

高 T_c 超导探测器的进展与应用前景*

刘心田

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家实验室 上海 200083)

摘要 描述了高 T_c 超导体检测红外辐射的机理和高 T_c 超导红外探测器的技术水平,介绍了亚微米结构器件、 4×4 元面阵以及 HBCCO 超导体的研究结果,最后简要讨论了这一技术的应用前景。

关键词 高 T_c 超导体,红外探测器,超导器件

HIGH T_c SUPERCONDUCTING INFRARED DETECTORS

Liu Xintian

(National Laboratory for IR Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

Abstract The mechanism of infrared radiation detection using high T_c superconductors and the state-of-the-art of such detectors are described. Research by the author on submicron structure devices, 4×4 element arrays and the HBCCO superconductor is reported also. Application prospects are briefly discussed.

Key words high T_c superconductor, infrared detector, superconducting device

1 引言

目前,高 T_c 超导红外探测器研究成为超导电学中的重要内容之一,这是因为高 T_c 超导探测器的研制水平已达到实用阶段,并且成为光电探测技术发展的一个新方向^[1-4]。与传统的半导体探测器比较,高 T_c 超导探测器在大于 $20\mu\text{m}$ 的长波探测中将成为优良的接收器件,填补了电磁波谱中远红外至毫米波段的空白。此外,它还具有高集成密度、低功率、高成品率、低价格的优点。预计这一技术将在天文探测、光谱研究、远红外激光接收和军事光学等领域有广泛应用^[5-7]。

2 探测机理

用超导体检测红外辐射,早在 50 年代就开

始^[8]了,但由于 20 K 以下深低温的工作条件而一直停滞不前。高 T_c 超导材料的问世,使这一技术领域得以新生。探测机理有如下 9 种:

(1) 电阻与温度关系机制。它是利用超导体从正常态转变到超导态时,电阻随温度变化而急剧改变的特性来检测红外辐射的。现有的高 T_c 辐射热计 (bolometer) 就是依据这个原理研制的。Richards 等的探测率理论值 $D_{\text{理}}^* = 1.89 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1[9]}$ 。

(2) 电感与温度关系机制。它是根据超导膜处在 T_c 探测率下,其动态电感随温度变化而急剧改变这一原理而制成探测器的^[10]。在 T_c 下工作,可消除 bolometer 的热噪声,非常精确地测定动态电感 L_K 引起的频率变化,具有制作简单、灵敏度高的特点。

* 中国科学院基金资助项目

1998 - 09 - 21 收到初稿,1998 - 11 - 02 修回

(3) 磁化率与温度关系机制. 当红外辐射照射在超导敏感元上并引起温度上升时, 其磁化率也迅速变化, 它有如“磁场快门”, 是一种抗磁机制的改变或者交流磁化率的变化来实现对入射辐射检测的, 已试制出最小可探测功率 $NEP^{(1)} \sim 10^{-11} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 的探测器^[11,12]. 这种探测机制不涉及电流输运, 不需要电学连续性, 这对探测器在低温下工作、室温下读取信号的设计非常有利.

(4) 光助隧道效应 (photon - assisted tunneling effect). 1962 年, Josephson 在理论上预言: 若两个超导体之间隔有一层很薄的绝缘介质, 约几纳米, 弱电流 (μA 到 mA) 也能无阻地穿过. 不久, 这一预言被贝耳实验室的实验证实, 称这种现象为约瑟夫森效应. 把具有超导体 (S) - 绝缘体 (I) - 超导体 (S) 结构叫做约瑟夫森结, 当对这种隧道结施加恒定电场时, 结区产生高频电流, 并辐射或吸收电磁波, 其频率与电压 V 有如下关系: $\nu = eV/h$. 就是说, 光子能量 $h\nu$ 可以引起超导隧道结的 $V - I$ 特性发生变化. 根据这个原理可制成性能优良的红外探测器, 其理论上的 NEP 值可达 $10^{-21} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 响应时间 τ 约为 10^{-10} s , 光谱响应可到微波范围.

(5) 非平衡光电效应 (non - equilibrium photo effect). 在 1971 年, Testardi 用 Ar^+ 激光照射超导 Pb 膜时, 感应出电阻现象^[13], 即超导电性消失, 称这种现象为非平衡光电效应. Testardi 认为这是借助于光子破坏了超导库珀电子对而产生准粒子, 准粒子的存在使超导能隙被压缩, 并破坏了超导电性, 也即实现了对红外辐射的检测. 如今, 已在 Sn, Pb 及其他氧化物、BaPbBiO 和 YBCO 等材料中观察到这种现象, 其响应时间优于 10^{-6} s .

(6) 光磁量子效应 (photofluxonic effect). 这一效应是从超导相位滑移物理概念发展起来的, 1990 年, 由 Kadin 等人形成光磁量子探测红外辐射的新型机理^[14]. 当条状超导体宽度小于超导相干长度时, 在临界电流 I_c 下, 其超导电性的破坏要经过局部相位滑移, 并形成中心

涡旋. 就是说, 超导能隙 局部压缩为零, 超导相位重复地滑移. 对于二维超导体来说, 这个滑移过程就连接成圈, 形成涡旋 - 反涡旋对, 在两个涡旋中产生横向的洛伦兹力, 彼此排斥而分开, 同时产生了净磁通为 Φ_0 的电压脉冲. 当有入射辐射时, 一个光子在超导膜中产生净磁通 Φ_0 , 则 N 个光子在单位时间 (秒) 产生净直流平均电压 $V = (\Phi_0/h) P$ (P 为极化强度), 则有磁量子电压响应率 $R_V = \Phi_0/h = 1/2ef$. 已用 NbN 和 BaPbBiO 膜在实验上证实了这种光助涡旋磁量子探测辐射的微观机制, 分别得到 R_V 为 6000 V/W 和 10^4 V/W 的结果, 其值优于纳秒.

(7) 能斯特效应. 当入射光照射高 T_c 膜时, 膜内产生了垂直于表面的温度梯度, 在外加磁场下沿膜表面可测出红外辐射的存在. 它是由磁通线的消钉扎和温度梯度驱动磁通线的机制实现检测的. 其响应速度较快, 为 10^{-6} s 级.

(8) 电流与温度关系机制. 1993 年, Flik 等人提出了一种新型辐射探测器, 称为本征超导辐射探测器 (ISRD). 它是利用超导薄膜的临界电流 I_c 与 T 的关系制成的, 美国麻省理工学院 (MIT) 获得结果如下: $R = 1000 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, $NEP = 2.6 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, $D^* = 2.7 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 有潜力达到声子噪声限^[15].

(9) 热电子型. 它是由美国 Berkeley 大学提出来的深低温探测器, 其 D^* 达到 $1.15 \times 10^{15} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 的高性能.

3 探测器技术水平与特点

根据上述 9 种探测机理都已设计制造了各种样式的高 T_c 超导红外探测器, 其中较成熟的是根据 $R - T$ 关系制造的 bolometer 型器件. 其次是 Josephson 结型器件. 表 1 列出了几种水平较高的探测器的主要性能.

1) NEP 定义为入射辐射功率所产生的信号电压等于器件本身的噪声电压时的入射功率

表1 高 T_c 超导探测器的主要性能

超导材料	类型	NEP/ $W \cdot Hz^{-1/2}$	$D^*/cm \cdot Hz^{1/2} \cdot W^{-1}$	研究机构
YBCO	bolometer	7.0×10^{-14}	2.0×10^{10}	中科院昆明物理研究所
YBCO	bolometer	1.1×10^{-13}	1.8×10^{10}	中科院上海技术物理研究所
GBCO	bolometer	3.8×10^{-12}	1.7×10^{10}	西北大学, 北京物理研究所
YBCO	bolometer	7.8×10^{-12}	8.3×10^9	华中理工大学
YBCO	bolometer	1.6×10^{-11}	6.0×10^9	美国航天局(NASA)
YBCO	bolometer	5.0×10^{-12}	1.4×10^{10}	Berkeley 大学
YBCO	ISRD	2.6×10^{-12}	2.7×10^9	MIT
YBCO	bolometer	4.5×10^{-12}	$\sim 5.0 \times 10^9$	美国加利福尼亚大学

从表1可看出,单元超导探测器性能已达到实用水平.多是用 $YBa_2Cu_3O_7$ 材料制造的,主要原因是该材料制膜工艺成熟, $T_c \sim 90$ K,探测器的热学设计容易实现.

由于实际应用,多元列阵与焦平面列阵(FPA)研究极为活跃,已有 1×8 元、 1×12 元、 1×64 元线阵, 3×4 元、 8×8 元面阵的报道,特别值得注意的是,进行高 T_c 红外焦平面列阵(IR-FPA)的研究机构竟有10多家,如美国Honeywell、TRW、西屋、超导公司,NASA/Goddard 空间中心、美国海军研究实验室(NRL)和加利福尼亚大学等.图1是上海技术物理研究所试制的 4×4 元面阵,对于这种电阻型的bolometer,每个敏感元有两根信号读出线,面阵器件的制造和工艺实现成为一个难点.从图1可看出,利用面阵中各个敏感元公用电极编组的巧妙设计,引用集成微加工技术,对 YBCO

薄膜光刻,试制出了 4×4 元面阵.它的 D^* 值为 $(1.2 \sim 7.2) \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,工作温度为 88 K.与延迟线时钟脉冲读取信号方法比较,它具有两维同时读出信号的特点.这一独特的设计方法,还可以试制 $4N$ 系列的焦平面器件(如 4×8 元、 4×128 元等),并可引用制造光导型 HgCdTe、热敏电阻等传统红外探测器面阵.

图2示出的是引用同步辐射源光刻出 $0.8 \mu\text{m}$ 线条的高 T_c 超导探测器敏感元照片.它不仅提高了接收入射辐射的能量,而且为制造高密度的多元列阵打下了技术基础.



图2 亚微米结构敏感元

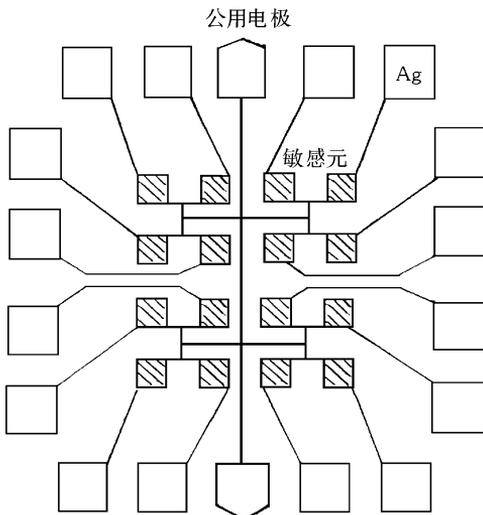


图1 4×4 元面阵结构

对于光子型 Josephson 型高 T_c 探测器,目前还不成熟,但研究工作相当广泛,主要有 SIS 结、SNS 结、晶粒边界结和 Josephson 微桥 4 种,但工艺复杂,成结不稳定.实验上用 TdBa-CaCuO 制成的 Josephson 结, $D^* \sim 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,响应时间 $= 10^{-9} \text{ s}$.这类快速、高性能的探测器特别适用于远红外及毫米波段.

目前,半导体 IR-FPA 面临着两个难题:一是制造工艺;二是功耗.从制造工艺上看,半导体 IR-FPA 包括探测器的组合件、前置放大器和二维的信号读出线路.这样的混成结构,在单一基片上制造出电学特性均匀的大面积列阵

是相当困难的,很难要求结构低于 $100\mu\text{m}^2$,对于 FPA 为 100×100 以上元数的器件就必须是镶嵌的组合件。通常,超导电路尺寸仅为几微米,而半导体电路则要几十微米,因而在一定面积上,超导线路可以完成更为复杂的信息处理。关于功耗,美国战略防御局(SDIO)有个指标,即所设计的系统,每个象元功耗在 $10\mu\text{W}$ 之内。按照这个要求,对于象元数目巨大的半导体 IR - FPA 系统,其功率总消耗量也是相当大的,如一个 1000×1000 元面阵则要有 10W 的功耗,这对航空或航天整机系统带来很多技术困难。

如今,正在开发的超导 IR - FPA 技术却能够有效克服半导体 IR - FPA 的上述困难。为研制高密度低功耗 IR - FPA 展现了良好的前景。归纳起来有如下 4 个优点:

(1) 低功耗。超导电路可以认为是无功耗的,但实际上功耗是存在的。通常它比相同作用的半导体电路功耗低两个数量级,如现已采用的超导量子干涉放大器(SQUID),其噪声级低 10^{-2} 。超导 IR - FPA 的研究内容,除敏感元之外还包括前放(可选 SQUID)、A/D 转换和信息处理电路。总的来看,功耗低 1—2 个量级。

(2) 超导线路尺寸可极小。从亚微米和纳米结构研究报道看,微米级的器件加上微米级的线路将比半导体 IR - FPA 有更高的密度,完成更为复杂的信息处理。

(3) 便于研制大面积均匀列阵。由于超导均匀膜已有 $\phi 76\text{mm}$ 尺寸,利用现有的光刻技术可以制造大面积均匀敏感元。工艺表明,坏器件可极少,甚至没有。

(4) 成品率高、价格低。这是由于超导电膜和光刻工艺可靠所确定的。如高 T_c 超导体淀积在 Si 微结构上的薄膜制成 bolometer 器件,成品率高,其成本比 HgCdTe 低 5—6 个量级。

超导 IR - FPA 技术主要问题在于超导器件与线路是低阻抗的,因此信息读出的匹配问题必须解决。Smetana 等人提出用高 T_c 超导阻抗变换器去耦合低阻抗的探测器,并与 CMOS 处理,多路传输线路衔接,它实际是一种 Z 平

面 - FPA 读出结构。在超导 IR - FPA 中使用超导 A/D 转换器已取得进展,如西屋公司的超导 IR - FPA 课题组,已将超导 A/D 转换用于红外成像系统。

4 研究动态与发展趋势

作为超导电子学一个重要应用方面,高 T_c 超导红外探测器研究是相当活跃的,主要表现在开拓新材料、提高现有探测器性能和推广应用等方面,现归纳为以下 7 个内容:

(1) 新的高 T_c 材料器件。迄今制成的高 T_c 超导器件是 YBCO 材料,但它并不是最佳选择,如其费米能级上的电子密度远不如 BaK-BiO 、 BaPbBiO 等材料,日本 NTT 公司用这两种材料制成了优于 10^{-6}s 的快速器件。加州大学用 ErBCO 制成 X 光到微波响应的高性能器件,其 $\text{NEP} \sim 10^{-12}\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

最近,我们对 $\text{Hg} - 1223$ 相进行合成与 Hg 退火工艺研究,获得 $T_c = 139\text{K}$ 的结果,如图 3 所示,测试分析与确认工艺路线仍在进行,寻求室温超导体是一个极富吸引力的目标。

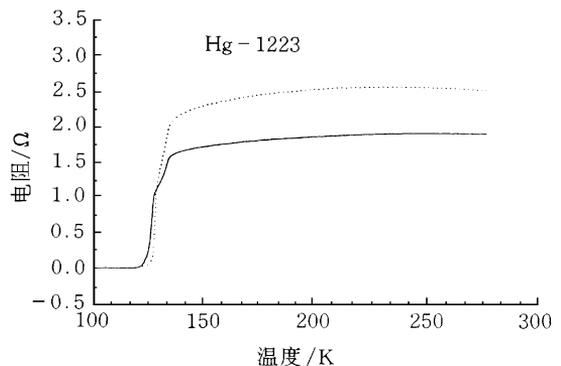


图3 $\text{Hg} - 1223$ 相的 $R - T$ 关系

(2) 超导体/半导体混成器件。这是与现有的半导体技术结合以期达到超导器件实用。主要是 YBCO 与 Si 集成的组合结构,如 Virginia 大学在 Si 衬底上先制成 YZS 岛作为过渡形成 YBCO/Si 微桥。美国标准局(NIST)利用 Au 或 Ag 使 YBCO 与 Si 互连,实现了 Si - 氧化物 - 半导体常规工艺而试制出超/半混成器件,为与 CMOS 读出电路的连接提供了技术基础。

(3) 快速器件. 高 T_c 探测器的响应速度为毫秒级, 这对有些应用达不到要求, 因此研制快速器件成为一个追求目标. 如波音公司制造的微桥, 配以焦耳 - 汤姆孙制冷, 其 τ 值为 $10\mu\text{s}$. 俄罗斯莫斯科师范大学制出的 $0.15\mu\text{m}$ 亚微米桥, τ 值为 $1-2\text{ps}$, 其响应波长为 0.8mm , $\text{NEP} = 3 \times 10^{-11} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

(4) 长波器件. 所谓长波, 是指 $20\mu\text{m}$ 至 mm 波谱区. 由于光谱研究、天文观测和远红外激光接收等应用需要, 高 T_c 超导器件成为最佳选择. 如丹麦哥本哈根大学制出的器件, 波长为 $90-600\mu\text{m}$, $\text{NEP} = 4 \times 10^{-10} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

(5) 新型探测机理器件. 它有多种. 1993 年, Blujer 等提出了量子超导探测器, 它是基于超导态下出现量子共振实现检测入射辐射的^[15]. 1995 年, Hibbs 等提出了基于光磁量子效应的感应耦合红外凝视器件, 其象元为 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ^[7].

(6) 引进新的技术手段提高器件性能. 很多成熟的科学方法都可拿来我用, 如利用同步辐射光源和电子束直刻获得亚微米和纳米级敏感元、天线与敏感元耦合以及 Si 膜片工艺.

(7) Josephson 结工艺研究较多, 如双晶结、亚微米或纳米微桥等.

5 应用前景

目前, 尽管热敏型器件尚有若干技术难点, 但已无重大的难以逾越的障碍. 预计 2010 年前将有较成熟的发展, 单元和线阵将会实际应用, 部分可商品化. 而光子型器件也将有技术突破并试用, 但它不会取代前者, 和红外探测器现状一样也将是两大类探测器并行发展. 下列应用仪器将实用于诸多领域: (1) 光谱仪, 高 T_c 超

导器件用于傅里叶光谱仪的中、远红外区要比热电堆、热释电器件优越, 特别是快扫描型的傅里叶光谱仪则更好; (2) 快速低温测温仪及辐射计; (3) 热像仪, 用于大于 $20\mu\text{m}$ 至亚毫米波段的成像是最佳器件; (4) 地物波谱仪, 长波地物辐射波谱检测应是首选的; (5) 远红外激光器的接收; (6) 托卡马克等离子体电子温度测量; (7) 射电天文亚毫米波接收机、天文探测的光谱仪, 特别是天文卫星对外层空间探测; (8) 军事上多种装备可用, 如主动式亚毫米波型扫描器、红外前视等.

参 考 文 献

- [1] 万发宝, 平一梅, 李宏成等. 低温物理学报, 1994, 16(2): 152—154
- [2] 刘心田, 陆惠秀, 褚君浩等. 红外技术, 1997, 19(6): 5—7
- [3] Brasunas J C, Lakew B. Appl. Phys. Lett., 1994, 64(6): 777—778
- [4] Verghess S, Richards P L *et al.* J. Appl. Phys., 1992, 71(6): 2491—2497
- [5] Johnson B R, Kruse P W. SPIE, 1993, 2020: 2—11
- [6] Liu X T, Shi B A, Yang D J *et al.* ACTV Physica Sinica (Overseas Edition), 1993, 2(4): 248—251
- [7] Hibbs A D, Singseas A L, Taussig D A. AD - A292784, 1995, 1—26
- [8] Milton R M. Chem. Rev., 1946, 39: 419—421
- [9] Richards P L, Clarke J, Leoni R Ph *et al.* Appl. Phys. Lett., 1989, 54(3): 283—285
- [10] Kruse P W. SPIE, 1990, 1292: 108—117
- [11] Sauragean J E, McDonald D G, Grossonan E N. IEEE Trans. Magn., 1991, 27(2): 2757—2760
- [12] Brasunas J, Lakew B, Lee C. J. Appl. Phys., 1992, 71(7): 3639—3641
- [13] Testardi L R. Phys. Rev. B, 1971, 4: 2189—2192
- [14] Kadın A M, Leung M, Smith A D *et al.* Appl. Phys. Lett., 1990, 57(26): 2847—2849
- [15] Blujer N, Forrester M G. SPIE, 1993, 2020: 292—303