

摘要

连续波 HF 化学激光的光谱是其重要参数之一，它的显著特点是各支谱线的强度随时间不断变化，从而需要实时监测。受阵列探测器技术的制约，合适波段的光谱仪很难获得，因此本文设计了一套方案，它通过对光路的改进，利用常见的 *PbS* 光导探测器达到了高速测量要求。

PbS 探测器的缺点在于其外壳尺寸无法缩减，在传统的多通道光谱仪方案中为了保证色散率，仪器体积过于庞大。论文提出了分层接收、交错采集的方法，实验证明它能够有效降低色散要求，从而缩小系统体积，进一步分析结果还显示，像散、场曲与彗差的校正是系统结构的首要设计要求，同时谱线波长需要通过标定的方法来定位。

通过详细的像差分析，仪器选择了水平非对称 Czerny-Turner 结构，并对参数进行了优化。计算结果表明，谱线焦面近似平直，各焦斑尺寸与间距能够与探测器匹配，成像效果达到了设计要求。

根据分析结论，建立了相应的试验装置，其接收系统采用多层可水平滑动的分立探测模块形式，并在焦面位置上增加了显示挡板。以 He-Ne 导引光为基准，装校调试各组件，再通过一套相对响应率和本底噪声经过标定的探测-采集系统，对整个装置进行了实验研究，获得了一段时间内，两支较重要谱线强度同步变化的曲线，证实了设计方案的可行性。

本文的研究为工程设计提供了思路和可参考的数据，对一些工程问题作了详细分析，同时指出了应继续开展的工作，为仪器走向实用化奠定了基础。

关键词：多通道光谱仪；连续波 HF 化学激光器；中红外波段；探测器；激光光栅；像差

Abstract

The spectrum is one of the most important parameters of Continuous Wave HF Chemical Laser, the oscillation of each line's intensity is the chief characteristic of it, and thus a measurement in real time is urgent needed. Owing to the weakness of array detector technology, the spectrometers in HF band are hard to obtain. Therefore, a structure with common *PbS* infrared detectors is brought forward in the thesis to measure the fluctuation of the intensity of lines in high-speed, by means of improving the optic construction.

Due to the big size of *PbS* detectors, the volume of the instrument is too huge to accept in conventional structure of the multi-channel spectrometer, if the dispersion wants to be kept. The method called layered receiving and interlaced collecting is proposed accordingly, and the experiment confirms that it can reduce the request of dispersion effectively, as well as the volume of system. Further research shows that the calibration to astigmatism, curvature of field, and coma aberration is the major request on design; in addition, the location of lines needs to be demarcated.

A horizontal and asymmetric Czerny-Turner structure is elected, and the parameters are optimized via detailed analyses of aberration. The result of calculation reveals that the focus surface can be considered a plane, and the size of focus spots can match the detectors, thus the effects of imaging achieve the demands of design.

According to the analyses, an experimental device has been set up, the separate detector modules which can slip on layers horizontally are fit to the receiving system, as well as a board installed at the location of the focus plane. Take He-Ne laser for reference, the device is calibrated, and through the detecting system which response rate and background noise has been measured, the whole system is experimental investigated, and the history of the intensity of two important lines are presented. The conclusion shows that the scheme of spectrometer is feasible.

On this research, the plan and referenced data for engineering are provided, some problem of project are detailed, and the further works should be developed are indicated. Therefore, the foundation for the instrument has been established.

Key words: Multi-channel spectrometer, Continuous Wave HF Chemical Laser, mid-infrared band, detector, laser grating, aberration

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写过的研究成果，也不包含为获得国防科学技术大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文题目： 连续波 HF 化学激光器专用高速光谱仪的设计与研制

学位论文作者签名： 张培邵 日期 2007 年 6 月 5 日

学位论文版权使用授权书

本文完全了解国防科学技术大学有关保留、使用学位论文的规定。本文授权国防科学技术大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文题目： 连续波 HF 化学激光器专用高速光谱仪的设计与研制

学位论文作者签名： 张培邵 日期 2007 年 6 月 5 日

作者指导教师签名： 陈金生 日期 07 年 6 月 15 日

第一章 引言

本章介绍连续波 HF 化学激光器专用高速光谱仪的研制背景、发展现状与设计难点，阐述本文的设计定位以及基本方案，最后对文章的结构安排进行说明。

§1.1 连续波HF化学激光光谱测量仪器研制背景

在化学激光体系中，连续波 HF 激光器具有一定的代表性，它的运行成本低，相关数据详尽，细化测量它的参数对于化学激光器的研究很有帮助。而在其各项参数中，输出光束的总功率在各支谱线上的分布是非常重要的一项。一方面，光谱决定了激光束的大气传输性能；另一方面，它又是诊断激光器运转状态的重要手段，反之在某种程序上，还可以通过调节激光器的运转状态来改变其光谱特征。所以，对这一参数进行测量可以为评估化学激光器的大气传输性能和优化其设计参数提供依据。

利用光栅扫描记录的方式，在常规条件下，对某燃烧驱动连续波 HF 化学激光器的输出光谱进行测量，并参照卤化氢化学激光振转能级的计算结果，可以将 HF 激光的光谱特点总结如下：

- (1) 谱线位于中红外波段 ($2.5\mu\text{m} \sim 3.1\mu\text{m}$)，数目较多；
- (2) 谱线波长间距的差别较大；
- (3) 输出总功率在各支谱线上的分布比较分散；
- (4) 竞争和级联效应使各支谱线的强度随时间不断变化。

其中，各支谱线强度随时间的变化，尤其是变化趋势的相关性，能反映出激活介质中不同能级间的竞争以及激光器谐振腔模式间的竞争对激光光束的影响，是研究的重点所在。然而长期以来，能够实时监测 HF 激光光谱变化的仪器成本昂贵，获取难度很高，因此，自行研制一套测量装置具有重要的实际意义。

现阶段，光谱仪器的结构主要有傅利叶变换型和色散型两种。

前者的核心部分是迈克尔逊干涉仪。光源发出的光被分束器分为两束，一束经反射到达动镜，另一束经透射到达定镜，两束光分别经定镜和动镜反射再回到分束器。动镜以一恒定速度作直线运动，因而两束光形成周期性的光程差，产生随时间变化的干涉信号。探测中央亮条纹的光强变化，再通过傅立叶变换得到随频率变化的谱图，即谱线分布。这样，动镜一个周期的运动即完成一次全谱线的扫描，所需时间为一至数秒。这种仪器信噪比大、分辨率高、扫描速度快，可同时测定所有的波长区间。但它实际上是在动镜的每个运动周期内对谱线分布完成一次测量，仍旧不能监测谱线的实时波动。

后者一般由 3 个分系统组成：辐射源和照明系统、分光系统以及接收系统，如图 1.1 所示：

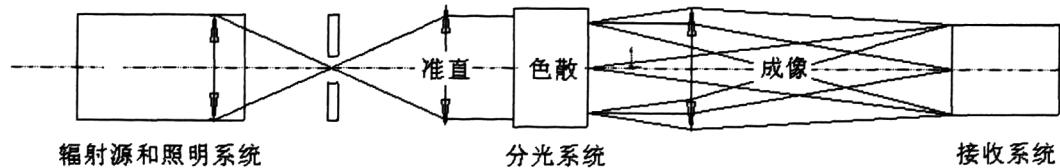


图 1.1 色散型光谱仪结构

照明系统将入射光束聚焦并去除其高阶空间频谱。

分光系统包括准直、色散和成像三个子系统。由狭缝进入的多波长光束经准直后射入色散元件，受其作用，该光束分解为不同方向上的多束单色光，成像后则按照波长的顺序在焦面上产生空间排列，形成若干单色的狭缝像。目前对光谱的精细测量多采用光栅作为色散元件。

接收系统记录各谱线像斑的瞬时强度，它包括接收、处理和显示三个单元。根据接收通道的不同，光谱仪可以分为单通道光谱仪和多通道光谱仪，其中单通道光谱仪在任一瞬间只能观测一个很窄的波长范围，需要通过光栅的转动，来扫描记录各谱线的强度波形，由于存在扫描周期，它同样不适合全谱线强度的同步监测；而多通道光谱仪的光路固定，采用多个探测器分立测量各支谱线的强度，从原理上讲，这种结构可以满足设计要求。

多通道光谱仪产品已经发展了很多年，但是适合于 HF 波段和测量速度的比较罕见，出现这种情况的关键原因是没有相应的多通道探测器产品。

对于色散型仪器，探测器件的像元尺寸越小越好，因此线阵 CCD 是比较理想的元件，它的像素元尺寸达到了微米级。基于线阵 CCD 设计的光谱仪具有很高的紧凑性和稳定性，如图 1.2 所示。

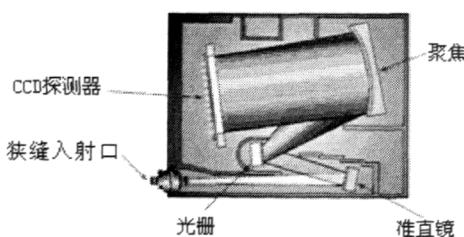


图 1.2 采用线阵 CCD 的光谱仪结构

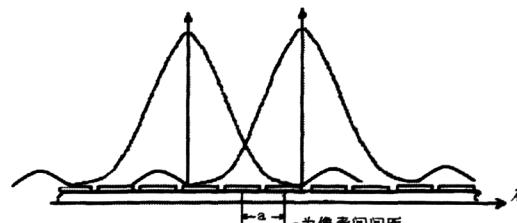


图 1.3 线阵 CCD 采集光谱信号示意图

由于像元尺寸很小，某一根谱线的强度分布波形通常由多个像素元探测得到，仪器的分辨能力取决于成像系统的瑞利分辨率，如图 1.3 所示。这样即使仪器的成像系统在设计、

调试过程中对像差校正不足，导致谱线强度分布波形不对称或者展宽，也可以通过提高单位面积像素数量，或者在后续程序上对数字信号进行处理等方法来分辨各条谱线。

然而，由于制造水平的问题，目前适合于 HF 激光工作波段的线阵 CCD 产品价格昂贵，不易获得；同时，HF 激光各谱线强度差异较大，部分谱线的强度可能超过了探测范围，而线阵 CCD 很难通过衰减的方法控制这些谱线的曝光量；另外，CCD 是电荷转移型元件，由于大量像元闲置，顺序读出信号将耗去一定时间，测量速度无法做到很高。

另一种器件是热像仪，通过拍摄漫反屏上的光斑，并计算每一帧图像的光斑能量来分析谱线强度的变化。不过合适波段的热像仪的获取难度更高，暂不做讨论。

考虑到 HF 激光的波长都是已知的，经过固定的色散光路后，焦斑的位置也都是确定的，仪器并不需要扫描装置或者高像素、大面积的光电元件，采用少量的探测器固定在设计好的位置上接收光强不但能降低成本而且能够实现快速实时测量。

方案之一是线列模式，它是在一个线性底座内，按要求在不同位置安放半导体感光元，然后统一加芯片封装。这种器件可以解决 CCD 的部分问题，读取速度较快，但是它的灵活性很差，各感光元位置固定不可微调，并且一旦发现有损坏的感光元就必须整体更换，不利于仪器的装校调试工作。重要的是，它的定制成本也非常高昂。

现有条件下，独立封装的热敏探测器是比较常见的选择。典型结构有光伏型和光导型两种，其中光导型的灵敏度和抗干扰性最高。它采用半导体材料薄膜，如 $HgCdTe$ 或 PbS 或 $InSb$ ($HgCdTe$ 需冷却至液氮温度以降低噪声， PbS 较常用于近红外区室温下的检测)，这些材料置于表面为非导电性玻璃的真空舱内，则吸收辐射后非导电性价电子跃迁至高能量的导电带，从而降低半导体电阻，产生信号。基于这种探测器阵列设计的接收系统优点在于：响应时间短（几百微秒），基本达到实时测量；产品型号系列化，便于选择；调试灵活，对阵列位置重新设计后还可以用于 DF 等类似激光器。

各种探测器件的对比如表 1.1 所示：

表 1.1 多通道探测器件对比

	采集速度	成本	分立衰减	灵活性	体积
线阵 CCD	低	高	不可	差	很小
热像仪	低	很高	不可	差	一般
线列探测器	高	高	不便	差	小
单元光导探测器阵列	很高	低	容易	好	大

§1.2 仪器基本方案

通过上一节分析，本文最终选用以单元探测器阵列为基础的多通道色散型光谱仪结构。原因如下：

- (1) HF 激光的各支谱线波长已知，不需扫描；
- (2) 固定各探测器位置，可实现快速实时测量；
- (3) 基于现有条件，成本低；
- (4) 调试方便，灵活性高；
- (5) 便于分立衰减各支谱线强度；
- (6) 易扩展到 DF 等类似激光。

单元探测器的缺点在于它需要一个真空舱，因此无法摆脱封装外壳，而外壳尺寸较大，一般是感光元的 10 倍左右，最小也要 10mm，这导致仪器对线色散率的要求比较高。

通常情况下线色散率正比于角色散率和成像焦距的乘积。HF 化学激光可能出现的谱线较多（24 条），并且若干相邻谱线的波长差很大，要保证所有谱线都在成像范围之内，角色散率的提高有限，经计算，即使角色散率取最大值，探测器紧密排列，也需要 3 米以上的焦距和 1.5 米以上的成像孔径才能将所有谱线分离，仪器体积过于庞大。色散率和体积之间的矛盾正是长期以来 HF 激光光谱仪难于设计的原因。

事实上，可以通过对其他分系统的改进来降低仪器对线色散率的要求。本文提出了一种分层接收、交错采集的解决方案，经验证，该方案可以使以单元探测器阵列为基础的多通道色散型光谱仪体积缩小到原来的 1/20。

在此基础上，文章对光谱仪进行了结构设计和参数分析，最后在一台电激励连续波 HF 化学激光器上完成了对该装置的实验研究。

§1.3 论文结构安排

整篇论文的具体结构安排如下：

第一章介绍连续波 HF 化学激光光谱测量的重要性及其谱线特点，通过对现有测量手段局限性的分析，引出本文的设计目标、定位和重点，并给出设计思路与基本方案。最后对整篇论文的结构安排进行说明。

第二章从实用角度出发，以几何光学理论为基础，描述光栅的各项物理特性，并对成像系统可能存在的像差进行分析。这些理论与方案设计密切相关，为后续章节中对元件参数和结构参数的选择提供了依据。

第三章针对 HF 激光多通道光谱测量的关键问题，给出解决方案。这一章以分层接收、交错采集方法的介绍为核心，同时通过实验研究对方案进行了验证，并进一步分析了干扰

仪器测量结果的主要因素，为系统的结构设计提出了具体要求。

第四章根据第三章提出的结构要求，通过对系统结构参数进行色散计算与像差分析，给出了最优化的结构形式和参数组合，在此基础上，详细计算了谱线成像数据，最后根据该参数组合建立了一套试验装置。

第五章通过一套相对响应率和本底噪声经过标定的探测-采集系统，对整个装置进行实验研究，得到了在同一时间坐标下，两支比较重要谱线的相对强度变化曲线，证实本文的光谱仪方案切实可行。

第六章展望后续工作，进一步指出走向实用所应继续研究的几个方向，讨论潜在的使用问题，并给出可能的解决方法。

第二章 光谱仪器相关理论

设计方案涉及光栅的光学理论与像差分析方法，本章仅选取这些理论中与光谱仪设计密切相关的部分做一介绍。

§2.1 平面反射光栅的几何光学理论

2.1.1 光栅基本方程

当平行光入射到平面反射光栅上时，其每条刻槽都起着衍射的作用，如图 2.1 所示：

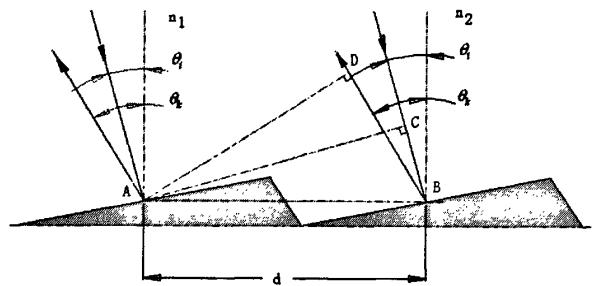


图 2.1 平面光栅色散原理图

相邻两条刻槽的光程差可以表示为：

$$\Delta = \overline{CB} + \overline{BD} = d(\sin \theta_k + \sin \theta_i) \quad (2.1)$$

式中下标 i 表示入射光线，下标 k 表示第 k 级衍射光线。根据光的干涉原理，相干光束的极大值条件为：

$$\Delta = \pm K\lambda (K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.2)$$

由此可以得到平面反射光栅方程：

$$d(\sin \theta_k + \sin \theta_i) = K\lambda (K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.3)$$

根据(2.3)式可以将光栅的色散特点总结如下：

- (1). 对于参数 d 相同的任何平面衍射光栅，只要入射角 θ_i 相同，其光谱线分布位置就完全相同。
- (2). 在某确定的光谱级次 K 中，波长越长的光束其衍射角 θ_k 越大，因此，光谱按波长产生空间排列。
- (3). 对于单一波长的平行光束，经光栅衍射后，光谱按级次 K 产生空间排列。
- (4). 波长为 λ 的第 K 级衍射光束，与波长为 $K\lambda$ 的第 1 级衍射光束重合。

2.1.2 衍射光栅的工作特性

(1) 角色散率

当入射角不变 (θ_i =常数) 时, 角色散率可以由光栅方程微分得到:

$$\frac{d\theta_k}{d\lambda} = \frac{1}{\cos\theta_k} \frac{K}{d} \quad (2.4)$$

光栅槽距 d 越小, 衍射级次 K 越高, 衍射角 θ_k 越接近 90° , 则角色散率越大。当衍射角 θ_k 较大的时候, 角色散率不能近似为常数。

(2) 分辨率

按照瑞利准则, 某一谱线衍射图样的中央极大值与另一条谱线衍射图样的第一极小值重合时, 可以认为这两条相邻谱线是可以分辨的。

谱线的第一衍射角极小值由夫琅和费衍射光强分布的第一零点决定。

$$\Delta\theta_{k0} = \pm \frac{\lambda}{W \cos\theta_k} \quad (2.5)$$

其中 $W = Nd$ 是光栅的有效面积。而色散角由色散率确定:

$$\Delta\theta_k = \frac{1}{\cos\theta_k} \frac{\sin\theta_k + \sin\theta_i}{\lambda} \Delta\lambda \quad (2.6)$$

当 $\Delta\theta_k = \Delta\theta_{k0}$ 时, 得到理论分辨率表达式:

$$R.P. = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{W}{\lambda} (\sin\theta_k + \sin\theta_i) \quad (2.7)$$

可以看出, 光栅分辨率与光栅常数和刻槽数无关, 而充分利用光栅的光学面积, 提高入射角和衍射角有助于增加分辨率。

(3) 级次重叠

单色光入射到光栅上后, 对应于 $K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 等不同级次, 将获得一系列衍射光束, 它们的衍射角符合光栅方程:

$$\sin\theta_k = \frac{K\lambda}{d} - \sin\theta_i \quad (2.8)$$

这样, 多波长光束入射时, 短波的高级次衍射光与长波的低级次衍射光有可能发生重叠。但是对于 HF 激光, 它的最大波长($3.0958\mu m$)小于最小波长($2.5507\mu m$)的二倍, 其 1 级和 2 级的衍射光谱区并不会重叠。

在某些情况下, 级次重叠这一特性也会对我们很有帮助。例如, He-Ne 激光的波长为 $0.6328\mu m$, 是可见的红光, 经光栅后, 其第 4、5 级衍射光束的衍射角与波长分别为

$0.6328 \times 4 = 2.5312 \mu m$ 、 $0.6328 \times 5 = 3.164 \mu m$ 的红外光的一级衍射角相同，利用这一特性可以比较简便地标记不可见光。

(4) 闪耀

锯齿状刻槽的闪耀光栅可以将大部分衍射光能量转移到所需要的级次上。假定闪耀角，即锯齿长边斜表面与平均光栅表面的夹角，为 θ_b ，当 $\theta_i = \theta_k = \theta_b$ 时，由光栅方程可以得到闪耀波长 λ_b 的表达式：

$$\lambda_b = \frac{2d \sin \theta_b}{K} \quad (2.9)$$

对于级次 K ，该波长的衍射光将获得最大相对光强。

(5) 激光光栅

为激光的使用而设计的光栅需要满足一定反射效率，在 $700 nm$ 到 $5 \mu m$ 之间的波长范围内，金膜反射率高于铝膜，并且能够承受激光极高的平均功率和瞬时功率。

同时，为了达到较高的光栅效率，还需要合理选择光栅常数和衍射级次。设闪耀时的定向级次为 K_L ，定向波长为 λ_L ，光栅方程变为：

$$K_L \lambda_L = 2d \sin \theta_i \quad (2.10)$$

与光栅方程合并，令 $\lambda_L = \lambda$ ，得到：

$$\frac{2K}{K_L} - 1 = \frac{\sin \theta_k}{\sin \theta_i} \quad (2.11)$$

为了减少衍射损失，只允许通过光栅的光分布于 0 和 K_L 两个衍射级次之内，即 $K > K_L$ 和 $K < 0$ 的区间内不存在衍射级次，所以：

$$\left(\frac{2K}{K_L} - 1 \right) < \left(\frac{2(K_L + 1)}{K_L} - 1 \right) \quad (2.12)$$

θ_k 不能超过 90° ，所以：

$$\frac{1}{2} K_L \lambda_L < d < \frac{1}{2} (K_L + 2) \lambda_L \quad (2.13)$$

由于 K_L 和 0 之间不存在衍射级次，故 $K_{L_{\max}} = 1$ ，由此得到选择激光光栅常数的依据：

$$0.5 \lambda_L < d < 1.5 \lambda_L \quad (2.14)$$

将 $\sin \theta_i = \frac{\lambda_L}{2d}$ 带入式，可以得到入射角的可选范围：

$$19^\circ 30' < \theta_i < 90^\circ \quad (2.15)$$

§2.2 反射式成像系统的像差理论

像差理论将导致光学系统像差的因素分为成像系统内部参数因素（如焦距 f 、透镜厚度 d 等）和外部参数因素（物高 y 或视场角 ω 、孔径 h 或孔径角 u ）。在外部因素一定的情况下，把像差和系统结构参数之间的关系用幂级数表示，取其中一次项，建立像差和结构参数之间的近似线性关系，再将外部因素 y, h 和像差的关系也用幂级数形式表示，其中最低次幕对应的像差称为初级像差，较高次幕对应的像差称为高级像差。在实际应用中，对初级像差进行分析就能够满足需要。

2.2.1 凹球面镜光路的追迹计算

针对反射式成像结构的物像符号特点，本文选取如下符号规则：

- (1) 长度：以球面顶点为坐标原点，与出射光线行进方向相同的长度为正。
- (2) 角度：光线与轴所夹的锐角，由轴起算，顺时针为正。

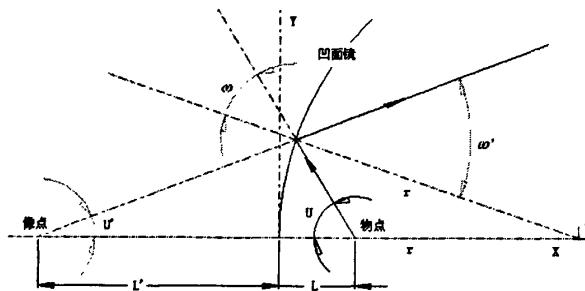


图 2.2 轴上点对凹面镜成像

如图 2.2 所示，物方参数 L, U, ω 为正，像方参数 L', U', ω' 为负。

根据三角形定理，得到凹面镜光路计算普遍公式(2.16)，给定 U, L 可以计算出 U', L' ：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \omega = \frac{r-L}{r} \sin U \\ \omega' = -\omega \\ -U' = 2\omega - U \\ -L' + r = \frac{\sin \omega'}{\sin U'} r \end{array} \right. \quad (2.16)$$

2.2.2 初级像差系数与像差的关系

按照初级像差的定义，用像差系数表征系统结构参数对各种像差的影响，波像差的初级表达式为：

$$2W(\eta, 0, y, z) = \frac{1}{4} S_I (y^2 + z^2)^2 + S_{II} (y^2 + z^2) y \eta + S_{III} \eta^2 y^2 + \frac{1}{2} (S_{IV} + S_{V}) (y^2 + z^2) \eta^2 + S_V y \eta^3 \quad (2.17)$$

式中 $S_I - S_V$ 分别为球差、彗差、像散、场曲、畸变的初级系数； y 和 z 为光线与光瞳交点坐标的归一化数值， η 和 ζ 为物面坐标的归一化数值。

波像差 $W(\eta, 0, y, z)$ 使光线与高斯像面的交点坐标改变 TA_y 和 TA_z ，使对称于主光线的光线对交点在轴向上改变 δL ，波像差与它们之间有如下关系：

$$\begin{cases} nu' TA_y = \frac{\partial W}{\partial y} \\ nu' TA_z = \frac{\partial W}{\partial z} \end{cases} \quad \begin{cases} nu'^2 \delta L = 2 \frac{\partial W}{\partial (y^2 + z^2)} \\ nu'^2 LA_y = 2 \frac{\partial W}{\partial y^2} \\ nu'^2 LA_z = 2 \frac{\partial W}{\partial z^2} \end{cases} \quad (2.18)$$

由(2.18)式可以得到垂轴总几何像差的表达式：

$$\begin{cases} TA_y = \frac{1}{2nu'} [S_I y(y^2 + z^2) + S_{II} \eta(3y^2 + z^2) + (3S_{III} + S_{IV}) \eta^2 y + S_V \eta^3] \\ TA_z = \frac{1}{2nu'} [S_I z(y^2 + z^2) + S_{II} \eta(2yz) + (S_{III} + S_{IV}) \eta^2 z] \end{cases} \quad (2.19)$$

2.2.3 初级像差系数和结构参数的关系

像差系数的定量分析可以通过追迹计算光学系统的近轴光线 l 和轴外近轴主光线 l_p 得到。这两条近轴光线的参数如图 2.3 所示，其中无下标参数对应 l 光线，下标为 p 的参数对应 l_p 光线。

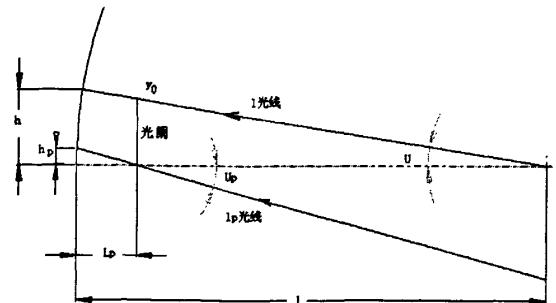


图 2.3 两条近轴光线

在无光阑，并且凹面镜焦距较大的情况下，可以认为凹面镜的光学表面就是入瞳平面，镜面边界即为孔径光阑，此时：

$$\begin{cases} L_p = 0; y_0 = h \\ u = \sin U; u_p = \sin U_p \\ y_0 = h = L \sin U = Lu \\ \eta_0 = L \sin U_p = Lu_p \\ j = nLu u_p = n\eta_0 u = -ny_0 u_p \end{cases} \quad (2.20)$$

式中 j 是光学系统的拉赫不变量。

初级像差分布系数可以写为：

$$\begin{cases} S_I = 2(n'u'^2 \sin U' \delta L' - nu \sin U \delta L) = hn(i' - u)(i - i') \\ S_{II} = hn i_p (i' - u)(i - i') = S_I \frac{i_p}{i} \\ S_{III} = hn i_p^2 (i' - u) \left(1 - \frac{n}{n'}\right) = S_I \left(\frac{i_p}{i}\right)^2 \\ S_{IV} + S_{IV'} = S_I \left(\frac{i_p}{i}\right)^2 + j^2 \frac{n' - n}{n'nr} \\ S_V = (S_{III} + S_{IV'}) \frac{i_p}{i} \end{cases} \quad (2.21)$$

2.2.4 初级几何像差计算

本文可能需要考虑的各种像差与像差系数关系为：

$$\begin{cases} \text{轴向球差: } \delta L = \frac{1}{2nu'^2} \sum S_I \\ \text{垂轴球差: } \rho = u' \delta L \\ \text{垂轴弧矢彗差: } K'_s = \frac{1}{2nu'} \sum S_{II} \\ \text{垂轴子午彗差: } K'_r = \frac{3}{2nu'} \sum S_{II} \\ \text{轴向子午场曲: } x'_t = \frac{1}{2nu'^2} \sum (3S_{III} + S_{IV}) \\ \text{轴向弧矢场曲: } x'_s = \frac{1}{2nu'^2} \sum (S_{III} + S_{IV}) \\ \text{轴向像散: } \Delta x = \frac{1}{nu'^2} \sum S_{III} \\ \text{垂轴畸变: } DT = \frac{1}{2nu'} \sum S_V \end{cases} \quad (2.22)$$

各偏移量含义如下：

(1) 球差

受球差影响，在垂轴方向，高斯像面上的像点变成一个弥散斑，半径为 ρ ；在沿轴方向，最大孔径的成像光束交点距离理想焦点 δL 。

(2) 蕈差

蕈差导致对称于主光线的同心光束在子午面内的交点不与主光线重合，它们之间的垂轴距离为 K'_T ；相应的，弧矢面内偏离距离为 K'_S 。

事实上，将 $S_I = S_{II} = S_{IV} = S_V = 0$ 代入垂轴像差公式，可得到蕈差弥散斑的坐标表达式，换成极坐标后可合并为：

$$[X - (2S_{II}\rho^2\eta)]^2 + Y^2 = [S_{II}\rho^2\eta]^2 \quad (2.23)$$

因此，该弥散斑是一系列圆斑，它的点列图形有如彗星，最宽处为 K'_S ，径向长度为 K'_T ，如图 2.4 所示：

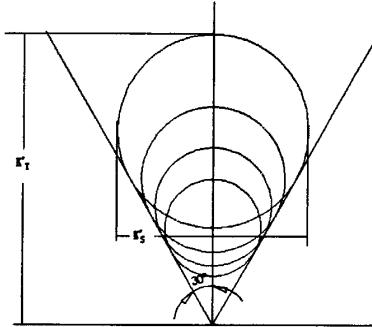


图 2.4 蕈差的点列图解

(3) 像散和场曲

受场曲影响，子午细光束的交点沿光轴方向到高斯像面距离为 x' ，相应的，弧矢面内距离为 x'_s 。这样物面上超出近轴区的像点都会变得模糊，一个平面物体的像将变成一个回转曲面，其曲率半径为：

$$R = \frac{j^2}{3S_{III} + S_{IV}} \quad (2.24)$$

而像散使光线的子午像点和弧矢像点无法重合，两者分开的轴向距离为 $\Delta x = x'_s - x'$ 。将 $S_I = S_{II} = S_V = 0$ 代入式，可以得到弥散斑的坐标表达式，换成极坐标后可以合并为半轴为 a 和 b 的椭圆方程：

$$\begin{cases} \frac{[TA_y]^2}{a^2} + \frac{[TA_z]^2}{b^2} = 1 \\ a = \left[\frac{1}{2nu} \eta^2 \rho (3S_{III} + S_{IV}) \right] \\ b = \left[\frac{1}{2nu} \eta^2 \rho (S_{III} + S_{IV}) \right] \end{cases} \quad (2.25)$$

因此，在子午焦点和弧矢焦点的两个位置上，光斑呈线状，并且互相垂直，在这两个焦点之间的位置上，光斑为椭圆形的弥散斑。

(4) 畸变

畸变并不破坏像面清晰度，只是改变像的相似性，而光谱仪器的像宽度都很窄，一般不考虑畸变，即 $S_V = 0$ 。

(5) 色差

本文所采用的反射式成像系统不存在色差。

第三章 方案设计与验证

对于以单元探测器阵列为基础的多通道光谱仪，如果采用传统方案，为了保证色散率，仪器体积过于庞大。本章设计了一套能降低色散要求的分层光学系统，并给出了相应的实验研究结论。

§3.1 HF激光振转跃迁波长计算

HF 化学激光的激射发生在 HF 分子上下两个振转态(ν', j')、(ν'', j'')之间， ν 、 j 分别是用以描述振动态和转动动态的量子数。连续波 HF 化学激光器一般都运转在部分反转状态下，此时仅有 P 支谱线出现。按习惯记法，本文以 $\nu P j$ 表示如 $(\nu, j-1) \rightarrow (\nu-1, j)$ 的 P 支基频振转谱线。

在双原子分子转动振子模型的基础上，以 cm^{-1} 为单位，双原子分子振转能级(ν, j)的高度可写成如(3.1)式的 Dunham 标准展开式：

$$E_{\nu, j} = \sum_{m, n} Y_{m, n} \left(\nu + \frac{1}{2}\right)^m j^n (j+1)^n \quad (3.1)$$

其中， $Y_{m, n}$ 为 Dunham 系数。对任一满足跃迁选择定则的振转谱线： $(\nu', j') \rightarrow (\nu'', j'')$ ，跃迁的波数 ω 直接等于上下能级高度之差：

$$\omega = E_{\nu', j'} - E_{\nu'', j''} \quad (3.2)$$

每一项 Dunham 系数都与双原子分子光谱学中的光谱项常数一一对应，从而具有明确的物理意义，其准确性、高阶修正系数的多少直接决定了计算精度。目前国际上最新的光谱项常数列表来自于 20 世纪 90 年代加拿大 Waterloo 大学的科学家所作的工作，如表 3.1 所示：

表 3.1 HF 分子的 Dunham 系数

Y_{10}	Y_{20}	Y_{30}	Y_{40}	Y_{50}	Y_{01}	Y_{11}	Y_{21}
4138.73	-90.05	0.932	-1.42e-2	-5.9e-4	20.9555	-0.77958	1.182e-2
Y_{31}	Y_{41}	Y_{02}	Y_{12}	Y_{22}	Y_{03}	Y_{13}	Y_{04}
-3.11e-4	-5.8e-6	-2.153e-3	6.23e-5	-2.06e-6	1.68e-7	-6.5e-9	-1.9e-11

用这些数据计算所得的波长结果与《气体与蒸汽激光谱线表》一书中的实测谱线波长数据进行核对，结果符合的相当好，误差在 $0.2 cm^{-1}$ 以内，计算结果如表 3.2 所示。

表 3.2 HF 激光振转跃迁波长计算结果

序号	跃迁	波长 (μm)	序号	跃迁	波长 (μm)
1	1P1	2.5507	13	2P5	2.7952
2	1P2	2.5787	14	1P9	2.8231
3	1P3	2.6084	15	2P6	2.8319
4	1P4	2.6397	16	1P10	2.8656
5	2P1	2.6667	17	2P7	2.8705
6	1P5	2.6727	18	1P11	2.9103
7	2P2	2.6963	19	2P8	2.9112
8	1P6	2.7074	20	2P9	2.9539
9	2P3	2.7275	21	1P12	2.9573
10	1P7	2.7440	22	2P10	2.9989
11	2P4	2.7604	23	2P11	3.0462
12	1P8	2.7826	24	2P12	3.0958

§3.2 分层接收

根据 1.2 节的讨论，在现有条件下，采用独立封装的光导探测器阵列来测量 HF 激光全谱线的实时波动时，仪器最小线色散率必须大于探测器的尺寸，而探测器尺寸远大于谱线强度的展宽轮廓，因此，两条谱线能否被分辨决定于色散率，如图 3.1 所示：

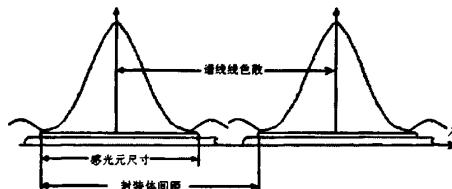


图 3.1 独立探测器采集光谱信号

经调研，国内红外探测器感光元尺寸可以做到 1mm 左右，但是封装后的尺寸一般大于 10mm，即使探测器紧密排列，相邻波长差最小的谱线对，其线色散率也不能小于 10mm。计算表明，对于 HF 激光的谱线分布，将需要 3 米以上成像焦距和 1.5 米以上的成像孔径才能保证线色散率，这样的体积对于一台仪器来说，显然是不可接受的。

为了解决这一难题，本文提出了一种分层接收的方法，该方法用组合凹面镜代替单一的成像凹面镜。所谓组合凹面镜是将三块参数相同的凹面球面镜切割成矩形后，在垂直于色散面的平面上，主轴平行、焦平面重合、并列放置。如图 3.2 所示：

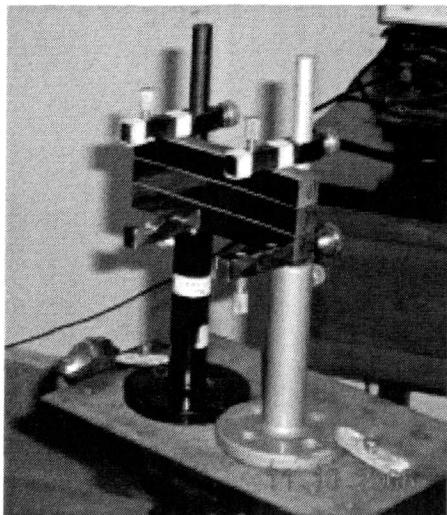


图 3.2 组合凹面镜

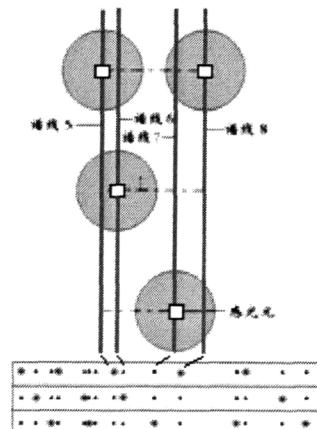


图 3.3 分层接收、交错采集效果

其效果相当于同一束入射光在上中下三个位置对三块相同的凹面镜成像，原光斑在这个平面上被复制为 3 层，每层的谱线焦斑阵列都分布相同。这样，当某两个谱线的焦斑间距小于探测器的封装体尺寸时，其中一个焦斑可以在另外一层进行探测，如图 3.3 所示。图中心点表示谱线位置，圆圈表示探测器位置；小方块表示感光元，灰色圆圈表示封装外壳。这种情况下，相邻两条谱线的间距大于 1mm，相邻 4 条谱线间距和大于 10mm 即可满足要求，整个装置的体积缩减到 1/20（0.5 米成像焦距、0.3 米成像孔径）。

为了保证分层的效果，需要准直光束完全覆盖光栅，并且组合凹面镜的整体高度不得大于光栅，整个光路的限制光阑实际上由光栅边框和组合凹面镜边界共同决定。

此外，计算表明，波长差最小的谱线对（1P11 和 2P8），其色散角比其它相邻谱线间的色散角小一个数量级，放弃这对谱线的分立测量可进一步缩小仪器尺寸到 1/10，因此方案中只使用一个探测器来测量这对谱线的光强和。事实上，能够出现的谱线，其转动量子数通常比较集中，因此根据相邻谱线的振转量子数，可以判断这一位置实际对应的谱线。

§3.3 验证方法

为了验证分层接收方法的可行性，分析影响成像效果的主要因素，本文设计了一套验证方法。

1. 试验光路

试验装置光路图如图 3.4 所示，从左上方入射的 HF 激光光束经凹凸透镜组成的准直扩束系统后照射到光栅上，不同波长的谱线光束以不同的角度衍射，再经组合凹面镜，会聚到接收板上形成三层焦斑阵列。

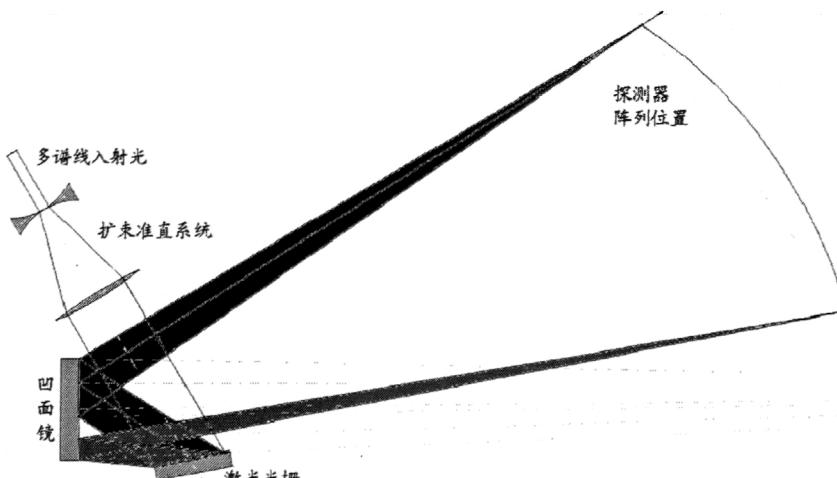


图 3.4 试验装置示意图

由于试验重点在于检验接收系统的分层效果，装置简化了其他分系统，以便于分析影响成像结果的主要因素。

- (1) 准直扩束系统采用简单的凹、凸透镜组合。
- (2) 接收系统暂未使用探测器，选用热敏纸探测；漫反射屏接收，热像仪采集；以及烧蚀有机玻璃板三种方法观察分层效果。
- (3) 暂未考虑校正像差，观察哪种像差对成像结果的影响最大。

2. 装校调试方法

HF 激光处于红外波段，肉眼不可见，为了便于各组件的装校调试，可以充分利用调腔 He-Ne 激光（波长 $0.6328 \mu m$ ，为红色可见光）。它与 HF 激光输出光束同轴，根据 2.1 节中光栅的色散原理可知，其第 4、5 级衍射光线相当于波长分别为 $0.6328 \times 4 = 2.5312 \mu m$ 、 $0.6328 \times 5 = 3.164 \mu m$ 的一级衍射光线，而 HF 激光的波长范围是 $[2.5507, 3.0958] (\mu m)$ ，它的一级衍射范围正好在上述区间内。这种情况下，He-Ne 调腔光的 4、5 级衍射焦斑就相当于 HF 激光谱线成像区间的边界。采用该方法可以较为方便地调节接收板位置，并标记出焦斑位置的范围。

对 0 级衍射光（以平均光栅表面为镜面的反射光束）的判断可以通过耦合其他颜色光束来检验，当耦合了小型固体激光器的绿色光束时，二者重叠在一起的光斑就是 0 级衍射光斑。以 0 级衍射光束为界，光强较强的一边为正级次。

另外，试验装置的成像系统处于离轴状态，存在较明显的像散，向远离成像物镜的方向移动接收板，调腔光的 4、5 级衍射像斑将会从一条竖直的线状光斑变化为椭圆形光斑，进而变为一条水平焦线。在本次试验里，选择折衷情况，取圆形焦斑作为焦点。根据像差理论，这些焦点组成的曲面是一个圆柱面。

3. 波长的标定方法

由于试验中存在多种误差因素，单纯靠理论计算确定焦斑对应的谱线波长是不够准确的，必须和标定的方法相结合。所谓标定方法是指通过波长已知的参考焦斑来确定出位置与波长之间的对应关系，这样根据实际出现焦斑的位置就可以推断出对应的谱线。

根据 2.1.2 节的讨论可知，对于平面衍射光栅，谱线衍射角对波长的微分不是一个常数，但是它连续变化，因此采用多项式拟合的方法可以比较精确地确定谱线波长与位置之间的关系。

在现有条件下，可以在激光器输出窗口和准直镜之间加一块分光棱镜，将一束波长为 $0.532 \mu\text{m}$ 的绿色激光耦合入光路，使它与 He-Ne 激光共轴。这时，绿光的第 4、5 级衍射光线与波长分别为 $2.128 \mu\text{m}, 2.66 \mu\text{m}$ 的一级衍射光线共线。计算表明，用绿光和 He-Ne 红光的 4、5 级衍射焦斑共 4 个参考点做 2-3 阶拟合就可以达到较好的效果。

§3.4 试验结果分析

验证试验在一台电激励 HF 化学激光器上完成，器材包括凹透镜、凸透镜、激光平面反射光栅、组合凹面镜、热敏纸、黑色木板、有机玻璃板、普通红外热像仪等，参数如表 3.3 所示：

表 3.3 试验装置元件参数表

元件	材料	规格参数
凹透镜	CaF_2 无镀膜	球面双凹 $\phi 20; R = 30.9 \text{mm}; d = 2 \text{mm}$
凸透镜	CaF_2 无镀膜	球面双凸 $\phi 80; R = 276 \text{mm}; d = 3 \text{mm}$
衍射光栅	铜基底（镀金膜）	平面 $64 \times 64 \text{mm}^2; 420 \text{g/mm}$; $\theta_b = 26.45^\circ; \lambda_b = 2.15 \mu\text{m}$
凹面反射镜 $\times 3$	K9 玻璃镀金膜	球形凹面 $130 \times 16 \text{mm}^2; R = 1000 \text{mm}; d = 15 \text{mm}$
元件匹配参数		
凹、凸透镜间距	$f_2 - f_1$	292.78 mm
凸透镜与光栅间距	L	200 m
光栅摆放角度	θ_i	20°
光栅与凹面镜最近边缘点距离	l	107 mm
凹面镜与光栅夹角	θ	81.73°

实物摆放如图 3.5 所示：

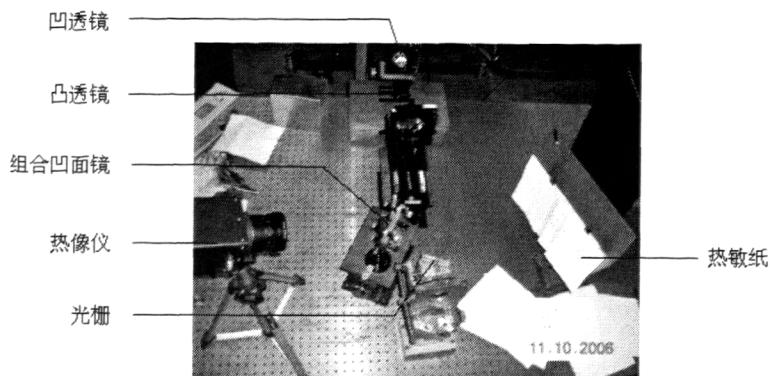


图 3.5 试验装置实物图

1. 分层接收试验

开启激光器，出光功率 34W，用热像仪观察，图像如图 3.6 和图 3.7 所示：

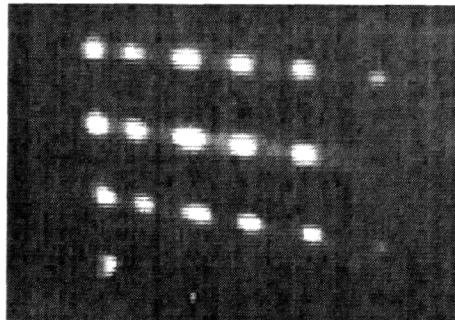


图 3.6 黑色木板做漫反屏

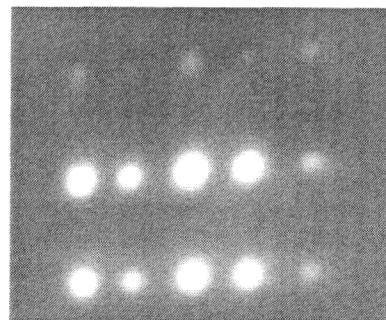


图 3.7 普通打印纸做漫反屏

试验中使用的是长波热像仪，它记录的不是 $[2.5507, 3.0958]$ (μm) 波段的光斑实际形状，而是该光斑对漫反屏造成的热斑形状。而热斑受接收材料的影响较大：打印纸热积累效应较严重，黑板稍好，而采用铝板和普通玻璃则很难观察到热斑，因此图 3.6 和图 3.7 上的光斑形状仅作为参考。

出光功率 40W，用热敏纸和有机玻璃记录光斑，效果如图 3.8 和图 3.9 所示：

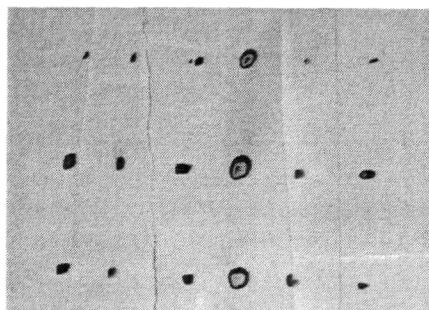


图 3.8 打印纸接收



图 3.9 烧蚀有机玻璃板

由于有些焦斑强度较弱，采用打印纸记录时，印记很不明显，试验中在这些地方覆盖了热敏纸。采用有机玻璃接收时，效果较好。

在激光器工作期间，通过一块半透半反镜，将输出光束分出一路引入单色仪。单色仪在激光器出光期间保持工作状态，持续扫描，多次扫描得到的结果较为一致，其中一组数据如图 3.10 所示：

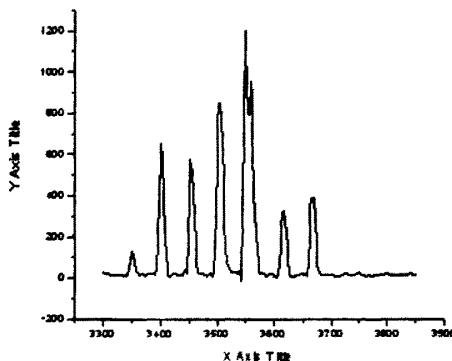


图 3.10 单色仪同步扫描结果

图中横坐标单位为波数 (cm^{-1})，扫描结果为 7 条主要谱线，与成像结果相符。由于谱线强度随时间变化，图中纵坐标表示的相对强度仅作为参考。

总结上述记录结果，有如下特点：

- (1) 都出现了 3 层光斑，每层 6-7 个斑点，与单色仪扫描结果相符。每一层的强度分布相同，从左至右 2、4、5 较强，其中 4 最强，2 次之。
- (2) 3 层光斑中，上中两层斑点距离 30.5mm，中下两层距离 29.1mm，没有严格相等。这是由于三块凹面镜的法线平行度不够造成的。
- (3) 同一谱线位置，不同分层上的光斑强度不同，上层较弱，中层较强。这是由于初始入射光束的强度分布不均匀导致的。如果要正确采集信号，将需要标定出层与层之间相对强度的比率。
- (4) 成像质量从左到右逐渐变差。这是由于所出现的 7 条谱线集中于整个工作光谱区波长较短的一边，而场曲造成系统焦面是一个近似圆柱面，调试过程只能保证接收平面与焦面在 He-Ne 激光的 4、5 级衍射焦斑位置重合，因此中间谱线（对应试验图像中右端谱线）的成像质量较差。
- (5) 在强度较弱的第 5 个焦斑处，能量最强点没有处于斑点中心，这导致焦斑位置的测量存在误差。

2. 波长的标定试验

He-Ne 激光与固体激光耦合后，引入试验装置，成像的光斑位置如图 3.11 所示：

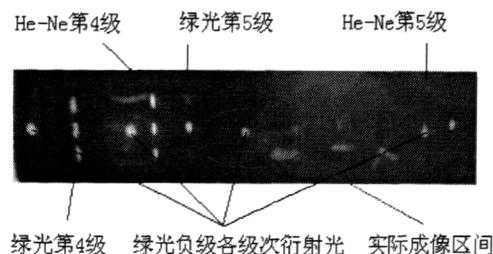


图 3.11 波长标定方法成像光斑

图中单层光斑是绿光的负级次衍射光，它经过光栅后直接照射到接收板上，属于杂散光，与参考点无关。

在有机玻璃接收板上标好这 3 个参考点的位置后，取下棱镜，开启 HF 激光器，在同一个接收板上记录谱线焦斑位置。拟合曲线与试验实测数据如图 3.12 所示：

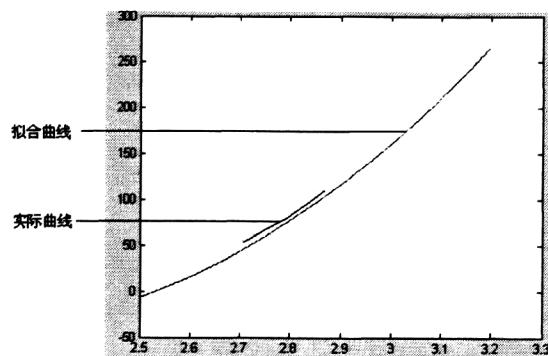


图 3.12 拟合曲线与实测数据

由于参考点的坐标零点是 He-Ne 光的 4 级衍射焦斑，而实际光斑的坐标起点是 1P1，因此两条曲线的纵坐标有一个固定差值，同时由于试验中参考点少，光斑像差大，导致实测数据存在误差，与计算结果不能严格相符，但是可以看出变化趋势是一致的。

3. 试验结论

首先，分层接收原理可行，该成像方法能够将输出光束中所有出现的谱线分层分离，层与层之间焦斑分布情况相同。

其次，该方法如实地反映了激光器输出光束的谱线成分。试验中出现了 7 个主要的谱线光斑，与单色仪反复扫描的结果相吻合。事实上，对于多谱线激射，运转于部分反转状态的 HF/DF 化学激光器，各支谱线出现的几率不同，转动量子数比较低和比较高的谱线都不容易发生激射。在本次试验中，增益介质有 40cm 宽，耦合输出率 30%，激光器工作在饱和状态下，这时候由于谱线竞争的存在，激光器输出的谱线必然会少于理论计算的 24

条。

最后，试验证明谱线波长可以通过对参考点进行拟合的方法来判断，但是要得到精确的数据需要更好的成像质量和更多的参考数据点。

影响最终测量结果的主要因素是像差。场曲、像散、慧差的存在导致平板接收的焦斑形状、尺寸和均匀性均不够理想。另外，初始入射光束的强度分布不均匀也是因素之一，它造成各层谱线的强度不等。

第四章 系统结构设计与分析

系统的结构设计决定于仪器的光学要求。通过 3.5 节的分析，多通道光谱仪应当重点满足的光学要求有：比较大的平直谱面、较小的像散和彗差、强度分布经过标定的初始入射光束。

本章首先通过像差理论分析结构参数对成像效果的影响，然后根据前述光学要求对参数进行优化，在此基础上计算成像效果，最后对相应的分系统进行设计。

§4.1 系统结构选择

系统结构形式是后续设计的基础，本文选用的是各元件主轴位于同一水平面的反射式结构，考虑因素如下：

- (1) 设计要求的工作光谱区位于中红外波段，在这个波段内很难找到高透过率的透镜材料，而适当镀膜的反射式成像系统却适用于任意波段。考虑到 HF 激光的功率较高，成像系统中各反射光学元件应镀金膜。其他分系统如果用到透镜应选择 CaF_2 作为材料，该材料在这一波段内透射率高于 93%。
- (2) 衍射光栅的角色散变化缓慢，不能使透射式成像系统的焦面倾斜变化均匀，也就是说，色差将使透射系统无法获得平直谱面，而反射系统不存在色差。
- (3) 一次拍取大量谱线的多通道光谱仪，需要较大口径的成像物镜，而晶体材料的大口径厚透镜难以制造，更难以保证表面曲率质量，因此选择相对容易加工的反射镜。
- (4) 元件主轴位于同一竖直面内有利于缩减系统体积，但是这种结构对长谱面成像时成像质量较差，谱面倾斜并且弯曲严重，尤其是装配难度较高，因此选择水平结构。

根据 2.2 节的讨论，处于离轴状态的成像系统仅靠一块凹面镜是无法校正彗差与场曲的，需要将系统作为一个整体来考虑，通过调整两部分凹面镜以及光栅之间的匹配参数来校正像差。这一类系统的典型结构有 Ebert-Fastie 系统、Czerny-Turner 系统和凹面光栅系统。其中适合于多通道测量的结构是水平非对称 Czerny-Turner 结构，该结构包括狭缝、准直凹面镜、平面衍射光栅、组合成像凹面镜等光学元件，光路呈“M”形，俯视图如图 4.1 所示。

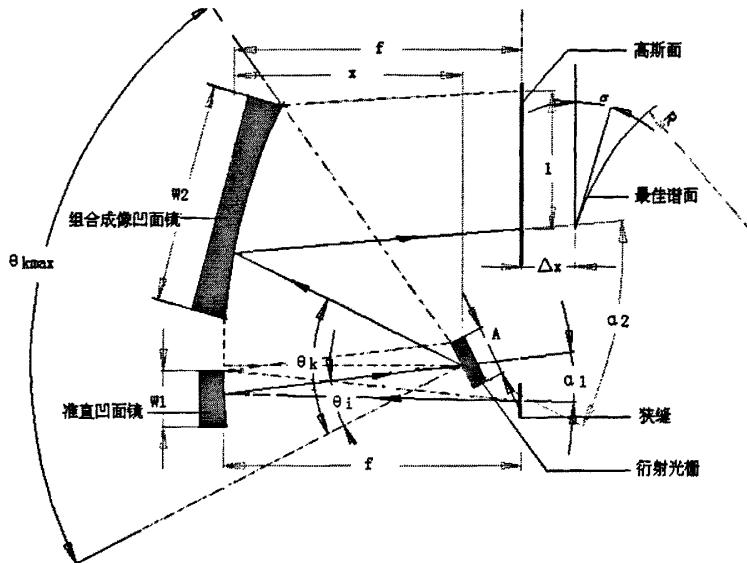


图 4.1 水平非对称 C-T 结构俯视图

HF 化学激光对该系统成像后，在空间上形成三层分布相同的焦斑阵列，这些焦斑构成了光学系统的最佳谱面，它是一个与高斯焦面的距离为 ΔX ，夹角为 σ ，底面半径为 R 的圆柱面。理想情况下，该谱面平直 ($R = \infty$)，谱面上的焦斑阵列层与层之间分布相同、强度相若，每个焦斑的光学尺寸都在 $1 \times 1 mm^2$ 以内。

§4.2 光学元件参数选择

光学元件参数包括准直凹面镜的焦距 f_1 和宽度 W_1 、成像凹面镜的焦距 f_2 和宽度 W_2 以及成像范围的宽度 $2l$ 。

本文选取两块凹面镜焦距相同，即 $f_1 = f_2$ ， f_2 由所需要的线色散率公式确定。

$$\frac{\Delta l}{\Delta \lambda} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda} \frac{f_2}{\cos \sigma} \quad (4.1)$$

采用探测器感光元面积 $1 \times 1 mm^2$ ，因此最小分辨距离 $\Delta l \geq 1 mm$ ；相邻谱线中波长差为次最小的两条谱线是 2P9 和 1P12，即次最小波长差 $\Delta \lambda = 3.4 nm$ 。根据 2.2 节的讨论，采用平面衍射激光光栅作为色散元件时，如果希望得到尽量大的衍射角，应尽量减小入射角，而最小入射角为 20° ，在这种情况下，谱线 2P9 和 1P12 的角色散为 $\Delta \varphi = 0.18^\circ$ 。将上述分析代入(4.1)式，可得 $f_2 \geq 325 mm$ 。

尽管成像凹面镜的焦距越长，获得的焦斑线线色散率越大，但是长焦距意味着需要更宽成像孔径才能将整个光谱衍射区间收入，而过宽的凹面镜不便于集成并且容易折断。不同参数的凹面镜与成像效果之间的关系如表 4.1 所示。

表 4.1 成像凹面镜参数与成像效果关系

成像凹面镜焦距 $f(\text{mm})$	成像凹面镜宽度 $W_2(\text{mm})$	最小焦斑间距 $\Delta l(\text{mm})$
325	220	1
500	340	1.5
650	>400	2

综合考虑后，选择 $f = 500\text{mm}$ 的成像凹面镜，此时 $W_2 = 340\text{mm}$ 。准直凹面镜的宽度 W_1 应略大于光栅宽度 64mm 。成像范围： $2l > (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \frac{dl}{d\lambda} = 300\text{mm}$ （线色散率并非随波长不变）。

§4.3 系统结构参数选择

各元件之间的匹配参数需要通过像差分析来确定。根据 2.2 节介绍的像差分析步骤，首先应推导光线追迹方程，以便于计算谱线成像位置以及像差系数；然后具体分析各种像差。

4.3.1 谱线位置计算

为了便于编程，将第 k 条谱线的参数代入反射系统光线追迹的通用公式，得到谱线统一的光线方程：（参看图 4.1）

$$\left\{ \begin{array}{l} U_i = \theta_k - \varphi \\ \omega = \arcsin\left(\frac{2f-L}{2f}\sin U_i\right) \\ -U_k' = 2\omega - U_i \\ -L_k' = \left(\frac{\sin \omega}{\sin U_k'} - 1\right)r \\ l_k = \frac{\tan U_k'}{\cos \sigma}(-L_k' + f) \\ \Delta l = |l_{k+1} - l_k| \end{array} \right. \quad (4.2)$$

(4.2)式中下标 i 表示凹面镜的入射光线，下标 k 表示第 k 条谱线经凹面镜后的成像光线； L 是光栅到系统光轴顶点的距离； l_k 是不同谱线的成像坐标； Δl 是相邻谱线间距； σ 为最佳谱面与高斯谱面的倾角，一般不会太大，其具体计算在后面的章节阐述。

$f = f_1 = f_2$ 是凹面镜焦距，根据 4.2 节的讨论，取 $f = 500\text{mm}$ 。 φ 为光栅法线与整个系统主光轴夹角，其取值要保证像差校正的中心谱线落在激光器工作谱线区之内，并且光栅尺寸不会遮挡准直光路，即：

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = 2\omega_{\text{准直}} = 2 \arcsin \left[\frac{2f - L}{2f} \sin(\theta_i - \phi) \right] \\ \gamma^3 \alpha_1 < 2\omega_{k\max} \\ \tan \frac{\alpha_1}{2} > \frac{W}{2L} \end{array} \right. \quad (4.3)$$

(4.3)式中 γ 是系统角放大率, 满足 $2\omega_k = \gamma^3 \alpha_1$ 的谱线是像差被校正的中心谱线; α_1 是射入准直凹面镜的主光线和由它反射后的光线所构成的夹角; α_2 是聚焦于谱面中心的主光线与它由成像凹面镜反射前的光线构成的夹角; W 是光栅的有效宽度。

选定了合适的 ϕ 之后就可以根据(4.2)式计算出谱线位置, 结果如图 4.2 所示:

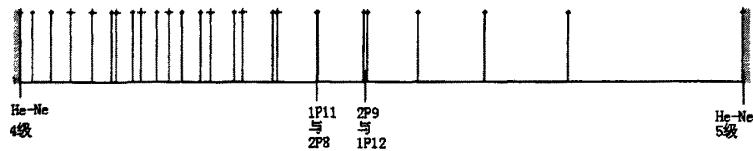


图 4.2 谱线位置

受像差影响, 实际谱线位置会有偏差, 位置与波长的准确对应关系还需要利用标定的方法得到。

4.3.2 像差分析

根据 2.2.3 节的讨论, 利用光线追迹方程, 可以计算出初级像差系数并推导出各种像差的表达式。

对于球面凹面镜, 光轴的选择不影响像差分布, 因此单根谱线的成像光路具有代表意义, 通过对它的分析, 可以推论出整个光学系统的像差分布。

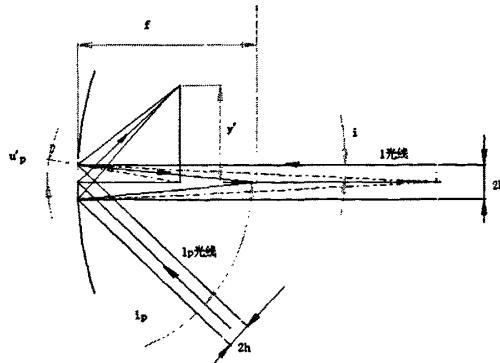


图 4.3 单根谱线的近轴光线

选取成像物镜上的光斑中心和凹面镜球心的连线作为光轴, 谱线的近轴光线如图 4.3 所示。图中无下标参数对应近轴光线 l , 下标为 p 的参数对应轴外近轴主光线 l_p , 取

$$u_p' = \sin U_p'.$$

准直入射时, $L = \infty, u = 0, i = \frac{h}{2f}, u' = -\frac{h}{f}, i_p = \omega$; 在相对孔径较小, 即 i 较小的情况下, $u_p' = u' = -(2i - u) = -2i$; 在镜面系统中, $i = -i', n = -n' = 1$; 最后将各谱线成像相对孔径记为 A ($A = \frac{2h}{f} = \frac{W \cos \theta_k}{f}$)。

将上述分析代入镜面系统像差通用公式, 首先得到光学系统的拉赫不变量 j , 然后可以推出方案中不同种类像差的表达式:

(1) 球差:

$$\begin{cases} j = m\eta_0 u = -ny_0' u_p' = i_p f u_p' = i_p f 2i \\ S_I = hni(i' - u)(i - i') = hi(-i)2i = -\frac{h^4}{4f^3} \end{cases} \quad (4.4)$$

代入垂轴几何像差公式(2.19), 并令 $S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0$, 得到球差造成的弥散斑坐标:

$$\begin{cases} TA_y = \frac{1}{2nu'} S_I y (y^2 + z^2) \\ TA_z = \frac{1}{2nu'} S_I z (y^2 + z^2) \end{cases} \quad (4.5)$$

取 $y=1, z=0$, 得到弥散斑半径:

$$\rho_{\text{球差}} = \frac{1}{2n'u'} \sum_i^k S_I = \frac{1}{2h/f} S_I = \frac{1}{64} A^3 f \quad (4.6)$$

(2) 蕈差:

$$\begin{cases} j = y' u_p' = i_p' f u_p' = -i_p f 2i \\ \frac{i_p}{i} = \frac{-j 2f}{h^2} \\ S_{II} = hni_p(i' - u)(i - i') = S_I \frac{i_p}{i} = \frac{j h^2}{2f^2} \end{cases} \quad (4.7)$$

代入式(2.19), 并令 $S_I = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0$, 得到蕈差弥散斑坐标:

$$\begin{cases} TA_y = \frac{1}{2nu'} S_{II} \eta (3y^2 + z^2) = \frac{i_p}{4} \frac{h^2}{f} \eta (3y^2 + z^2) \\ TA_z = \frac{1}{2nu'} S_{II} \eta (2yz) = \frac{i_p}{4} \frac{h^2}{f} \eta (2yz) \end{cases} \quad (4.8)$$

根据 2.2.3 节的讨论，彗差造成的弥散斑形如彗星，最宽处为 $2\rho_{\text{彗差}}$ ，径向长度 $3\rho_{\text{彗差}}$ ($\rho_{\text{彗差}} = \frac{1}{2nu} S_{II} \rho^2 \eta$)。分别取 $\eta, y=1, z=0$ 和 $\eta, z=1, y=0$ 则有：

$$\begin{cases} TA_y = 3 \frac{i_p}{4} \frac{h^2}{f} = \frac{3}{16} A^2 f i_p = \frac{3}{16} A^2 f \omega = 3\rho_{\text{彗差}} \\ TA_z = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

(3) 像散与场曲：

$$\begin{cases} S_{III} = hni_p^2(i'-u)(1-\frac{n}{n'}) = S_I (\frac{i_p}{i})^2 = -\frac{j^2}{f} \\ S_{IV} + S_{IV'} = S_I (\frac{i_p}{i})^2 + j^2 \frac{n'-n}{n'n r} = S_{III} + j^2 \frac{1}{f} \end{cases} \quad (4.10)$$

当 i 较小的时候，可以近似认为 $S_{III} + S_{IV} = 0$ 。

像散和场曲是由于相同的物理因素引起的，但是二者互相独立，校正场曲不一定能校正像散，反之亦然。

首先讨论像散，令 $S_I = S_{II} = S_V = 0$

$$\begin{cases} TA_y = \frac{1}{2nu} [(3S_{III} + S_{IV})\eta^2 y] = \frac{f}{2h} \frac{2j^2}{f} \eta^2 y = i_p^2 h \eta^2 y \\ TA_z = \frac{1}{2nu} [(S_{III} + S_{IV})\eta^2 z] = 0 \\ (x_t - x_s) = \frac{1}{nu^{i^2}} S_{III} \eta^2 = \frac{f^2}{h^2} \frac{j^2}{f} \eta^2 = i_p^2 f \eta^2 = f \omega^2 \end{cases} \quad (4.11)$$

取 $\eta, y=1, z=0$ 和 $\eta, z=1, y=0$ ，则有像散线段长度表达式

$$\begin{cases} TA_y = i_p^2 h = \frac{1}{2} i_p^2 \frac{2h}{f} f = \frac{1}{2} Af i_p^2 = \frac{1}{2} Af \omega^2 \\ TA_z = 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

它是轴向像散与不同方向上的相对孔径 A 乘积，在色散面内，取 $\eta, y=1$ ，像散线段：

$$l_{\text{像散1}} = 2TA_y = Af \omega^2 = W \cos \theta_k \omega^2 \quad (4.13)$$

在竖直方向上，凹面镜被分为 n 层，孔径为 W/n ，故竖直方向的焦线长度为：

$$l_{\text{像散2}} = Af \omega^2 = \frac{1}{n} W \omega^2 \quad (4.14)$$

再看场曲，它是实际像面与高斯焦平面之间的偏差，需要在系统主光轴下进行分析。主光轴下 i 光线和 i_p 光线示意图如下：

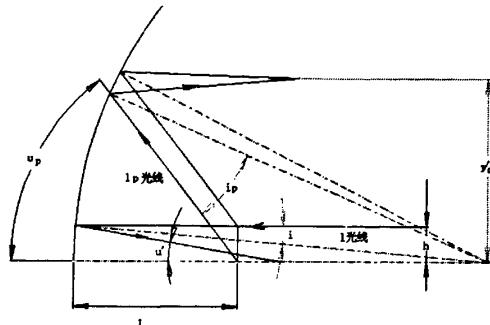


图 4.4 系统主光轴对应的近轴光线

变换坐标系后产生了如下变化：

$$\begin{cases} \eta_0 = h \\ j = \eta_0 u = h i_p \frac{2f}{2f - L} = \frac{hi_p}{\chi} \\ \chi = \frac{2f - L}{2f} \\ \frac{i_p}{i} = \chi \frac{j}{h} \frac{2f}{h} = \chi \frac{j2f}{h^2} \end{cases} \quad (4.15)$$

由于球差是对称存在的，所以光轴的选择不影响球差分布系数，将式带入象差系数可得：

$$\begin{cases} S_{III} = S_I \left(\frac{i_p}{i} \right)^2 = -\frac{j^2}{f} \chi^2 = -\frac{j^2}{f} \left(1 - \frac{x}{2f} \right)^2 \\ S_{IV} = \frac{j^2}{f} \end{cases} \quad (4.16)$$

在弧矢面内，成像光束对称分布，所以受场曲影响的像面是一个柱面，根据 2.2.3 节的讨论，其底面曲率半径为 R ：

$$R = \frac{j^2}{3S_{III} + S_{IV}} \quad (2.24)$$

如果希望得到平直的像面，需要 $R = \infty$ ，此时 $3S_{III} + S_{IV} = 0$ ，故：

$$\begin{cases} \chi = \frac{2f - L}{2f} = \frac{1}{\sqrt{3}} \\ L = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)f = 0.85f \end{cases} \quad (4.17)$$

因此，色散元件到系统光轴顶点的距离 $L = 0.85f$ 时，谱线焦面为平面。此时系统最佳谱面与高斯谱面的倾角 σ 为

$$\sigma = \left[1 - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{x}{2f} \right) \right] \alpha_2 \quad (4.18)$$

综上所述，成像系统存在三种主要的像差，由它们造成的弥散斑与系统结构参数之间的关系为：

$$\begin{cases} \rho_{\text{球差}} = \frac{1}{64} A^3 f \\ \rho_{\text{彗差}} = \frac{1}{16} A^2 f \omega \\ I_{\text{像散}} = A f \omega^2 \end{cases} \quad (4.19)$$

其中 W 为光栅宽度， A 为各谱线成像光束的相对孔径， ω 为各谱线衍射光束的中心光线照射到成像凹面镜上的入射角，参见光路计算公式(4.1)。

实际系统的衍射角 θ_k 较大，即相对孔径 A 较小，而各谱线成像入射角 ω 较大，因此对总像差贡献较大的是像散和彗差。

4.3.3 成像系统总像差

实际系统的总像差包括理想情况下，各光学元件严格同心共轴时由结构决定的像差，以及实际装配时由光学表面和理想球心、参考轴发生偏离而带来的像差。

1. 共轴同心系统

理想装配条件下，成像系统的总像差由准直镜和成像镜共同决定，考虑到转面倍率，它可以表示为：

$$\begin{cases} TA_y = \gamma \overline{TA'_{y1}} \frac{f_2'}{f_1'} + TA'_{y2} \\ TA_z = \overline{TA'_{z1}} \frac{f_2'}{f_1'} + TA'_{z2} \end{cases} \quad (4.20)$$

式中 $f_1 = f_1' = f_2 = f_2'$ ， $\overline{TA'_{y1}}, \overline{TA'_{z1}}$ 是准光物镜反向光路的垂轴像差， γ 是成像系统的角放大率。

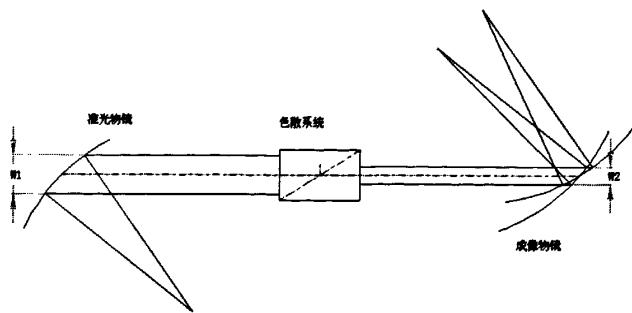


图 4.5 多通道光谱仪等效光路图

如图 4.5 所示，起转面作用的色散系统，其垂轴放大率和角放大率可表示为：

$$\begin{cases} \beta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W \cos \theta_k}{W \cos \theta_i} \\ \gamma = \frac{1}{\beta} = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_k} \end{cases} \quad (4.21)$$

代入(4.20)式，可得到共轴同心系统的总像差：

(1) 球差：

球差总是叠加，但是它对总像差的贡献较小，可以近似认为

$$\sum \rho_{\text{球差}} = \frac{\sqrt{2}}{64} A^3 f \quad (4.22)$$

(2) 蕈差：

由于系统蕈差与 ω 成正比，而准直物镜和成像物镜的 ω 异号，二者的蕈差可以在一定程度上相互抵消。

$$\begin{cases} \rho_{2k} = \frac{1}{16} \left(\frac{W_k}{f}\right)^2 \omega_{2k} f = \frac{1}{32} \left(\frac{W \cos \theta_k}{f}\right)^2 \alpha_{2k} f \\ \rho_1 = \frac{1}{16} \left(\frac{W_1}{f}\right)^2 \omega_1 f = \frac{1}{32} \left(\frac{W \cos \theta_i}{f}\right)^2 \alpha_1 f \\ 3\rho_{\text{残余}} = 3(\rho_{2k} - \gamma_k \rho_1) \approx 3\rho_1 \left(\frac{\alpha_{2k}}{\alpha_1} - \gamma_k^3\right) / \gamma_k^2 \end{cases} \quad (4.23)$$

可以看出，当 $\frac{\alpha_{2k}}{\alpha_1} = \gamma_k^3$ 时，对于选定的波长 λ_k ，相应的蕈差抵消为零，两侧谱线的蕈差在一定程度上抵消。

(3) 像散:

系统像散与 ω^2 成正比, 所以像散总是叠加; 在竖直面内, 角放大率为 1, 因此:

$$\begin{cases} \sum I_{\text{像散1}} = \gamma h_1 \omega_1^2 + h_{2k} \omega_k^2 \\ \sum I_{\text{像散2}} = \frac{W}{n} (\omega_1^2 + \omega_k^2) \end{cases} \quad (4.24)$$

2. 偏心系统

实际试验装置的光学表面中心对光轴的偏离有两种情况: 平移 δ 和转动 α 。由光学表面转动引起的球心偏离量为 $\delta' = r\alpha$, 这样可以认为平移和转动同时存在的情况等效于球心和表面同时平移 δ , 另外附加表面平移 Δd 。

$$-\Delta d = r(1 - \cos \alpha) \approx \frac{1}{2} \delta \alpha \quad (4.25)$$

由于 δ, α 都是小量, 故 Δd 是二级小量, 因此一般情况下, 偏心情况仅讨论平移, 即 y, η 的增量, 所带来的像差增量。

与像差系数处理方法相同, 将波像差的表达式对 y, η 微分, 得:

$$\begin{cases} 2\Delta W = S_2(y^2 + z^2)y + S_3y^2\eta + \frac{1}{2}(S_3 + S_4)(y^2 + z^2)\eta + S_5y\eta^2 + S_0\eta^3 \\ S_2 = S_I\Delta y + S_{II}\Delta\eta \\ S_3 = 2S_{II}\Delta y + 2S_{III}\Delta\eta \\ S_4 = 2S_{IV}\Delta\eta \\ S_5 = (3S_{III} + S_{IV})\Delta y + 3S_V\Delta\eta \\ S_0 = S_V\Delta y \end{cases} \quad (4.26)$$

将(4.26)式对 y 和 z 求偏微分, 得到几何像差表达式:

$$\begin{cases} 2nu'\Delta TA_y = \frac{\partial W}{\partial y} = S_2(3y^2 + z^2) + (3S_3 + S_4)y\eta + S_5\eta^3 \\ 2nu'\Delta TA_z = \frac{\partial W}{\partial z} = S_2(2yz) + (S_3 + S_4)z\eta \end{cases} \quad (4.27)$$

由此可见, 由偏心带来的像差也可以类似地分为彗差、像散、场曲、畸变, 分别对应系数 $S_2 - S_5$, 给定偏心量 δ 就可以计算出像差系数的变化值。

在孔径较小的情况下, S_I 较小, 这样 $\sum S_{II}$ 如果被校正为零, 则 $\sum S_2$ 也被近似校正为零, 即 $\frac{\alpha_{2k}}{\alpha_1} = \gamma_k^3$ 时, 同心彗差和非同心彗差都将被校正。此时中心波长谱线的像点和圆孔入射点具有“共点性”, 孔径中心、像场中心、光栅中心因不共线而导致的非同心彗差可以

有相当程度地抵消。

只有非同心像散不可忽略，因此，实际像散线段的长度还会有一定增加。

3. 成像系统的总像差

编程计算各种参数组合对应的像差，结果表明它的选择有一定限制。

光栅常数大于 430g/mm 则色散过大，部份谱线的衍射角将大于 90°；常数小于 400g/mm 则需要焦距大于 500mm 的成像凹面镜才能保证必要的色散。因此，常数为 420g/mm 的光栅比较合适。

由于通常光栅产品的尺寸在 $60 \times 60\text{mm}^2$ 左右，准直光路的入射角 α 不能小于 7°；同时要保证校正彗差的中心波长落在工作谱线区间内， α 不能大于 9°，因此 α 取 8° 比较合适。

计算优化参数的程序界面如图 4.6 所示，基于该参数组合得到的谱线成像数据如表 4.2 所示。

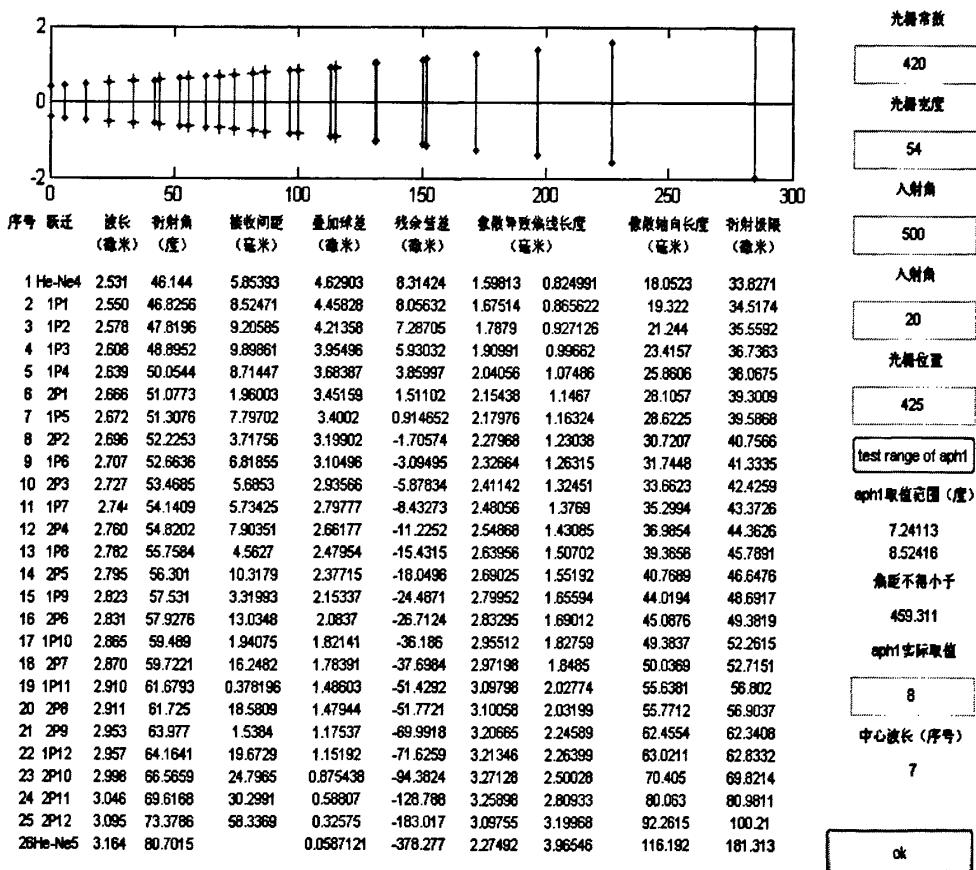


图 4.6 多通道光谱仪像差分析程序界面

表 4.2 多通道光谱仪光谱成像数据

序号	跃迁	波长 (μm)	衍射角 θ_k (度)	接收间距 (mm) R=500mm	残余慧差 (μm)	叠加球 差 (μm)	存在像散时的 谱线长度 (mm)		接收间距 (mm) R=325mm
							存在像散时的 谱线长度 (mm)	存在像散时的 谱线长度 (mm)	
1	He-Ne4	2.5312	46.14		13.0781	4.6300	1.7297	0.8812	
2	1P1	2.5507	46.83	6.1087	12.8173	4.4572	1.8140	0.9258	3.5193
3	1P2	2.5787	47.82	8.7503	12.0398	4.2135	1.9354	0.9922	5.0728
4	1P3	2.6084	48.90	9.5257	10.6511	3.9538	2.0678	1.0678	5.5669
5	1P4	2.6397	50.05	10.1188	8.5547	3.6849	2.2077	1.1519	5.9676
6	2P1	2.6667	51.08	9.0408	6.1387	3.4510	2.3314	1.2302	5.3817
7	1P5	2.6727	51.31	2.0158	5.5300	3.3997	2.3587	1.2481	1.2067
8	2P2	2.6963	52.23	8.0523	2.8433	3.1980	2.4667	1.3210	4.8453
9	1P6	2.7074	52.66	3.7573	1.4496	3.1057	2.5164	1.3558	2.2751
10	2P3	2.7275	53.47	7.0667	-1.4134	2.9354	2.6083	1.4226	4.3043
11	1P7	2.744	54.14	5.8342	-4.0158	2.7979	2.6825	1.4790	3.5792
12	2P4	2.7604	54.82	5.9107	-6.8733	2.6618	2.7560	1.5375	3.6507
13	1P8	2.7826	55.76	8.1527	-11.1815	2.4792	2.8540	1.6200	5.0774
14	2P5	2.7952	56.30	4.6739	-13.8443	2.3773	2.9083	1.6683	2.9335
15	1P9	2.8231	57.53	10.6192	-20.4215	2.1535	3.0259	1.7808	6.7289
16	2P6	2.8319	57.93	3.4452	-22.7141	2.0833	3.0621	1.8181	2.2028
17	1P10	2.8656	59.49	13.3968	-32.3803	1.8212	3.1933	1.9666	8.6614
18	2P7	2.8705	59.72	1.9698	-33.9038	1.7842	3.2111	1.9889	1.2868
19	1P11	2.9103	61.68	16.7283	-47.9311	1.4859	3.3465	2.1830	11.0721
20	2P8	2.9112	61.73	0.4254	-48.3138	1.4787	3.3496	2.1881	0.2850
21	2P9	2.9539	63.98	19.0702	-66.8666	1.1750	3.4629	2.4192	12.9639
22	1P12	2.9573	64.16	1.5195	-68.4670	1.1524	3.4698	2.4380	1.0491
23	2P10	2.9989	66.57	20.2560	-91.6936	0.8750	3.5313	2.6944	14.2274
24	2P11	3.0462	69.62	25.3992	-126.6082	0.5878	3.5162	3.0286	18.5168
25	2P12	3.0958	73.38	30.9591	-181.4408	0.3257	3.3396	3.4507	23.6883
26	He-Ne5	3.1640	80.70	59.3254	-377.6423	0.0587	2.4465	4.2794	49.2153

将成像数据制作成效果图，如图 4.7 所示。

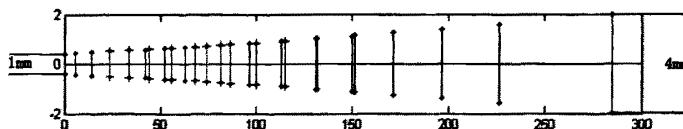


图 4.7 单层谱线焦斑阵列

结果表明，在该参数组合下，谱线成像为一排竖直线状焦斑的阵列，其横向尺寸 $<1mm$ ，最小间距 $>1.5mm$ ，满足光学要求。但是受像散影响，焦斑的纵向长度在 $1mm$ 到 $4mm$ 之间，需要进一步加以校正。

4.3.4 小结

通过本章的像差分析，对于结构参数的选择与相应的成像效果，有如下结论：

- (1) 水平非对称 Czerny-Turner 结构能够满足多通道光谱仪的光学要求；
- (2) 原则上两块凹面镜的焦距可以不同，但相同焦距的凹面镜，有助于简化结构；
- (3) 当色散元件和成像元件距离为 0.85 倍的焦距，即 $\frac{x}{f} = 0.85$ 时，成像系统的最佳谱面接近于平面；
- (4) 衍射方向，当 $\alpha_2 = \gamma^3 \alpha_1$ 时，选定中心谱线的彗差可以完全消除，附近谱线的彗差部分消除，残余彗差最多处约为 $181\mu m$ ，远小于探测器感光元尺寸。（ α_2 是中心谱线经光栅后的衍射光束与它经成像凹面镜后反射光束的夹角， α_1 是光栅入射光束与它经准直凹面镜后的反射光束的夹角， γ 为系统线色散率，当选择谱线 1P6 为重心波长时， $\gamma^3 = 3.7188$ ）
- (5) $\alpha_1 = 8^\circ$ 时，成像效果最佳。
- (6) 最佳谱面与理想的高斯像面之间存在夹角 $\sigma = \left[1 - \frac{3}{2}(1 - \frac{x}{2f})\right] \alpha_2$ 。
- (7) 整个光学系统的尺寸不超过 $500 \times 500 mm^2$ 。

§4.4 采集系统设计

根据 4.3.2 节的结论, 受像散的影响, 部分焦斑的纵向尺寸超过了感光元探测范围。本节通过对采集系统的设计来完成这一校正。

由纵向像散长度公式 $l_{\text{像散}} = \frac{W}{n} \omega^2$ (n 为分层数) 可知, 在不考虑衍射效应的情况下, 分层越多, 位于水平焦点位置的线状像斑, 其纵向长度越短。但是过多分层将导致矩形凹面镜过窄, 增加加工和装配的难度, 实际应用中只可选用 3-4 层。

更为有效的方法是采用柱面透镜 (CaF_2 材料) 来校正像散。在成像光路靠近像面的位置, 平行于像面和衍射面的方向上放置柱面透镜, 使竖直方向上的成像光束产生会聚; 在水平方向上, 像斑将只发生微小的平移。竖直方向成像光路如图 4.8 所示, 左图为原谱线成像效果, 右图为加入柱面透镜后的成像效果。

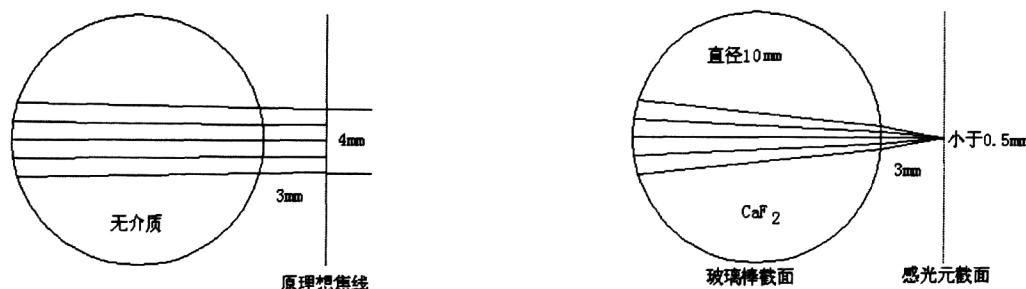


图 4.8 柱面透镜的会聚效果

经计算, 原成像光束通过直径 10mm 的柱面透镜后, 水平方向和竖直方向上的两个焦点将基本重合, 焦斑的纵向长度由 4mm 压缩至 1mm 以内, 宽度保持不变; 同时该像斑距离玻璃棒后表面 3mm, 稍大于探测器感光元与窗口之间的距离。

为了使采集系统便于调试, 设计了如下的结构:

(1) 将红外探测器窗口紧贴柱面透镜后封装, 作为一个探测模块, 如图 4.9 所示:

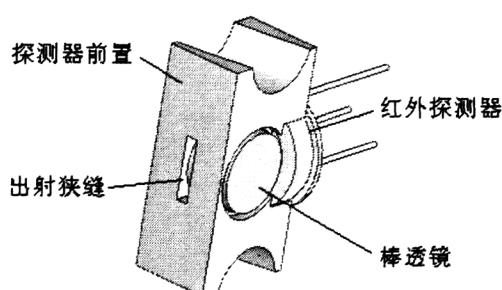


图 4.9 探测模块

(2) 通过滑杆将接收平面分为 3 层, 对应于谱线成像后的 3 层焦斑阵列, 探测模块在滑杆上可以自由滑动。根据 4.2 节的计算, 谱面与理想的高斯像面并不平行, 夹角 $\sigma \approx 11.5^\circ$, 因此在探测模块与滑杆之间设计了一个 12° 的夹角, 如图 4.10 所示:

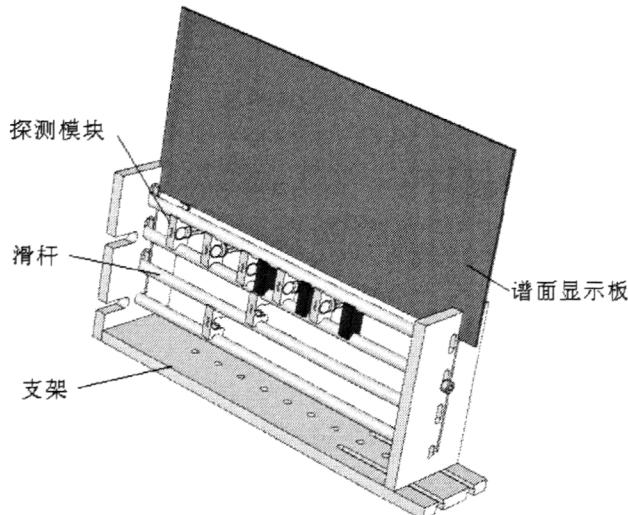


图 4.10 接收架

图中谱面显示板用于显示接收架与理想谱面的匹配程度, 其卡槽到滑杆的距离与探测器感光元表面到滑杆的距离相同, 换言之, 显示板的前表面正是探测器阵列的接收平面。当该平面与计算出的谱线最佳像面共面时, 接收架的位置就调节完毕。

使用时, 先将显示板放下, 调整接收架的位置, 使成像于显示板上的 He-Ne 调腔光的红色光斑达到最佳聚焦状态, 即三层两列清晰细锐的竖直线状光斑, 两列光斑位于显示板的两端, 每层光斑居于两条滑杆之间。调整完毕后将显示板抽出, 安放探测模块。

滑动模块从支架一端到另一端, 观察并记录信号出现尖峰的位置, 这个过程类似于单色仪通过转动光栅对光谱区的扫描, 如果与预想情况相符, 即可在各个尖峰位置固定探测模块, 进行多通道光谱探测。

§4.5 准直系统设计

为了控制准直光束的宽度、相位、光强, 提高像斑清晰度, 需要设计合适的准直系统。

近年来小型化光谱仪采用光纤探头作为光束引入装置, 不但使准直光束的均匀性校正效果较好, 而且大幅度的缩小了仪器尺寸, 减少了仪器装校调试工作。但是对于 HF 激光, 目前还没找到合适的光纤导入方法。

传统光谱仪器采用带中间成像的三透镜照明系统来准直扩束, 考虑到 HF 激光的输出光束本身就具有高度相干性和准直性, 本文采用单透镜系统来简化结构, 如图 4.11 所示。

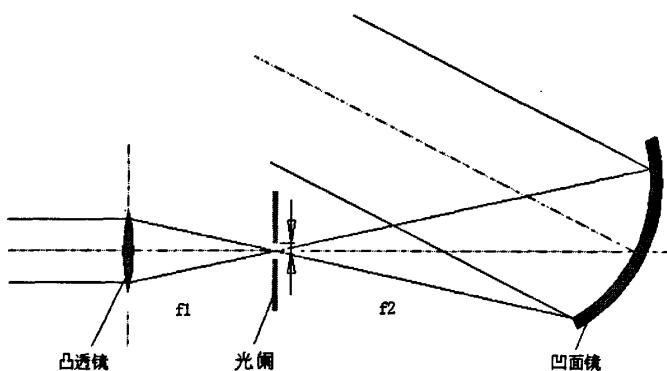


图 4.11 准直扩束系统

激光器输出光束经透镜后聚焦，相当于进行了一次傅利叶变换，选择合适宽度的光阑在焦点处将高阶空间频谱和杂散光过滤，这样得到的像斑清晰度大大提高。同时，光阑还可以控制入射光的光强和位置。

估算零基频宽度， $1.22 \frac{\lambda}{D} f = 1.22 \times 2.7074 \times 10^{-3} / 70 \times 500 = 23 \mu\text{m}$ ，即光阑孔尺寸在 23

微米左右时，可以有效提高像斑清晰度。

多波长光束经透镜后会产生色差，需要对其影响加以分析。 CaF_2 的折射率随波长（波长范围为 $0.2298 \mu\text{m}$ 至 $9.724 \mu\text{m}$ ，温度为 19° ）变化的拟合曲线以及厚透镜焦距与折射率的关系如下：

$$\begin{cases} n^2 - 1 = \frac{0.5675888\lambda^2}{\lambda^2 - 0.050263605^2} + \frac{0.4710914\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1003909^2} + \frac{3.8484723\lambda^2}{\lambda^2 - 34.649040^2} \\ \frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{(n-1)d}{nr_1r_2} \right] \end{cases} \quad (4.28)$$

经计算，对于 $[2.5507, 3.0958] (\mu\text{m})$ 这一较短的波长范围，单透镜的色差对焦距的影响在 0.5mm 以内，可以忽略不计。

第五章 系统实验研究

本章在一台电激励连续波 HF 化学激光器上，通过实验研究了系统的整体性能，同时给出一组典型的双通道同步采集数据。

§5.1 调试与标定

5.2.1 光学元件

根据第四章的讨论，系统最优化的元件参数组合如表 5.1 所示：

表 5.1 光学元件参数

元件	材料	规格参数
凸透镜	CaF_2 无镀膜	球面双凸 $\phi 20mm; R = 47.64mm; d = 2mm$
准直凹面镜	K9 玻璃镀金膜	球形凹面 $70 \times 70mm^2; R = 1000mm; d = 15mm$
成像凹面镜 $\times 3$	K9 玻璃镀金膜	球形凹面 $130 \times 16mm^2; R = 1000mm; d = 15mm$
平面衍射光栅	铜基底镀金膜	平面 $64 \times 64mm^2; 420g / mm$ $\theta_b = 26.45^\circ; \lambda_b = 2.15\mu m$
柱面透镜	CaF_2 无镀膜	柱面抛光 $\phi 10mm; h = 10mm;$
红外探测器	PbS 感光元	感光元 $1 \times 2mm^2$ ；外壳 $\phi 10mm$
元件匹配参数		
凸透镜、光阑间距	$f_0 = 57.0686mm$	
光阑、准直镜间距	$f_1 = 500mm$	
准直镜法线、入射光束夹角	$0.5\alpha = 4^\circ$	
光栅、准直镜间距	$x = 406.7mm$	
光栅法线、系统主轴夹角	$\theta = 26.73^\circ$	
4 级 He-Ne 光参考点	色散点(9.7, 118.2)mm, 像点(495.8, 168.1)mm (系统主轴坐标系)	
5 级 He-Ne 光参考点	色散点(97.6, 430.9)mm, 色散点(534.7, 453.2)mm (系统主轴坐标系)	

试验装置实物摆放和光路结构如图 5.1、5.2 和 5.3 所示。(注：实物图为第一次试验时拍摄，后续试验中为了远离干扰源，采用光路图中的结构，拉长了 HF 激光器到平面全反射镜的距离。)

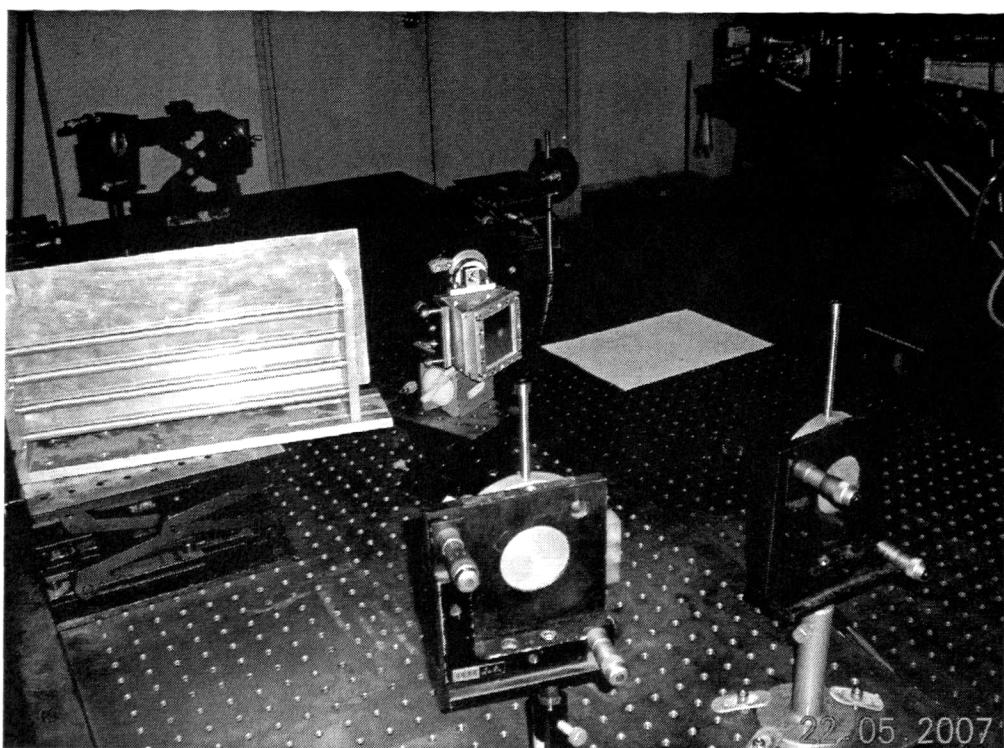


图 5.1 系统实验实物摆放图(1)

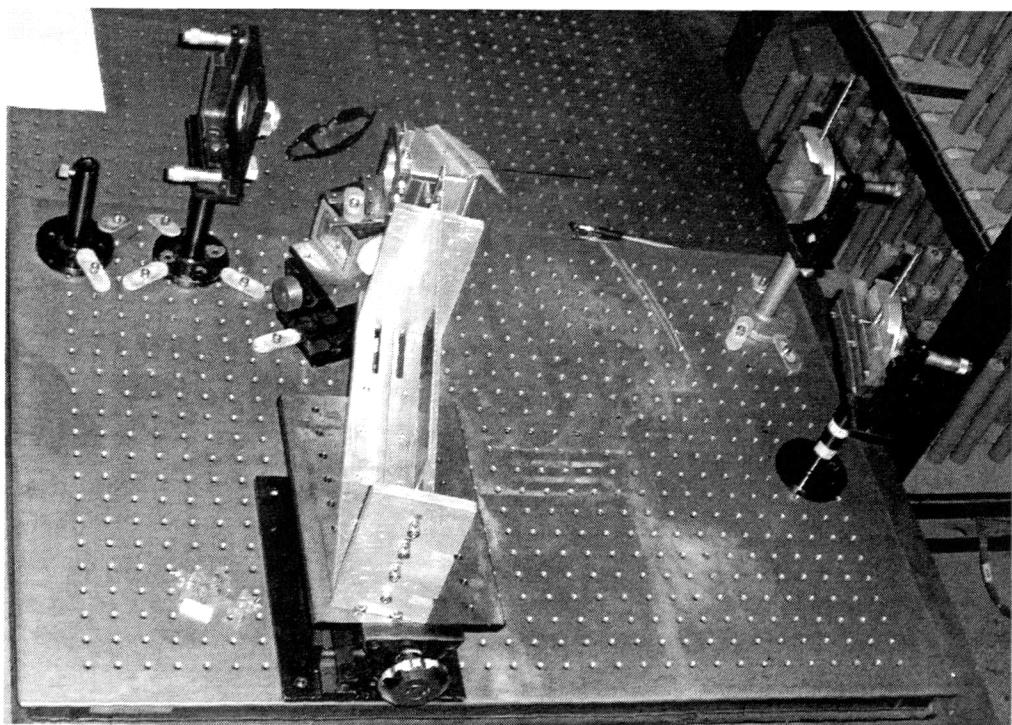


图 5.2 系统实验实物摆放图(2)

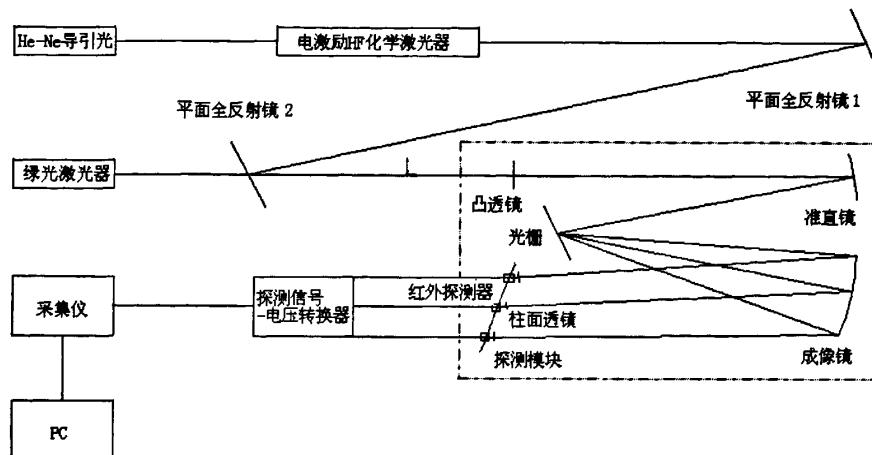


图 5.3 系统实验结构图

将波长为 $0.532\mu m$ 的绿色激光作为主导引光引入试验装置，对光学系统进行调试，同时通过两块平面反射镜将与 HF 激光同轴的 He-Ne 激光耦合入光路，由于该平面全反镜是针对 HF 激光的波长范围镀膜，所以绿光的大部分能量都可以透过它。

根据 2.2.4 节的讨论，成像镜在水平方向和竖直方向各自聚焦成一条焦线，二者互相垂直，装校成像系统的主要任务就是寻找这两条焦线的位置。为此，试验中采用了刀口法（阴影法），其原理如下：

设刀口位置与两条焦线分别形成 45° 夹角，当该刀口沿成像光线的主轴向远离镜面的方向移动时，远处由刀口引起的阴影界线绕刀口按逆时针方向转动。图 5.4 中所示的是刀口位置和阴影的明暗界线的相对关系。 a, b, c, d 和 e 分别是刀口位于竖直焦线内、竖直焦线上、两焦线之间、水平焦线上和它以外时，阴影的明暗界线相对刀口方向的位置。

可以得出结论，刀口位于两条焦线正中间的位置时，阴影界线与刀口垂直；刀口位于两条焦线上时，阴影界线互相垂直。试验中选取 b 点作为焦点位置。

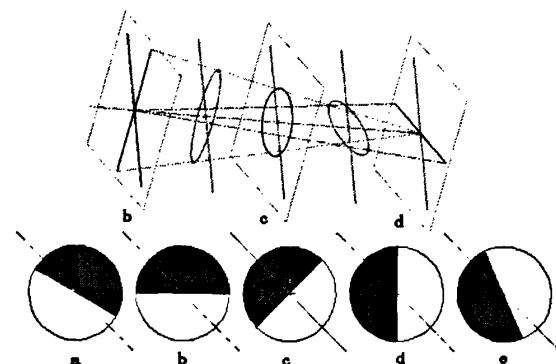


图 5.4 刀口法示意图

光学系统校正完毕后，利用导引光检测其成像效果，结果如下：

- (1) 各级次焦斑位置的波长误差在 $0.002\mu m$ 左右。
- (2) 焦斑中能量较为集中的区域符合像差分析结果，并且合适孔径的光阑可以有效地减小该范围以外的区域面积，增加像斑清晰度。
- (3) 通过刀口法测量的 b 和 d 之间的间距，即轴向像散 Δx ，为几十个毫米，与计算结果吻合。
- (4) b 位置附近有数毫米的景深区间，在这个范围内像斑的横向尺寸都能满足与感光元的匹配。

5.2.2 探测器

本文中使用的 3 个红外探测器均为光导型，感光元材料是 PbS ，参数如表 5.2 所示。

表 5.2 红外探测器参数

序号	初始电阻 Rd ($k\Omega$)	比探测率 D^* ($cmHz^{1/2}W^{-1}$)	光谱范围 (μm)	峰值 (μm)	时间常数 (μs)	工作面积 (mm^2)
1	154.5	1.0×10^8	2.5-3.2	2.7 ± 0.1	≤ 400	2×1
2	168.4					
3	174.8					

这一型号探测器的光谱范围刚好覆盖了 HF 激光的工作波段，响应时间小于 $400\mu s$ ，同时 D^* 达到了 1.0×10^8 ，相当于在 1Hz 带宽内可以分辨 $10^{-7} W$ 辐照信号，完全满足高速测量的要求。其检测电路如图 5.5 所示：

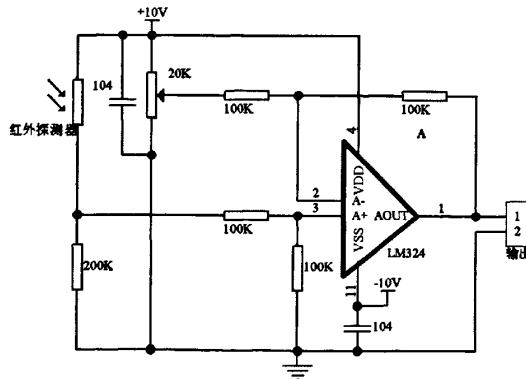


图 5.5 光导检测电路

实验中将其与负载电阻串联，并连接直流偏压，以负载上的电压变化作为信号输出。经计算，负载电阻在 $100K\Omega$ 以上时能保证输出信号的浮动最大。受初始电阻的影响，无光辐照时三个探测电路也存在输出电压并且各不相同，因此采用了一个可调的减法器来对它们分别进行调零，这样做还能保证信号在经过后续电路放大后不超过采集仪的量程。

通常探测器都存在差异，需要对相应探测电路的响应率进行标定。本文使用一个稳定的热辐射源辐照 3 个探测器，通过不断叠加同一透过率的衰减片来取样测量探测通道对辐射信号的响应，多次测量的相对响应数据如图 5.6 所示。从图中可以看出，1 号和 2 号探测电路的响应率较为一致，将它们的初始电压调零后可以用于光谱仪系统实验。

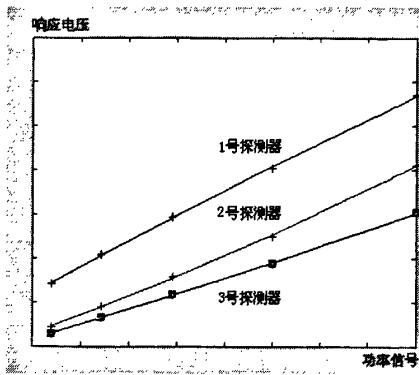


图 5.6 探测通道的响应率

5.2.3 采集仪

实验中使用的数据采集仪有 32 个输入通道，输入电压范围为 $\pm 10V$ ，输入阻抗大于 $100M\Omega$ ，分辨率为 12bit，精度为 $0.00488V$ ，优于 0.1%（满量程），其最高 A/D 转换频率为 $300KHz$ ，远大于探测器信号频率的 2 倍，能够保证实时采集信号。

需要指出的是，电激励 HF 化学激光器工作时放电管对外释放强烈的电磁辐射，电源的大型电阻箱也有很高的热辐射，同时真空泵的运行还会造成较强的震动，受这些干扰因素的影响，在激光器周围使用的电子仪器每次工作前后都必须进行标定。

将标准信号引入采集仪，在不同的条件下测试干扰对采集仪的影响，我们发现，悬空的通道必须短接，否则收到的干扰会对采集通道造成串扰；各电子仪器的外壳应当接地；所有裸露的信号线应当带有屏蔽层；系统尽量远离激光器；同时采集频率高于 $10KHz$ 有较好的采集效果。

通过上述措施后，短接探测器的两个引脚，长时间测量整个采集系统的本底噪声，发现其幅度稳定在 $0.02V$ （如图 5.7），比探测信号小一个数量级，满足采集要求。

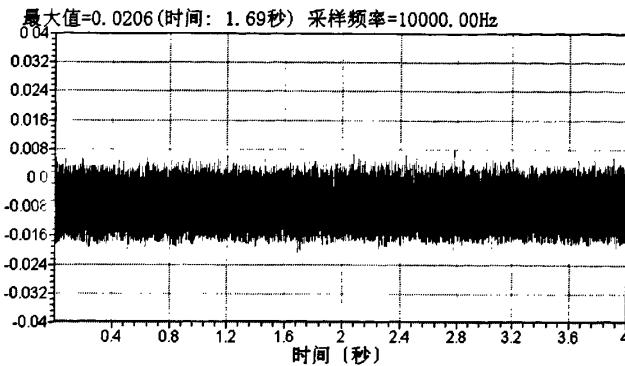


图 5.7 采集系统的本底噪声

§5.2 测量结果

5.2.1 谱线位置

光路调试完成后，首先对谱线成像位置进行定位。由于现有条件下，成像凹面镜只有 130mm 长，所以选择 He-Ne 激光的 4 级和固体激光的 4、5 级衍射光斑作为参考点。根据刀口法确定的竖直焦线位置，调整接收架，使挡板与谱线的成像面重合。

记录参考点位置（以 He-Ne 光的 4 级衍射光斑作为零点），并用参考点拟合波长-位置曲线，与计算出的 24 支谱线位置比较，如图 5.8 所示：

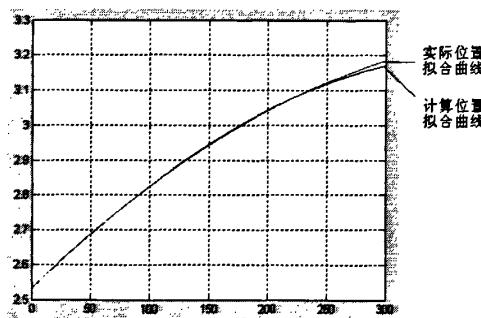


图 5.8 谱线位置-波长拟合曲线

从图中可以看出，实际曲线与计算结果较为吻合，仅在波长大于 $3.1\mu m$ 时有少许偏差，可以用于判断信号对应的谱线。调整成像凹面镜的位置，在保证 He-Ne 光的 4 级和绿光的 5 级衍射光斑不变的情况下，使成像镜孔径尽量覆盖谱线的衍射区间。在挡板上覆盖热敏纸，开启 HF 激光，出光功率 20W，焦平面的 3 层位置上都出现了 3 个烧蚀点，它们代表了能量较强的 3 支谱线的成像位置。如图 5.9 所示：

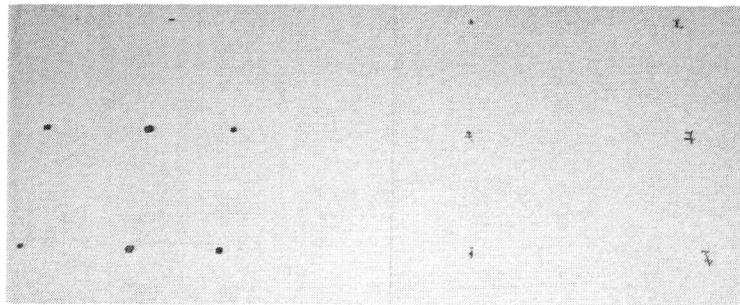


图 5.9 谱线焦斑与参考点

可以看出，与验证性试验相比，由焦斑产生的烧蚀斑点形状有了较大改善。根据参考点拟合曲线，这几个点对应的波长如表 5.3 所示。

表 5.3 像点的波长拟合数据

实际位置(mm)	0	41.7	85.0	103.5	119.7
拟合波长(μm)	2.5312	2.6622	2.7843	2.8323	2.8722
实际谱线	He-Ne 4 级	绿光 5 级	1P8	2P6	2P7
实际波长(μm)	2.5312	2.6600	2.7826	2.8319	2.8705
偏差(μm)	0	0.0022	0.0017	0.0004	0.0017

结果表明，波长的偏差远小于谱线间的波长差，因此，对于波长已知的激光器，拟合的方法完全可以精确定位谱线。如果有更多的参考点，这一偏差会更小。

5.2.2 单探测器采集数据

取出挡板，在接收架的中间一层放置 1 号探测器模块，将其输出信号调零后，开启激光器，出光功率 10W。用步进电机带动滑动模块，以 $9.5035 mm/s$ 的速度从支架一端到另一端。记录结果（如图 5.10）显示，成像范围内确实有 3 个位置的辐射强度较大，经计算，这些位置对应的波长与之前拟合得到的 3 支谱线完全相符。但是，在一些非谱线位置也出现了强度较弱的辐射信号，这有可能是以下原因造成的：

- (1) 由于光谱系统前的两块平面反射镜为非金属镀膜，在接收位置与焦点不完全重合时，其后表面的反射光线通过装置后会使像点发生平移；
- (2) 光栅表面被强激光灼伤，这些局部范围的隆起和凹陷会产生强度较弱的“假谱线”；
- (3) 存在红外干扰源；
- (4) 滑动时某些位置存在机械抖动或电路受到干扰。

在后续研制工作中，将改进系统以排除上述因素，来进一步分析这些信号的成因。

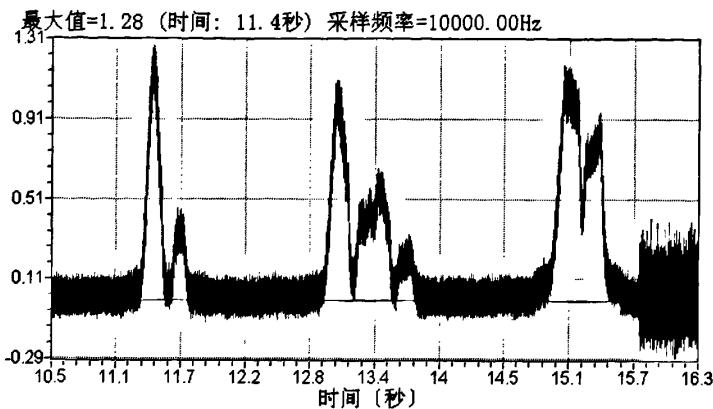


图 5.10 单通道探测器滑动扫描数据

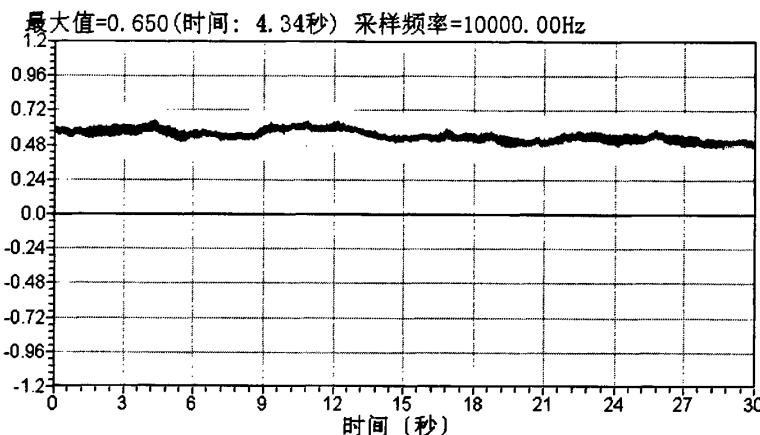


图 5.11 通道 1 持续记录数据

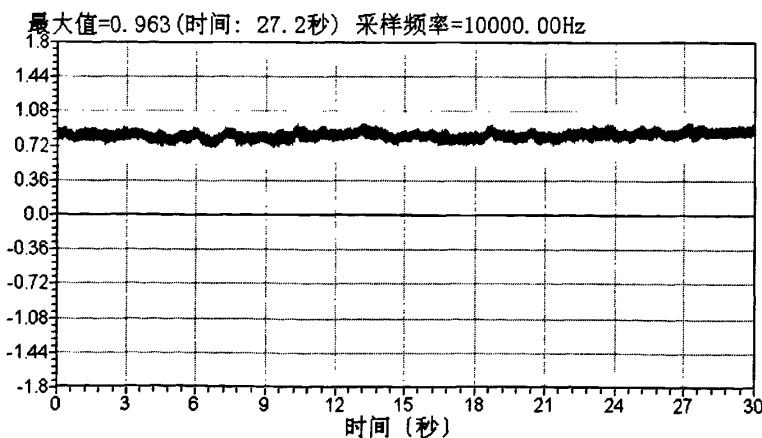


图 5.12 通道 2 持续记录数据

令 1 号探测器停留在 2P7 的位置，进行微调，当响应电压达到最大值后，连续记录 30 秒，数据如图 5.11 所示。此时位置为 122.04mm ，拟合出的波长为 $2.8746\mu\text{m}$ ，与 2P7 实际波长的偏差为 $0.0041\mu\text{m}$ 。

令 2 号探测器停留在 1P8 的位置，同样情况下记录的数据如图 5.12 所示。其位置为 84.97mm ，拟合波长为 2.7855mm ，与 1P8 实际波长的偏差为 $0.0029\mu\text{m}$ 。

根据单探测器的采集结果，有如下结论：

- (1) 谱线强度变化的幅度大约是其最大值的 $1/4$ 左右；
- (2) 电子噪声强度以上的所有强度变化频率基本都位于几百个赫兹的低频区，远低于预计的光学效应或者超声速流所产生的变化频率。

这些低频起伏，有可能是机械震动、激光器光腔结构的热漂移、或者超声速流喷嘴流场上游内的微扰造成的，这些因素对谱线间的竞争影响较大。

5.2.3 双探测器同步采集数据

由于 HF 激光器的输出光束存在不均匀性，如果在不同的层上取探测点，则层与层之间的强度比率需要标定，由于本次试验主要目的在于验证仪器多通道采集的性能，因此暂不考虑标定，仅在同一层中对这两支的谱线进行测量。1 号和 2 号探测器双通道同步测量的结果如图 5.13 所示。

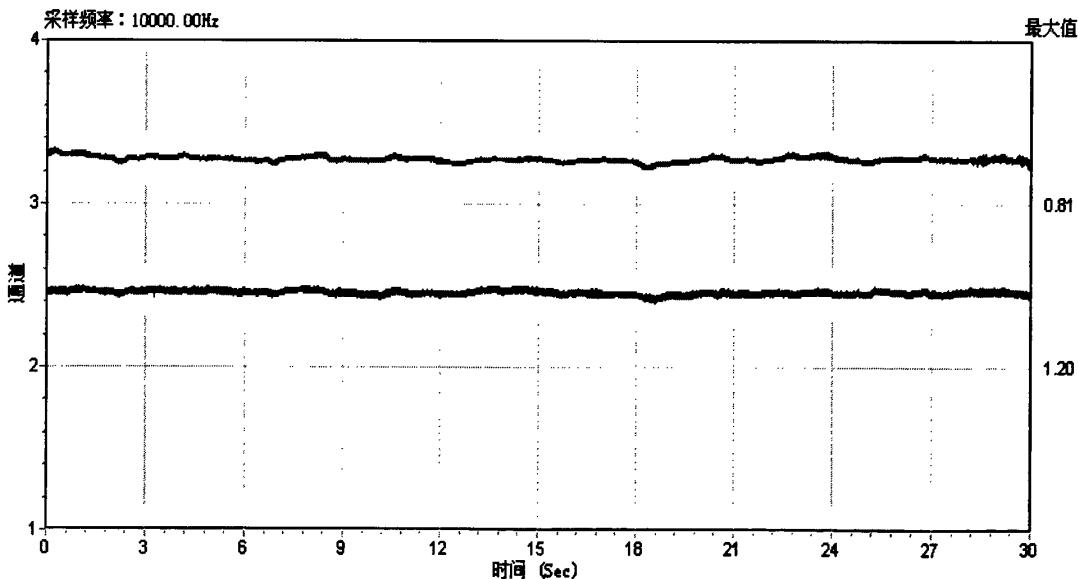


图 5.13 双通道同步记录数据

图中左侧纵轴表示通道序号，实验中，1 号探测器使用的是采集仪的 3 号输入通道，因此图中的通道 3 表示实验中的通道 1；右边的纵轴表示通道各自达到的最大值。从图中

可以看出，这两支谱线强度的波动存在一定的关联，并且是正相关，可以预计，存在另外一些谱线与之负相关。如果激光器的所有谱线都能被监测的话，将能够说明谱线间竞争的细节。

这几组光谱信号数据都是相对强度的变化，要得到谱线的具体功率值，还需要对探测器效率和光栅效率进行标定。

§5.3 结论

1. 本文所设计的高速光谱仪方案切实可行，在现有条件下，用 4 个光学元件和常见的 *PbS* 红外探测器完成了对 HF 激光谱线的多通道同步测量，结果真实可重复，能够反映激光器的谱线竞争特性。
2. 仪器的光学系统达到了像差校正要求，谱线的像面曲率、色散位置、像斑尺寸与分层效果与计算结果准确相符。
3. 在保证色散率的前提下，仪器的尺寸为 $500 \times 500 \text{ mm}^2$ ，满足小型仪器的要求。
4. 通过数据采集前后的标准信号测试，在电激励 HF 化学激光系统的强烈干扰下，采用了一系列屏蔽措施的采集系统得到的数据真实可信。
5. 探测系统的响应速度、灵敏度、响应率、采集频率和信噪比等参数都能够满足对谱线强度变化的快速实时检测。
6. 通过对参考点的拟合，可以较准确地判断像平面上接收到辐射信号所对应的谱线。
7. 测出的谱线强度的变化频率范围小于 1 KHz 。

第六章 展望

本文的完成，是 HF 化学激光光谱测量仪器走向实用的第一步，距离达到小型仪器级别的使用水平还应当开展一系列的研制工作，下面对部分工作进行展望。

1. 标定

标定工作是光谱仪能够被定量使用的重要保障。各谱线的强度差异很大，采用探测器测量最弱信号时，可能部分谱线要添加衰减片才能保证强度都在探测器的探测范围之内，其衰减率需要标定。

给定探测器和检测电路，其输出电压与各支谱线强度的对应关系可以考虑用黑体辐射加带通滤波器作为标准光源来标定。还可以考虑已知强度的单色红外辐射源。

受光栅影响，每支谱线的光学效率不同，可以通过光栅效率曲线来估算，作为实测信号的加权系数。

另外，激光器的输出光束受光腔结构、反应气流以及腔镜清洁度的影响，其强度分布存在一定不均匀性，造成同一谱线分层成像后像斑强度不等，其比率也需要进行标定。

2. 机械装置

机械装置的设计关系到仪器的实用性。各光学元件的配套支架应当便于光路调试，尤其是光栅和成像凹面镜需要增加倾斜调节。

接收架需要更准确的定位装置，其滑动部件应当增加转动功能，以便调节光线进入探测器的角度。探测器模块需要增加屏蔽的导线接口，以防止相互间机械干扰和外界的电磁干扰。

仪器需要增加一路能测量总功率变化的光路。另外部分元件可以整合，以减少调试：例如，第 2 块平面反射镜和凸透镜可以合并成一块凹面镜。

3. 谱线位置

谱线位置与波长的精确判定需要更多的参考光斑，使多项式拟合曲线更加逼近实际曲线。可以考虑用多波长的标准可见光源来对仪器进行标定。

4. 信号的降噪与放大

对于信号采集类仪器，信噪比是其性能的重要指标。为了降低噪声干扰，仪器应尽量缩小体积，减轻重量，以便于移动远离干扰源，电路应当尽量减少裸露在外的导线，整体

封装在一个屏蔽较好的盒子里，可以考虑和光学系统整合在一起。

通过多次实测谱线的波动数据，其起伏的频率范围为 $1KHz$ ，通过带通滤波器将其它频率过滤，再通过斩波加锁相放大的方法能够有效提高抗噪性能。

5. 使用前景

与 HF 激光器类似的多波长激光器，只要各支谱线的波长已知，都可以使用这套光谱仪装置。尤其对于 DF 激光器，只需要对探测器的位置进行重新设计就可以直接使用。因此，这套仪器的使用前景比较广泛。

致 谢

本文是在陈金宝教授和袁圣付副教授的共同指导下完成的，首先向两位教授表示感谢。

陈金宝教授是作者的导师，他倡导的重视调研，重视基础理论，强调严谨实验的科研风格使作者受益匪浅；他知识渊博，对各个领域的理论都有深刻理解，常在作者遇到困难的时候点出问题的关键所在，为作者指明正确的研究方向。同时陈教授作风民主、讲究实效，给作者以充分的自由发挥的空间，在这里要特别表示感谢。

袁圣付副教授具体指导了本文的工作，是作者进入化学激光领域的引路人。他热爱工作，精力充沛、善于钻研。正是他帮助作者解决了本文的关键问题，并为作者提供了实验条件。他善于规划、重视动手能力、强调实践，使作者对完成科研任务的程序和重点有了深刻的认识。

杜少军副教授在高能激光领域工作多年，有很强的工作能力，他思维敏锐、为人谦和、乐于助人，帮助作者解决了很多光学和程序上的难题，并提供了大量的参考意见，在此向他表示由衷的感谢。

王红岩博士是作者的良师益友，他涉猎广泛，工作起来一丝不苟，善于分析试验结果，给予作者大量帮助。最令人感动的是他向作者毫无保留地传授自己的科研心得、实践经验，介绍大量与 HF 激光和光谱仪有关的资料，并不断鼓励作者，在此向他深表谢意。

实验员肖章德和陈景春长期在一线对激光器进行装配、调试，帮助作者完成大量的实验调试工作，他们经验丰富、不计劳苦，没有他们的帮助，本文难以完成，在此表示特别感谢。

最后感谢父母多年的抚育和教育，他们始终是作者的强大支持。

研制实用性仪器看似简单，实际需要考虑的细节非常多，本文的完成幸运的得到了很多专家、老师、朋友的帮助，使作者不断成长，在此向他们一并表示感谢。

参考文献

- [1] 吴国安等. 光谱仪器设计. 北京: 科学出版社, 1978
- [2] 塔拉索夫[苏]. 光谱仪器. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [3] 李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理. 北京: 北京理工大学出版社, 1999
- [4] 祝绍箕, 邹海兴, 包学诚等. 衍射光栅. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [5] 林大健. 工程光学系统设计. 北京: 机械工业出版社, 1987
- [6] J.M.Bernard, D.H.Ross, J.G.Coffer. Spectrometer for temporal measurement of each output line of multi-line HF lasers. *Applied optics*. Vol.23, No.1, 1984
- [7] S.W.Townsend, L.H.Sentman. Design of a constant efficiency spectrometer for IR wavelength. *Applied optics*. Vol.23, No.14, 1984
- [8] N.R.Greiner, G.P.Arnold, R.G.Wenzel. Rapid recording of infrared spectra from pulsed chemical lasers. *JAP*, 1973
- [9] K.L. 科姆帕. 化学激光. 北京, 科学出版社, 1981
- [10] R.W.F. 格罗斯, J.F. 博特. 化学激光手册. 北京: 科学出版社, 1987
- [11] 庄琦, 桑凤婷, 周大正. 短波长化学激光. 北京: 科学出版社, 1997
- [12] 王红岩. 电激励连续波红外多波段化学激光器的研究. 工学博士学位论文. 国防科技大学研究生院, 2006, 10
- [13] 陈金宝, 赵伊君, 刘泽金, 舒柏红. 燃烧驱动连续波 DF 化学激光器的输出光谱. 国防科技大学学报. Vol.21, No.3, 1999
- [14] R.H. 金斯顿. 光学和红外辐射探测. 北京, 科学出版社, 1984
- [15] 陆启生等. 激光辐照效应. 北京, 国防工业出版社, 20024
- [16] L.H.Sentman, P.Theodoropoulos, T.Nguyen. An Economical Supersonic CW HF Laser Test bed AIAA, 89, 1898
- [17] Dolin. A rapid scan spectrometer that sweeps corner mirrors through the spectrum. AO, 1967
- [18] 唐奕, 陈海清, 张子业等. 线阵 CCD 多通道光谱仪及其应用. 华中科技大学学报. Vol.30, No.10, 2002
- [19] 沈杭城, 潘建根, 冯华君等. 多通道快速光谱仪的波长定标. 光学仪器. Vol.28, No.2, 2006
- [20] 石绍澄, 林宝莲. WP_2L_ICP 摄谱仪照明系统的透镜对谱线强度的影响. 光谱学与光谱分析. Vol.10, No.6, 2000
- [21] 苏毅, 万敏. 高能激光系统. 北京: 国防工业出版社, 2004

- [22] R.S.Ram, Z.Morbi. Infrared spectra of hot HF and DF. AJSE, 1996
- [23] Braun. Infrared emission spectroscopy of HBr. JMS, 1994
- [24] A.R.杰哈. 红外技术应用——光电、光子器件及传感器. 北京: 化学工业出版社, 2004

攻读硕士期间发表的论文

1. 张烜皓, 陈金宝, 袁圣付. 连续波 HF 化学激光器专用高速光谱仪设计. 《航天电子对抗首届学术年会论文集》, 2006: 142
2. 袁圣付, 闫宝珠, 张烜皓, 王红岩. 多谱线激光器用光谱仪. 《实用新型专利》, 申请号: 200620052821.0