

可见光-近红外万量级铅超导动态电感探测器阵列的设计与制备^{*}

李薇薇¹⁾²⁾ 李苗²⁾³⁾ 柴晔²⁾⁴⁾ 代旭城¹⁾ 吕昭斌¹⁾ 王一帆¹⁾
贺旺¹⁾ 郭伟杰⁵⁾ 王轶文^{1)†} 舒诗博^{2)†}

1) (西南交通大学物理科学与技术学院, 量子光电实验室, 成都 610031)

2) (中国科学院高能物理研究所, 粒子天体物理全国重点实验室, 北京 100049)

3) (上海师范大学数理学院, 上海 200234)

4) (湘潭大学物理与光电技术学院, 湘潭 411105)

5) (深圳国际量子研究院, 深圳 518048)

摘要: 超导动态电感探测器 (KID) 具有低噪声、高灵敏度、单光子分辨能力且容易扩展为大阵列的特点, 在天文探测领域得到了广泛研究与初步应用. 本文针对可见光-近红外波段, 设计、制备并测试了 20008 像素的超导动态电感探测器阵列. 阵列共 10 条读出线, 每条读出线的像素数量约 2000 个, 像素集中排布于直径 24 mm 的圆形区域内, 阵列整体尺寸 32 mm × 50 mm. 设计上, 通过仿真频率偏移随不同方向上像素间距的变化, 确定阵列的最优空间布局, 将像素间频率串扰控制在 220 kHz 以下, 以保障高密度阵列信号读出的完整性与稳定性; 通过对阻抗转换网络进行设计与优化, 使反射系数 $S_{11} < -11$ dB, 可实现阵列与测试线路间信号的高效传输; 此外还设计了微透镜阵列, 设计其光斑尺寸与电感尺寸相匹配, 用于提升探测器的光吸收率. 工艺上, 选用高电阻率、低超导转变温度的单质金属铅 (Hf) 作为超导薄膜材料, 采用直流磁控溅射工艺沉积超导薄膜, 制备了 KID 阵列. 在 20 mK 温度下测试了阵列的 S_{21} , 像素的内部品质因数 (Q_i) 在 3×10^3 至 80×10^3 之间, 并测得 Hf 薄膜的超导转变温度约为 350 mK, 展示了可见光-近红外波段万量级高密度 KID 阵列的潜在可行性.

关键词: 动态电感探测器, 超导探测器阵列, 铅

† 通信作者. E-mail: shusb@ihep.ac.cn

† 通信作者. E-mail: qubit@swjtu.edu.cn

* 国家自然科学基金 (批准号: 12373091, 61871333) 资助的课题.

1 引言

自 2003 年问世以来, 超导动态电感探测器 (Kinetic Inductance Detector, KID) [1] 技术快速发展. KID 最大的优势在于容易扩展为大阵列, 在毫米波及亚毫米波的天文探测中有重要应用 [2-4]. 同时, KID 具有本征的单光子能量分辨和光子计数能力 [5], 因此也逐渐应用于光学至近红外波段的天文探测. 随着系外行星直接探测、快速时变天体观测、暗弱面源观测等科学需求的牵引, KID 探测器像素数量发展迅速 [6-10], 国际上已从千像素量级跨越到万像素量级, 实现了大规模阵列的初步研制与应用 [6,11-14]. 相较而言, 国内该领域还处于起步阶段, 现有研究多集中于百像素量级及以下规模探测器的物理特性探索 [11,12,15-17]. 目前, 国外在高灵敏度大阵列红外探测器领域对我国实行出口管制和禁运, 国内应用于天文望远镜的近红外探测器十分有限, 所以发展自主红外探测技术是天文研究的战略亟需.

KID 基于高品质因数的超导微波谐振器结构 [18], 其探测原理为: 当入射光子能量大于金属超导能隙时 $h\nu > 2\Delta$, 光子被超导薄膜吸收, 拆散超导 Cooper 电子对, 产生准粒子同时改变超导体的表面阻抗及动态电感, 进而改变谐振峰的深度和位置. 通过读取谐振峰深度或谐振频率的变化可以得到入射光子的能量和数目, 或光子流功率等信息 [1]. 对于 BCS 超导体, 当 $T \ll T_C$ 时, 超导能隙满足 $2\Delta \approx 3.52k_B T_C$, 其中 k_B 为玻尔兹曼常数, T_C 为超导转变温度. 当光子能量被最大化利用产生准粒子信号时, KID 的单光子能量分辨能力由 Fano 极限给出:

$$R_{Fano} = \frac{1}{2\sqrt{2\ln 2}} \sqrt{\frac{\eta_{pb}^{max} E}{\Delta F}}, \quad (1)$$

其中 E 为光子能量, $\eta_{pb}^{max} \approx 0.59$ 是光子能量转换为准粒子的最大效率, $F \approx 0.2$ 为 Fano 因子 [19]. 公式 (1) 说明, 当入射光子能量一定时, 单光子能量分辨能力 R_{Fano} 与 Δ 呈负相关, 即制备高 R_{Fano} 的 KID 需要低 T_C 的超导材料. 另一方面, 超导薄膜的方块动态电感 (L_s) 在 BCS 理论下可表示为:

$$L_s = \frac{\hbar \rho_n}{\pi \Delta t}, \quad (2)$$

其中 ρ_n 为常温电阻率, t 为薄膜厚度. 可以看到, L_s 正比于 ρ_n , 反比于 Δ , 说明高电阻率、低超导转变温度

对应高动态电感, 而高动态电感不仅有助于提高探测器的动态电感比及响应度 [18,20], 还可以有效缩小像素尺寸. 此外, 高电阻率还有利于提高薄膜的光吸收率. 目前已知的高动态电感超导材料有 NbN, NbTiN, Hf, 前两种材料的 T_C 通常在 3 K 以上, 而 Hf 的 T_C 在 0.4 K 左右且具有较高的电阻率, 意味着 Hf 薄膜不仅具

有高 L_s 还具有较高的 R_{Fano} 和光吸收率^[20-23]. 同时, 单质金属薄膜的工艺相对简单, 适合大规模阵列的制备^[24]. 基于以上分析, 为制备高单光子能量分辨能力、高灵敏度和高光吸收率的超导 KID 探测器阵列, 我们选择高电阻率和低超导能隙 (转变温度) 的铪 (Hf) 作为探测器材料^[20], 主要研究目标为: 单光子能量分辨能力 $R \geq 8 @ 1064 \text{ nm}$, 内部品质因数 $Q_i \geq 100 \text{ k}$.

基于国内可见光-近红外波段天文探测的实际需求, 本文设计, 制备和测试了 20008 像素的大规模 KID 阵列. 本文首先研究了高密度大规模阵列易出现的频率串扰问题, 分别对水平、垂直、读出线两侧三个方向的相邻像素进行谐振频率串扰的仿真分析, 基于仿真结果优化像素空间排布方式和谐振频率分配方案, 从设计层面减小频率串扰; 同时针对阵列微带读出线与测试线路之间的阻抗失配问题, 完成了阻抗转换网络的设计与仿真, 以保障大规模阵列信号的低损耗读出; 此外还设计了微透镜阵列, 用于提升探测器阵列的光吸收率. 其次, 本文以低超导转变温度 ($T_C \approx 350 \text{ mK}$) 的 Hf 作为主要的超导薄膜材料, 优化了直流磁控溅射工艺参数, 实现大面积超导 Hf 薄膜的沉积, 以及万像素级 KID 阵列的制备. 最后, 我们测试了 KID 阵列在低温 (20 mK) 下的微波传输曲线 (S_{21}), 展示了可见光-近红外波段万量级高密度 KID 阵列的潜在可行性, 为后续阵列工艺优化与器件性能提升奠定基础.

2 仿真与设计

2.1 KID 阵列设计

KID 阵列设计主要包括单像素设计, 频率串扰仿真分析, 阻抗转换设计以及阵列的空间排布四个部分. 在电磁仿真软件 Sonnet 中参数设置为: 硅衬底厚度 $150 \mu\text{m}$, 相对介电常数 11.7; 100 nm Hf 薄膜动态电感 $L_s = 22.5 \text{ pH}/\square$; 150 nm Nb 薄膜动态电感 $L_s = 0.1 \text{ pH}/\square$.

如图 1 所示, 探测器像素采用集总式谐振电路, 由紧凑式叉指电容 (IDC) 与蜿蜒的电感条 (中间蓝色虚线框区域) 并联构成, 材料为 Hf. 为降低相邻像素间的频率串扰, 谐振器四周被一个 $2 \mu\text{m}$ 线宽的矩形框包围, 整体构成一个单像素, 尺寸 $129.5 \mu\text{m} \times 119 \mu\text{m}$. 蜿蜒电感条为光敏区, 呈方形布局, 尺寸 $39 \mu\text{m} \times 39 \mu\text{m}$, 电感条宽度 $w_i = 1.5 \mu\text{m}$, 电感条间距 $g_i = 1 \mu\text{m}$, 电感区设计对所有像素保持不变; 叉指电容环绕布设于电感四周, 电容宽度 $w_f = 2 \mu\text{m}$, 电容间距 g_f 为 $2 \mu\text{m}$ 或 $2.5 \mu\text{m}$. 通过调节电容总长度以调节谐振频率, 在 $4.117 - 8.470 \text{ GHz}$ 的带宽里设计约 2000 个像素. 为减小像素间距, 提高像素排布密度, 读出线采用微带线结构, 线宽 $w_r = 6 \mu\text{m}$, 与矩形框间隔 $g_1 = 2 \mu\text{m}$. 考虑到铌 (Nb) 的工艺相对成熟 (动态电感稳定), 读出线的材料选用 Nb 以方便后续的阻抗转换设计. 读出线与谐振器的耦合强度 (耦合品质因数 Q_c) 可通

过改变 $8\ \mu\text{m}$ 线宽的耦合器进行调节. 但本工作中该耦合器保持不变, 但因为像素频率的差异, 设计的 Q_c 在 6.6 k 到 74.7 k 之间.

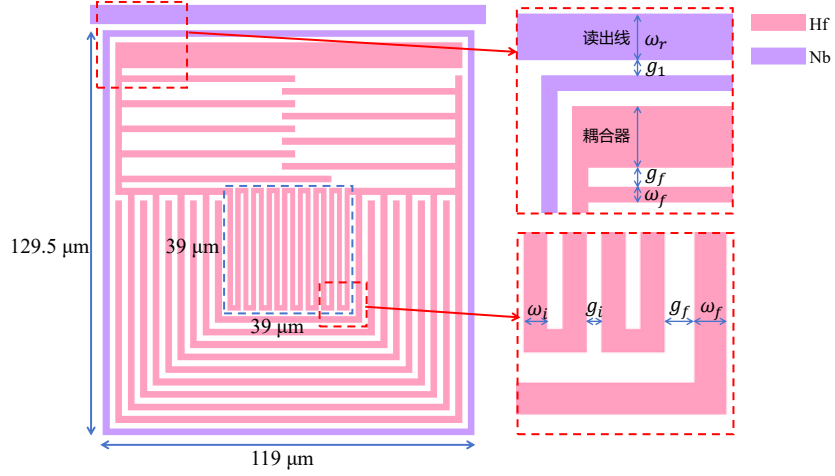


图 1 单像素设计图. 集总电路结构的谐振器与读出线电容耦合, 蓝色虚线框内为电感区, 四周环绕着叉指电容. 单像素整体尺寸 $129.5\ \mu\text{m} \times 119\ \mu\text{m}$.

Fig. 1. Single-pixel design. The lumped-element resonator is capacitively coupled to the readout line. The area within the blue dashed box is the inductor region, surrounded on all sides by interdigitated capacitors. The overall size of a single pixel is $129.5\ \mu\text{m} \times 119\ \mu\text{m}$.

高密度的像素排布会增强像素之间的电磁耦合, 表现为像素之间的频率串扰^[25,26], 使实际谐振频率偏离其设计值. 若频率串扰过大, 会导致阵列中相邻频率的谐振峰互相重合, 导致探测器像素无法正常工作, 影响阵列产率. 对于基准像素而言, 水平、垂直和读出线对侧方向上的三个相邻像素对其产生的串扰影响最为显著. 因此, 为了减小像素之间的频率串扰, 本文针对上述三种情况进行仿真分析. 仿真流程如下: 首先对两个单像素的谐振频率进行仿真, 获得基准谐振频率; 然后分别构建水平、垂直及读出线对侧三种近邻排布的双像素结构, 分析相邻像素的加入对基准像素谐振频率的影响, 以谐振频率偏移量作为频率串扰大小的定量表征. 通过改变近邻像素之间的间距和谐振频率间隔, 研究频率串扰的变化规律.

水平方向 (平行于读出线) 的频率串扰仿真设置如图 2(a) 所示. 为研究像素之间的水平间距对串扰的影响, 固定两像素的谐振频率间隔为 667 MHz, 对像素电感中心间距 X 在 $130\ \mu\text{m}$ 至 $600\ \mu\text{m}$ 范围内的频率串扰进行了仿真分析, 结果如图 2(b) 所示. 图中蓝色与橙线曲线分别对应低频与高频像素, 可以看到, 随着 X 的增大, 频率串扰显著降低, 并在 $X > 250\ \mu\text{m}$ 后趋于稳定. 为验证矩形框对频率串扰的抑制作用, 在相同间距 X 下, 对有无矩形框像素的频率串扰进行了对比仿真. 图中圆点与方框分别对应带矩形框

像素和无矩形框像素. 结果表明, 在相同情况下, 无矩形框像素的频率串扰整体上是带框像素的 2 倍以上, 证明了矩形框有屏蔽效果可有效抑制频率串扰. 对于带矩形框的像素, 当 $X > 150 \mu\text{m}$ 时, 频率串扰小于 220 kHz; 当 $X > 200 \mu\text{m}$ 时, 串扰低于 50 kHz. 综合考虑间距对频率串扰的影响和探测器阵列的排布紧凑性, 我们最终选取 $150 \mu\text{m}$ 作为像素的水平间距.

此外, 为进一步研究相邻像素的谐振频率间隔对频率串扰的影响, 我们对谐振频率间隔在 50 MHz 至 600 MHz 范围内的频率串扰进行仿真分析, 结果如图 2(c) 所示. 随着谐振频率间隔的增大, 频率串扰逐渐降低并在大于 200 MHz 后趋于平稳, 整体串扰低于 220 kHz. 因此, 我们将水平相邻像素的谐振频率间隔设定为 200 MHz 以上, 以保证阵列在高密度排布下仍具有较低的串扰水平.

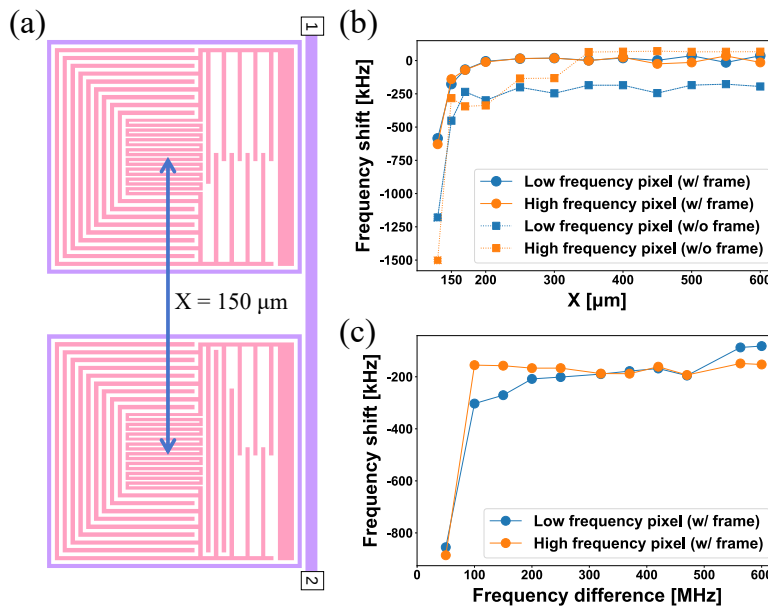


图 2 (a) 水平方向相邻像素的频率串扰仿真设置图;(b) 水平方向频率串扰随像素间距 X 的变化, 蓝色与橙色对应低频与高频像素, 圆点与方框对应有无矩形框; (c) 水平方向频率串扰随相邻像素之间谐振频率间隔的变化.

Fig. 2. (a) Schematics of the frequency crosstalk simulation between two horizontally adjacent pixels; (b) Simulated frequency crosstalk as a function of pixel spacing X , where blue and orange correspond to low-frequency and high-frequency pixels, and circles and squares correspond to cases with and without a rectangular frame; (c) Simulated frequency crosstalk as a function of the resonant frequency spacing between horizontally adjacent pixels.

垂直方向 (垂直于读出线) 的频率串扰仿真如图 3(a) 所示. 首先对垂直方向上相邻像素在不同间距下

的频率串扰进行仿真。固定两像素的谐振频率间隔为 987 MHz，像素电感中心的垂直间距记为 Y ，结果如图 3(b) 所示，可以看到频率串扰随间距 Y 的增大先显著降低后趋于稳定，且 $Y < 200 \mu\text{m}$ 时无矩形框像素的频率串扰是带框像素的 1.5 倍以上。当 $Y > 150 \mu\text{m}$ ，带框像素的频率串扰低于 220 kHz。综合考虑阵列整体排布的紧凑性和均匀性，最终选取与水平间距相同的垂直间距 $Y = 150 \mu\text{m}$ 。接着，在 $Y = 150 \mu\text{m}$ 的条件下，对垂直方向上相邻像素不同谐振频率间隔的情况进行仿真，结果如图 3(c) 所示。整体上看，随着谐振频率间隔的增大，频率串扰同样先减小后趋于稳定，当谐振频率间隔大于 300 MHz 时，频率串扰低于 220 kHz。因此，垂直方向上，相邻像素的谐振频率间隔设定为 300 MHz 以上。

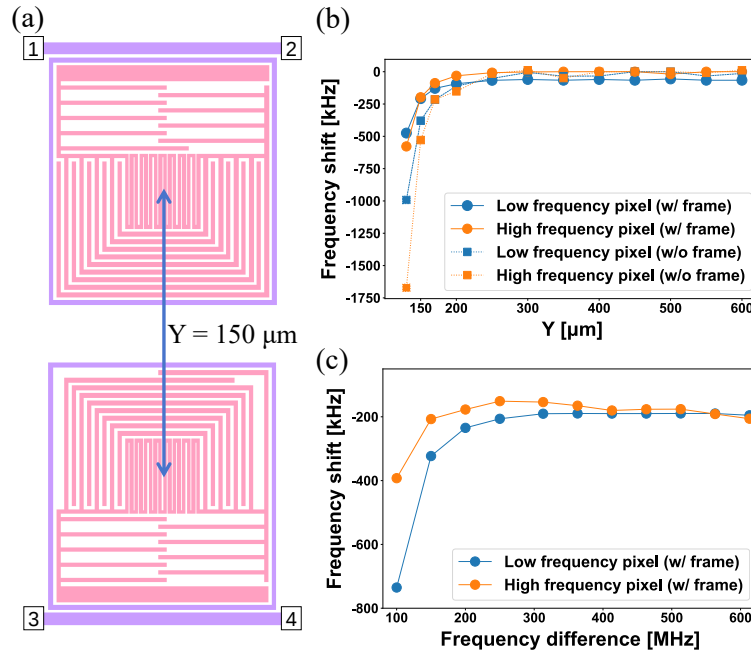


图 3 (a) 垂直方向相邻像素的频率串扰仿真设置图; (b) 垂直方向频率串扰随像素间距 Y 的变化，蓝色与橙色对应低频与高频像素，圆点与方框对应有无矩形框; (c) 垂直方向频率串扰随相邻像素之间谐振频率间隔的变化。

Fig. 3. (a) Schematics of the frequency crosstalk simulation between two vertically adjacent pixels; (b) Simulated frequency crosstalk as a function of pixel spacing Y , where blue and orange correspond to low-frequency and high-frequency pixels, and circles and squares correspond to cases with and without a rectangular frame; (c) Simulated frequency crosstalk as a function of the resonant frequency spacing between vertically adjacent pixels.

读出线两侧的频率串扰仿真如图 4(a) 所示。保持间距 $150 \mu\text{m}$ 不变，仿真了频率串扰随相邻像素谐振频率间隔的变化，结果如图 4(b) 所示。谐振频率间隔为 100 MHz 时，频率串扰高达 1100 kHz。而谐振频

率间隔大于 300 MHz 后, 频率串扰低于 220 kHz. 因此, 读出线两侧像素的谐振频率间隔设定为 300 MHz 以上. 相比水平和垂直相邻方向, 读出线两侧近邻像素的串扰更大, 这可能是因为读出线在中间起到了加强两个像素之间耦合的作用.

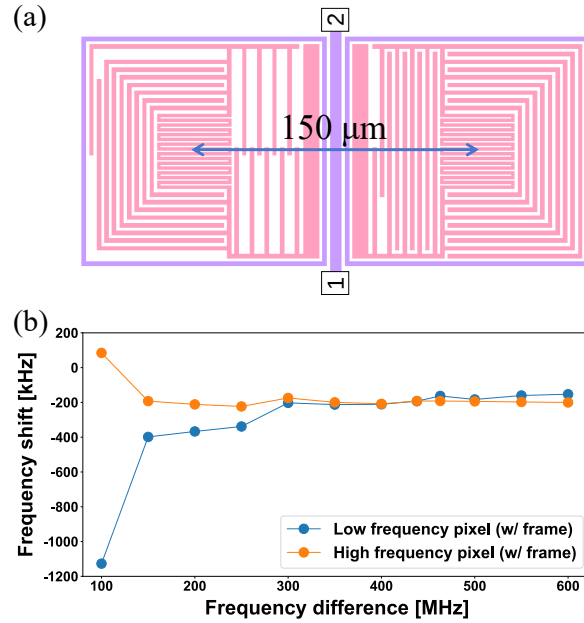


图 4 (a) 读出线两侧相邻像素的频率串扰仿真设置图; (b) 读出线两侧频率串扰随相邻像素谐振频率间隔的变化.

Fig. 4. (a) Schematics of frequency crosstalk simulation on both sides of the readout line; (b) Simulated frequency crosstalk as a function of the resonant frequency spacing between adjacent pixels on both sides of the readout line.

为了紧密排布, 阵列中的微带线主体线宽较窄 ($w_r = 6 \mu\text{m}$), 对应特征阻抗为 123.1Ω , 而信号输入线路和接头采用标准的 50Ω 特征阻抗, 两者存在明显的阻抗失配问题. 为实现读出线与信号线路之间的阻抗匹配, 降低信号反射, 我们基于切比雪夫阻抗变换理论^[27]设计了多级阻抗转换网络. 目标带宽 3–9 GHz, 具体设计过程如下: 首先, 根据目标带宽 ($\theta_a = 3 \text{ GHz}$, $\theta_b = 9 \text{ GHz}$) 确定通带的中心频率为 $\theta_m = 6 \text{ GHz}$, 进而得到分数带宽 $w = (\theta_b - \theta_a)/\theta_m = 1$. 再根据需要转换的输入阻抗 $Z_0 = Z_{in}$ 与输出阻抗 $Z_{n+1} = Z_{out}$ ($Z_{in} < Z_{out}$), 计算出阻抗比 $r = Z_{out}/Z_{in} = 2.46$; 根据 $r = 2.5$, $w = 1$, 选择 $n = 6$. 对阻抗进行归一化处理, 即令 $Z_0 = 1$, $Z_7 = r$. 再从切比雪夫阻抗变换表^[27]中查得前半段 Z_1 至 Z_3 的归一化阻抗值, 后半段 Z_4 至 Z_6 可由公式计算得到:

$$Z_j \Big|_{j=(n/2)+1 \text{ to } n} = \frac{r}{Z_{n+1-j}} \quad (3)$$

之后, 将归一化的阻抗换算为实际值, 即乘以 50Ω , 得到实际阻抗. 然后, 根据各段传输线的阻抗值, 仿真得到其对应的宽度及有效介电常数 ε_{eff} . 进而计算出各段传输线的长度

$$l = \frac{1}{16} \lambda_m = \frac{1}{16} \cdot \frac{c}{\theta_m \sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (4)$$

其中, c 为真空中光速, ε_{eff} 为各段传输线有效介电常数. 阻抗转换网络具体设计参数如表 1 所示, 设计结构如图 5(a) 所示, 网络由 8 节特性阻抗不同的微带线级联构成. 对阻抗转换网络进行 2 端口传输曲线的仿真, 结果如图 5(b). 反射系数 S_{11} 在整个工作频段内都小于 -11 dB, 即信号传输效率在 92% 以上, 可满足高密度 KID 阵列的宽带读出需求.

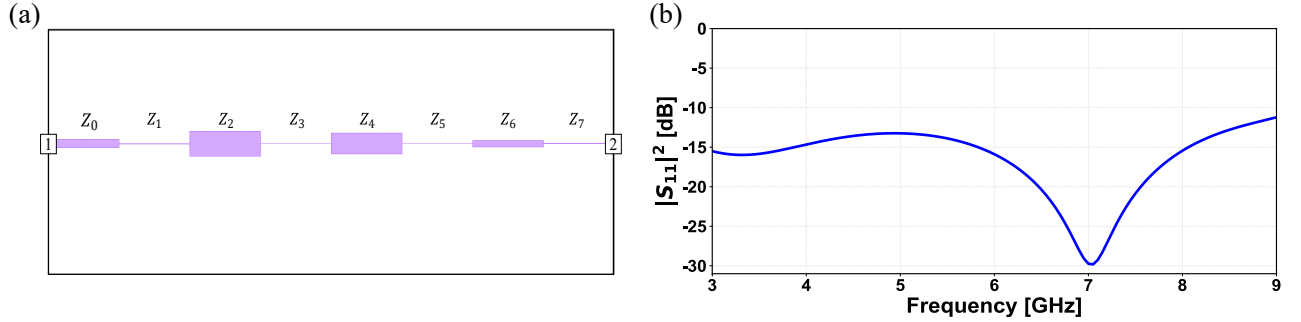


图 5 (a) 8 节阻抗转换网络设计图; (b) 阻抗转换网络的仿真 S_{11} , 在工作频段内都小于 -11 dB.

Fig. 5. (a) Design of the 8-section impedance transforming network; (b) Simulated S_{11} of the impedance transforming network, which is below -11 dB within the working frequency band.

表 1 切比雪夫阻抗转换网络设计参数

Table 1. Design parameters of Chebyshev impedance transformation network

	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7
阻抗 (Ω)	50	111.9	26.9	171.9	30.3	171.9	55.8	123.1
长度 (μm)	1129	1179	1070	1166	1081	1166	1139	1182
宽度 (μm)	121.8	9.2	369	1	308	1	95	6

通过改变单像素叉指电容的总长度并仿真其谐振频率, 可得到一系列电容长度与对应的谐振频率值. 本文对叉指电容总长度在 $58.5 - 1260 \mu\text{m}$ 范围内进行离散取值 (步长 $5 - 10 \mu\text{m}$), 仿真得到对应谐振频率覆盖范围为 $4.117 - 8.470$ GHz. 对这些数据进行多项式拟合与插值处理, 可以构建叉指电容长度与谐振频

率的映射关系, 从而可以根据目标谐振频率反向计算出所需的插指电容长度, 以实现阵列中各像素谐振频率的精确设计.

如图 6(a) 所示, 本工作中的探测器阵列共计 20008 个像素, 共布设 10 条读出线, 整体尺寸 $32 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. 所有探测器像素分布在直径 24 mm 的圆形范围内, 方便与微透镜阵列实现高效耦合, 图 6(b) 显示了局部放大图, 共包括 9 个像素, 像素间距 $150 \text{ }\mu\text{m}$. 每条读出线上约 2000 个像素, 为防止谐振频率混叠, 需合理设计以让谐振频率理想分布 [28]. 为使频率间隔与谐振峰半高宽的比值 $\Delta f/\text{FWHM} > 6$, 我们采取了分段非均匀的频率间隔分配方式: 在耦合较强、谐振峰较宽的高频频段, 设置较大的频率间隔, 比如 8.470 GHz 的 Q_c 最小, 为 6.6 k , $\text{FWHM} = 1.283 \text{ MHz}$, 所以该谐振频率附近的频率间隔最大 $\Delta f = 8 \text{ MHz}$; 而在耦合较弱、谐振峰较窄的低频频段, 则设置较小的频率间隔, 比如 4.117 GHz 的 Q_c 最大, 为 74.7 k , $\text{FWHM} = 0.055 \text{ MHz}$, 所以该谐振频率附近的频率间隔最小 $\Delta f = 0.8 \text{ MHz}$.

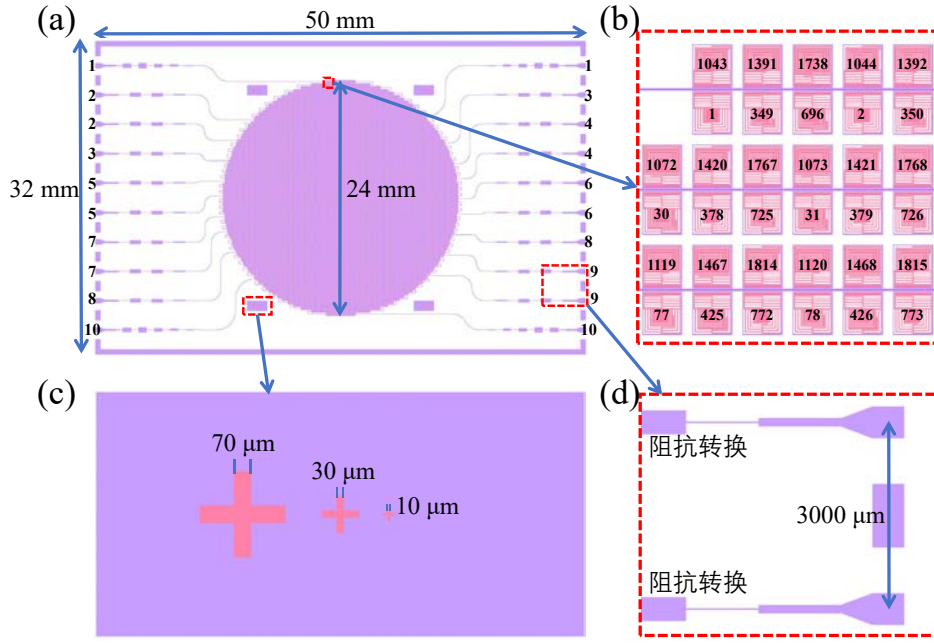


图 6 (a) 阵列整体版图, 共布设 10 条读出线, 20008 个探测器像素高密度分布在直径 24 mm 的圆形范围内; (b) 阵列第一条读出线频率排布的局部图, 第 1 个像素从 8.470 GHz 开始; (c) 阵列一角的对准标记; (d) 读出线的阻抗转换部分及焊盘, 相邻读出线间距 3 mm.

Fig. 6. (a) Overall layout of the detector array, with 10 readout lines in total. All 20008 detector pixels are densely distributed within a circular area of diameter 24 mm; (b) Local frequency distribution of the first readout line of the array, with the first pixel starting at 8.470 GHz; (c) Alignment mark at one corner of the array; (d) Impedance transforming section and bonding pads of the readout lines, with a spacing of 3 mm between adjacent readout lines.

同时, 为保证水平方向上相邻像素的谐振频率间隔在 200 MHz 以上, 垂直和读出线两侧方向上相邻像素的谐振频率间隔在 300 MHz 以上, 我们采用空间交错方式对阵列中的谐振频率进行排布: 谐振频率按从高到低的顺序 (第 1 个像素谐振频率为 8.470 GHz) 依次排布, 先排布读出线下方的像素, 再排布读出线上方的像素; 谐振频率上相邻的两个像素 (比如 8.470 GHz 与 8.462GHz), 在空间上水平间距为 450 μm, 中间间隔两个其他频段的像素; 空间上, 水平间距为 150 μm 的两个像素, 在频率域至少间隔 300 个谐振频率, 垂直方向和读出线两侧间距为 150 μm 的两个像素, 在频率域至少间隔 900 个谐振频率. 图 6(b) 展示了阵列中第一条读出线的频率排布局部图, 该条读出线共 2084 个像素, 像素 1 为 8.470 GHz, 像素 2 为 8.462 GHz, 像素 349 为 6.637 GHz, 像素 350 为 6.634 GHz, 像素 696 为 5.727 GHz, 像素 1043 为 5.226 GHz,

像素 1391 为 4.837 GHz..... 各方向上相邻像素的谐振频率间隔均满足我们的设计要求.

此外, 为了与后续设计的微透镜阵列进行精确对准, 我们在探测器阵列的四个角分别设计了对准标记, 如图 6(c) 所示. 对准标记为十字形, 每一处的对准标记由 3 个不同线宽十字形构成, 线宽分别为 $10\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$, 和 $70\ \mu\text{m}$. 不同线宽的十字形标记设计能够提供不同精度的对准参考, 有助于在封装过程中, 实现探测器阵列与微透镜阵列的高精度对准, 提高光学耦合效率. 图 6(d) 为两条读出线输出端的阻抗转换部分和焊盘.

2.2 微透镜阵列设计

为将入射光聚焦至每个像素的光敏区 (图 1 中 $39\ \mu\text{m} \times 39\ \mu\text{m}$ 的电感区), 我们仿真设计并制备了与探测器阵列匹配的微透镜阵列. 首先, 针对单个子透镜利用 Zemax 软件进行仿真, 如图 7(a) 所示. 考虑到光学性能以及机械装配的可行性, 微透镜阵列与探测器阵列之间的空气间隙设定为 $0.8\ \text{mm}$, 微透镜厚度设定为 $1\ \text{mm}$, 并根据探测器阵列像素间距设定入瞳直径为 $150\ \mu\text{m}$. 考虑到石英材料色散特性随波长微弱变化, 以及样品盒和微透镜阵列的加工误差 $\pm 100\ \mu\text{m}$, 我们分别仿真了当入射光波长为 $400\ \text{nm}$ 与 $2000\ \text{nm}$ 时, 子透镜在离焦 $\pm 200\ \mu\text{m}$ 范围内的成像情况. 仿真结果如图 7(b) 所示, 所有情况下, 聚焦的光斑尺寸均在 $40\ \mu\text{m}$ 以内, 可以很好的匹配探测器像素的光敏区.

微透镜阵列实物图如图 7(d) 所示, 中间透明区域为子透镜覆盖区域. 考虑到微透镜制造过程中的边缘效应, 即位于阵列边缘的子透镜在加工时物理尺寸上容易产生误差, 我们设计微透镜的子透镜物理覆盖区域比探测器阵列的区域更大, 以确保探测器阵列正上方的子透镜光学性能一致. 此外, 为确保微透镜阵列与正下方的探测器阵列可以高精度对准, 我们在微透镜阵列版图的相同位置上, 设计了与探测器阵列完全相同的十字对准标记. 如图 7(e) 所示, 十字形标记采用镀铬工艺制作, 镀铬区域具有遮光性, 在显微镜下, 镀铬的十字形标记可与透明背景形成鲜明对比, 方便探测器阵列和微透镜阵列的对准. 图 7(d) 中上下两侧的透明区域未制作子透镜, 其作用是作为紫外固化胶的曝光窗口, 紫外光可透过此区域照射紫外固化胶水, 从而将微透镜阵列固定在样品盒上. 微透镜阵列与探测器阵列之间的空气间距通过样品盒上设计的 $0.95\ \text{mm}$ (探测器阵列厚度 $0.15\ \text{mm}$, 空气间距 $0.8\ \text{mm}$) 台阶进行控制. 微透镜阵列具体的设计参数如表 2 所示.

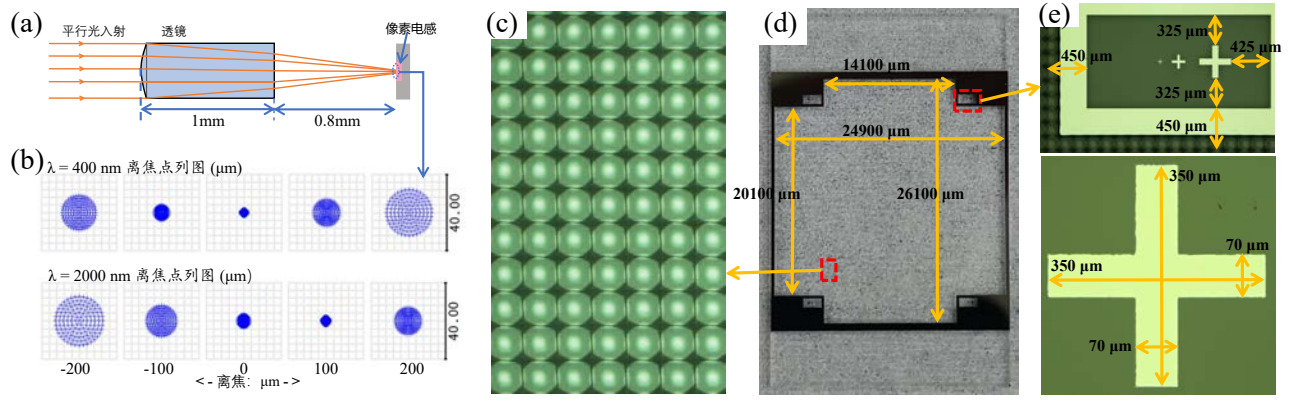


图 7 (a) 微透镜仿真设置图, 透镜厚度为 1 mm, 与探测器间隔 0.8 mm 空气层; (b) 光学及近红外波段的离焦点列图, 显示在离焦 $\pm 200 \mu\text{m}$ 范围内, 光斑尺寸均在 $40 \mu\text{m}$ 以内; (c) 显微镜下微透镜阵列局部图; (d) 微透镜阵列实物图; (e) 微透镜对准标记及其局部放大图.

Fig. 7. (a) Simulation setup diagram of the microlens, with a lens thickness of 1 mm and an air gap of 0.8 mm between the microlens and detector; (b) Defocus light spot diagrams at optical and near-infrared wavelengths, showing that the spot sizes remain below $40 \mu\text{m}$ for a defocus range of $\pm 200 \mu\text{m}$; (c) Local view of the microlens array under the microscope; (d) Photograph of the fabricated microlens array; (e) Alignment marks of the microlens array and enlarged partial view of the alignment marks.

表 2 微透镜阵列设计参数

Table 2. Design parameters of the microlens array

参数	数值
微透镜型号	ML-S150-F1.5
材料	熔融石英 JGS1
尺寸	26 mm × 40 mm
厚度	1 mm
焦距	1.5 mm
折射率	≈ 1.456
曲率半径	0.684 mm
子单元形状	正方形
子单元间距	150 μm
排列方式	密接
波长范围	400 ~ 2000 nm
厚度精度	$\pm 0.1 \text{ mm}$

3 工艺与测试

3.1 阵列的工艺制备

阵列的工艺制备流程如图8所示, 工艺制备参数如表 3所示, 具体制备步骤如下:

(a) 备片. 本文采用 4 英寸、厚度 150 μm 的双面抛国产单晶硅片作为衬底, 该衬底具有低介电损耗、高机械稳定性与良好的表面平整度, 可降低器件的介质损耗并保证后续微纳加工的图形精度. 为去除硅片表面的有机污染物, 需对硅片进行清洁处理: 依次用丙酮、异丙醇进行超声清洗, 然后用氮气吹干, 再置于热板上烘烤, 消除衬底表面吸附的水汽.

(b) 匀胶. 为了增强衬底表面与光刻胶的黏附性, 先在衬底表面旋涂一层增粘剂, 再旋涂一层光刻胶. 匀胶过程需要注意旋涂转速, 若旋涂转速过快, 会导致光刻胶无法均匀地覆盖在衬底表面. 所以需先低速旋涂, 后加速旋涂. 旋涂完置于热板上烘烤, 固化胶层.

(c) 光刻、显影. 本文采用 DWL66 + 激光直写光刻机 (1 μm 写头) 进行 Hf 薄膜图形曝光. 曝光过程中需选取合适的曝光剂量, 若曝光剂量过小, 会导致图形线宽偏窄, 且容易留残胶. 由于阵列排列密集且

最小间隙为 $1\ \mu\text{m}$, 所以我们适当增加曝光剂量, 以减小间隙留残胶的情况. 曝光完成后, 使用碱性显影液静置显影. 随后迅速使用去离子水冲洗终止显影, 再用氮气吹干表面. 然后对光刻胶进行坚膜处理, 使光刻胶里的溶剂进一步挥发, 同时固化光刻胶图案. 最后, 用打胶机去除残留的光刻胶. 光刻胶的去胶速率约为 $1.5\ \text{nm/s}$, 去胶时间不宜过长, 否则会影响图形区域的光刻胶厚度, 进而影响后续的剥离.

(d) 溅射 Hf 薄膜. 本文利用 Kurt J. Lesker 公司的 PRO Line PVD75 设备, 采用直流磁控溅射工艺进行超导薄膜的沉积. 采用 $50\ \text{W}$ 溅射功率沉积 Hf 薄膜. 先预溅射 Hf 靶材, 以去除靶材表面的氧化层, 再正式溅射, 溅射速率约为 $2.08\ \text{nm/min}$, 最终形成 $100\ \text{nm}$ Hf 薄膜.

(e) 剥离 Hf 薄膜. 将沉积有 Hf 薄膜的硅片浸泡在丙酮溶液中超声清洗, 软化溶解光刻胶, 将覆盖在光刻胶上的 Hf 薄膜剥离下来. 然后, 将硅片转移至异丙醇溶液中超声清洗, 以去除残留的丙酮和光刻胶残渣. 此过程需观察并控制超声的功率和时间, 避免超声功率过大或超声时间过长而导致 Hf 薄膜脱落.

(f) 溅射 Nb 薄膜. 采用同样的直流磁控溅射工艺, 在剥离完成的 Hf 薄膜上沉积 Nb 薄膜. 采用 $900\ \text{W}$ 溅射功率沉积 Nb 薄膜. 同样先预溅射, 再正式溅射, 溅射速率约为 $68.2\ \text{nm/min}$, 最终形成 $150\ \text{nm}$ Nb 薄膜.

(g) 匀胶. 与步骤 (b) 操作相同.

(h) 光刻、显影. 与步骤 (c) 操作相同.

(i) 刻蚀 Nb 薄膜. 本文采用 HZ-R200 电容耦合等离子体刻蚀机进行 Nb 薄膜的图形化刻蚀. 刻蚀气体为 CF_4 和 O_2 的混合气体, 刻蚀速率约 $21.4\ \text{nm/min}$. 刻蚀完后, 需在显微镜下观察整片样品的颜色, 并用万用表进行导通测试 (不导电表示刻蚀完成), 确保 Nb 完全刻蚀至硅衬底, 避免因刻蚀不到位而导致器件短路.

(j) 去胶. 将沉积有 Hf 薄膜与 Nb 薄膜的衬底依次浸入丙酮、异丙醇中进行超声清洗, 去除光刻胶, 此过程同样需要注意控制超声功率和时间. 最后用氮气吹干表面, 用划片机对基片进行分割, 完成阵列样品的整体制备.

表 3 阵列制备工艺参数

Table 3. Process parameters for array fabrication

序号	工艺步骤	工艺参数
(a)	备片	丙酮 8 min; 异丙醇 5 min; 100 °C 烘 1 min
(b)	匀胶	增粘剂 AR 300-80NEW: 800 r/min 2 s, 4000 r/min 35 s; 100 °C 烘 2 min; 光刻胶 AZ6112: 600 r/min 6 s, 4000 r/min 40 s; 100 °C 烘 2 min
(c)	光刻、显影	曝光: power 180 mW, Intensity 40%, filter 12.5%, 20 min 38 s; 显影: ZX238 显影液, 1 min 20 s; 100 °C 烘 2 min; O ₂ Plasma 打胶: 150 W, 1 min
(d)	溅射 Hf 薄膜	本底真空 $< 5 \times 10^{-8}$ Torr, 溅射功率 50 W, Ar 气压 2.5 mTorr; 预溅射 180 s; 正式溅射 2880 s; 厚度 100 nm
(e)	剥离	丙酮 40 min; 异丙醇 10 min
(f)	溅射 Nb 薄膜	本底真空 $< 5 \times 10^{-8}$ Torr, 溅射功率 900 W, Ar 气压 9 mTorr; 预溅射 60 s; 正式溅射 132 s; 厚度 150 nm
(g)	匀胶	增粘剂 AR 300-80NEW: 800 r/min 2 s, 4000 r/min 35 s; 100 °C 烘 2 min; 光刻胶 AZ6112: 600 r/min 6 s, 4000 r/min 40 s; 100 °C 烘 1 min
(h)	光刻、显影	曝光: power 108 mW, Intensity 40%, filter 12.5%, 18 min 58 s; 显影: ZX238 显影液, 2 min; 100 °C 烘 2 min; O ₂ Plasma 打胶: 150 W, 2 min
(i)	刻蚀	RF power 50 W, CF ₄ 80 sccm, O ₂ 8 sccm, Press 30 mTorr, 7 min
(j)	去胶	丙酮 10 min; 异丙醇 10 min

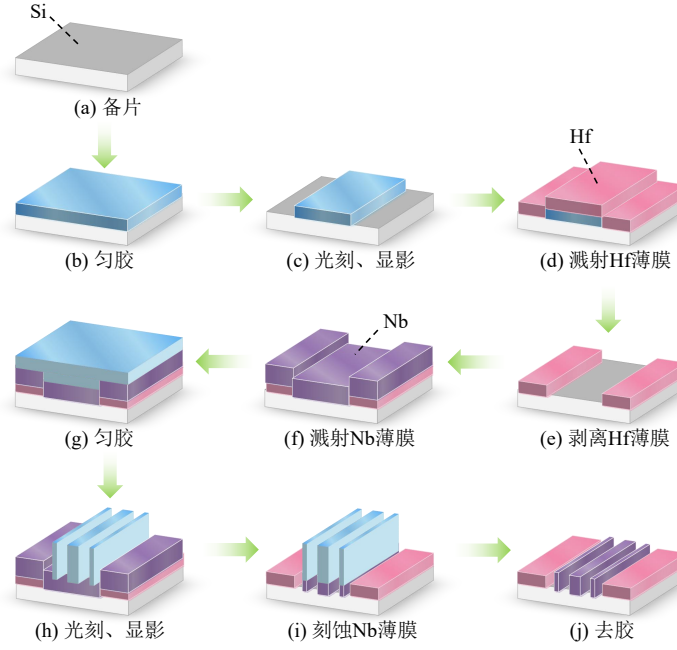


图 8 阵列工艺制备流程图

Fig. 8. Schematic Diagram of the Array Fabrication Process.

3.2 KID 暗测试

首先, 对 Hf 薄膜工艺优化阶段制备的器件进行了暗测试. 该器件采用共面波导分布式谐振器结构, 其谐振频率只需通过改变谐振器长度可实现调控, 且薄膜特性受器件几何结构的影响较小, 能够较为真实地反映薄膜自身的超导特性. 内部品质因数 Q_i 用于表征谐振器的内部损耗, 其定义为探测器内存储的总能量与每周期内部耗散能量的比值. Q_i 值越高, 意味着探测器的内部损耗越小, 能量耗散越低, 对应探测器的灵敏度越高, 是衡量超导 KID 本征性能的关键参数. 图 9(a) 为 100 nm Hf 薄膜器件其中一个谐振器 (谐振频率约 0.894 GHz) 的谐振峰随温度的变化. 依据 BCS 超导理论, 温度升高会打破超导库珀对, 产生大量准粒子, 准粒子密度的增加会使动态电感增大. 根据谐振频率计算公式 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, 其中 L 为谐振器总电感 (L 为动态电感与几何电感之和), C 为谐振器等效电容, 动态电感的增加会导致谐振频率降低, 即谐振峰往低频方向偏移. 同时, 准粒子密度增大也会导致谐振器的内部品质因数 Q_i 降低. 又根据有载品质因数计算公式 $Q_r = 1/Q_i + 1/Q_c$, 其中 Q_c 为耦合品质因数, 一般不随温度变化. Q_r 与谐振峰半高宽成反比, Q_i 降低导致 Q_r 降低, 进而导致谐振峰展宽且深度变浅.

我们对图 9(a) 谐振器的谐振频率随温度的变化进行拟合^[18]. 由于制冷机冷盘上的温度计与测试样品

盒之间存在一定距离, 导致样品的实际温度略高于温度计读数, 因此拟合时对温度数据作了 +6 mK 的修正. 超导转变温度 T_C 根据实验测量结果设定为 350 mK, 拟合结果如图 9(b) 所示. 图中, 红色星号为温度修正后的实验测量值, 红色实线为拟合曲线. 从图中可见, 在 16 mK 至 86 mK 的范围内, 拟合曲线与实验数据吻合良好, 拟合得到动态电感比 α 为 0.937. 同时, 我们通过仿真得到动态电感 $L_s = 22.5 \text{ pH}/\square$, $\alpha \approx 0.945$, α 与拟合值非常接近, 验证了拟合结果的可靠性.

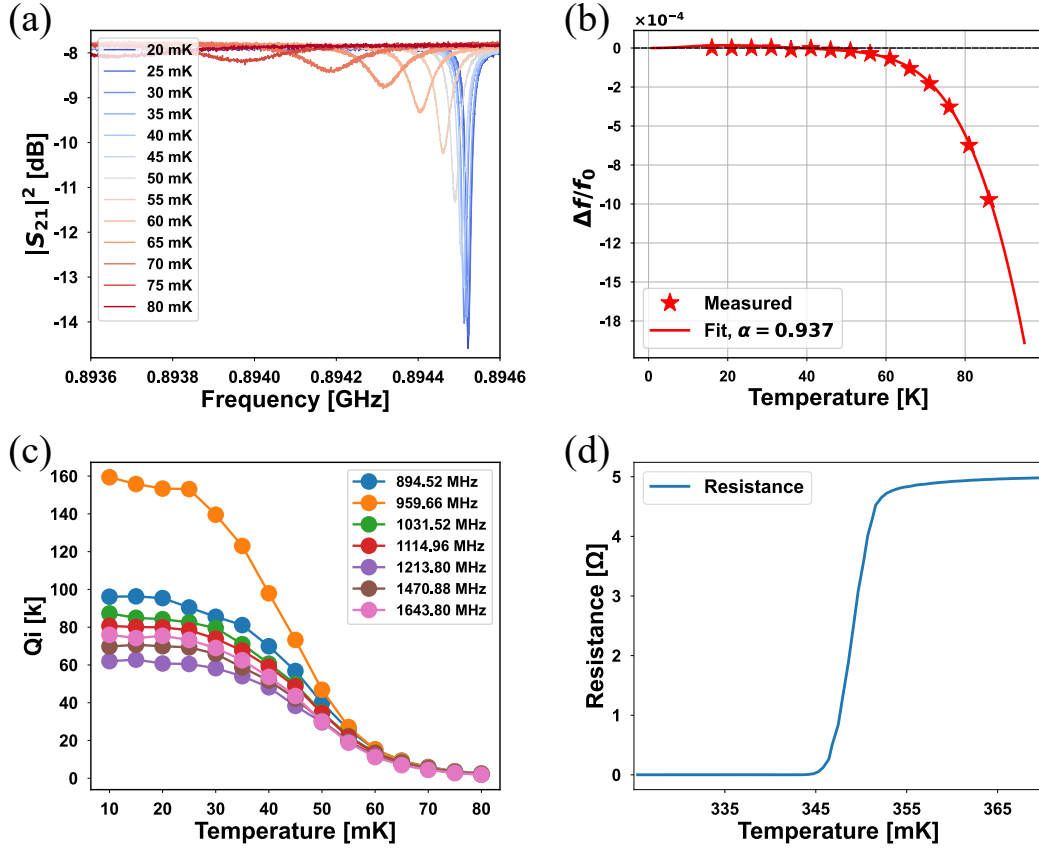


图 9 (a) 0.894 GHz 谐振器的谐振峰随温度的变化; (b) 0.894 GHz 谐振器的谐振频率偏移量随温度的变化; (c) 100 nm Hf 薄膜共面波导谐振器 Q_i 随温度的变化. 10 mK 时的 Q_i 在 60 k 与 160 k 之间; (d) 100 nm Hf 薄膜的电阻-温度曲线, $T_C \approx 350$ mK.

Fig. 9. (a) Variation of the resonance peak of the 0.894 GHz resonator with temperature; (b) Temperature dependence of the resonant frequency shift of the 0.894 GHz resonator; (c) Temperature dependence of Q_i for 100 nm Hf thin-film coplanar waveguide resonators. The Q_i value at 10 mK lies between 60 k and 160 k; (d) Resistance-temperature curve of the 100 nm Hf thin film, $T_C \approx 350$ mK.

图 9(c) 展示了各谐振器 Q_i 随温度的变化, 可以看到, 各谐振器的 Q_i 在 30 mK 以下逐渐饱和. 在 10 mK 时达到最高值, 在 60 k 至 160 k 之间. 30 mK 以下的 Q_i 符合我们的预期值, 可作为探测器的工作

温区. 当温度大于 30 mK 后, Q_i 开始迅速降低. 80 mK 时, Q_i 已低于 3 k.

图 9(d) 展示了采用四端法测得的 100 nmHf 薄膜在低温下的电阻-温度特性曲线, 结果显示其超导转变温度 $T_C \approx 350$ mK, 与 Coiffard 等 [20] 采用相同倾斜溅射工艺制备的 Hf 薄膜的 $T_C \approx 355$ mK 非常接近.

此外, 我们利用光谱椭偏仪对 85 nm Hf 薄膜进行了表征, 在入射角 65° 情况下测得振幅角 ψ 与相位差 Δ , 计算得到薄膜的折射率 n 与消光系数 k [29], 结果如图 10(a)(b). 然后利用光学传输矩阵法计算得到薄膜的反射率、透射率与吸收率 [29-31], 如图 10(c) 所示, 在波长 400-1000 nm 的范围内, 85 nm Hf 薄膜的吸收率在 39-50% 之间.

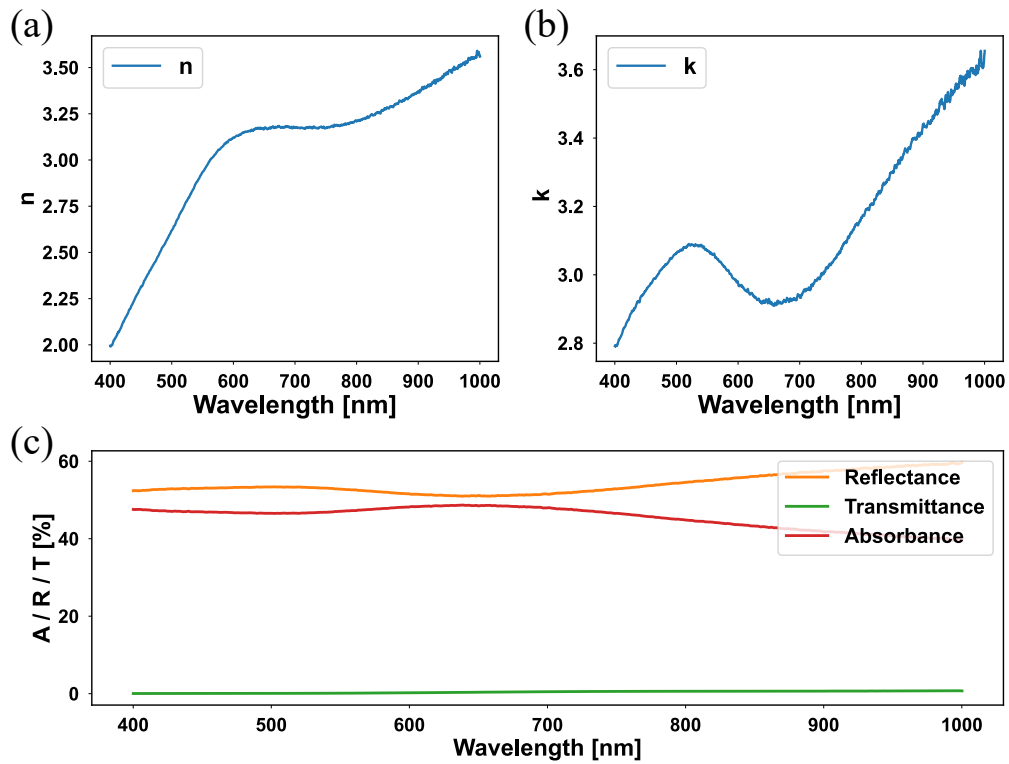


图 10 (a) 85 nm Hf 薄膜折射率 n 随波长的变化; (b) 85 nm Hf 薄膜消光系数 k 随波长的变化; (c) 85 nm Hf 薄膜反射率、透射率以及吸收率随波长的变化. 在 400 nm-1000 nm 的波长范围内, 反射率在 50-60%, 透射率在 1% 以下, 吸收率在 39-50%.

Fig. 10. (a) Variation of refractive index n of the 85 nm Hf film with wavelength; (b) Variation of extinction coefficient k of the 85 nm Hf film with wavelength; (c) Variations of reflectance, transmittance and absorptance of the 85 nm Hf film with wavelength. In the wavelength range of 400–1000 nm, the reflectance ranges from 50% to 60%, the transmittance is below 1%, and the absorptance varies between 39% and 50%.

在完成 Hf 薄膜工艺参数的优化, 确定内部品质因数与超导转变温度符合我们的预期且具备正常测试条件, 同时确定动态电感以及动态电感比之后, 我们进一步设计、制备并测试了 KID 阵列. 如图 11(a) 所示, 阵列通过弹簧片固定于样品盒内, 样品盒由导热性优异的非超导金属铜制成, 采用铝线键合工艺完成外部电路与阵列的连接, 置于稀释制冷机内进行低温测试, 测试最低温度为 20 mK. 图 11(b) 和图 11(c) 分别是阵列局部显微镜照片和单像素显微镜照片.

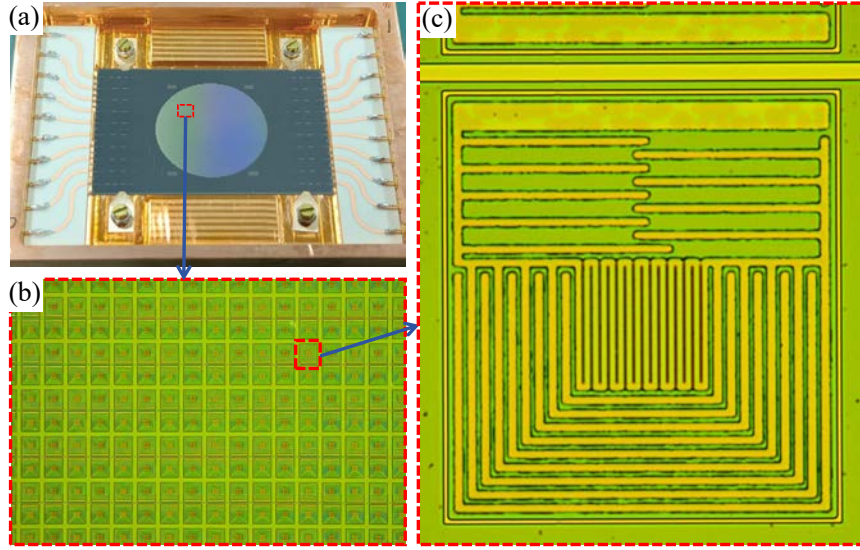


图 11 (a) 探测器阵列及样品盒; (b) 探测器阵列局部显微照片; (c) 单像素显微照片.

Fig. 11. (a) Detector array and sample holder; (b) Micrograph of part of the detector array; (c) Micrograph of a single pixel.

我们使用矢量网络分析仪对 KID 阵列其中一条读出线的传输曲线 S_{21} 进行了变温和变功率测试, 由于低温放大器的工作频段 (4-8 GHz) 限制, 所以频率最高只测试到了 9.3 GHz. 图 12(a) 展示了 20 mK 下阵列 3 GHz - 9.3 GHz 的传输曲线 S_{21} . 结合变温和变功率的测试结果, 我们发现 7.500 GHz 之前的谐振峰不随温度或功率变化, 而 7.500 GHz 之后的谐振峰表现出明显的温度与功率依赖特性, 因此我们判断阵列像素的谐振峰从 7.500 GHz 开始. 相比于阵列设计的谐振频率 4.117 – 8.470 GHz, 实际测得的谐振峰则主要集中在 7.500 – 9.300 GHz, 谐振频率整体偏高. 我们假设实际像素尺寸与设计尺寸一致, 谐振频率的偏移仅由动态电感的变化引起, 将实验测得的最低谐振频率 7.500 GHz 与设计最低谐振频率 4.117 GHz 进行仿真对比, 得到 Hf 薄膜的实际动态电感 $L_s \approx 6.4$ pH/□. 在该动态电感下, 阵列设计的谐振频率范围由原来的 4.117 – 8.470 GHz 变为了 7.500 – 15.420 GHz, 对应 7.500 – 9.300 GHz 范围内设计的像素数量约 800 个. 图 12(a) 中的插图红色虚框 7.500 GHz 至 9.300 GHz 的放大视图, 该频段内可观测到约 220 个谐振峰, 对应像素成品率约为 27.5%.

上述假设是基于加工尺寸无误差的理想情况, 实际上阵列整体谐振频率偏高和部分像素无谐振响应, 也可能源于加工制备过程中的非理想因素. 曝光剂量标识显示, 在溅射 Hf 薄膜之前的曝光过程中, 我们的曝光剂量偏大, 导致电感条的实际线宽在 $1.5 \mu\text{m}$ 至 $2 \mu\text{m}$ 之间, 大于设计值 $1.5 \mu\text{m}$, 减小了像素的等效电感, 导致谐振频率偏高. 假设所有电感条宽度都变为 $2 \mu\text{m}$, 仿真得到最低谐振频率变为了 4.749 GHz, 即电

感条线宽偏大最多使谐振频率变化 +632 MHz. 在 Hf 薄膜剥离过程中, 剥离不彻底则容易在电感间隙区域形成金属残留, 如图 11(c) 中的黑色部分, 造成局部区域短路. 短路区域一方面也会减小等效电感, 导致谐振频率偏高; 另一方面会影响像素结构的完整性, 可能导致像素无法产生有效谐振响应. 我们对像素局部区域短路的情况也进行了仿真, 结果显示谐振频率变化在 +1 GHz 以内. 基于上述分析, 我们认为实测谐振频率整体偏高的主要原因是 Hf 薄膜动态电感的变化较大, 而动态电感的大幅变化也反映了目前我们 Hf 薄膜工艺的不稳定.

根据图 12(a) 可以看到, S_{21} 基线起伏较大. 可能原因有两个, 其一, 我们采用的激光直写工艺的极限线宽为 $1\ \mu\text{m}$, 与阻抗转换中的最小线宽相同, 因此曝光剂量的偏差会带来显著的变化, 使得传输线的实际特征阻抗偏离设计值. 其二, Hf 薄膜器件需要极低的工作温度 (30 mK 以下), 因此我们没有采用导热性差的超导金属作为微带线接地层, 而是以导热性优异的铜盒作为接地层. 衬底与铜盒之间的空气间隙, 会改变微带线的特征阻抗, 进而影响阻抗转换网络的正常工作 [32]. 此外, 当频率超出放大器工作带宽 4 - 8 GHz 时, 线路中器件的阻抗不匹配占主导.

我们对阵列的谐振峰进行拟合, 得到像素的 Q_i 主要分布在 3 k 至 30 k 之间, 如图 12(b) 所示. 阵列像素的 Q_i 相比于工艺优化阶段制备的器件偏低, 其原因可分为三个方面. 首先, 与光刻和剥离的工艺有关. 如图 11(c), 由于曝光剂量偏差和剥离不彻底导致图形线宽不均匀, 引入额外的损耗, 导致 Q_i 降低 [33]. 其次, 在相同溅射条件下, 阵列 Hf 薄膜的沉积速率为 $2.08\ \text{nm}/\text{min}$, 只有工艺优化阶段的 45.8%, 这会显著增加溅射过程中腔内残余气体与 Hf 反应的程度, 产生氧化铪等非超导材料, 导致薄膜 T_C 降低, 同时限制 Q_i 水平 [34,35]. 最后, 其他研究表明, 样品盒采用非超导材料也会使谐振器的 Q_i 降低 [36].

图 11(c) 为部分像素的内部品质因数 Q_i 随温度的变化. 与工艺优化阶段制备的器件相比, 阵列像素的 Q_i 在 30 mK 以下饱和平台不明显, 可能由于 Hf 薄膜 T_C 低于预期所导致. 同时, 随着温度升高, Q_i 也未像工艺优化阶段制备的器件那样符合 Mattis-Bardeen 理论地降低, 说明这部分 Q_i 并非由超导体内热激发的准粒子所限制, 我们认为可能与材料本身中的氧化铪等非超导材料有关, 后续将继续对阵列的工艺开展优化.

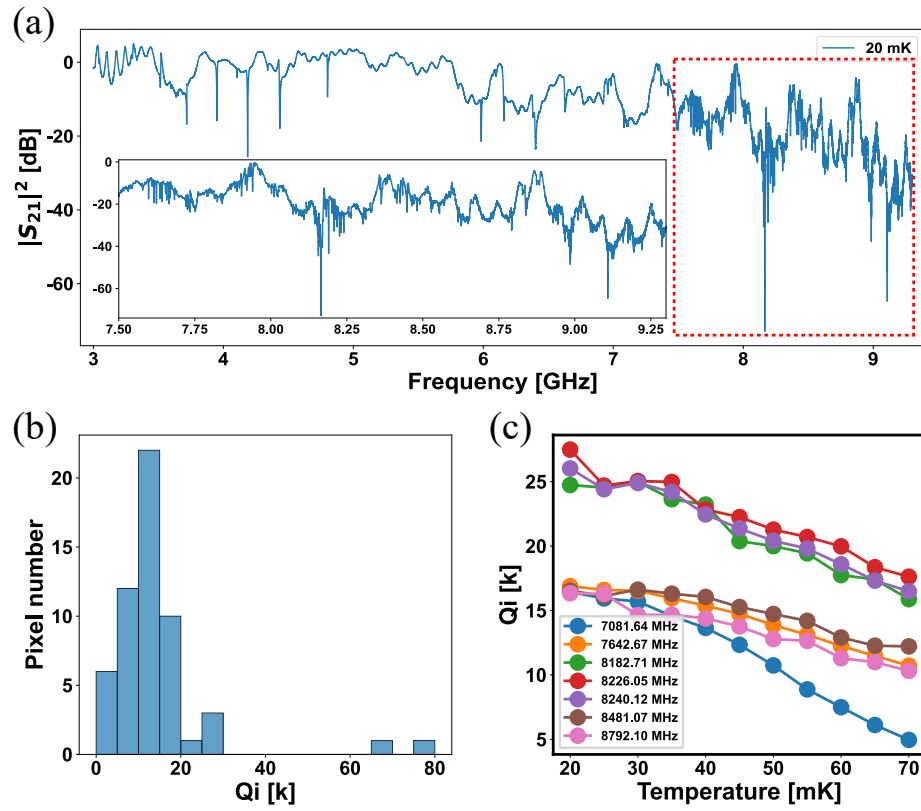


图 12 (a) 探测器阵列的 S_{21} ; (b) 阵列中像素内部品质因数 Q_i 分布, 大多在 3 k 至 30 k 之间; (c) 阵列中像素内部品质因数 Q_i 随温度的变化.

Fig. 12. (a) Measured S_{21} of the detector array; (b) Distribution of internal quality factor Q_i of pixels in the array, mostly ranging from 3 k to 30 k; (c) Variation of the internal quality factor Q_i with temperature.

4 结 论

本文完成了用于可见光-近红外波段万量级 (20008 像素) KID 阵列的仿真设计、工艺制备和测试. 在阵列结构设计上, 基于频率串扰仿真, 并综合考虑高密度排布的空间约束与布局, 确定了像素在水平、垂直及读出线两侧方向的间距均为 $150 \mu\text{m}$, 控制频率串扰在 220 kHz 以下; 设计了阻抗转换网络以实现窄微带读出线与外部测试线路之间的低损耗连接; 设计了与探测器阵列匹配的微透镜阵列以提高光吸收效率. 工艺及测试方面, 采用直流磁控溅射工艺沉积超导转变温度约 350 mK 的 Hf 薄膜; 制备了探测器阵列, 并测试了其 S_{21} , 多数像素的 Q_i 分布在 3 k 至 30 k 之间.

后续我们将继续进行阵列工艺的优化: 首先, 换用步进式光刻机精准定义线宽; 其次, 针对 Hf 薄膜的剥离工艺和 Nb 薄膜的刻蚀工艺开展优化; 此外, 将通过提高溅射本底真空度和溅射速率来沉积 Hf 薄膜,

进一步提升阵列的内部品质因数 Q_i . 本研究为国内可见光-近红外波段大规模 KID 阵列的结构设计、工艺摸索及后续性能优化提供了实验基础与技术参考.

参考文献

- [1] Day P K, LeDuc H G, Mazin B A, Vayonakis A, Zmuidzinas J 2003 *Nature* **425** 817
- [2] Shi Q, Li J, Zhi Q, Wang Z, Miao W, Shi S C 2022 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **65** 239511
- [3] Shi S C, Li J, Lin Z H, Yang J P, Liu D, Duan W Y, Lou Z, Shi Q, Li Z, Zhang W, Miao W, Yao Q J 2018 *J. Low Temp. Phys.* **193** 128
- [4] Ren Y, Miao W, Shi S C 2023 *Phys.* **52** 255 (in Chinese) [任远, 缪巍, 史生才 2023 物理 **52** 255]
- [5] Dai X, Wang H, Wang Y, Mai Z, Shi Z, Wang Y F, Jia H, Liu J, He Q, Dai M, Ouyang P, Chai Y, Wei L F, Zhang L, Zhong Y, Guo W, Liu S, Yu D 2025 *Appl. Phys. Lett.* **126** 012602
- [6] Walter A B, Fruitwala N, Steiger S, Bailey III J I, Zobrist N, Swimmer N, Lipartito I, Smith J P, Meeker S R, Bockstiegel C, Coiffard G, Dodkins R, Szypryt P, Davis K K, Daal M, Bumble B, Collura G, Guyon O, Lozi J, Vievard S, Jovanovic N, Martinache F, Currie T, Mazin B A 2020 *Publ. Astron. Soc. Pac.* **132** 125005
- [7] Mazin B A, Meeker S R, Strader M J, Szypryt P, Marsden D, van Eyken J C, Duggan G E, Walter A B, Ulbricht G, Johnson M, Bumble B, O'Brien K, Stoughton C 2013 *Publ. Astron. Soc. Pac.* **125** 1348
- [8] Meeker S R, Mazin B A, Walter A B, Strader P, Fruitwala N, Bockstiegel C, Szypryt P, Ulbricht G, Coiffard G, Bumble B, Cancelo G, Zmuda T, Treptow K, Wilcer N, Collura G, Dodkins R, Lipartito I, Zobrist N, Bottom M, Shelton J C, Mawet D, van Eyken J C, Vasisht G, Serabyn E 2018 *Publ. Astron. Soc. Pac.* **130** 065001
- [9] Mendillo C B, Hewawasam K, Howe G A, Martel J, Cook T A, Chakrabarti S 2019 In *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets IX* (San Diego, California, USA, August 12–16 2019), p 1111707

- [10] Nicaise P, Hu J, Martin J M, Beldi S, Chaumont C, Bonifacio P, Piat M, Geoffray H, Boussaha F 2022 *J. Low Temp. Phys.* **209** 1242
- [11] Guo W, Liu X, Wang Y, Wei Q, Wei L F, Hubmayr J, Fowler J, Ullom J, Vale L, Vissers M R, Gao J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 212601
- [12] Yu S, Shu S, Duan R, Yang L, Li D 2022 In *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy XI* (Montreal, Quebec, Canada, 17–22 July 2022), p 574
- [13] Walter A B 2019 *MEC: The MKID Exoplanet camera for high speed focal plane control at the subaru telescope*. Ph.D. Dissertation, (Santa Barbara: University of California)
- [14] Szypryt P 2017 *Development of microwave kinetic inductance detectors for applications in optical to near-IR astronomy*. Ph.D. Dissertation, (Santa Barbara: University of California)
- [15] Hu J, He Q, Yu F, Chen Y, Dai M, Guan H, Ouyang P, Han J, Liu C, Dai X, Mai Z, Liu X, Zhang M, Wei L F, Vissers M R, Gao J, Wang Y 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 022601
- [16] Shi Z Y, Dai X C, Wang H Y, Mai Z Z, Ouyang P H, Wang Y Z, Chai Y Q, Wei L F, Liu X M, Pan C J, Guo W J, Shu S B, Wang Y W 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 038501 (in Chinese) [石中誉, 代旭城, 王浩宇, 麦展彰, 欧阳鹏辉, 王翼卓, 柴亚强, 韦联福, 刘旭明, 潘长钊, 郭伟杰, 舒诗博, 王轶文 2024 物理学报 **73** 038501]
- [17] Su R F, Tan R, Chen J H, Zhu Y W, Chi T Y, Zang S M, Wu J B, Tu X C, Zheng K, Chen J, Wu P H 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 192601
- [18] Zmuidzinas J 2012 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **3** 169
- [19] Zobrist N, Clay W H, Coiffard G, Daal M, Swimmer N, Day P, Mazin B A 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 017701
- [20] Coiffard G, Daal M, Zobrist N, Swimmer N, Steiger S, Bumble B, Mazin B 2020 *Supercond. Sci. Technol.* **33** 07LT02
- [21] Pei Y, Fan Q, Ni X F, Gu X 2024 *Coatings* **14** 496

- [22] Thoen D J, Bos B G C, Haalebos E A F, Klapwijk T M, Baselmans J J A, Endo A 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** 1
- [23] Zhang L, Peng W, You L, Wang Z 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 122603
- [24] Zobrist N, Coiffard G, Bumble B, Swimmer N, Steiger S, Daal M, Collura G, Walter A B, Bockstiegel C, Fruitwala N, Lipartito I, Mazin B A 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 213503
- [25] Shu S, Calvo M, Leclercq S, Goupy J, Monfardini A, Driessen E 2018 *J. Low Temp. Phys.* **193** 141
- [26] Noroozian O, Day P K, Eom B H, Leduc H G, Zmuidzinas J 2012 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **60** 1235
- [27] Matthaei G 1966 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **14** 372
- [28] Liu X, Guo W, Wang Y, Dai M, Wei L F, Dober B, McKenney C M, Hilton G C, Hubmayr J, Austermann J E, Ullom J N, Gao J, Vissers M R 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 252601
- [29] Kouwenhoven K, Elwakil I, Wingerden J v, Murugesan V, Thoen D, Baselmans J, Visser P d 2022 *J. Low Temp. Phys.* **209** 1249
- [30] Pozar D M 2011 *Microwave Engineering*. 4th edn. (New York: John Wiley & Sons), pp 15–30
- [31] Frickey D A 1994 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **42** 205
- [32] Lacey D, Gallop J, Davis L 1998 *Meas. Sci. Technol.* **9** 536
- [33] Irimatsugawa T, Yamamori H, Hirayama F, Nagasawa S, Fujii G, Kohjiro S, Sato A, Fukuda D, Hidaka M, Sato Y, Ohno M, Takahashi H 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1
- [34] Verjauw J, Potočnik A, Mongillo M, Acharya R, Mohiyaddin F, Simion G, Pacco A, Ivanov T, Wan D, Vanleenhove A, Souriau L, Jussot J, Thiam A, Swerts J, Piao X, Couet S, Heyns M, Govoreanu B, Radu I 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 014018
- [35] Manzo-Perez M, Jamalzadeh M, Huang Z, Tong X, Kisslinger K, Nykypanchuk D, Shahrjerdi D 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 112602

- [36] McCarrick H, Flanigan D, Jones G, Johnson B R, Ade P, Araujo D, Bradford K, Cantor R, Che G, Day P, Doyle S, Leduc H, Limon M, Luu V, Mauskopf P, Miller A, Mroczkowski T, Tucker C, Zmuidzinas J 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 123117

录用稿件，非最终出版稿

Design and Fabrication of Optical and Near-Infrared 10^4 -Scale Hafnium Superconducting Kinetic Inductance Detector Array*

LI Weiwei¹⁾²⁾ LI Miao²⁾³⁾ CHAI Ye²⁾⁴⁾ DAI Xucheng¹⁾ LYU Zhaobin¹⁾
WANG Yifan¹⁾ HE Wang¹⁾ GUO Weijie⁵⁾ WANG Yiwen^{1)†} SHU
Shibo^{2)†}

1) (*Quantum Optoelectronics Laboratory, School of Physical Science and Technology,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

2) (*Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Beijing
100049, China*)

3) (*Mathematics and Science College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China*)

4) (*College of Physics and Optoelectronic Technology, Xiangtan University, Xiangtan 411105,
China*)

5) (*International Quantum Academy, Shenzhen 518048, China*)

Abstract

Superconducting kinetic inductance detectors (KIDs), featuring low noise, high sensitivity, single-photon energy resolution, and easy scalability to large-format arrays, have been widely studied and preliminarily applied in astronomical detection. This paper designs, fabricates, and characterizes a 20008-pixel superconducting KID array for the optical and near-infrared wavelength band. The array contains 10 readout lines with approximately 2000 pixels per line. The pixels are arranged in a circular area with a diameter of 24 mm, and the overall array size is 32 mm $\times$ 50 mm. The pixel spatial layout is optimized by simulating the frequency shift as a function of pixel spacing in different directions. It is found that a pixel pitch of 150 μ m can reduce the inter-pixel frequency crosstalk below 220 kHz, ensuring the integrity and

stability of signal readout for the high-density KID array. By designing and optimizing the impedance transformation network, the simulated reflection coefficient S_{11} can be reduced to below -11 dB, enabling efficient signal transmission between the array and the readout circuit. In addition, a microlens array is designed with a focused light spot of diameter below $40\text{ }\mu\text{m}$, matching the inductive absorber area of $39\text{ }\mu\text{m} \times 39\text{ }\mu\text{m}$, to improve the optical absorption efficiency. 100 nm thick high-resistivity hafnium (Hf) film with low superconducting transition temperature ($T_C \approx 350\text{ mK}$) is preliminarily fabricated using DC magnetron sputtering, and serves as the superconducting film for the KID array. The microwave transmission S_{21} of the Hf KID array is measured at a base temperature 20 mK , showing internal quality factor (Q_i) ranging from 3×10^3 to 80×10^3 and higher resonance frequencies than designed values. We discuss the factors that may lead to the decrease in Q_i and the resonance frequency away from designed value. These results demonstrate the potential feasibility of high-density KID arrays with number of pixels on the order of 10^4 for the optical and near-infrared wavelength band.

Keywords: Kinetic Inductance Detector, Superconducting Detector Array, Hafnium

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12373091, 61871333)

† Corresponding author. E-mail: shusb@ihep.ac.cn

† Corresponding author. E-mail: qubit@swjtu.edu.cn