9(1990), 4: 287～292

红 外 研 究
Chin. J. Infrared Res.

InSb 过热电子远红外探测器

徐建人　龚雅谦　刘松荷

(中国科学院上海技术物理研究所，上海，200083)

摘要——指出采用低浓度高补偿 N 型 InSb 单晶材料是改善远红外探测器性能的有效途径. 得到的最小的探测器噪声等效功率 NEP 为 6.0×10^{-12} $WHz^{-1/2}$. 通过改进探测器的腔体结构，成功地探测到耿氏振荡器产生的 3.24 mm 辐射.

关键词——InSb，过热电子，远红外探测器.

1. 引　　言

基于过热电子效应和自由载流子吸收效应的 InSb 过热电子探测器是一种重要的远红外、亚毫米及短毫米波段探测器，它具有高灵敏度、宽光谱响应范围和快速响应等优点，因而在天文学观察、等离子体诊断和物质远红外光谱研究中有着重要的应用。由于 InSb 的电子有效质量很小，迁移率很高，即使现在可得到的最纯的 InSb 材料，在 4.2K 下的电阻率仍很低，这就使探测器的阻抗较低，难以得到高电压响应率. 为提高 InSb 探测器芯片阻抗主要采用三种方法[1~3]：一是利用液氦温度下的互感阻抗变换器，二是利用外加强磁场，三是将芯片制成迷宫状，但这三种方法均未从改进材料本身特性来提高探测器的阻抗. 本文在研究材料的电学参数对 InSb 过热电子非线性电导影响的基础上，选择适当参数的材料制作探测器，提高了它的响应率.

根据过热电子探测器的原理，在短毫米波段(1～3 mm)由于自由载流子吸收最强，探测器本应有较高的响应率，但实际使用的过热电子探测器响应率在这一波段随波长增加而迅速下降，在核聚变等离子体诊断等应用(例如测量电子迴旋辐射)中，正需要探测器在该波段有较高的响应率，所以，解决响应率在长波段突然下降的问题有着重要的意义. 本工作指出了导致探测器响应率在长波段下降的原因. 通过改进探测器腔体结构改善了探测器在远红外长波段的响应率.

本文 1989 年 6 月 15 日收到，修改稿 1990 年 1 月 6 日收到.

* 国家自然科学基金资助课题.

2. 原 理

Putley 已给出了有关过热电子探测器的详细理论[4]，这里仅概述其原理. 由于 InSb 材料的 m^* 很小，在 4.2 K 下电子与晶格的能量耦合相当弱，在强电场作用下电子温度显著地高于晶格温度，迁移率是外电场的函数，这就是过热电子效应. 当自由载流子吸收了远红外辐射能量而引起迁移率变化时，将导致电导率变化，这就是光导型 InSb 远红外探测器的工作原理. 由于自由载流子吸收率与波长平方成正比，高纯 InSb 材料(载流子浓度约为 $1\times10^{14}\,cm^{-3}$)对波长大于 300 μm 的辐射有明显吸收，波长在 1 mm 时，吸收率最大[5]，可见这种探测器的响应波段正好复盖整个远红外波段. 探测器性能主要取决于材料的非线性输运特性. 随着材料补偿度增加，过热电子引起的电导率非线性增强，非线性电导区向强电场方向移动[6]，这些特性对提高探测器电压响应率极其有利.

为了讨论这种探测器在远红外长波段响应率突然下降的现象，我们首先分析当待测辐射的波长增加到能与探测器的元件尺寸相比拟时，用辐射功率响应来描述远红外探测器性能所引起的问题. 众所周知，在红外波段，探测器对一个温度均匀分布、面积足够大的扩展热辐射源的光谱响应为 $V_s(\nu)=R_{p\nu}A\Omega\cdot B(\nu)d\nu$，其中 $R_{p\nu}$ 为探测器对入射功率的光谱响应率，$B(\nu)$ 为源光谱辐射率，$A\Omega$ 乘积是探测器的面通量，A 和 Ω 是由几何光学决定的与入射辐射波长 λ 无关的两个参数，它的定义是明确的并可精确测量. 但在远红外波段，当波长 λ 与探测器元件尺寸相比不是很小时，由于入射辐射在探测器处的衍射和干涉现象，探测器的有效截面 $A_e(\nu)$ 和有效视场角 $\Omega_e(\nu)$ 就随波长而变化. $A_e(\nu)$ 的不确定性决定了探测器接收到的功率具有不确定性，因此，采用对功率的响应率 $R_{p\nu}$ 和噪声等效功率 NED(ν) 来描述探测器性能也具有不确定性. 为此，基于电磁场的普通理论，即平面波角分布谱的理论，我们提出了用对辐射通量密度的响应率 $R_F(\theta, \varphi, \nu)$ 等来直接描述探测器性能[7].

就我们的远红外直接探测器系统而言，当待测辐射的波长与光锥的横向几何尺寸相比不是很小时，光学衍射效应使入射功率无法全部达到芯片，这时应该用电磁波在金属波导中的传输理论来计算光锥的传输效率及与波长的关系. 作为一个极端的例子，当 λ 大于光锥细端的直径时，所有入射辐射的能量都会被反射出来，不能达到芯片，这相当于 λ 大于探测器截止波长时的情况. 基于对光锥在远红外探测器中作用的理解，探测器的响应率在长波段的突然下降，是由于在长波段作为远红外波导的光锥的传输效率下降所引起. 为此，我们在实验中将光锥细端的直径增大，以保证较多的长波辐射功率达到芯片，从而提高该探测器在长波段的性能.

3. 设计和制作

我们设计和制作的远红外视频接收系统由探测器系统、液氦杜瓦瓶和前置放大器三部分组成，其中探测器系统如图 1 所示. 基于材料的电学参数对其过热电子非线性电导有很大影响，我们选择了不同电学参数的材料制作芯片. 为了增加芯片的电流流程，采用电火花切割工艺将芯片制成迷宫形，且选择适当的厚度及间隙，以保证芯片对远红外辐射的吸收效

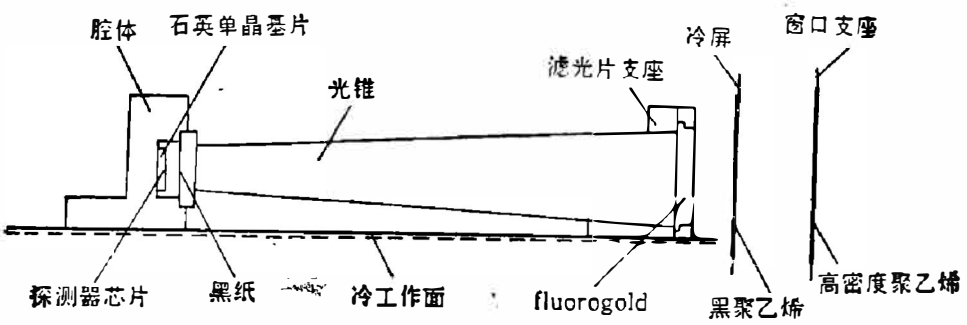

图 1　锑化铟远红外探测器结构

Fig. 1　The structure of an InSb FIR detector.

率，如图 2. 为了克服工艺过程引入的损伤层产生的额外噪声，成形后采用机械抛光和化学抛光去除芯片表面损伤层，同时，在制作电极过程中注意避免欧姆接触不良产生的额外噪声，由于过热电子效应对温度很灵敏，我们在设计探测器系统时特别注意减少液氦杜瓦瓶冷工作面与芯片间的热阻，使芯片温度尽量接近 4.2 K，同时选择热导系数较大的无氧铜材料制作腔体.

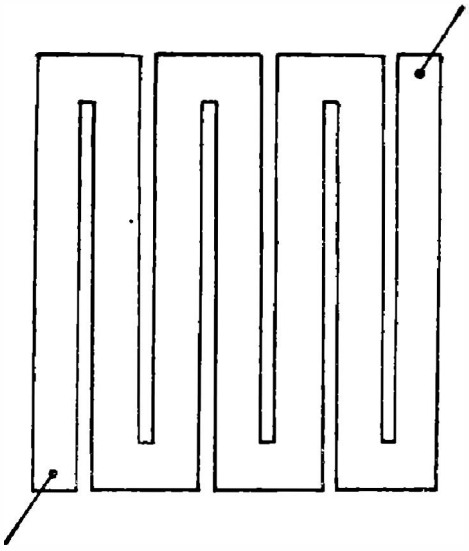

图 2　厚度为 300 μm 的锑化铟迷宫芯片

Fig. 2　InSb toaster element.

一般热辐射源中远红外辐射所占比例很微弱，而短波辐射却很强，这些短波辐射进入腔体将引起很大的背景噪声. 这是远红外探测器结构设计中的一大难题，为此，我们选择了三层特殊的、工作在低温下的滤光片，即处于 77 K 温度下的聚乙烯，处于液氦温度下的 fluorogold(一种由掺玻璃纤维的聚四氟乙烯制作的远红外滤光片)和黑纸，它们在远红外波段具有较高的透射率[9]，同时，选择真空封闭性能良好的高密度聚乙烯作为杜瓦瓶窗口. 这些冷滤光片的作用不仅可截住短波辐射，还可减少其自身辐射，使探测器芯片接收到的辐射主要来源于两大部分：一是信号辐射，即 $\lambda>300\ \mu m$ 的远红外辐射；二是冷背景辐射，包括液氦温度的腔体和黑纸组成的冷背景辐射. 这种多层冷滤光片结构设计大大减小了探测器的背景辐射噪声.

为了减少远红外辐射能量在传输过程中的损耗，如果将光锥和腔体作为探测器前的光学系统，其作用不仅是收集和会聚入射能量，还可限制探测器的接收视场，视场角为 56°. 我们采用光学表面复制技术将光锥和腔体内表面镀一层铝以提高其反射率(~97%)，另外，选择在远红外透过率较高的 G. E. Varnish 低温胶及 z 方向石英单晶片作为基片，以提高辐射能量的传输效率，使第一次透过 InSb 芯片而未被完全吸收的远红外辐射能量被反射回来，再次进入 InSb 芯片，以改善其吸收效率. 为了改善该探测器在长波段响应率，采用光线跟踪技术，在保证光锥视场角不是很大的基础上，将腔体入射口直径和光锥细端直径适当放大，使长波辐射功率能达到芯片.

我们设计的前置放大器具有低噪声 ($V_N=3\sim4\ nVHz^{-1/2}$)、宽带 (500 KHz) 和能与芯

片阻抗相匹配三个特点. 实验用的 HD-3 Arizona Infrared Lab.Inc. 液氦杜瓦瓶最低温度可达1.2K.

4. 性能测试与应用

前面我们已指出: 当待测辐射的波长 λ 与探测器元件尺寸相比不是很小时, 干涉和衍射效应使探测器的有效面积随 λ 而变化, 因而探测器接收到的功率具有不确定性, 所以必须引入辐射通量密度的概念, 即对辐射功率的响应改为对辐射通量密度的响应来描述探测器性能. 为了便于与国外同类探测器的性能作比较, 我们仍采用对功率的响应参数 R_p 和 NEP 等来描述探测器性能, 在计算黑体辐射功率方法及测试条件方面也尽可能与国外现行方法一致.

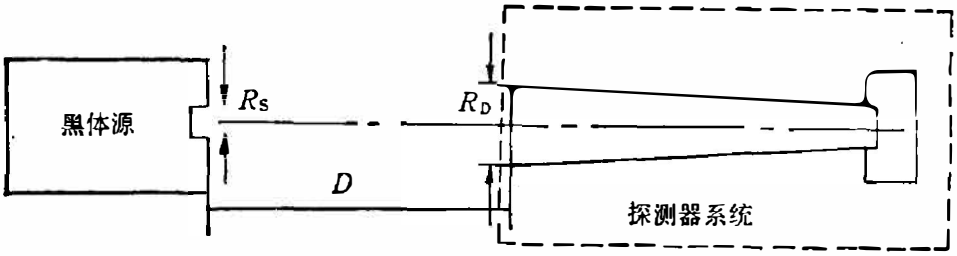

图 3 黑体辐射功率计算示意图

Fig. 3 Schematic representation of the calculation of radiation power from blackbody source to InSb detector system.

图 3 为辐射功率计算示意图(图中虚线方框为液氦杜瓦瓶内), R_s 为面源半径, R_D 为接收面半径, D 为两者间距离. 由普朗克公式可得辐射频率在 $\nu \to \nu + d\nu$ 间的功率为

$$F(\nu)d\nu = \frac{2\pi h\nu^3 d\nu}{c^2(e^{h\nu/K_BT}-1)}. \tag{1}$$

其中 T 为黑体温度, $F(\nu)$ 为黑体功率分布函数. 在长波段, $h\nu \ll K_BT$, 利用瑞利-岭斯近似得探测器接收到的辐射功率 $P(\nu_1-\nu_2)$ 为:

$$P = \frac{2}{3}\cdot\frac{\nu_2^3-\nu_1^3}{c^2}K_B\cdot(T_1-T_2)dA_S\beta_1\beta_2\cos\theta\, d\Omega. \tag{2}$$

其中 $d\Omega = \cos\theta\, dA_D/S^2$ 为面源上一点对接收面元 dA_D 所张的立体角, dA_S 为黑体源面元, θ 为辐射面元 dA_S 的法线与光轴的夹角, S 为面元上任意一点到接收面任意一点的距离, T_1 为黑体源温度, T_2 为调制盘温度, β_1 为调制盘的正弦因子, β_2 为滤光片的透过率.

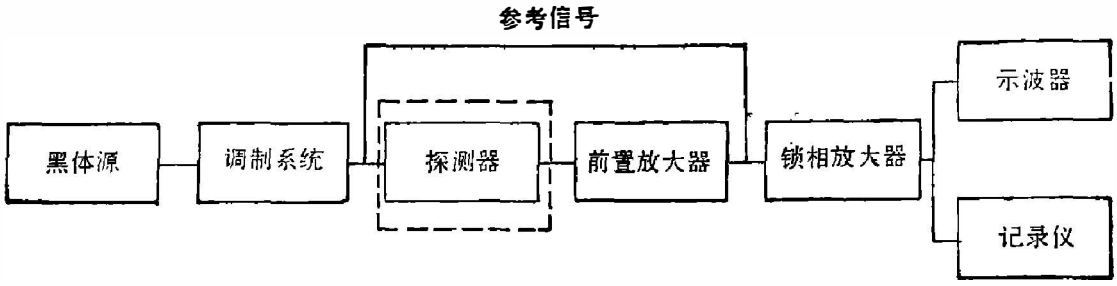

图 4 探测器性能测试方框图

Fig. 4 Block diagram of the measurement for detector performances.

表 1　温度为 4.2K、调制频率为 240Hz 及不同 I_{op} 条件下探测器的光学性能及其材料电学参数

Table. 1　Optical performances of the detectors under different I_{op} at 4.2K and 240Hz as well as electrical parameters of the corresponding materials.

探测器编号	I_{op} (μA)	V_S (μV)	V_N (nV)	V_S/V_N	R_P (V/W)	NEP (WHz$^{-1/2}$)	n_0 (coulcm^{-3})	μ(77K) (cm^{2}V^{-1}s^{-1})	$\bar{K}$ (%)
I	19	26	20	1.3×10^3	3.4×10^3	6.0×10^{-12}	1.2×10^{14}	4.4×10^5	61
	50	21	20	1.05×10^3	2.7×10^3	7.3×10^{-12}			
II	108	0.96	8.0	1.2×10^2	1.25×10^2	6.4×10^{-11}	2.0×10^{14}	6.3×10^5	36
	130	1.39	8.0	1.76×10^2	1.8×10^2	4.3×10^{-11}			
	145	0.55	8.0	6.9×10^1	7.1×10^1	1.1×10^{-10}			

在实验中 $R_D \ll D$，则 $S \approx D$，由式(2)可得

$$P=\frac{2}{3}\cdot\frac{\nu_2^3-\nu^3}{c^2D^2}\,K_B(T_1-T_2)A_SA_D\beta_1\beta_2, \tag{3}$$

由式(3)算得实验条件下探测器接收到波长大于 300 μm 的功率 P 为 7.7×10^{-9} W，并有 $R_P=V_S/P$，NEP$=P/(V_S/V_N)$.

图 4 为用黑体源测量探测器性能方框图，实验采用上海技术物理所 500°HFY-100 标准黑体源，Teckmation limited 391 锁相放大器测试探测器光学性能，实验结果如图 5. 表 1 为两个典型探测器在不同偏置电流 I_{op} 下的性能参数. 由表 1 可见，采用低浓度、高补偿 InSb 材料制作的远红外过热电子探测器的性能较好，详见参考文献[6].

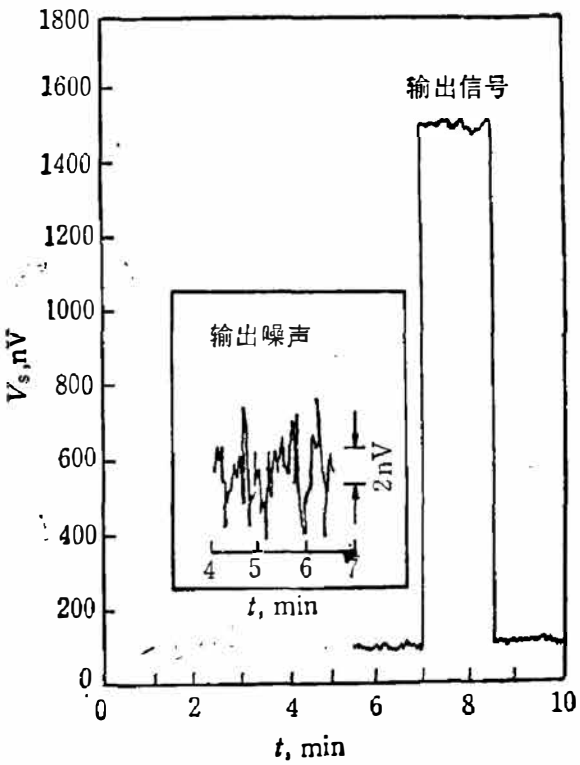

图 5　InSb 远红外探测器 II 的响应电压和噪声 ($f=240$ Hz, $T=4.2$ K)

Fig. 5　The response voltage and noise voltage of InSb FIR detector II at $f=240$Hz, $T=4.2$K

利用耿氏振荡源测试该探测器对长波辐射的响应如图 6. 耿氏振荡器产生的辐射能量通过一个内壁刻有波纹槽的圆锥喇叭天线沿轴向发射一束能量集中的定向高斯波束[8]，然后由探测器系统中的光锥将高斯波束耦合到器件光敏面上，耿氏振荡器 92.6 GHz(~3.24 mm) 频率的辐射功率可达 10 mW 左右，测得 R_P 约为10^3 V/W 数量级，证实了放宽腔体入射口径及光锥细端直径对改善该探测器在远红外长波段响应是有效的. 另外，利用光泵远红外激光器作为辐射源，通过玻璃镀金波导将辐射能量传输到探测器入射口，观察到该探测器对 447.2 μm 的泵浦线有明显的响应. 可见，通过该探测器对 447.2 μm 及 3.24 mm 的远红外辐射的响应，证实了锑化铟过热电子远红外探测器可工作在很宽的远红外波段，为在等离子体诊断应用奠定了基础.

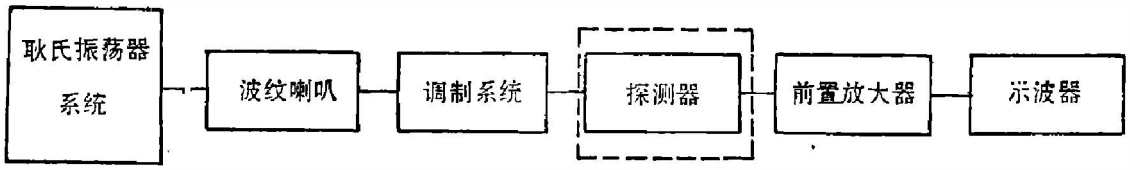

图6 直接探测3.24mm信号的测试方框图

Fig. 6 Block diagram of the measurement for 3.24mm signal by video receiving method.

我们在研究不同掺杂浓度和补偿度的材料对过热电子非线性电导影响的基础上，选择了不同电学参数的N-InSb材料制作远红外探测器．实验证实了采用低浓度高补偿N型InSb材料是改善远红外探测器性能的有效途径．我们制作的探测器，其等效噪声功率响应范围．探(NEP)可达6.0×10^{-12} $WHz^{-1/2}$．通过改进探测器腔体结构，拓宽了该探测器在长波段的测到了远红外长波长为3.24mm的辐射，同时观察到了该探测器对447.2μm的辐射有响应，从而证实了这种探测器可工作在很宽的远红外波段．

致谢——作者感谢本所红外物理开放实验室、低温组、锑化铟材料组、远红外接收组及远红外光泵激光器组等许多同志的支持和帮助．

参 考 文 献

[1] Putley E. H., *Proc. IEEE*, **51** (1963), 1412; Putley E. H., *Physics of Semiconductors in Proc.* 7th Inter Conf., p. 443, Dunod Paris and Academic Press, N. Y. (1964).
[2] Kinch M. A. Brit., *J. Appl Phys.*, **14** (1963), 672.
[3] *QMC Instruments Ltd*, Private Communication, 1980.
[4] Putley E. H., *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 1, Chapter 9, Academic Press., New York and London, 1966.
[5] Gong Y. Q., *J. Infrared and Mm. Waves*, **4** (1983), 135.
[6] XuJ. R. and Gong Y. Q., *International Conf. on MM. and FIR. Technology*, 1989.
[7] 龚雅谦，红外研究，**6** (1987), 51.
[8] 王正秋、龚雅谦，红外研究，**6** (1987), 113.
[9] Gong, Y. Q., *University of London. Ph. D. Thesis*, (1983).

InSb HOT ELECTRON FAR-INFRARED DETECTOR*

XU JIANREN, GONG YAQIAN, LIU SONGHE
(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*, 200083, *Shanghai, China*)

ABSTRACT

This paper points out that it is one of the effective methods to improve the FIR detector performances by using N-InSb crystal materials with low electron concentration and high compensation degree. The lowest NEP of the detectors available is 6.0×10^{-12} $WHz^{-1/2}$, and the 3.24mm radiation generated from the Gunn oscillator has been successfully received by the InSb detector with improved cavity structure.

* Project supported by the Chinese National Natural Sciences Fund.