

量子光谱成像

◎ 毕思文 编著



科学出版社

www.sciencep.com

量子光谱成像

毕思文 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

量子光谱成像综合了量子光学、量子信息技术以及国防军事安全和生命科学研究的重要理论,它是量子遥感的核心内容.全书共6章:第1~2章概述了量子光谱成像的提出背景和量子光谱成像的基本概念;第3~6章详细阐述了量子光谱成像的理论、实验、计算、量子光谱成像设计和量子光谱成像技术;最后从国防军事安全、遥感科学技术和生命科学研究等方面概要介绍了量子光谱成像的应用前景.

本书主要供从事光学与光学工程、量子信息技术、成像光谱技术、国防军事安全、空间科学、遥感科学技术和生命科学等领域的学者和专家参考,也可作为从事相关专业的研究生和科研管理人员的参考用书.

图书在版编目(CIP)数据

量子光谱成像/毕思文编著. —北京: 科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-018647-8

I. 量… II. 毕… III. 量子光学 IV. O431.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第024891号

责任编辑: 胡 凯 / 责任校对: 陈丽珠

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年3月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007年3月第一次印刷 印张: 11 彩插: 1

印数: 1—3 000 字数: 206 000

定价: **39.00元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

20 世纪初, 化学家们开始利用光谱成像技术来测定分析物质的物理性质和化学成分, 如光的吸收和发射、电导、电势、荷质比以及荧光等。当前, 随着物理学、化学、光学、材料科学等研究的不断发展和微电子及计算机技术的广泛应用, 光谱成像技术得到了迅速的发展, 其内容得到了极大的充实。

从光谱成像分析仪器的发展进程来看, 学科间的相互渗透, 特别是一些重大的科学发现, 为许多新仪器分析方法的建立和发展提供了良好的基础。当前, 光谱成像正处在一个大发展阶段, 为光谱成像有关参数的测定以及其他学科提供了各种有用的信息。光谱成像仪器分析已不仅是重要的分析测试方法, 而且是强有力的科学研究手段。

在光谱成像仪器分析中, 依据物质发射、吸收电磁辐射以及物质与电磁辐射的相互作用而建立起来的一类分析方法, 称为光谱成像分析法。光谱成像分析法分为两类: 一类是以辐射能与物质组成和结构之间的内在联系及表现形式的光谱测量为基础; 另一类是不包含物体内能的变化, 即不涉及能级跃迁, 而是基于物质所引起的辐射方向和物理性质的改变, 如折射、反射、色散、散射、干涉、衍射及偏振等现象。遥感仪器在经历了单波段、多波段(如陆地卫星 MSS)、甚多波段(如美国 GER 公司的 64 波段航空扫描仪、中国 SITP 的 71 波段 MAIS 等)之后, 现朝着超光谱(hyper-spectral)的方向发展, 目前的代表性仪器是美国 JPL 的 224 波段的 AVIRIS 可见红外成像光谱仪。基于遥感应用的目的要求和分类识别方法的需要, 决定了这种向超光谱发展的趋势。

量子光谱成像理论的基础是现代物理学, 量子光谱成像的波谱波段划分细化至 $10^{-10} \sim 10^{-15}$ m, 光谱分辨率达到 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ nm。另外, 光谱成像在时间分辨率、辐射分辨率、空间分辨率和仪器灵敏度等方面, 指标都会有 2~5 倍的大幅提高, 所以, 开展量子光谱成像理论与技术研究, 在提高综合探测和信息获取能力方面具有重要意义。

卫星是一种信息装备, 对技术平台载荷、传输要求越来越高, 载荷的不足主要是分辨率低, 我们把发展高分辨率的遥感仪器作为重点。虽然在“十五”期间, 国家“863”指出了遥感高分辨率载荷的不足, 并着重发展, 但是目前在高空间分辨率方面, 中国在国际上还是比较落后, 排在第 7~8 位。同时, 在国家中长期发展规划中, 高分辨率遥感技术是重点发展方向之一, 将会起到引领作用。与现在光谱成像技术相比, 量子光谱成像技术在空间分辨率、时间分辨率、辐射分辨率和光谱分辨率上

都会有大幅的提高.

全书共 6 章, 主要内容有: 第 1 章绪论, 主要介绍了光谱成像研究现状、量子光谱成像提出背景和量子光谱成像研究方法; 第 2 章量子光谱成像概念, 介绍了量子光谱成像基本概念、量子光谱成像与光谱成像的对比和关系; 第 3 章详细阐述了量子光谱成像理论, 主要内容包括量子光谱成像的波函数、量子光谱成像中的力学量、量子光谱成像微扰理论、量子光谱成像的散射、量子光谱成像的自旋、量子光谱成像的全同粒子、量子光谱成像态的描述、量子光谱成像的对称性、EPR(Einstein-Podolsky-Rosen) 佯谬、量子光谱成像的路径积分与相位及二次量子化、量子光谱成像的时间反演、量子光谱成像辐射场化与及其物质相互作用和量子光谱成像自发多极辐射场量子化及其与物质相互作用; 第 4 章量子光谱成像实验, 阐述了量子光谱成像实验方案、氢原子光谱分析以及量子光谱成像实验基础研究; 第 5 章量子光谱成像计算, 主要阐述了量子光谱成像计算的复杂性、量子光谱成像的单量子比特门、量子光谱成像多量子比特门、量子光谱成像除计算基以外的基的测量、量子光谱成像的量子比特复制线路和量子光谱成像算法; 第 6 章量子光谱成像技术, 首先介绍了量子光谱研究概况和量子成像研究概况, 然后给出了量子光谱成像设计思路, 双光子纠缠的量子图像实验, 最后进行了量子光谱成像技术分析, 概述了量子光谱成像关键技术和结果; 书后还附有关于量子光谱成像应用展望的附录, 主要介绍了量子光谱成像在国防军事安全、遥感科学技术和生命科学研究中的应用.

在撰写和出版本书过程中, 作者得到中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室(代码: 1991DA173725)的资助(课题编号: 1100001213), 并得到赵卫所长, 孙传东主任以及实验室陈国夫先生、王屹山研究员、李萍秘书等人的真诚帮助; 始终得到了中国科学院遥感应用研究所陈述彭院士、童庆禧院士、李小文院士、郭华东研究员、顾行发研究员、赵忠明研究员、谭福安书记、郑兰芬研究员、朱重光研究员、王长耀研究员、邵芸研究员和张兵研究员等的大力支持, 作者对他们的帮助和支持一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限, 书中不足之处恳请批评指正.

毕思文

2006 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光谱成像研究现状.....	1
1.1.1 光谱成像仪器分析.....	1
1.1.2 光谱成像分析的历史发展.....	1
1.1.3 光谱成像技术.....	3
1.1.4 量子信息技术.....	6
1.1.5 国内相关领域研究机构.....	6
1.2 量子光谱成像提出背景.....	7
1.3 量子光谱成像研究方法.....	8
1.3.1 研究目标.....	8
1.3.2 研究内涵.....	8
1.3.3 研究内容.....	8
第 2 章 量子光谱成像概念	12
2.1 量子光谱成像基本概念.....	12
2.1.1 光谱.....	12
2.1.2 光谱类型.....	13
2.1.3 量子光谱.....	15
2.2 量子光谱成像与光谱成像的对比.....	17
2.2.1 在概念上的比较与区别.....	17
2.2.2 在理论上的比较与区别.....	18
2.2.3 在光谱分辨率上的比较与区别.....	18
2.2.4 在仪器上的比较与区别.....	18
2.3 量子光谱成像与光谱成像的关系.....	18
2.3.1 量子光谱成像与光谱成像的对应原理.....	18
2.3.2 量子光谱成像谐振子的相干态.....	21
2.3.3 量子光谱成像的 Rydberg 波包, 波形的演化与恢复.....	22
第 3 章 量子光谱成像理论	25
3.1 量子光谱成像的波函数.....	25
3.1.1 量子光谱成像波函数的统计解释.....	25
3.1.2 量子光谱成像态叠加原理.....	27
3.1.3 量子光谱成像态随时间的演化, Schrödinger 方程.....	28
3.1.4 量子光谱成像粒子流密度和粒子数守恒定律.....	28
3.1.5 量子光谱成像态随时间的演化, 定态 Schrödinger 方程.....	29

3.1.6	量子光谱成像一维无限深势阱的物理含义	30
3.1.7	量子光谱成像线性谐振子	31
3.1.8	量子光谱成像的势垒贯穿	31
3.2	量子光谱成像中的力学量	33
3.2.1	量子光谱成像中表示力学量的算符	34
3.2.2	量子光谱成像动量算符和角动量算符	35
3.2.3	量子光谱成像算符与力学量的关系	37
3.2.4	量子光谱成像算符的对易关系	38
3.2.5	量子光谱成像力学量平均值随时间的变化与守恒定律	39
3.2.6	结论	40
3.3	量子光谱成像微扰理论	41
3.3.1	量子光谱成像的非简并态微扰理论	41
3.3.2	量子光谱成像简并情况下的微扰理论	42
3.3.3	量子光谱成像变分法	43
3.3.4	量子光谱成像与时间有关的微扰理论	44
3.3.5	量子光谱成像的跃迁概率	45
3.3.6	量子光谱成像的光的发射和吸收	46
3.3.7	结论	49
3.4	量子光谱成像的散射	49
3.4.1	量子光谱成像的碰撞过程与散射截面	49
3.4.2	量子光谱成像势垒场中的弹性散射	51
3.4.3	量子光谱成像的方形势阱与势垒所产生的散射	52
3.4.4	量子光谱成像的玻恩近似	53
3.4.5	量子光谱成像质心坐标系与实验室坐标系	54
3.4.6	结论	55
3.5	量子光谱成像的自旋	55
3.5.1	量子光谱成像的电子自旋	56
3.5.2	量子光谱成像的电子自旋算符和自旋函数	56
3.5.3	量子光谱成像的塞曼效应	58
3.5.4	量子光谱成像的两个角动量的耦合	59
3.5.5	结论	60
3.6	量子光谱成像的全同粒子	60
3.6.1	量子光谱成像全同粒子的特性	60
3.6.2	量子光谱成像全同粒子系统的波函数与泡利原理	62
3.6.3	结论	65
3.7	量子光谱成像态的描述	65
3.7.1	量子态的描述	65

3.7.2	量子光谱成像态	72
3.7.3	量子光谱成像纠缠态	75
3.7.4	量子光谱成像态的测量, Wigner 函数	83
3.8	量子光谱成像的对称性	83
3.8.1	对称性在量子光谱成像中的深刻内涵	83
3.8.2	量子光谱成像的全同性	84
3.8.3	量子光谱成像的守恒量 and 对称性	85
3.8.4	量子光谱成像独立守恒量的数目	89
3.8.5	结论	89
3.9	EPR(Einstein-Podolsky-Rosen) 佯谬	90
3.9.1	EPR 佯谬的历史背景	90
3.9.2	EPR 佯谬一文两个论断	90
3.9.3	EPR 佯谬在理论上问题出在何处?	93
3.9.4	Bell 不等式与实验检验	94
3.10	量子光谱成像的路径积分与相位及二次量子化	95
3.10.1	量子光谱成像的 Feynman 路径积分	95
3.10.2	量子光谱成像中的相位	97
3.10.3	量子光谱成像的二次量子化	98
3.10.4	结论	100
3.11	量子光谱成像的时间反演	101
3.11.1	量子光谱成像的时间反演态与时间反演算符	102
3.11.2	量子光谱成像的时间反演不变性	104
3.11.3	量子光谱成像力学量的分类与矩阵元的计算	106
3.11.4	结论	107
3.12	量子光谱成像辐射场量子化与物质相互作用	108
3.12.1	量子光谱成像辐射场的量子化	108
3.12.2	量子光谱成像多极辐射场及其量子化	111
3.12.3	结论	115
3.13	量子光谱成像自发多极辐射场量子化及其与物质相互作用	116
3.13.1	量子光谱成像自发多极辐射	116
3.13.2	讨论	119
3.13.3	结论	120
第 4 章	量子光谱成像实验	121
4.1	量子光谱成像实验方案	121
4.2	氢原子光谱分析	121
4.2.1	氢原子的基本光谱规律	122
4.2.2	一维氢原子	125

4.3	量子光谱成像实验基础研究	129
4.3.1	量子光谱成像的光谱精细结构	129
4.3.2	结论	134
第 5 章	量子光谱成像计算	135
5.1	量子光谱成像计算的复杂性	135
5.1.1	计算机和物理学	135
5.1.2	量子计算概念的起源	136
5.1.3	量子计算的困难及其克服途径	137
5.1.4	算法和算法复杂性	138
5.1.5	P 和 NP 分类	138
5.1.6	量子计算机在什么方面超过了经典计算机?	139
5.2	量子光谱成像的单量子比特门	139
5.3	量子光谱成像的多量子比特门	141
5.4	量子光谱成像除计算基以外的基的测量	142
5.5	量子光谱成像的量子比特复制线路	143
5.6	量子光谱成像算法	145
5.6.1	平行与纠缠	145
5.6.2	量子并行性	146
5.6.3	基于 Fourier 变换的量子光谱成像算法	146
第 6 章	量子光谱成像技术	148
6.1	量子光谱研究概况	148
6.2	量子成像研究概况	148
6.3	量子光谱成像设计思路	150
6.4	双光子纠缠的量子图像实验——“鬼相”实验	150
6.5	量子光谱成像技术分析	153
6.5.1	量子光谱成像的相关技术	153
6.5.2	量子光谱成像系统	155
6.6	量子光谱成像关键技术	161
6.7	结论	162
附录	量子光谱成像应用展望	163
参考文献		167

第1章 绪 论

量子光谱成像理论与技术研究在空间科学和遥感科学技术领域首次提出。下面从光谱成像技术的历史发展、量子信息技术的发展需要和国内相关领域研究机构等方面,进行国内外该领域研究发展趋势及现状分析。

1.1 光谱成像研究现状

1.1.1 光谱成像仪器分析

对光谱的研究是人们探索样本物质结构,获得原子与光场相互作用信息的重要途径。原子辐射谱和腔场谱各自从不同的侧面反映原子与光场相互作用的特性,它已成为量子光学中研究的热点之一。许多学者已广泛研究了理想腔内原子与辐射场多种相互作用过程的动力学特性,发现了真空场拉比劈裂在内的一系列非经典效应,原子与光场间相互作用的量子特性被逐步揭示出来^[1]。

光谱成像是近一个多世纪才出现的方法,是近代和现代科学技术的重要研究内容,20世纪初,化学家们开始利用光谱成像技术来测定分析物质的物理性质和化学成分,如光的吸收和发射、电导、荷质比以及荧光等。

从光谱成像分析仪器的发展进程来看,学科间的相互渗透,特别是一些重大的科学发现,为许多新的仪器分析方法的建立和发展提供了良好的基础。在建立这些新的仪器分析方法的过程中,不少科学家获得了诺贝尔物理奖、化学奖或生理医学奖。表 1.1 列出了与建立现代光谱成像仪器分析方法有关的一些诺贝尔奖的科学家名字及其贡献。当前,光谱成像正处在一个大发展阶段。随着微电子和计算机技术的广泛应用以及物理学、数学、生物学和材料科学等学科新的研究成果的不断引入,光谱成像的内容得到了很大的丰富,在很大程度上为有关参数的测定提供了重要手段,进而为其他学科提供各种有用的化学信息等。毫无疑问,光谱成像仪器分析不仅是重要的分析测试方法,而且是强有力的科学研究手段。可以预测,随着电子和计算机科学的迅猛发展和分析仪器的不断更新,光谱成像将得到迅速的发展。

1.1.2 光谱成像分析的历史发展

在光谱成像仪器分析中,依据物质发射、吸收电磁辐射以及物质与电磁辐射的相互作用而建立起来的一类分析方法,称为光谱成像分析法。光谱成像分析法分为两类:一类是以辐射能与物质组成和结构之间的内在联系及表现形式的光谱测量

为基础. 另一类是不包含物体内能的变化, 即不涉及能级跃迁, 而是基于物质所引起的辐射方向和物理性质的改变, 如折射、反射、色散、散射、干涉、衍射及偏振等现象.

表 1.1 与现代仪器分析方法有关的获诺贝尔奖的科学家及其贡献^[2]

获奖人	项目内容	获奖时间
Bragg WH(英国)	应用 X 射线研究晶体结构 (物理学奖)	1915
Aston FW(英国)	用质谱法发现同位素并用于定量分析 (化学奖)	1922
Pregl F(奥地利)	开创有机物质的微量分析法 (化学奖)	1923
Tiselius A(瑞典)	成功将人的血清中的蛋白质分为五个主要组分 (化学奖)	1948
Bloch F(美国)	发明核磁的测定方法 (物理学奖)	1952
Purell EN(美国)		
Matin A J P(英国)	开创气相分配色谱分析法 (化学奖)	1952
Synge RLM(英国)		
Heyrovsky J(捷克)	开创极谱分析法 (化学奖)	1959
Yalow R(美国)	开创放射免疫分析法 (生理学/医学奖)	1977
Siegbahn KM(瑞典)	发展高分辨率电子光谱学并用于化学分析 (物理学奖)	1981
Binnig G(德国)	发明隧道扫描显微镜 (物理学奖)	1986
Rohrer H(瑞士)		
Ernst R(瑞士)	发明了傅里叶变换核磁共振分光法和二维核磁共振技术 (化学奖)	1991
Zewail A(美国)	用激光闪光灯照相拍摄到化学反应中化学键断裂和形成的过程 (化学奖)	1999
Fenn J(美国)	发明了对生物大分子进行确认和结构分析的方法及对生物大分子的质谱分析法 (化学奖)	2002
Tanaka K(日本)		
Wuethrich K(瑞士)	发明了利用核磁共振技术测定溶液中生物大分子的三维结构的方法 (化学奖)	2002
Lauterbur P(美国)	发明核磁共振成像技术 (生理学/医学奖)	2003
Mansfield P(英国)		
Hall J(美国)		
Hansch T(德国)	在激光精密光谱研究中做出了突出的贡献 (物理学奖)	2005

近红外线是由英国人威·赫歇耳 (W. Herschel) 于 1800 年在观察太阳光谱与温度上升之间的关系时发现的. 通过水银温度计, 他发现随着光谱由紫向红变化, 温度上升的效果也逐渐变强. 还发现在红光外侧光谱看不到的部分具有更强的温度上升效果. 赫歇耳认识到这是与可见光不同的辐射线.

1835 年, 安培 (Ampère) 在论文中指出, 这部分辐射线是一种波长比可见光长的光, 这就诞生了红外的概念. 接着麦克斯韦 (Maxwell) 从理论上提出可见光、红外线都是具有相同性质的电磁波, 赫兹 (Hertz) 通过实验证明了麦克斯韦的理论, 从此红外成为了一般的概念.

1880 年前后, 阿布尼 (Abney) 等使用照相底版的古典方法测量了 700nm 和

1200nm 两个范围的有机化合物的吸收光谱,这是关于近红外吸收光谱的最早报告.

1892 年,朱丽叶斯发明了测辐射热仪 (bolometer),可以代替照相底版测量辐射能量,使分光光谱测量产生了很大的发展. 1900 年,阿布尼和科布伦茨 (Coblents) 测定了许多物质的红外光谱,揭示出红外吸收与分子的振动、扭转等运动有关,并指出这些运动都与氢原子有关.

1930 年利用布拉凯特 (Brackett) 开发的分光光度计测到了 C-H 的倍频,从此开始了实质性的近红外光谱测定. 第二次世界大战中出现了光电传感器,采用这种传感器就生产出了接近于近代分光光度计的记录型分光仪器. 1954 年 Applied Physics 公司开发了 Cary14 测量仪器,从此近红外光谱研究产生了飞跃性的进展.

上述内容主要是研究近红外光谱的归类与有机化合物化学构造的关系等基础性课题,揭示出了近红外吸收是基准振动(基频)的红外吸收的倍频或合频.可以看出,近红外吸收测定中试料的准备处理要求不高,试料量较多时也可以完成测量,得到测量结果;在另一方面,近红外光谱与红外光谱相比,优点不多,实用较困难.到 20 世纪 80 年代在纤维、医药、化工等工业领域也得到了应用,技术上也产生了飞跃.对于下一代分析仪器,希望改进的是:

(1) 为了获得信噪比高的分光数据,需要能对各波长进行高速扫描的仪器,现在,傅里叶变换近红外技术、音响光学调制滤光片等新型仪器正在得到广泛的应用.

(2) 使用时,是方便携带的小型仪器.

(3) 为了实现理想的品质管理,无干涉过程控制,有必要开发可实现遥控操作的分析仪器.

(4) 期望开发近红外光声光谱、近红外 X 射线计算机断层摄影、近红外核磁共振等仪器,以近红外法为基础,组合其他测试技术从而形成高性能仪器.为达到这一目的,在加强开发硬件的同时,还有必要加强开发所需要的软件.

1.1.3 光谱成像技术

光谱成像技术是由光学、光谱学、电子技术、计算机技术以及精密机械于一体组成的高新技术.由于这项技术能够获得探测目标较丰富的空间和光谱信息,因此在航天和航空遥感、军事侦察识别、环境检测和资源勘探等方面都具有广阔的应用前景.

在讨论光谱成像技术时,成像光谱仪是光谱成像技术的核心.20 世纪 80 年代初世界上第一台成像光谱仪在美国加州理工大学 JPL 实验室问世.到目前为止,全世界有几十套不同功能、不同形式的成像光谱仪.主要类型有色散型、干涉型和计算层析型三种,其中干涉成像光谱仪也称 Fourier 变换成像光谱仪,干涉成像光谱仪与其他成像光谱仪一样,在获得目标空间信息的同时,还获得目标的光谱信息.干涉成像光谱仪获得的图像包含了二维的空间信息和一维的光谱信息,与传统的色散

型成像光谱仪不同,干涉成像光谱仪首先将入射的一束光送入干涉仪,分解为具有一定光程差的光线,并进行干涉叠加,由于在一行上各点的光程差不同,从而在成像平面形成具有竖条状干涉条纹的干涉超光谱图像.光谱信息就存在于干涉条纹中,干涉成像光谱仪通过推扫方式产生另一维空间信息.对于干涉超光谱图像,干涉图像作为中间结果,必须要经过傅里叶变换以后才能得到可以直接使用的超光谱图像序列.

然而,现在成熟的光谱仪是机载高分辨率成像光谱仪,它已从研究阶段走向商业运行阶段,硬件技术已逐步走向成熟,机载高分辨率成像光谱仪在中红外波段已实用化;按计划近几年有多台星载成像光谱仪系统进入轨道运行,包括中分辨率和高分辨率成像光谱仪.

(1) 高分辨率复合成像光谱仪系统

成像光谱仪系统是 21 世纪最主要的光学对地观测系统,国际上中分辨率成像光谱仪的研制正逐步成熟.机载中分辨率成像光谱仪以 GER 公司研制的光机扫描型为主要代表,星载中成像光谱仪以美国的 MODIS 和欧洲空间局 MERIS 为主要代表.但在许多场合,中分辨率成像光谱仪还不能完全满足使用的需要.因此以固体自扫描红外焦平面器件为核心的高分辨率成像光谱仪是国际上成像光谱仪研制的主要方向.由于探测器的原因,在可见/近红外波段研制此类仪器并不困难,但在红外波段相对较难.目前在 $1\sim 2\mu\text{m}$ 完成研制的面阵扫帚式成像光谱仪有加拿大的 SFSI 和美国的 TRWIS III.美国星载高分辨率成像光谱仪的计划也一再变化,原有的 HIRIS 计划也被取消,而由 TRW 在 TRWIS 基础上改进得 HIR 系统取代,但不管怎样,面阵推扫式高分辨率成像光谱仪是成像光谱技术的发展方向.我国机载实用型高分辨率成像光谱仪在 2000 年前投入实用性运行阶段,星载的中分辨率成像光谱仪也可能入轨运行.但从可见至短波红外具有连续光谱波段的高分辨率成像光谱仪尚属空白.

(2) 高分辨率干涉成像光谱系统

傅里叶变换成像光谱仪采用迈克耳孙干涉仪或其他类似的干涉仪作为分光器件,光的干涉通过动态的扫描来实现,但由于利用扫描来的干涉,难以克服的加工困难和稳定性差等缺点,20 世纪 80 年代后期以来又发展了以静态迈克耳孙干涉仪为代表的无动镜干涉成像光谱技术,20 世纪 90 年代后期在此基础上又建立了大孔径干涉成像光谱仪 (LASIS) 的概念.

遥感仪器在经历了单波段、多波段(如陆地卫星 MSS)、甚多波段(如美国 GER 公司的 64 波段航空扫描仪、中国 SITP 的 71 波段 MAIS 等)之后,现朝着超光谱(hyper-spectral)的方向发展.目前代表性仪器是美国 JPL 的 224 波段的 AVIRIS 可见红外成像光谱仪.遥感应用目的的要求和分类识别方法的需要,决定了这种向超光谱发展的趋势.近十年来,世界上先进国家投入了巨大的努力进行了超光谱技术

的研究和应用. 美国 JPL 研制了 AVIRIS 供应多用户使用; 奥地利使用 AVIRIS 在奥地利东南部地区获取资料, 目的是评估超光谱数据在测定与树木病相关的冠层生物化学成分的变化潜力; 意大利为南意大利的天气和环境的战略项目, 建立了一个新的实验室. 建立机载超光谱图像遥感使用的是美国 Daedalus 公司的 MIVLS(共 102 个波段); 加拿大根据 AVIRIS 数据, 使用三个辐射传输码: 5S,6S 和 Modtran2 来确定地表反射率; 法国与意大利合作, 对 AVIRIS 图像数据进行了校正或恢复, 来研究大气效应. 这意味着需要发展比 AVIRIS 有更精细光谱分辨率, 有更高图像性噪比的遥感仪器.

综合众多光谱技术的光谱仪, 已越过了第一代的棱镜光谱仪, 第二代的光栅光谱仪, 现已跨进了第三代的傅里叶变换光谱仪. 在近十多年里, 傅里叶变换光谱仪作为先进的遥感仪器类型, 在包括地面、机载、星载的对地观测中显示了卓越的功能. 1993 年, 德国航空航天组织的光电研究所研制了机载傅里叶变换光谱仪, 以旋转的后向角反射器产生光程差, 用于监测巡航状态下喷气发动机排气的组分. 1994 年美国 Kestrel 公司研制了傅里叶可见光超多光谱程序 (FTVHIS), 它使用面阵 CCD 器件, 以推扫方式成像. 近年来世界上已研制出来的或正在研制的基于傅里叶变换的超多光谱遥感仪器还有: 置于 Voyager 平台上的红外成像光谱仪 IRIS; 置于 Space Lab-3 上的 ATMOS; 置于 Canada-France-Hawaii 望远镜上的 FTS 装置; 由 JPL 为对地观测系统正在研制的 FTS 仪器等. 综上所述, 世界各国正在努力发展超光谱技术以及实现精细光谱的先进的傅里叶变换光谱技术, 这两方面的结合, 正是以后遥感仪器的发展方向之一.

(3) 空间高光谱分辨率红外探测技术

在大气物理和气象探测中, 对空间红外探测的光谱分辨率要求不断提高, 高分辨率红外干涉式光谱仪可在宽的光谱范围内以高分辨率测量地面和大气的红外辐射, 将成为高分辨率红外探测技术的主要发展趋势, 美国已于 20 世纪 70 年代将高光谱分辨率的红外探测仪由气象卫星送入空间轨道探测地球大气, 西方发达国家都有将类似仪器发射到轨道上的研制计划. 例如, 大气痕量气体分子观测的 ATMOS(JPL, USA, 1985), 高分辨率干涉光谱仪 HIS(University of Wisconsin, USA) 等. 国内, 中国科学院上海技术物理研究所在 1985 年进行过原理研究, 中国科学院安徽精密光学机械研究所曾考虑过类似仪器. 此外, 北京第二光学仪器厂引进美国公司 ANALEC 的技术, 生产实验用的傅里叶红外光谱仪. 为跟踪世界先进技术, 我国在 21 世纪发展空间高分辨率红外干涉光谱仪十分必需.

星载超光谱成像仪器是集光学、光谱学、精密机械、电子技术等计算机技术为一体的新型遥感器, 是近年来国内外航空技术应用的热点. 超光谱成像仪中的摆镜系统位于镜头的前方, 成像仪接受摆镜反射地面目标的辐射信息来成像, 通过摆镜的摆动扩大成像视场, 进行成像和定标工作的切换, 所以摆镜系统的性能、功能等

是影响成像仪正常工作的重要因素。

(4) 微波成像雷达

微波遥感能穿过云层和一定量的雨进行对地观测,尤其是波长较长时几乎与气候无关;与光学传感器相比,由于不需要太阳的照射,还有全天时的特点,因此在对地观测应用中有较重要的应用价值。合成孔径雷达是一种主动式微波成像系统,一般工作在正侧视状态。它在方位向(沿飞行方向)是通过合成孔径原理来提高空间分辨率的,并且该分辨率与飞行平台(机载或星载)的高度无关。许多国家和地区都发展了机载或星载 SAR 系统。较先进的国家有美国、俄罗斯、欧共体、加拿大、德国、日本等。国际上 SAR 技术的发展趋势集中在空间分辨率、多频段、多极化、多视角、多工作模式和干涉成像几个方面。

我国已先后研制成功机载实用化 SAR 系统,机载多条带多极化成像 SAR 系统。目前,我国的星载 SAR 系统正处于样机研制阶段,第一代星载 SAR 系统预计于几年后发射。

1.1.4 量子信息技术

量子信息技术领域是目前最具有吸引力的前沿领域之一,是近年来的新兴交叉学科,涉及数学、物理学和计算机科学技术等众多学科,主要分量子通信和量子计算两大领域,其中量子通信又分为量子密码和量子通信网络两个分支,目前已成为国内外学术界关注的焦点。

美国科学家在量子计算机研究方面获得重大的进展,这使得人们向往已久的量子计算机又向我们靠近了一步,使科学家们对利用量子研究领域的新技术,研制出超级计算机充满了信心。美国科学家宣布,他们已经实现了 4 量子位逻辑门,取得了 4 个锂离子的量子纠缠态,此举使 21 世纪量子计算机的研制取得了重大突破。并且,美国在量子信息技术方面获得了 2 项发明专利,一项是“多光谱量子阱红外探测器”;另一项是“对偏振灵敏的波纹状量子阱红外光电探测器阵列”^[3]。

在我国,科学时报刊登的 2004 年中国十大科技进展新闻中,我国量子信息实验领域取得重大突破。2004 年 7 月,《自然》杂志发表了中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室(筹)潘建伟教授和他的同事杨涛、赵志完成的重大研究成果:在国际上首次通过实验实现了五粒子纠缠态以及终端开放的量子态隐形传输。此项成果表明我国在量子纠缠态的研究方面已经进入国际领先水平^[4]。

1.1.5 国内相关领域研究机构

目前国内在量子领域开展研究工作主要在量子信息、量子通信、量子计算量子光学和量子成像等方面如:中国科学技术大学的量子信息与量子通信实验室,北京大学、清华大学的量子信息与测量教育部重点实验室,山西大学的量子光学与量子

器件国家重点实验室, 华东师范大学的光谱学与波谱学教育部重点实验室, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 中国科学院物理研究所, 北京师范大学, 中国科学院上海光学精密机械研究所等研究机构。

综上所述, 当今科学技术的发展和国防安全的需求, 对信息探测与获取技术提出了更高的要求。所以, 作者提出开展量子光谱成像的理论与技术研究。

1.2 量子光谱成像提出背景

根据美国空军军用卫星的发展特点, 以及美国海军和 NASA 在超光谱成像技术领域的发展与应用, 随着军事侦察、监视需求的格局变化和对目标需要详细深入地了解, 光谱成像技术越来越与军方需求的关系密切, 它在识别伪装、弄清武器性质和浅海作战等军事应用方面均有重要价值。它主要根据应用需要和遥感器的实际能力选择几个谱段、十几个甚至几百个、上千个谱段探测目标, 如果光谱遥感谱段太少, 只能了解和发现一些现象, 不可能深入地了解探测目标的细节和本质, 这就是量子光谱成像理论与技术研究的基本动因。

现代战争突破了前方与后方对阵的方式, 空中打击直接瞄准后方军事目标和经济要害, 这些都是高新技术的体现。但是, 目前的对地观测光谱成像技术还不能完全满足国防安全要求, 量子光谱成像技术将是 21 世纪国防军事高新技术的一个亮点。

卫星是一种信息装备, 对技术平台载荷、传输要求越来越高, 载荷的不足主要是分辨率低, 我们把发展高分辨率的遥感仪器作为重点。虽然在“十五”期间, 国家“863”计划抓了遥感高分辨率载荷的不足, 但是目前在高空间分辨率方面, 中国在国际上还是比较落后, 排在第 7~8 位。同时, 在国家中长期规划中, 高分辨率遥感技术是重点之一, 将会起到引领作用。与现在分辨率技术相比, 量子光谱成像技术要达到高空间、长时间、强辐射、高角度分辨率和光谱分辨率 2~5 倍。

测谱学早在 20 世纪初就被用于识别分子和原子及其结构, 但是直到 20 世纪 80 年代才产生光谱成像技术。成像光谱仪能在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和短波红外区域, 获取许多非常窄而光谱连续的图像。成像光谱仪为每个像元提供数十至数百个窄波段光谱信息, 他们组成了一条完整而且连续的光谱曲线。成像光谱仪将视域中观测到的各种地物以完整的光谱曲线记录下来。这种纪录的光谱数据能用于多学科的研究和应用, 在可见光到短波红外波段其光谱分辨率高达纳米数量级, 也就是目前的高光谱、超光谱。另外, 从仪器分析的发展进展来看, 由于学科间的相互渗透, 特别是一些重大的新学科出现, 为许多新的仪器分析方法的建立和发展提供了良好的基础^[2]。当前, 光谱成像正处在一个新的发展阶段。随着物理学、光学、材料科学的新研究成果的不断加入和微电子及计算机技术的广泛应用, 光谱成像的内容得到了极大的充实。在这种情况下, 作为信息识别与获取重要组成部分的

光谱成像理论与技术研究,毫无疑问,不仅是重要的分析测试方法,而且更是有力的科学研究手段.可以预测,随着光谱成像技术的迅速发展和分析仪器的不断更新,量子光谱成像将全面得到更迅速的发展.

量子光谱成像理论的基础是现代物理学,量子光谱成像的波谱波段划分级别细化至 $10^{-10} \sim 10^{-15}\text{m}$,光谱分辨率达到 $10^{-1} \sim 10^{-4}\text{nm}$,另外光谱成像在时间分辨率、辐射分辨率、空间分辨率和仪器灵敏度等方面指标都会有 2~5 倍大幅度的提高,这中间深含着在更深层次上分析研究物质的波谱特性与波段特征的可能性,存在提高对各种物质识别精度的现实性.现代物理学研究由少数粒子构成的“小”体系,如果知道了支配这些粒子的基本定律,原则上就可以预言由大量粒子构成的宏观物理体系的行为.这正是量子光谱成像的研究意义所在,它的研究会给信息探测与获取提供一种新的手段.所以,开展量子光谱成像理论与技术研究,在提高综合探测和信息获取能力方面具有重要意义^[5,6].

1.3 量子光谱成像研究方法

量子光谱成像的研究方法是以量子论和光谱成像原理为基础,然后通过量子效应,来提取量子光谱并对其成像加以研究.

1.3.1 研究目标

围绕高性能武器系统的信息化和特殊环境信息获取的需求,量子光谱成像理论和技术研究的目标是:完成量子光谱成像理论研究;完成量子光谱实验,量子光谱成像技术方案设计和量子光谱成像演示系统.其技术指标:波谱波段划分级别细化至 $10^{-10} \sim 10^{-15}\text{m}$,光谱分辨率达到 $10^{-1} \sim 10^{-4}\text{nm}$;光谱成像的时间分辨率、辐射分辨率、空间分辨率和仪器灵敏度等方面指标都会有 2~5 倍的大幅度提高.

1.3.2 研究内涵

在国内外相关领域研究进展趋势和现状分析基础上,主要开展量子光谱成像理论、量子光谱成像实验、量子光谱成像技术方案和量子光谱成像演示系统研究.通过该项目研究在量子光谱成像理论、实验、计算、技术方案和演示系统等方面都取得创新性成果,为提高综合探测和信息获取能力提供依据.

1.3.3 研究内容

- (1) 量子光谱成像理论研究
 - (i) 量子光谱成像的波粒二象性

量子光谱成像的一个基本原理是电子或光子等微观物质都同时具有波和粒子的双重性质,这就是说具有波粒二象性.这种二象性是理解量子光谱成像的关键之