arXiv:2601.11834v1 [physics.optics] 16 Jan 2026

使用可编程灵活集成式 PZT-on-SiN 谐振器进行亚多普勒铷原子冷却

Andrei Isichenko[1†]、Steven Carpenter[2†]、Nick Montifiore[1],Jiawei Wang[1],Mayand Dangi[4], Nitesh Chauhan[1], Pritha Mukherjee[4], Xuting Yang[2],Nitin Indukuri[1],Mark W. Harrington[1], Chuan Zhong[1], Iain M. Kierzewski[3], Ryan Q. Rudy[3],Jennifer T. Choy[2]、4*和 Daniel J. Blumenthal[1*1]加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校电学与计算机工程系，美国加利福尼亚州圣塔芭芭拉 93106[2]威斯康星大学麦迪逊分校物理系，美国威斯康星州麦迪逊 53706[3]美国陆军研究实验室，美国马里兰州阿德尔菲 20783[4]威斯康星大学麦迪逊分校电学与计算机工程系，美国威斯康星州麦迪逊 53706

†这些作者对本研究的贡献相同。

*通讯作者：jennifer.choy@wisc.edu，danb@ucsb.edu

摘要： 激光频率的可编程性和精确控制对于量子实验以及原子钟、量子计算机和冷原子传感器等应用至关重要。当前系统采用体积庞大且耗电的调制器和移频器，难以集成，并限制了便携性和可扩展性。我们报道了一种电学可控的灵活光频率源，该光源基于稳定到光子集成锆钛酸铅（PZT）驱动谐振腔的半导体激光器。我们通过对 780 纳米激光器进行精确、可编程的频率控制来展示这一方法：激光器可周期性地参照铷光谱学进行校准，随后执行快速、可编程的任意频率调谐序列以实现量子控制。我们使用

这一方法展示了无需任何外部调制器即可实现铷-87的亚多普勒冷却，原子云温度最低可达 16 μK。该器件的调谐强度最高可达 1 GHz/V，调制带宽为 11 兆赫，且仅消耗 10 nW 的电功率。这项工作为面向下一代量子和原子传感技术的紧凑、低功耗芯片级激光系统开辟了道路。

引言

精密激光频率控制是众多量子技术的基础，包括光学原子钟（*1*）、量子计算（*2*）和冷原子惯性传感器（*3,4*）。这些系统依赖窄线宽激光器，必须能够分辨原子跃迁并将频率稳定在相对于原子跃迁的位置。例如，工作在780纳米附近的铷（Rb）系统要求绝对频率漂移低于100千赫，才能实现精密传感性能（*5,6,7*）。在冷原子磁光阱（MOT）中，为了俘获原子，激光频率会红失谐数十兆赫，随后迅速返回共振，以进行荧光探测。此外，要达到亚多普勒温度，还需要动态且精确定时的失谐序列：偏振梯度冷却（PGC）（*8*）和 Λ 增强灰色摩拉塞依赖快速的毫秒级频率斜坡，变化范围达数十兆赫；而用于相干态操控的拉曼跃迁通常需要吉赫兹量级的频率跳变。因此，兼具长期稳定性和短期灵活性的频率偏移控制能力，是实现高精度传感和量子态读出所需超低温度与相干性的关键。

激光频率控制技术已发展得相当成熟，相关工作仍在持续推进其小型化与规模化。通常通过参照原子蒸气池光谱学（如饱和吸收光谱（SAS））来实现激光频率的长期稳定性；而快速、可编程的失谐则通过外部调制或直接控制激光器（例如调节激光器电流和温度），并结合偏移拍频锁定来实现（*10*）。声光调制器（AOM）可实现数百兆赫兹的频移，而电光调制器（EOM）通过施加边带，可将这一范围扩展到数吉赫兹的偏移。这些工具构成了许多紧凑型冷原子仪器的基础：采用单种子激光架构的

声光调制器和电光调制器已助力实现可野外部署的原子干涉仪（*11*），近期在 C 波段开展的光子集成实现也展示了高速单边带频移与调制（*4,12*）。然而，这些方案是以系统复杂度和功耗为代价实现频率捷变的。具体而言，体光学和光纤耦合声光调制器需要瓦级射频功率放大器，且会因不需要的衍射级次而损失光功率；电光调制器则会产生寄生边带，可能降低原子干涉仪灵敏度（*7,13*）。在 C 波段工作的集成方案还必须依赖倍频才能达到可见波长，这会带来转换效率低下和封装负担。对频率可调冷却激光器进行偏移拍频锁定是一种可靠方案，但运行时需要额外的激光器（*13*）。总之，这些限制制约了传统架构向光子集成、紧凑、低功耗、可野外部署的量子系统扩展。

一个关键的下一步，是在原子跃迁波长处实现可见光和近红外（NIR）精密频率控制，例如铷的 780纳米 D_2 线。基于 CMOS 兼容氮化硅（Si_3N_4）波导平台实现的频率调制对原子应用尤为重要，因为该平台具有宽广的透明窗口（405 纳米–2350 纳米）（*14*）、极低的激光频率稳定光学损耗（*15*），且兼容与砷化镓、氮化镓和磷化铟等有源材料进行异质或混合集成。特别是，在氮化硅上采用锆钛酸铅（PZT）的应力光调制非常适合原子频率控制，因为它能够实现宽带（直流耦合，带宽可达数十兆赫）和低功耗控制。在氮化硅上集成 PZT 几乎不会带来额外的光学损耗，且功耗仅为纳瓦级（*16, 17,18, 19, 20*）。PZT 具有显著更强的机电耦合能力，因此能以更低的驱动电压实现更大的频移。迄今为止，大多数 PZT 调制都应用于 1550 纳米波段；近期也有研究报道将应力光调制扩展至可见光谱（*21,22*）。然而，利用集成应力光学调谐，在可见光至短波红外（SWIR）范围内实现灵活且任意的频率控制，尚未得到演示，也尚未应用于原子实验。

在本研究中，我们展示了一种780纳米、基于PZT-on-SiN应力光学效应的环形谐振器，其可作为用于激光频率控制的频率灵活可编程光学腔；并将其应用于实现铷-87原子的亚多普勒冷却，而无需任何外部调制。施加于PZT执行器的编程电压波形能够对Pound-

德雷弗-霍尔（PDH）锁定的激光频率进行确定性且可重复的控制。我们测得其静态调谐效率为1 GHz/V、小信号调制带宽为11 MHz，且电功耗低于100 nW，从而能够在不降低光学品质因数或增加额外光功率的情况下，实现精确的直流调谐和灵活调制。利用这一频率可编程腔，我们在三维磁光阱（MOT）中实现了用于偏振梯度冷却（PGC）的快速光频率扫描序列，使原子温度低至 16 μK——远低于146-μK的多普勒极限——仅使用PZT谐振器和半导体光放大器（SOA），无需在频率移位或强度控制环路中使用AOM。PZT腔在定期依据铷光谱学重新参考期间提供保持能力，展现了一种用于冷原子控制的紧凑、低功耗激光频率合成方案。这种方法与自注入锁定天然兼容，为面向量子传感和原子干涉测量的全集成、频率可编程激光系统铺平了道路。

结果

PZT-on-SiN谐振器提供了一个用于锁定激光频率控制的集成平台，将短期稳定性与快速调谐相结合，实现可编程控制和长期原子参考。压电陶瓷控制的快速调谐谐振腔的工作原理如图1所示。商用单频780纳米半导体激光器（Photodigm分布式布拉格反射器（DBR））通过Pound-德雷弗-霍尔（PDH）技术锁定到谐振器上（图1A）。这使锁定激光器能够跟踪快速调谐腔的频率，同时降低激光频率的短期漂移。在激光稳频步骤中，我们采用双级锁定（*6,23,5*）连接到铷饱和吸收光谱（SAS）模块，并将来自SAS的信号反馈至压电陶瓷调谐器，从而将光子集成电路锁定激光器锚定到一个原子跃迁上，并降低激光频率的长期漂移。

为执行亚多普勒原子冷却所需的失谐扫描序列，会定期禁用铷光谱锁定，并由任意波形发生器（AWG）驱动压电陶瓷，施加预先编程的电压信号。由此产生用于磁光阱形成和偏振梯度冷却（PGC）的激光频率扫描和跳变。该过程会重复进行，并定期重新参考铷光谱，以防止长期频率漂移过大；在此期间，

PIC谐振器充当保持腔，将周期之间的频率漂移限制在一定范围内（图1B）。毫米级的PZT-on-SiN谐振器件如图1C所示。

谐振器表征

环形谐振器的横截面设计如图 2A 所示。波导厚度经过选择，使模式适度受限，从而实现较小的弯曲半径；波导宽度则设计为支持 TM_0 模式。谐振器的半径为 750 μm，对应 38 GHz 的自由光谱范围（FSR）。层叠结构包括 15-μm 的 SiO_2 下包层、厚 120 nm、宽 900 nm 的 Si_3N_4 芯层，以及 4-μm 的 SiO_2 上包层。厚度为 1-μm 的平面压电陶瓷层沉积在波导上方，并与波导中心横向错开。谐振器中还设有一对铂电极，用于对共振进行热调谐。与先前的工作不同，沉积压电陶瓷致动器的工艺无需欠刻蚀（*17,18*）。制造工艺的详细信息见“材料与方法”部分。

高品质因数、快速调制和大范围 PZT 调谐的结合，是器件性能的关键。对于 TM 模式谐振，我们测得本征品质因数为 Q_i = 2.8 M，加载品质因数为 Q_L = 2.3 M，传播损耗为 20 dB/m （图 2B ）。我们通过将激光调谐至谐振的正交点，并使用网络分析仪，测量小信号电光调制响应 S_{21} 。我们发现，6 dB 截止频率为 11 MHz（图 2C）， 180° 相位滞后点为 5.8 MHz（图 S1A）。PZT 执行器可在宽范围内实现低功耗频率调谐。光学透射光谱（图 2D）显示了共振随直流控制电压从 0 到 10 V 的变化情况，相应的共振偏移呈现 1 GHz/V 的线性调谐强度（图 2E）。由于应力光学调谐存在迟滞，正向和反向电压扫描会产生略有差异的共振偏移，如图 S1B 所示。在施加 10 V 电压时，我们测得漏电流为 <1 nA，表明功耗为 <10nW。为评估晶圆级均匀性，我们测量了 4 英寸晶圆上各器件的静态调谐和本征品质因数 Q_i（图 2F）。测得的七个器件的调谐强度均超过 100 MHz/V，调谐极性由 PZT 执行器相对于波导的横向偏移决定；正（负）调谐对应于无偏移（偏移 2-μm）。绿色边框掩模版上的器件具有最高的 Q_L 和调谐强度。蓝色边框掩模版上的器件经过封装（图 S2），并用于原子冷却演示。

亚多普勒原子冷却

接下来，我们展示 PZT-on-SiN 谐振器作为灵活频率调谐器的应用，用于铷冷原子系综中的 PDH 锁定激光器。借此，可通过偏振梯度冷却（PGC）（*8*），将三维磁光阱（MOT）中的原子冷却至远低于 146 μK 多普勒极限的温度。实现最佳 PGC 需要在数毫秒内将 MOT 冷却光快速红失谐，通常为 30–100 MHz，同时降低光功率（*4*）。这种动态失谐会降低散射率，使原子能够局域于空间变化光场中，从而达到亚多普勒温度。

在本研究中，我们重点利用集成谐振器进行频率控制。传统上，亚多普勒冷却序列依靠声光调制器（AOM）实现两项功能：（1）将激光频率移至磁光阱形成所需的失谐；（2）在亚多普勒阶段施加啁啾射频驱动，逐渐增大失谐。AOM 也可用作光学快门，但这一功能也可由半导体光放大器（SOA）替代，或者最终通过扩展本研究提出的同一压电陶瓷机制来实现。

利用压电陶瓷光学谐振器灵活的频率控制能力，我们在磁光阱形成和亚多普勒冷却两个阶段都以此替代声光调制器的功能。事实上，冷却光束的光路中没有声光调制器。我们通过 Vescent D2-125-PL伺服控制器控制系统，该控制器支持在光谱参考运行与自由运行的谐振器稳频运行模式之间快速切换。在自由运行模式下，向压电陶瓷施加任意电压波形，即可快速控制冷却激光器的频率。

用于展示和测量锁定激光器调谐的示意图如图3A所示。我们将780 nm冷却分布式布拉格反射激光器通过PHD稳定至环形谐振器，并实现了锁定激光频率控制，使用 V_{PZT}。施加的压电陶瓷信号在（$V_{\mathrm{Rb\ lock}}$）和快速频率控制（V_{agile}）之间交替切换，前者用于驯服铷，后者用于磁光阱形成和亚多普勒冷却。V_{agile} 信号调谐冷却激光器的频率，使其能够在PZT执行器的调谐范围内任意控制激光频率，调谐速度则处于激光器PDH锁定的锁定带宽之内，如图3B所示。锁定装置的详细示意图见图S3，相关讨论见补充材料第S1节。

我们放大了 通过光纤耦合半导体光放大器（SOA）产生冷却光，其

输出功率由电压控制（V_{SOA}），以实现可编程功率斜坡控制和快门控制。SOA 用作偏振梯度冷却（PGC）的功率调制器，并在飞行时间（TOF）温度测量期间充当光学快门。 [87]铷磁光阱采用六束光配置（三束光经反向反射）。780 纳米激光器驱动红失谐的 [87]铷 $5S_{1/2}\ F = 2 \rightarrow 5P_{3/2}\ F' = 3$ 跃迁，而独立的 795纳米分布式布拉格反射激光器则用作再泵浦光，激发 [87]铷 $5S_{1/2}\ F = 1 \rightarrow 5P_{1/2}\ F' = 2$跃迁。

一个实验周期的时序图如图3C所示。每个序列首先在 $F' = (2、3)$交叉跃迁处进行铷原子驯服，持续 25 毫秒。随后将压电陶瓷电压阶跃调整 ~1 伏特，使冷却激光器相对于 $F' = 3$冷却跃迁设定为磁光阱失谐 Δ_{MOT}，并进行磁光阱装载，持续223毫秒。磁光阱装载完成后，V_{agile} 波形在12毫秒内将激光失谐线性增加15兆赫，以实施偏振梯度冷却（PGC）。完成该斜坡后，所有磁光阱光和再泵浦光在 $t = 250$ 毫秒时关闭，启动飞行时间测量，延迟时间范围为0至6毫秒。在 Δ_{MOT} 时施加一个持续0.5毫秒的照明脉冲（未来实验中也可选择在 $\Delta = 0$ 时施加），以获取原子荧光图像。在 $t = 290$ 毫秒时，系统重新启用Rb频率参考：首先将压电陶瓷返回锁定点，然后重新启用SAS反馈。

原子云温度由飞行时间（TOF）测量确定（*24*）（见补充材料第 S2 节）。图 4A 展示了四种测试配置。其中三种测试配置采用双级激光锁定。这些测试包括：（I）既无频率偏振梯度冷却斜坡，也无激光强度斜坡（不进行有意的亚多普勒冷却）；（II）仅进行频率偏振梯度冷却斜坡（通过压电陶瓷实现）；（III）同时进行频率斜坡（通过压电陶瓷实现）和激光强度斜坡（通过半导体光放大器实现）。第四种（IV）测试配置使用声光调制器进行频率斜坡，并使用半导体光放大器进行强度斜坡。图 S4 展示了四种冷却配置，图 S5 则详细说明了配置 III 的实验时序。关于温度数据采集的更多讨论，请参见补充材料第 S2 节。

通过配置（III）测得的最低温度达到 16 μK。原则上，基于声光调制器的配置（IV）也应能实现类似的低温；然而，由于激光耦合效率会随失谐变化，优化难度更大。因此，采用声光调制器配置所达到的最低温度为 28 μK。

谐振器频率敏捷性测量

我们通过监测激光频率在 PDH 反馈带宽内跟踪腔调谐的情况，表征 PDH 锁定的压电陶瓷–氮化硅谐振器的频率灵活调谐能力。图 5A 展示了测量示意图。一台锁定到压电陶瓷谐振器的 780 纳米 DBR 冷却激光器，与另一台稳定在独立铷 D_2 线饱和吸收光谱（SAS）系统上的 780 纳米参考 DBR 激光器进行外差。我们使用快速光电二极管、电子频谱分析仪（ESA）和频率计数器，记录两台激光器之间的拍频。同时，相机监测 ^{87}铷磁光阱发出的荧光。

图5B显示了连续运行 20 分钟期间记录的激光拍频。在我们定期将 PZT 腔参考到铷饱和吸收光谱（上图）时，拍频在铷原子锁定期间保持在 78 兆赫附近，在磁光阱形成期间保持在 185 兆赫附近。我们观察到，长时间连续运行时，磁光阱荧光缓慢漂移（扩展的原子数稳定性数据见图 S6A）。这种兆赫量级的长期漂移与致动器动态特性缓慢（PZT 蠕变和迟滞）和/或光子封装中的残余热漂移相符；这些因素会使有效激光失谐偏离最佳值 Δ_{MOT} （见补充材料第 S2 节）。重要的是，定期重新参考铷饱和吸收光谱可维持可重复的频率状态，并防止漂移不断累积。未来，我们计划通过添加一个以磁光阱荧光为误差信号的慢速微调环路，进一步抑制残余荧光漂移。无铷参考（下图）时，频率漂移会迅速累积，导致磁光阱信号在运行的第一分钟内完全消失。这证实，PDH 与 SAS 混合方案兼具腔提供的短期稳定性和原子参考提供的长期漂移抑制能力。在另外几次未同时监测拍频的测量运行中，磁光阱原子数至少 30 分钟保持稳定，表明在这些运行条件下 PZT 迟滞可以忽略不计（S6B）。

图 5C 展示的三个连续周期的放大部分，突显了每个周期可重复的频率轨迹。图 5D 叠加了 100 个连续周期，显示在整个 PZT 驱动范围内均能保持稳定运行。每个序列均以 25 毫秒的 Rb 频率参考间隔开始，随后进入磁光阱阶段，最后以持续 12 毫秒、对应偏振梯度冷却（PGC）序列的三角频率斜坡结束。

最后，图 5　E、F 展示了该系统的灵活性：向

压电陶瓷施加任意波形，可生成经过编程的激光频率轨迹，重现二维图案。这凸显了集成式 PZT–SiN 谐振器能够在数百兆赫范围内实现确定性、高速且可重复的频率控制。综合来看，这些结果证实，以铷光谱为参考时，该谐振器能够实现稳健、长期的频率保持，并在毫秒时间尺度上进行精确、灵活的调谐，足以在冷原子实验中实现亚多普勒冷却和动态频率控制。

讨论

我们展示了一种集成式 780 nm PZT-on-SiN 谐振器，可为冷原子应用实现可编程、精确且灵活的激光频率控制。通过将 780 nm DBR 激光器锁定到可编程的高 Q（本征值为 280 万）谐振器，并根据亚多普勒冷却电压序列驱动 PZT 致动器，我们在三维磁光阱中利用 12 毫秒内快速进行的 15 兆赫线性失谐，实现偏振梯度冷却（PGC），将铷原子冷却至 16 μK。在这项演示中，基于 PZT 的灵活调谐腔完全取代了声光调制器（AOM）在亚多普勒冷却三维磁光阱中的作用。这种方法保持了激光锁定的稳定性，并将原子温度降至远低于 146 μK 多普勒极限。结果表明，宽带应力光学调谐可在单个集成光子器件中同时实现长期稳定性与快速、可编程的频率捷变。这种方法可降低功耗，并缓解传统基于射频的方法（如声光或电光调制）所带来的问题；这些方法会产生不需要的光学边带，并可能寄生激发附近的原子跃迁。通过对光学参考谐振器本身进行编程，激光保持单频，并获得由高 Q 谐振器确定的频率轨迹。此外，得益于谐振器较低的热折射噪声（TRN）、高 Q 值和高消光比（ER），该方案还兼容频率噪声降低和线宽窄化（*25,23*）。这种无边带频率合成可消除冷却序列中的杂散光学频率分量，简化系统架构并减少不必要的原子激发。

此处的 SiN 波导层与用于磁光阱的光子集成光束传输系统中的层相同*26*，这凸显了该方法与大面积发射器阵列及集成冷原子平台的兼容性。除频率调谐外，同一压电陶瓷

驱动机制还可设计用于直接振幅调制和光学快门控制，可采用干涉式或谐振配置。此前在SiN 和氮化铝平台上对多环调制器和马赫 – 曾德尔干涉仪（ MZI ）调制器的演示 *27,28* 表明，类似的应力光学驱动有望实现快速振幅调制和开关。与此同时，半导体光放大器（SOA）近期已被证明可用作集成振幅调制器和光学快门*29*，为实现激光功率和时序的全芯片控制提供了另一条途径。

锁定到原子参考后，谐振器无需重新进行参考校准，即可在毫秒量级的冷却时间窗内保持频率稳定性，从而能够在数百个周期中重复实现100兆赫的频率斜坡。这凸显了腔本身作为短期保持腔的固有能力，而这得益于高Q氮化硅腔所提供的出色短期相干性，以及其低功耗压电陶瓷驱动。此功能无需笨重的光学参考腔，并进一步实现集成化、小型化和低功耗运行。

展望未来，这种应力光学调谐方法与高带宽自注入锁定（SIL）架构兼容（*30,25*），在这种架构中，压电陶瓷调谐谐振器与激光器之间的直接反馈可进一步提升频率稳定性并扩大调谐范围。因此，压电陶瓷驱动的谐振器是原子和量子系统所需的一系列集成光子元件之一。将其与852纳米窄线宽外腔激光器（*31*）、780纳米自注入锁定激光器（*25*）以及集成蒸气室光谱参考相结合，该平台可实现冷原子传感器和钟的全光子化方案。此外，我们可以使用蒸气室饱和吸收光谱或磁光阱本身进行锁参考，如自锁定磁光阱架构所示（*32*），从而提供一种实现自主频率稳定的紧凑方案。

图6展示了我们对全集成冷原子控制系统的构想，该系统由本文展示的快速可调压电陶瓷–氮化硅谐振器实现。在这一架构中，一对自注入锁定的 780 纳米激光器提供冷却光和再泵浦光。独立的 PZT 执行器可稳定并调谐每台激光器。激光器之间的频率间隔由片上偏移拍频锁定设定，该锁定采用集成式定向耦合器和光电探测器实现。我们计划通过由压电陶瓷振幅控制驱动的临界耦合谐振器实现功率斜坡控制和快门控制，同时利用来自磁光阱（MOT）的荧光反馈提供绝对频率

基准。结合用于数据处理和反馈的集成电子器件（例如基于现场可编程门阵列的控制），这一系统构想为芯片级冷原子仪器的发展提供了路径，使激光频率、功率和原子读出均由同一光子平台统一控制。

总之，这种可编程、灵活的 PZT-on-SiN谐振器兼具低光学损耗、高调谐效率、宽带响应和低功耗，并能够作为保持腔运行，为原子量子实验执行可重复、快速且可编程的频率调谐。亚多普勒冷却的成功演示，为原子物理领域的集成频率控制确立了新范式。通过在单一光子平台上集成激光稳频、灵活调制和原子参考，这项工作为实现紧凑、节能且可扩展的冷原子仪器铺平了道路，助力量子传感与精密计量。

材料与方法

器件制造与封装

我们在厚度为 15-μm 的下包层上制作 PZT-on-SiN 谐振器件波导。该下包层由热二氧化硅构成，位于厚度为 1 mm、直径为 100 mm 的硅衬底上。随后，采用低压化学气相沉积（LPCVD），直接在热氧化层上沉积厚度为 120 nm 的化学计量比氮化硅层。使用 248 nm 深紫外步进光刻设备和 CF4/CHF3/O2气体进行电感耦合等离子体刻蚀，并通过光刻胶掩模对氮化硅层中的波导进行图形化。完成图形刻蚀后，采用等离子体增强化学气相沉积（PECVD）沉积厚度为 4-μm 的 SiO_2 上包层，所用前驱体为正硅酸四乙酯（TEOS）。将晶圆在 1050℃ 下退火 7 小时，再在 1150℃ 下退火 2 小时。PZT致动器堆叠层由溅射沉积的厚度为 40 nm 的 TiO_2 粘附层、溅射沉积的厚度为 150 nm 的 Pt底电极，以及通过化学溶液沉积（CSD）沉积的厚度为 1-μm 的 PZT 层（Zr/Ti 比为 52/48）组成。该堆叠层顶部覆盖一层溅射沉积的厚度为 100 nm 的 Pt顶电极。通过氩离子铣削对 PZT 和 Pt 电极进行图形化。致动器完成图形化后，通过剥离工艺蒸镀并图形化电气走线，其由 Cr/Pt/Au堆叠层构成，厚度分别为 20 nm、20 nm 和 730 nm。为降低电阻率并尽量减少电极上的金覆盖面积，我们电镀了一层厚度为 10-μm 的铜层，

该铜层采用光刻胶模具和溅射沉积的铜种子层进行电镀。随后使用溶剂去除光刻胶模具和铜种子层，以释放器件。

将晶圆切割，以从每个晶圆掩模版中分离出多个环形谐振器器件。使用导热环氧树脂将芯片粘接在安装于铝制外壳内的热电制冷器（TEC）顶部。在TEC上放置热敏电阻以稳定温度。一对保偏单光纤V形槽与谐振器总线对准，并用紫外固化环氧树脂粘接固定。通过金线键合，将PZT执行器的电触点连接至电路板；电路板通过电气馈通端子连接至外壳外部。在磁光阱运行和拍频测量期间，Vescent™ SLICE温度控制器将谐振器稳定性维持在 ≤ 0.1 mK。

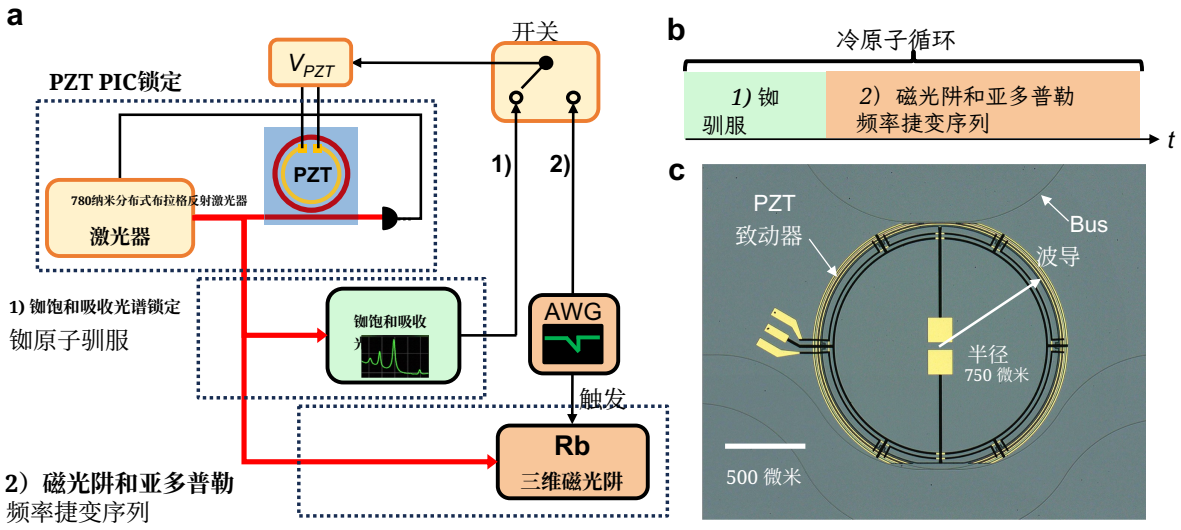


图1：采用灵活的集成式压电陶瓷的铷亚多普勒冷却工作原理

受控氮化硅腔。a）780 纳米激光器通过德雷弗-霍尔（PDH）锁定至集成谐振器，该谐振器包含一个PZT 应力光学致动器。激光器紧密跟踪谐振器（PZT PIC锁定），从而降低短时间尺度上的激光器漂移（即漂移保持）。通过驱动PZT，使用饱和吸收光谱（SAS）将锁定激光器稳定至铷超精细跃迁；该方法可实现铷原子驯服和长期频率稳定性。在冷却周期期间，我们关闭铷原子锁定（同时保持PZT PIC锁定处于激活状态），并向PZT施加快速控制信号，以迅速改变激光频率，用于铷磁光阱（磁光阱）和亚多普勒原子冷却。**b）**整个冷原子循环包括以下时段：激光器和PZT PIC由铷原子驯服（1），以及PZT PIC在原子冷却实验期间提供频率捷变和短期保持（2）。**c）**PZT驱动的氮化硅环形谐振腔显微图，环半径 750 μm。

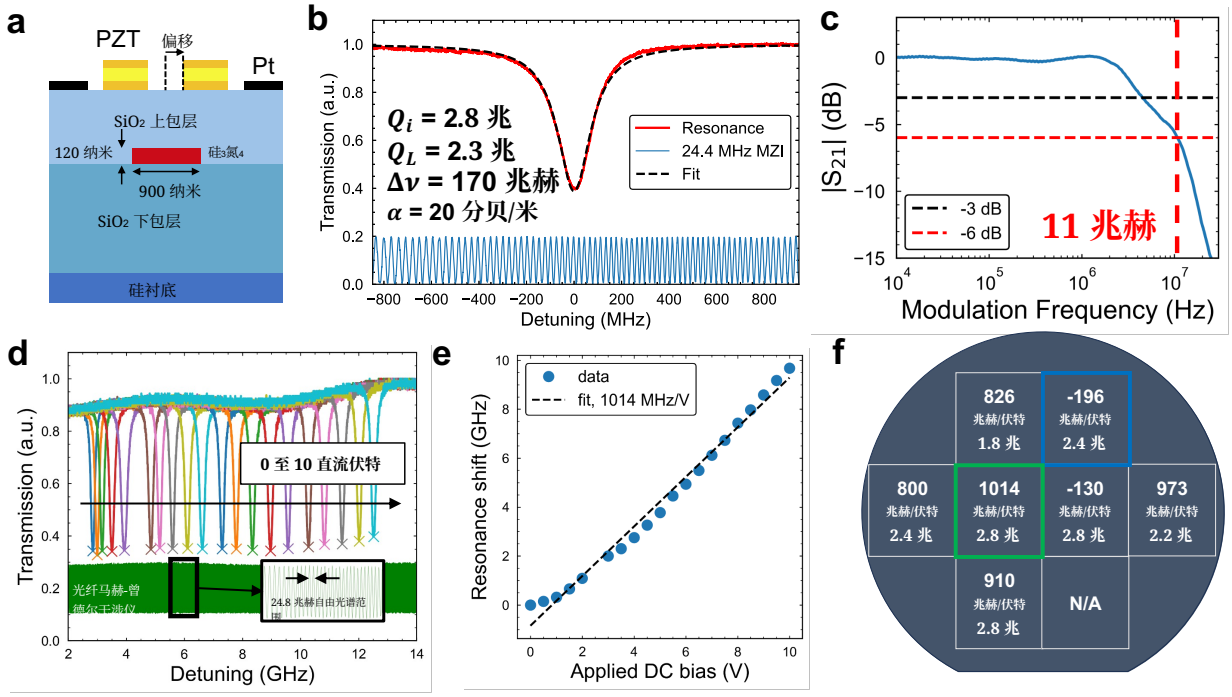


图 2：PZT光子集成电路谐振器的设计与表征。a) 硅的横截面带有 PZT执行器和铂热调谐器的氮化物环形谐振器，其中偏移量表示 PZT 与波导之间的横向位移。**b)** 环形谐振器的透射光谱品质因数（Q）测量结果为：本征品质因数（Q_i）为 280 万，加载品质因数（Q_L）为 2.3 M，损耗 α=20 分贝/米，总线宽 $\Delta\nu$ 为 170 兆赫。使用非平衡马赫-曾德尔干涉仪（MZI，蓝色曲线）校准频率失谐。**c)** PZT 应力光学小信号调制的频率响应。调制带宽（6 dB）为 11 兆赫。**d)**单个共振峰的透射光谱随施加于 PZT 的偏置电压变化。使用非平衡马赫-曾德尔干涉仪（光纤马赫-曾德尔干涉仪，绿色曲线）校准频率调谐。**e)** 共振频率偏移随施加的直流偏置变化。测得的调谐强度为 1 GHz/V ≈ 2 pm/V。**f)** 4 英寸晶圆深紫外步进光刻曝光掩模版分布图。每个掩模版包含多个器件；我们仅报告掩模版中单个直通型谐振器器件的数据（PZT 调谐强度、Qi）。绿色轮廓：调谐强度最大的器件；蓝色轮廓：用于原子冷却演示的器件；N/A：因器件损坏而不适用。

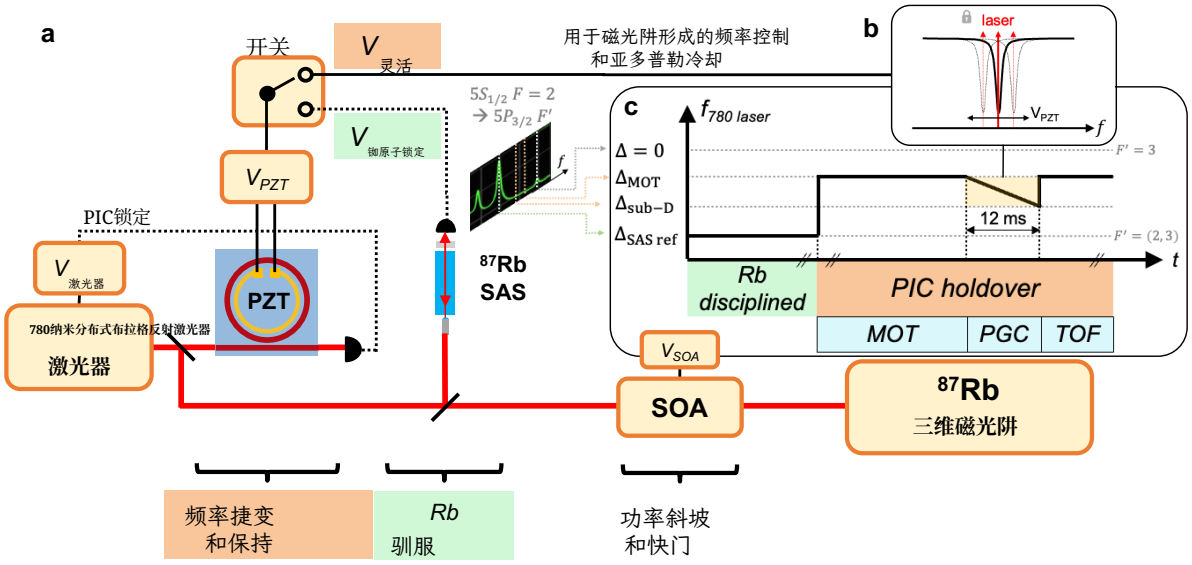


图 3：**冷原子实验示意图。a)** 780 纳米 DBR 冷却激光器锁定至 PZT光子集成电路谐振腔，以减小激光器漂移（即保持），并采用 V_{PZT}进行锁定激光器频率控制。PZT 控制在快速频率控制（V_{agile}）之间切换，用于控制腔体，以实现：1）通过锁定至铷饱和吸收光谱（SAS）进行铷原子驯服；2）磁光阱形成和亚多普勒冷却。冷却激光通过半导体光放大器（SOA）放大；该放大器由电压控制（V_{SOA}），用于功率斜坡控制和快门控制，以进行亚多普勒冷却温度测量。**b)** V_{agile} 频率控制可调节冷却激光频率，使其在 PZT 致动器的调谐范围内实现任意激光频率控制，并以处于激光锁定范围内的速度进行调节。**c)** 一个冷原子实验周期的时序图，包括对 PZT光子集成电路谐振腔进行铷原子驯服，以及调谐 PIC，以设置冷却激光频率相对于铷超精细跃迁的位置。铷原子驯服在强 $F' = (2, 3)$交叉跃迁处进行，持续 25 毫秒（见图S5）。通过施加设定电压使 PZT 跃变，从而将冷却激光设定在相对于冷却（$F' = 3$）跃迁的 Δ_{MOT} 失谐处。完成磁光阱装载后，向 PZT 施加快速频率控制信号，在 12 毫秒内使激光频率快速斜坡变化 15 兆赫，以进行偏振梯度冷却（PGC），从而实现亚多普勒冷却；在飞行时间（TOF）阶段测量冷却效果。

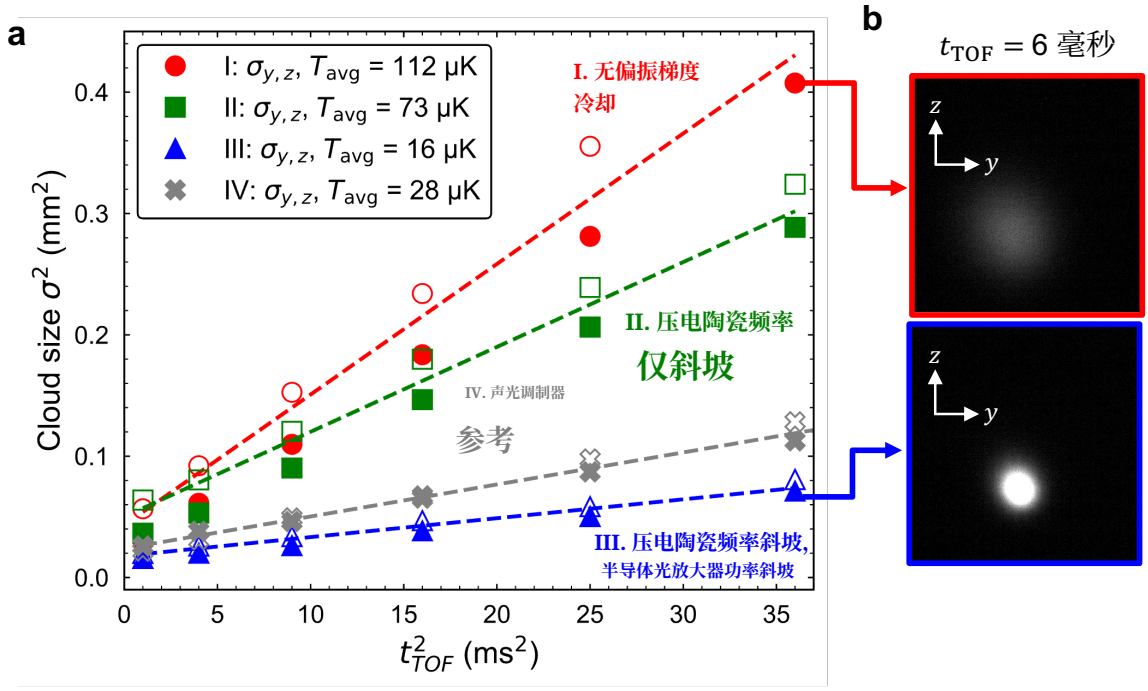


图 4：不同冷却激光器控制配置下的磁光阱温度测量。

a) 飞行时间（TOF）原子云温度测量：对于不同的平方飞行时间t^2_{TOF}，沿 z（空心标记）和 y（实心标记）方向的云半径平方。线性拟合对应于$\sigma_i^2 = \sigma_{i,0}^2 + \frac{k_B T_i}{m} t^2_{\mathrm{TOF}}$，其中 σ_i 是云沿某一轴的高斯标准差（y，z），$\sigma_{i,0}$是云的初始宽度，k_B是玻尔兹曼常数，m是单个 ^{87}铷原子的质量，T_i 是沿某一轴的温度。实验配置（I–IV）的示意图见图 S4。**c)** 自由膨胀 t_{TOF} = 6 毫秒后的磁光阱原子云荧光图像。两幅图像使用相同的色标。

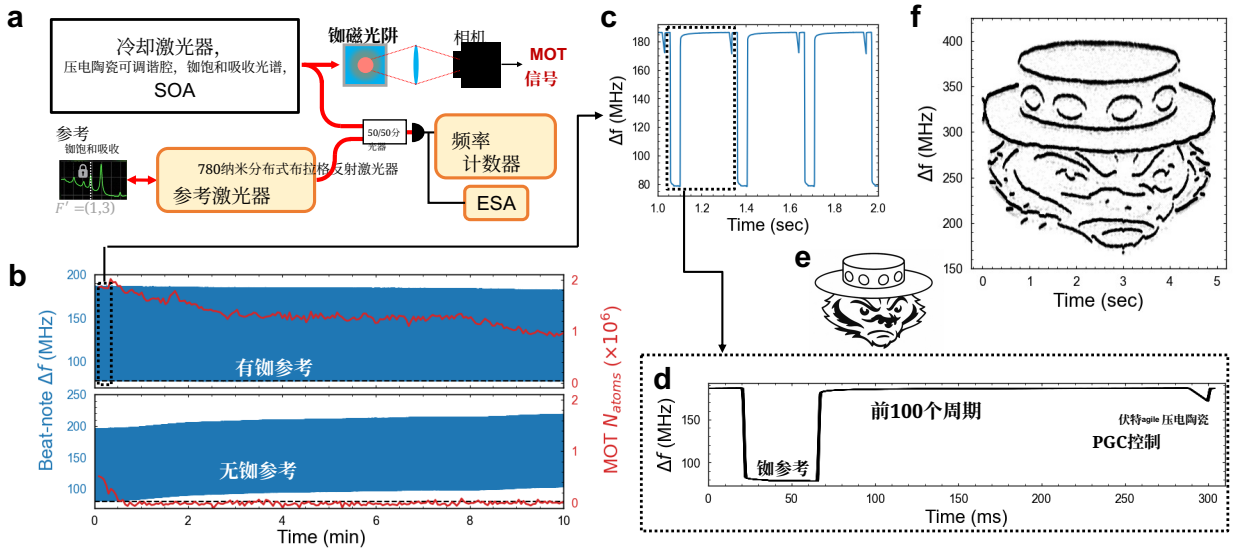


图5：冷却激光频率灵活性测量。a)监测磁光阱和亚多普勒冷却期间由压电陶瓷控制的冷却激光频率的示意图。一个参考780 nm DBR激光器锁定到另一套铷光谱系统，参考激光器与冷却激光器之间的外差拍频由光电二极管和频率计数器记录。在该序列期间，拍频由电子频谱分析仪（ESA）监测，并从相机中提取磁光阱荧光信号。**b)** 频率计数器记录的连续运行20分钟期间的激光拍频。当PZT腔重新参考铷饱和吸收光谱（使用铷参考时，顶部）时，在周期的参考（磁光阱形成）阶段，拍频保持在78兆赫（185兆赫）附近。我们全程记录磁光阱原子数。不使用铷参考（底部）时，漂移会导致捕获原子在运行的第一分钟内损失。**c)** （b，顶部）中六个周期的拍频放大图。**(d)** 将（c）中的一个周期与100个连续周期叠加，显示该期间压电陶瓷响应的稳定性。第一次跳变具有25毫秒的铷参考时间，290毫秒处的三角斜坡是偏振梯度冷却斜坡。**(e)**预编程参考图像，展示了**(f)**中所示的预期激光拍频轨迹。

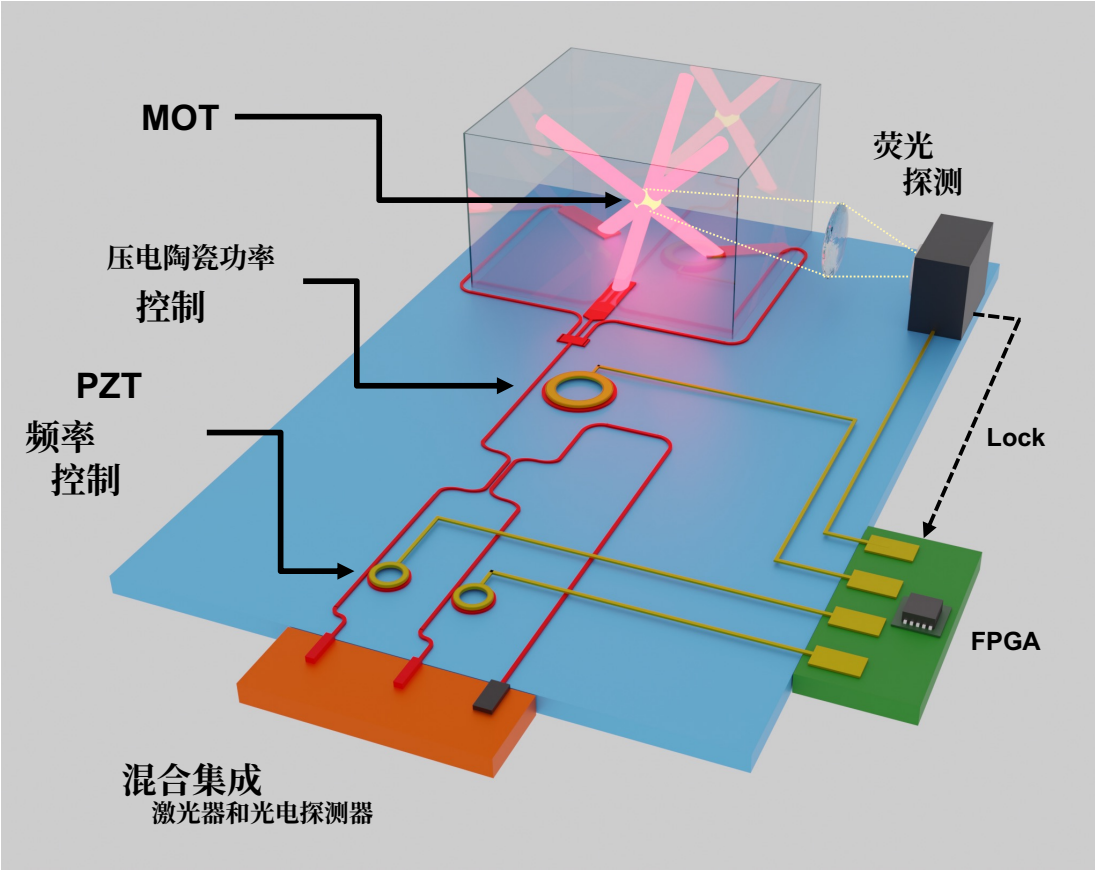


图6：由780纳米锆钛酸铅谐振器支持的冷原子集成系统示例。一对由混合集成边发射激光器和 PZT-on-SiN谐振器构成的自注入锁定激光器，可为磁光阱提供频率可调冷却与再泵浦激光器。激光器之间的频率间隔通过偏移拍频锁定控制，该锁定由定向耦合器分光器和光电探测器实现。功率快门控制和斜坡调节由临界耦合的 PZT 谐振器控制。冷却激光器的绝对频率根据磁光阱荧光反馈设定。

参考文献和注释

1. A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, P. Schmidt, 《光学原子钟》。《现代物理学评论》**87** (2), 637–701 (2015), doi:10.1103/RevModPhys.87.637, https://link . aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.87.637。

2. T. M. Graham，等，中性原子量子计算机上的多量子比特纠缠与算法。《自然》**604** (7906)，457–462（2022），doi:10.1038/s41586-022-04603-6，https: // www.nature.com/articles/s41586-022-04603-6。

3. B. Stray，等，用于重力制图的量子传感。《自然》**602** (7898)，590–594（2022），doi:10.1038/s41586-021-04315-3，https://www.nature.co m/articles/s41586-021-0 4315-3。

4. J.Lee，等，采用高数据速率光栅磁光阱和兼容光子集成电路的激光系统的紧凑型冷原子干涉仪。《自然·通讯》**13** (1)，5131（2022），doi:10.1038/s41467-022-31410-4, https://www.nature.com/articles/s4 1467-022-31410-4。

5. W. Loh，等，利用微加工铷原子池实现微谐振器布里渊激光器稳频。《Optics Express》**24** (13), 14513 (2016), doi:10.1364/OE.24.014513, https://www.osap ublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-24-13-14513。

6. W. Liang，等，用于频率计量的紧凑型稳频半导体激光器。《应用光学》**54**(11), 3353 (2015), doi:10.1364/AO.54.003353, https://opg.optica.org/abs tract.cfm?URI= ao-54-11-3353。

7. F. Theron，等，用于机载原子干涉测量的窄线宽单激光器光源系统。《应用物理 B》**118** (1), 1–5 (2015), doi:10.1007/s00340-014-5975-y, https://doi.or g/10.1007/s00340-014-5975-y。

8. J. Dalibard, C. Cohen-Tannoudji, 《利用偏振梯度实现低于多普勒极限的激光冷却：简单理论模型》。《美国光学学会杂志 *B*》**6**(11), 2023–2045 (1989), doi:10.1364/JOSAB.6.00 2023, https://opg.optica.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-6-11-2023。

9. S. Rosi，等，Λ增强的灰色摩拉塞冷却：铷-87 原子 D2 跃迁。《科学报告》**8** (1), 1301 (2018), doi:10.1038/s41598-018-19814-z, https://www.nature.com / articles/s41598-018-19814-z。

10. B. Wiegand，等，单激光器交替频率磁光阱。《科学仪器评论》**90** (10)，103202（2019），doi:10.1063/1.5110722, https://pubs.aip.org/rsi/article/90/10/103202/360725/A-single-laser-alternating-frequency-magneto。

11. S.-w. Chiow，N. Yu，使用单激光器的紧凑型原子干涉仪。《应用物理 *B*》**124**(6), 96（2018），doi:10.1007/s00340-018-6965-2, https://doi.org/10.1007/s00340-018-6 965-2。

12. A. Kodigala，等，用于冷原子干涉测量的高性能硅光单边带调制器。《科学进展》**10**(28)，eade4454（2024），doi:10.1126/sciadv.ade4454, https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.ade4454。

13. E. Wang，等，用于单频光纤激光器的灵活偏移频率锁定。《科学仪器评论》**93**(8), 083002 (2022), doi:10.1063/5.0089303, https://doi.org/10 .1063/5.0089303.

14. D. J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroek, A. Leinse, C. Roeloffzen，《硅光子学中的氮化硅》。《*IEEE*会刊》**106** (12), 2209–2231 (2018), doi:10.1109/JPRO C.2018.2861576, https://ieeexplore.ieee.org/document/8472140/.

15. M. W. Puckett，等，具有亚兆赫线宽的4.22亿本征品质因数平面集成全波导谐振器。《自然通讯》**12** (1), 934 (2021), doi:10.1038/ s41467-021-21205-4, https://www.nature.com/articles/s41467-021-21205-4.

16. K. Alexander，等，《硅氮化物平台上的纳米光子波克尔斯调制器》。《自然·通讯》**9** (1), 3444 (2018), doi:10.1038/s41467-018-05846-6, https://www.nature.com/articles/s41467-018-05846-6.

17. W. Jin, R. G. Polcawich, P. A. Morton, J. E. Bowers, 《压电调谐氮化硅环形谐振器》。*OpticsExpress***26**(3), 3174–3187 (2018), doi:10.1364/OE.26.003174, https: // opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-26-3-3174.

18. P. R. Stanfield, A. J. Leenheer, C. P. Michael, R. Sims, M. Eichenfield，兼容 CMOS 的压电光机械可调光子学，适用于可见波长和低温。*Optics Express* **27** (20), 28588–28605 (2019), doi:10.1364/OE.27.028588, https://opg.op tica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-27-20-28588.

19. J. Wang, K. Liu, M. W. Harrington, R. Q. Rudy, D. J. Blumenthal，用于光学控制应用的氮化硅应力光学微谐振器调制器。*OpticsExpress***30**(18), 31816– 31827 (2022), doi:10.1364/OE.467721, https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?u ri= oe-30-18-31816.

20. J. Wang、K. Liu、A. Isichenko、R. Q. Rudy、D. J. Blumenthal，采用超低功耗压电控制的集成可编程强耦合三环谐振器光子分子。*Optics Letters* **48** (9)，2373–2376（2023），doi:10.1364/OL.482567，https://opg.optica.o rg/ol/abstract.cfm?uri= ol-48-9-2373。

21. A. Siddharth，等，窄线宽、压电可调谐集成光子蓝色激光器（2025），doi:10.48550/arXiv.2508.02568，http://arxiv.org/abs/2508.02568。

22. N. Montifiore，等，用于原子与量子应用的集成低功耗蓝光压电陶瓷氮化硅环形调制器，载于*CLEO 2025*，论文 *SS160_5*（Optica出版集团）（2025），第 SS160_5 页，doi:10.1364/CLEO_SI.2025.SS160_5，https://opg.optica.org/a bstract.cfm?uri= CLEO_SI-2025-SS160_5。

23. A. Isichenko，等，采用原子基准驯服光子集成谐振器的多激光器稳频（2025），doi:10.48550/arXiv.2509.09124，http://arxiv.org/abs/2509.09124。

24. P. D. Lett，等，《低于多普勒极限的原子激光冷却》。《物理评论快报》**61**(2), 169–172 (1988), doi:10.1103/PhysRevLett.61.169, https://link.aps.org / doi/10.1103/PhysRevLett.61.169。

25. A. Isichenko，等，自注入锁定的780纳米混合集成激光器：亚赫兹基频、亚千赫兹积分线宽。《科学报告》**14**(1), 27015 (2024), doi:10.1038/s41598-024 -76699-x, https://www.nature.com/articles/s41598-024-76699-x。

26. A. Isichenko，等，用于铷原子三维磁光阱的光子集成光束传输。《自然·通讯》**14** (1), 3080 (2023), doi:10.1038/s41467-023-38818-6, https: // www.nature.com/articles/s41467-023-38818-6。

27. T. A. Huffman，等，面向多功能应用的超低损耗氮化硅/二氧化硅平台中的集成谐振器。*IEEE*《量子电子学精选主题期刊》**24** (4), 1–9 (2018), doi:10.1109/JSTQE.2018.2818459。

28. H. Xie，等，用于自注入锁定激光器高速电光调谐的氮化铝光子学。*Optics Letters* **50** (18), 5913 (2025), doi:1 0 . 1 3 6 4 / O L. 5 7 131 4, https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ol-50-18-5913。

29. E. Kittlaus，等，《基于半导体光放大器的激光系统，用于冷原子传感器》。《*EPJ*量子技术》**12** (1), 1–19 (2025), doi:10.1140/epjqt/s40507-025-00348-z, https://epjquantumtechnology.springeropen.com/articles/10.1140/epjqt/s 40507-025-00348-z。

30. M. Corato-Zanarella，等，《从近紫外到近红外波长范围内可广泛调谐的窄线宽芯片级激光器》。《自然·光子学》pp. 1–8 (2022), doi:10.1038/s415 66-022-01120-w, https://www.nature.com/articles/s41566-022-01120-w。

31. H. Nejadriahi，等，《低于100赫兹的本征线宽 852纳米氮化硅外腔激光器》。《Optics Letters》**49** (24), 7254–7257 (2024), doi:10.1364/OL.543307, https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-49-24-7254。

32. C. S. Fletcher, J. E. Lye, N. P. Robins, J. D. Close，《自锁定磁光阱》。《光学通讯》**212** (1), 85–88 (2002)，doi:10.1016/S0030-4018(02)01952-1，https: // www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401802019521。

33. B. Wiegand、B. Leykauf、R. Jördens、M. Krutzik，Linien：一种通用、易于使用的开源、基于现场可编程门阵列的频率稳定与光谱学参数优化工具。

《科学仪器评论》**93**(6)，063001（2022），doi:10.1063/5.0090384，https: // doi.org/10.1063/5.0090384。

34. L. Chen，等，《平面集成磁光阱》。《物理评论·应用》**17** (3)，034031 (2022)，doi:10.1103/PhysRevApplied.17.034031，https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.17.034031。

35. D. A. Steck，铷-*87 D*线数据，技术报告，洛斯阿拉莫斯国家实验室 (2001)，https://steck.us/alkalidata/rubidium87numbers.1.6.pdf。

36. Thorlabs公司，*F810APC-780-AutoCADPDF*，技术报告，Thorlabs (2021)，https://www.thorlabs.com/drawings/6eb3bcb4bdcdce79-C36D5BFC-9849-9B12-5A99830D819EB75B/F810APC-780-AutoCADPDF.pdf。

37. Thorlabs公司，紧凑型科学数字相机—用户指南（*CS*系列）(2025),https: // www.thorlabs.com/drawings/6eb3bcb4bdcdce79-C36D5BFC-9849-9B12-5A99830D819EB75B/CS135MU-Manual.pdf.

38. Semiconductor Components Industries有限责任公司，*NOIP1SN1300A/D – PYTHON 1.3/0.5/0.3*百万像素全局快门*CMOS*图像传感器：数据手册，NOIP1SN1300A/D技术数据手册，安森美半导体，美国亚利桑那州菲尼克斯(2021)，https://www. onsemi.com/download/data-sheet/pdf/noip1sn1300a-d.pdf.

致谢

我们感谢 Catie LeDesma 和 Kendall Mehling（科罗拉多大学博尔德分校），以及 Jeff Pulskamp（美国陆军研究实验室）提供了有益的讨论。

资助： 本研究由美国陆军研究实验室与 SEMI-PNT 共同赞助，并根据合作协议编号 W911NF-22-2-0050开展。本文所述观点和结论仅代表作者观点，不应被解读为代表美国陆军研究实验室、美国政府或 SEMI 的明示或默示官方政策。美国政府获授权进行复制和分发

本文件中的重印件，用于政府用途，不受其中任何版权声明的限制。本研究还获得了美国陆军研究实验室合作协议编号W911NF-22-2-0056（用于 PZT 制造）、NSF QuSeC-TAQS（2326784）（用于 PZT 与原子的集成及冷原子实验）以及 NASA 量子路径研究所（80NSSC23K1343）（用于器件表征）的资助。S.C. 获得了美国能源部/国家核安全管理局项目编号 DE-NA0004196 的支持。本材料中表达的任何意见、发现、结论或建议均为作者的观点，不一定反映美国国家航空航天局（NASA）的观点。

作者贡献： A.I.、S.C.、J.T.C. 和 D.J.B. 撰写了稿件。A.I. 和 N.M. 搭建了 PZT 光子集成电路器件并进行了激光锁定。S.C.、A.I. 和 N.M. 搭建了用于铷光谱参考的锁定环路。S.C. 进行了磁光阱温度表征。A.I.、N.M. 和 J.W. 对 PZT 光子集成电路器件进行了表征。J.W. 和 N.C. 设计了这些器件。N.M. 对 PZT 光子集成电路器件进行了封装。M.D 在 P.M. 的协助下测量了频率计拍频信号。S.C. 和 X.Y. 搭建了铷磁光阱实验。N.I. 协助进行了磁光阱温度表征和锁定电子设备的工作。M.W.H. 协助开展了锁定激光器调谐和拍频测量的初期工作。C.Z. 对器件进行了切割，以便封装。I.M.K. 制作了由 R.Q.R. 设计的 PZT 执行器。J.T.C. 和 D.J.B. 监督并领导了科学合作。所有作者均阅读并批准了最终稿件。

利益冲突： D.J.B. 的工作由 ColdQuanta（以 Infleqtion 名义经营）资助。D.J.B. 曾为 Infleqtion 提供咨询服务并获得报酬，且持有其股票。其他所有作者均无须声明利益冲突。

数据和材料可用性： 本文所述结果的基础数据目前尚未公开，但可根据合理请求向作者获取。

补充材料

补充文本第 S1 和 S2 节 图 S1 至
S6 表 S1 至 S2 参考文献 *(7-38)*

补充材料

使用可编程敏捷集成式 PZT-on-SiN 谐振器进行亚多普勒铷原子冷却

Andrei Isichenko 和 Steven Carpenter 等

通讯作者：

Jennifer T. Choy（jennifer.choy@wisc.edu）和 Daniel J. Blumenthal（danb@ucsb.edu）

此 PDF 文件包含：

补充文本 图 S1 至
S6 表 S1 至 S2 参
考文献 *(7-38)*

1 PZT 谐振器表征与运行

小信号调制与迟滞

我们对来自同一晶圆的多个 PZT-on-SiN 环形谐振器器件进行了表征，并在此总结两种器件的代表性结果：芯片6具有最高的调谐效率，而芯片3则用于亚多普勒冷却演示（图 S1）。我们使用连接到 PZT致动器电极和快速光电探测器的 是德科技 N5247B PNA-X矢量网络分析仪，测量了小信号电学到光学响应 S_{21} 。将激光器调谐至光学共振的正交点，并将 PZT 偏置在 3 V 后，我们测量了压电陶瓷调谐谐振器的幅度调制频率响应。

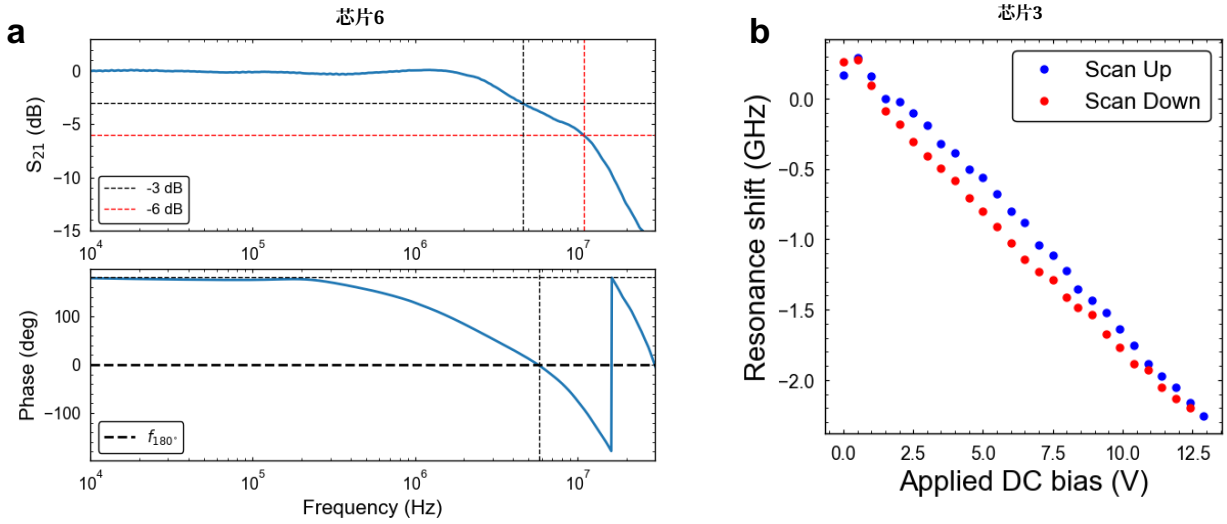


图 S1：**PZT 器件表征。a**）对芯片6进行的频率响应测量，该芯片具有最强的调谐强度和最快的响应速度。−3 dB和−6 dB响应滚降分别位于4.5兆赫和11兆赫处。180度相位滞后点位于5.8兆赫处。**b**）用于亚多普勒演示的芯片3的迟滞测量。

对于芯片6，−3 dB和−6 dB响应滚降分别出现在4.5 MHz和11 MHz处，并在5.8 MHz处观察到 180° 相位滞后点（图S1A）。对于芯片3，测得−6 dB滚降出现在12.3 MHz处。这些压电陶瓷环形谐振器器件的平均电阻和电容分别约为 2 Ω 和700 pF，对应的RC限制电带宽为 $f_e = 1/(2\pi RC) \approx 114$MHz。光子

芯片6的腔寿命所限定的带宽为 $f_o = c/(\lambda Q_L) = 170$ MHz。总调制带宽可表示为电学、光机（OM）和光学限制的综合贡献：

$$\frac{1}{f_{\mathrm{BW}}^2} = \frac{1}{f_e^2} + \frac{1}{f_{\mathrm{OM}}^2} + \frac{1}{f_o^2} \tag{S1}$$

该分析表明，测得的约11兆赫带宽受压电执行器的光机响应限制，而非受电学或光学约束限制。

PZT执行器表现出迟滞，这可能会影响光谱参考步骤之后锁定激光器的绝对频率。图S1B展示了芯片3的静态调谐测量结果；芯片3是亚多普勒冷却演示中所使用的器件，其中正向（向上扫描）和反向（向下扫描）直流电压扫描显示出轻微的偏置相关迟滞。这种迟滞主要表现为两条调谐曲线之间的偏移，而调谐斜率在整个电压范围内仍近似呈线性。因此，所施加电压与激光频率之间形成了依赖历史的映射关系。在重复致动循环期间，这种效应可能导致冷却激光失谐缓慢变化，进而产生可观测的磁光阱荧光变化，如下文所述。

激光锁定

PZT-on-SiN谐振器件经过封装并集成到实验系统中，如图 S2 所示。封装后的PIC安装在温控台上，并通过引线键合接入电路，以便对PZT执行器和集成热调谐器进行电气控制（图 S2B、C）。激光稳频采用Pound–Drever–Hall（PDH）锁定方案，完整的激光稳频架构示意图见图 S3A。激光器到PIC锁定的PDH伺服器基于Red Pitaya FPGA平台，使用Linien锁定应用程序实现（*33*）；铷光谱锁定则使用Vescent D2-125-PL伺服器，利用其可触发的相对电流跳变功能。为两个锁定阶段生成误差信号，我们通过直接电流调制向780 nm DBR 激光器施加单一的1.2 MHz调制音。我们将输入激光器电流控制器的信号衰减，以限制频率调制范围和引入的噪声。该调制音用作两个锁定环路的本振解调信号。由PDH误差信号提取的环内频率噪声功率谱密度（PSD）如图 S3B 所示。

启用激光器到PIC锁定后，通过向PZT执行器施加电压即可调谐锁定激光器的频率。图 S3C 显示了线性斜坡调节压电陶瓷电压并扫描铷饱和吸收光谱（SAS）特征时获得的误差信号。

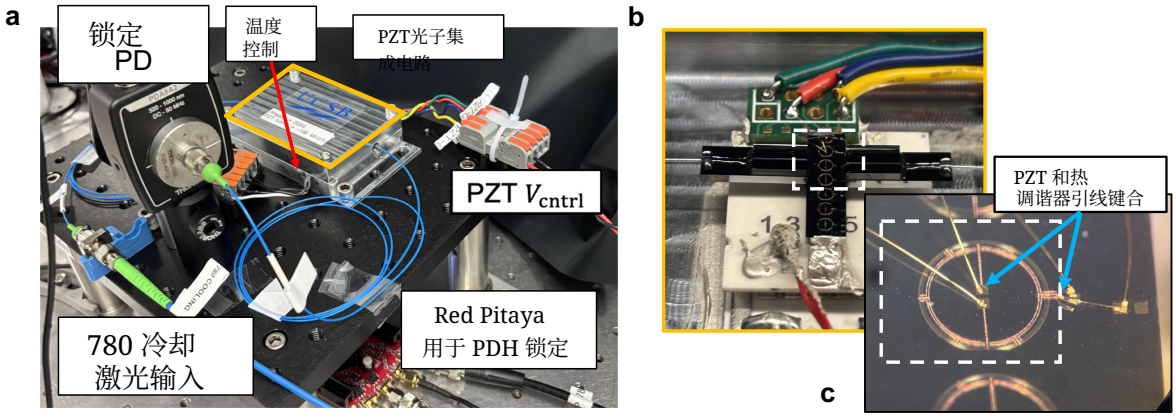
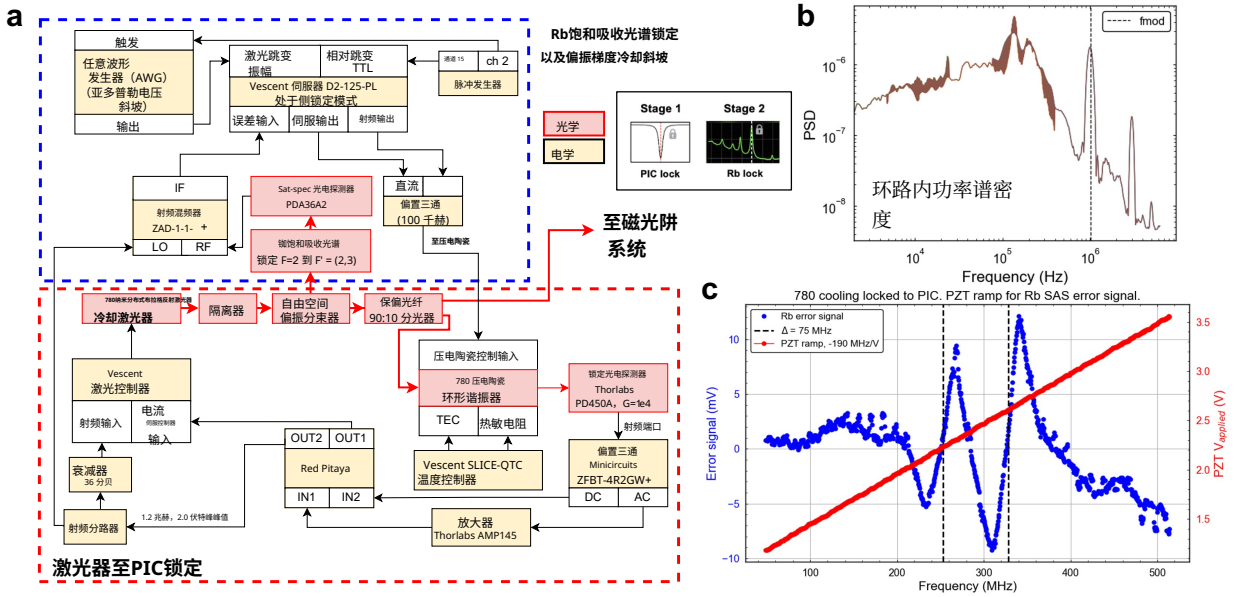


图 S2：**PZT光子集成电路封装。a)** 用于激光稳频和压电陶瓷光子集成电路控制的装置，其中橙色标出的是外壳内的封装光子集成电路。该封装采用温度控制，并设有 PZT 控制输入端。Red Pitaya现场可编程门阵列用作伺服控制器，将 780 激光器锁定至 PZT光子集成电路谐振器。**b)** 带有 V形槽光纤附件的 PZT光子集成电路谐振器芯片。芯片与热电冷却器连接。**c)**用于控制 PZT执行器和热调谐器的引线键合谐振器。



图S3：**激光稳频。a)** 激光器到PIC锁定以及压电陶瓷锁定到铷光谱和偏振梯度冷却斜坡调节的示意图。**b)** 激光器到PIC的PDH锁定的环路内功率谱密度（PSD）。我们采用直接调制激光电流、频率为1.2 兆赫的调制来生成激光锁定和铷原子锁定的误差信号。**c)**在激光器到PIC锁定启用时斜坡调节压电陶瓷所得的铷光谱锁定误差信号。根据超精细峰（$F' = (1,3)$ 和 $F' = (2,3)$，间隔为75 兆赫）的已知间距，我们得出频率调谐系数为−190 兆赫/伏特，与图2中的测量值相近。

2 磁光阱系统的表征与测量

我们使用了一个六束光（其中三束光采用反向反射）的自由空间 ^{87}铷磁光阱（MOT）。780 纳米激光器驱动红失谐的 ^{87}铷 $5^2S_{1/2}\ F = 2 \rightarrow 5^2P_{3/2}\ F' = 3$ 跃迁，而独立的 795纳米分布式布拉格反射激光器作为再泵浦光，作用于 ^{87}铷 $5^2S_{1/2}\ F = 1 \rightarrow 5^2P_{1/2}\ F' = 2$ 跃迁。我们的系统使用了一个自制的二维印刷电路板线圈，其设计最初受 Chen 等人（*34*）的启发。线圈由定制电路控制，开关时间为 ~ 100 μs。在所有配置中，我们都使用半导体光放大器（Thorlabs BOA780P）进行冷却功率控制和快门控制。

本研究中的系统配置

我们采用四种硬件与控制配置进行亚多普勒冷却，如图 4A 所总结。参考配置在图 4 中标记为案例 IV，采用了一个声光调制器（见图 S4）。在这一传统设置中，激光器锁定于 [87] 铷、$5^2S_{1/2}$、$F = 2 \rightarrow 5^2P_{3/2}$、$F' = 1$、3 交叉跃迁，并双程通过一个设定在约 95 MHz 的声光调制器，从而相对于冷却跃迁产生 ~22MHz 的红失谐。通过分别调制声光调制器驱动和半导体光放大器偏置，实现了频率斜坡和强度斜坡。图 4 展示了在该配置下获得的温度最低的铷原子云的飞行时间数据。

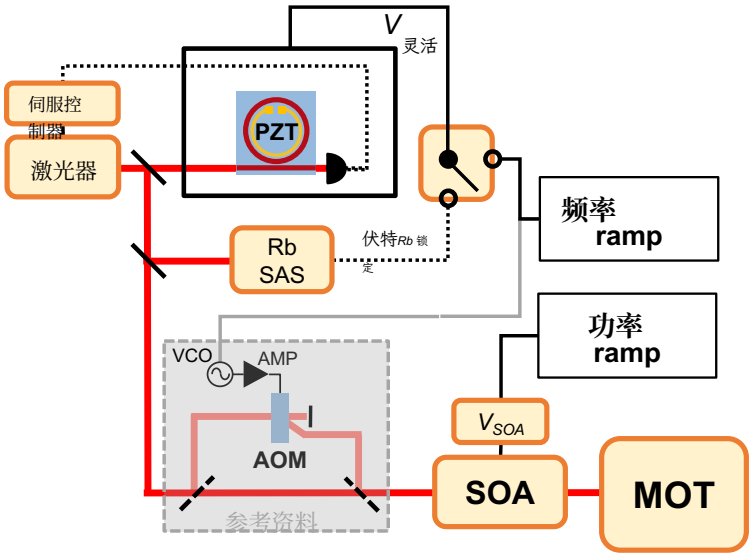


图 S4：磁光阱　用于温度测量的系统配置。780 纳米冷却激光器锁定到压电陶瓷可调谐腔。激光器跟踪腔的共振频率，而腔本身则锁定到铷饱和吸收光谱（SAS）或所施加的频率斜坡信号。功率斜坡信号通过调节流经半导体光放大器（SOA）的电流，控制输送至磁光阱的冷却光束功率。记录了四种情况下的磁光阱温度：（I）不进行偏振梯度冷却（PGC）的磁光阱（即不施加频率斜坡或功率斜坡）；（II）PZT控制频率斜坡（不施加功率斜坡）；（III）PZT控制频率斜坡并由SOA控制功率斜坡；（IV）声光调制器控制频率斜坡并由SOA控制功率斜坡（声光调制器参考方案）。情况I、II、III均未使用声光调制器。声光调制器由射频放大器（AMP）和压控振荡器（VCO）驱动。

所有其他配置（I、II、IV）均采用双级锁定（激光器到腔以及腔到铷饱和吸收光谱），并将声光调制器移出光路。每种情况下，在实验中由铷基准控制的阶段（图3C），光学腔均锁定到^{87}Rb，$5^2S_{1/2}$，$F = 2 \rightarrow 5^2P_{3/2}$，$F' = 2$，3交叉跃迁（注意这与配置 IV 中的 $F' = 1$，3交叉跃迁不同）。磁光阱形成223毫秒后，要么施加持续12 毫秒的偏振梯度冷却（PGC）斜坡序列（II和III），要么保持磁光阱状态不变（I）。通过飞行时间（TOF）成像测定原子云温度（详情见下文）。测试了两种经实验优化的偏振梯度冷却方案：仅频率斜坡调节（II），即通过对PZT致动器施加电压斜坡，使激光器进一步红失谐；以及分别使用PZT和SOA进行频率与强度联合斜坡调节（III）。作为对照，图 4 纳入了基于声光调制器的配置。集成式可调谐腔方案在不影响光束对准的情况下，提供了更大且更稳定（光功率方面）的调谐范围，是一种紧凑、节能的亚多普勒原子冷却替代方案。

原子数计算

结合其他实验条件，可以利用磁光阱荧光确定被俘获原子的数量：

$$N = \frac{1}{R_{\mathrm{scat}}} \frac{\mathrm{d}N_\gamma}{\mathrm{d}t}, \tag{S2}$$

其中，$\mathrm{d}N_\gamma / \mathrm{d}t$ 表示单位时间内向整个球面发射的光子速率。光子散射率 R_{scat} 由下式给出（*35*）

$$R_{\mathrm{scat}} = \frac{\Gamma}{2} \frac{\frac{I_{\mathrm{tot}}}{I_{\mathrm{sat}}}}{1 + \frac{I_{\mathrm{tot}}}{I_{\mathrm{sat}}} + 4\left(\frac{\Delta}{\Gamma}\right)^2} \tag{S3}$$

其中，$\Delta = 2\pi\,\delta f_{\mathrm{MHz}}$，$\delta f_{\mathrm{MHz}}$ 是冷却激光器相对于 ^{87}铷 $5^2S_{1/2}\,F = 2 \rightarrow 5^2P_{3/2}\,F' = 3$ 跃迁的频率失谐，单位为兆赫。I_{tot} 和 I_{sat} 分别是冷却光束的总强度和饱和能量。我们在玻璃真空室外紧贴其位置放置了一片平凸透镜来收集光线。随后，使用传统的复合相机镜头将光线成像到 Thorlabs CS135MU 相机的传感器上。

通过相机拍摄的数字图像，我们可以通过对一次曝光中感兴趣区域（$C_{x,\,y}$）内的（扣除背景后的）像素计数求和，并应用

转换因子来确定：

$$\frac{\mathrm{d}N_\gamma}{\mathrm{d}t} = \frac{4\pi \left(\sum_{ROI_{x,y}} C_{x,y}\right) G}{\Omega\, \eta_{\mathrm{QM}}\, \eta_{\mathrm{geo}}\, \Delta t_{exp}}, \tag{S4}$$

其中，G 是相机传感器的增益系数，η_{QM} 是相机在780纳米处的量子效率，η_{geo} 表示成像路径中的障碍物造成的光收集锥几何损耗，Ω 是光收集的立体角，Δt_{exp} 是相机曝光时长。通过仔细测量装置并使用 Zemax OpticStudio™进行仿真，得到了 Ω 和η_{geo} 的值。表 S1列出了计算原子数时使用的实验参数。

在偏振梯度冷却前拍摄磁光阱图像（如图S5所示，在 $\tau_{\mathrm{seq}} = 237$毫秒时），我们测得原子数为 ~ 5 兆。然而，磁光阱仅加载了227毫秒，这不足以在各周期之间完成充分的重新加载（尽管有部分原子重新捕获）。延长加载时间可以增加原子数，但会降低完整量子传感器可达到的采样率。

表 S1：用于确定磁光阱原子数的实验参数。

参数	**说明**	**数值**	**Ref.**
λ	^{87}铷 D2 跃迁波长	780.241 nm	(*35*)
Γ	^{87}铷 D_2 的自然线宽 （$5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$）跃迁	2π （6.066 兆赫）	(*35*)
σ_0	^{87}铷的共振截面强度 $F = 2 \rightarrow F' = 3$ 和各向同性光偏振	1.36×10^{-12} 厘米^2	(*35*)
I_{sat}	^{87}铷的饱和强度（ $F = 2 \rightarrow F' = 3$） 各向同性光偏振下的跃迁	3.577 毫瓦 cm^{-2}	(*35*)
Δ	与.....的（角）频率失谐 $F = 2 \rightarrow F' = 3$ 跃迁（适用于配置 I、II, 和 III）。通过拍频测量确定	-2π (25.5 ± 0.2 兆赫)	
$P_{\mathrm{x,y}}$	x 轴和 y 轴冷却光束的平均功率 在进入原子气室前测量	6。22 ± 0。05 毫瓦	

参数	说明	数值	Ref.
P_z	z 轴光束在刚 进入原子气室前测得的平均功率。由于这条光路经过 扩束器，并被 PCB 线圈的孔径（直径 6.5 mm），该 数值是在孔径之后测得的	1。00 ± 0。05 毫瓦	
$A_{x,y}$	使用 x 轴和 y 轴冷却光束的面积，利用 $1/e^2$ Thorlabs F810APC-780 的光束宽度 准直器	0.442 厘米^2	(*36*)
A_z	z轴冷却光束的面积，使用以下宽度： PCB线圈孔径（直径 6.5 毫米）	0.332 厘米^2	
$I_{x,y}$	x 轴和 y 轴冷却光束的平均强度 玻璃池前	$P_{x,y}/A_{x,y}$ = 14。07 ± 0。11 毫瓦 厘米$^{-2}$	
I_z	z轴冷却光束的平均强度	P_z/A_z = 3。00 ± 0。15 毫瓦 厘米$^{-2}$	
T_{cell}	测得的通过该层的透射率 未镀膜玻璃真空池以 45° 入射	0。96 ± 0。01	
I_{tot}	原子所在位置处六束捕获光束的光强总和 三束输入光束和三束 反向反射（RR）光束。z 轴光束穿过 增透膜池时垂直入射，且 可忽略反射。假设完全 反向反射	$2T_{cell}\, I_{x,y} + 2T_{cell}^2\, I_{x,y} +$ $2I_z$ = 59.0 ± 1.0 毫瓦 厘米$^{-2}$	
Ω	收集光的立体角。此值是 根据实验测量计算得出的，并 在 Zemax OpticStudio 中模拟的透镜参数。 最终的半角收集锥为 6。0°	0。035 球 面度	

参数	说明	数值	Ref.
η_{geo}	几何光收集效率，假设 B涂层透镜的透射率 接近 1（该光线在距法线 ≤ 6° 处收集 入射）。这种损耗是由于轻微遮挡造成的 光学支架对收集锥的遮挡	η_{geo} = 0。74	
η_{QM}	相机（Thorlabs CS135MU）的量子效率 在 λ = 780 nm处	0.45 e^- 每个光子	(*37*)
G	相机传感器（onsemi NOIP1SN1300A-QTI） 增益系数。LSB 表示一次 “最低有效位”翻转	10.42 e^- 每个最低有效位	(*38*)
Δt_{exp}	相机曝光时间	0.5 毫秒（单次拍摄），5 毫秒（累积10次）	

温度测量

我们通过对在弹道膨胀的 ^{87}铷磁光阱原子云进行成像来确定其温度，曝光时间为0.5毫秒，针对一系列不同的 τ_{TOF} （飞行时间）进行测量。在 τ_{TOF} = 0时，我们关闭冷却和再泵浦激光，并迅速关闭磁线圈。需要注意的是，对于偏振梯度冷却，我们会更早关闭线圈。我们用于实验测定磁光阱温度的时序信息如图S5所示。

对于六个不同的 τ_{TOF} 设置（1、2、3、4、5、6毫秒），我们采集了背景扣除图像，并根据线性化弹道膨胀方程拟合云团宽度：

$$\sigma_y^2(\tau_{\mathrm{TOF}}) = \sigma_{y,0}^2 + \frac{k_{\mathrm{B}}T_y}{m}\tau_{\mathrm{TOF}}^2, \qquad \sigma_z^2(\tau_{\mathrm{TOF}}) = \sigma_{z,0}^2 + \frac{k_{\mathrm{B}}T_z}{m}\tau_{\mathrm{TOF}}^2, \tag{S5}$$

其中，$\sigma_y(\tau_{\mathrm{TOF}})$、$\sigma_z(\tau_{\mathrm{TOF}})$分别是云团图像在各维度上的高斯拟合标准差，$l_{\mathrm{px}}$ 是校准像素尺寸，k_B 是玻尔兹曼常数，m 是 ^{87}铷的质量，T_y、T_z 分别是沿 y、z 轴的磁光阱温度。表S2列出了此计算所需的相关数值。

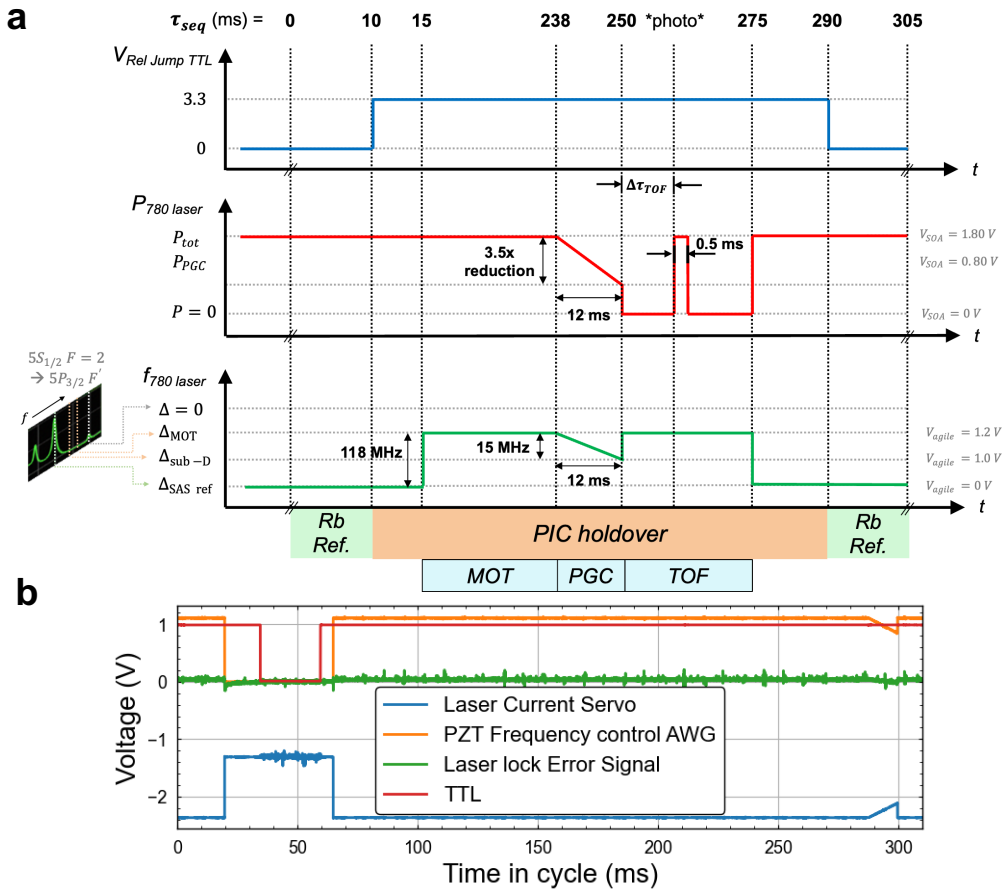


图 S5：**实验时序。a**）图 4 和图 S4 中配置 III 的时序图。所有飞行时间（TOF）测量均在重复运行的 305 毫秒控制序列中进行，飞行时间延迟 τ_{TOF} 在各次运行之间变化。继电器跳变 TTL 为低电平时，每个周期开始和结束时各有一个 25 毫秒窗口，用于饱和吸收光谱（SAS）重新参考。磁光阱装载于 τ_{seq} = 10 毫秒时开始；对于包含偏振梯度冷却（PGC）的序列，装载持续至 238 毫秒；省略 PGC 时，则持续至 250 毫秒。PGC 期间，磁场在 238 毫秒时关闭（未使用 PGC 时为 250 毫秒），并保持关闭状态直至 275 毫秒。在 τ_{seq} = 250 毫秒时，冷却光束和再泵浦光束被快门关闭，原子云随后进行时长可变的弹道膨胀 τ_{TOF}。成像采用 0.5 毫秒的相机曝光，之后将激光频率调回 SAS 参考点，为下一个周期做准备。**b**）序列期间的监测信号，显示锁定误差信号（绿色），证实激光在整个周期内始终锁定于压电陶瓷稳定腔。

表S2：用于确定原子温度的参数

参数	说明	数值	Ref.
k_B	玻尔兹曼常数	$1.380649 * 10^{-23}\mathrm{J\ K^{-1}}$	
$m_{87铷}$	^{87}铷同位素质量	$1.44316060(11) * 10^{-25}$ 千克	(*35*)
Δt_{exp}	相机曝光时间	0.5 毫秒（单次拍摄），5 毫秒（10 倍累积）	
l_{px}	美国空军目标校准像素尺寸	$12.86\ \mu$米 $\mathrm{px^{-1}}$	

由 PZT 频率响应漂移导致的原子数漂移

正文中的图5B展示了采用两种方案测得的数分钟内磁光阱原子数（红色曲线）：定期参考铷光谱（上图），或在 $t = 0$停止铷参考锁定（下图）。前一种情况的扩展数据集见图 S6A，其中我们同时记录了780纳米分布式布拉格反射器冷却激光器与另一台锁定至 ^{87}铷、 $5S_{1/2}$、 $F = 2 \rightarrow 5P_{3/2}$、$F' = 1$、3交叉跃迁的780纳米分布式布拉格反射器激光器之间的拍频（蓝色曲线）。左侧纵轴显示每个磁光阱 + 偏振梯度冷却序列相对于 $t = 0$序列的拍频信号归一化均方误差（NMSE）。

在没有铷参考锁定的情况下（图5B，下图），由于压电陶瓷腔锁定激光器发生频率漂移，磁光阱会在 30 秒内完全消散。在采用铷参考锁定后，残余的频率偏移可归因于固定电压跳变下压电陶瓷腔电压-频率响应的漂移。如图 S6B 所示，可以观察到压电陶瓷迟滞的独立影响：磁光阱在 20 分钟后仍然可见，但压电陶瓷响应随时间发生偏移，导致这段时间内俘获原子损失了 ~2/3。在没有铷参考锁定的情况下，冷却激光器在 20 分钟内会发生 ~50 兆赫的漂移；而采用铷参考锁定后，同一时间段内的漂移降低至兆赫量级。对于计算或传感等精密量子应用，必须将此类激光频率漂移降至最低。为此，未来的工作将动态调节 PZT电压以抵消这些漂移，最初使用光谱信号，最终则使用磁光阱荧光本身进行反馈。

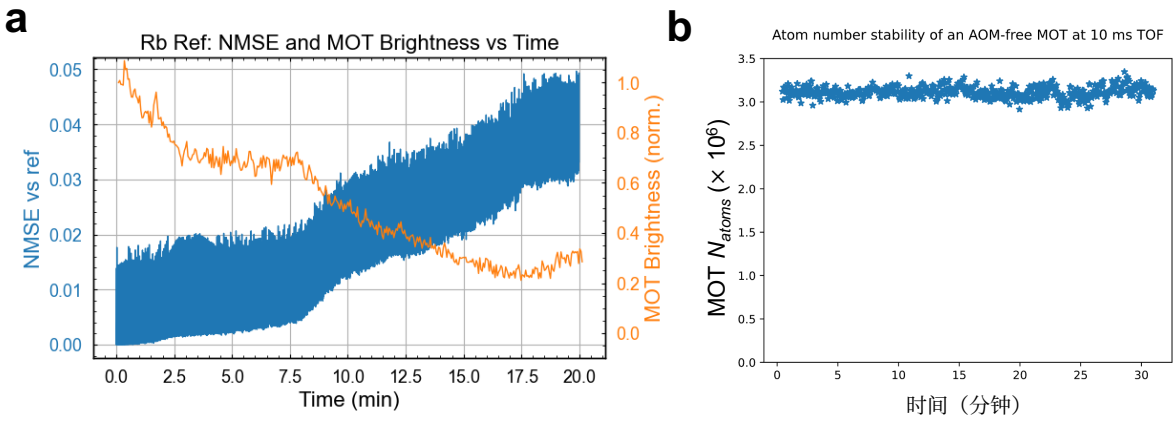


图 S6：压电陶瓷迟滞与原子数稳定性 a) 图5B的扩展时间序列数据。在相同时间段内测得的冷却激光器与参考激光器之间拍频的归一化均方误差（NMSE）（蓝色），以及磁光阱中的原子数（橙色）。NMSE 是通过比较每个序列与第一个序列的频率轨迹计算得出的。NMSE 缓慢上升，表明压电陶瓷电压到频率的驱动特性发生了变化。俘获原子数的变化与这一漂移相关。在此测试中，由于部分光被分用于同时进行的拍频测量，磁光阱以较低的冷却光束功率运行。**b)** 使用压电陶瓷腔进行光谱参考和偏振梯度冷却时，连续记录的 30 分钟磁光阱原子数；此期间压电陶瓷迟滞可忽略不计。

我们注意到，PZT频率响应漂移会随时间变化，通常在系统上电后不久最为明显。图5B中的数据采集于这一初始阶段。在另一天经过数小时连续运行后，磁光阱亮度在 30 分钟内保持稳定（S6B）。在这次试验中，腔会定期参考铷光谱学进行锁定（如图5A所示），并执行我们典型的 12 毫秒偏振梯度冷却功率和频率斜坡。原子数成像在 10 毫秒飞行时间后进行。尽管此次试验未采集拍频数据，但原子数的稳定性直接对应于稳定的绝对激光频率，这表明一旦实施动态PZT控制，系统将达到预期性能。