

①

381-385

亚微米结构高 T_c 超导探测器研制

刘心田 陆惠秀 刘兴海 李 标 褚君浩

(中国科学院上海技术物理所红外物理国家实验室, 上海 200083)

胡一贯 洪义麟 傅绍军

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽合肥, 230029)

0511

摘要 应用同步辐射技术对 YBCO 超导薄膜进行光刻, 获得 $0.8\mu\text{m}$ 间隔的折线结构, 研制成亚微米结构高 T_c 超导薄膜红外探测器, 敏感元接收红外辐射能量提高约 42%。器件的最好探测率 D^* 达到 $1.8 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 工作温度约 90K。

关键词 红外探测器, 同步辐射, 高温超导器件。

YBCO 高 T_c

引言

亚微米

高 T_c 超导探测器是超导电子学的重要组成部分。1986 年底高 T_c 超导材料问世后, 人们立即开展超导红外探测器的应用研究, 经过约 5 年时间达到了实用水平, 探测率 D^* 达到 $5 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ [1], 成为红外探测技术发展的一个新方向。此后它向两个方向发展: 一是继续提高探测器性能; 二是研制更实用的多元列阵 [2~3]。对于前者, 近两年较有成效的工作是膜片技术和与天线耦合的研究 [4~5], 我们提出的亚微米结构设计与实践则是兼有上述两个目标的有益尝试, 它不仅提高了敏感元接收红外辐射能量, 有效地改善了器件性能, 而且为提高焦平面列阵 (FPA) 的像元密度打下技术基础, 特别是引进了同步辐射光刻工艺后, 把传统的微加工集成技术推上了一个新台阶。

1 探测机理

超导体的重要特征之一是在某一温度下从正常态转变为超导态 (电阻为零) 时, 电阻随温度变化而急剧下降, 根据这一特性可以设计制造出灵敏的超导红外探测器。目前设计制造红外探测器的最好材料是 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO), 其超导临界温度 T_c 值在 90K 附近, 正好接近液氮温区 (77K), 有利于探测器工作点的选择。更为重要的是 YBCO 材料电阻温度系数大, 是设计高性能器件的重要条件。当处于 T_c 下的敏感元吸收入射红外辐射 P_0 时, 其电阻变化为

$$\Delta R = \alpha R_0 \eta \cdot P_0 / G (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 R_0 为敏感电阻, $\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR_0}{dT}$ 为 T_c 下的电阻温度系数, η 为光学吸收率, G 是器件的总热导, ω 是入射辐射的角频率, τ 是热时间常数, $\tau = C/G$, C 为敏感元热容。

当在敏感元上施加一个恒定电流 I_b 时,电阻的变化引起输出电压的改变,从而得到输出信号电压 V_s ,则敏感元的电压响应率为

$$R_v = I_b R_0 \alpha \eta / G (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}. \quad (2)$$

式(2)是设计探测器与进行工艺加工的依据,它表示出提高探测器响应率的途径, R_v 除与 η 、 I_b 、 R_0 、 ω 有关外,还受制于热性能参数 G 和 C .对于材料本身决定的 η 和 C 不去考虑,而 R_0 、 G 、 α 等对提高器件性能起着决定性作用.对于 R_0 ,将 YBCO 薄膜光刻成折线结构,可使敏感元电阻 R_0 大大提高,由式(2)器件响应率也提高了,这里 YBCO 的正常态电阻可高达几十 $k\Omega$,如原设计折线宽与间隙比为 1:1 时,则有 50% 入射能量的损失,本设计实现了高值 R_0 而又使入射能量损失极小.对于敏感元综合考虑,要求它有大的 α 和良好的 η ,而热导 G 要尽量小,调制频率越低则响应率越大,偏流 I_b 必须适当,因为它与噪声和 YBCO 膜临界电流密度 J_c 有关,通常 I_b 为 1mA.此外,探测器的响应速度与 YBCO 膜厚、衬底厚度成反比.

实际测量中,常用噪声等效功率 NEP 来表征器件性能的优劣,其定义是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 V_N 时的入射功率,即

$$NEP = V_N / R_v = (4KT_d R_0)^{1/2} \cdot G (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2} / I_b \cdot \alpha \cdot \eta \cdot R_0. \quad (3)$$

对于电阻性材料,包括所用的 YBCO 超导体的噪声机制,主要是约翰逊噪声,其电压 $V_J = (4KT_d R_0 \Delta f)^{1/2}$,这里 K 是玻耳兹曼常数, T_d 是环境工作温度, Δf 是测量带宽,在整个输出频率内是常量.

由温度起伏引起的噪声为

$$V_T = \left(\frac{KT_d^2}{c} \right)^{1/2} I_b \alpha R_0 \quad (4)$$

它是由敏感元到衬底到热沉的热流密度变化引起的,由热导 G 决定.周围环境条件变化则引起背景起伏噪声为

$$V_B = R_0 (\omega = 0) \left[\frac{2A_d \sigma K (T_a^5 + T_B^5)}{r\eta} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

式中 T_B 是背景温度, σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数.所以,总噪声 $V_N = (V_J^2 + V_T^2 + V_B^2)^{1/2}$,对于 V_T 和 V_B 仅限于探测器的热工作频率内.

由于探测器的性能还与敏感元面积 A_d 和前置放大器的带宽有关,通常用归一化特性参数探测率来表述,定义为 $D^* = (A_d \Delta f)^{1/2} R_v / V_N$.

2 探测器结构与工艺

2.1 器件结构

选用 C 轴取向优良的 YBCO 膜, J_c 为 $5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ (77K),具有良好形貌和超导相,其电阻温度系数 α 值比半导体高 100 倍,比金属高 10^3 倍.膜厚为 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$,对 YBCO 材料的光学吸收深度约为 $0.1 \mu\text{m}$,这样的厚度正好是入射红外辐射的有效作用深度. $T_c \sim 90\text{K}$, $\Delta T_c < 1\text{K}$.利用同步辐射源光刻成如图 1 所示的折线结构,即为所说的敏感

元,折线宽度为 $9.2\mu\text{m}$,总长约为 $1000\mu\text{m}$,折线间隔为 $0.8\mu\text{m}$,这样的设计可以提高 T_c 工作点的电阻率,室温电阻在几 $\text{k}\Omega$ 至几十 $\text{k}\Omega$ 之间,而光能损失却大大减少,敏感元的面积为 $9.2 \times 1000/\mu\text{m}^2$,折线两端是引出线电极,通常蒸银或金,最后表面用类金刚石(DLC)膜作为保护膜,并用金黑来提高光学吸收率。

2.2 工艺

同步辐射光刻工艺是在中国科技大学国家同步辐射实验室进行的,由电子同步加速器产生强的 X 辐射,其辐射强度比普通 X 射线源高两个量级以上,波长为 $50\sim 280\text{nm}$,方向性在 1mrad 以下,X 线光刻掩模是工艺的关键,选用有机材料聚酰亚胺作为基底,膜厚度为 $10\sim 20\mu\text{m}$,对 X 线有良好的透过性,蒸金膜作为 X 线吸收体材料,厚度为 $0.5\sim 1\mu\text{m}$,周边用金属撑起成为 X 射线掩模版,结构如图 2 所示,可以得到 $0.3\mu\text{m}$ 的平整度,掩模图形位置对准精度达到 $0.05\mu\text{m}$ 。

YBCO 膜经清洁处理后,上光刻胶聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),厚度为 $1.6\sim 2\mu\text{m}$,在 $170\sim 180^\circ\text{C}$ 下烘 $30\sim 40\text{min}$,具有良好的亚微米分辨率和图形的高宽比,其灵敏度为 $1\sim 3\text{J}/\text{cm}^2$,最后在真空度为 $5 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 的同步辐射源曝光装置中进行曝光,其参数条件如下:曝光开关作用时间 15ms ,扫描镜角为 $20\sim 5.5\text{mrad}$,曝光面积 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$,非均匀度 $< 10\%$,对准精度达 $0.15\mu\text{m}$ 。Be 窗可以保证曝光的均匀性,并能承受较高的气压。

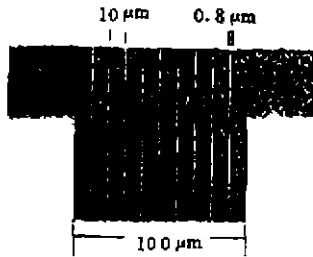


图1 探测器敏感元结构
Fig. 1 The structure of sensitive element

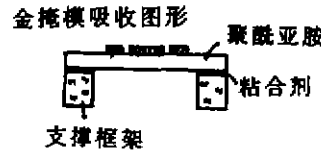


图2 同步辐射光刻掩模版结构
Fig. 2 The structure of mask plate for SR

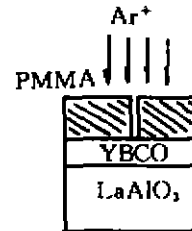


图3 Ar^+ 束刻蚀工艺图
Fig. 3 The diagram of Ar^+ beam etching technology

显影是在甲基异丁基甲酮:异丙醇=3:1显影液中完成的(300K 下 $20\sim 30\text{s}$ 即可),在甲苯中 $10\sim 20\text{s}$ 漂去 PMMA 胶亚微米线条,然后用干法的 Ar^+ 束进行刻蚀,在这道工艺实验中,关键是把握好 PMMA 胶与 YBCO 材料的 Ar^+ 刻蚀速率,在 400eV 下分别为 $400\text{nm}/\text{min}$ 和 $100\text{nm}/\text{min}$,如图 3 所示,获得了 $0.8\mu\text{m}$ 刻线的曲折线结构,即为敏感元。干法刻蚀工艺保证了 YBCO 膜性能稳定。

折线的两端为电极引线点,金丝球压焊引线后,放置于低温杜瓦瓶的恒温热沉上,并用低温导热胶粘敷固定,敏感元电极用 Ag 浆胶直接引出,外接线柱锡焊即可,杜瓦瓶窗口为 KRS-5 材料,在 $1\sim 40\mu\text{m}$ 范围内透过率约为 72% 。为使敏感元保持在 T_c 的最佳工作点上,用精密测温仪或调节液氮蒸发率进行温度控制,精度可达到 $\pm 9\text{mK}/\text{h}$ 。

3 测量结果与讨论

亚微米结构高 T_c 超导探测器性能测量,可使用常规的红外器件的测试设备,但偏流装置和低噪声前置放大器则是重新设计试制的。前置放大的增益为 1.1×10^4 ,频宽为 $3\sim$

80kHz, 短路噪声优于 3nV. 所用测量杜瓦瓶为中国科学院低温中心设计制造, 可方便地变温和控温, 并选择最佳 T_c 工作点, 该点并不是 T_c 的中点, 而是在下部 $T_c/4$ 附近. 在室温下测量, 调制频率为 10Hz, 读出信号经前放后送到频谱仪, 此时应尽量降低对信号干扰, 特别是 50Hz 工频的干扰. 兹选取两次工艺流程的样品, 测量结果列于表 1 和 2.

从测量结果看, 同步辐射光刻工艺可以获得高性能的红外探测器, 其中最好性能探测率 D^* 达到 $1.8 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 的实用水平. 而 $8.6 \times 10^8 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 的器件性能是差的, 看来与测试工作点选择有关, 即 $R=934\Omega$ 的工作点不是 α 值最大的位置, 不仅输出信号小, 而且噪声也提高, 噪声机制分析表明, 除了约翰逊噪声得到加强之外, 热噪声也起了作用. 另外, 在 Ar^+ 束刻蚀工艺中存在 YBCO 表面损伤与曲折线未刻透问题, 甚至表面存有残留胶, 这显然是与 Ar^+ 束刻蚀不均匀性和刻蚀速率不稳定性有关. 为避免出现刻蚀不净情况, 可用丙酮漂洗样品.

表 1 A 组探测器的主要性能(YBCO/ ZrO_2 , $R_{300}=14.2\text{K}\Omega$, $T_c \sim 88\text{K}$)

Table 1 Main performances of group-A detectors

编号	工作点 电阻(Ω)	V_c (μV)	V_n (μV)	R (V/W)	NEP ($\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)	D^* ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$)
1	177	11.8	0.018	667	2.7×10^{-11}	3.3×10^9
2	153	11.5	0.015	650	2.8×10^{-11}	3.2×10^9

表 2 B 组探测器的主要性能(YBCO/LAO, $R_{300}=18.6\text{K}\Omega$, $T_c \sim 89\text{K}$)

Table 1 Main performances of group-B detectors

编号	工作点 电阻(Ω)	V_c (mV)	V_n (mV)	R (V/W)	NEP ($\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)	D^* ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$)
3	105	74	0.4	1.15×10^4	1.09×10^{-13}	1.8×10^{10}
4	163	72	0.5	1.12×10^4	4.0×10^{-12}	5.1×10^9
5	934	36	0.8	5.8×10^3	1.28×10^{-11}	8.6×10^8

测量的参数表明, 探测器的噪声是影响器件性能的重要因素, 除了上述工艺操作的影响之外, 起主要作用的噪声源为电阻热噪声, 其次为背景噪声, 它是环境与工作温度之间辐射热交换引起的, 所以杜瓦瓶的隔热设计与实际保温效果极为重要. 第三是恒温器温度起伏造成的热导变化引起的热起伏噪声, 精心设计杜瓦瓶的传热与热沉体系的热学参数也是降低噪声的途径. 此外还有 $1/f$ 噪声, 它在低频段显得突出. 总之, 在入射辐射与超导体相互作用时, 光子激发了准粒子形成, 会引起 T_c 下敏感元的电阻温度系数 α 改变. 这种基于温度起伏与超导体电导变化的模型, 其器件性能的改善, 除了同步辐射光刻工艺提高接收能量之外, 还需要对超导体光热电激发机理、超导膜厚优选、衬底减薄以及前放本底噪声再降低等方面进行研究.

本文工作表明同步辐射光刻工艺制造高 T_c 超导探测器是可行的, 而且更有利于试制高密度的多元阵列.

感谢 作者感谢中科院物理所超导薄膜组赵伯儒先生提供了 YBCO 高温超导薄膜.

REFERENCES

- 1 Brasuna J C, Lakew B. *Appl. phys. Lett.*, 1994; **64**(6): 777
- 2 Johnson B R, Kruse P W. *SPIE*, 1993; **2020**: 2
- 3 LIU X T, *et al.* *ACTA Physica Sinica* (Overseas Edition), 1993; **2**(4): 248
- 4 Burnus M, *et al.* *SPIE*, 1995; **2746**: 290
- 5 Mess J, *et al.* *Appl. phys. Lett.*, 1991; **59**(10): 2329

DEVELOPMENT OF HIGH T_c SUPERCONDUCTING IR DETECTORS WITH SUB-MICROMETER STRUCTURE

LIU Xin-Tian LU Hui-Xiu LIU Xin-Hai LI Biao CHU Jun-Hao

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

HU Yi-Guan HONG Yi-Ling FU Shao-Jun

(National Synchronous Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,
Hefei, Anhui 230029, China)

Abstract A sub-micrometer ($0.8\mu\text{m}$) meander structure of the high T_c superconducting film YBCO infrared detector was fabricated using the synchronous radiation technology. The receivable energy of IR radiation by the sensitive elements was enhanced by about 42%. The detectivity D^* for the best detector was $1.8 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ at the operational temperature of $\sim 90\text{K}$.

Key words infrared detector, synchronons radiation, high T_c superconducting device.