具有改进射频耐受性的集成于离子阱的超导纳米线单光子探测器，用于囚禁离子量子比特态读出

Benedikt Hampel，[1,2,a)] Daniel H. Slichter，[1] Dietrich Leibfried，[1] Richard P. Mirin，[1] Sae Woo Nam，[1] 和 Varun B. Verma[1]1)*National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado 80305, USA*2)*Department of Physics, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309, USA*

（日期：2023年2月6日）

利用集成于离子阱的探测器进行囚禁离子量子比特态读出，有望应对可扩展量子计算中的重要挑战，但用于囚禁离子的强射频电场可能会影响探测器性能。本文报告了采用接地铝镜作为电屏蔽的氮化铌钛超导纳米线单光子探测器（超导纳米线单光子探测器），并将其集成到线性表面电极射频离子阱中。这些经过屏蔽的超导纳米线单光子探测器可在高达 54 V_{peak}、70 MHz 的射频囚禁电势及高达 6 K 的温度下成功运行，系统探测效率最高可达 68%。这一性能应足以在典型的低温装置中实现多种囚禁离子种类的并行高保真态读出。

arXiv:2302.01462v1 [quant-ph] 2 Feb 2023

囚禁离子量子比特的态读出通常通过驱动一个或多个激光束使其发生光学循环跃迁，并观测离子[1]发出的、依赖于量子比特态的荧光来实现。通常只需计数离子发出的总荧光光子中的几个百分点，即足以实现具有 >0.999[2]保真度的态读出。几乎所有实验中使用的离子种类，其荧光都位于紫外（UV）或蓝光波长范围。大多数实验装置采用高数值孔径的荧光收集光学系统，并结合相机或光电倍增管等光子探测器，探测荧光的有无，从而推断量子比特态。在将这种架构扩展到大量离子时，视场、数值孔径、离轴像差、放大率以及收集光学系统物理尺寸等方面的要求必须同时满足，这带来了挑战。可扩展囚禁离子量子计算[3–5] 等应用可能受益于将多个用于荧光探测的光子探测器集成到离子阱本身，而无需用于成像的光学元件[6–9]。

超导纳米线单光子探测器（超导纳米线单光子探测器）是此应用的理想候选器件，因为它们具有极低的暗计数率[10]，、很高的探测效率[11]，、在包括紫外波长在内的宽波长范围内具有很高的最大计数率[6,7,12]，，并且可以制成包含多个独立像素的器件[13]，，适用于在大型离子阱阵列中并行探测离子[2]。许多离子阱实验已经在约 4 K 至 10 K 的低温下运行，因此，超导纳米线单光子探测器运行所需的低温可能不会构成重大障碍。然而，用于囚禁离子的强射频电场会在阱集成超导纳米线单光子探测器中感应出不必要的射频电流，并降低其性能[6,7]。其他阱集成光子探测器方案包括单光子雪崩光电二极管（单光子雪崩光电二极管），它们可在室温离子阱中运行。不过，阱集成单光子雪崩光电二极管也会受到相同的射频串扰影响，而且其暗计数率远高于超导纳米线单光子探测器，量子效率则更低。由于单光子雪崩光电二极管输出脉冲的幅度更大，它们引起的离子运动加热也比超导纳米线单光子探测器脉冲更严重[7–9]。

在这项工作中，我们展示了一种改进型线性离子阱设计，其中集成了超导纳米线单光子探测器，针对探测 Ca^+ 离子在 397纳米处的荧光进行了优化。器件下方设置的铝镜可屏蔽囚禁射频场，同时也有助于提高探测效率。根据测得的系统性能和参考文献 7 的结果，这些器件应能在实际离子阱运行条件（温度和囚禁射频）下，实现对被囚禁 Ca^+离子的高保真度量子比特态读出。

离子阱电极设计与参考文献 7 中的相同，但超导纳米线单光子探测器在两个主要方面有所不同。首先，我们使用氮化铌钛（NbTiN）而非硅化钼（MoSi）作为超导纳米线单光子探测器[14–17]的超导材料，从而将其临界电流提高约 10 倍，并使其能够在高达 7 K[18]的温度下运行。这些特点降低了超导纳米线单光子探测器性能对所施加离子阱射频电势的敏感性。其次，在超导纳米线单光子探测器下方制备的接地铝镜可提供电屏蔽，并提高其探测效率。我们表征了超导纳米线单光子探测器在适用于囚禁多种离子种类的实际射频囚禁电势下的性能，并测定了其系统探测效率和暗计数性能。

图 1 的显微照片展示了集成超导纳米线单光子探测器的离子阱。我们沿图 1 中垂直于离子阱表面的白色虚线，在垂直于离子阱表面的平面内对离子阱几何结构进行二维有限元电磁仿真，以此设计屏蔽镜。晶圆上的所有介电层和金属层

a)benedikt.hampel@nist.gov

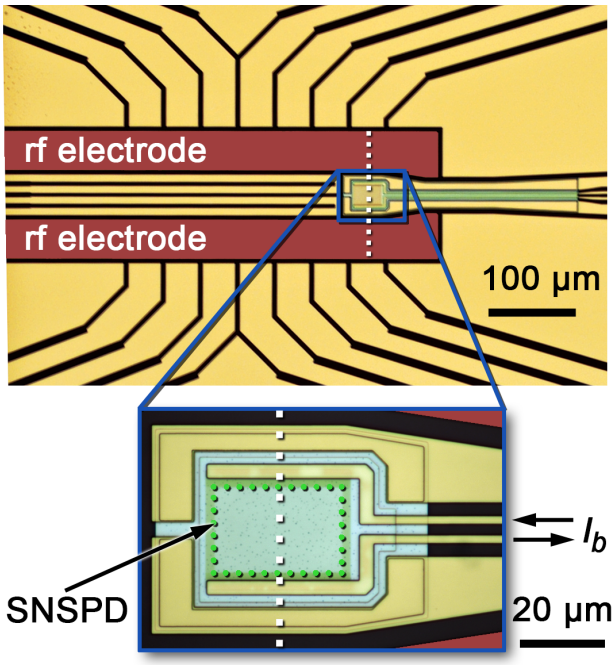

图 1：集成了超导纳米线单光子探测器的线性离子阱显微照片。射频囚禁电势施加在标记并以不同颜色显示的射频电极上。所有其他非超导纳米线单光子探测器电极均用于产生直流囚禁电势。放大的插图显示了位于一面小型铝镜上的超导纳米线单光子探测器；较大的图中则可见一面更大的铝镜，其覆盖了超导纳米线单光子探测器引线下方的区域。两面镜子在金电极之间的间隙中均呈浅蓝色，而黑色间隙显示的是衬底。绿色点线标示出超导纳米线单光子探测器的有源区。白色虚线表示图 2 中二维模拟所在的平面。偏置电流 I_b 施加在超导纳米线单光子探测器的引线上。

均纳入了模拟，其中包括金质离子阱电极。当离子阱的射频电极（图 1 中以红色伪彩色显示）施加射频电势时，我们分析了超导纳米线单光子探测器处的电场。模拟所用的射频频率为 70 MHz，适用于囚禁多种离子，包括目标 Ca^+ 物种。

模拟结果如图 2 所示。图中的颜色表示对数刻度下的射频电场振幅。纳米线各部分所在位置的射频电场越强，产生的感应射频电流就越大，对超导纳米线单光子探测器性能的影响也相应越大[6,7]。图 2(a) 模拟的是未加屏蔽的超导纳米线单光子探测器，类似于参考文献 7 中所述的器件。图示的层堆叠结构自下而上依次为硅晶圆、厚度为 212 nm 的 SiO_2层、节距为 160 nm 的氮化铌钛纳米线（厚 10 nm、宽 100 nm）、厚度为 130 nm 的 SiO_2 层，以及上方的真空。在图 2(b) 中，在硅晶圆与下层 SiO_2 层之间加入接地铝镜，以屏蔽超导纳米线单光子探测器。与未屏蔽情况相比，纳米线横截面周围的射频电场约降低了一个数量级，表明其对囚禁射频场的耐受性更强。此外在顶部增设接地导体——可以是宽度和节距均与超导纳米线单光子探测器间隙相同、厚度为 50 nm 的金网（图 2(c)），也可以是厚度为 50 nm 的氧化铟锡（ITO）层（图 2(d)）——可进一步增强超导纳米线单光子探测器对射频信号的屏蔽，同时仍能使大部分离子荧光光子透射至纳米线。顶部电屏蔽层既能保护超导纳米线单光子探测器免受囚禁射频场影响，也能屏蔽离子，使其免受超导纳米线单光子探测器脉冲产生的电场影响。

该镜子还与介电层共同构成光学堆栈。根据严格耦合波分析（RCWA）[19]，，在适当选择 SiO_2 厚度时，该镜子可使纳米线对垂直入射光子的吸收提高一倍；选择铝是因为其紫外/蓝光反射率高于金。

根据仿真结果，为简化设计，我们制造了在接地铝镜上集成超导纳米线单光子探测器、但不含顶部屏蔽层的离子阱，如图 2(b) 所示。超导纳米线单光子探测器的几何结构和介电堆栈经过优化，可在 Ca^+离子的 397 nm 荧光波长处实现吸收。所有器件均在 NIST 博尔德微加工设施制造。

这些器件制作于高电阻率（>20 kΩ·cm）的硅晶圆上，先通过等离子体增强化学气相沉积（PECVD）工艺沉积了 150 nm厚的SiO_2。随后，采用剥离工艺对用于形成反射镜的50 nm厚电子束蒸发铝层进行图案化，并覆盖212 nm厚的SiO_2。这

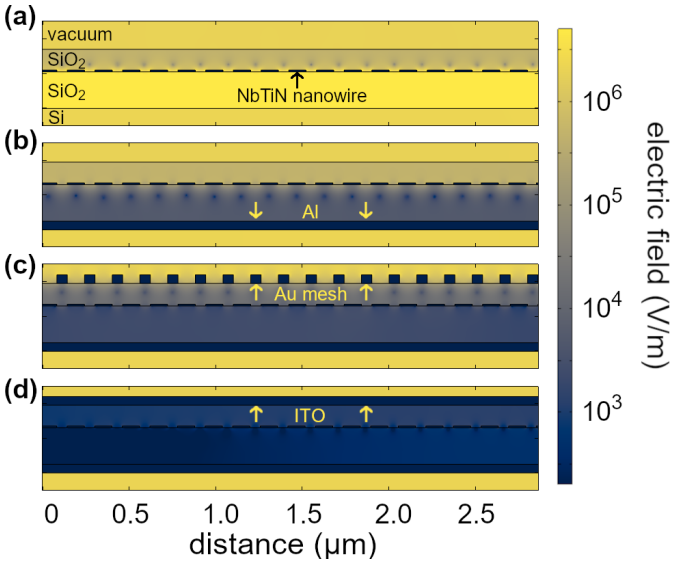

图 2：在离子阱射频电极上施加 100 V_{peak}、频率为 70 MHz 的射频电势后，数值模拟得到的电场幅值；图中显示了超导纳米线单光子探测器小段横截面在不同屏蔽配置下的情况。(a) 未屏蔽、嵌入 SiO_2 中的超导纳米线单光子探测器纳米线。(b) 纳米线下方的接地铝镜。(c) 堆栈顶部的接地金网，以及接地铝镜。(d) 以接地 ITO 层取代金网。

之后，在底部SiO_2层上于500 °C通过共溅射沉积了10 nm厚的氮化铌钛薄膜。结合光刻和电子束光刻，并通过使用六氟化硫（SF_6）的反应离子刻蚀，在氮化铌钛中制作了纳米线蛇形结构。超导纳米线单光子探测器的有源区域尺寸为20 μm × 30μm。通过扫描电子显微镜测得纳米线宽度为90 nm，节距为180 nm。随后，在使用三氟甲烷（CHF_3）的反应离子刻蚀工艺中刻蚀穿过底部SiO_2层的通孔，然后沉积20 nm厚的金层，以便与埋置的铝反射镜实现电连接。

图 1 中离子阱的射频（红色）和直流（金色）电极在适当驱动时提供用于囚禁离子的电势。它们与超导纳米线单光子探测器的引线一同采用剥离工艺制备，使用了 350nm 蒸镀金层；在预先开设通孔的区域，该金层与铝镜层形成电接触。最后，在超导纳米线单光子探测器顶部沉积了一层厚 130 nm 的SiO_2保护层，以在后续加工过程中保护纳米线，并减少氧化造成的性能退化。该层通过 PECVD 工艺沉积在整片晶圆上，随后采用CHF_3反应离子刻蚀工艺进行图形化，使其仅覆盖超导纳米线单光子探测器。

我们制备并测试了两种不同尺寸（大和小）的镜面，并让镜面分别处于电气悬浮状态或通过离子阱电极接地，以比较其屏蔽性能。图 1 的放大插图中可以看到小镜面，它覆盖超导纳米线单光子探测器下方及其周围的一小片区域。图 1 上方的显微照片展示了较大的镜面。该镜面设计为覆盖更大区域，包括超导纳米线单光子探测器的电引线下方，并沿射频电极方向延伸数百 μm。

阱集成超导纳米线单光子探测器的性能和射频耐受性测量在变温低温恒温器中进行，其基温为 2.6 K。采用峰值波长为 395 nm 的低温工作的发光二极管对样品进行泛光照明。离子阱的射频电极连接至电压升压系数为 20、谐振频率介于 68 MHz 和 72 MHz 之间的射频谐振器，这些谐振器由经放大的射频信号发生器驱动。通过偏置三通的低频端口，使用低噪声电压源和 10 kΩ 串联电阻对超导纳米线单光子探测器施加电流偏置。从偏置三通高频端口输出的超导纳米线单光子探测器输出脉冲经过放大、低通滤波和陷波滤波，以去除任何射频串扰，随后发送至示波器或计数器。测得超导纳米线单光子探测器的脉冲衰减时间常数为 $\sim$25 ns，由此得到器件的动能电感为 1.3 μH。

图3展示了不同工作温度和反射镜配置下，测得的亮计数率（BCR）和暗计数率（DCR）随直流偏置电流 I_b变化的关系；每种情况下均采用了多个施加于离子阱射频电极的射频电压值。根据参考文献 7 中的模拟和测量结果，频率为 70 MHz、幅度为 40 V 的射频电压施加于离子阱电极时，应能将单个 $^{40}Ca^+$ 离子限制在阱中，其轴向（径向）久期频率为 2 MHz（$\sim$5 MHz）；直接位于超导纳米线单光子探测器上方时，限制能力会略强。较低的射频幅度也应可用；降低射频频率则可按比例降低达到相同限制效果所需的射频幅度。

同一面板内所有曲线对应的 SNSPD 入射光子通量相同，但不同面板之间的入射光子通量不一定相同。BCR 与系统探测效率（SDE）成正比；SDE 表示入射到探测器上的光子被室温电子设备记录为计数的概率。未施加射频电势时，所有器件均呈现典型的 SNSPD 特性：随着偏置电流增大，S形系统探测效率曲线逐渐上升并最终达到平台。SNSPD 锁定在正常态之前所能施加的最大直流偏置电流称为切换电流，图中以水平轴上的彩色刻度标出。通常，测得的 DCR 低于每秒 1 次计数，直到偏置电流达到距切换电流仅几μA 的范围；此时可以观察到 DCR 随偏置电流呈指数增长。对于离子囚禁应用，读出激光束产生的杂散光通常会使暗计数率远高于每秒 1 次，因此我们没有尝试对每秒 1 次以下的 DCR 进行表征。无论是否施加射频电势，这种定性的暗计数行为都成立。

图3(a)绘出了离子阱器件的 BCR 和 DCR，该器件的超导纳米线单光子探测器下方设有一个处于电气浮置状态（未接地）的大反射镜。随着施加的射频幅度增大，切换电流降低，BCR 随 I_b 变化的曲线也趋于平坦。这些现象此前已在离子阱集成式超导纳米线单光子探测器中观察到，据信是由超导纳米线单光子探测器中流动的感应射频电流所致[6,7]。无射频电势时的切换电流远高于参考文献6和7中器件的切换电流，因此，即使射频幅度远高于此前展示的水平，超导纳米线单光子探测器仍能继续工作。然而，随着射频幅度增大，可达到的最大 BCR（因而最大系统探测效率）开始下降。相比之下，图3(b)、(c)和(d)中的器件，其超导纳米线单光子探测器下方的反射镜均已电气接地，表现出明显不同的特性。首先，对于给定的射频幅度，其切换电流的降幅通常小于图3(a)中反射镜未接地的器件。其次，BCR 随 I_b 变化的曲线不会变平，而是发生偏移，使 BCR 在更低的偏置电流下开始上升。此外，在更高的射频幅度下，可达到的最大 BCR 仍不受影响。

在图4(a)中，我们将图3(a)中的数据拟合到一个模型，该模型描述存在超导纳米线单光子探测器中感应射频电流时 BCR 随 I_b 的变化。该模型同时考虑空间均匀和空间变化的感应电流，并已在参考文献 7 中详细介绍。我们对模型稍作扩展，以允许 BCR 随 I_b 变化的曲线出现小幅横向偏移。

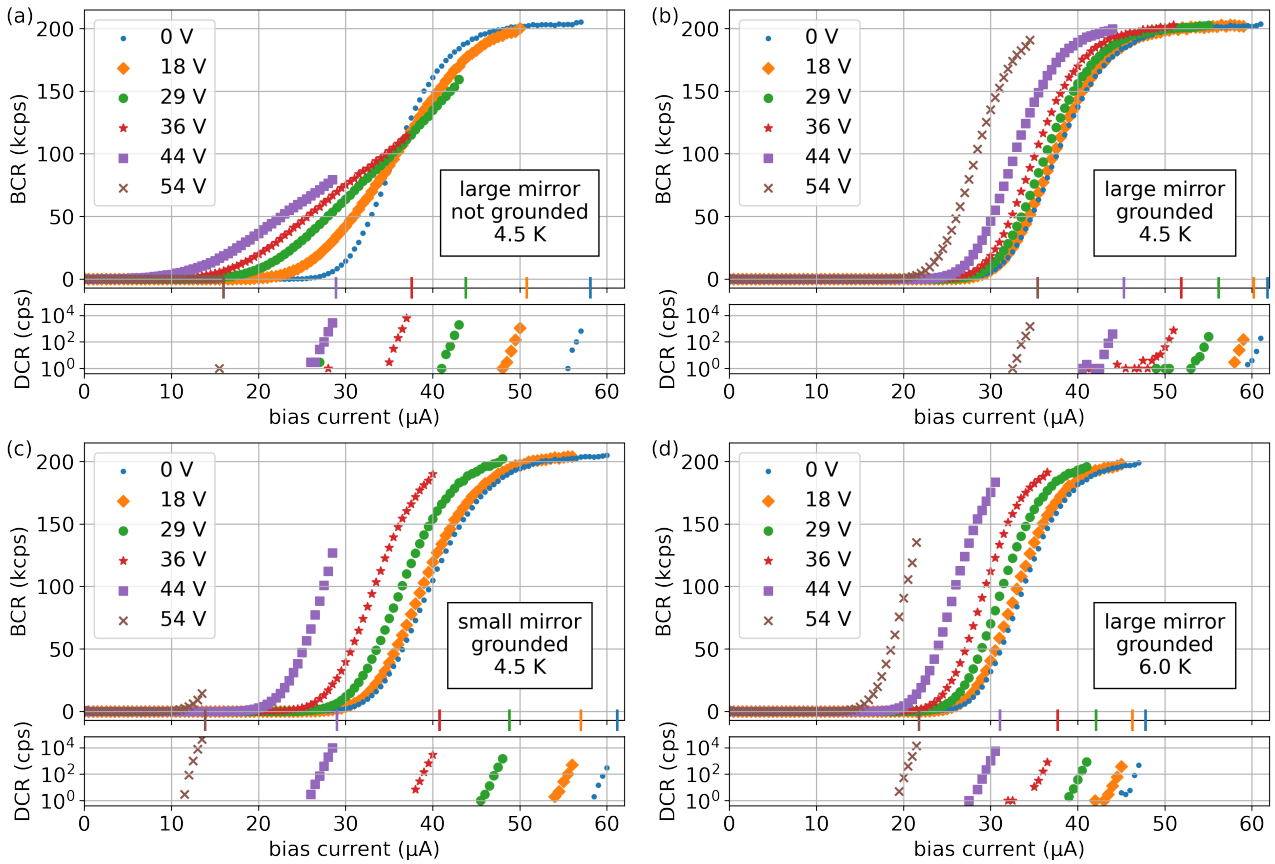

图3： 在温度为 4.5 K 时，对于具有大反射镜的器件，亮计数率（BCR）和暗计数率（DCR）（单位为每秒计数（cps））随偏置电流的变化关系；不同曲线对应离子阱上不同的射频电压峰值幅度。大反射镜分别为 (a) 未接地和 (b) 接地。与以下器件进行比较：(c) 在 4.5 K 时具有较小接地反射镜的器件，以及 (d) 在 6 K 下工作的、与 (b) 相同的器件。每个射频施加值对应的切换电流由水平轴上颜色相应的垂直标记表示。图示 BCR 值已按 DCR 进行了校正。DCR 以对数刻度绘于垂直轴上。

这种曲线形态与图3其他面板中的曲线相同。我们认为，这些偏移是下文所述射频耗散导致超导纳米线单光子探测器局部加热所致。数据与拟合结果高度吻合，这表明在采用非接地反射镜的器件中，超导纳米线单光子探测器存在感应射频电流。相比之下，该模型无法很好地拟合采用接地反射镜的器件的任何数据，因为模型表明，感应射频电流总会使 BCR 随 I_b 变化的曲线斜率变平。然而，超导纳米线单光子探测器对射频增强的响应，与其对温度升高的响应相似；图4(b)展示了一台代表性器件的情况。因此，我们推断，射频驱动造成的片上功耗会使超导纳米线单光子探测器局部加热，而这正是观测到的 BCR 对偏置电流的射频依赖性的主要来源。我们在另一台器件中使用阱集成超导纳米线单光子探测器来探测局部加热，并以超导纳米线单光子探测器的切换电流作为其温度的替代指标。如果关闭所施加的射频（$V_{\mathrm{peak}} = 45$ V），并在随后 ~10μs 内测量切换电流，我们推断超导纳米线单光子探测器的温度比无射频时的稳态温度高出约 0.5 K。

射频驱动。这为局部加热假设提供了定性而非定量的支持。这些器件中的射频电极厚 350 nm，而用于离子阱的器件中电极厚度为 ~6μm[7]；相应的线迹电阻增大，因而功耗也增加，这可能意味着，与采用较厚金电极、用于离子的器件相比，这些器件中的局部加热更为显著，因此后者对所施加射频电势的敏感度可能更低。

为确定探测器系统探测效率的校准值，我们采用参考文献20中描述的自对准设计，制备并测试了独立式超导纳米线单光子探测器；在低温下，光纤与超导纳米线单光子探测器采用端面耦合。层堆叠结构和纳米线几何结构与集成于离子阱的器件相同，唯一区别是将底部SiO_2 层的厚度优化至186 nm，以获得理论上的最高系统探测效率。我们使用峰值波长为395 nm的光纤耦合LED光源照射独立式超导纳米线单光子探测器。在室温下，使用光电倍增管（PMT）对光纤输出端的光子通量进行校准；该光电倍增管的

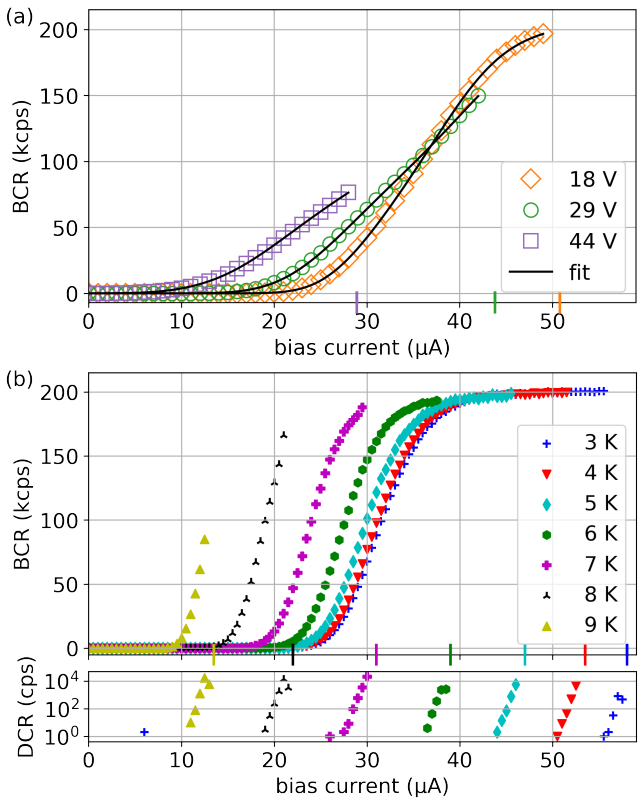

图4：亮计数率（BCR）和暗计数率（DCR），单位为每秒计数（cps），随偏置电流的变化关系。(a) 对图3(a)中的数据进行感应射频电流模型曲线拟合。(b) 阱集成超导纳米线单光子探测器在不同温度下、 I_b 无射频驱动时的 BCR 和 DCR。切换电流以水平轴上的标记表示。

量子效率由制造商提供。随后，在固定的LED功率下测量超导纳米线单光子探测器与光电倍增管各自计数率之比，即可确定超导纳米线单光子探测器相对于光电倍增管的系统探测效率。带铝镜的自对准超导纳米线单光子探测器层堆叠结构的系统探测效率最高达到68%，而不带镜面的超导纳米线单光子探测器的系统探测效率为40%，两者均在2.5 K下测得。超导转变温度远低于工作温度的超导纳米线单光子探测器，其系统探测效率通常与温度无关[10]。

总之，我们展示了一种改进型屏蔽氮化铌钛超导纳米线单光子探测器，并将其集成到线性离子阱中。与采用相同离子阱电极几何结构的先前工作相比，这些器件对外加囚禁射频电势的耐受性提高了一个数量级，工作温度也至少提高了 2.5 K[7]。这些阱集成超导纳米线单光子探测器应能够对荷质比低至每统一原子质量单位含 ~ 0.01 个基本电荷的离子种类进行基于荧光的态读出，涵盖量子信息实验中通常使用的大多数离子种类。未来的工作将致力于进一步提高超导纳米线单光子探测器的系统探测效率，并通过额外屏蔽进一步提升离子阱射频耐受性并降低芯片上射频耗散，目标是利用阱集成超导纳米线单光子探测器，对编码在 Ca^+ 离子中的量子比特进行高保真度读出。

我们感谢 D. V. Reddy 和 N. K. Lysne 对稿件提出的宝贵意见。本研究由美国国家标准与技术研究院（https://ror.org/05xpvk416）和 IARPA LogiQ 项目资助。本文是美国政府机构美国国家标准与技术研究院的一项成果，不受美国版权保护。

作者声明 利益冲突

作者声明不存在任何利益冲突。

作者贡献

B.H. 进行了模拟、制作了器件、采集并分析了数据，D.H.S. 和 V.B.V. 提供协助；B.H. 和 D.H.S. 在所有作者的意见基础上撰写了稿件；V.B.V. 和 D.H.S. 在 D.L.、R.P.M. 和 S.W.N. 的协助下监督了该项工作；V.B.V.、D.H.S.、D.L.、R.P.M. 和 S.W.N. 为该项工作争取了经费。

Benedikt Hampel：概念化（同等）；数据整理（牵头）；形式分析（牵头）；调查（牵头）；方法学（同等）；软件（牵头）；验证（同等）；可视化（牵头）；撰写——初稿（同等）；撰写——审阅与编辑（同等）。**Daniel H. Slichter**：概念化（同等）；形式分析（协助）；经费获取（同等）；调查（协助）；方法学（同等）；项目管理（同等）；资源（同等）；软件（协助）；监督（牵头）；验证（同等）；撰写——初稿（同等）；撰写——审阅与编辑（同等）。**Varun B. Verma**：概念化（同等）；形式分析（协助）；经费获取（同等）；调查（协助）；方法学（同等）；项目管理（同等）；资源（同等）；软件（协助）；监督（牵头）；验证（同等）；撰写——审阅与编辑（同等）。**Dietrich Leibfried**：经费获取（同等）；项目管理（同等）；资源（同等）；监督（协助）；撰写——审阅与编辑（同等）。**Richard P. Mirin**：经费获取（同等）；项目管理（同等）；资源（同等）；监督（协助）；撰写——审阅与编辑（同等）。**Sae Woo Nam**：经费获取（同等）；项目管理（同等）；资源（同等）；监督（协助）；撰写——审阅与编辑（同等）。

数据可用性

支持本研究结论的数据可在美国国家标准与技术研究院企业数据清单（EDI）中公开获取，网址为 http://doi.org/[doi]。

参考文献

[1]H. G. Dehmelt, 《单离子振荡器：潜在的终极激光频率标准》, IEEE仪器与测量汇刊 **IM-31**，83–87（1982）。[2]D. J. Wineland、C. Monroe、W. M. Itano、D. Leibfried、B. E. King 和 D. M. Meekhof, 《囚禁原子离子相干量子态操控的实验问题》, 美国国家标准与技术研究院研究期刊 **103**，259–328（1998）。[3]D. Kielpinski、C. Monroe 和 D. J. Wineland, 《大规模离子阱量子计算机的架构》。《自然》**417**，709–11（2002）。[4]C. Monroe 和 J. Kim, 《扩展离子阱量子处理器的规模》。《科学》**339**，1164–1169（2013）。[5]C. D. Bruzewicz、J. Chiaverini、R. McConnell 和 J. M. Sage, 《囚禁离子量子计算：进展与挑战》, 《应用物理评论》**6**，021314（2019）。[6]D. H. Slichter、V. B. Verma、D. Leibfried、R. P. Mirin、S. W. Nam 和 D. J. Wineland, 《用于集成到离子阱中的紫外敏感超导纳米线单光子探测器》, Optics Express **25**，8705–8720（2017）。[7]S. L. Todaro、V. B. Verma、K. C. McCormick、D. T. C. Allcock、R. P. Mirin、D. J. Wineland、S. W. Nam、A. C. Wilson、D. Leibfried 和 D. H. Slichter, 《使用阱集成超导光子探测器读出囚禁离子量子比特的态》, 《物理评论快报》**126**，010501（2021）。[8]W. J. Setzer、M. Ivory、O. Slobodyan、J. W. Van Der Wall、L. P. Parazzoli、D. Stick、M. Gehl、M. G. Blain、R. R. Kay、H. J. Mcguinness 等, 《利用单片集成单光子计数雪崩二极管探测囚禁离子的荧光》, Applied Physics Letters **119**，154002（2021）。[9]D. Reens、M. Collins、J. Ciampi、D. Kharas、B. F. Aull、K. Donlon、C. D. Bruzewicz、B. Felton、J. Stuart、R. J. Niffenegger、P. Rich、D. Braje、K. K. Ryu、J. Chiaverini 和 R. McConnell, 《使用阱集成雪崩光电二极管进行高保真离子态探测》, 《物理评论快报》**129**，100502（2022）。[10]E. E. Wollman、V. B. Verma、A. D. Beyer、R. M. Briggs、B. Korzh、J. P. Allmaras、F. Marsili、A. E. Lita、R. P. Mirin、S. W. Nam 等, 《具有高效率、低噪声和 4 K 工作温度的紫外超导纳米线单光子探测器》, Optics Express**25**，26792（2017）。

[11]D. V. Reddy, R. R. Nerem, S. W. Nam, R. P. Mirin, 和 V. B. Verma, 《在 1550 nm 下系统探测效率达 98% 的超导纳米线单光子探测器》, Optica **7**, 1649– 1653 (2020). [12]S. Crain, C. Cahall, G. Vrijsen, E. E. Wollman, M. D. Shaw, V. B. Verma, S. W. Nam, 和 J. Kim, 《使用超导纳米线单光子探测器高速、低串扰地探测 $^{171}Yb^{+}$ 量子比特》, Communications Physics **2**, 97 (2019). [13]E. E. Wollman, V. B. Verma, A. E. Lita, W. H. Farr, M. D. Shaw, R. P. Mirin, 和 S. W. Nam, 《超导纳米线单光子探测器千像素阵列》, Opt. Express **27**, 35279 35289 2019– ( ). [14]S. N. Dorenbos, E. M. Reiger, U. Perinetti, V. Zwiller, T. Zijlstra, 和 T. M. Klapwijk, 《硅基低噪声超导单光子探测器》, Applied Physics Letters **93**, 131101 (2008). [15]M. G. Tanner, C. M. Natarajan, V. K. Pottapenjara, J. A. O'Connor, R. J. Warburton, R. H. Hadfield, B. Baek, S. Nam, S. N. Dorenbos, E. B. Ure˜na, T. Zijlstra, T. M. Klapwijk, 和 V. Zwiller, 《在氧化硅基底上采用氮化铌钛超导纳米线增强电信波段单光子探测》, Applied Physics Letters **96**, 221109 (2010). [16]S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, 和 Z. Wang, 《采用吉福德-麦克马洪制冷机的高性能光纤耦合氮化铌钛超导纳米线单光子探测器》, Opt. Express **21**, 10208–10214 (2013).[17]J. Chang, J. W. N. Los, J. O. Tenorio-Pearl, N. Noordzij, R. Gourgues, A. Guardiani, J. R. Zichi, S. F. Pereira, H. P. Urbach, V. Zwiller, S. N. Dorenbos, 和 I. Esmaeil Zadeh, 《以 $99.5^{+0.5}_{-2.07}$% 系统探测效率和高时间分辨率探测电信波段单光子》, APL Photonics **6**, 036114 (2021). [18]R. Gourgues, J. W. N. Los, J. Zichi, J. Chang, N. Kalhor, G. Bulgarini, S. N. Dorenbos, V. Zwiller, 和 I. E. Zadeh, 《工作温度为 4 至 7 K 的超导纳米线单光子探测器》, Optics Express **27**, 24601–24609 (2019). [19]M. G. Moharam, T. K. Gaylord, E. B. Grann, 和 D. A. Pom- met, 《二元光栅严格耦合波分析的稳定高效实现公式》, Journal of the Optical Society of America A **12**, 1068 (1995). [20]A. J. Miller, A. E. Lita, B. Calkins, I. Vayshenker, S. M. Gru- ber, 和 S. W. Nam, 《损耗低于百分之一的紧凑型低温自对准光纤至探测器耦合》, Optics Express **19**, 9102 (2011).