arXiv:2603.06935v1 [physics.atom-ph] 6 Mar 2026

使用全介质钾里德堡原子传感器检测从兆赫到亚千赫兹的电场

DanielHammerland[1,3], Rajavardhan Talashila[1,3],Dixith Manchaiah[1,3], NoahSchlossberger[3],NikunjkumarPrajapati[3], Erik McKee[2], Michael A. Highman[2],MatthewT. Simons[3], Samuel Berweger[3],AlexandraB. Artusio-Glimpse[3], ChristopherL.Holloway[3*]1科罗拉多大学博尔德分校物理系，Libby Dr，博尔德，80305，科罗拉多州，美国。[2]TOPTICA Photonics，美国纽约州匹兹福德，14534。[3]美国国家标准与技术研究院通信技术部，325 Broadway，博尔德，80305，科罗拉多州，美国。

*通讯作者。电子邮件：christopher.holloway@nist.gov；

摘要

里德伯传感器有望成为用于亚兆赫频率通信的天线系统的替代方案。在这类通信中，高效率天线的尺寸往往大得不切实际，因此不得不使用效率较低的电小型天线。由于硅酸盐蒸气池的场传输能力较低，里德伯传感器在这些频率下的应用探索受到阻碍。我们使用钾而非铷或铯作为有源介质，大幅提升了硅酸盐蒸气池的低频场传输能力。全介质传感器中的钾里德堡传感器能够测量频率低至 500 赫兹的电场；与性能相当的铷蒸气池相比，这使传感器的低频截止频率有效降低了近四个数量级。仅需这一简单替换，低频传感实验便能更容易地为广大研究人员所开展。

关键词：量子器件、超低频、甚低频、低频、场传感、电磁感应透明、钾、里德堡

1 引言

在经典接收系统中，天线用于检测射频信号。当天线尺寸约为信号波长的一半时，其效率最高，$\frac{\lambda}{2}$[1]。对于 1 兆赫信号，天线尺寸约为百米；而在 1 千赫时，天线尺寸则达到数百千米。在许多应用中，这种尺寸的天线过于庞大，因此不得不使用电小天线[2, 3]。电小天线的效率和带宽都较低。虽然可以使用匹配电路提高其效率，但这会降低天线可接收的带宽。

里德伯传感器 [4, 5]基于根本不同的原理工作。在这些系统中，原子高度可极化里德伯态的能级受到入射射频场的扰动。里德伯态的扰动被印记在光学透射光谱上，从而提供射频场的光学读出。由于原子与电场之间的相互作用本质上是保守的 [6]，信号接收并不需要对原子系统进行功率传输。这使里德伯传感器摆脱了经典天线的尺度定律和阻抗匹配难题，使其成为现代通信系统极具吸引力的补充。尽管前景如此，低频电场传感一直是里德伯场传感器面临的持续挑战，即使在兆赫范围内也是如此 [7, 8]。

在里德伯传感器中，原子种类被置于玻璃蒸气池内。迄今，由于铷和铯蒸气压高，且将电子激发至里德伯态所需的激光器可商购，因此一直仅使用这两种原子。尽管玻璃是绝缘体，加入铷和铯后，在低于数兆赫的频率下仍会出现显著屏蔽 [9–11]。该领域已探索若干途径来研制低频里德伯传感器。镀层蒸气池在蒸气池壁内放置一组金属电极，已能测量低至直流的场 [12–16]。然而，这些蒸气池需要电接触才能良好工作，因而无法用于任何涉及自由空间场的应用。蓝宝石蒸气池展现出优异的低频场传输 [9, 10] ，并对亚千赫兹场提供了改进的电磁感应透明信号 [17]，但未报告灵敏度测量。然而，蓝宝石的优势伴随着若干重大缺陷。就电场而言，高折射率会在几乎所有射频频率上降低射频场传输，双折射还会使光偏振发生畸变。比介电损耗更为严重的是蓝宝石带来的制造挑战。与存在“软化”相的玻璃不同，蓝宝石由固态直接转变为液态，无法采用标准玻璃吹制技术进行吹制。扩散键合蒸气池 [17–19] 不再需要化学反应性黏合剂，但成本高昂且难以获得，因此尚未得到广泛使用。尽管这些进展的价值无可争议，但利用便于大规模生产的材料研制全介质宽带里德伯传感器，将是推动这些下一代低频量子传感器走向实际部署的重要一步。

本文采用钾作为原子种类，并在全介质熔融石英蒸气

池中展示了低频场性能的显著提升，可测量频率低至 500 赫兹的场。为钾的这些结果建立基准，我们使用相同材料制成的铷蒸气池重复了测量。我们发现，在几乎完全相同的条件下，铷传感器的低频场传输显著降低，因此其灵敏度远逊于钾。通过比较两种原子种类在不同频率下的斯塔克位移，进一步验证了灵敏度测量结果；在相同场强和频率下，钾产生的位移显著更大。这些进展为开展低频传感研究提供了一种易于实现的方法。此外，它们也凸显了在里德堡传感器的应用背景下，理解碱金属与其蒸气池之间化学作用的重要性。

2 结果

2.1 钾中的倒置梯形方案电磁感应透明

本文所示结果采用了一种文献中尚未探讨过的反向阶梯式电磁感应透明方案。这对灵敏度测量有重要影响，因此我们简要讨论钾的电磁感应透明光谱。钾的能级结构见图 6(a)，与铷的能级结构（图 6(b) ）有几处显著区别。钾在所有相关态的超精细态之间的能隙约为铷的 1/14。在铷的电磁感应透明实验中，m_J 里德伯态之间的间隔可用于在测量过程中轻松校准能量轴。在钾中，$50D_{5/2}$ 态与 $50D_{3/2}$ 态之间的间隔约为 9 兆赫。这使校准颇具挑战，因为钾的质量较轻且探测频率较高，导致多普勒线宽比铷大近 1.5 倍。这一效应超过了激发光束多普勒抵消略有改善所带来的影响，因此在温度和拉比频率相同的情况下，钾的线宽比铷更宽。加上功率展宽，这些因素使电磁感应透明线宽达到 20 兆赫，见图 1(c)。如此宽的线宽掩盖了 $D_{5/2}$ 与 $D_{3/2}$之间的间隔，使这些态无法用于能量校准。此外，钾的 3P 不同 F 态比铷的排列紧密得多。经过多普勒校正后，33.8 兆赫的间隔压缩至 23 兆赫，这意味着图 1(c) 中的钾电磁感应透明信号也包含 3P 超精细态。距离 50D 峰最近的下一个可辨认态是 52S 里德伯态，两者相距约 5.1 吉赫，见图 1(d)。该态用于参照一个距 50D 峰 768 兆赫的弱峰。在斯塔克位移测量期间，这个小峰与 50D 峰同步移动，因此无法用于斯塔克位移测量中的频率轴校准。由此，52S 态成为唯一可用于校准的选项。两个峰之间相距 5.1 吉赫，意味着无法探测到细微的能量变化。对于低于 1 兆赫的频率，由于场传输较低，外加场的显著作用是轻微改变电磁感应透明峰的高度，而非造成更易辨识的频移。因此，对于 1 兆赫以下内部场强与外场强度之比的校准能力，我们并无把握。

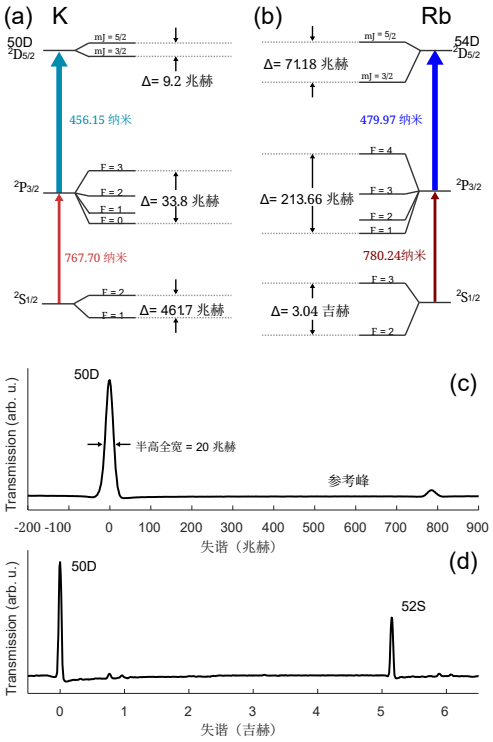


图1 钾原子EIT光学透射光谱，涵盖 (a) 50D态和 (b) 50D态与52S态。

2.2 钾与铯的比较

为证实这种新出现的低频场传输源于以钾替代较重的碱金属，我们分别在钾和铯中进行了斯塔克频移测量和外差灵敏度测量。我们采取了若干措施，使两组测量尽可能具有可比性。简言之，两组实验使用了相同的光束路径、探测器和射频源。两组实验均使用熔融石英蒸气池，并共用相同的加热元件和隔热层。之所以选择钾的 $n = 50$ 态和铯的 $n = 54$ 态，是因为它们具有相似的直流极化率。我们调整光功率，使两组测量的拉比频率保持一致。装置的更多细节见第 3节。

钾和铯的斯塔克位移测量凸显了低频场传输的差异。图2 显示了在外场强度为 60 V/m、频率介于 1 兆赫和 10 兆赫之间时，钾的 50D态 (a) 和铯的 54D态 (b) 测得的斯塔克频移光谱。在 1 兆赫时，与未施加外场的测量结果相比，钾的频谱中电磁感应透明峰的振幅降低了 40%。在更高频率下，数百兆赫的巨大频移表明场传输显著。然而，铯的测量结果在 1 兆赫时没有显示任何变化，

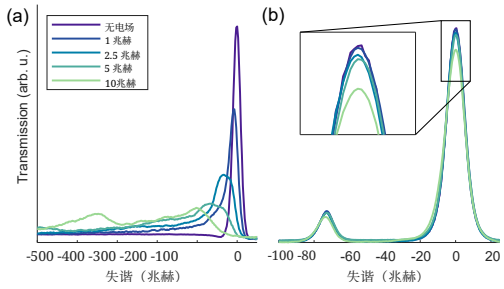


图 2 在不同频率、外场振幅为 60 V/m 时，观测到的钾（**a**）和铷（**b**）中斯塔克位移后的电磁感应透明对比。

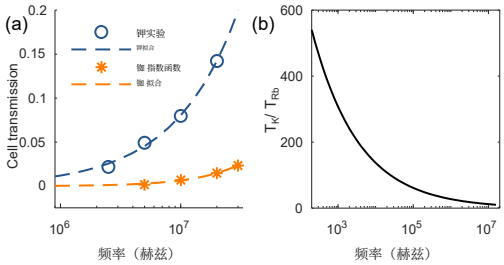


图 3 钾（蓝色）和铷（橙色）的校准射频电场传输曲线（**a**），以及钾与铷传输曲线的比值（**b**）；将曲线外推至数兆赫范围之外，以定性展示低频特性。

如图2(b) 的插图所示。在更高频率下，铷的峰值高度仅有轻微变化。这些简单的测量凸显了钾相较于铷具有更优异的低频场传输性能。

除了可视化之外，还可以根据所施加的电场与观测到的斯塔克位移之间的关系进行测量，从而校准这些较高频率下的场传输。对铷和钾而言，这种随频率变化的校准关系均以指数函数进行启发式拟合，如图 3（a）所示。在测量频率范围内，钾的场传输已是铷的十倍。若将指数趋势外推至更低频率，如图 3（b）所示，则在约 25 千赫时，钾的场传输可达到铷的一百倍。

射频电场灵敏度测量表明，与铷相比，钾的透射率提高带来了灵敏度的提升。在这些测量中，频率介于 50 千赫和 10 兆赫之间的弱信号与频率略有偏移的本地振荡器信号相干涉；本例中的偏移频率为 10 千赫，从而产生一个偏移频率处的拍频信号。该拍频信号被印刻在里德伯原子的光学透射光谱上，随后可通过监测该光谱，测量其随弱信号振幅的变化情况 [20]。更多详情请见第3节。本节中，我们说明接收器对外场的灵敏度。该数值通过将施加的交流电压除以平行板间距得出，它为蒸气池实际承受的电场提供了一个上限。我们将在第4节中对此进行更详细的讨论。

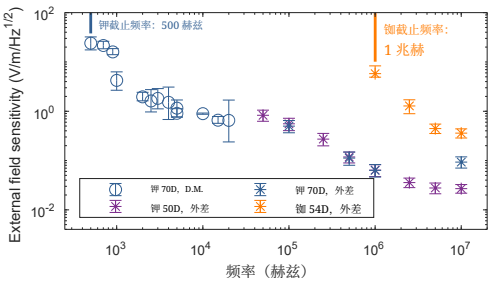


图 4 外　　电场灵敏度测量，对象为钾和　　铷。

50D 钾态下外差测量的灵敏度在图4中以紫色表示。对于钾，在 5 兆赫和 10 兆赫处测得的数值非常相近，但随后灵敏度开始下降，并在接近 200 千赫时下降趋缓。铷测量的灵敏度在图4中以橙色星号表示。灵敏度随频率迅速下降；在 1 兆赫处，本地振荡器的函数发生器达到极限，外场振幅为 300 伏/米，因此无法在低于 1 兆赫的频率下测得可比的灵敏度。在 1 兆赫至 10 兆赫之间，铷的灵敏度比钾低约一个数量级。

2.3 钾低频传感

为了进一步探索钾的低频传感能力极限，在 70D态下进行测量，以提高直流极化率。图 4中以蓝色星号表示了 50 千赫至 10 兆赫之间的外差测量结果。对于低于 1 兆赫的频率，外差测量显示，相较于 50D态，灵敏度略有提高。然而，在 10 兆赫时，70 D态的灵敏度显著降低。这是因为斯塔克位移过强，使谱幅度分散在较大的失谐范围内，从而限制了测量的高场灵敏度。当频率低于 50 千赫时，使用外差测量变得困难，因为信号频率逐渐接近拍频。

对于低于 50 千赫的测量，射频信号被测量为所施加射频场频率处电磁感应透明传输的直接调制（DM）。具体而言，通过采集时域波形及其傅里叶变换，并观察傅里叶谱功率密度随所施加场的变化来实现测量。对于钾，我们能够测量从 20 千赫降至 500 赫兹的直接调制（DM）灵敏度，如图4所示，其中以蓝色圆圈表示。为举例说明这一行为，图 5 展示了 300 赫兹至 900 赫兹频率范围内与幅度和频率相关的傅里叶分量。这些结果体现了低于 50 千赫时的典型行为。也就是说，对于给定的场强，较高频率会显示出更大的谱幅度，同时具有更低的 1/f噪声底。这一点体现在该频率范围内最终得到的灵敏度值中。

在 300 赫兹下的测量显示，在高场强下振幅非零（黄色）。然而，强烈的 1/f 噪声使得难以提取有意义的灵敏度值。

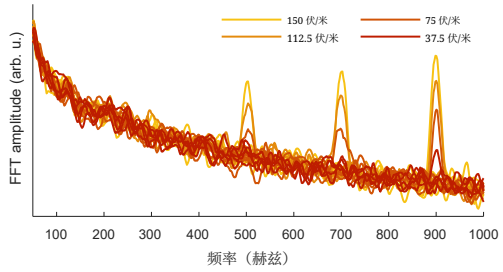


图 5 亚千赫兹频率下直接调制的电磁感应透明传输拍频信号幅度的傅里叶变换图。

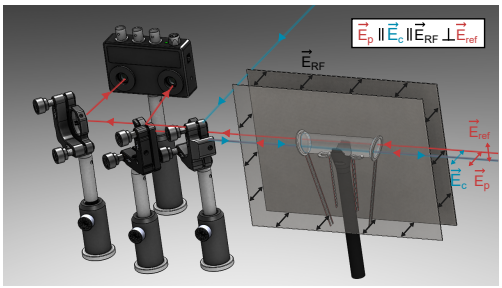


图 6 (a)钾(b) 和铷(c).实验装置示意图，以及激发方案和能级。

3 方法

所有实验均使用相同的光束路径和元件，唯一的例外是耦合光，因为无法用单一光源同时为铷和钾提供耦合光。为尽可能直接地进行比较，两个耦合光源均从同一个光纤准直器发出，其余元件均保持不变。对于钾，456 纳米光来自外腔二极管激光器；对于铷，480 纳米光来自腔式二次谐波产生二极管激光器。钾和铷所用的探测光均由同一台外腔二极管激光器提供。为产生电磁感应透明信号，耦合光束与反向传播的探测光束在蒸气池内空间重叠。探测光束和耦合光束的直径分别为 200 μm 和 210 μm。

实验装置中最关键的部分如图 6(a) 所示。光束在一个75 mm熔融石英蒸气池内重叠。射频场施加于一对环绕蒸气池的150 mm x 200 mm平行板上。两板间距为33 mm。由于钾的熔点较高，需加热至60° C才能获得明显信号。陶瓷加热器和3D打印的非导电蒸气池支架可减少对所施加电场的扰动。不过，仍需使用金属导线为加热器供电。铷实验中也使用了陶瓷加热元件，并将其稍微加热至35° C，使其密度与钾蒸气池中的密度相当。各实验的数据分别由频谱分析仪和示波器同步记录。

倒置阶梯型电磁诱导透明方案可将电子激发至原子里德伯态。对于钾，如图6(b) 所示，探测激光锁定在从$4S_{1/2}(F = 2)$ 态到$4P_{3/2}$ $(F = 3)$ 态的跃迁上，而耦合激光则根据测量需求，在70/50D态附近扫描。对于铷，探测激光锁定在从$5S_{1/2}(F = 3)$到 $5P_{3/2}$ $(F = 4)$ 态的跃迁上，耦合激光则在 54D 态附近扫描。

为在铷和钾之间进行尽可能相似条件的比较，采用了若干光谱调节。计算了钾和铷里德伯态的极化率，发现铷的54D态具有与钾的50D态相近的极化率，分别为366 兆赫/(V/cm)^2, 和361 兆赫/(V/cm)^2。选择极化率相近的态，可以将蒸气池低频传输的来源限定为原子种类。此外，还使用碱金属里德伯计算器（ARC）[21] 计算钾的$4S_{1/2}$ 与$4P_{3/2}$ 态之间的跃迁偶极矩，为5.017 a_0e；随后计算铷的$5S_{1/2}$ 与$5P_{3/2}$ 态之间的跃迁偶极矩，为5.17 a_0e。同时还计算了耦合光束的跃迁偶极矩。对于钾的$4P_{3/2}$ 到50D态，偶极矩阵振幅为0.014 a_0e；对于铷的$5P_{3/2}$ 到54D态，偶极矩阵元为0.022 a_0e。这些计算用于对两种原子种类之间的光功率进行归一化。由于探测光的偶极矩相近，进入铷和钾蒸气池的探测光功率均设为 $10\ \mu$W。通过在钾实验中使用120 mW的耦合光功率、在铷实验中使用75 mW的耦合光功率，实现了耦合光束相等的拉比频率。由此，探测光束和耦合光束的拉比频率分别为44 兆赫和12 兆赫。

对于射频外差测量，10 千赫的拍频 [20] 使我们能够在相同条件下测量从 50 千赫到 10 兆赫的频率。使用 20 千赫和 50 千赫拍频的测量获得的灵敏度略好，但使直接测量与外差测量之间的差距更大。对于每个频率，通过搜索本地振荡器（LO）功率变化时拍频幅度的最大值来优化 LO 幅度。峰值位置的优化精度为 0.25 V。信号幅度选为在拍频幅度随 LO 幅度变化的扫描中观察到最大值时的最小幅度。扫描耦合激光的频率以覆盖电磁诱导透明光谱，同时使用设为零扫宽的频谱分析仪测量拍频频率处的调制幅度。这样无需锁定耦合激光的频率；由于外腔二极管激光器的功率有限，锁频并不可行。随后将电场幅度转换为对数刻度，并对拍频幅度随射频幅度的变化进行线性拟合。该直线与噪声底的交点定义了最小场，将最小场除以测量的分辨率带宽（RBW）的平方根，即可得到最终灵敏度。

DM 测量更容易受到我们无法锁定耦合激光的影响。为应对这一实验限制，耦合激光器频率扫描的跨度设为 EIT 线宽的一小部分，并采集时域波形。将时域波形进行傅里叶变换，转换到频域，并分离出所施加信号的频率峰值振幅，测量其随射频幅度和频率的变化。与外差测量类似，

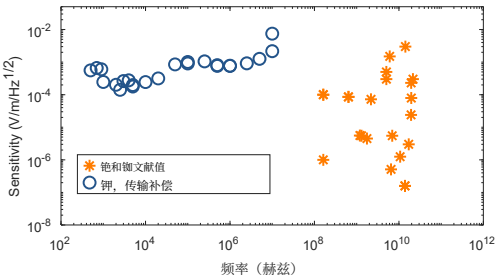


图 7 与文献中铷和铯的灵敏度相比，传输补偿钾电磁感应透明灵敏度测量。为进行等效比较，已排除镀层蒸气池。改编自参考文献 [5]。

将快速傅里叶变换振幅峰值拟合为所施加场幅度对数的函数，其与噪声底的交点给出最小场。由于测量在时域中进行，将其乘以采集时间的平方根（实质上即分辨率带宽的倒数），即可得到灵敏度。

对于低于 1 千赫的测量，采集 128 个频谱；对于所有其他测量，则在每个频率和振幅下采集 32 个频谱。误差棒通过外推一条直线得到：该直线拟合重复扫描的均值±，并在所有场强振幅下取重复扫描数值的一个标准差（SD）。这些 SD 偏移振幅以场强为函数进行拟合，方法与灵敏度均值数据相同；其与噪声底的交点即代表误差棒。这种做法有益，因为它考虑了不同振幅下测量偏差的变化，而这种变化会非线性地改变直线与噪声底的截距。

4 讨论

在低频下校准电极与蒸气池之间场传输的困难意味着我们无法测量低频下的精确传输。然而，我们可以将兆赫水平的传输曲线外推至千赫范围，以深入了解这些结果与文献的比较情况。这在图7中完成。尽管精确的灵敏度值仍存在一定不确定性，但显然，钾里德伯传感器实现了一种简单的低频传感方法，而该方法在很大程度上尚未被学界探索。铷和铯中灵敏度测量的缺失，凸显了屏蔽效应如何在亚兆赫频率下强烈限制铷和铯蒸气池。尽管所演示/预测的灵敏度高于其较重的对应物，但这些相对简单的测量并未超出已报道的灵敏度范围 [5]，并且很可能可以通过该领域已知的方法加以改进 [22–28]。即便如此，这些测量仍代表了这些量子传感器能力的显著扩展。

尽管这些测量结果相比铷有了显著改善，但还必须注意到，绝对传输率仍然相当低，在约 800 千赫处只有 1% 的信号能够通过蒸气池。因此，尽管这些结果确实开辟了一条

让相关领域能够便捷地研究低频的途径，但蒸气池中的低频传输问题仍需得到相当程度的关注。

深入理解钾为何在这些低频下具有更好的传输性能，其确切机制超出了一篇论文所能探讨的范围。尽管如此，我们目前对屏蔽背后的机制已有一个初步假设。我们推测，钾的低频场传输源于不同碱金属与蒸气池体相之间化学相互作用的差异。与铷和铯相比，钾的原子半径更小，因此更容易渗入并穿过玻璃 [29–32]。尽管如此，与较重的碱金属相比，钾离子渗入玻璃并不会使玻璃的电导率显著提高；这一点不仅得到本研究支持，也有其他研究佐证 [10]。此前的结果表明，铯会与二氧化硅晶格中的非桥联氧缺陷发生强烈反应 [33, 34]。在这一反应中，铯原子会向周围晶格供给几乎一个完整的电子电荷，这远高于较轻的碱金属所能供给的电荷 [34]。电荷完全供给给晶格，再加上渗透性较低，会形成大量低迁移率电荷，从而产生显著的屏蔽效应。对于较轻的碱金属而言，较高的渗透性与较少的电荷供给相结合，会使晶格中的电荷分布更为弥散，从而有效减弱屏蔽。此前提及的关于蒸气池中碱金属消耗的研究也进一步支持了这一化学渗透假说 [35, 36]。

许多人提出，蒸气池内壁上的凝聚态碱金属是造成屏蔽的主要机制 [17, 37, 38]。然而，按照这一解释，蒸气池内碱金属的体积将是一个可调参数，可用于控制低频传输。此外，关于蒸气池中光吸收随时间降低的报告 [35, 36] ，也意味着随着可用于表面吸附的原子数量减少，低频场传输会有所改善。另外，如果表面聚集是导致屏蔽效应的主要因素，那么钾应表现出更强的屏蔽，因为其电阻率为 72 nΩ·m，而铷和铯的电阻率分别为 128 和 205 nΩ·m[39]。这些体相数值应适用于蒸气池中预测的碱金属层厚度 [35, 40]。因此，尽管这些层可能会导致屏蔽效应，但这些解释与碱金属的性质之间存在矛盾，表明其中可能存在另一种机制。

若要更深入地理解这些蒸气池相互作用中起作用的机制，可能需要采用电测量以外的方法。X射线技术 [41] 和紫外吸收 [30, 34] 边的元素选择性也可能有助于量化碱金属暴露前后的缺陷行为，尽管这些探针的高光子能量可能会诱发缺陷，并显著改变晶格/玻璃结构。核磁共振是另一种颇有前景的方法，它利用损伤较小的辐射揭示了玻璃的诸多细节 [34, 42]。要理解这些机制，还面临另一项挑战：玻璃固有的各向异性，其特性可能因组成的细微变化而显著不同。此外，玻璃暴露于化学物质、紫外光、热和强电场后，其结构会发生显著变化，这使问题更加复杂

。理解玻璃在这些条件下的行为，对于里德伯传感器的晶圆级生产尤为关键。

5 结论

这些测量展示了全电介质钾里德伯传感器在亚千赫兹频率下的电场灵敏度。尽管要提升这类器件的灵敏度仍需开展大量工作，但这些结果为研究群体探索低频传感开辟了一条易于开展的途径。此外，这些结果也表明，我们需要更深入地了解碱金属与蒸气池之间的化学相互作用，尤其是在里德伯传感器的背景下；与原子钟或光泵磁力计相比，采用不同配置或许能实现最佳性能。

补充信息。

作者贡献。 D.H. 负责概念构思、方法设计、数据采集、数据分析、图表制作和论文撰写。R.T.、D.M. 负责数据采集和方法设计。E.M.、M.H.、N.S.、N.P.、M.S.、S.B.、A.A-G. 负责方法设计。C.L.H 负责方法设计和论文撰写。

致谢。 本研究由美国国家标准与技术研究院通过 NIST-on-a-Chip 项目资助。

利益冲突。 作者声明不存在利益冲突。本研究成果属于美国政府的贡献，在美国不受版权保护。与本研究相关的任何合作均不意味着美国国家标准与技术研究院推荐或认可任何产品或服务，也无意暗示任何此类产品或服务必然是该用途的最佳选择。

参考文献

[1] Balanis, C.A.：《天线理论：分析与设计》，第4版。Wiley，新泽西州霍博肯（2016）。https://books.google.ps/books?id=iFEBCgAAQBAJ[2] Fano, R.M.：任意阻抗宽带匹配的理论限制。技术报告41，麻省理工学院电子研究实验室（1947年11月）[3] Hansen, R.C.：天线的基本限制。《IEEE会刊》**69**（2），170–182（1981）https://doi.org/10.1109/PROC.1981.11950 。访问日期：2026-01-20[4] Holloway, C.L., Gordon, J.A., Jefferts, S., Schwarzkopf, A., Anderson, D.A., Miller, S.A., Thaicharoen, N., Raithel, G.：宽带基于里德伯原子的

电场探针，用于可溯源至SI的自校准测量。《IEEE天线与传播汇刊》62(12)，6169–6182（2014）https://doi.org/ 10.1109/TAP.2014.2360208[5] Schlossberger, N., Prajapati, N., Berweger, S., Rotunno, A.P., Artusio-Glimpse, A.B., Simons, M.T., Sheikh, A.A., Norrgard, E.B., Eckel, S.P., Holloway, C.L.：原子蒸气中碱金属原子的里德伯态：可溯源至SI的场探针和通信接收器。《自然综述：物理》6(10)，606–620（2024）https: //doi.org/10.1038/s42254-024-00756-7。访问日期：2025-09-03[6] Grimm, R., Weidem¨uller, M., Ovchinnikov, Y.B.：中性原子的光学偶极阱。载于：《原子、分子与光学物理进展》第42卷，第95–170页。爱思唯尔，???（2000）。https://doi.org/10.1016/S1049-250X(08)60186-X。https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1049250X0860186X 访问日期：2026-02-02[7] Liu, B., Zhang, L.-H., Liu, Z.-K., Zhang, Z.-Y., Zhu, Z.-H., Gao, W., Guo, G.- C., Ding, D.-S., Shi, B.-S.：利用里德堡原子传感器高灵敏度测量兆赫兹射频电场。《Physical Review Applied》18(1)，014045（2022）https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.18.014045。访问日期：2026-01-28[8] Rotunno, A.P., Berweger, S., Prajapati, N., Simons, M.T., Artusio-Glimpse, A.B., Holloway, C.L., Jayaseelan, M., Potvliege, R.M., Adams, C.S.：利用“拉比匹配”缀饰里德堡原子的Floquet边带间隙检测3–300 MHz电场。《应用物理学杂志》134(13)，134501（2023）https://doi. org/10.1063/5.0162101。访问日期：2025-09-10[9] Bouchiat, M.A., Gu´ena, J., Jacquier, P., Lintz, M., Papoyan, A.V.：暴露于干燥铯蒸气中的玻璃池和蓝宝石池的电导率。《应用物理B：激光与光学》68(6)，1109–1116（1999）https://doi.org/10.1007/ s003400050752。访问日期：2024-09-20[10]Richardson, D., Dee, J., Yaeger, J., Viray, M., Marsh, J., Kayim, B., Sawyer, B.C., Mantia, D.S.L., Wyllie, R., Westafer, R.S.：提取10–300 MHz范围内里德伯电场计蒸气池的有效电磁材料属性。预印本（2025）。https://doi.org/10.36227/techrxiv. 173950932.23386150/v1。https://www.techrxiv.org/users/693388/articles/1
268321-extraction-of-effective-electromagnetic-material-properties-for-rydberg-e

电测计蒸气室

提交=0956f4d004f08b40095daf15fafedec461841dc6 访问日期：2025年7月30日

[11] Ma, L., Paradis, E., Raithel, G.: 通过光照在无电极玻璃蒸气池中产生直流电场。《光学快报》 **28**(3), 3676–3685 (2020年)https://doi.org/10.1364/OE.380748[12] Holloway, C.L.,Prajapati, N., Sherman, J.A., R¨ufenacht, A., Artusio-Glimpse,

A.B., Simons, M.T., Robinson, A.K., La Mantia, D.S., Norrgard, E.B.: 基于电磁感应透明的里德堡原子传感器，用于可溯源电压测量。AVS Quantum Science 4(3), 034401 (2022年) https://doi. org/10.1116/5.0097746 . 访问日期: 2024-09-06[13] Ma, L., Viray, M.A., Anderson, D.A., Raithel, G.: 使用壁面集成电极测量原子蒸气池内的直流和交流电场。Physical Review Applied 18(2), 024001 (2022年) https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied. 18.024001 . 访问日期: 2026-01-26[14] Li, L., Jiao, Y., Hu, J., Li, H., Shi, M., Zhao, J., Jia, S.: 基于里德堡原子的超低频电场测量。Optics Express 31(18), 29228 (2023年) https://doi.org/10.1364/OE.499244 . 访问日期：2024-09-20[15] Chen, Y.-C., Fang, S.-C., Chen, Y.-H.: 用于超低频电场测量的原子量子传感器。arXiv. arXiv:2402.01430 [physics] (2024年). http://arxiv.org/abs/2402.01430 访问日期: 2024-09-20[16] Teale, C., Sherman, J., Kitching, J.: 简并双光子里德堡原子电压基准。AVS Quantum Science 4(2), 024403 (2022年) https://doi.org/10.1116/5. 0090892[17] Jau, Y.-Y., Carter, T.: 用于探测低于 1 千赫频率的基于蒸气池的原子电测量。Physical Review Applied 13(5), 054034 (2020年) https: // doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.054034 . 访问日期：2024-09-20[18] Sarkisyan, D., Sarkisyan, A.S., Gu´ena, J., Lintz, M., Bouchiat, M.-A.: 配有金属镀膜窗口、可高效施加电场的碱金属蒸气池。Review of Scientific Instruments 76(5), 053108 (2005年) https://doi.org/10.1063/ 1.1914780 . 访问日期: 2026-01-27[19] Sekiguchi, N., Sato, T., Ishikawa, K., Hatakeyama, A.: 用于高温金属蒸气的扩散键合蓝宝石池的光谱研究。Applied Optics 57(1), 52 (2018年) https://doi.org/10.1364/AO.57.000052 . 访问日期：2024-10-03[20] Gordon, J.A., Simons, M.T., Haddab, A.H., Holloway, C.L.: 在射频下利用里德堡原子混频器实现具有亚 1 赫兹分辨率的弱电场探测。AIP Advances 9(4), 045030 (2019年) https://doi.org/10.1063/1.5095633[21] ˇSibali´c, N., Pritchard, J.D., Adams, C.S., Weatherill, K.J.: ARC：用于计算碱金属里德堡原子性质的开源库。Computer Physics Communications 220, 319–331 (2017年) https://doi.org/10.1016/j.cpc.2017.06.015 . 访问日期：2025-03-31[22] Brown, R.C., Kayim, B., Viray, M.A., Perry, A.R., Sawyer, B.C., Wyllie, R.: 利用高角动量里德堡态探测甚高频和超高频电场。Physical Review A 107(5), 052605 (2023年) https:

//doi.org/10.1103/PhysRevA.107.052605 . 访问日期：2026-01-28

[23] Cai, M., You, S., Zhang, S., Xu, Z., Liu, H.: 通过高里德伯态实现基于原子的振幅调制微波电测量的灵敏度扩展。《应用物理快报》122(16), 161103 (2023年) https://doi.org/10.1063/5.0146768 。访问于2026-01-28[24] Dixon,K., Nickerson, K.,Booth, D.W., Shaffer, J.P.: 采用自外差频率梳读出与制备方案的基于里德伯原子的电测量。Physical Review Applied 19(3), 034078 (2023年) https://doi.org/10.1103/ PhysRevApplied.19.034078 。访问于2024-09-06[25] Holloway, C.L., Prajapati, N., Artusio-Glimpse, A.B., Berweger, S., Simons, M.T., Kasahara, Y., Al`u, A., Ziolkowski, R.W.: 利用开口环谐振器增强基于里德伯原子的场传感。《应用物理快报》120(20), 204001 (2022年) https://doi.org/10.1063/5.0088532 。访问于2024-09-06[26] Kumar, S., Fan, H., K¨ubler, H., Sheng, J., Shaffer, J.P.: 采用零差读出对弱射频电场进行基于原子的感测。《科学报告》7(1), 42981 (2017年) https://doi.org/10.1038/srep42981 。访问于2026- 01-28[27] Prajapati, N., Robinson, A.K., Berweger, S., Simons, M.T., Artusio-Glimpse, A.B., Holloway, C.L.: 通过布居再泵浦增强基于电磁感应透明的里德伯原子电测量。《应用物理快报》119(21), 214001 (2021年) https://doi.org/10.1063/5.0069195 。访问于2024-09-06[28] Prajapati, N., Kunzler, J.W., Artusio-Glimpse, A.B., Rotunno, A.P., Berweger, S., Simons, M.T., Holloway, C.L., Gardner, C.M., Mcbeth, M.S., Younts, R.A.: 甚高频频段中用于增强里德伯原子传感的高角动量耦合。《应用物理学杂志》135(7), 074402 (2024年) https://doi.org/10.1063/5.0179496 。访问于2024-09-19[29] Gershinskii, A.E., Krivtsova, V.L., Mironova, L.V., Cherepov, E.I.: SiO_2/Si系统中碱金属迁移与积累的研究：界面结构。《薄固体膜》70(2), 341–349 (1980年) https://doi.org/10.1016/ 0040-6090(80)90375-2 。访问于2024-09-12[30] Samuneva, B., Djambaski, P., Avramova, K.: 玻璃与碱金属蒸气之间的相互作用。《非晶态固体杂志》112(1-3), 385–391 (1989年) https://doi.org/10.1016/0022-3093(89)90559-0 。访问于2024-09-09[31] Cormack, A.N., Du, J., Zeitler, T.R.: 通过分子动力学模拟探究硅酸盐玻璃中的碱金属离子迁移机制。《物理化学化学物理》4(14), 3193–3197 (2002年) https://doi.org/10.1039/b201721k 。访问于2026-01-28

[32]Karlsson, S., Wondraczek, L., Ali, S., Jonson, B.: 钠钙硅酸盐玻璃离子交换强化有效扩散系数的趋势。《材料前沿》4, 13 (2017年) https://doi.org/10.3389/fmats.2017.00013 。访问于2026-01-27[33] Charles, R.J.: 硅酸盐玻璃中的极化与扩散。《应用物理学杂志》32(6), 1115–1126 (1961年) https://doi.org/10.1063/1.1736169 。访问于2024-11-26[34] Lopez, N., Illas, F., Pacchioni, G.: 铜、钯和铯原子在SiO 2表面规则位与缺陷位上的吸附。《美国化学会志》121(4), 813–821 (1999年) https://doi.org/10.1021/ja981753c 。访问于2024-09-09[35] Ma, J.,Kishinevski, A., Jau, Y.-Y., Reuter, C., Happer, W.: 铷蒸气对玻璃池壁的改性。Physical Review A 79(4), 042905 (2009年) https: // doi.org/10.1103/PhysRevA.79.042905 。访问于2024-11-18[36] Woetzel, S., Talkenberg, F., Scholtes, T., IJsselsteijn, R., Schultze, V., Meyer, H.- G.: 通过原子层沉积壁涂层改善微加工碱金属蒸气池的寿命。《表面与涂层技术》221, 158–162 (2013年) https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.01.044 。访问于2025-03-07[37] Lim, M.J., Cervantes, M., Brady, C., McPoyle, S., Simmermon, J.: 利用时间平均斯塔克位移在碱金属蒸气池中进行千赫兹范围的电场标定。《应用物理快报》123(5), 051106 (2023年) https://doi.org/10.1063/5. 0153752 。访问于2024-09-20[38] Ma, K., Xiao, D., Zhang, H., Wang, X., Wei, X.: 面向里德伯原子电场传感器的SiO_2与CaF_2 蒸气池中电场屏蔽研究。《物理学杂志D：应用物理》58(13), 135113 (2025年) https://doi.org/10.1088/ 1361-6463/adb04c 。访问于2025-02-12[39]Chi, T.C.: 碱金属元素的电阻率。《物理与化学参考数据杂志》8(339), 339–438 (1979年) [40] Fuchs, K.: 根据金属电子理论得出的金属薄膜电导率。《剑桥哲学学会数学汇刊》34(1), 100–108 (1938年) https://doi.org/10.1017/S0305004100019952 。访问于2026-02-06[41] Mastelaro, V., Zanotto, E.: 氧化物玻璃的X射线吸收精细结构（XAFS）研究——45年综述。《材料》11(2), 204 (2018年) https://doi.org/10.3390/ma11020204 。访问于2026年2月2日[42] Youngman, R.: 玻璃科学中的核磁共振波谱：元素综述。《材料》11(4), 476 (2018年) https://doi.org/10.3390/ma11040476 。访问于

2026年2月2日