子带隙空芯光子晶体光纤的端部，以便充入气体，并通过塌缩玻璃池的一段来封装气体[14]。上述各种技术都存在缺陷：使用胶黏剂或暴露于环境空气会导致气体污染，长期来看还会降低光子微腔的光谱性能。最近，Billotte 等人提出了一种新型光子微腔组装工艺，无需氦缓冲气体，也不需要粘接步骤[5]。通过塌缩玻璃套管，他们利用一段 7 米长、充入压力为 80 μbar 乙炔的抑制耦合空芯光子晶体光纤，制成了插入损耗为 1.5 dB 的微型气室。无多普勒光谱学结果显示，线宽和对比度在三个月以上的时间里保持稳定，凸显了密封气体介质的质量与纯度，也表明这种无污染技术对制造下一代光子分子腔具有重要意义。

上述关于光子微腔组装的工作主要出于频率标准的需求，而迄今为止，这类频率标准仅限于分子气体，例如乙炔（C_2H_2, 1550nm 区域） [4,5,11] 或二氧化碳（CO_2）[15–17]。密封光子微腔的实际最先进水平由 Triches 等人和 Billotte 等人所取得，他们的频率不稳定度均约为 2.10^{-11} @1000s [14,18]。两者使用的都是电信波长波段附近的乙炔。

将光子微腔技术扩展至原子或分子蒸气（如碱金属蒸气或卤素分子气体，例如碘（I_2））一直极具挑战性，这是因为它们具有反应性，且应用需要真空环境。因此，基于光子微腔的光学频率参考只能应用于有限的光谱范围。例如，在绿色和红色光谱范围内，已知碘（I_2 具有极为密集的多普勒谱线谱，可用于开发可见光宽带频率参考[19,20]。例如，若干碘（I_2）转动-振动吸收谱线已被国际计量局（BIPM）列为实现米定义的推荐频率参考[21]。此外，基于碘（I_2）的频率稳定[22–26] 已在多种技术应用中展现出价值 [27–30]。因此，碘填充光子微腔（I_2-PMC）的出现将极大有益于导星激光器[31], 、高分辨率激光雷达[32], 或激光频率稳定 [26], 等应用；这些应用要求在紧凑、可移动的物理封装中实现上述性能。然而，将碘蒸气封装进玻璃池面临特定挑战，这是由碘（I_2）的物理和化学性质所致。尤其是其较强的

反应性以及对金属的腐蚀性[33,34]，使其必须采用复杂的玻璃歧管充填系统。因此，开发碘（I_2-PMC）在蒸气处理、充填和HCPCF内密封方面都构成了技术挑战。事实上，常见的金属真空部件不适用于碘（I_2-PMC）的组装过程，而碘（I_2 微型气室制造中常用的玻璃歧管方案过于复杂且成本高昂，不适合大规模生产碘（I_2-PMC。在此背景下，我们注意到此前有关碘（I_2填充HCPCF的研究[24,35,36]。Lurie等人表明，在碘（I_2微型气室开发和饱和吸收光谱应用中，空芯光纤因泵浦光和探测光具有较强的重叠而表现出很高的效率[35],；对于安装在玻璃真空歧管上的HCPCF，实现了激光稳频，分数频率稳定度为2.3×10^{-12}，测量时间为1秒[24]。作者指出，真空系统中的残余气体以及碘（I_2 蒸气压力会阻碍实现渡越时间限制的亚多普勒线宽。这项在碘（I_2填充HCPCF框架下的开创性工作，随后于2015年迎来了首个采用气密密封碘（I_2 Kagome HCPCF的演示 [36]。尽管其在100秒时实现了分数频率稳定度为3.10^{-11} 的激光稳频，但这种密封HCPCF存在高达21.5 dB的插入损耗；由于其通过熔融塌缩一段光纤来实现气体密封，消除了塌缩段的光导特性，因此不能称为光子微腔。

本文报告了一种基于可扩展、耐腐蚀且无污染制造工艺[5]的碘$_2$-PMC开发成果。例如，我们制造了长度分别为2.5米和4米、类似跳线的基于管状IC-HCPCF[37] 的碘PMC，其整体传输效率最高可达40%。这些PMC在室温下表现出优异性能，在632.991纳米 [38]处的P(33)6-3跃迁上，吸收对比度分别达到60%和53%。此外，借助可饱和吸收，我们展示了在室温下对碘超精细光谱的观测分辨率：在633纳米附近超过10 GHz的光谱范围内，可观测到来自不同展宽谱线的若干亚多普勒光谱透明窗口。通过4年前制备的碘$_2$-PMC中P(33)6-3吸收对比度和多普勒线宽均未发生变化，证明了这些微型气室具有卓越的寿命。

2. 用于碘$_2$-PMC制造的实验装置

我们设计并制造了一种基于管状晶格包层的抑制耦合空芯光子晶体光纤，可在绿光至红光光谱范围内对数十万条碘超精细跃迁实现最佳导光（图1(a)），且在530纳米至668纳米范围内的损耗低于30 dB/km。该光纤（图1(a)）外径为200 μm，纤芯直径为30 μm，周围由8个独立管状包层环绕。该光纤具有出色的模式特性，可实现准单模导光；在一段4米长光纤的输出端测得的633纳米近场强度分布显示了这一点（见图1(a)）。

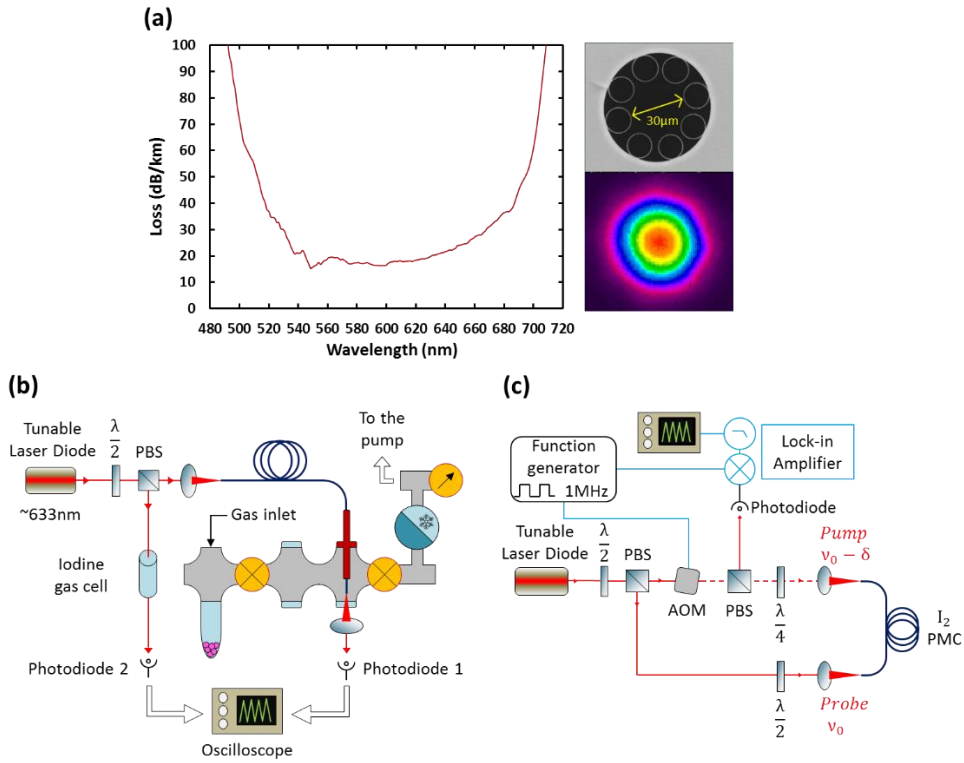

图 1. (a) 与所制备的光子微腔相关的实验用 IC 管状光纤的测量损耗谱（见图 2）。右侧：光纤横截面的显微图像，以及 633纳米处的近场强度分布。(b) I_2填充和光纤密封实验装置概览。真空系统以灰色表示，阀门和压力计以黄色圆圈表示。光纤以深蓝色表示。PBS：偏振分束器。锁相系统以蓝色表示。AOM：声光调制器。(c) 光子分子腔表征装置示意图。

PMC#1和PMC#2这两个光子微腔分别于2017年和2020年采用相似的光纤制造，制作时间相隔3年。制作时使用了自制的气体真空歧管，其示意图见图1(b)，并专为向空芯光子晶体光纤充填I_2 以及组装I_2-PMC而设计。

歧管由三个主要腔室组成，腔室之间由真空阀隔开。中间部分容纳空芯光子晶体光纤，并用作光纤装载段。光纤装载段右侧通过低温捕集器连接涡轮分子真空泵，以防止在 I_2 释放过程中污染真空泵。左侧则对应 I_2分配器。 此处将碘片放入玻璃试管中，并通过金属接头与歧管密封连接。该部分的压力和/或温度可调节，以实现 I_2 升华并将其释放到光纤装载段中。光纤充填按以下流程进行。首先，将光纤装载段抽空至低于 10^{-6} mbar 的真空压力。同样地，对碘分配器部分抽真空，同时通过调节碘片温度确保 I_2保持固态。上述步骤可确保歧管的气密性和较高的真空质量。完成此过程后，通过升高温度使 I_2 升华，直至压力达到约 10^{-1} mbar。其次，打开两个部分之间的阀门，并关闭通往真空泵部分的阀门，将 I_2 蒸气释放到光纤装载段中，并

关闭通往真空泵部分的阀门。在此充填过程中，我们持续监测光纤透射光谱。该光谱由一台可调谐外腔二极管激光器（TOPTICA DL-PRO，631–635 nm 波段）测得，激光器调谐至对应于其中一条碘转振线的频率范围。同一台激光器发出的第二束光被送入碘宏观气室，作为参考。充填 10 分钟后，即可观察到碘吸收线的光谱特征（在 P(33)6-3跃迁附近跨越一组三条谱线）。随后继续充填，直至达到所需的对比度。

值得注意的是，整个歧管的金属部件都经过后处理，在内侧金属表面施加陶瓷涂层，以防止腐蚀以及与碘发生化学反应。这样一来，即使历经数年，仍可轻松装载和组装多根空芯光子晶体光纤。

在安装和熔接空芯光子晶体光纤（如图 1(a) 所示）之前，先用氦气或氩气冲洗，并在 ~100°C 的烘箱中加热数小时，以减少光纤内的残余气体。随后，按照 [5] 中所述的工艺，在光纤一端封端：将一根内径与光纤外径相匹配的硼硅酸盐毛细管压塌。然后将密封并抛光的一端安装到 FC/APC光纤连接器上。在 633纳米处测得的耦合损耗为 1 至 1.5dB，比在 [36] 中通过将光纤自身压塌而获得的熔接损耗低 20dB。

HCPCF 的另一端通过硼硅酸盐套管熔接，与一段 30 cm 长的相同 HCPCF 相连。30 cm 长 HCPCF 的另一端通过自制光纤馈通件与歧管的充填舱室气密连接（[5]中的图 1(a)）。随后，通过抽空真空系统中由阀门控制的中间腔室，将带有端帽的光纤抽至 10^{-6} mbar。达到所需对比度（此处约为 60%）后，我们使用熔接机，通过在 HCPCF 尖端周围塌缩套管来封装光纤端部，从而实现气密密封，具体方法如 [5] 所述。然后将制成的 PMC 两端抛光，并安装到 FC/APC 光纤连接器上。图 2(a) 展示了典型的、两端装有 FC/APC 连接器的跳线式 PMC 成品照片。图 2(b) 展示了由制备的 I_2-PMC 透射光重建的近场强度分布。测得的透射率为 40–50%，对应的插入损耗低于 4 dB，比 [36] 中测得的数值低 17.5 dB。

图2(d)展示了在相同激光配置和室温条件下连续测得的 PMC#1 输出端（红色曲线）、PMC#2 输出端（橙色曲线）以及商用宏观气室（黑色曲线）的归一化透射光谱。图表的横轴和上方轴分别表示频率以及相对于 R(39)6-3 跃迁的相对频率。两个光子微腔在 P(33)6-3 谱线上的对比度为 53% 至 60%，在 R(39)6-3 上为 61% 至 73%。这分别是使用 10cm 长的商用宏观 I_2 气室测得结果（分别为 9% 和 12%）的 5.9 至 6.7 倍和 5.1 至 6.1 倍；制造商给出的 I_2 蒸气压规格为 $1.3.10^{-1}$ – $1.6.10^{1}$ mbar。这些对比度是先前报道的研究[36], 中室温下测得值的 2.2 至 2.9 倍。据我们所知，该研究是唯一一项关于低损耗 I_2填充密封空芯光子晶体光纤的报道。

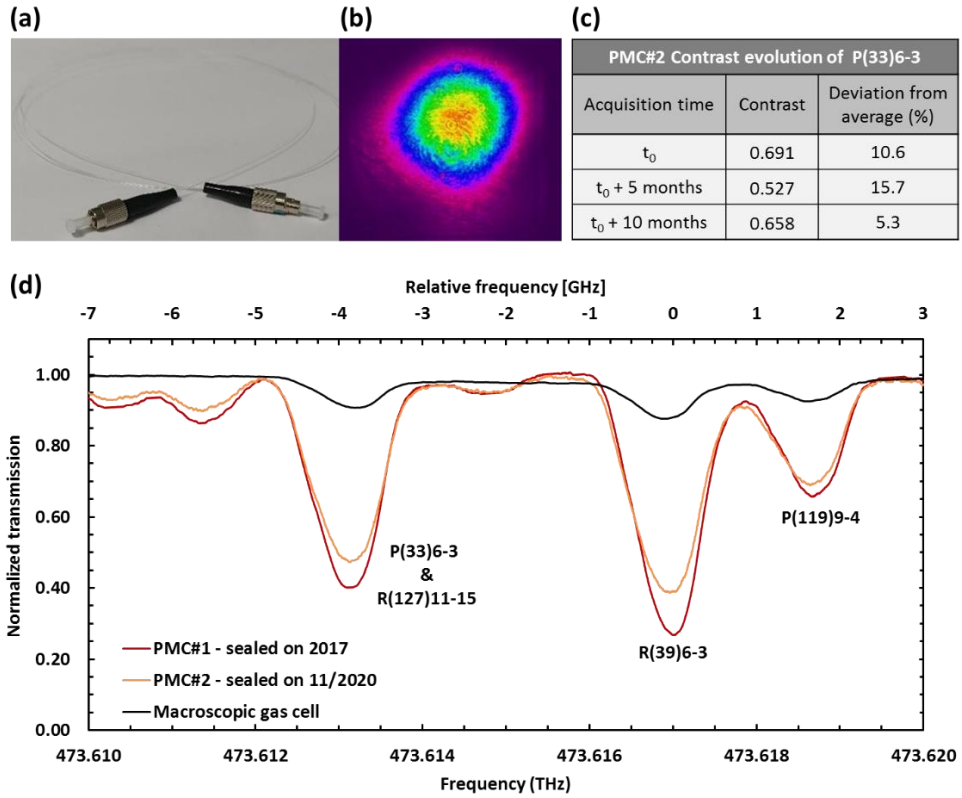

图 2. (a) 安装在 FC/APC连接器上的 I_2 PMC#1 的照片。(b) PMC#1 输出端在 633纳米处测得的近场强度分布。(c) PMC#2 的对比度在 2 年内的变化。(d) 制备的PMC（PMC#1 为红色，PMC#2 为橙色）与宏观商用气体池（黑色）的归一化透射光谱。

最后，将所示透射光谱与 PMC 封装时及后来于 2022年10月（见图2(c)）记录的光谱进行比较，可发现其对比度相近。事实上，自 PMC#2 于 t_0封装以来，已对其 P(33)6-3 谱线的对比度变化进行了为期 2 年的研究。不同测量结果汇总于图 2(c)的表格中。测得的 I_2 P(33)6-3 谱线对比度始终保持稳定，波动范围为±8，5%，极值平均值为 61%。观测到的波动被归因于温度条件和激光二极管电流设定值的差异，并通过使用另一个基于相同光纤和制造工艺的光子微腔进行的补充研究加以验证。结果表明，考虑室温的极端实验值（即 19 至 22.5°C）和激光二极管电流值时，这两个导致对比度变化的主要因素可引起 ±9% 的变化。

吸收对比度的稳定性凸显了光子微腔的密封性，以及所开发工艺的可靠性和重复性。

3. 使用 I_2 光子微腔进行亚多普勒光谱学

制备的PMC展现了用于亚多普勒光谱学的潜力，成功分辨出P(33)6-3谱线的超精细结构。为此，采用饱和吸收

光谱学（SAS）测量按照图1(c)所示的装置进行。激光束分为反向传播的泵浦光束和探测光束，输出功率分别为4 mW和40 μW。泵浦光束取自声光调制器（AOM）产生的一级衍射光，该调制器的工作频率为64 MHz。这样做是为了避免探测光与反射回来的泵浦光在光纤中传播时发生干涉。通过偏振分光立方体将PMC透射的探测光束导向光电二极管，从而获得光谱透明信号。使用半波片和四分之一波片，以提升光子微腔的光学透射率以及导向光电探测器的探测光束强度。

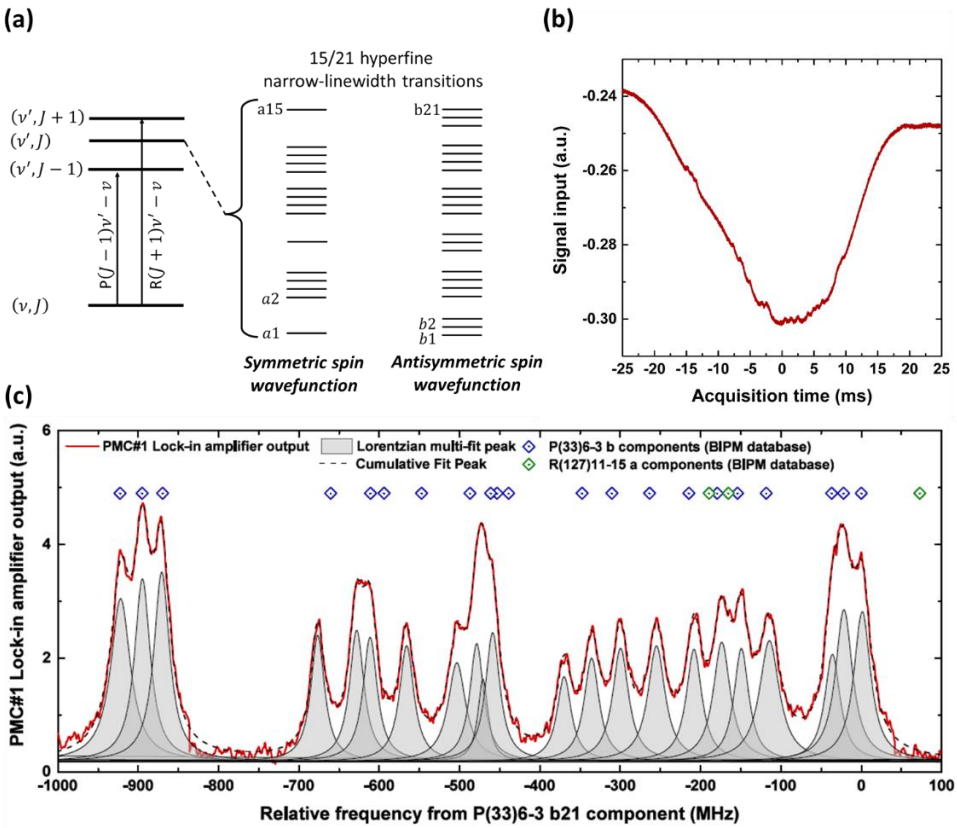

图 3. (a) 碘转动-振动超精细能级示例。通常无法通过室温下的简单宏观气室观察到这种结构。(b) 通过 PMC#1 在室温下测得的 R(39)6- 3 多普勒谱线。(c) 使用锁相放大器检测方案获得的 P(33)6-3 多普勒谱线超精细分量结构。将测得的峰值（红色）与 P(33)6-3 和 R(127)11-15 的表列分量值进行比较（分别以蓝色和绿色表示）。数据采用洛伦兹多峰拟合函数进行拟合。

图 3(b) 展示了激光频率调谐至 R(39)6- 3 谱线附近时的探测信号，该信号由室温下的光电探测器直接记录。除多普勒展宽吸收线外，迹线还显示出 21 条超精细 b 线 [39]。据我们所知，这是首次在未使用任何信噪比（SNR）采集后放大手段（例如锁相放大器）的情况下，在气室中观察到此类碘透明现象

检测。为提高超精细结构的分辨率，我们采用了锁相放大检测方案，并使用 1 MHz 方波调制泵浦光束（幅度调制）。锁相放大器输出端获得的光谱如图3(c)所示。已识别出 P(33)6-3 谱线的 21 个超精细 b 分量（ “b” 能级示意图见图 3(a) ），其结果与国际计量局以蓝色标注的光学频率表数据吻合良好[38]。可以观察到一些频移和/或额外峰，例如 b11 与 b18 之间的峰，这可能是由 P(33)6-3 谱线与碘的 R(127)11-5 吸收谱线重叠所致$_2$。因此，其他较弱的峰可能来自 R(127)11-5 谱线的饱和吸收光谱。

图4展示了此前在图3(c)中呈现的 P(33)6-3谱线的 b4 超精细分量。洛伦兹拟合表明，泵浦光束功率为 4mW 时，半高全宽为 21MHz。壁碰撞和自然线宽等展宽来源的贡献可直接计算得出[4] ，分别为 2.95MHz 和 3.23MHz（寿命约为 310ns[40,41]）。制造商提供的激光线宽约为 0.20MHz。考虑到光子微腔内 I_2 的压力约为 10^{-2}mbar，可估算分子间碰撞展宽约为 40kHz [42]。因此，该装置可实现的最小线宽为 6.42MHz。实测线宽较大，达到 21MHz，这是由于泵浦光束强度为 10MW/m2，远高于 28kW/m2 的饱和强度，达到其 357 倍，从而产生了功率展宽[43]。

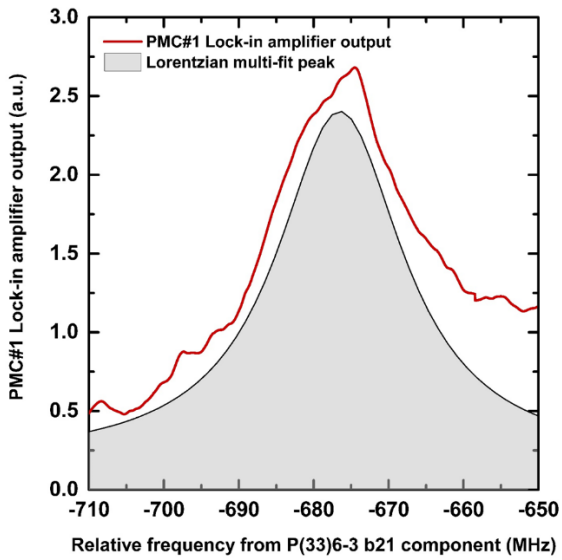

图4. 图3(c)所示超精细结构中 b4 分量的局部放大图。锁相信号以红线表示。采用黑线拟合了半高全宽为 21 MHz 的洛伦兹曲线。

4. 结论

总之，我们报道了首次采用一种新工艺制备米长、低光学损耗的纯 I_2 光子微型池，该工艺可制备全光纤独立式光子微型池。在室温下测得的吸收对比度最高达 73%，光子微型池插入损耗为 4dB，比最先进水平低 5.4 倍。光子微型池在 4 年后仍能正常工作，且两个光子微型池中的吸收均保持稳定，这证明了其密封质量良好；此外，在室温下，首个光子微型池在 I_2 的 P(33)6-3谱线上实现了无多普勒信号测量。该谱线的 b4 分量在输出泵浦光束功率为 4mW 时，半高全宽为 24MHz。通过计算不同展宽来源，我们确定主要来源为功率展宽。优化 I_2 压力、光子微型池长度和泵浦功率，有望在保持相同饱和吸收对比度的同时降低半高全宽。这些结果对于许多紧凑型传感应用和激光稳频都非常有前景。

资助： 新阿基坦大区。

利益披露： 作者声明不存在任何利益冲突。

参考文献

1. S. Knappe、V. Shah、P. D. D. Schwindt、L. Hollberg、J. Kitching、L.-A. Liew 和 J. Moreland，《微加工原子钟》，《光学快报》**85**(9), 1460–1462 (2004). 2. W. Yang、D. B. Conkey、B. Wu、D. Yin、A. R. Hawkins 和 H. Schmidt，《芯片上的原子光谱学》，《自然·光子学》**1**(6), 331–335 (2007). 3. M. Graf、L. Emmenegger 和 B. Tuzson，《用于移动激光吸收光谱学的紧凑型圆形光学稳定多通池》，《光学快报》**43**(11), 2434 (2018). 4. F. Benabid、F. Couny、J. C. Knight、T. A. Birks 和 P. S. J. Russell，《使用空芯光子晶体光纤制成的紧凑、稳定且高效的全光纤气体池》，《自然》**434**(7032), 488–491 (2005). 5. T. Billotte、M. Chafer、M. Maurel、F. Amrani、F. Gerome、B. Debord 和 F. Benabid，《用于亚多普勒光谱学的无污染物端封单模乙炔光子微型池》，《光学快报》**46**(3), 456 (2021). 6. B. Debord、F. Amrani、L. Vincetti、F. Gérôme 和 F. Benabid，《空芯光纤技术：“气体光子学”的兴起》，《光纤》**7**(2), 16 (2019). 7. G. T. Jasion、H. Sakr、J. R. Hayes、S. R. Sandoghchi、L. Hooper、E. N. Fokoua、A. Saljoghei、H. C. Mulvad、M. Alonso、A. Taranta、T. D. Bradley、I. A. Davidson、Y. Chen、D. J. Richardson 和 F. Poletti，《0.174 dB/km空芯双嵌套反谐振无节点光纤（双嵌套反~~"~~谐振无节点光纤）》，3 (2022)。8. J. Osório、F. Amrani、F. Delahaye、A. Dhaybi、K. Vasko、G. Tessier、F. Giovanardi、L. Vincetti、B. Debord、F. Gérôme、F. Benabid：《短波长范围内表面粗糙度降低且损耗超低的~~空芯光纤》，arXiv https://arxiv~~.org/abs/2207.11090，2022。9. F. Couny、P. S. Light、F. Benabid 和 P. St. J. Russell，《基于充填碳-12乙炔的空芯光子晶体光纤的全光纤器件中的电磁诱导透明和可饱和吸收》，《光学通信》263(1), 28–31 (2006)。10. P. S. Light、F. Couny 和 F. Benabid，《基于空芯光子晶体光纤的低光学插入损耗真空压力全光纤乙炔池》，《光学快报》31(17), 2538 (2006)。11. N. V. Wheeler、M. D. W. Grogan、P. S. Light、F. Couny、T. A. Birks 和 F. Benabid，《通过拉锥空芯光子晶体光纤制成的大芯径乙炔充填光子微型池》，《光学快报》35(11), 1875 (2010)。12. M. D. Feit 和 J. A. Fleck，《渐变折射率光纤中的光传播》，《应用光学》17(24), 3990 (1978)。13. C. Wang、Y. Zhang、J. Sun、J. Li、X. Luan 和 A. Asundi，《渐变折射率光纤探针与空芯光子晶体光纤的高效耦合方法》，《应用科学》9(10), 2073 (2019)。14. M. Triches、A. Brusch 和 J. Hald，《采用新型封装技术的基于密封充气空芯光纤的便携式光学频率标准》，《应用物理B辑》121(3), 251–258 (2015)。15. E. A. Curtis、T. Bradley、G. P. Barwood、C. S. Edwards、N. V. Wheeler、R. Phelan、D. J. Richardson、M. N. Petrovich 和 P. Gill，《使用紧凑型CO_2充填Kagome空芯光纤气体池系统，在2051 nm处进行激光频率稳定和光谱学》，《光学快报》26(22), 28621 (2018)。

16. I. Y. Poberezhskiy、P. Meras、D. H. Chang 和 G. D. Spiers，《空芯光子晶体光纤气体参考池的紧凑、稳健再充填与连接》，载于LEOS 2007——IEEE激光与光电子学会年度会议论文集（IEEE，2007），第568–569页。17. P. Meras、I. Y. Poberezhskiy、D. H. Chang 和 G. D. Spiers，《使用空芯光纤CO 2频率参考池实现2.05 μm激光器的频率稳定》，载于A. Mendez、H. H. Du、A. Wang、E. Udd 和 S. J. Mihailov编（2010），第767713页。18. T. Billotte、M. Chafer、M. Maurel、F. Amrani、F. Gerome、B. Debord 和 F. Benabid，《用于亚多普勒光谱学的无污染端封乙炔光子微腔》，载于2019年激光与光电子学欧洲会议暨欧洲量子电子学会议（CLEO/Europe-EQEC）（IEEE，2019），第1–1页。19. S. Gerstenkorn、P. Luc、J. Verges 和 J. Chevillard，碘分子吸收光谱图集，《碘分子吸收光谱图集》第1卷（艾梅·科顿实验室，1978）。20. H. Salami 和 A. J. Ross，《ASCII格式的分子碘图集》，《分子光谱学杂志》233(1), 157–159 (2005)。21. F. Riehle、P. Gill、F. Arias 和 L. Robertsson，《国际计量委员会推荐频率标准值清单：指导原则与程序》，《计量学》55(2), 188–200 (2018)。22. J.-F. Cliche、A. Zarka、M. Tetu 和 J.-M. Chartier，《633 nm半导体激光器在碘谱线上的自动锁定》，IEEE《仪器与测量汇刊》48(2), 596–599 (1999)。23. M. Merimaa、P. Kokkonen、K. Nyholm 和 E. Ikonen，《采用紧凑型外腔二极管激光器的633 nm便携式频率标准》，《计量学》38(4), 311–318 (2001)。24. A. Lurie、F. N. Baynes、J. D. Anstie、P. S. Light、F. Benabid、T. M. Stace 和 A. N. Luiten，《高性能碘光纤频率标准》，《光学快报》36(24), 4776 (2011)。25. C. Philippe、R. Le Targat、D. Holleville、M. Lours、Tuan Minh-Pham、J. Hrabina、F. Du Burck、P. Wolf 和 O. Acef，《频率三倍转换的1.5 μm电信激光二极管在10−15范围内稳定于碘超精细谱线》，载于2016年欧洲频率与时间论坛（EFTF）（IEEE，2016），第1–3页。26. J. Barbarat、J. Gillot、H. Alvarez-Martinez、M. Lours、D. Holleville、R. Le Targat、P.-E. Pottie、P. Wolf、P. Tuckey、O. Acef、F.-X. Esnault 和 T. Leveque，《紧凑型便携式碘频率稳定激光器》，载于国际空间光学会议—ICSO 2018，N. Karafolas、Z. Sodnik 和 B. Cugny编（国际光学工程学会，2019），第28页。27. A. V. V. Nampoothiri、B. Debord、M. Alharbi、F. Gérôme、F. Benabid 和 W. Rudolph，《连续波空芯光纤光泵浦碘9光纤气体激光器》，《光学快报》，OL 40(4), 605–608 (2015)。28. S. N. Bagayev、V. I. Denisov、A. S. Dychkov、N. A. Koliada、B. N. Nyushkov、V. S. Pivtsov、S. A. Farnosov 和 A. A. Antropov，《稳定于碘频率标准的光纤飞秒光学频率梳》，《物理学杂志：会议系列》793, 012003 (2017)。29. V. Schkolnik、K. Döringshoff、F. B. Gutsch、M. Oswald、T. Schuldt、C. Braxmaier、M. Lezius、R. Holzwarth、C. Kürbis、A. Bawamia、M. Krutzik 和 A. Peters，《JOKARUS——探空火箭任务用紧凑型光学碘频率基准的设计》，《EPJ量子技术》4(1), 9 (2017)。30. K. Döringshoff、F. B. Gutsch、V. Schkolnik、C. Kürbis、M. Oswald、B. Pröbster、E. V. Kovalchuk、A. Bawamia、R. Smol、T. Schuldt、M. Lezius、R. Holzwarth、A. Wicht、C. Braxmaier、M. Krutzik 和 A. Peters，《探空火箭上的碘频率基准》，《物理评论·应用》11(5), 054068 (2019)。31. D. Bonaccini Calia、Y. Feng、W. Hackenberg、R. Holzlöhner、L. Taylor 和 S. Lewis，《欧洲南方天文台钠激光导星激光器的研制》，《信使》139, 12–19 (2010)。32. N. Wang、X. Shen、D. Xiao、I. Veselovskii、C. Zhao、F. Chen、C. Liu、Y. Rong、J. Ke、B. Wang 和 D. Liu，《浙江大学气溶胶与云高光谱分辨率激光雷达的研制：特征检测与分类》，《定量光谱学与辐射传输》261, 107513 (2021)。33. H. Bouasse，普通热力学：气体与蒸气，Bibliothèq（德拉格拉夫书店，1932）。34. J. Szabo、M. Robin、S. Paintal、B. Pote、V. Hruby 和 C. Freeman，《碘推进剂空间推进》，载于IECP（2013）。35. A. Lurie、P. S. Light、J. Anstie、T. M. Stace、P. C. Abbott、F. Benabid 和 A. N. Luiten，《空芯光纤中碘的饱和光谱学》，《光学快报》20(11), 11906 (2012)。36. P. S. Light、J. D. Anstie、F. Benabid 和 A. N. Luiten，《气密式光纤碘频率标准》，《光学快报》40(12), 2703 (2015)。37. B. Debord、A. Amsanpally、M. Chafer、A. Baz、M. Maurel、J. M. Blondy、E. Hugonnot、F. Scol、L. Vincetti、F. Gérôme 和 F. Benabid，《抑制耦合导光空芯光纤中的超低透射损耗》，《光学》4(2), 209–217 (2017)。38. “[国际计量局] 标准频率：474 THz（≈ 633 nm）– 碘”，（2003）。https://www.bipm.org/ 39. X. Chen、K. Zhang、E. J. Zang、Y. Akimoto、T. Kasahara、K. Sakamoto 和 H. Inaba，《633 nm处的频率稳定可调谐二极管激光器与强跃迁碘超精细光谱》，载于《半导体激光器III》（国际光学工程学会，1998），3547，第194–202页。40. G. A. Capelle 和 H. P. Broida，《I2(B 3Π Ou+)的寿命和猝灭截面》，《化学物理学杂志》58(10), 4212–4222 (1973)。41. K. C. Shotton 和 G. D. Chapman，《由632.8 nm氦氖激光器激发的^{127}碘$_2$分子的寿命》，《化学物理学杂志》56(2), 1012–1013 (1972)。42. C. S. Edwards、G. P. Barwood、P. Gill 和 W. R. C. Rowley，《633 nm碘稳频二极管激光频率标准》，《计量学》36(1), 41–45 (1999)。

43. J. Hu、T. Ahola、E. Ikonen 和 K. Riski，“高次谐波稳频时碘稳频氦氖激光器的频率偏移”，IEEE 仪器与测量汇刊 **46**(2), 186–190 (1997).