

远红外探测技术的进展

孔凡平 陆永祥

(中国科学院上海技术物理研究所)

一、引言

电磁波谱中波长介于红外和微波之间(波长30微米至3毫米)的远红外谱区是一个重要的过渡区,许多重要的物理过程都与这一谱区的辐射现象有着密切的联系。例如,大部分轻分子的纯转动谱、固体中晶格振动和其它元激发过程所涉及的吸收现象都发生在这个谱区;磁约束等离子体在超高温条件下的电子回旋辐射也在这个区域,而正是这些辐射构成了聚变等离子体能量耗散的主要部分;此外,象3K宇宙背景辐射、银河系和河外星系的冷天体、星际尘埃和星云分子精细结构等天文学中引人注目的研究课题也都离不开远红外探测技术。从应用技术角度看,这一谱区也富有特点,它把传统的微波技术和几何光学原理融合了起来。

正因为远红外谱区蕴藏着广泛的科学和技术应用前景,因而历来受到各国科学工作者的重视和关注。早在十九世纪末,以Rubens为代表的德国科学家就已开始了远红外谱区的早期探索研究^[1]。但由于缺乏理想的辐射源和足够灵敏的探测器件,这一谱区的开拓研究进展迟缓。

从红外和微波科学技术发展的进程中,人们清楚地看到:在电磁辐射的产生、传输及其与物质相互作用的研究中,灵敏的探测器件起着特殊重要的作用。特别是对远红外辐射来说,它不能为人们的感官直接感受,必须借助特殊的敏感元件把远红外辐射能量转换成其它的物理量。可以说,在灵敏的探测元件充分发展之前,远红外辐射的广泛应用是不可能的。远红外探测还涉及辐射的有效传输和耦合问题,

这与待测辐射的能量微弱及严重的大气衰减有关,因而常规的微波和光学技术遇到了困难。

本文主要介绍远红外探测器件的进展,附带说明与探测器密切相关的传输方式和耦合结构等问题。

二、探测机理

根据远红外辐射和物质相互作用的不同方式,远红外探测器一般可以分为热探测器、光导探测器和检波型探测器三大类。前两类器件是在光学、红外探测器基础上发展起来的,而第三类器件则是直接把微波探测器件的响应谱区移向了更短的波长处。

1. 热探测器

热探测器是最早实用的远红外探测器件,它是基于远红外辐射的热效应而制成的。从器件结构本身来说,一般都有两个部分:能吸收远红外辐射的吸收材料和用以指示吸收温升的测温计。为了提高热探测器的灵敏度并保持良好的瞬态响应特性,热探测器的吸收材料和测温计的热惯性都控制得比较小,它们通过一定的热阻与恒温源(周围环境)连通。热探测器的响应谱由吸收材料和窗口材料所决定,而噪声特性则由测温计、热惯性、热阻和工作温度综合而定。

热探测器的响应特性可以从普遍的热平衡方程出发来分析。假定热探测器的热容(比热与质量的乘积)为 H ,它与恒温源之间的热导为 G ,温差为 θ ,则

$$\eta I = H d\theta/dt + G\theta, \quad (1)$$

这里的 I 是探测器上接受辐照的功率, η 为吸

收效率。如果入射的辐射功率是经正弦形幅度调制的,亦即 $I = I_{\omega} e^{i\omega t}$, 此时 θ 的变化也是正弦形的,而且 $\theta = \theta_{\omega} e^{i(\omega t + \phi)}$ 。这里的 θ_{ω} 和 ϕ 分别满足

$$\theta_{\omega} = \eta I_{\omega} (G^2 + \omega^2 H^2)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$\phi = \arctan(\omega H/G). \quad (3)$$

由于 θ_{ω} 实际上就是吸收材料受辐照后的最大温升,因此由(2),(3)式可见,降低热导 G , 降低入射辐射的调制频率 ω (使 $\omega H \ll G$) 有助于提高热探测器的响应率。

常用的热探测器种类繁多,有气动式高莱管、温差电堆、热释电探测器以及致冷型电阻测辐射热计等。高莱管使用金属薄膜作为吸收材料,当它吸收的热量传递给高莱管内气体之后,气体的压力相应增加,导致后壁的有机膜膨胀,有机膜的张弛由光学方法直接读出。温差电堆结构牢靠,性能稳定,承受功率高,常作为远红外谱区功率定标的基础。近年来发展最快的还是热释电探测器,这种器件采用具有自发极化特性的铁电材料制成,输出信号与材料的温升变化率(而不是温升本身)成正比,因此有可能把响应时间缩短至毫微秒量级,应用范围也随之而扩展。致冷型电阻测辐射热计已在远红外谱区普遍使用,由于工作温度低,器件中与温度有关的噪声和自身发射都降低了,所以响应性能很好。目前还在发展成型电阻测辐射热计来延展响应谱区范围。各种类型热探测器的发展水平参见表1。

2. 光导探测器

光导探测器基于电磁辐射和探测材料直接作用所引起的电导变化而制成,由于这种光电导效应总是与探测材料中电子的某种激发过程相联系,因而探测过程常显示出长波截止特性。对于远红外探测应用中广泛涉及的非本征光电导过程,待测的远红外辐射量子的能量必须大于探测材料相应的能级间距 E_i , 即

$$h\nu = hc/\lambda \geq E_i, \quad (4)$$

这里的 h 是普朗克常数, ν 是辐射频率, c 是光速, λ 为辐射波长, E_i 是非本征半导体材料中的杂质激活能。由(4)式还能直接得到光电导过程的截止波长 λ_c :

$$\lambda_c = hc/E_i. \quad (5)$$

在半导体探测器中,入射电磁辐射产生光生载流子的速率是 $I\alpha\beta$, 其中 I 表示入射辐射强度(以光子数目为单位), α 是吸收系数, β 是量子产额。通过各种机构而复合的载流子复合率可以统计地表示为 $\Delta n/\tau$, τ 为载流子寿命。稳态条件下,

$$I\alpha\beta = \Delta n/\tau, \quad (6)$$

由于光导探测器的信号电压 V_s 与 $\Delta\sigma/\sigma$ 成正比(σ 为材料电导率),而在大多数情况下 $\Delta\sigma/\sigma$ 主要由 $\Delta n/n$ 决定。因此,

$$V_s \propto \Delta\sigma/\sigma \propto I\alpha\beta\tau/n. \quad (7)$$

可见,增加入射辐射强度,采用辐射积分腔提高吸收系数,采用高量子产额材料以及通过选用高阻材料或降低工作温度来减少探测材料的本

表1 典型的热探测器性能^[1]

种类	响应波长范围	响应率	响应时间(或调制频率范围)	噪声等效功率 NEP
热电堆(室温)	$\lambda < 50$ 微米	$10^{-1} - 10^2$ 伏·瓦 ⁻¹	$10^{-2} - 10$ 秒	10^{-9} 瓦·赫 ^{-1/2}
高莱管(室温)	取决于窗口材料	$10^2 - 10^6$ 伏·瓦 ⁻¹	5-20赫	10^{-10} 瓦·赫 ^{-1/2} (商品)
热释电探测器(室温)	取决于探测材料和窗口材料	$10^2 - 10^6$ 伏·瓦 ⁻¹	10^{-9} 秒	5×10^{-10} 瓦·赫 ^{-1/2}
⁴ He 致冷的半导体测辐射热计(1.2K)	取决于探测材料、涂层和窗口材料	$10^3 - 10^6$ 伏·瓦 ⁻¹	5-100毫秒	$10^{-12} - 10^{-13}$ 瓦·赫 ^{-1/2}
³ He 致冷的半导体测辐射热计(0.3K)	取决于探测材料、涂层和窗口材料	10^7 伏·瓦 ⁻¹	5-100毫秒	$10^{-14} - 10^{-16}$ 瓦·赫 ^{-1/2}

表2 典型的光导探测器性能^[1]

种 类	响应波长范围 (微米)	响 应 时 间	响 应 性 能
非本征 Ge Ge:Cu Ge:Ga	2—30 30—120	典型值100毫秒,重 补偿材料有可能达 1毫微秒	NEP $\sim 2.5 \times 10^{-13}$ 瓦·赫 $^{-\frac{1}{2}}$ NEP $\sim 6 \times 10^{-17}$ 瓦·赫 $^{-\frac{1}{2}}$
非本征 Si Si-As(<20K) Si-As, Si-P, Si-Sb 中D-态 (1.6K)	1—23 100—500	同上 1毫微秒	$D^* \sim 2.5 \times 10^{10}$ 厘米·赫 $^{-\frac{1}{2}}$ 瓦 $^{-1}$, NEP $\sim 10^{-11}$ 瓦·赫 $^{-\frac{1}{2}}$
GaAs (4—6K)	100—350	10毫微秒	NEP $\sim 4 \times 10^{-14}$ 瓦·赫 $^{-\frac{1}{2}}$
InSb (2K)	200—3000	200毫微秒	NEP $\sim 5 \times 10^{-12}$ 瓦·赫 $^{-\frac{1}{2}}$

底载流子浓度,都有益于增强光导探测器的输出信号。控制复合机构来延长载流子寿命固然也能提高信号,但这是以牺牲探测器快速响应为前提的,必须根据应用要求权衡考虑。

目前以 Ge, Si 为基质材料的非本征光导探测器应用相当普遍。Ge 中的杂质激活能分布在 0.01—0.35 电子伏特范围,响应的截止波长为 3—120 微米, Si 中的杂质激活能在 0.04—0.55 电子伏特,响应的截止波长稍短些。利用中性施主俘获电子的 D-态(或中性受主俘获空穴的 A⁺ 态)以及 Rydberg 态发展的新的探测器件,则有可能把响应波长延至 0.5 毫米。基于 n 型 InSb 自由载流子的吸收光电导探测器的灵敏度虽不及致冷型电阻测辐射热计,但响应快速,使用方便,因而颇受重视。近来,对 HgCdTe 自由载流子吸收光导探测器的研究,可望在探测性能方面有所提高。各种光导探测器的发展水平参见表 2。

3. 检波型探测器

远红外谱区的检波型探测器实际上是微波检测器件的延伸发展,它能响应入射电磁辐射感生的电流,并通过某种非线性检波作用而输出信号。检波型探测器一般都采用点接触的结构形式,接触结点的面积控制在几个平方微米以内。这样的结构设计可以降低器件本身和寄生电容的数值,不致严重旁路器件的电流,但点

接触结构稳定性差,工作寿命短。检波型器件响应时间很短,特别适合于调制频率很高的应用场合,或者作为外差探测系统中的混频器。

作为视频探测或者外差混频探测的器件, W, P-Cu 和各种半导体材料 (Si, Ge, GaAs, InSb) 之间金属半导体接触的结构应用时间最长。这种结构可能有多种探测机理,但在远红外谱区应用的一般均属肖脱基势垒型。材料的选取决定于应用,但直到最近还没有定量的结果来判定哪种材料以及何种掺杂程度为最佳状态。近年来,使用电子来蚀刻工艺,使肖脱基势垒二极管和“超肖脱基”二极管(以超导金属替代正常金属来作触丝)已有成功报道。另一类室温工作的检波型探测器 MIM 结构的研究也很普遍,它的非线性电学性质据信是电子隧道效应的结果。约瑟夫森结在远红外探测应用方面前景宽阔,其内部产生的振荡电流和外来辐射感生的电流相互作用表现出许多独特的性能。由于约瑟夫森结振荡超导电流固有的电感性和超导体性质,当入射辐射的量子能量超过超导体能隙时,这种效应的强度减弱。从目前已有的超导体材料基本参数推测,约瑟夫森结主要适用于波长为 200 微米以上的辐射探测,而且,点接触结构的器件最为灵敏。各种检波型探测器件的发展水平参见表 3。

表3 典型的检波型探测器性能^[2]

类型	材料	响应波长(毫米)	输入耦合方式	响应率(伏·瓦 ⁻¹)	视 频 NEP (瓦·赫 ^{-1/2})
金属-半导体 点接触 (300K)	金属-Ge W-GaAs	1	过模波导 触须天线	10 ⁹	3×10 ⁻⁴
		0.337			2×10 ⁻⁸
光刻肖脱基 二极管 (300K)	n 型 GaAs	0.496	触须天线	10	10 ⁻⁸
		0.119	触须天线	0.4	10 ⁻⁷
金属-金属点 接触 (300 K)	W-Co W-Ni	0.337	触须天线	1	
		0.337-0.389	触须天线	10 ⁻¹	
点接触约瑟夫 森结 (≤4K)	Nb-Nb	2.5	触须天线	5×10 ⁷	3×10 ⁻¹³

200 毫米,最大光程差 40 毫米,相当于分辨率 0.1 厘米⁻¹。

三、传输问题

远红外谱区可以理解为经典光学技术和传统的微波手段相互交迭的区域。远红外辐射的有效传输手段和耦合方式方面的困难在于:波导通常作为微波传输的主要手段。然而金属波导的电阻损耗和介质波导的弛豫损耗,由于工作频率的升高在远红外波段变得很大。此外,当工作波长短于 2 毫米时,小尺寸波导的加工以及功能元件的装配都存在严重困难。过模波导虽在一定程度上可以缓和损耗和尺寸方面的苛刻要求,但波导截面的辐射场分布相当复杂,存在着许多因模式混合而引起的困难,尤其计及色散时,情况更为严重。因此,开放结构的定向传输技术已成为远红外谱区最有希望的选择。但是,不计波动效应的纯光线光学设计,要求光学元件的线度较工作波长高二个数量级以上,譬如,对于 1 毫米波,透镜或反射镜的直径至少不小于 100 毫米方能保证系统具有高的性能。但如此庞大的元件装配在实验室仪器上显然是不方便的,应用在天文望远镜中同样也是不实用的。所以,熟知的微波手段和光学方法在远红外谱区遇到了难以克服的困难,为了解决传输和耦合问题,就产生了亚毫米波光学或准光学。Martin 和 Lesurf^[3],根据高斯光束的传输特性,把光学方法贯彻到远红外谱区,设计出结构紧凑,性能优良,能有效传输远红外辐射的准光学双束干涉光谱仪,整个系统尺度约

物理

四、耦合结构

如上所述,传统的光学和微波技术直接应用于远红外辐射的探测遇到了困难。光导探测器作为一种性能优良的混频器,它的响应又慢了些。肖脱基势垒二极管和 MIM 结作为非线性元件具有较大的带宽和室温操作的优点,但是体积太小,需要某种馈送结构以便有效地把能量耦合到二极管。当工作波长减小时,由于趋肤效应,金属波导的电阻损耗变得很大,因此广义概念上的天线对于远红外辐射来说是最好的耦合结构。到目前为止,应用得较为成功的

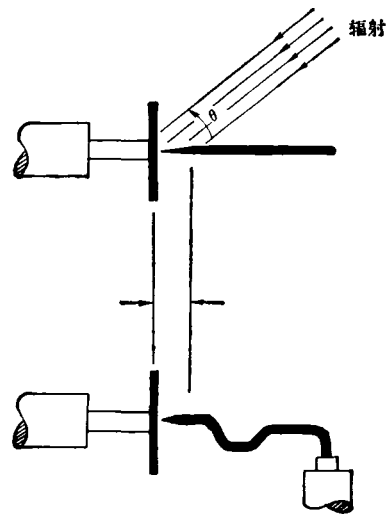


图1 Cat-Whisker 天线

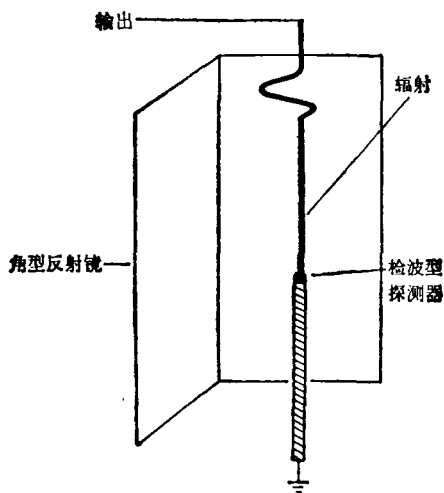


图2 自由空间天线

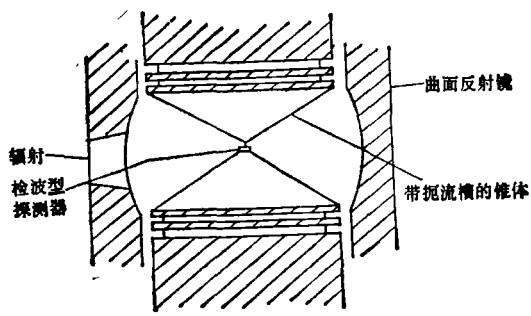


图3 双角锥腔

远红外天线是 Tungsten Cat-Whisker (图1), 附加角反射镜后可使其天线的方向性得到改进 (图2), 以及 Gustincic 等人所设计的双角锥腔 (图3)。

各类耦合技术尚处于发展的早期阶段, 对它们的性能还不能作出定量的比较。这类天线所存在的最大缺点是: (1) 从天线模型上讲它很象普通的长导线天线, 当工作波长短于2毫米时, 由于天线的有效面积减小 (正比于 λ^2) 以及钨在该谱区的材料特性, 导致非线性二极管的性能显著变坏; (2) 采用点接触式, 所以机械稳定性差; (3) 方向性不好。

已经作出的改进是采用微电子学工艺将平面天线嵌在介质中间, 做成夹心面包的形式, 图4就是 Schwarz 在石英介质中嵌制V形平面天线的示意图。它具有单瓣天线特性, 增益高, 频

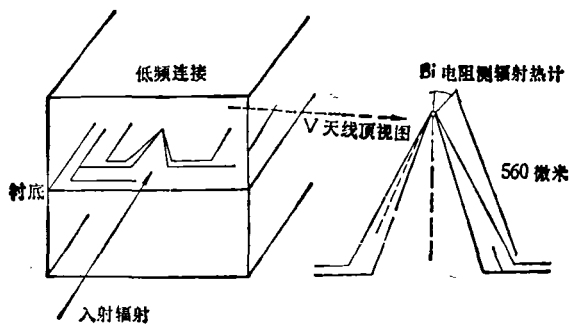


图4 红外V型天线

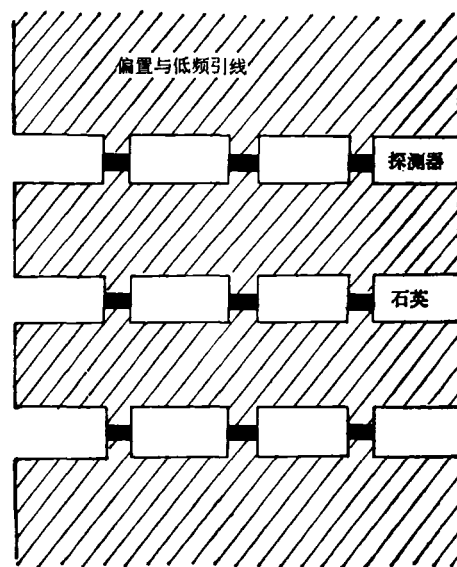


图5 平行导线传输线与400元Bi电阻测辐射热计的集成

带宽, 机械稳定性也远较点接触器件为好。这种V型天线可与多种类型的探测器耦合^[4], 当和Bi电阻测辐射热计组合使用时, 在119微米处测得的天线增益 g 为8分贝^[5,6]。根据同样原理而制成的平行导线传输线与400元Bi电阻测辐射热计集成已获成功, 总的工作面积1厘米², 在1毫米波处的耦合率60%, 器件探测率为 $D^* \approx 4 \times 10^8$ 厘米·赫^{1/2}·瓦⁻¹, 响应时间 2×10^{-7} 秒 (图5)。与肖脱基势垒二极管和SIS探测器的集成化研究正在进行中^[7]。

五、结束语

远红外探测技术是一项综合性的应用技

术,相关学科的研究进展将为其提供新的机理和方法。加强远红外辐射和物质相互作用的研究从而探索更加灵敏实用的探测器,完善准光学系统设计理论以满足更加广泛的应用要求,采用微加工工艺,发展平面阵列探测器件并逐步实现与天线、波导、辐射源的集成,所有这些都是当前远红外探测技术研究中值得重视的发展方向。可以预料,远红外探测技术的研究进展将会带来更为广泛的应用。

本文是在汤定元先生热情指导下完成的,苏锦文同志对稿件内容提出了有益建议,作者在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] E. D. Dalik, *J. Opt. Soc. Am.*, **67**(1977), 857—865.
- [2] T. G. Blaney, *Infrared and Millimeter Waves*, Academic Press, (1980), Vol. 3, 34—49.
- [3] D. H. Martin et al., *Infrared Phys.*, **18**(1978), 405—412.
- [4] T. L. Hwang et al., *Appl. Phys. Lett.*, **31**(1977), 101—104.
- [5] D. B. Rutledge et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16**(1980), 508—516.
- [6] T. L. Hwang et al., *Appl. Phys. Lett.*, **34**(1979), 9—11.
- [7] D. B. Rutledge et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**(1981), 407—414.

中国物理学会召开“2000年的中国(物理学)”报告会

中国物理学会于1983年8月18日在中国科学院物理研究所举行了“2000年的中国(物理学)”报告会。来自京区的100余位物理学工作者参加了会议。会上,粒子物理、核物理、凝聚态物理、原子分子物理、光学、电子显微镜等分支学科分别作了专题学术报告,分别介绍了各学科国内外发展情况及与国民经济发展、技术应用的关系,展望了到本世纪末的发展前景。

与会代表认为:物理学是研究物质的基本结构,相互作用和运动形态的基本规律的科学,物理学研究的目的在于认识物质运动的普遍规律和揭示物质各层次的内部结构。物理学是其他科学和生产技术发展的基础,其研究成果往往能变成改造世界的有力工具,物理学以其特有的方式推动着人类社会生产的发展。十九世纪以来,物理学曾长期处于整个自然科学的前沿地位,对工业技术的发展起着巨大的促进作用。今后,它仍将是基础学科中的带头学科之一。大家认为,现代物理学的发展与生产的进步密切相关,现代工业的发展对物理学提出了要求,并为物理学的发展创造了必要的条件,而物理学在实验上和理论上的重大发现对工农业技术革命给予深刻的影响,使生产力的发展出现质的飞跃。二十世纪以来,人类宣布进入“电气时代”“原子能时代”,正是以物理学研究成果为先导的新技术变为时代标志的例证。当代社会生产力的发展,向物理学提出了一系列要求,如开辟新能源,寻找能量

转换、传递和存贮的新途径;研究巨量信息的提取、传输、加工和保存的新方法;发明新型材料和元件、器件等,从物理学本身来说,已从分子、原子、原子核深入到对物质微观世界认识的更深层次——“基本”粒子结构的研究;从研究单粒子运动,发展到多体运动,从研究简单运动形态,发展到研究复杂运动形态,直至研究生命过程的高级运动形态。在工业技术不断发展,新技术层出不穷的今天,已能够为物理学提供许多重大、复杂、精细的实验条件。新现象、新效应、新规律的不断出现,物理学正孕育着重大突破。

会上,有的同志还分析了近代物理学发展的特点及我国物理学发展的现状,提出了今后为推动我国物理学的迅速发展的若干建议:

1. 建立一支强大的物理研究和技术队伍;
2. 加强统一安排和计划管理;
3. 充分发挥仪器设备的作用,逐步实现实验室现代化;
4. 加强国内外科技情报资料交流;
5. 努力改善中青知识分子的工作和生活条件。

最后,中国物理学会秘书长管惟炎同志就如何开展“2000年的中国(物理学)”这一研究课题讲了话并作了进一步部署。

(程义慧)