

建所以来衍射光栅工作介绍

梁 浩 明

引 言

长春光机所衍射光栅的研究工作是1958年开始的。经二十多年的努力建立了一整套光栅刻划机设计、加工、装调技术，制造了4台三种类型的光栅刻划机，并向国内七个光学仪器厂推广，建立了光栅检验设备及六项光栅性能指标的检验方法。掌握了从近紫外、可见到近、中红外光栅刻划的基本技术。建立了光栅复制工艺。已向国家提供原刻光栅及复制光栅近百个品种，一千余块。近年来，又开展了大光栅机、凹面光栅机构、全息光栅及其它光栅的研究和设计工作。下面就几个方面分别介绍。

一、光栅刻划机的设计、制造和发展

衍射光栅精度要求很高。1959年设计了我国第一台纯机械式光栅刻划机。该机最大刻划面积为 100×100 毫米²，可刻每毫米1200、600、300、200槽的光栅。

刻机采用光栅坯作间歇运动、刻刀作往复运动的工作方式。由分度机构和刻线机构互相配合进行刻划。分度机构由曲柄连杆、棘轮棘爪、蜗杆蜗轮、丝杆、螺母带动承载光栅毛坯的滑座组成。刻线机构由伞齿轮付、减振器、曲柄连杆、刻桥及摇刀架带动钻石刻刀组成。

刻机主要零件的精度由精密研磨获得。几个主要零件的实际精度如下：分度丝杆累积误差为0.3微米（100毫米内）其偏离圆弧部分略小于0.17微米，周期误差为0.01~0.02微米，分度蜗轮的累积误差为 $8''$ ，相邻周节误差为 $3''$ ，导轨平面度为 $\frac{\lambda}{8} \sim \frac{\lambda}{10}$ （ $\lambda = 5461$ 埃）表面光洁度 $V_{11} \sim V_{12}$ 。

整机采用了同平面布置方案使机器垂直方向的误差对分度方向的精度传动比为最小。滑座承重方向使用了滚动导轨付以减少摩擦力的变化。分度螺母与滑座的连接上设计了两半螺母、“三连接环”、“双层滑座”的特殊结构。即用两个单独的半螺母通过弹簧力封闭于丝杆上、上下半螺母各通过一个顶杆与环的上下连接。弹簧台环左右两边则通过两片弹簧片与双层台的弹簧台固接。毛坯放在弹簧台上。这一机构有平均丝杆周期误差的作用。并避免了丝杆任何横向误差对弹台的影响。

刻桥的导轨触点布置成磨损对消的方式，使刻一块光栅累积磨损对光栅精度的影响为两触点磨损的差值。刻线系统中设计了减振器使前半部传动系统（包括驱动马达）的微振传不到对振动极为敏感的钻石刀上。图1为第一台纯机械式光栅刻划机的外貌。

光栅刻划对环境的要求是苛刻的，我们采用大块混凝土板垫弹性体的防振基础，使基础的自振频率达到1.5赫兹，减振的有效重量达到5.4吨。恒温采用了机房、房间、刻机罩内三层控制措施，恒温精度达到了 $\pm 0.03^\circ\text{C}$ 。

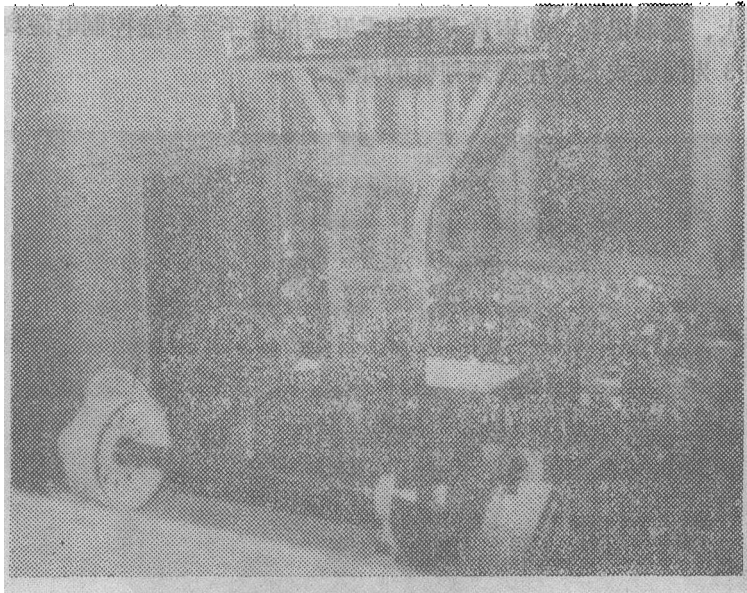


图1 第一台纯机械式光栅刻划机

1965年该机刻划出 100×50 毫米²，600槽/毫米光栅，一级分辨本领达到4.5万。罗兰鬼线强度小于0.1%。赖曼鬼线观测不到。

为适应刻划宽度大于100毫米的光栅，1964年设计了第二台纯机械式刻机。如图2。机器结构与第一台相似。刻划宽度增加到200毫米。

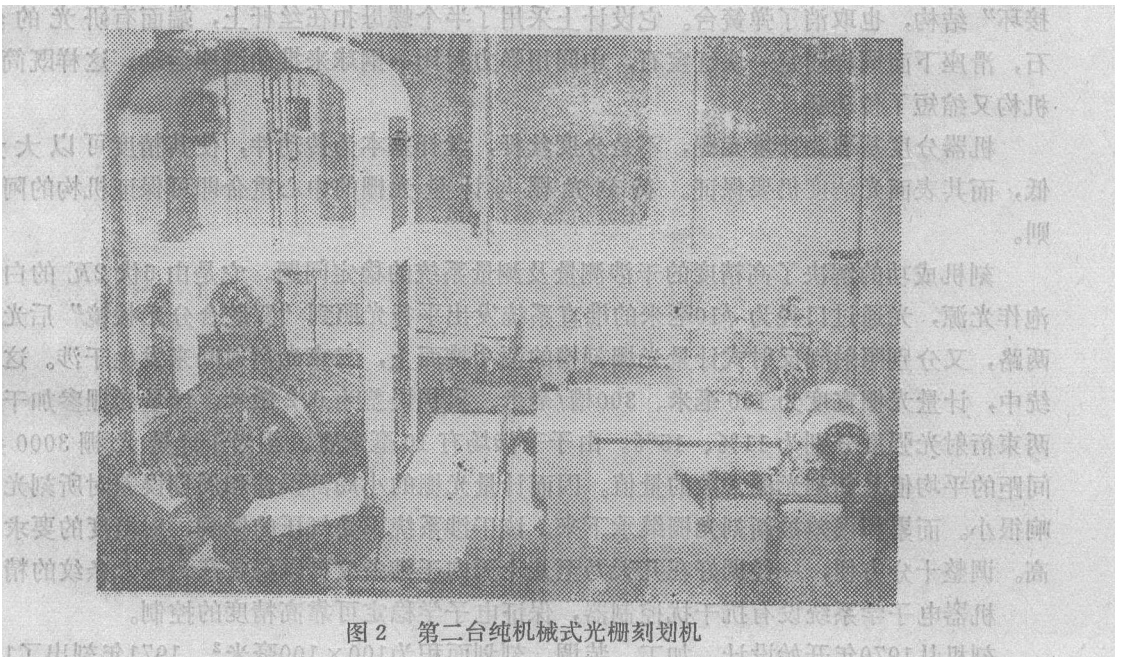


图2 第二台纯机械式光栅刻划机

为了提高光栅刻划机的精度而又不增加精密机械加工的困难，1970年我们开始研制第一台间歇式的光电控制光栅刻划机。刻机的刻线系统结构与纯机械刻机的结构相似。分度系统由电动机带动电磁离合器运动，经齿轮、蜗杆、蜗轮、丝杆、螺母传动系统带动滑座在一边V型、一边平面结构的导轨系统中向前运动。滑座上放有控制光栅分度的干涉系统的计量光栅。每当滑座向前移动 $1/2400$ 毫米距离时干涉系统就移过一个整条纹。由光电倍增管接收

后，经包括放大、整形记数、功率放大及回零开关的电子学系统控制电磁离合器实现机器的间歇分度。图3为间歇式光电控制光栅刻划机的外貌。

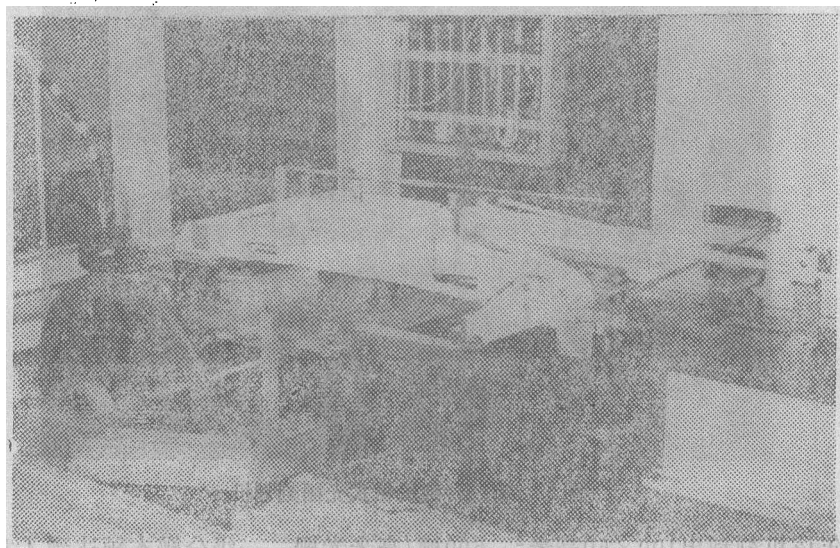


图3 间歇式光电控制光栅刻划机

间歇式光电控制光栅机与纯机械式刻机主要区别在于采用光栅作为定位基准，使机器既提高了精度又大大减化了机构，既取消了机械机中，为消除周期误差和其它误差使用的“连接环”结构，也取消了弹簧台。它设计上采用了半个螺母扣在丝杆上，端面有研光的红宝石，滑座下面同样固定一块红宝石，中间用弹力封闭一钢球来推动滑座运动。这样既简化了机构又缩短了传动链。

机器分度基准为计量光栅，不是分度丝杆，丝杆基本为传动件，使其精度可以大大降低，而其表面光洁度仍要保证。待刻光栅与计量光栅的中心重合即可保证机构的阿贝原则。

刻机成功的解决了高精度的干涉测量及测量系统的稳定问题。它是由6伏2瓦的白炽灯泡作光源，光通过口径为 $\phi 10$ 毫米的准直系统发出平行光照到“双胶合分光棱镜”后光分成两路，又分别照射到反射式计量光栅刻槽的两个槽面上，二束光衍射回来发生干涉。这个系统中，计量光栅宽度为180毫米、300槽/毫米、累积误差为0.2微米。计量光栅参加干涉的两束衍射光强度分别为11%、15%。由于干涉场有10毫米宽，相当于计量光栅3000条槽间距的平均值是新刻光栅常数的量值。因而计量光栅的小局部误差和周期误差对所刻光栅影响很小。而累积误差被新刻光栅继承下来。该干涉系统不受气压的影响，对温度的要求也不高。调整十分方便，一经调好在几天乃至几十天内干涉条纹可以稳定在 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{20}$ 条纹的精度。

机器电子学系统设有抗干扰控制器，保证电子学稳定可靠高精度的控制。

刻机从1970年开始设计、加工、装调，刻划面积为 100×100 毫米²。1971年刻出了 100×50 毫米²，300槽/毫米、试验性光栅4358埃的第13级分辨本领达到理论值的75%。

1972年刻机进行了改进和精调。减小了1200槽/毫米光栅分度系统的局部误差和短周期误差，刻出了1200槽/毫米、 50×40 毫米²的光栅一级分辨本领接近理论值、赖曼鬼线强度减小到万分之一以下。罗兰鬼线强度可小到 1×10^{-6} 量级。

1973年为了刻划大于100毫米宽度的高精度光栅，又进行了扩大刻划面积的改进设计。

使该刻机刻划面积最大可达 150×140 毫米²、随后又解决了150毫米行程分度系统的累积误差以及刻划长线槽的精度和振动问题。1973年刻出 100×100 毫米²、600槽/毫米、二级分辨本领达到理论值的80%，鬼线和杂散光积分总和小于0.6%的天文光栅。1975年又刻出 150×120 毫米²、600槽/毫米，三级分辨本领达理论值的80%的天文光栅。

间歇式光电控制光栅刻划机“停”、“动”运动，这样光栅滑座静动摩擦力差别和机械惯性引起了光栅滑座微量的定位误差。而且“停”、“动”运动也使光栅滑座产生微量的水平偏摆。这些对进一步提高光栅刻划机的精度很不利。特别是对于刻划大光栅、滑座很重，摩擦力和惯性都相应加大，给提高精度带来困难，为此1976年开始研制连续式光电控制光栅刻划机。如图4。



图4 连续式光电控制光栅刻划机

刻机工作台连续运动，闭环控制。它由两个连续运动的低速力矩马达分别带动分度系统和刻线系统。两个系统之间由光电干涉系统发出的信号与等速刻桥主轴的信号发生器所发出的参考信号进行电子学比较相位来控制工作台，使工作作等速运动，该机干涉系统和分度系统与间歇式光电控制光栅机结构基本相同。它的特点是具有等速运动的刻桥和与滑座连续比相的连续运动。

连续比相的刻线系统参考信号的产生是由刻线系统的轴通过齿轮组传到空心轴，旋转的偏振片固定在空心轴内。用6伏、2瓦白炽灯做光源，通过准直系统照入旋转的偏振片上，再通过固定于基座上的定偏振片。当动偏振片随旋转轴转动时，固定于基座上的并在固定偏振片之后的光电接收器就接收到了光强起伏的信号。当旋转的偏振片每转 180° 时光信号产生一个起伏，接收器接收到一个代表刻线速度的参考信号，机器控制运动时，先调整电位计，改变力矩电机的基本转速使从参考信号和基准信号产生的频率相接近，当两路正弦信号相差正好 90° 时，力矩电机是均匀运动。当机器运动速度出现误差时两路信号相位差就偏离 90° ，此时力矩电机就改变转速以调整光栅滑座的运动速度从而改变条纹信号的频率以保证两路信号固有 90° 的相位差，以此来始终保持所刻光栅间距的均匀。

刻机等速刻线采用双曲柄机构。即摆盘随转盘的转动而往复摆动。我们设计 r_1 、 r_2 、 R_1 、 L 分别为30、60、150、500毫米。得到刀桥行程140毫米时在120毫米范围内刻桥运动不均匀性为4%。

刻机所用超低频锁相环路鉴相器的增益是固定的，留给设计者的只有马达控制线路增益和滤波环路两个变量。而滤波环路参数选择是决定系统动态性能和锁相精度的主要因素，刻

机连续七天工作，锁相控制精度为 4° ，相当于 $1/100$ 条纹。

刻划机刻出的 150×120 毫米²、600 槽/毫米光栅三级分辨本领达到理论值的 80%，罗兰鬼线强度为 1×10^{-9} 量级，赖曼鬼线观测不到。

连续式光电控制光栅刻划机研制成功为进一步提高光栅刻划机的精度开辟了途径。

1978 年我们为了适应光谱学的发展和天文仪器的需要设计了大光栅机，它的刻划面积可以为 $0 \sim 500$ 毫米，现正在加工零件。

二、光栅刻划技术的发展

为了刻出好光栅必须了解和掌握光栅刻槽与光栅集光效率等性能的关系。通过实践我们总结出了影响光栅集光效率的诸因素，掌握了一定的方法和规律。这些规律主要是：

1，运用衍射光栅能量分布公式计算出要求刻制的光栅闪耀角。而实际刻划光栅的钻石刀安装角，由于刻划时的“弹性回复”而不能与闪耀角相等，需增加一个 $0^\circ \sim 5^\circ$ 的修正量。

2，光栅刻刀的刀尖角决定了光栅的槽底角。而选用刀尖角为 $110^\circ \sim 120^\circ$ 时闪耀光栅的集光效率较高。

3，光栅刻槽的宽度一般在定向波长的 2~3 倍时可获得较高的集光效率。应注意闪耀角尽可能不小于 6° ，否则会限制集光效率的提高。

4，刻槽畸变主要是由于钻石刀不锐或光洁度低、压削参数不适宜、刀刃与刻线不平行等诸因素引起，它使光栅集光效率降低。

5，光栅膜层的硬度、颗粒、韧性，会影响集光效率的提高。

6，小刀架的振动将影响集光效率的提高。具有垂直刚度系数为 7 克/毫米、转动刚度系数为 1 克·毫米/分，转动惯量为 0.77 克·秒²·毫米，自振频率为 11 周/秒。并以凡士林油为阻尼的弹簧片式小刀架具有刻划紫外、可见、红外光栅的良好性能。

近年来借助于干涉显微镜和扫描电子显微镜对双定向刻槽和高级次定向刻槽的研究上也取得了进展。

为了满足光栅膜层的特殊要求，早期我所研制出一台 $\phi 450$ 毫米具有冷却系统的高真空度的镀膜机。1962 年镀出可刻划 600 槽/毫米光栅的单层膜。为了加强膜层的牢固性，随后又在基板与铝膜之间增加一层铬膜，提高了铝膜和玻璃基板之间的牢固性。现在膜层的真空涂镀工艺可以适应每毫米 2400 槽~100 槽的紫外、可见、红外光栅的要求。可见区应用的光栅镀铝面积可以大到 150×120 毫米²。

1960 年开始设计光栅磨刀机，1964 年磨制出劈形光栅刻刀

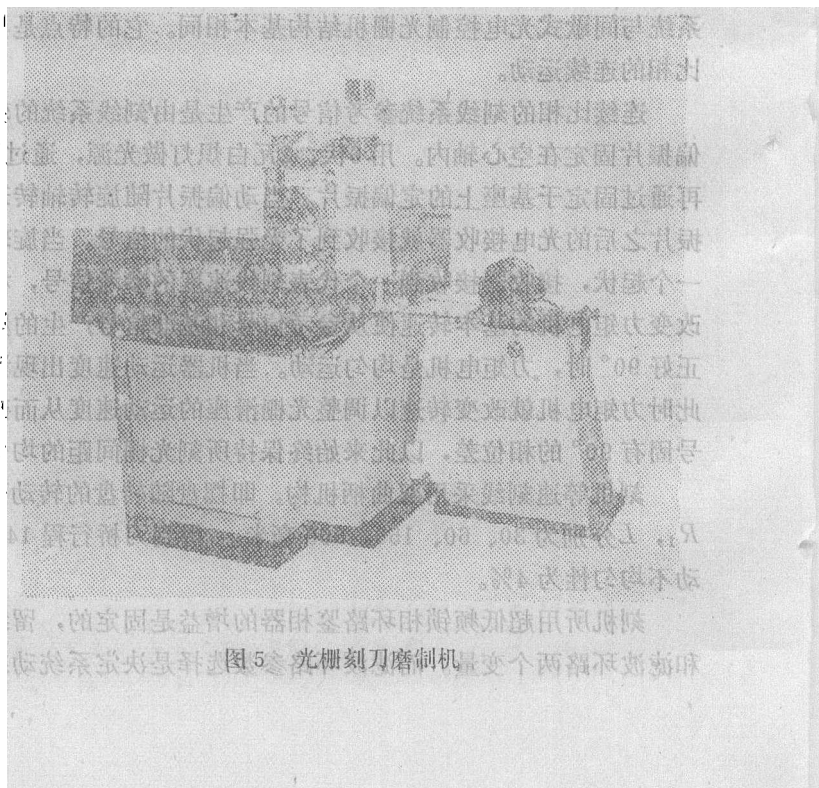


图 5 光栅刻刀磨制机

随后又磨制出圆弧形钻石光栅刻刀。掌握了光栅刻刀机的设计以及光栅钻石刻刀的加工技术。并向国内五个光学仪器厂推广。图5为光栅刻刀磨制机外貌。

三、光栅品种方面的发展

开始我们刻划每毫米200、300、600槽用于可见区的光栅。根据国家的需要先后进行了红外光栅、紫外光栅的刻划以及复制光栅的生产。

用于紫外和可见区光栅刻划面积最大达到 150×120 毫米²。每毫米的刻槽数可以为200、300、600、1200、2400槽。控制刻划槽形可以使光栅分别闪耀在波长3132埃、3650埃、4358埃、5461埃、6438埃的第一级至第三级，光栅一级实际分辨本领可达到理论值的80%~100%，集光效率在一、二级可达到70~90%，三级可达50%左右，罗兰鬼线相对强度一级为0.2~0.001%。赖曼鬼线观测不到。

这些光栅的性能满足了工业生产上的要求，也部分的解决了科研和天文方面研究的需要。

红外光栅方面是在可见光栅制造的基础上于1966年开始研制的。红外光栅的刻划面积可以达到 100×100 毫米²，每毫米刻槽数可以做到50、60、80、100、120、150、200、240、300、400槽。闪耀波长可以从1~15微米。相对集光效率可以到80~90%。

1976年又刻制成功了2.5微米~15微米应用的宽波段光栅。这样的光栅可以使仪器结构简化、操作方便。

近年来开展了全息光栅的研制。建立了全息光栅实验室、制造了一套全息光栅干涉仪，建立了全息光栅制造工艺。1980年做出1200槽/毫米~600槽/毫米平面全息衍射光栅，集光效率达到30%。1981年又做出 33×33 毫米²四型全息凹面光栅，用于凹面光栅地面辐射计分光仪上性能良好。目前正在考虑全息光栅定向技术。

四、光栅检验方面的进展

为了配合光栅的研究和给出完好光栅性能的说明，我们进行了光栅检验方法和设备的研究工作。现已能对光栅进行干涉波前、分辨本领、闪耀效率、鬼线和杂散光强度等项指标的测定。

光栅干涉检验 设计制造了一台台曼型光栅干涉仪。仪器干涉分光板上没有镀层，参考镜镀铝全反射，这样和光栅衍射光相匹配在闪耀级次有较好的条纹可见度。仪器最大检验面积为 100×100 毫米²。为了克服制造大面积干涉仪中分光板的困难，1978年我们又设计制了一台激光棱镜干涉仪，由于采用激光光源，解决了大面积光栅在大角度检验时因光栅倾斜程差变化所引起的条纹可见度不好的问题。

从光栅干涉仪的干涉条纹可以定性和半定量的检验出光栅周期误差、累积误差、超射误差、扇形误差、局部误差。

光栅分辨本领的测定 我们常用谱线宽法测定光栅分辨本领。即根据瑞利判据，用光谱仪的一条谱线轮廓测出强度0.4处的宽度代替 $\Delta\lambda$ ，进而求出 R 值。实际采用谱线强度0.5处宽度（半宽度）代替 $\Delta\lambda$ ，这对于可分辨5%或更小的光电接收器来讲是可行的，此法测分辨本领很方便。高于10万的分辨本领用Hg 5461埃和4358埃线超精细结构中子线的半宽。此外，我

们还用分辨谱线对的方法来测定光栅的分辨本领。

上述两种方法都是在我们自己设计的四米 Ebert 垂直布置式平面反射光栅摄谱仪上进行的。仪器自准式，对 600 槽/毫米，光栅线色散倒数一级为 4 埃/毫米。出射狭缝放在有滚动导轨的滑座上，同步马达通过齿轮传动使滑座运动，实现了狭缝在谱面上扫描，马达反转狭缝可反向运动。狭缝扫描速度为 3.3 微米/秒 $\pm 3\%$ 。在谱面上扫描一条谱线大约需半分钟。信号用 1p 21 光电倍增管接收，经放大器进入 EWC-01 型记录仪。仪器经十余年的使用，性能稳定可靠。

为了满足高分辨本领光栅的检验，1972 年我们又设计制造了一台 8 米焦距的 Ebert 型摄谱仪，配合一台测微光度计拍照超精细结构可以检验分辨本领近 100 万、通光口径不大于 150×120 毫米²的光栅。

光栅闪耀效率的测定 采用了相对效率的测定方法，即光栅在给定波长和角度的衍射光能量与在给定波长与光栅相同孔径的膜层反射镜反射光能量之比。我们设计了一米 Ebert 型水平布置式光栅单色仪，待测光栅放在其中，光电测量系统由 1p 21、1p 28 光电倍增管和直流测量放大器组成。用它直接读出光栅和反射镜的能量。现已能够测定 2537 埃、3132 埃、4358 埃、5085 埃、5461 埃、6438 埃七条谱线的强度，其测量误差不大于 $\pm 7\%$ 。

光栅鬼线、杂散光相对强度的测定 罗兰鬼线采用照相测光法进行测定。即在 4 米或 8 米光谱仪上加阶梯减光板，再用同样的曝光时间加阶梯减光板和滤光片照主线，分别用它们做出两条乳剂特性曲线，在相同照相条件下它们之间的距离为：

$$\lg I_{\text{鬼}} - \lg I_{\text{主}}' = \lg \frac{I_{\text{鬼}}}{I_{\text{主}}'}$$

求出 $I_{\text{鬼}}/I_{\text{主}}'$ 再乘上所加滤光片透过率即求出。这一方法相当于取主线上若干点的平均值，结果可靠。

赖曼鬼线用测光栅闪耀效率的装置进行测量，可以测到强度小于 0.01%。

散射光测定 在 8 米光栅摄谱仪上，用照相测光法测定杂散光强度，即测量过曝光光谱线的线翼强度作为杂散光，再测出谱线本身的强度，二者之比即求出。此外，还在 4 米摄谱仪上用激光作光源测定杂散光。