

一个新兴的近代光学分支——集成光学

洪佩智

(沈阳工业学院物理教研组)

集成光学是六十年代末期,在集成电子学和激光技术的基础上发展起来的一门新兴学科,是一门与光学、电子学和固体物理有关的交叉学科。集成光学主要是研究有关集成光路的理论、制造和应用。集成光路就是采用类似半导体集成电路那样的技术把一些光学元件(如激光器、光波导、耦合器、调制器、光开关、探测器等)以薄膜的形式集中在同一衬底上,构成一个具有独立功能的微型光学系统,如图1所示。

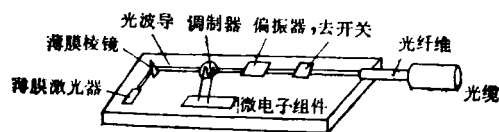


图1 设想的一种集成光学系统示意图

为理解上图中各部件的作用,我们把它与传统的系统的基本结构作一比较,如表1所示。

表 1

系统 元件	传统的光学系统	集成光学系统
发光元件	白炽灯、激光器	薄膜激光器
光传输元件	镜、筒	介质光波导
各种调节 控制元件	光学透镜、棱镜光栏、 滤光器、反光镜等	薄膜形式的透镜、棱 镜、光开关、光调制器、 定向耦合器
光接收器	眼睛、照相底片、投影屏	各种光电探测器

由此可见,传统的光学系统,包括六十年代出现的激光系统也得由固定在共同的光学底座上的各分立光学器件组成。这样的光学系统具有体积大,笨重,易受环境干扰,光束对准困难

和造价昂贵等缺点。六十年代初,集成电路的出现和发展,不仅对电子计算机,而且对整个电子技术产生巨大的影响,也使从事其它技术工作的人们受到启发。人们考虑怎样用集成的方式使系统小型化,并获得可靠性高的优良性能。另一方面,客观上,由于当代通讯技术的迅速发展,已经感到现有的无线电频率过分拥挤,迫切要求扩展工作频带,增大信息容量,于是人们在开发新频段,向高频进军的过程中,提出了光通讯的设想。

理论上,用光作通讯载波与用微波相比,其带宽要提高 10^3 倍,信息存储量提高 10^4 倍,信息处理速度快100倍。光通信的诱人前景吸引着科学工作者努力探索,指望借助于成功的电信技术和理论使技术光学来一次革命性的变化。激光的出现使这个愿望有可能变成现实。近十几年来,无线电电子技术的一整套理论和技术元件已逐步向光频段渗透。光通讯和光信息处理技术的迅速发展以及光计算机的需求,使集成光学应运而生。

在六十年代,一些科学家做了一些开拓性工作^[1-3]他们首先把微波方法用于激光束,从理论和实验上提出并验证了激光束在介质薄膜波导中传输的可能性。这些工作为开辟一个崭新的领域打下了理论与实验基础。

1969年美国光学协会、国际光学委员会和国际纯粹和应用物理学联合会共同发起在美国召开了第一届国际集成光学会议,会上正式提出了“集成光学”这门崭新的学科。接着在1972年,1974年和1976年又召开了三次集成光学国际性会议。此后,许多国家的政府机构、军事部门、公司企业和高等院校都相继投入了相当的力量从事集成光学和光纤通信的研究与开发

工作,使得这方面的学术交流日趋活跃。现在,这个领域的最有权威性的学术活动是国际集成光学和光纤通信会议,简称 IOOC,从 1977 年起,每隔两年轮流在远东、欧洲和北美三地区召开。我国从 1974 年起正式开展集成光学研究,现在全国已有二十多个科研单位、高等院校和企业单位开展这一领域的研究和开发工作。

与传统的理论发展过程不同,集成光学这门学科在刚提出来的时候,仅是理论上的一种设想,人们对它的认识还相当模糊。那时,不仅拿不出一个真正的实体,连用什么材料?如何制作?有哪些理论依据都不十分清楚。十几年过去了,集成光学在孕育着和发展着,正在由一种纯粹的设想,向现实转变之中。

十六年来,主要完成了以下几项工作:

(1) 理论基础基本奠定,已构成完整独立的学科体系。

(2) 使用的材料逐步明确,相应的工艺技术日趋成熟。

(3) 制作了多种薄膜分立元件,有些已进入局部应用阶段。

(4) 光路集成取得了显著进展,已制成多种集成化的功能器件和具有一定集成度的光路。

本文试从以上几个方面向读者简要介绍集成光学这一领域发展的概貌,以便引起更多的人了解和关心这一领域的进展。

一、光波导与导模

在微波中,我们用金属波导来传输电磁波。而在光频段中,由于光在金属边界上被吸收严重,因此不能用金属波导来传输,而要用介质光波导。

这里介绍一种最简单最基本的介质光波导——平板波导。平板波导的横剖面结构如图 2 所示,这是一个由介质薄膜、衬底和包层组成的三层介质结构,其折射率分别为 n_1, n_2, n_3 且满足 $n_1 > n_2 > n_3$ 。一般来说,薄膜厚度约微米量级,而衬底厚约毫米量级,包层通常为空气(即 $n_3 = 1$)。由光的全反射原理可知,一束光从光密媒质(折射率为 n_1)入射到光密媒质与光

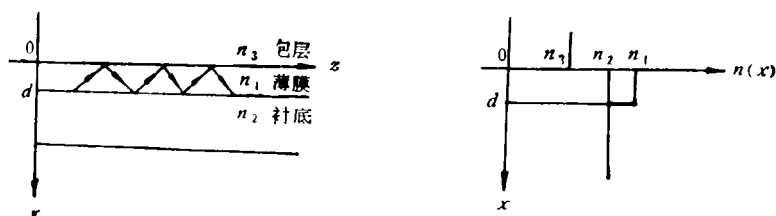


图 2 平板波导结构

疏媒质(折射率为 n_2)的分界面时,当入射角 θ 满足 $\theta > \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ 时,光线在分界面上将发生全反射,而 $\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ 即叫做全反射临界角。在平板波导中,薄膜-包层界面(即上界面)的全反射临界角为 $\theta_{13} = \arcsin \frac{n_3}{n_1}$,薄膜-衬底界面(即下界面)的临界角为 $\theta_{12} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ 。当薄膜中的光束入射角满足 $\theta_{12} < \theta < \pi/2$ 时,光波就在薄膜上、下界面都产生全反射,沿锯齿形光路向前传输,此时,光波能量基本上被

限制在薄膜内,薄膜就成为传输光束的光路,而被限制在薄膜内传输的光波叫导模。

从上面分析可知,如果在某种介质结构的横截面上产生低—高一低的折射率分布,那么就可用来作光波导,而被低折射率包围的高折射率区就叫做波导层。因此,光波导就是集成光路中用以限制和传导光波的基本光学回路,类似于集成电路中的回路。光波导可分为两类:平面波导和条形波导。平面波导只在横截面内的一个方向上限制光波,对于某些应用来说,光被限制在一个方向就足够了。但是,很多

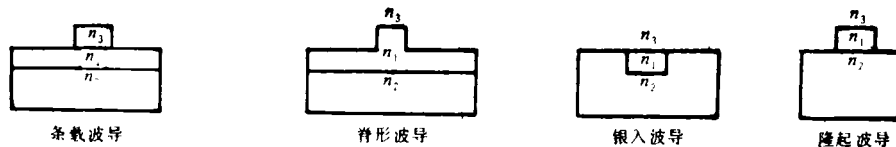


图3 条形波导横截面示意图 ($n_1 > n_2 > n_3$)

集成光学器件如开关、调制器和激光器都要求对光有格外的限制,因此,要用条形波导。图3给出了四种不同类型的条形波导截面示意图。在这些波导中,光波均被限制在波导横截面的两个方向上。

描述各种波导传播特性的介质光波导理论是建立在 Maxwell 方程基础上的电磁波理论。对于平面波导来说,问题的实质归结到求解以薄膜-衬底和薄膜-空气界面为边界条件的 Maxwell 方程。我们可以从理论上获得该方程的严格解。波导方程的每一个特解即表示导模的一个模式,因此,求解满足给定边界条件的 Maxwell 方程不仅可以讨论波导中导模的传播特性(例如导模的传播常数、截止条件、波导的有效厚度等),还可以讨论各模式导模的场分布、偏振态以及功率流等问题。对于横截面为圆形、椭圆形的条形波导,也都可以从理论上得出严格解;对于横截面为矩形的条形波导,由于边界问题比较复杂,很难在分界面上将电磁场加以匹配,因此求解特征方程往往采用一些近似方法(如 WKB 近似、变分法、有效折射率法、数值计算法等)。

对于平面波导,还有一种简单而直观的方法,即采用几何光学的方法来讨论波导中导模的传播特性,这就是 P. K. Tien 首先提出的锯齿形平面波导理论^[1]。该理论可以导出与电磁

理论结果完全一致的模方程,求解模方程即可得出导模的传播常数,从而可以研究波导的传播特性。下面以平板波导为例较详细地介绍光波导的几何光学处理法。

我们首先讨论平板波导的模式。为此,先考虑各种可能的光线在平板波导中的传播情况。平板波导的结构与折射率分布如图2所示。已知光线在上界面的全反射临界角为 θ_{13} , 下界面的临界角为 θ_{12} 。当光束在薄膜内的人射角 θ 从零增加到 $\pi/2$ 时,会有三种不同的情况发生,如图4所示。当 $0 < \theta < \theta_{13}$ 时,由衬底一侧入射的光束折射入薄膜内,又通过薄膜上界面折射到包层中;反之,从包层一侧入射的光束通过薄膜也折射到衬底中,如图4(a)所示。此时,光波能量未被限制在薄膜内而是辐射在衬底和包层这两个半无限空间内,与此对应的电磁波模式叫包层模。当 $\theta_{13} < \theta < \theta_{12}$ 时,由衬底一侧入射的光束在薄膜下界面折射入薄膜内,在薄膜上界面受到全反射,然后又折射到衬底中,如图4(b)所示。这时,光波能量也未被限制在薄膜内,而是辐射在衬底这个半无限空间内,相应的电磁波模式叫衬底模。当 $\theta_{12} < \theta < \frac{\pi}{2}$ 时,光波在薄膜上下界面都产生全反射,

能流就集中在薄膜内,沿 z 方向传播,与此对应的电磁波模式叫导模。由以上分析可知,光波

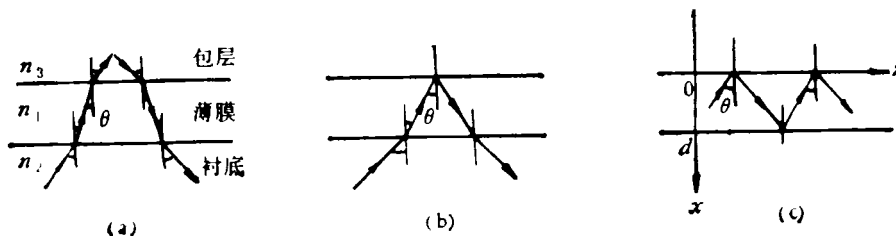


图4 平板波导模式的几何光学模型
(a) 包层模; (b) 衬底模; (c) 导模

在波导中有三种可能的传输模存在,即包层模、衬底模和导模。而只有导模才是实际在光波导中传输着的光波,所以下面着重介绍导模。

以上我们用锯齿形光线模型描述了平板波导中的导模。现在来进一步讨论平板波导中维持导模存在的条件。根据 P. K. Tien 的理论^[1], 锯齿形光波可看作为薄膜中两个相互叠加的均匀平面波,其中一个为斜向上传播,另一个为斜向下传播,图 5 分别给出了两个平面波的波矢量。然后,把波矢量分别分解成水平分量(z 分量)和垂直分量(x 分量),显然两个波矢量的水平分量相等,表明波以恒定的速度在平行于膜层的方向上传输。波矢量的垂直分量一个表示向上传播的波(沿 x 负向),另一个表示向下(沿 x 正向)传播的波,当这两列频率和振幅相等、传播方向相反的相干波重叠时,它们便在膜厚度方向(x 方向)的横截面上形成驻波花样,改变 θ 就改变了波矢量的方向,也就改变了它们的水平和垂直分量,因而也就改变了平行于膜层的波速和膜层横截面上的驻波花样。

设图 5 中 $\mathbf{K} = n_1 K \mathbf{K}_0$, 则

$$K_x = h = n_1 K \cos \theta,$$

$$K_z = \beta = n_1 K \sin \theta,$$

式中 \mathbf{K}_0 为 \mathbf{K} 方向上的单位矢量。 h 和 β 分别代表 \mathbf{K} 的 x 分量和 z 分量。 $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为光波在

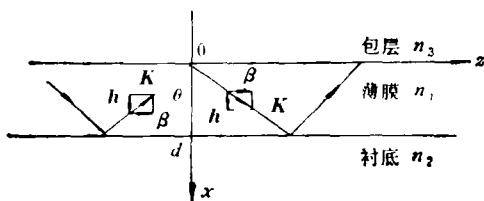


图 5 锯齿光线的波矢量图

真空中的传播常数,其中 λ 为真空中的光波长。可以设想,如果我们从波导端面观察这两个光波的运动,那么只能看到光波沿 x 方向作上下运动,因而可不必考虑光波沿 z 方向的运动。以下便从这个观点出发来导出平板波导中维持导模的条件。根据相干波的叠加加强条件可知,为维持光波在薄膜内的传播,必须使光波在

物理

薄膜的上下界面之间往返一次经受的总位相差为 2π 的整数倍。已知波矢量的垂直分量为 h , 对于膜厚为 d 的薄膜层,光波上下往返行进的位相差为 $2hd$; 此外,由于光波在薄膜上界面处产生全反射,界面效应引起的位相变化为 $(-2\Phi_{12})$ 同理在下界面产生位相变化为 $(-2\Phi_{13})$ 表示 Goos-Haenchen 移动^[2], 因此可写出平板波导中维持导模的条件为

$$2hd - 2\Phi_{12} - 2\Phi_{13} = 2\nu\pi$$

$$(\nu = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

上式即称为平板波导的模方程,式中 ν 叫做模阶数。

为了形象直观地了解各类模式的性质,图 6 给出了平板波导中导模、衬底模、包层模三种模式的场分布图形,其中导模只画出了 $\nu = 0$ 和 $\nu = 1$ 的两个模式。

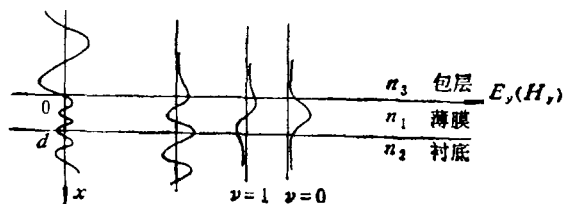


图 6 平板波导中模式的场分布

以上图样说明全反射时,入射波和反射波在波导内叠加后形成了沿 x 方向的驻波,而在波导的上下介质内则形成场振幅沿 x 方向作指数衰减的消失场,称为瞬逝场。这就解释了为什么全反射时光波能流基本上被限制在薄膜波导中的物理本质^[3]。

三、材料与工艺

集成光学从开始提出的那天起,人们首先把精力集中在波导的制作上。在制作过程中,使用什么材料,采用哪些工艺是首先遇到的问题。十多年来经过大量的实验和探索,已经知道能制作波导的材料体系有玻璃、半导体、有机材料、铁电材料等。理想的集成光学材料应具

有良好的透光性,光损耗低(传输损耗须低于 1dB/cm),一定的折射率(比衬底约高 10^{-3} — 10^{-1}),成膜容易且便于制作和集成,具有多种功能,性能可靠等。目前认为最有希望的材料有两种:一种是砷化镓 GaAs 及其三元、四元化合物;另一种是铌酸锂 LiNbO_3 ,钽酸锂 LiTaO_3 晶体。前者已用来制成激光器、调制器、定向耦合器、探测器等分立元件,它们在制作工艺上,可把半导体集成电路工艺移植过来,但目前它的传输损耗比较大,后两种材料已用来制成优良的光波导,且传输损耗低(已低于 1dB/cm),电光系数大,能制成高效率的光开关和各种调制器、双稳态光学器件及全息存储器等,但似乎不适宜做激光器。

不同材料需采用不同工艺,集成光学工艺技术主要包括成膜工艺和光路微加工技术。一些半导体集成电路工艺,象高频溅射、扩散、外延、离子交换、光刻腐蚀等,在波导制作及集成电路中均得到应用。制作光路图案的方法有电子束曝光、分子束外延、X射线曝光、离子铣、全息曝光等,例如用电子束已制成线宽为 80\AA 的金属结构,用全息曝光已获得 9000 条/ mm 质量很好的光栅等。

四、分立元件的制作和集成工作的进展

材料、工艺基本确定后,人们从简单的器件做起,逐渐向集成化方向发展。到目前为止,各种各样的薄膜形式的集成光学分立元件相继问世,有的已付之实用,主要有:

1. 光波导

目前已制成较高质量的平面光波导和各种形状的条波导($4\mu\text{m}$ 宽)。国内用离子交换法、扩散法、射频溅射法均已制备出性能较高的光波导^[5,6]。光波导参数的测量以及波导性能评价方面的可靠性和重复性正在增长。天津大学精密仪器系研制的“平板波导测试仪”,长春第一光学仪器厂生产的“CBG型光波导测试仪”,为此提供了实验设备条件。

2. 耦合器

其功能是把激光束从一个部件全部或部分地传递给另一个部件。集成光学的耦合包括光束与波导,波导与波导,波导与光纤以及各分立元件间的耦合等。目前,耦合方式主要有四种:第一种是光束直接聚焦到波导端面^[7],这种耦合由于端面入射光的散射不易克服,因而耦合效率较低;第二种是棱镜耦合器,理论上耦合效率几乎可达 100% ,实际已达到 88% ^[8],此种耦合器已广泛用来测量光波导的各种参数,如传输损耗、膜厚、折射率等;第三种是光栅耦合器,理论上耦合效率可达 81% ,实际已达到 70% 以上^[9]。由于光栅是直接做在薄膜波导上的,因此可作无损测试,而且便于集成;第四种是楔形耦合器,耦合效率可达 40% 以上^[10]。此种耦合适用于同一衬底上不同元件之间的互相连接,从集成的角度来看,此种耦合器意义较大。

3. 调制器

这类器件主要是为了适应集成光路、光通讯以及各种信息处理系统的需要,其工作原理大都是利用电-光,声-光和磁-光效应,使波导在适量的电、声、磁场干扰下局部折射率发生变化,从而实现对光束的调制、偏转、开关等功能。这类器件的研制在国外进展很快,如C. S. Tsai等人在 LiNbO_3 中使用模拟电光棱镜结构,实现了引导光束的超快速偏转、开关和调制^[11],每单元有九个光束信道,能开关进入9个信道中任何一个人射光束,每个光束位置的驱动电压为 8V ,光学插入损耗为 0.5dB ,相邻信道间的串音为 $13.5\sim 9\text{dB}$ 。由于它具有非常小的电容,因此能以很低的驱动电压实现超快速光学多孔束偏转开关和调制。国内在声光频谱分析器方面做了很多工作,已研制出波导声光器件和波导透镜。但对各种调制,无论从工艺技术和测试方面还是从器件性能的研制和探索方面来看,目前都还需要做大量的工作。

4. 探测器

集成光学所需的探测波长,目前主要是在 $0.8\sim 1.6\mu\text{m}$ 范围内。在 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 范围内,可

用 Si 和 GaAs 探测器, 在 1.0—1.60 μm 范围内, 可用 GeInGaAs 和 GaInAsP 探测器. 已经制成一种与光波导集成在一起的 Si 探测器, 在 Si-SiO₂ 衬底上淀积玻璃波导, 对 6238 \AA 的光耦合效率为 80%, 上开时间为 15ps^[12]. 最近报道了在 InP 衬底上外延 GaInAsP 层, 成功地制成了探测 0.9~1.2 μm 的雪崩光电二极管, 上开时间为 150ps 量子效率为 45%^[13]. 这类器件的制作大都可采用标准的集成电路工艺, 以便于光学元件与其它电子元件集成在一起.

5. 激光器

激光器是集成光路的核心部件. 目前所研制的分立薄膜激光器主要有五类不同结构; 光栅反馈型^[14] (包括分布反馈激光器和分布喇格反射式激光器); 集成双波导型^[15]; 集成干涉反射镜型^[16]; 生产台面型和环型^[17,18]等, 其中分布反馈激光器已实现了室温连续激发.

光路的集成也有了显著的进展, 制备了一些简单的集成光路. 这方面水平较高的要算美国贝尔实验室的一种光路, 它在一块坤化镓衬底上制作了一个激光器, 一个波导和一个探测器, 激光器发出的光束通过厚 1 μm , 长 250 μm 的波导传输后, 探测器测得的总微分转换效率为 10% 左右^[19]; 此外日本人也宣称, 他们在同一衬底上集成了六个发射波长不同的分布反馈激光器^[20], 每个激光器在室温下的阈值电流密度为 3—6kA/cm², 这六个激光器通过六个光源波导接到一个输出波导.

五、应用与展望

集成光学最先应用的领域是光纤通讯, 近年来由于通讯频带过分拥挤, 一些技术发达的国家在 1975 年和 1976 年就相继建立了一些试验线路^[21], 在 2—3km 的试验线路上传输生活图象、电视节目, 进行电视遥控等均获得成功. 此外在长达 64km 的光纤中继线路上传输彩色电视的试验 (每 8km 设一个中继器) 也获得成功. 这种光纤通讯还将在飞机、舰艇、激光雷达、卫星通讯方面大显身手. 在国内, 1978 年在桂

林成功地建立了全国第一条短波长 8.448Mb/S (相当于 120 路数字电话) 的 1.8km 光纤通讯试验线路. 1980 年, 先后实现了 6km 和 16km 的光纤通讯试验线路, 并于 1982 年 11 月正式提供铁道部专用网使用, 传输距离为 12km, 经使用证明, 该系统性能稳定可靠, 在各种条件下, 误码率均保持在 1×10^{-9} , 这标志着我国光纤通讯已进入实用阶段.

此外, 集成光学在光学图象处理、全息技术、光纤传感器方面的应用也明显增多, 相应的实验也在进行. 如美国海军部利用声光效应, 用集成光路制成一个频谱分析仪已投入使用.

用集成光路构成光计算机, 这是集成光路最吸引人的应用领域, 从理论上利用光波的高频率运算速度可达每秒 100—1000 亿次, 存储量为 10^{18} 位, 这是电子计算机远不能相比的. 近几年来以集成光学为技术基础的各种光计算机方案探索特别活跃. 1984 年 5 月, 报道了欧洲八所大学联合研制世界上第一台光计算机的消息. 据报道, 研究计划为期三年, 由欧洲委员会资助经费 140 万美元, 地点设在英国爱丁堡的赫里粤特-瓦特大学. 我国于 1984 年 10 月 18 日在西安成立了《中国光计算机研究促进会》, 由钱学森教授担任该会的名誉会长, 并准备积极筹建“中国光计算机研究开发中心”.

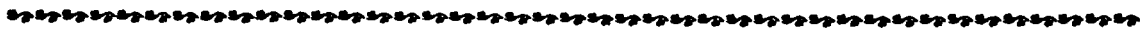
由于光具有最高的传播速度, 光电器件尺寸又可以小到光波长量级, 因此从传播速度和小型化来看, 都是十分理想的. 从目前来看, 集成光学对大容量单模光纤通信、光纤传感器和集成光学传感器, 对改进和提高现有电子计算机性能, 发展电光结合或新型的全光计算机以及实现某些光信息处理, 实现光、机、电全自动控制技术等新领域, 均能提供共同的技术基础和元件. 正象钱学森教授所说: “量子电子学这个名称应改为“光子学”, 这是一门与电子学平行的科学, 光子学、光子技术, 光子工业将象电子学、电子技术、电子工业一样获得异常迅速的发展”.

既然集成电路和微机几乎已经进入人类社会活动的一切领域, 那么相信不久的将来, 集成

光学、集成光路技术也会象集成电路那样普及，
为人类造福。

参 考 文 献

- [1] P. K. Tien, *Appl. Opt.* **10**(1971), 2395.
 [2] H. Kogelnik et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-9**(1973), 795.
 [3] Born and Wolf 著, 黄乐天、陈熙谋、陈秉乾译, 光学原理(上册), 科学出版社, (1981).
 [4] 洪佩智, *物理*, **14-7**(1985), 429.
 [5] 刘洪举, *中国激光*, **11-6**(1984), 381.
 [6] 李玉善等, *科学通报*, **25-15**(1980), 685.
 [7] D. Marcuse et al., *Bell. Syst. Tech. J.*, **50**(1971), 43.
 [8] R. Ulrich, *J. Opt. Soc. Amer.*, **61**(1971), 1467.
 [9] D. G. Dalgoutte, *Opt. Commun.*, **8**(1973), 124.
 [10] P. K. Tien et al., *Appl. Phys. Lett.*, **18**(1971), 398.
 [11] C. S. Tsai et al., *Appl. Phys. Lett.*, **27**(1975), 248.
 [12] D. B. Ostrowsky et al., *Appl. Phys. Lett.*, **22**(1973), 463.
 [13] C. E. Hurwitz et al., *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 487.
 [14] W. Ng et al., *Appl. Phys. Lett.*, **29**(1976), 684.
 [15] M. Yamada et al., *IEEE J. QE-13*(1977), 201.
 [16] D. R. Scifres et al., *Appl. Phys. Lett.*, **30**(1977), 585.
 [17] C. E. Hurwitz et al., *Appl. Phys. Lett.*, **27**(1975), 241.
 [18] N. Matsumoto et al., *Japan. J. Appl. Phys.*, **16**(1977), 1395.
 [19] J. L. Méz et al., *Appl. Phys. Lett.*, **30**(1977), 530.
 [20] K. Aiki et al., *Appl. Phys. Lett.*, **29**(1976), 506.



(上接第 430 页)

另外,对晶棒的一端六个方位(大致转 60°
测一数据)测得六个数据,如表 5 所示。

根据以上测得的{220},{200}及端面(200)
的实测数据,作出(200)面的极图,见图 3。

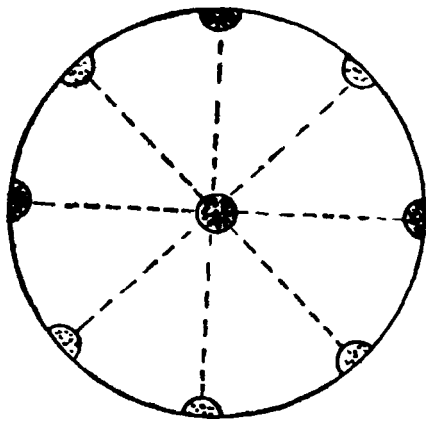


图 3 多晶铜棒择优取向的(200)极图(正视方位)

三、结 语

金属多晶材料不同程度择优取向的存在, 往往会影响它的物理性质和机械强度, 因此判断金属多晶材料是否有择优取向存在, 并对其择优取向面指数进行测定, 是一项很重要的工作。在没有先进的衍射仪设备条件下, 应用本法鉴别单晶与多晶, 并快速判断择优取向的存在是行之有效的。本法对样品无严格要求, 设备简单, 操作方便, 精度较高, 因此有一定实用价值。不足之处是测定面指数只能单个进行, 无永久性的记录资料, 因此有一定局限性。

参 考 文 献

- [1] 许顺生, *金属 X 射线学*, 上海科学技术出版社, (1962).
 [2] 刘来保, *物理*, **13**(1984), 746.
 [3] 刘来保, *物理*, **14**(1985), 487.
 [4] 刘来保, *物理*, **13**(1984), 415.