

集成非制冷热成像探测阵列

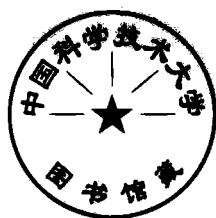
刘卫国 金娜 著

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

集成非制冷热成像 探测阵列

刘卫国 金娜 著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

集成非制冷热成像探测阵列/刘卫国,金娜著. —北京:国防工业出版社,2004.6

ISBN 7-118-03412-6

I. 集... II. ①刘... ②金... III. 热敏探测器:辐射探测器 IV. TN376

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 006271 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12% 333 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

热探测器的研究经历了超过一个世纪的时间,对热探测器阵列的研究也有将近 40 年的历史。集成非制冷热成像探测器阵列的研究核心包括两个方面,即集成化和非制冷化。其中非制冷化是这一类器件的重要特征,其基本含义是探测器阵列的工作温度在室温附近,相应的热成像系统不需要复杂、昂贵的探测器制冷。热成像探测器阵列的非制冷化,依赖于新型高性能热探测材料。集成化的要求是热探测器性能提高的基础,其实现的保障是半导体集成电路技术。集成非制冷热成像探测器阵列的基本概念早在 20 世纪 60 年代就已经提出,但是它的全面研究是从越南战争期间开始的。由于美军在作战中体会到低成本、高性能热成像系统的重要性,促使对这一类器件的研究从 20 世纪 70 年代末进入迅速发展阶段。

热探测器阵列研究的突破,依赖于半导体集成电路技术的进步和热辐射探测材料研究的进展。相关的研究,涉及材料、电子、光学、热学、集成微制造技术等学科内容。具有代表性的热探测器阵列分别基于热电效应、测辐射热计效应和热释电效应。其中美国亨尼维尔公司在测辐射热计热成像探测器阵列的研究方面取得了突破,研究成果在 1992 年解密,并迅速形成器件的批量生产能力;而德州仪器公司则在混合集成热释电成像探测阵列的研究方面取得了突破,并最早实现了非制冷热成像系统的批量生产。随着技术的解密,越来越多的研究机构和企业进入了相关的研究和生产领域。

目前热探测器阵列的研究已经进入到一个新的阶段,新器件

的开发周期越来越短、阵列规模越来越大、性能越来越高。热成像探测器阵列的规模从最初的 320×240 逐步朝向 640×480 发展, 最小可探测温差 (NETD) 也低达 50mK 。法国 Sofradir 公司成功地在 6 个月的时间内, 实现了 320×240 非晶硅阵列器件从研究成果到生产的转化。开发 1024×1024 大规模阵列的工作也已经提上日程。

非制冷热成像探测阵列的应用领域, 随着器件性能的提高而日益广泛, 覆盖了从民用到国防的诸多领域。典型的军事应用包括: 红外制导、火控跟踪、警戒、目标侦察、热瞄准、车辆及舰船导航等。在准军事领域, 广泛应用于安全警戒、刑侦、森林防火、消防、大气检测等方面。在民用领域, 广泛应用于工业设备监控、安全保卫、交通管理、救灾、遥感以及医学热诊断技术等。由于非制冷热成像探测阵列应用的广泛性, 特别是在国防领域的重要应用, 国内从 20 世纪 90 年代开始了集成非制冷热探测材料和器件的研究, 对非制冷热成像系统的研究已经取得了进展。但是对非制冷热成像探测阵列的研究尚处在起步阶段。

本书总结了作者十多年来在相关领域研究的心得, 同时也融入了对研究历史的回顾, 和当前研究的新进展。全书由刘卫国统稿, 其中第一章至第五章由刘卫国执笔, 第六章至第八章由金娜执笔。

本书的完成, 得到了中国科学院院士姚熹教授的支持、鼓励和指导, 在此表示诚挚的谢意。

作者

目 录

第一章 热探测器发展简史	1
参考文献	9
第二章 热探测原理	13
2.1 热辐射及热探测器基本概念	13
2.1.1 热辐射概念	13
2.1.2 热探测器的基本参数	15
2.2 热探测器的基本结构	17
2.3 测辐射热计原理	19
2.3.1 偏置效应	22
2.3.2 测辐射热计的噪声	26
2.3.3 限制测辐射热计性能的主要因素	38
2.4 热释电探测原理	40
2.4.1 铁电材料的热释电性质	41
2.4.2 热释电探测模式	51
2.4.3 热释电响应	53
2.4.4 热释电探测器的噪声	57
2.4.5 实际热释电探测器	62
参考文献	71
第三章 热探测材料	73
3.1 测辐射热计材料	73
3.1.1 材料选择依据	73
3.1.2 常用的测辐射热计材料	75
3.2 热释电材料	97

3.2.1	热释电材料选择的依据	97
3.2.2	常用热释电薄膜材料	106
	参考文献	141
第四章	热探测薄膜制备技术	156
4.1	薄膜制备的基本方法	156
4.1.1	常用薄膜沉积方法	159
4.1.2	薄膜的生长过程	171
4.1.3	衬底	178
4.1.4	其它薄膜沉积技术	182
4.2	电阻薄膜的沉积	182
4.2.1	α -Si:H	182
4.2.2	VO_x 薄膜的制备	186
4.2.3	非晶 YBCO 薄膜	188
4.3	铁电薄膜的制备	189
4.3.1	化学溶液法	190
4.3.2	溅射	199
4.3.3	MOCVD	209
4.3.4	脉冲激光沉积技术(PLD)	217
	参考文献	220
第五章	热探测器的基本结构与集成制造	236
5.1	热探测器的基本结构	236
5.1.1	常见结构:带支撑层结构	236
5.1.2	自支撑结构	239
5.1.3	绝热层结构	241
5.2	热探测器常用结构的设计	243
5.2.1	力学设计	243
5.2.2	热学设计	246
5.2.3	红外吸收结构	250
5.3	常见热探测器结构的集成制造	256
5.3.1	常用微加工技术	256

5.3.2	单片集成热探测器	272
5.3.3	混合集成热探测器阵列	277
5.3.4	热探测器阵列的封装	279
	参考文献	283
第六章	热探测器阵列的信号处理	290
6.1	测辐射热计	290
6.1.1	偏置条件	290
6.1.2	信号读出电路	291
6.2	热释电探测	305
6.2.1	信号前置放大	305
6.2.2	信号读出电路	308
6.3	信号选通和转换	312
6.3.1	选通开关	312
6.3.2	模数转换 ADC	313
6.4	系统电路的构成和设计	316
6.4.1	典型系统电路构成	316
6.4.2	系统设计流程	319
6.5	辐射调制技术	322
	参考文献	328
第七章	热探测器阵列与系统性能测试	332
7.1	薄膜性能的测试	332
7.1.1	电阻特性	332
7.1.2	介电特性	334
7.1.3	应力测试	339
7.1.4	热学性质	340
7.1.5	光学测试	349
7.2	热探测单元及阵列性能的测试	350
7.2.1	响应度测试	352
7.2.2	噪声测试	353
7.2.3	MTF	355

7.3 热成像系统的性能测试	357
7.3.1 系统主要参数的测试	358
7.3.2 热成像系统的自动测试	370
参考文献	373
第八章 新型热探测技术与热成像系统的典型应用	378
8.1 新型热探测材料与技术	378
8.1.1 热光效应	378
8.1.2 光机非制冷成像	380
8.1.3 石英振荡器阵列	382
8.1.4 新型热探测材料	383
8.2 热成像探测系统的典型应用	386
8.2.1 系统选择依据	386
8.2.2 非制冷热成像系统的典型应用	389
参考文献	393

第一章 热探测器发展简史

集成电路制造技术的发展,为集成非制冷热探测器的发展提供了条件。热探测器种类繁多,按照目前发展的状况,适于集成制造的阵列探测器主要有三类:测辐射热计、热释电探测器及热电探测器。其中前两类最受研究者的关注,前景也最为明朗,本书仅围绕这两类探测器加以讨论。

热探测器的研究历史可以上溯到 2000 年前^[1,2],那时就有了关于热释电效应的记录,但是真正将这一效应用于热探测器,特别是用于热成像探测,则是在 20 世纪 60 年代^[3~5]。将测辐射热计用于热目标探测的成功尝试,是在 20 世纪初。Langley 于 1901 年演示了用铂条制成的测辐射热计,可以探测到 400m 以外的奶牛。在经历了材料、理论及器件的一系列发展之后,热探测器达到了日臻完善的阶段。

具有实用价值的热释电材料的种类并不广泛,研究对象主要集中在两类材料上:一是正常热释电体;另一类是介电测辐射热计型热释电材料。前者通常利用的是材料在远离铁电相变温度区域内极化随温度的变化;后者则利用材料在相变温区附近极化随温度及外场的强烈变化。虽然在相变温区,自发极化随温度的变化会产生很大的热释电响应,但环境温度的微小起伏也会带来很大的温度起伏噪声,抵消了由此获得的益处。而在偏压下,诱导热释电效应可以在保持同样的温度起伏噪声的条件下,产生更大的热释电响应,因而介电测辐射热计型热释电材料成为高性能热释电探测的首选。在正常热释电效应和偏压热释电效应的研究过程中,有几项值得特别提出的成果。1956 年,Chynoweth 利用辐射

调制方法研究钛酸钡的动态热释电响应^[6],这一方法为研究材料极化的温度特性提供了重要实验手段,为利用热释电效应实现热成像探测提供了基础。同年,Mathias 利用 TGS 制成了实用的热释电探测器,使得此类材料在随后的很长一段时间内成为研究重点,并于 1969 年用于热成像探测。1961 年,Hanel 首次揭示了介电测辐射热计效应,这在当时并不是一个引起很大重视的工作,但随后在对钽铌酸铅(PST)/钛酸锶钡(BST)类相变型热释电材料的深入研究之后,一种新的探测机制建立起来了^[5,7]。

对典型热释电材料研究的深入,伴随着铁电理论和热释电探测理论的发展和完善。虽然在热释电现象的理论研究方面还有许多未知的领域,但是热释电探测原理已经在热力学分析的基础上很好地建立起来了。1970 年 Putley 全面总结和阐述了热释电探测器的工作原理及热探测器的理论探测极限^[8]。在此基础上,他还演示了具有接近探测极限性能的单元探测器,为设计和制造具有极限探测性能的探测器建立了基本原则。1978 年 Liu 等全面总结了热释电材料与器件的发展,指明了探测器设计中材料选择的依据,通过对材料优值的对比,指明了具有正常热释电效应的材料的局限^[9]。1986 年,Whatmore 再次全面总结了热释电探测器的原理、材料选择、器件设计及应用,较系统地提出了介电测辐射热计效应的应用^[3],对器件设计、制造中的一些关键因素作了简要的总结。随后,Kulwick^[10]、Muralt^[11,12]等又对随后的研究进展作了总结。这些理论和总结,基本上完整地勾画出了热释电探测在理论、材料及器件诸方面的发展状况。

热释电成像探测的真正障碍,在于高性能材料的制备及器件的集成制造技术两个方面。早期的材料制备方法,只适于块状陶瓷或单晶材料,薄膜制备手段的局限,使成像探测器件的研究停滞不前,许多性能优异的材料如 PST 等无法得到应用,没有解决的关键问题是:薄膜材料无法表现出与块体材料相当的性能;薄膜制备方法不适于集成器件的制造。最早对集成制造的尝试围绕 TGS 外延单晶、PVDF 及减薄单晶等,无法适应高性能器件的要

求,只有 PVDF 在一些低性能阵列中得到应用^[13,14]。1969 年, Tompsett 在提出热释电摄像管概念的同时,首次提出具有绝热结构及用场效应管寻址的热成像集成器件的概念。但是由于材料制备和器件制造技术的限制,真正具有集成制造思想的阵列器件的尝试,是 Okuyama 等于 1981 年进行的^[15],虽然当时利用溅射外延方法制备的钛酸铅在性能上并不理想,但薄膜沉积结合微加工技术的思想被广泛采用。随后,对集成器件性能影响很大的薄膜沉积技术经历了迅速的发展。溅射、MOCVD、PLD 等方法得到应用,但是均没有像溶胶-凝胶技术那样被广泛采用,这一技术本身并不是器件集成制造的理想方法,但是它以设备简单、成本低廉等特点,大大降低了薄膜制备的难度,使铁电薄膜研究进入了一个迅猛发展的阶段,多种材料的薄膜化及新材料的研究成为可能。更多的薄膜沉积技术在开发当中,其中 MOCVD 方法是可以预见的有效方法。

成像探测器件的制造也经历了一些有代表性的发展阶段。最早的成功实例是热释电摄像管,仅在 TGS 类材料中取得成功,其性能指标并不突出,性能改进空间很小,应用受到限制,研究也陷于停顿。随后,TI(现并入雷神公司)和 Plessey 独立发展出混合集成热释电探测阵列,在经历一系列发展完善后,器件性能迅速达到相当高的水平,尤其是 TI 研制的阵列,采用了工作于介电测辐射热计模式的 BST 陶瓷,性能优于 Plessey(随后改名为 GEC-Marconi, 现并入 BAE 系统公司)采用正常热释电材料 PZT 陶瓷的阵列。这两种器件均不能采用标准硅集成工艺制造,因而成本高、性能提高空间小。热释电材料的薄膜化及器件制造的集成化成为发展的必然。到 20 世纪 90 年代初,测辐射热计集成器件取得的出乎意料的进展,为热释电探测阵列的集成制造提供了新思路。

Polla 等曾就热释电成像器件的单片集成制造进行过尝试^[16~18],但器件性能离实用还有很大一段距离。测辐射热计集成器件所积累的设计和制造经验,为完善和提高热释电探测器性能

提供了有益的经验。热释电探测器集成制造的另外一个契机是微机电系统和硅微加工技术的迅速发展和成熟,设计和制造出多种具有优良热学特性的器件结构。热释电探测阵列的集成制造问题,变为如何有效发挥薄膜热释电材料的性能,及如何实现其与各类微结构的有机结合,即仍然归结为薄膜制备和器件制造技术问题,但是已经被赋予新的意义。

在整个 20 世纪 90 年代,热成像探测研究的重点都是围绕着测辐射热计阵列,由此发展出了多种有效的器件微结构。由于热释电材料制备过程与微加工过程,特别是硅集成制造过程的兼容性问题始终没有解决,对热释电探测阵列的研究进展缓慢。研究重点是在采用与测辐射热计类似的结构和制造工艺的情况下,如何保证微结构的实现,其中热释电薄膜的制备过程与标准硅工艺的兼容性最为重要,必须在低温(470°C)下实现高性能薄膜的沉积。BAE 的研究小组围绕 PST 和 PZT 薄膜的沉积,发展出两条不同的工艺路线^[19~21]:一是尝试在低于 470°C 的温度下沉积 PZT 薄膜,实现与硅信号处理电路的直接集成;二是在过渡基片上沉积 PST,随后再将此过渡基片与硅信号处理电路混合集成,这是基于陶瓷混合集成阵列制造技术的成功经验提出的折衷方案,可以避免热释电薄膜高温沉积对硅信号处理电路的影响。在与 Raytheon 合并后,TI 的红外探测器分部也开始了单片集成热释电探测器阵列的研究。通过铁电薄膜的材料的低温沉积^[22],直接利用混合集成阵列的信号处理电路作信号处理,验证了单片集成的可行性^[23,24]。这些突破性进展,为实现热释电成像探测器的集成制造创造了条件,并再次验证了热释电材料是实现热成像探测的一类重要材料。

在热释电材料和器件研究过程中还取得了其它一些较为重要的成果,其中值得特别提出的有两个:1995 年前后,西安交通大学的研究小组和美国 Ruffner 等独立地提出了利用多孔二氧化硅薄膜为绝热层,改善热释电探测器低频响应的器件方案^[25~27]。西安交通大学在国家 863 计划资助下,完成了 64×1 阵列的制造;

Ruffner 等则验证了这一方案与硅集成制造的兼容性。引入绝热层的概念早在制造 PVDF 阵列时就已经采用,在无机体系中引入多孔绝热层,是一个新的尝试,但仍面临许多技术难点,器件性能的提高受到许多限制。另外一个重要的结果是在 PST 薄膜中取得的,Fullyigin 等^[28]在 2001 年获得了具有自支撑结构的 PST 薄膜,这一结果可以与 BAE 的混合集成概念结合,实现薄膜与硅信号处理电路的混合集成,同时实现热绝缘。围绕器件结构和薄膜制备及性能研究所取得的一系列成果,为最终获得与测辐射热计阵列性能相当,甚至更优的热释电探测器阵列创造了条件。

热释电成像探测阵列的最佳性能指标,都是在 TI 的研究方案中获得的。利用混合集成陶瓷热释电 245×328 阵列的 NETD 达 0.047K ,而初步演示的同等规模热释电薄膜阵列器件的 NETD 达 0.2K 。研究的重点将沿着优化薄膜制备方法及薄膜性能、改善器件热学性能、提高信号读出电路性能的方向展开。

早期的测辐射热计热探测研究都是围绕辐射计量开展的,将其用于成像探测是近年来的事情^[5]。Putley 于 1966 年全面描述了薄膜电阻测辐射热计的热探测原理,建立了响应度和噪声极限的理论模型。直到 1979 年,测辐射热计热探测器由于尺寸大 (1mm) 而无法制成阵列。1978 年,Johnson 提出了利用硅的各向异性微加工,制备氮化硅薄膜微桥结构用于热探测器的绝热结构;1979 年 Johnson 与 Higashi 验证了这一设想。随后, Kruse 于 1982 年从理论上证明了具有良好绝热结构的探测器可以达到探测极限,他的预测于同年被 Arch 和 Heisler 证明。1983 年, Wood 演示了阵列制造的可能性。1981 年—1992 年,在美国政府资助下, Honeywell 公司开展了全面的秘密研究,直到 1992 年,研究全面完成后,才将有关技术公开^[5]。采用微加工技术制造具有微桥绝热结构的阵列器件所取得的巨大成功,引起了研究者的极大关注,直至今日,仍是主流的研究方向,并扩展到热释电探测阵列的研究中。

测辐射热计阵列的成功,依赖的是两方面的技术:一是优良的

薄膜材料,二是器件的单片集成制造技术。在薄膜材料方面,由于氧化钒薄膜的成功利用,极大地促进了器件性能的提高。氧化钒在其半导体-金属相变温区表现出极大的电阻-温度系数,即使在接近相变温度的半导体相,也表现出很高的电阻温度系数($>2\%/K$),使其成为理想的选择之一。目前氧化钒薄膜的沉积多采用溅射方法。由于金属固有的高电阻温度系数,在测辐射热计阵列中也得到应用。与氧化钒相比,钛、铂等薄膜的电阻温度系数较低(约 0.4%),但噪声水平也较低,仍不失为较好的选择。除了氧化钒薄膜,还有许多其它材料表现出很高的电阻温度系数,如已经得到应用的氢化非晶硅、非晶超导氧化物及巨磁阻材料等。这些材料存在的共同问题是伴随着高电阻温度系数的同时,表现出较高的噪声,在很大程度上抵消了高电阻温度系数带来的益处,但是仍然表现出很大的性能改进空间。寻找同时具有高电阻温度系数及低噪声特性的薄膜材料是当前研究的重点。

自1992年技术解密后,对测辐射热计的研究经历了迅速发展的阶段。通过技术许可证方式,相关技术被广泛用到热成像产品中。目前采用的微加工技术与1992年没有根本的区别,仍然为悬空的微桥结构。为了提高器件的填充因子,尝试了双层悬空结构^[29,30]。器件微结构的制造通常采用牺牲层的表面加工技术。由于氧化钒等薄膜的沉积温度较低,可以在制有硅信号处理电路的芯片上直接沉积敏感薄膜。为了提高器件的热响应速度,希望每个器件单元具有较小的热质量和较小的热导损耗。但是通过减小单元器件的几何尺寸来改善热性能,遇到了机械质量下降的问题,同时过小的几何尺寸也受到光刻加工所允许的最小尺寸限制。通常微结构采用氮化硅为机械载体,因而高机械强度低应力的氮化硅薄膜的制备是一个技术关键。在氮化硅支撑结构中,氮化硅对整个器件贡献的是无效热质量。为了克服这一不足,法国 Sofradir 公司采用自支撑非晶硅为敏感薄膜,重点解决了其电阻稳定性问题,器件性能与氧化钒相当,使得非晶硅成为重要的测辐射热计材料^[31,32]。

除了氧化钒和非晶硅薄膜,目前受到关注的薄膜材料还有超导氧化物和硅锆合金^[33,34]。在氧化物高温超导体出现的时候,就有尝试将其用作测辐射热计。在相变温度附近,超导材料表现出极大的电阻温度系数。但是进一步的研究发现,器件自身温度的微小变化,会给工作在相变温度附近的器件造成很大的温度起伏噪声,实际获得的信噪比远低于预期值,另外,此温区的电阻温度系数为正值,辐射响应的动态范围受到限制。同时,器件需要工作在一个恒定的低温,抵消了非制冷器件的优点。近来的研究发现,非晶超导氧化物薄膜在室温附近表现出较高的电阻温度系数(约8%),存在的问题是薄膜有较高的 $1/f$ 噪声。自支撑的非晶超导薄膜结构已经制备出来,薄膜可以在室温下用溅射法制备,与硅集成工艺兼容。如果能够进一步降低噪声,不失为好的选择。但是这类材料固有的缺点,是材料复杂的组份及微观结构为保证材料性能的一致性带来了困难。另外一类十分具有价值的材料是硅锆合金。利用改变硅锆合金组分,可以调节材料性能,因而可以获得较高的电阻温度系数;通过对噪声特性的深入研究,有希望发展出一类新的测辐射热计薄膜材料。目前已经制备出具有折边结构的超薄自支撑硅锆薄膜器件^[35,36],前景诱人。这类材料的优点之一是可以利用硅工艺中广泛使用的化学气相沉积方法获得,有利于批量制造。

虽然测辐射热计热成像探测器件的研究历史较短,但是其发展速度惊人。它首先演示了具有实用性能的非制冷热成像探测器件的可行性,并迅速被应用到多种成像系统中。早期 320×240 阵列的NETD即达到 0.05K ,典型的单元尺寸为 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$,填充因子大于80%,单元器件探测度达到 $1 \times 10^9 \text{CmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。目前正在致力发展 640×480 阵列^[37],目标NETD为 0.005K ,单元尺寸 $< 25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$,器件综合性能将趋近理论极限。

测辐射热计探测器的信号提取具有特殊性。最基本的方法是采用电桥结构,通过对每个单元施加偏置电流来读取响应电流。这种方式带来了两方面的问题:一是增加了读出电路的复杂度;二

是偏置电流造成电阻薄膜的“自热”效应,产生额外的热起伏噪声。其中降低自热效应与提高器件的响应幅度及速度是矛盾的要求,快速热响应意味着更好的绝热效果和更小的热质量,此时自热效应会变得更加显著,这为进一步减小器件尺寸附加了限制。因此,在信号读出电路设计中,偏置的施加方式是一个重要的考虑因素。目前偏置的施加已经由连续方式改变为脉冲方式,减小偏置也是降低功耗的重要因素。对测辐射热计材料的基本要求可以归纳为:低热质量、高机械强度、高阻抗、低噪声。对于氧化钒、非晶硅等材料,高阻抗往往意味着高噪声,所以对于新材料的研究显得十分迫切。

与热释电探测器相比,测辐射热计模式的器件具有不需要辐射调制器、可以对辐射作绝对测量等优点,但是需要偏置是其最大弱点。

在热探测器设计技术方面也经历了较快的发展。用解析手段设计热探测器已经取得了成功,发展出一系列的探测理论和设计方法。在微桥结构得到应用以后,设计工作主要围绕三个方面进行:一是器件的热学设计,即如何减小器件的热响应时间,并保证响应幅度;二是器件的力学设计,在保证热学特性的同时,微结构要具有良好的机械特性;三是器件的热辐射吸收能力,在单元结构尺寸日趋减小的情况下,许多吸收结构已经无法利用^[38],成为限制器件性能提高的因素之一。

用解析方法已经可以很好地预测探测器的响应特性。Eriksson作了很好的总结^[39]。而数值分析手段的引入,特别是围绕MEMS技术发展出的数值分析手段,可以将设计与工艺过程结合起来。由于微桥为薄壳结构,其力学设计是一个较为复杂的问题。MEMS技术的发展,提供了许多可以借鉴的手段。

为了提高器件的辐射吸收能力,最早采用的是涂黑的方法,但只适于块体材料制成的器件。在薄膜化以后,最多得到利用的有两种方法:一是薄金属吸收层的方法^[40,41];另一个是共振吸收腔的方法^[42,43]。但是这些方法或多或少都增加了器件的无效热质