

Δx 引起函数 y 的间接误差 Δy 是: $\Delta y \approx (1/2)x^{-1/2}\Delta x$. 具体到 $y = \sqrt{4.52 \times 10^3}$, 有 $x = 4.52 \times 10^3$, 为三位有效数字, $\Delta x \leq 5$. 所以

$$\Delta y \leq \frac{5}{2\sqrt{4.52 \times 10^3}} < 0.04,$$

$$y = \sqrt{4.52 \times 10^3} = 67.2$$

为三位有效数字. 另外, 68 这时又以分子形式参与除法运算, 且上述定理条件依然满足, 但商 1.0 在这里不取三位有效数字, 否则最低位上的误差将使相关系数 $r > 1$, 不合理.

最后看一下(20)的结果. 上面分析了 1.70 的误差, 因而推知求出的声速 5.88×10^3 米/秒在第三位数字上是有误差的. 所以对声速测量的结果, 只准确到前两位有效数字.

二、实例 2

为了研究耦合界面对声速的影响, 可用同直径不同长度的圆柱形有机玻璃块按一定方式对接组合, 在对接面上涂以硅油, 人为地形成一个、两个等耦合界面. 现取 2、3、4、5、6、7、8、10 厘米的有机玻璃块各一块, 先不做对接组合, 测其走时. 然后将 2 厘米长的那块分别与 3、4、...8、10 厘米的各块做二组合对接, 形成

一个耦合界面, 再测其走时. 最后做三组合对接. 用本文的回归方法求出相应的声速为:

组合方式	不做组合	双组合	三组合
声速 (米/秒)	2.75×10^3	2.75×10^3	2.72×10^3

如果采用精确数的计算方法来求回归方程, 最后保留六位有效数字, 那么, 求出的声速是:

组合方式	不做组合	双组合	三组合
声速 (米/秒)	2761.92	2748.98	2753.20

显然前一个表是正确的, 因为根据一般的物理常识, 界面增多, 声速肯定要降低 (至少这种降低在仪器精度范围内测不出来), 但决不会象后一个表给出的那样三组合 (两个界面) 的声速比双组合 (一个界面) 还高. 由此看来, 精确计算在处理近似数的过程中, 有时非但不能给出精确结果, 反而会掩盖问题的实质, 造成错误结论. 因此, 在回归过程中强调数值分析的重要性, 就是十分必要的了.

参 考 文 献

- [1] 中国科学院数学研究所数理统计组, 回归分析方法, 科学出版社, 1975 年.
- [2] J. B. 斯卡勃罗, 数值分析, 科学出版社, 1958 年.

强磁场技术及其在科学研究中的应用

高 秉 钧

(中国科学院等离子体物理研究所)

强磁场的含义在技术上通常是指超过 3T (1T = 10⁴G) 的磁场.

产生强磁场的基本方法是让电流通过多匝线圈. 这项技术始于十九世纪, 正是这一发明导致了近代电力工业的出现.

本世纪三十年代末, 由于 F. Bitter 在美国麻省理工学院开创了水冷磁体设计技术^[1], 从

而使稳态强磁场的产生技术有了大的突破. 五十年代, 许多国家开始建造强磁场实验装置; 六十年代后, 大型的强磁场实验室在许多国家相继建立, 并广泛开展了强磁场下的科学研究工作. 目前, 水冷磁体产生的场强达到 23.5T. 与此同时, 由于六十年代初, 高临界参量 (H_{c1} , T_c , J_c) II 类超导体的出现, 使相当数量的场强

高于 14T 的超导磁体系统在世界范围内建立起来了。目前的世界纪录是 17.5T。

将水冷磁体与超导磁体相组合可以产生最高稳态场 30.1T^[2]。

更高的磁场是以脉冲方式产生的。准稳态(零点几秒)磁场约达到 40 T。短脉冲(毫秒数量级)磁场以非破坏方式提供的场强接近 100 T, 更高的场强可达 300T 以上, 但线圈和样品会受到破坏^[3]。

本文主要讨论稳态强磁场技术及其在科学研究中的应用。

一、强磁场技术

1. 水冷磁体

表 1 列有世界上主要的大功率水冷磁体,

表 1 世界上主要的大功率水冷磁体

国家	场所	建立年份	电源功率 (MW)	电源类型	场强 (T)	有效孔径 (cm)	注
美国	FBNML	1960	10	机组 4×2.5	8—23.5	25—3.2	
	NRL	1948	8	整流 6 机组 2	18	3.2	
	Pennsylvania 大学	1968	4	机组	15	2.5	
	California 大学	1960	8	机组	12.8	12.2	煤油冷却
法国	C. E. A. Saclay		4	机组	15	4.2	
	Grenoble (法、德)	1972	10	整流 4×2.5	23.4	5.0	
西德	Hochfeld 实验室	1971	5.5	整流	16	5.0	
英国	Clarendon 实验室	1945	2	机组	9.5	5.1	
荷兰	Nijmegen 大学	1971	6	整流	15	5.3	
波兰	Int. Lab. HMF & L. T., Wroclaw		6.4		20	3.0	
苏联	Lebedev 研究所		9		18	5.0	
	Kurchatov 研究所		6	整流	18	4.0	
日本	东北大学(仙台市)		3.5 8	整流	12	5.0	

的匝间用环氧树脂粘结,同时作绝缘用。冷却水流过相邻两薄线圈之间的通道,因此冷却量大,传热效果好,可以允许较高的电流密度。

由于多螺旋线圈是分离结构,其电流密度

其中绝大多数是用 Bitter 技术制作的。将用绝缘环隔开的许多硬铜(或合金铜)圆盘串接起来,并用绝缘连接杆拧紧,构成一个刚性厚线圈[图 1(a)]。圆盘上开有一排排小圆孔作轴向冷却用。Bitter 线圈导体中的电流密度与半径成反比。如果采用不同的圆盘厚度,也可以改变轴向的电流密度分布。这种线圈比均匀电流密度线圈的效率,但却会引起磁体径向内侧的最大电流密度,这就带来严重的冷却问题和应力问题。

水冷磁体的中心磁场 $B_0 \propto 1/\sqrt{D_1}$ (D_1 为磁体的有效孔径),所需的电源功率 $W \propto B_0^2$ 。为了进一步提高中心磁场或进一步扩大有效孔径,近十余年来发展了另一种强磁场线圈,称为多螺旋线圈[图 1(b)]。它是由一组分离的薄线圈组成,每一薄线圈是一个单层绕组。线圈

J 、线圈的半高度 b 和填充因子 λ 均可按优化设计要求,沿径向自由调节,因此它的利用系数比 Bitter 线圈要高。每一薄线圈的应力可以任意限制,以适应不同的材料选择要求。

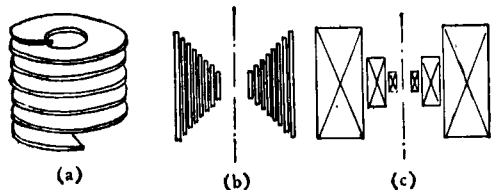


图1 水冷磁体

(a) Bitter 线圈; (b) 多螺旋线圈; (c) 多线 Bitter 线圈

在麻省理工学院还采用了开有辐射状槽的导体圆盘以改善冷却状况,并将磁体做成多级 Bitter 线圈[图1(c)].

建造大功率水冷磁体不仅需要大功率的电源,而且需要与电源功率相应的纯水冷却系统.同时,为了承受高场磁体中巨大的电磁应力,除了考虑用高强度的铜合金(如 Cu-Ag, Cu-Al₂O₃)外,还应考虑两边是否用不锈钢增强的铜导体.但是,这就会减小导体的电导率,同时还需要更大的电源功率(图2).

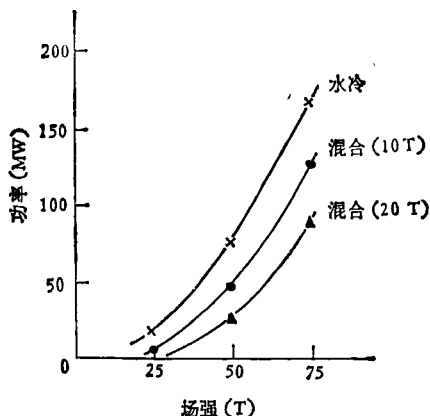


图2 3cm 孔径的水冷磁体和混合磁体的电源功率要求;两混合磁体曲线的 10T 和 20T 为外超导磁体提供的磁场^[43]

2. 超导磁体

目前,从小型到大型已相当普遍地采用多丝 Nb-Ti 复合线的超导磁体.获得 8T 左右的场强已是容易的事情.如果在 1.8K 下运行,场强可达 10T.更高场强的小型磁体是采用 Nb₃Sn 带,也已经有商品.但是,使用多丝 Nb₃Sn 线的大型磁体还仅仅是开始.

在超导磁体设计中,超导体的上临界场和临界电流密度是有关键意义的物理量.超导体

的临界电流密度 J_c 随线圈内磁场的增加而降低.达到上临界场时, J_c 为零,所以无法获得高于上临界场的磁场.为此,人们正致力于研制高临界参量的实用超导体.另外,由于洛仑兹力的存在,为限制脆性 A₁₅ 化合物的应变,在超导带中常加入不锈钢增强,这样就相对地降低了绕组中的平均电流密度.还有,磁体的贮能与磁场的平方成正比,在高场时,磁场的贮能是相当大的(兆焦量级以上).失超时,为了将此能量安全引出,常采用高铜比的超导线,这会使绕组的平均电流密度再度下降.因此,随着磁场的提高,磁体的尺寸和成本增长很快(参看图3和图4).

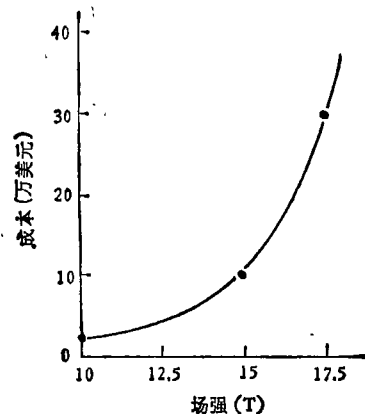


图3 5cm 孔径,场强为 10 到 17.5T 的超导线圈的成本^[43]

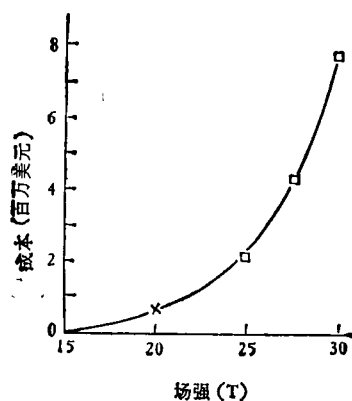


图4 3cm 孔径,高场超导线圈的估算成本^[43]

3. 混合磁体

1966年,牛津大学的 Wood 和麻省理工学院的 Montgomery 共同提出混合磁体(由水冷

表 2 世界上主要的混合磁体

国家	场 所	建立年份	水冷线圈		超导线圈 场强 (T)	总 场 (T)	孔 径 (cm)	现 状
			功率 (MW)	场强 (T)				
英国	牛津大学	1975	1.6 2	9.5 13.5	6.5	16 20	5.0 3.0	运行 计划建造
美国	麻省理工学院	1977*	9.2	22.1	8	30.1	3.2	实验值
荷兰	Nijmegen	1978	5.7	17	8	25	3.2	运行
苏联	Kurchatov	1977	5.6	18	6.3	24.3	4.0	
法、德	Grenoble		10	20.5	11	31.5	5.0	正在建造
日本	东北大学 (仙台)		3.5	13	8	21	3.0	正在建造 计划建造 计划建造
			7	18	8	26	3.0	
			7	18	12	30	3.0	

* 是指文章发表的时间

内磁体和超导外磁体相混合而成)的设想^[5]。对于一个水冷磁体,功率多消耗在磁体的外层,而此处的场强较低,所以用超导磁体代之,这样便可以用较小的功率获得较高的磁场(图 2)。

表 2 列有世界上主要的混合磁体。

目前稳态场(混合磁体的)是 30.1T。麻省理工学院计划在 1990 年达到 75T。为此,必须努力发展强磁体新技术、增加电源的功率和扩大超导磁体的规模。

二、强磁场在科学研究中的应用

在基础科学研究中,某些新现象、新特性的探索和发现往往更多地依赖于某些极端条件(如高压、高温、低温、强场和强光等)。

强磁场在科学研究和工业技术方面的应用是十分广泛的^[3,6,7], 已有多次专门的国际学术会议。限于篇幅,本文着重讨论它在下列基础科学研究中的应用。

1. 半导体物理

强磁场的重要性在许多情况下,与固体中载流子的朗道量子化有关。由于朗道分裂,态密度明显地改变,这在许多物理现象中可以得到反映,因而可用实验来研究,并可以从中得到反映电子能带结构的有意义的信息。如早期曾指出,在低温下,强磁场的应用导致角动量量子化,能带分裂成磁的次带,由相邻的两个磁的

次带之间的能量差 $\hbar\omega_c = \hbar e B / m_c$ 求出有效回旋质量 m_c 。为了造成朗道分裂, $\hbar\omega_c$ 必须大到与 kT 可以相比的程度,并要求 $\omega_c\tau > 1$, 这就要求在低温和强磁场下进行实验。半导体反型层、非晶硅和其他半导体在强场下的性能是当代十分活跃的研究课题^[8]。

在现有 30 T 的场强下,许多实验已经能够做了。如果将场强再增大到 50—75T,那么就有可能在以下几个方面获得好的结果:(1) 向低维结构的相变;(2) 磁性半导体的电子结构;(3) 声子裹胁电子运动的“扫描”;(4) 有效质量的近似验证;(5) 浅能级杂质的研究;(6) 深能级杂质态的塞曼分裂。另外还可进行非补偿材料的霍耳角饱和、电子-空穴柱凝聚、重质量回旋共振、接近于简并的 Si 和 Ge 的真实量子极限、二维磁等离子体激元和激发效应以及半导体在强磁场中的负氢离子的研究。

2. 金属物理

研究金属费米面可以采用磁阻、德哈斯-范阿耳芬效应测量和磁击穿等方法。为了选取有效信号,前两种方法要求 $\omega_c\tau > 1$; 后一种方法要求 $(\Delta E)^2 = \mu_B H E_F$ 。为此,要求 15—20T 以上的磁场。在强磁场下,用这些方法可获得一些不寻常的科学机遇如电诱发相变、钾中的电荷密度波、奇异金属的电子结构和浓二元合金等。

结构的不稳定性和高温超导体之间的关系

是一个十分重要而仍未被认识的问题。在这些材料的研究中,回旋共振测量和费米面的观察均需强磁场。利用充分强的磁场,可以研究形变和非形变样品中费米面的尺寸和形状,从而直接探测态密度、费米面簇和结构稳定性三者之间的相互关系。

许多奇异形态的低维固体的研究表明,具有金属行为的材料比以前想象的更普遍了,象超导聚合物(例如 $[\text{SN}]_x$)和仅有一维或二维传导结构的层状化合物(如过渡金属硫化物)等。

强磁场下费米面的测定对于认识它们的传导稳定性是极为重要的,并且为试图描述这些系统中的结构相变的许多理论提供依据。特别是使我们有可能确定,在低于三维的材料中电子-电子相互作用对相变的影响,以及对与此相关的传导变化的影响。

冶金相变是应用强磁场于研究的另一重要领域。如果在所包含的相之间存在着磁化率或磁化强度差,那么外磁场就可以用来诱发或抑制相变。用磁场控制相变与以温度变化诱发相变相比,有一定的优越性,前者能在更短的时间内达到相变的驱动力,这对非扩散型马氏体相变是很重要的。人们知悉马氏体相变已有2,000年了,但是其机制至今仍未被认识。如果应用脉冲强磁场,在脉冲宽度内诱发相变,脉冲结束,相变终止,这样就能把相变停留在各个阶段,人们就有可能观察相变的中间过程。这对研究结晶机制和相变过程是很有意义的。

3. 低温物理

观察自旋取向氢的玻色凝聚的关键是降低平行电子自旋分子结构的能量。估计在50T的磁场中,自旋取向氢的玻色凝聚能长时间保持稳定,这样便能观察所预言的相变。这种相变有奇异的性质,研究它有重要的科学意义。

在进行科学研究的凝聚态物质中,液体 ^3He 是物理内容最丰富的系统之一。由于存在化学效应和配对效应,在 $^3\text{He}-A$ 中存在着铁磁矩。但是由于内部偶极场的作用,这种效应模糊了。如果加上足够强的磁场,则铁磁矩就会定向,这样便能直接测量磁矩。另外,由于磁场克服了偶

极场的影响, ^3He 中的其它定向开始起作用,人们就能研究这种没有偶极场影响的量子液体。

4. 超导电性

已实用化的高场超导材料(Nb_3Sn , V_3Ga)和高场候选材料(Nb_3Al , Nb_3Ge , $\text{Pb}_6\text{Mo}_6\text{S}_8$)的临界参量(H_{c_2} , J_c)的测量,分别要求20—30T和50—60T的稳态场。

关于材料的组分和缺陷(无序、空位和位错等)对临界参量(T_c , H_{c_2} , J_c)的影响,可以通过改变场强获得更多的信息。晶格缺陷和磁通点阵的相互作用是磁通钉扎的基础。特别有意义的是,在强磁场下研究实用超导体的经验公式: $J_c \times B = \text{常数}$,以寻找新的磁通钉扎方法,来排除该关系式存在的严重限制。这对高场磁体的设计显然是重要的。

在接近100T的磁场下,研究电子的三体配对的存在,必然要修改在场能接近凝聚能时的磁相界线。研究 H_{c_2} 随温度的变化,可以验证各种与顺磁极限、自旋轨道耦合效应以及强场超导体的其他基本性质有关的理论。

5. 磁学

迄今关于金属铁磁性的起源仍是个谜。在1T的磁场中产生相当于1.4K塞曼分裂(对于 $g=2$ 自旋),那么在75T磁场下将会产生相当于100K量级的塞曼能。该场包含许多铁磁性和反铁磁性材料的交换场,此时会产生各种各样的磁场诱导相变。用20—35T的场对Pd和 YCo_2 进行的实验证明,虽然Pd是周期表中最重要的交换增强元素,它的长程极化使它成为3d元素(如Fe, Co)的一个基质,但是在Pd中没有观察到诱发铁磁性的证据,而 YCo_2 中则有。由于磁矩的交换增强部分预计将随 D^3H^3 变化(D为交换增强)。50—75T的场能将分辨率提高两个数量级。研究增强基质中的磁性杂质之间的耦合是有价值的。因为当基质的磁化率增加时,杂质间耦合范围增加,因此可用磁场来调制这种耦合。这对认识稀释合金、自旋玻璃和非稀释系统是很重要的。

磁有序系统的多临界点使验证近代相变理论和定标律成为可能。在过去的几年中已有很

大进展。人们已能概括物质中的从磁性到非磁性相变的行为。其中最有意义的是反铁磁体的双临界点。自旋转向、反铁磁和顺磁三种相边界在这里相交。为了研究这一区域，需要几倍于临界场 $H_c = (2H_R H_A)^{1/2}$ (其中 H_R 和 H_A 分别为交换场和各向异性场) 的磁场，大约为 15—30T。这种临界现象的另一重要研究领域是，在横向磁场中的伊辛 (Ising) 基态模型可以描绘成任意温度的没有磁场的二维伊辛模型。

6. 原子和分子光谱学

这一领域的主要课题有高里德伯态的研究；运动斯塔克线形、反交叉研究和碰撞动力学问题等。

强磁场引起原子或分子基态和受激态动量矩的进动，因而改变碰撞的截面。例如，在 Na-Na^* 共振碰撞中，由于一定的塞曼能级迁移，长程偶极子-偶极子的相互作用对激发迁移的贡献可能接近消除。这在原则上允许人们单独地研究相互作用势的较高阶非共振项，它们在零场中被共振偶极项所掩盖。强磁场下，碰撞动力学的研究直接地涉及到碰撞时间，并有可能得到关于碰撞势的新见解。磁场愈高，碰撞时间愈短，碰撞动力学将大为改观。

研究塞曼能和库仑能可相比较的高里德堡态，在一般磁场下要求电子具有非常高的主量子数 n 。提高磁场强度将扩展被研究系统的数目。

强磁场光谱学的研究还与天文学研究有密切的关系。在 100—1000T 磁场中的天文光谱的实验室模拟将成为研究白矮星和其他目标的有价值的工具。

7. 化学

利用强磁场，有助于回答化学上三个未解决的问题：(1) 认识凝聚相中的络合反应；(2) 认识决定分子中和分子形成期间的原子动力学的因素；(3) 认识高激发态的电子结构。

磁研究方法将改善对化学活动性的认识，它是通过络合物系统中的相对反应速率的变化来研究反应机制的。它能研究由于在磁场中分子波函数的改变所引起的新的化学性质，研究

各向同性的化学反应系统中的磁诱导各向异性效应；以及研究光诱导化学反应方法，其中包括强磁场中分子的磁敏感的单线态和三重线态。由于对一个自由电子，1T 磁场产生相当于 1.4 K 的能量分裂，强磁场能产生相当于几百 K 的塞曼分裂，这样化学激活过程就能得到实质性的修正了。

气体和凝聚相中以及表面上的化学反应动力学将明显地受 kT 量级的磁能的影响。足够的磁场将有效地改变支配原子或分子间接近和相互作用的势能面。同时，由于抗磁作用，磁场将使分子部分地定向，因此为研究化学反应的位阻效应提出一个全新的方法。

由于离子回旋共振的质量分辨率随 B^2 变化，目前的水平是，7.5T 时的极限为 1000 质量单位，如果磁场增至 100T，那么质量极限将达到 200,000。因此，使研究生物系统、多核络合物和大分子量的有机金属成为可能。100T 的离子回旋共振还能用于研究少于微克的材料，这对探索生物系统的种类和同位素分离是有用的。

8. 生物学

在磁场中，相同原子偶极子的同步进动构成磁共振的宏观效应。利用这种磁共振现象做成的波谱仪，广泛用于研究生物分子结构如蛋白质、核酸、类脂物和碳水化合物等。这是认识生物医学结构和功能的基础。为了进一步提高分辨力和灵敏度，人们正致力于提高磁场。例如，对转移 RNA 的溶液结构的研究，在目前可以达到的磁场(约 14T) 下，低场位移 NHN 共振不能分辨，它的共振数及其测定是有争议的。但是，当磁场提高到 20—30T 时，便能产生足够的分辨力，从而可以进行测定，例如进行热的折叠和非折叠的研究以及对结构能的测定。如果磁场提高到 75T，便能着手解决抗体-抗原的相互作用、血红蛋白的结构和功能、脂蛋白反应复合酶的络合体和受体束缚位置的测绘等问题。若将三维 NMR 成像技术用于单个细胞内部结构的研究，有可能认识细胞中化学过程和物质的输送情况。

9. 等离子体物理

磁约束是等离子体研究的重要手段。当磁场用于激光照射区时,对固体表面的激光诱导损伤会大大减少。研究强磁场对等离子体的激光辐射的反向散射效应表明,与激光传播方向相垂直的场减小等离子体声波反向散射的强度。轻的氢离子受磁场的影响比重的氦离子大得多,在激光加热等离子体中的这些磁场效应对于激光聚变研究有重要意义。

本文得到焦正宽和曹效文两位同志的许多帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] F. Bitter, *Rev. Sci. Instrum.*, 7(1936), 482.

- [2] M. J. Leupold, R. J. Weggel and Y. Iwasa, *Proc. 6th Int. Conf. Magn. Techn.*, Bratislava, Aug. (1977), 400.
- [3] Panel on High Magnetic Field Research and Facilities, National Academy of Sciences, Washington, (1979).
- [4] D. B. Montgomery, *J. Magn. Magn. Mater.*, 11 (1979), 293.
- [5] M. F. Wood and B. Montgomery, *High Magnetic Field—Their Production and Their Applications*, Coll. Inter. du CNRS, Paris, (1967), 91.
- [6] Francis Bitter National Magnet Laboratory, Annual Report 1977, MIT, Cambridge, USA.
- [7] S. Chikazumi and N. Miura, *Physics in High Magnetic Fields*, Springer-Verlag, (1981).
- [8] G. Landwehr, *J. Magn. Magn. Mater.*, 13 (1979), 13.

光学信息处理专题学术讨论会议简讯

由中国物理学会和中国科学院物理研究所联合主办的光学信息处理专题学术讨论会,在福建师范大学物理系的大力支持下于1983年8月26日至30日在厦门举行。来自全国各地17个研究单位和27所高等院校共84位代表参加了会议,他们当中的大多数是从事多年光学信息处理研究工作和将要开展这方面工作的中青年科学工作者。张洪钧、张以谟、徐大雄在全体会议上分别作了题为“光学双稳态不稳定性及与视觉系统非线性的类比”、“光学反馈”、“全息散斑空间变信息处理的研究”等专题报告。他们就光学信息处理同其它学科的联系、可能发展的方向,结合国内外情况谈了他们的看法,受到代表们的欢迎。与会代表还宣读了59篇论文报告。这些报告交流了近二、三年来的研究成果和进展。报告表明,除傅里叶光学、白光信息处理和假彩色编码等的研究在进一步的深入,一般性变换在几所大学和研究单位采用不同的方法取得了一定进展外,对具有相当发展前途的光电数字混合处理、实时空间光调制器件以及液晶双稳、四波混频光学在信

息处理中的应用等项研究开展了较多的工作,有些工作已取得了可喜的成果,出现了新的苗头。此外,这次会议约有一半的论文是关于光学信息处理在国防、工业、医学、遥测遥感等方面的应用,显示了光学信息处理直接为“四化”服务的潜在能力。

在宣读论文的基础上,会议还组织了四个专题讨论:(1)傅里叶光学;(2)一般性变换和混合处理;(3)银盐和非银盐记录介质;(4)白光信息处理和假彩色编码。代表们在各自感兴趣的专题里,结合自己的工作经验,进行了较深入的讨论。霍裕平在第二个专题里就一般性变换问题,提出自己的具体设想和实验方案,引起与会者的广泛兴趣。大家一致认为,光学信息处理除了基础研究外,由于光学信息处理是同应用结合较紧的学科,必须加强应用方面的研究。代表们希望今后对实时空间光调制器件的研究要进一步加快速度;同其他学科的联系要加强。与会代表还建议国内同行要加强联系,互相讨论,为光学信息处理赶上世界先进水平和实现“四化”作出贡献。(郑师海)

讲 座 预 告

本刊自第6期起开始连续刊登光学信息处理专题讲座,共13讲:相干光模糊图象处理;半色调方法实现非线性变换;计算机全息图及其应用;银盐记录介质在光学信息处理中的应用;光学普遍变换;光学 Mellin 变换;光学 Walsh 变换;非相干光(白光)信息处理;液晶光调制器;光学特征识别;光导热塑料记录介质;光学反馈;傅里叶光学中的算符方法。