

编 号: (79)020

内 部

出国参观考察报告

法 国 红 外 技 术

科学技术文献出版社



出国参观考察报告

法国红外技术

(内部发行)

编辑者：中国科学技术情报研究所

出版者：科学技术文献出版社

印刷者：中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：2¹/₂ 字数：64千字

1979年12月北京第一版第一次印刷

印数：1—7,150册

科技新书目：143—28

统一书号：17176·226 定价：0.40元

目 录

I. 概况	(1)
II. 参观考察单位介绍	(3)
III. 法国的远红外光谱技术	(7)
(一) 远红外光栅光谱仪	(7)
(二) 远红外扫描法布里—珀罗干涉仪	(9)
(三) 选择调幅干涉光谱仪	(12)
(四) 富里叶变换光谱仪 (或称调频干涉光谱仪)	(14)
IV. 基于受激拉曼散射原理的可调红外辐射源	(19)
(一) 染料激光系统概述	(19)
(二) 基于受激拉曼散射过程的频率转换	(21)
(三) 共振增强的受激拉曼散射	(24)
V. 亚毫米波回旋共振实验	(26)
VI. 法国的远红外探测器件	(29)
(一) 锗掺杂测辐射计	(29)
(二) 热释电红外探测器	(31)
(三) 砷化镓 GaAs 肖脱基势垒二极管	(32)
VII. 法国碲镉汞的研究概况	(34)
(一) 碲镉汞晶体的制备	(34)
(二) 碲镉汞红外探测器	(38)
(三) 碲镉汞晶体的物理研究	(39)

法 国 红 外 技 术

中国科学院技术物理考察组

根据中国科学院和法国国立科研中心的科技合作与交流协议,中国科学院技术物理考察组于1978年11月29日至12月20日赴法参观考察。考察组在法国期间,先后参观了巴黎、里尔、马赛和南锡等地的光学和固体物理研究单位共十二个,法国科学工作者在开拓远红外谱区的研究以及有关窄带半导体碲镉汞材料的系统研究给我们留下了深刻的印象。

I. 概 况

远红外谱区的开拓研究是红外物理学发展的前沿领域。七十年代以来,远红外干涉光谱技术的普遍应用、光泵远红外分子激光器问世和非线性红外产生研究所取得的积极成果,有力地推动了远红外谱区物理研究进入新的发展阶段,并带来若干重要的应用。近年来,在常规微波技术发展的基础上,回旋管(gyrottron)实现了兆瓦级的毫米波脉冲功率输出,相对论性电子注辐射源研究也有明显进展,这些都引起了各国科学工作者的密切关注,准光学的微波研究手段日益深入地应用于远红外研究工作中。

法国历来重视远红外研究工作。五十年代以来,法国科学工作者曾多次主持召开干涉光谱学研究的国际科学讨论会,系统提出了有关的科学理论基础,为创立付里叶变换光谱技术以及发展这一技术在整个红外谱区的应用作出了巨大的贡献⁽¹⁻⁴⁾。目前,法国国立科研中心AIME COTTON实验室多年精心设计制作的第三代付里叶变换光谱仪器已经完全实用,光谱分辨率达 10^{-3} 厘米⁻¹(在10微米波段处),已接近于分子光谱的多普勒极限水平⁽⁵⁾,更先进的第四代付里叶变换光谱仪器也将研制成功。巴黎第十一大学红外实验室以常规色散元件(衍射光栅)替代干涉光谱仪中的平面反射镜,发展了综合两者优点的选择调幅干涉光谱仪(SISAM),10微米处的光谱分辨率已达0.011厘米⁻¹为国际最优水平⁽⁶⁾。红外干涉光谱学的发展及其在宽谱弱能远红外光谱测量中所显示的优越性,不仅有力推动远红外研究早期发展,至今仍有重要的实用意义。

在进一步发展光泵远红外分子激光器的同时,探索基于非线性光学原理的可调远红外辐射源和利用微波方法发展可供实用的亚毫米波辐射源,是法国科学工作者引人注目的研究方向。巴黎工艺学校量子光学实验室基于对典型的气态和液态分子内部能量传递的全面研究,使用红宝石激光泵浦的染料激光器作为激励源,通过氢分子和液氮分子的拉曼散射过程以及氯化氢、氟化氢介质中Q(J)跃迁的共振增强受激拉曼过程,已经获得了0.72—7.7微米兆瓦级功率、波长达16微米毫焦耳能量以及256微米千瓦级功率输出的可调红外辐射源,在非线形红外产生研究方面迈进了一步⁽⁷⁻¹⁰⁾。法国Thomson-CSF公司生产的返波管,其最短输出波长为0.4毫米,功率3毫瓦,已成功应用于固体毫米波谐振实验中⁽¹¹⁻¹²⁾。巴黎工艺学校电离介质实验室还正在进行相对论性电子注前沿的多普勒频移实验研究,以期获得高能量的亚毫米波辐射⁽¹³⁾。

D587/21

在远红外辐射的探测接收方面,法国科学工作者在热释电探测器和热释电摄像管研究方面颇具特色。南锡大学A. Hadni教授曾对热释电探测器作过系统的理论分析^[14],在他的指导下,该校远红外实验室在各类衬底材料上进行准单晶薄膜外延生长和微滴生长工艺研究,以制取优质热释电探测材料^[15-16]。法国Thomson-CSF公司在国际上首创热释电靶面摄像管已达300电视线温度分辨率0.2°C的优良性能,应用于热辐射观测以及CO₂激光(10.6微米)、HCN激光(337微米)的实验研究方面^[17]。此外,法国电子学和应用物理实验室、巴黎第十一大学基础电子学研究所分别在GaAs肖脱基势垒二极管和约瑟夫森自谐振混频器研究方面也正在积极开展工作^[18-19]。

法国正在致力于远红外技术的科学应用研究,特别是在原子、分子、固体物理研究,地球大气和天文观测,等离子体等方面,都有一些国际先进水平的成果。AIME COTTON实验室使用第三代付里叶变换光谱仪,获得了量子数达100以上的里德伯能态精细结构研究,在国际上首次获得了钫(Fr)原子的精细光谱;巴黎第十一红外实验室已测定了上千种分子(包括双原子分子、线性分子、对称分子、非对称陀螺分子、球形对称陀螺分子)的精细光谱,其中有相当一部分工作是配合国际星际物质考察而进行的。南锡大学远红外实验室以有机聚合物和掺稀土杂质的CaF₂、SrF₂晶体为主要对象,开展远红外光谱测量分析研究,直接为探明固体中晶格振动、电子跃迁和相变规律提供有力依据^[20-23]。在窄带半导体碲镉汞研究方面,法国科学工作者做了大量的工作,取得了卓有成效的研究成果。法国国立研究中心Meudon-Bellevue固体物理实验室除了进行碲镉汞晶体生长最佳工艺探索外,还与法国SAT公司合作研制性能优良的碲镉汞单元和列阵探测器^[24-25]。有关窄带半导体碲镉汞晶体中电子输运过程和磁光特性等基础研究工作,也分别正在Meudon-Bellevue固体物理实验室和巴黎第七大学固体物理实验室中进行^[26-27]。法国原子能研究中心所属的Fontenay-Aux-Roses受控聚变和等离子物理实验室使用八通道337微米Mach-Zender型干涉仪,成功地测定了托卡马克装置中的电子密度分布,其水平国际领先^[28]。

根据参观考察的实际收获,在本报告的第二、第三至第七部分中将分别概述参观考察单位简况及法国远红外技术基础和窄带半导体碲镉汞研究的概况。

参 考 资 料

- (1) Proc. of CNRS Bellevue Colloquium《Le Journal de Physique et le Radium》v.19 (1958)
 - (2) Proc. of Second Conf. on FTS. (Licge, Belgium)《Journal de Physique Colloque, C2, Supplement au no. 3-4》v. 28 (1967)
 - (3) Proc. of the Conf. on FTS (Aspen, Colorado)《AFCRL-71-0019 1971/1/5 Special Report №114》
 - (4) J. Connes:《Rev. Opt》v. 40, p. 45, 116, 171, 231 (1961)
 - (5) G. Guelachvili,《Applied Optics》v. 17. N. 9 p. 1322-26 (1978)
 - (6) G. Guelachvili,《Applied Optics》v. 16 p. 2097 (1977)
 - (7) M. Bierry, R. Frey, F. Pradere《Review of Scientific Instruments》v. 48, N3. p. 733 (1977)
 - (8) R. Frey, F. Pradere, J. Lukasik, J. Ducuing《Optics Communications》v. 22. N. 3. p. 355 (1977)
 - (9) R. Frey, F. Pradere, J. Ducuing《Optics Communications》v. 23. N.1. p. 65 (1977)
 - (10) De Martine, R. Frey, F. Pradere《Optics Communications》v. 27. N.2. p. 262 (1978)
- (下接第6页)

II. 参 观 考 察 单 位 介 绍

考察组在法国期间先后参观了巴黎、里尔，马赛和南锡等地区的光学和固体物理研究单位，这些单位的基本情况简要列于表 1：

表 1

序 号	单 位 名 称	学术领导人	主要接待人员	主 要 工 作 内 容
1.	AIME COTTON实验室 (Lab. AIME COTTON Bâtiment 505-CNRSII-Campus. 91405 ORSAY)	P. Jacquinet (prof.)	S. Liberman (Dr.)	1. 干涉光谱技术，第三代、第四代付里叶变换光谱仪，选择调幅干涉光谱仪等。 2. 激光光谱学，研究辐射与物质的相互作用，内容涉及跃迁、电离以及n高达100的里德伯能态。 3. 原子光谱精细结构研究，分析精度达 10^{-15} 克，首次报导 ^{87}Fr 的研究结果。
2.	巴黎第十一大学红外实验室 (Lab. d'infrarouge Univ. de Paris XI Bâtiment 350—91405 ORSAY)	G. Granner (Dr)	G. Guelachvili C. Rossetti M. Sergeant-Rozey	1. 甚高分辨率红外光谱学：付里叶变换光谱仪及选择调幅干涉光谱仪。 2. 分子红外光谱研究，以双原子分子、线性分子、对称陀螺分子、非对称陀螺分子、球形对称陀螺分子为研究对象，并分析加压对分子光谱的影响。 3. 分子激光器及激光斯塔克光谱仪。
3.	巴黎工艺学校量子光学实验室 (Lab. d'Optique quantique Ecole polytechnique Route de Saclay, 91120 Palaiseau)	J. Ducuing (prof.)	F. Pradère R. Frey J. P. Hermann D. Richard	1. 基于受激拉曼散射原理的可调红外源。 2. 非线性光学理论。 3. 简单分子中的能量转换研究。 4. 激光参与的分子碰撞过程研究。 5. 双稳态光学现象及有关器件研究。
4.	南锡大学远红外实验室 (Lab. d. infrarouge lointain. Univ. de Nancy I)	A. Hadni (prof.)		1. 固体的远红外光谱研究。重点探索有机材料和稀土掺杂氟化物晶体的声子吸收、晶格振动模式、磁场作用下的电子跃迁以

续表 1—1

序号	单 位 名 称	学术领导人	主要接待人员	主 要 工 作 内 容
	54000 Nancy)			及相变规律。 2. 远红外分子激光器。 3. 热释电探测材料及其远红外应用研究。
5.	Meudon-Bellevue 固体物理实验室 (Lab. de Physique des Solides du CNRS à Meudon-Bellevue. 1, Place Aristide Briand 92190 Meudon-Bellevue)	Y. Marfaing	C. Verie R. Tri-boulet G. Cohen-Solal	1. 窄带半导体: 零隙跃迁、共振受主能级、能带结构对载流子复合的影响。 2. 磁性半导体, 简并掺杂半导体 (Mott 转变): 非直接交换对磁性半导体磁学、光学和输运性质的影响; Mott 转变的热力学描述与有关现象。 3. 发光材料: 合金的溶液生长、稀土化合物异质结的复合辐射性质。 4. 杂质与缺陷: II-VI 族化合物生长, 原子扩散、杂质缺陷复合体。 5. 太阳能电池, 光伏效应: 渐变能隙结构化合物的外延生长; 光伏效应。 6. 其他: 电子学; 材料特性鉴定。
6.	航空局 (Service d'aéronomie du CNRS.	J. Blamont	G. Chagnin J. P. Torre	发展星载, 球载与火箭运载红外技术 (迈克尔逊干涉仪、扫描法布里-珀罗干涉仪、球载 H_2 低温恒温器等) 及其在地球大气和行星观测中的应用。
7.	里尔大学微波和半导体研究中心 (Lab. d'Hyperfréquence et Semiconducteur de l'Université de Lille I -Bât. P3-UER-IEEA-59650 VILLE-NEUVE D'ASQ)	E. Constant (prof.)	Y. Leroy (prof.)	1. 介质和半导体材料的微波性质。 2. 微波及半导体器件: 雪崩二极管、耿氏二极管厘米波段场效应晶体管等。 3. 微波电路研究, 包括厘米波、毫米波的测量电路。 4. 仪器及应用, 诸如毫米波频段的测温技术及其医学应用。
8.	巴黎第六大学固体物理实验室 (Lab. de Physique des	M. Balkanski	J. M. Besson	1. 以半导体材料锗, 硅和若干薄层材料为对象, 研究固体中

续表 1—2

序号	单 位 名 称	学术领导人	主要接待人员	主 要 工 作 内 容
	Solides de l'Université de Paris VI. -Tour 13-4, Place Jussieco 75230 Paris Cedex 05)	(prof) .		的元激发现象。实验方法为低温、高压条件下测定固体的吸收光谱。工作波段为紫外、可见、近红外范围。 2. 基于拉曼散射效应的可调激光研究。 3. 观测拉曼散射效应, 分析化合物材料(磁性半导体、GaAlAs、Si及ZnS中掺Cr、Mn、Te、Co、Ni)中的各种振动模式, 研究激光退火促使无定形Si在Si注入后的晶化过程。
9.	巴黎第七大学固体物理实验室 (Groupe de Physique des Solides de l'Ecole Normale Supérieure-Tour 23-Couloir 2324-2^e étage Univ. de Paris VII 2. Place Jussieu-75221 Paris)	M. Hulin(prof.)	M. Sc-hott C. Benoit a la Guillaume P. Goy C. Rigaux	1. 应用磁光、回旋共振方法研究窄带半导体 HgCdTe 的能带结构。 2. 复合辐射现象的研究, 包括高强度激子、Ge 和 Si 中的电子空穴滴、CuCl 双激子。 3. 辐照损伤研究, 缺陷和深缺陷。 4. 分子晶体研究, 包括聚合物中激子与激子的相互作用, 碱金属中电子-声子的相互作用(费米面的高里德伯态等)。 5. 表面物理: 近表面处的原子输运, 核子微分析、氧化与钝化, 金属洁净表面研究等。 6. 超导、非弹性隧道过程。 7. 应用物理、表面声波研究。 8. 超流、液氮与固氮。 9. 无序系统, 玻璃中的复合, Ge 和 Si 的结晶过程等。 10. 声子脉冲。
10.	巴黎第十一大学固体物理实验室 (Lab. de Physique des Solides de l'Univ. de Paris XI. -Bât. 510. 91405 ORS-AY).	G. Du-rand	R. Cas-taing Colliex	1. 有关电子能态、能带结构、磁性现象及临界条件下物理现象的理论研究。 2. 晶体结构研究, 以中子衍射、x 线衍射为主要研究手段。 3. 固体的电子性质研究, 包

续表 1—3

序号	单 位 名 称	学术领导人	主要接待人员	主 要 工 作 内 容
				括电阻率、超导性、核磁共振、磁性现象等,以金属及无定形材料为主要研究对象。 4. 以电子探测和离子探测为研究手段,进行固体材料基本特性分析。 5. 开展物理化学综合分析研究,探索新材料。
11.	圣一日耳曼科学中心材料科学部晶体生长机理研究室 (Centre de Recherche sur les mécanismes de la croissance Cristalline, -Univ. de Provence Centre de St. Jérôme-Rue Henri Poincaré-13397 MARSEILLE)	R. KE-RN (prof.)		1. 矿物结晶研究:面心立方金属(Au, Ag, Al)和碱性卤化物系统,以及Ti,Ge在GaAs上的外延研究。 2. 界面研究:金属(Al,Ti)再结晶和表面成核研究。 3. 场致发射研究,发展场致发射显微镜,直接研究晶体表面原子现象。 4. X射线和中子衍射方法,研究晶体结构。
12.	圣一日耳曼科学中心光电实验室 (Lab. de Photoelectricite, -Univ. de Provence. Centre de St. Jérôme-Rue Henri Poincaré 13397 MARSEILLE)	S. Martinuzzi (prof.)		光伏现象研究,包括应用Sp-ray工艺制备薄层Cds-Cu ₂ S光电堆的光伏效应机理、界面和深陷阱中心的传导过程、CdS薄层再结晶影响、氢气中退火的CdS薄层的电学和光电性质研究等。

(上接第2页)

- (11) R. Carin, P. Goy, W. M. MacInnes《J. Phys. F: Metal Phys.》v. 8. N. 11 (1978)
- (12) P. Goy《J. de Phys., Colloque C2, Supplément au n°6, Tome 39》p. C2-222-C2-230 (1978)
- (13) J. M. Buzzi, H. J. Döurel《IEEE Trans. on MTT》v. MTT-25, N.6. p. 559(1977)
- (14) A. Hadni《Submillimeter Waves》p. 251 (Polytechnic Press. N. Y. 1971)
- (15) A. Hadni, R. Thomas, C. Erhard《Proc. of the Second Int'l Conf. and winter school on Submillimeter waves and their applications. San Juan, Puerto Rico, 6-11, Dec. 1976》p. 59.
- (16) A. Hadni, R. Thomas, C. Erhard《Phys. Statu Solidi A》v. 39. N2. p. 419-24 (1977)
- (17) J. Mangin et al《Optics and Laser Technology》Apr. 1976. p. 75-80
- (18) P. Hørrop et al《Proc. of 8th European Microwave Conf. 》p. 696. (1978)
- (19) G. Vernet, J. C. Henaux《IEEE Trans. on MTT》v. MTT.-25, p. 473 (1977)
- (20) F. Brehat, B. Wyncke, A. Hadni《J. Phys.》v. 37. N. 10. p. 1241-3 (1976)
- (21) F. Brehat, J. Claudel, P. Strimer, A. Hadni《J. Phys. Lett.》v. 37. N. 9. .

- p. L229—31 (1976)
- (22) G. Villermain-Lecolier, G. Morlot, A. Hadni et al. 《Phys. Rev. B》v. 15, N. 1 p. 130—6 (1977)
- (23) G. Villermain-Lecolier, A. Hadni. 《Infrared Physics》v. 18, N. 1, p. 17—22 (1978)
- (24) G. Cohen-Solal, A. Zozime《Infrared Physics》v. 16, p. 555—559 (1976)
- (25) M. Sirieix, M. Garcia, J. Farre, J. Simonne《Infrared Physics》v. 18, p. 233—242 (1978)
- (26) C. Vérié, A. Kozaski, S. Otmeguine, G. Weill《Proc. of 13th Int'l Conf. of Phys. Semiconductors》p. 467—70 (1976)
- (27) Y. Gulder, C. Rigaux, A. Mycielski, Y. Couder《Phys. Status Solidi B》v.81, N. 2 p. 615—27 (1976);v. 82, N. 1, p. 149—58 (1977)
- (28) D. Véron《JOSA》v. 67, N. 7 p. 964 (1977)

III. 法国的远红外光谱技术

(一) 远红外光栅光谱仪

在第二次世界大战后,远红外光谱技术与仪器有迅速的发展,到60年代初期,发展到相当成熟,世界上出现了各种类型的单光束和双光束的商品远红外光栅光谱仪。

一般,经典的远红外光栅光谱仪的分辨极限约为 0.1 厘米^{-1} 量级。近些年来,还有些研究工作者在继续努力提高这类仪器的性能。

法国南锡大学的远红外实验室的哈达尼 (A. Hadni) 在1956年研制成单光束远红外光栅光谱仪。此后,经法国的卡迈卡厂进行改进后投入生产。称为“SI36型远红外分光计”。对于远红外光谱研究工作,这一类仪器还是非常有用的。

下面介绍“SI36型远红外分光计”的概况。

1. 光学系统

图1中画出了仪器中各种光学元件与其他器件。光源S是菲利普厂生产的HPK125型熔

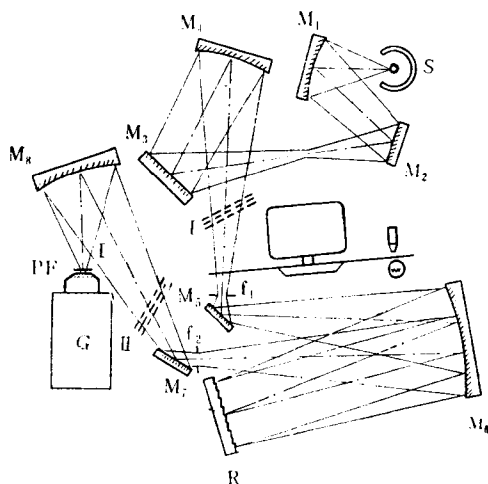


图1 卡迈卡SI36型远红外分光计的光学系统图

石英外壳的高压汞灯，仪器按单光束方式进行工作。单色仪为立特洛型。用宽度为70毫米的阶梯光栅作为色散元件。光栅的闪耀角为 26° 。 M_1 ， M_4 ， M_6 和 M_8 是镀铝的金属球面镜。 M_2 ， M_3 ， M_5 和 M_7 是平面反射镜，它们可以用毛面的平面反射镜或者刻槽与色散光栅的相垂直的阶梯光栅来代替。入射狭缝 f_1 作为样品架，左是出射狭缝。 M_7 可以用试样来代替，进行反射测定工作。 F 、 PF 、 I 是各种透过滤光片。 G 是高莱气动探测器。 R 是色散光栅。

2. 光谱范围

本仪器的工作光谱范围为40—700微米。其分段情况如表2所示。所用的色散光栅的光栅常数分别为50，80，125，250和500微米。

表2 卡迈卡SI36型分光计的光谱范围的倍频程分段（阴影线部分）

范 围	可 见	近 红 外					远 红 外					微 波
倍 频 程	- 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
波长 λ (微米)	0.375	0.75	1.5	3	6	12	24	48	96	192	384	768 1536
波数 ν (厘米 $^{-1}$)	26624	13312	6656	3328	1664	832	416	208	104	52	26	13 6.5
								250			16.6	

3. 滤光片

根据仪器工作的波段，选择各种不同的滤光片：磨毛的镜面，与色散光栅的刻槽方向垂直的所谓交叉阶梯光栅，石英片，聚苯乙烯片，以及碱性卤化物，表3列出了各波段上所用的各种滤光片。

表3 卡迈卡SI36型分光计各波段所用的滤光片色散光栅的传动速度、时间常数及缝宽

波段	λ (微米)	b (微米)	滤 光 片				F I (毫米) (毫米)	PF	ω (小时 $^{-1}$)	τ (秒)	f (毫米)
			M_2	M_3	M_5	M_7					
D ₁	40—80	50	MD	MD	MD	MD	1 —	LiF	45°	20	3
D ₂	70—100	80	RF100	MD	MD	MD	2 —	LiF, CaF ₂	45°	50	5
D ₃	100—200	125	RF125	RF125	MD	RF140	4 5	LiF, SrF ₂ , KCl, KBr	22°30'	100	5
D ₄	180—250	250	RF125	RF125	RF250	RF220	4 5	TlI, BaF ₂ , KBr	22°30'	100	5
D ₅	230—380	250	RF250	RF250	RF250	RF220	4 8	LiF, SrF ₂ , KCl, KBr, Gypse.	22°30'	100	6.5
D ₆	350—700	500	RF250	RF400	RF500	RF600	4 10	TlI, TlCl, KI, KBr	22°30'	100	8

λ = 波长
 b = 色散光栅的光栅常数
 MD = 毛面反射镜
 RF = 滤光光栅
 F = 石英片
 I = 聚苯乙烯片
 PF = 滤光片
 ω = 光栅的传动速度
 f = 入射和出射狭缝的宽度
 τ = 时间常数

4. 电子系统概述及其他

电子系统中放大器的增益为 $10^3—10^5$ ，时间常数为 $5—200$ 秒。电路设计中考虑到消除零点漂移，这一点对光谱学测量工作是非常重要的。

仪器工作时抽真空到气压为 0.05 托，用于去除大气中水蒸气的吸收。

(二) 远红外扫描法布里—珀罗干涉仪

1. 前言

法国国立科研中心所属的航空实验室目前的主要研究方向是行星探测，高层大气层和同温层的研究。发展了一系列卫星、探空火箭和气球运载的测试仪器。涉及的专业范围为：红外（包括远红外）、超导、真空紫外、激光及光谱学等方面。在欧洲《空间实验室》计划中，航空实验室承担了其中三个项目。

为了研究天文物理或地球上层大气起源的远红外和亚毫米波谱线，该室致力于研制气球载（或星载）远红外法布里—珀罗干涉仪。

P. Jacquinet等人首先指出，法布里—珀罗干涉仪与经典的狭缝分光计相比有较大的光流量增益。在一般情况下，在远红外光谱学研究中，法布里—珀罗干涉仪的性能及不上付里叶变换光谱仪（因为后者除了具有光流量增益外，还有多重光谱的优点）。但是在某些场合下，例如只需要研究一小段光谱时（如远红外激光研究），以及在体积和重量限制较为严格的情况下，法布里—珀罗干涉仪由于结构简单、结实、紧凑，而且又有相当高的分辨率，因而非常适用。

航空实验室准备利用研制成的远红外法布里—珀罗干涉仪实测地球大气的HII区中的 C^+ 的 156 微米的辐射线。仪器将装在斯密森天文物理台的稳定的气球吊舱上的 102 厘米的卡塞格伦望远镜的后面，配备 He^3 致冷的测辐射热计。干涉仪在开始的时候是不致冷的，用一片冷却的分级滤光片把望远镜的热辐射降低到探测器能允许的程度。仪器的光学有效孔径为直径 19 毫米。在设计波长 156 微米处，其有效精细度大于 25 。所以，所需的分辨率 2000 可以在小于 80 级而获得。相应的分级滤光片及光谱扫描范围，其带宽略大于 4 微米，中心位于 156 微米谱线上。用金属栅网作为半反射表面，可以容易地进行更换，而不破坏仪器的调整状态。不需要进行平行度调整，就可以获得最好的光学性能。

2. 法布里—珀罗干涉仪的光学性质

法布里—珀罗干涉仪利用在两块高反射、低损耗的平行板之间的多光束干涉的原理进行工作，在远红外扫描法布里—珀罗干涉仪中，用两片薄的金属栅网拉紧成为平面，并安装得使它们彼此平行。两者之间的间距为 d 。

根据爱里公式，仪器对单色准直光束的功率透过率为：

$$\tau(\sigma) = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1-R}\right)^2 \sin^2 \frac{\Phi}{2}\right]^{-1}$$

式中， R 为单块反射板的功率反射率，

A 为单块反射板的功率吸收率；

Φ 为内部多次反射的两束相继光束之间的相差；

$$\Phi = 2\pi\sigma \cdot 2nd - 2\varphi_r$$

φ_r 为在一块板上反射时的相移；

nd 为垂直入射时两反射板之间的光学间距；

n 为介质的折射率， σ 为波数。

如果 $\Phi = 2m\pi$ 时 (m 是整数)， $\tau(\sigma)$ 具有极大值，即

$$\tau(\sigma)_{\text{最大}} = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2$$

由计算这些峰的半宽度，可以将在 σ_m 处第 m 级的分辨率 $Q = \sigma_m / \delta\sigma$ 表示为

$$Q = mF$$

式中， F 为仪器的精细度，即有效的多次反射数，（或称为反射精细度）

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (\text{对 } R > 60\%)$$

实际上，由于反射板的表面缺陷，两板的不平行度以及具有一定的孔径的缘故，实际分辨率略低于 mF 。设表面缺陷的幅度为 $\Delta\epsilon$ ，由缺陷的高斯分布引起的精细度 F_D 为

$$F_D = \lambda / 2\Delta\epsilon$$

从上式可以看出， F_D 的增大与波长 λ 成线性关系。

干涉仪可以由改变间距 d （或改变 n ）进行波长的调谐。为了除掉重叠的级次，必须用分级滤光片进行滤光。两个级之间的自由光谱区为

$$\sigma = (2nd)^{-1}$$

利用总放大率为666倍的金相显微镜，调节移动台，使连续聚焦在两片栅网的上表面上，再扣除栅网的厚度，可以测得两栅网之间的真正间距，精确度达 ± 1 微米。利用这种方法，还可以测出栅网表面的不规则性或者两栅网之间的平行度。

3. 结构

仪器由两片互相平行的、成为光学平面的两维栅网所构成。栅网的作用是作为半反射表面，用一个机械装置，逐步地改变两者的间距。如图2所示：外栅网C装在可移动的工具钢制的移动台A上。内栅网D固定在工具钢制的空心支柱B上，由线性球轴承滑台E使台A的运动限制于一维方向上，轴承为压缩负载式，以减少剩余晃动，在10毫米的轴向行程中，晃动量在1微米以内。

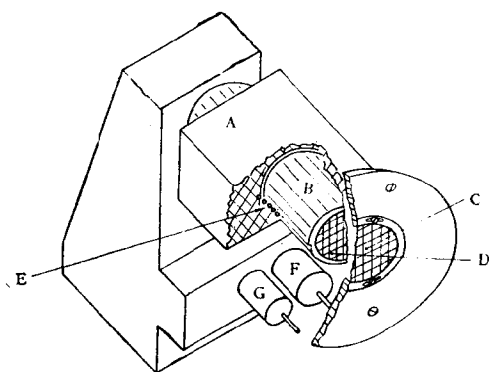


图2 干涉仪的机械系统概貌

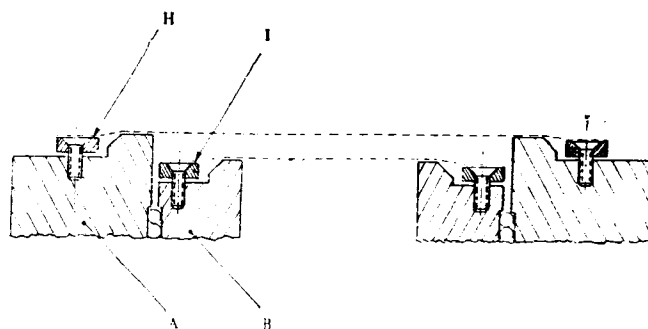


图3 干涉仪栅网的支承部分

使台A运动的驱动力来自“Inchworm”（商标名）压电换能器F。在模拟试验时发现它有严重的电晕放电问题，后来换用步进电机驱动测微丝杆的商品光学台驱动组件，台的位移利用同轴电容器位移计G进行测定，位移量可分辨到0.01微米，直线性为 $\pm 0.05\%$ 。移动

台的绝对位置的长期重复性可能达到0.1微米以内。

移动台和空心支柱用同一种材料制成,可以减少周围温度改变的影响。在空心柱B的外表面上涂上一层15微米厚的聚四氟乙烯,可以使摩擦力降低。

4. 金属栅网的平面度与平行度

反射板是用电成型的薄的铜网或镍网所制成,对于设计波长为156微米,栅网的周期性(即两相邻栅线的间距)为33微米,使它具有适宜的反射率,栅网的厚度的典型值为几个微米。栅网的性质极其脆弱,而且有严格的光学要求:表面没有损伤,褶皱以及非常微小的局部畸变,因此,在操作和运输中必须极其细心。

图3中的A和B是图2中的移动台和支柱,用稀释的G. E. 7031清漆将内、外栅网分别胶合在中间支承环I和H上。然后用螺钉固定在静止的支柱和移动台上。利用固定螺钉拧紧的程度,可以进一步调整栅网的张力,在外装置环上的槽,允许外栅网旋转,使栅网花样与内栅网的平行。

只需使得两个突出的栅网支承凸缘是平面,而且平行,就可以保证两片栅网表面成为光学平面而且保持平行度。

光学抛光过程如下:首先卸除栅网及“Inchworm”的连杆,使台能自由地滑行,然后使栅网支承凸缘面向下,放在光学抛光盘上,在法布里—珀罗干涉仪上加上平衡重量,使它在抛光过程中平衡,最后使两栅网的支承凸缘位于同一几何平面上,而且都成为光洁的光学平面。

5. 整台仪器的质量控制

为了验证在气球飞行条件下的性能,在预计的温度和压力(温度下限为 -55°C ,压力下限为10毫米汞柱)下,干涉仪进行机械扫描。在换用了新的驱动系统后,在仪器的运输和读出位置过程中,没有发现异常的情况。光学平行度的检验方法如下:卸下外栅网,换上镀铝

的薄的聚酯树脂膜,用自准平行光管观察薄膜在10毫米行程中姿态的变化(模拟条件与气球飞行的相同),发现角度变化在6弧秒以内,近似地相应的平行度误差小于设计指标 $\lambda/200$ ($\lambda=156$ 微米)。

在性能总检验时,把干涉仪放在“Cameca”光栅单色仪内,单色仪的波长调到156微米,扫描法布里—珀罗干涉仪的间距进行光谱扫描,即从1级扫到10级。测得有效精细度 >25 ,可以与预计的反射精细度相比。利用一台远红外激光器,可以实现在预计的间距下,确切地测定仪器的精细度。以前曾经用HCN激光器的337微米的辐射,测定周期性为50微米的栅网的性能,结果如图4所示。因为有效精细度近似等于预计的反射精细度(50),所以,栅网的

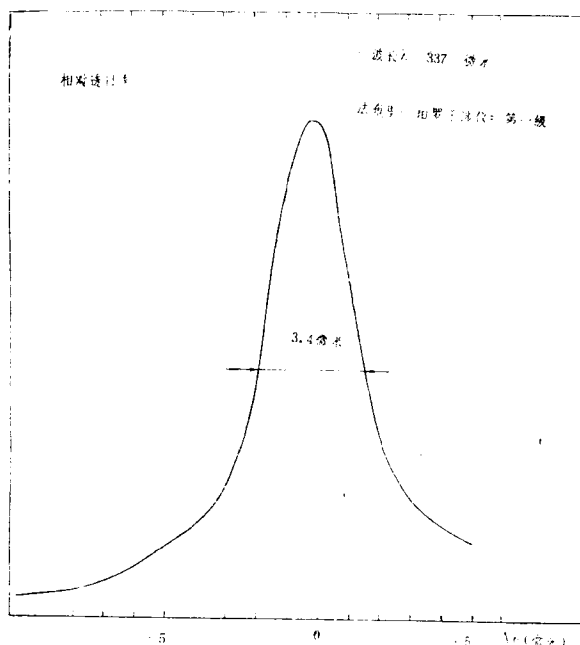


图4 利用周期性为50微米的栅网的法布里—珀罗干涉仪扫描HCN激光器的337微米谱线时,透过率与台位移的关系

缺陷和不平行的总效应不超过 $\lambda/500$ ($\lambda=337$ 微米)。

6. 金属栅网法布里—珀罗干涉仪的应用

利用金属栅网的远红外扫描法布里—珀罗干涉仪的几种典型的应用如下:

- (1) 用作滤光器;
- (2) 测量天体的远红外辐射;
- (3) 选择和测量各种远红外激光器的波长;
- (4) 用于托卡马克等离子体诊断等。

(三) 选择调幅干涉光谱仪

1. 概述

通常情况下,光栅(或棱镜)光谱仪是利用色散元件,将光谱按波长(或波数)的顺序在空间有规律地展开,为了充分利用色散元件的理论分辨率,采用狭缝作为光阑,而狭缝往往使仪器的光强显著地降低。

法国的宫纳(P. Connes)发明了选择调幅干涉光谱仪(法文简称为SISAM),可以克服上述缺点。所谓选择调幅,是指在某一时间内,只使某一选定波长(或波数)的光束的振幅100%地通过仪器,而使其他波长的光束的振幅调制到接近于零。因此,在探测器上探测到选择波长的光强的交变信号和其他波长光强的不变信号。经电子系统处理后,最后只记录出被选波长的光强。随着时间的变化,逐一扫描各所需波长,就测得整个光谱区内的光谱图。

这类仪器的主要优点是:

(1) 与经典的光栅光谱仪相比,它用圆孔代替原来的狭缝,使仪器的光强能提高二个数量级以上。但分辨率仍能保持色散元件原有值。因此,对于弱光光谱研究工作,其实际分辨率要比经典光栅光谱仪高得多。

(2) 由于最终获得光谱不需要进行计算,因此,其信息处理系统比富里叶变换光谱仪要简单得多。

2. 迈克尔逊干涉仪的性质

由于选择调幅干涉光谱仪是在迈克尔逊干涉仪的基础上变形而成,所以先简要地叙述一下迈克尔逊干涉仪的性质。

干涉仪的光路图如图5所示。光源S发出的单色光经透镜 L_1 准直后投射到分束板BS上,分成两束光,分别射到平面反射镜 M_1 和 M_2 上,当仪器处于正确调整状态时,反射镜 M_2 的象 M_2' 与反射镜 M_1 平行,随着干涉仪两臂的光程差的变化,可以观察到明亮的、或灰的或黑暗的视场,即能量的变化由100%逐渐降至零,再增至100%。

如果仪器处于失调状态,则 M_2' 与 M_1 构成楔角A,则可观察到定域于镜面上的干涉条纹,条纹与楔边平行,随着光程差的改变,条纹由黑暗变明亮,或者反之,但能量的变化降低。

用探测器在R处接收干涉仪射出的总光流,经推导,可以得到能量最大值($E_{\max}$)和能量最小值($E_{\min}$)的表示式,两者之差($E_{\max}-E_{\min}$)即表示振幅调制度(记作 α),

$$\alpha = E_{\max} - E_{\min} = \frac{I_0 L \sin(2\pi AL/\lambda)}{2\pi AL/\lambda}$$

上式中, L 为垂直于楔边方向上的反射镜的尺寸, λ 为光的波长。由上式可以看出,随着角A

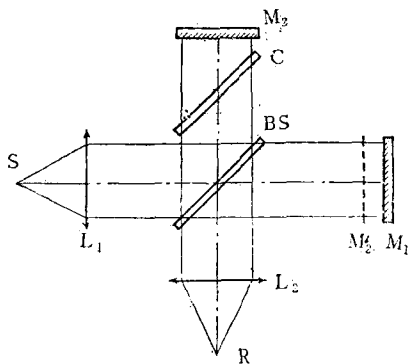


图5 迈克尔逊干涉仪的光学系统图
C为补偿板，L₂为物镜，R为物镜的焦点。

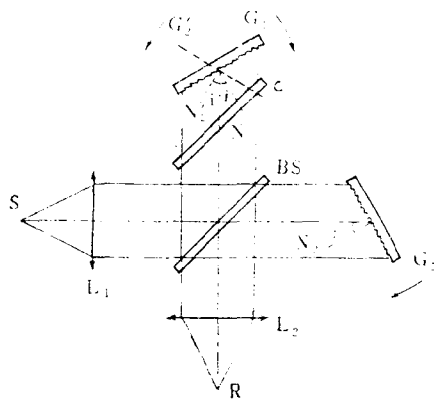


图6 选择调幅干涉光谱仪原理图

增大，调制度迅速降低。

3. 选择性调幅原理

在上述干涉仪中用两块相同的衍射光栅代替两块平面反射镜，光栅的方向相反，色散相反，见图6。图中G₁和G₂即衍射光栅，其他文字的意义与图5中的相同。

设光源为点光源，入射到光栅上的光线有相同的*i*值。再设光束在两块光栅上的入射角*i*值相同，考察沿光轴方向，（即*i*=*i'*，*i'*为衍射角）某一特殊选定波长λ₁的两路光干涉后的强度。根据光栅公式，极大值条件为

$$2\sin i = k\lambda_1/d$$

上式中，*k*是利用的光谱级，*d*是光栅常数。这时，干涉图强度的振幅为1，即调制度为1。

对于偏离仪器光轴的衍射光束的干涉情况（设两块光栅的入射角仍保持相等），经推导可得振幅调制度的表示式

$$\alpha' = \frac{I_0 L \sin 2\pi (v - v_1) / \delta v}{2\pi (v - v_1) / \delta v}$$

式中，*v*₁为选定的波数，δ*v*为一块光栅的分辨极限。

4. 高分辨率选择调幅干涉光谱仪

法国巴黎第十一大学的红外实验室的浜松（P. Pinson）等人研制了数台选择调幅干涉

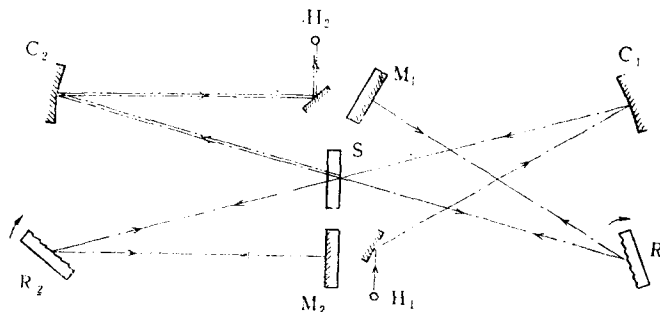


图7 两次通过式选择调幅干涉光谱仪

光谱仪：其中一台用于1—5微米区，分辨极限为 0.025厘米^{-1} ；另一台用于5—10微米区，分辨极限为 0.011厘米^{-1} ，其性能可列入目前最佳的甚高分辨率的红外光谱仪行列中。

下面介绍该实验室研制成的世界上第一台两次通过式选择调幅干涉光谱仪。仪器的光学系统如图7所示。图中 H_1 为入射孔，直径为7毫米， H_2 为出射孔，反射镜 C_1 和 C_2 的焦距为1.2米，S为分束器，用单晶氟化钡制成，表面镀铬，滤掉可见光，其有效直径为125毫米。限制了光强和分辨率（除非在光栅上的入射角很大时）， R_1 和 R_2 是两块相同的平面衍射光栅，其刻槽密度为37.4槽/毫米，闪耀角为 63° ，刻划面积为 204×254 毫米， M_1 和 M_2 是平面反射镜。

红外信号的干涉调制并不是由补偿板的振荡产生的，而是由平面镜 M_2 以适宜的振幅快速振动得到相干调制，经调制的红外辐射被碲镉汞探测器（由S.A.T.公司提供）所接收，探测器的灵敏面积为 200×200 微米，探测率 $D^*(8\text{微米区}) = 3 \times 10^{10}\text{厘米} \cdot \text{赫}^{1/2} \cdot \text{瓦}^{-1}$

探测器输出的电信号送入双功能的电子系统中，第一个功能是一台经典的锁定放大器，后面接一台记录器，第二个功能是取出信号中的第一谐波频率，提供误差电压，经积分后，用于移动反射镜 M_1 ，使干涉仪两臂的光程差保持为零，电子系统的方框图见图8。

当光栅的全部宽度加以利用时，则在闪耀角附近光谱的分辨极限 $\delta\nu = 0.011\text{厘米}^{-1}$ 。

图9是一氧化二氮的 $02^\circ 0-00^\circ 0$ 跃迁的 R_6 线和 $03^\circ 0-01^\circ 0$ 跃迁的 R_{15} 线，两者相距 0.015厘米^{-1} （计算值），可见仪器的分辨率非常接近于理论值。

仪器工作时抽真空到压力小于 10^{-4} 托。

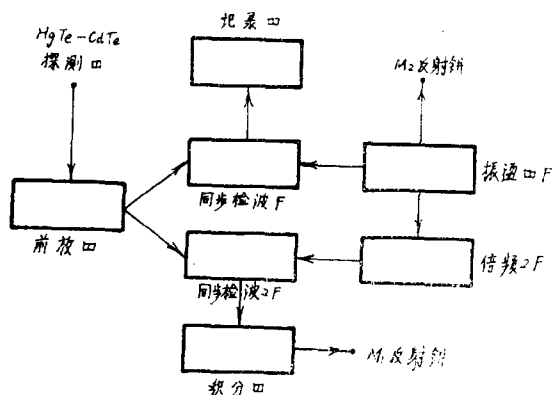


图8 电子系统的方框图

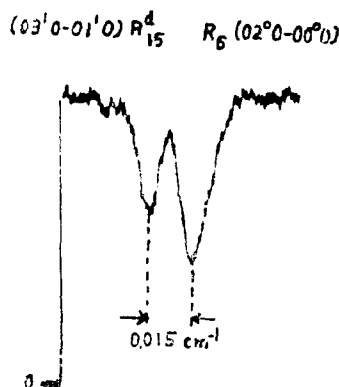


图9 光栅的整个宽度被照明时，记录的 N_2O 线显示仪器的分辨率

(四) 富里叶变换光谱仪（或称调频干涉光谱仪）

1. 前言

1951年至1961年，是富里叶光谱学的探索时期，在这段时期内，搞清楚了富里叶光谱学的主要的理论问题：例如，仪器的分辨率，有限制的干涉图，变迹、扫描函数、采样理论、数字处理、相位误差、准直误差、有限孔径以及噪声等。此后，进入实践时期，即投入实际应用，但与此同时，也不断有新的发明和改进。

法国国立科研中心所属的埃米—考东（Aime Cotton）实验室在富里叶变换光谱学及仪器的研究方面有悠久的历史，作了大量的工作，这次考察中参观了他们最近研制成功的用于