

超导太赫兹天线耦合微测辐射热检测器^{*}

姜寿禄^{1,2†}, 武剑², 马旭明², 赵自然¹

1. 清华大学工程物理系, 粒子技术与辐射成像实验室, 北京 10084;

2. 同方威视技术股份有限公司, 北京 100084

收稿日期: 2020-12-29; 接收日期: 2021-01-26

【摘要】 超导太赫兹天线耦合微测辐射热检测器具备探测频段宽、响应速度快、灵敏度高、易于阵列化等特点因而具备广阔的应用前景. 本文的主要工作是设计并微纳加工出基于氮化铌薄膜的超导器件, 针对所制备器件的关键参数进行了表征. 测试结果显示, 当浴冷温度为 4 K 时, 器件响应时间为 4 μs , 噪声等效功率达到 30 fW/Hz^{0.5}. 基于所制备的器件进行了陶瓷刀被动扫描成像实验并取得了良好的成像效果.

关键词: 超导, 氮化铌, 太赫兹, 测辐射热

PACS: 85.25.Pb, 85.25.Pb, 95.55.Rg, 95.85.Fm

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.06.004

Superconducting Terahertz Antenna-coupled Microbolometer

JIANG Shoulu^{1,2}, WU Jian², MA Xuming², ZHAO Ziran¹

1. Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Nuctech Company Limited, Beijing 100084

Received date: 2020-12-29; accepted date: 2021-01-26

【Abstract】 Superconducting antenna-coupled micro-bolometer has the characteristics of wide detection bandwidth, fast response speed, high sensitivity, easy arraying and et al. So it has broad application prospects. The main work of this paper is to design and fabricate device based on niobium nitride film. The key parameters of the device are characterized. The experimental results show that when the bath temperature is 4 K, the device response time is 4 μs . The noise equivalent power reaches 30 fW/Hz^{0.5} at the optimum bias point ($V_{bias}=3\text{ mV}$, $I_{bias}=55\text{ }\mu\text{A}$). Based on the fabricated device, a ceramic knife passive scanning imaging experiment was carried out and a good imaging effect was obtained.

Keywords: Superconductor, Niobium-nitride, Terahertz, Bolometer

PACS: 85.25.Pb, 85.25.Pb, 95.55.Rg, 95.85.Fm

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.06.004

Reference method: JIANG Shoulu, WU Jian, MA Xuming, ZHAO Ziran, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0279 (2020)

^{*} 国家自然科学基金(U1633202),北京市优秀人才培养资助(2018000057592G424)资助的课题.

[†] jshl2017@163.com

1 引言

太赫兹 (THz) 技术具有重要的科研价值与广阔的应用前景, 尽管当前面临的技术难题还很多, 但国际上仍对太赫兹技术高度重视并投入了大量的研究经费, 极大的推进了太赫兹技术发展. 太赫兹检测器^[1]是太赫兹技术中最重要的分支之一, 发展高灵敏度、大带宽、快速响应的检测器可以极大地降低对高功率太赫兹源的需求, 甚至在很多应用场合下无需太赫兹源便可达到探测的目的, 这可以降低光学系统的复杂性并增强系统整体的可靠性.

当前各大研究院所、高校所常用的室温太赫兹检测器主要是 Golaycell、热释电检测器等, 它们的灵敏度较差, 噪声等效功率 (NEP) 一般在 $\text{nW}/\text{Hz}^{0.5}$ 量级附近, 仅能用于探测一些功率较强的太赫兹信号, 多数情况下需要配置相应的太赫兹源才能达到探测的目的. 基于肖特基二极管技术的混频器^[2]以及基于低噪放技术的辐射计尽管其灵敏度较高, 但是它们的探测带宽普遍较窄 ($<100 \text{ GHz}$), 不适合宽频谱的信号检测. 而且由于功耗、成本、封装工艺等方面的问题使得这两种类型的检测器均不易阵列化. 目前已经得到商用的低温检测器主要有美国红外实验室主推的 Si bolometer 以及英国 QMC 公司主推的 InSb 检测器. 其中通用型 Si bolometer 的 NEP 处于 $0.1 \text{ pW}/\text{Hz}^{0.5}$ 量级, 响应时间为 ms 量级, 不能满足快速信号探测需求. InSb bolometer 响应时间为 μs 量级, 但其 NEP 仅能达到 $\text{pW}/\text{Hz}^{0.5}$ 量级, 无法满足一些微弱信号检测的场合 (如被动太赫兹信号探测). 并且这两种类型检测器属于宏观器件, 体积较大均不易于阵列化, 这会限制它们在快速成像领域的应用. 应用于天文领域的 TES^[4]、MKIDs^[5] 等类型检测器尽管其灵敏度很高 ($0.1 \sim 1 \text{ aW}/\text{Hz}^{0.5}$ 量级), 但它们的工作温度很低, 需要用到氦三制冷机才能满足制冷要求, 这使得制冷成本过于昂贵且操作、维护困难, 这些问题极大的限制了它们在天文以外领域的应用.

超导太赫兹天线耦合微测辐射热检测器^[6] (ACMB) 是一种基于辐射热探测原理的检测器. 其敏感单元基于常见的超导材料比如铌 (Nb)、氮化铌 (NbN)、铌钛氮 (NbTiN)、硼化镁 (MgB_2)、钇钡铜氧 (YBCO) 等材料制成. 这些材料对于整个太赫兹频段的电磁波均具有优良的响应, 而且它们的临界

温度 (T_c) 均高于液氮温度 4.2 K . 因此采用商用的小型化、低成本制冷机便可达到制冷要求, 拓宽了该类型检测器的应用范围. 基于这些超导材料制备的微桥其阻抗大小易于与平面超宽带天线^[7] (如等角螺旋、对数周期天线等) 匹配, 因此对频率跨度大的太赫兹信号均能有效地检出. 由于超导微桥在 T_c 附近的电阻温度系数 (TCR) 很高, 其理论噪声等效功率可达 $\text{fW}/\text{Hz}^{0.5}$ 量级, 接近地面应用太赫兹背景辐射极限^[8] ($0.1 \sim 1 \text{ fW}/\text{Hz}^{0.5}$ 量级), 因此可用于极微弱太赫兹信号的检测. 并且 ACMB 可以基于成熟的硅工艺制备出大规模的阵列器件, 可方便的与电路进行集成, 因此可应用于太赫兹快速成像领域. 由于 ACMB 所具备的这些优点, 国际上包括英国的 Cardiff 大学与 QMC 公司^[9]、美国的耶鲁大学^[10] 以及 NIST^[11]、意大利的 CNR^[12]、芬兰的 VTT^[13] 等单位均开展了相关的研究工作. 国内此前尚未有过关于该类型检测器的报道.

基于 ACMB 在微弱太赫兹信号探测所具备的优势以及广阔的应用前景, 本课题组开展了 ACMB 的研制工作.

2 ACMB 工作原理

ACMB 最核心的部分是其基于超导薄膜的微桥. 工作于 T_c 附近的微桥吸收太赫兹辐射后会在其中间区域形成一个热点 (hot spot)^[14], 热点的温度高于检测器的 T_c . 从而具有较大的电阻. 热点区域的大小随着外界入射信号的强弱而变化, 因此可通过外加偏置电源的方式利用电流信号监测微桥的电阻变化从而推测出入射太赫兹信号的强弱. 为了保证吸收的太赫兹辐射能量能够累积以引起微桥部分足够的温升, 实际设计时需要尽可能的降低微桥与衬底之间的热导. 悬浮桥结构是降低热导的一种有效方式并已经广泛的应用于红外探测领域. 相比于常温器件, 由于超导检测器工作于真空环境下, 因此空气导热的途径也被切断, 所以可以取得很低的热导. 因此 ACMB 可以通过将微桥下方的硅衬底挖掉以显著降低其热导从而极大改善其灵敏度. 为了保证微桥结构的健壮性以及微加工过程中反应离子对微桥薄膜的损耗, 通常需要在生长超导薄膜之前先在硅衬底上生长一层氧化硅 (或者氮化硅) 作为支撑层以及抗刻蚀层.

基于 bolometer 类型的检测器其响应时间表达

式为

$$\tau = \frac{C}{G}$$

其中 C 为检测器热容, G 为检测器热导. 为了保证检测器足够高的响应率, 通常其热导会设计的很低以便保证足够的温升. 同时为了保证器件的响应速度, 在热导很低的情况下只能降低微桥的热容, 而热容与检测器的材料以及体积密切相关. 对于同一种材料的检测器结构, 小尺寸(微米量级甚至更小)的微桥可以起到均衡响应率以及响应时间的作用. 但由于太赫兹的光斑尺寸远大于微桥的尺寸, 因此入射的太赫兹波能量并不能被微桥有效的吸收. 为了解决该问题需要为微桥匹配上天线以增强对太赫兹信号的有效吸收. 平面等角螺旋天线具有工作频段宽、与微桥阻抗易于匹配、易于平面加工集成等优点, 因此选择了平面等角螺旋天线作为微桥的耦合天线. 为了避免硅衬底的表面波效应对太赫兹信号的损耗并增强检测器的方向性, 通常需要为检测配置一个匹配的介质透镜.

3 ACMB 器件制备

ACMB 的制备工艺主要包括磁控溅射生长 NbN 薄膜、光刻及剥离制备天线与电极、套刻刻蚀窗口、挖桥制备出悬浮桥等流程.

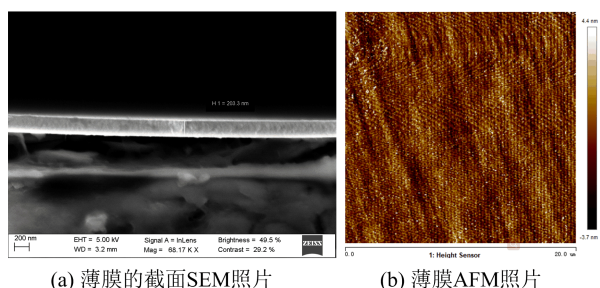


图 1 NbN 薄膜的显微照片

实验室所设计检测器的薄膜厚度为 200 nm, 通过采用磁控溅射工艺生长所需厚度的 NbN 薄膜. 针对生长完成的薄膜首先进行了划片并观察其侧面 SEM 照片以确认薄膜厚度的偏差. 从图 1 (a) 中可以看出, 由于划片的原因截面处的薄膜与衬底发生了部分脱离, 但薄膜的结构依旧完整, 薄膜整体平整且均匀. 通过 SEM 的标尺测试的薄膜厚度为 203.3 nm, 非常接近设计的厚度, 说明当前所采用的磁控溅射长膜速度控制的比较精确. 为了表征薄膜的表

面质量, 采用了 AFM 测试了其表面形貌. 如图 1 (b) 所示, 所选取的扫描区域范围为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, 测试结果显示薄膜表面的起伏小于 4.4 nm, 通过软件对数据处理得到其粗糙度仅为 1.14 nm. 由于所制备的薄膜厚度为 203 nm, 说明当前薄膜的粗糙度对于薄膜整体性能影响很小, 所以采用该薄膜用于制备 ACMB 器件预期会取得较好的性能.

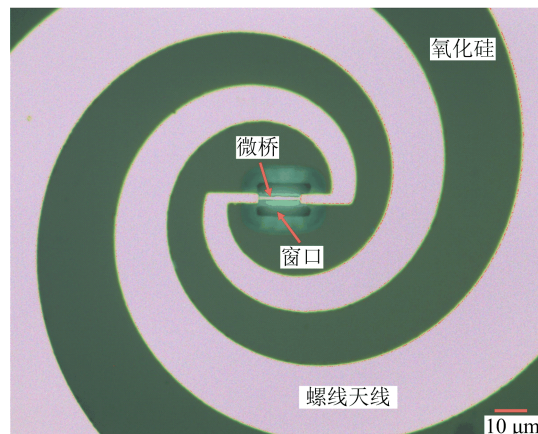


图 2 ACMB 光学显微照片

图 2 是制备出的 ACMB 器件光学显微照片. 从照片中可以看出, 天线与微桥部分边缘平整, 微桥底部的硅已被刻蚀干净. 其中绘制光刻版图时设计的微桥尺寸为 $2 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$, 实际制备的微桥尺寸基本接近设计尺寸, 说明了当前所采用的微纳加工工艺比较可靠.

4 ACMB 性能表征

实验室采用一台 G-M 制冷机为检测器提供合适的低温环境. 其中制冷机二级冷头处的冷板温度为 4 K 时其制冷量可达 0.5 W, 足以满足检测器及电路的功耗需求. 制冷机冷板温度可以通过一个外置的温控仪对其进行调节. 冷板温度可在 3~300 K 温度范围内连续可调, 满足 ACMB 的测试需求. 为了增强检测器的信号耦合的能力, 选择了高阻硅半球透镜与检测器结合以提高器件的光学响应率.

4.1 器件 I-V 曲线测试及 NEP 计算

超导检测器由于在 T_c 附近具有很强的非线性, 若采用恒流偏置会产生正反馈效应从而使得检测器工作点不稳定. 为此采用恒压偏置引入电热负反馈^[15]以稳定检测器的工作点. 实验室自制了一套可工作于恒压模式的低噪声偏置读出电路用于将 ACMB 偏置到合适的工作点并同时精确读取检测器的

响应电流. 图 3 的黑色圆圈是所测试的 ACMB 的 IV 数据, 红色曲线是根据 ACMB 的 IV 曲线表达式拟合的曲线. 从图 3 中可以看出, 检测器的测试数据与拟合曲线吻合的很好, 说明采用一维热点模型用于解释检测器电学特性的有效性. 从 IV 曲线数据拟合可以得出检测器的热导为 10 nW/K, 正常态电阻 R_N 为 113 Ω . 经测试得到其最佳偏置电压为 3 mV, 对应的相应电流为 167 μ A/W. 采用动态信号分析仪测试的其在最佳偏置点的噪声电流为 5 pA/Hz^{0.5} 对应的最佳 NEP_{meas} 为 30 fW/Hz^{0.5}.

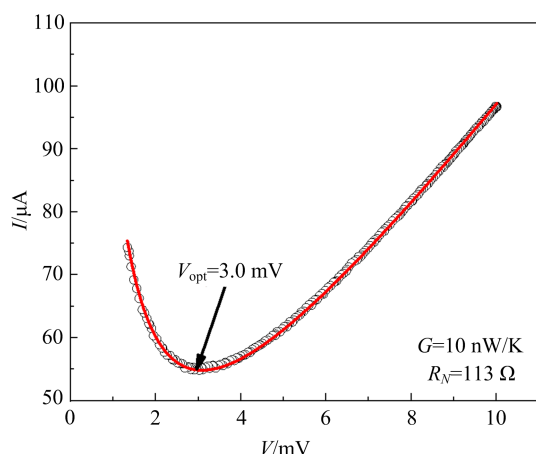


图 3 测试的检测器 IV 曲线以及公式拟合曲线

工作于低温下的测辐射热检测器的噪声源主要包括热噪声(约翰逊-奈奎斯特噪声)与热起伏噪声(声子噪声). 其中热噪声源于微桥中载流子的无规则运动, 而热起伏噪声则源于微桥与热沉之间的热交换. 由于检测器采用恒压偏置, 通过监测电流以推测入射信号的大小, 因此其噪声电流直接影响检测器的性能表现. ACMB 热噪声电流的表达式为

$$i_n = \sqrt{\frac{4k_B T_c}{R}}$$

其中 k_B 为玻尔兹曼常数, T_c 为检测器临界温度, R 为检测器最佳偏置点处的电阻. 将这些参数代入公式可以得到检测器的噪声电流为 3.5 pA/Hz^{0.5}. 结合检测器最佳偏置点的电流响应率便可求出受热噪声限制的理论极限 NEP_J 为 21 fW/Hz^{0.5}.

超导检测器热起伏噪声决定的检测器灵敏度表达式^[16]为

$$NEP_{ph} = \sqrt{4k_B T_c^2 G}$$

其中 G 为检测器微桥的热导, T_c 为检测器的临界温度. 将这些参数代入公式可以求得检测器受声子

噪声限制的 NEP_{ph} 为 9.3 fW/Hz^{0.5}. 总的 NEP_{tot} 与二者之间的关系如下

$$NEP_{tot} = \sqrt{NEP_J^2 + NEP_{ph}^2}$$

由此可以得出检测器的理论 NEP_{tot} 约为 23 fW/Hz^{0.5}.

对比检测器的理论 NEP_{tot} 与实测值 NEP_{meas} 可知当前所制备的检测器灵敏度已经基本接近理论极限, 后续通过电路以及测试方法的优化对检测器性能提升有限. 由 NEP 计算公式可知, 若要继续提升检测器的灵敏度, 可以通过制备 T_c 更低的薄膜材料(或更换低 T_c 材料, 如 Nb), 设计电阻更大、热导更低的器件以降低检测器的热噪声以及热起伏噪声对器件性能的限制. 但是由于热导的降低会导致响应速度下降, 电阻的增大会使得微桥与天线的匹配变差, 设计时需要综合考虑这些因素折衷处理.

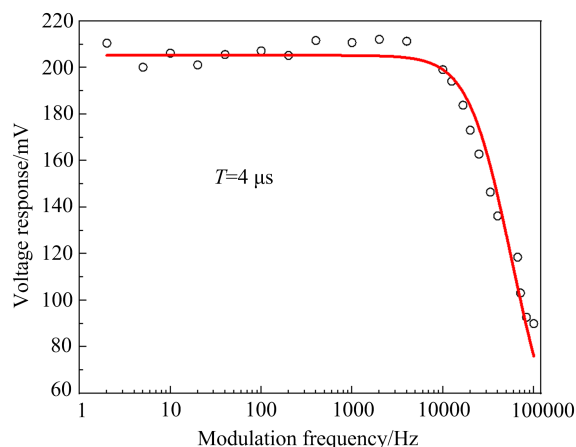


图 4 检测器响应电压与调制频率的关系曲线. 其中黑色圆圈为测试数据, 红色曲线为拟合曲线

4.2 响应时间测试

基于辐射热探测工作机制的器件, 其响应电压与调制频率的关系如下

$$V_s = \frac{V_0}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}$$

其中 f 是调制频率, V_0 为调制频率为 0 时检测器的相应电压, τ 为检测器的响应时间, V_s 则对应着不同调制频率的响应电压. 因此可以通过调节太赫兹信号的调制频率并读取锁相放大器响应值大小, 然后通过曲线公式拟合的方式得到其响应时间. 因为锁相放大器非常适于读取小信号, 所以采用该方法测试响应信号信噪比高、误差小, 通过拟合所得的数据更接近检测器的真实值. 图 4 是所测试的

检测器响应与调制频率的关系曲线,通过公式拟合的方式可以得到检测器的响应时间为 $4\ \mu\text{s}$,对应的带宽约为 40 k. 当前器件的响应时间远小于实时快速成像领域的时间需求(亚毫秒或毫秒量级),这就为后续优化检测器结构以提高其灵敏度留下了操作空间.

5 太赫兹被动扫描成像

器件性能标定完成之后,为了测试器件用于实际应用的效果,选择将其用于安检领域中的太赫兹被动成像实验以验证器件的使用效果. 基于制备的器件搭建单通道太赫兹二维被动扫描成像装置进行了成像实验. 如图 5 (a) 所示,安装有检测器以及透镜的样品座被放置于制冷机内部的冷板上,通过两个离轴抛物面反射镜用以搭建系统的光路. 所用的

离轴抛物面反射镜直径为 2 英寸,焦距为 4 英寸. 待测物体固定在一个二维扫描位移台的支架上,通过二维扫描控制器控制位移台的位置并将位置信息实时传输给计算机. 物方焦点前放置一个光学斩波器用以对物体辐射的信号进行调制. 锁相放大器接收来自检测器的响应信号以及来自斩波器的调制参考信号后便可准确测量出此时物方该焦点位置的辐射信号强度. 通过电脑所编写的 Labview 程序控制二维位移台的移动方式为步进移动,位移台每次移动一个步长后锁相放大器开始读取该位置处检测器的输出信号,读取完成之后位移台再开始移动. 这样经过多次移动后完成对指定区域内的物体的太赫兹被动扫描成像. 实际成像时设置的位移台的步长设置为 2 mm,锁相放大器的积分时间为 100 ms.

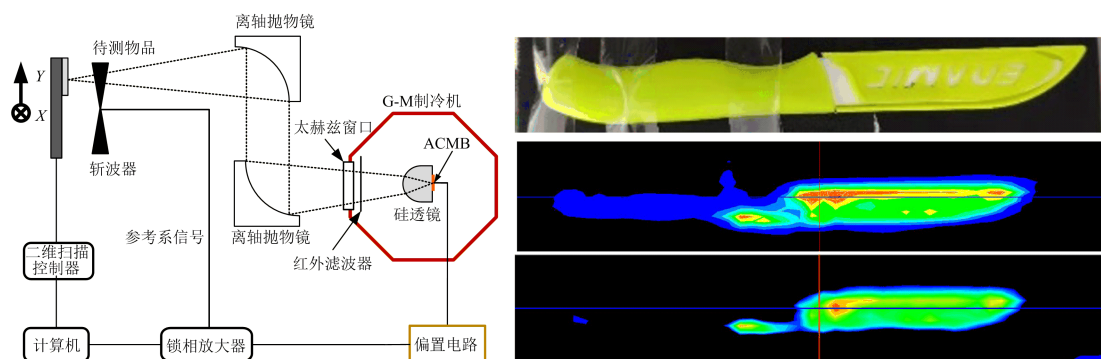


图 5 二维被动扫描成像: (a) 二维扫描成像系统示意图; (b) 陶瓷刀的实物图以及对应的太赫兹图像

陶瓷刀是各类公共交通中所严禁的危险品,但是采用传统的金属安检门以及金属探测器却无法对身体所携带陶瓷刀有效地检出,仅能通过安检员手检进行排查. 由于陶瓷材料对于太赫兹信号有比较强的衰减,所以采用太赫兹成像安检的方式可以有效地检出. 综上,为了说明太赫兹安检的优越性以及所研制的检测器用于安检成像应用的有效性,选择了陶瓷刀进行了成像实验. 如图 5 所示,图 5 (b) 最上方图像为市面上常见的陶瓷刀实物图,图 5 (b) 中间图像是陶瓷刀具未加遮挡物情况下所成的太赫兹图,从图像中可以看出陶瓷刀的轮廓清晰,尤其是陶瓷部分细节丰富. 由于陶瓷刀的塑料部分对于太赫兹信号的衰减较小,所以图像中其相比于背景的对比度比较低,但所成的图像依然能有效的分辨出其形状. 图 5 (b) 最下方图像为在陶瓷刀前添加了一个牛皮纸信封进行遮挡所成的太赫兹图,由于信

封对于背景辐射的太赫兹信号的衰减加之信封本身的太赫兹辐射影响,陶瓷刀的塑料部分基本与背景融为一体无法分辨,但是陶瓷部分依旧清晰可见,甚至可以清晰看出隐藏在塑料刀把里面的陶瓷刀柄部分. 这说明采用宽带被动太赫兹成像方式可以有效地检出陶瓷类危险品,也说明了当前所制备的器件其灵敏度、稳定性能够满足安检成像的需求.

在实验过程中陶瓷刀是放置于一块太赫兹吸波材料之上. 该吸波材料的物理温度为 22°C ,对应的辐射温度为 295 K. 由于吸波材料的辐射温度要显著低于人体的温度(约为 310 K),预期陶瓷刀放置于人体上所成图像的对比度要优于当前得到的图像.

6 结 论

本文设计、制备出高性能的 ACMB 器件并对其

关键参数进行了表征. 经测试检测器的 NEP 为 30 fW/Hz^{0.5}, 响应时间为 4 μ s, 满足实时扫描太赫兹被动成像的需求. 针对当前的检测器 NEP 极限进行了分析, 指出了检测器后续的改进方向. 基于制备的

器件搭建了一套二维扫描太赫兹被动成像系统并对陶瓷刀进行了成像实验, 取得了良好的成像效果, 验证了器件实际应用的有效性.

参 考 文 献

- [1] Lewis, R. A., *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2019, **52** (43).
- [2] Treuttel, J et al. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 2016, **6** (1), 148-155.
- [3] Ajayan, J et al. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 2018, **94**, 199-214.
- [4] Irwin, K. D et al. *Cryogenic Particle Detection* 2005, **99**, 63-149.
- [5] Day, P. K et al. *Nature* 2003, **425** (6960), 817-821.
- [6] Rice, J. P et al. *Applied Physics Letters* 1994, **65** (6), 773-775.
- [7] Dyson, J. D et al. *Institute of Radio Engineers Transactions on Antennas and Propagation* 1959, AP-7 (2), 181-187.
- [8] Zmuidzinas, J. *Applied Optics* 2003, **42** (25), 4989-5008.
- [9] Wood, K. P. et al. *35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (ImmW-Thz 2010)* 2010.
- [10] Santavica, D. F et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2007, **17** (2), 412-415.
- [11] Luukanen, A et al. Conference on Passive Millimeter-Wave Imaging Technology VIII, Orlando, FL, Mar 30-31; Spie-Int Soc Optical Engineering; Orlando, FL, 2005; pp 127-134.
- [12] Cibella, S et al. *Journal of Low Temperature Physics* 2012, **167** (5-6), 911-916.
- [13] Helisto, P et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2007, **17** (2), 310-313.
- [14] Floet, D. W et al. *Applied Physics Letters* 1999, **74** (3), 433-435.
- [15] Lee, A. T et al. *Applied Physics Letters* 1996, **69** (12), 1801-1803.
- [16] Richards, P. L. *Journal of Applied Physics* 1994, **76** (1), 1-24.