

超导磁体及其应用

于 颀

(中国科学院物理研究所)

自从1911年翁纳斯(Kamerlingh Onnes)发现了超导现象以来,已经过去六十八年了。然而,真正使超导有其重大的应用价值,也只不过是近十几年的事情。原因很简单,虽然一些材料在一定温度下变成了超导体(即电阻消失,完全抗磁),然而它本身的临界电流 J_c 和临界磁场 H_c 都很低,没有什么实用价值。直到发现了 J_c 和 H_c 都很高的非理想第II类超导体并能把它加工成可复绕的线材和带材之后,超导体在实际生活中才获得了广泛的应用。现阶段国内外生产的超导材料,大都用于制造各种不同用途的实用超导磁体。

下面我们就超导磁体的一些问题谈点意见。

一、超导磁体的设计要求

如图1所示,一个内半径为 a_1 ,外半径为 a_2 ,半长为 b 的螺线管磁体,如果每匝流过均匀的电流密度 i ,

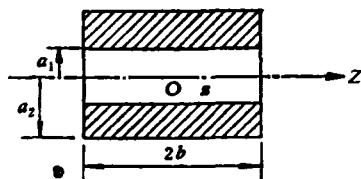


图1 磁体剖面图

导体总体积与磁体总体积之比为 λ 。那么不难算出在螺线管轴上任意点 z 处的轴向场为

$$H_z(0, z) = \frac{2\pi j \lambda a_1}{10} \left[(\beta - \xi) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\beta - \xi)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\beta - \xi)^2}} + (\beta + \xi) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\beta + \xi)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\beta + \xi)^2}} \right],$$

其中

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1}; \quad \beta = \frac{b}{a_1}; \quad \xi = \frac{z}{a_1}.$$

很明显,在螺线管中心处 O 点的轴向场为

$$H_z(0, 0) = \frac{4\pi j \lambda a_1 \beta}{10} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}.$$

我们引进函数 $F(\alpha, \beta) = \frac{4\pi}{10} \beta \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}};$

$$G(\alpha, \beta) = \frac{\sqrt{2\pi}}{5} \sqrt{\frac{\beta}{\alpha^2 - 1}} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}};$$

$$v(\alpha, \beta) = 2\pi(\alpha^2 - 1)\beta;$$

那么, $H_z(0, 0) = a_1 j \lambda F(\alpha, \beta) \times 10^{-6} = a_1 j \lambda G \sqrt{v} \times 10^{-6}$

(万高斯·安培·米)。

很多人已经把不同的 α, β 所对应的 $F, G \sqrt{v}$,全部制成了现成的图表或曲线。只要根据实际要求借助图表和曲线,通过并不困难的计算就可以得出一个满足体积最小的超导实用磁体的最佳尺寸。

如果设计一个高均匀度的磁体,就要采取尾端补偿

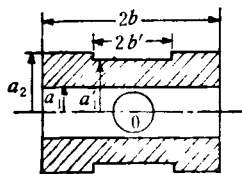


图2 磁体剖面图

线圈的办法,如图2所示。这种设计的基本出发点就是:一个螺线管中心一点的磁场在其附近一个小范围内可以进行泰勒级数展开或勒让德函数展开。由于磁场的对称性,因此,展开式奇次项均为0。尾端补偿实际上相当于两个同轴螺线管的磁场相减。我们只要选择适当的磁体尺寸,就可以使这些展开式中的二次项,四次项系数全为零。这样,除了零次项这个均匀场外,只剩下六次项和更高阶小量的项了。满足这种条件的磁体通称为六级磁体。设计的好,均匀度可达 10^{-3} — 10^{-6} 。如果均匀度再提高,就要加 x, y, z 方向的补偿线圈才行。这种高均匀度的磁体设计现在都是用计算机来完成的^[1-4]。

很清楚,超导线材越细,越容易达到设计要求。而对于带材来说,用上述方法所直接得到的基本参量不能用,必须外加逐步逼近的数学处理。总之,随着超导磁体工作的发展,其设计内容不仅仅去机械地计算几个主要参量,更重要的是要从另外两个方面去考察问题:一方面根据现有的超导材料和行之有效的稳定措施,考虑磁体的整体结构和布局。由于采用的稳定方式不同,磁体的整体结构和各部分的布局也可以有很大差别。因此,在选取主要参量时一定要考虑这个因素。例如,我们建立的 $\phi_{H_0} = 40$ 毫米,场强为112.6千高斯的铌钛和铌三锡混合磁体就是根据当时已有超导

材料的情况,采用了铌钛多股扭绞细丝的本征稳定的特点去克服铌三锡带材的低场和端部的不稳定性。因此,主要参量的选取必须遵从这一原则考虑。另一方面要根据超导磁体的具体对象,设计出适合磁体要求的超导材料。这方面的工作我们做的不多。

为了提高磁体绕组的电流密度,降低费用,我们可以把整个磁体看成是几个电流相同电流密度不同的同心线圈的组合。这样磁体结构可以更合理更紧凑。同时,还要根据实际情况,在磁体的不同部位选用不同的超导材料。一般在80千高斯以下用铌钛,80—140千高斯左右用铌三锡,140—200千高斯用钒三铟。虽然钒三铟在低场区电流密度比铌三锡低。但在高场区电流密度大大优于铌三锡。日本近年来建立了170千高斯以上的超导强磁体,高场区就是用了钒三铟材料。实际上,磁体设计不能和磁体工艺,磁体稳定化的具体措施截然分开。因为一个磁体的设计必须最终在工艺技术上得到实现,并满足稳定运行的条件。一个在工艺技术上稳定措施无法实现的磁体设计是没有实际意义的。

二、超导磁体的制作工艺

超导磁体由于所用材料不同,稳定方式不同,它的制作工艺也有非常大的差别。这里我们仅就铌三锡磁体的制作谈点体会。目前所用的铌三锡多数是气相沉积法制成的带材。在制作超导磁体过程中受力不能过大,对于宽为2.5毫米,厚为120微米的气相沉积铌三锡带材来说,一般拉力6公斤左右为宜。拉力过大,铌三锡超导层将受到损伤,性能显著下降。在复绕过程中,如果拉力一定,由于绕组的半径越来越大,其力矩也越来越大,这样下去绕组将内松外紧,甚至会出现中间层相对滑移引起带材弯折的危险。为了在绕制磁体过程中既要有一定的拉力又要保持力矩不变,那么就要采用示意图3的形式。主动轮A由于半径一定,因而在整个绕制过程中力矩是不变的。绕组为被动轮B。主动轮A以F的力压在超导绕组B上。这样制作的磁体内部的应力是均匀的。锻炼效应大大减小。在

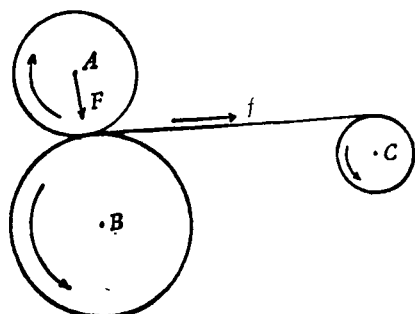


图3 铌三锡复绕示意图

螺线管式铌三锡带材磁体中,匝与匝之间留有0.2毫米的缝隙,层与层之间垫有15—24微米厚的表面氧化绝缘的高纯铝箔和5—8微米厚的电容器纸。铝箔切口全部绝缘,并用真空油脂粘合。由于铌三锡超导带材十分娇脆而昂贵,因此,在几千米甚至上万米的走带复绕过程中必须特别小心。为了合理使用这种昂贵的材料,在绕制前必须根据每根材料的性能、长度,结合磁体设计的最佳参量仔细计算一下,定出使用这些带材的前后顺序:使 J_c 高的放在高场区,并使带与带的接头既在磁体端部又最少浪费带材。磁体越大这一工作越应仔细做好。

由于铌三锡本身十分娇脆,而电流引线又都在磁场梯度十分高的端部,在励磁过程中受力非常大。因此,电流引线的安装要十分重视。在1973年,我们在105千高斯全铌三锡超导磁体上,电流引线采取了铌三锡带材直接放在槽式顺向用铟充填的紫铜接线柱上,这种接法的好处是减少了焊点电阻。而1975年在 $\phi_{内}=40$ 毫米磁场强度为112.6千高斯的铌钛和铌三锡混合磁体上,铌三锡磁体引线是采用多股铌钛和铜丝编织带的软引出。铜丝和铌钛编织带用纯铟焊接在厚0.5毫米、宽10毫米、长50毫米的紫铜片上,这块紫铜片的一边又焊接在15微米厚的紫铜箔上。这块紫铜箔又被铌三锡带压在磁体靠端部的部位并用铟和铌三锡带焊在一起。这种安装电流引线的方法比较简单,容易掌握。

所有铌三锡带的接头都要放在磁场弱,冷却好的磁体两端。铌三锡接头焊接要特别细心,要防止带材的损伤和假焊。我们把被接的两端在半米以内很均匀地复上一层铟,然后边绕边焊,复绕在一块长6厘米、宽6厘米,厚15微米的紫铜箔上。这块紫铜箔被压填到铌三锡带材的绕组里,并和铌三锡带材用铟焊在一起。用这种办法焊接带材接头有如下好处:

由于接头和铜箔焊在一起,增加了热扩散,改善了冷却条件,增大了超导接头的接触面积(大于15平方厘米),从而减小了接头电阻,增强了焊接部位的机械稳定性。如果接头不采用这种作法,往往由于焊接处带材硬度增强,又处在磁场梯度很高的端部,所以在励磁过程中,尤其是在磁体失超时,在电磁力的作用下经常将焊接部位拉出磁体端部,造成带材断裂扭伤。

在绕制铌三锡带材磁体时,层与层之间涂上混有氧化铝粉的环氧树脂或真空油脂都能获得比较满意的机械稳定的效果。磁体建成后真空充腊,机械稳定的效果也很好。由于我们现在生产的铌三锡是用虫胶绝缘的,真空充腊的温度如果太高将会使铌三锡绝缘层全部破坏。虫胶在100℃变软成粘状。在大于100℃时开始熔化失去绝缘或绝缘性能显著降低。但在80℃时虫胶仍成固态。我们曾做过如下实验:把两条10厘米长虫胶绝缘的铌三锡超导带材相互紧密接触,在

充腊温度为 60°C 时两者绝缘仍然很好,千欧姆挡没有反应;充腊温度为 70°C 时两者绝缘电阻为 400 千欧姆;充腊温度为 80°C 时两者之间绝缘全部消失。上述实验表明,日前用虫胶绝缘的铌三锡带材做成磁体之后浸腊温度无论如何不得超过 70°C。

三、超导磁体的稳定方法

为了建立更高场或更大口径的超导磁体并能达到预期效果,人们对磁通线运动的物理机制,磁体结构,材料的制作及冶金因素对材料性能的影响,总之与超导体不稳定性有关的所有问题都进行了深入的理论研究和工艺技术上的探讨,找出了一整套克服超导体不稳定的措施和办法^[1-9]。大家知道,由于非理想的第 II 类超导体本身对磁通线的钉扎作用,它在高磁场下仍有很高的载流能力,只要不超过它在该磁场下的临界电流密度就可以。但事情往往是互为依存的,处于临界态的第 II 类超导体,由于某些不可避免的偶然因素,不断产生一些缓慢的磁通运动。这种磁通运动本来是无关大局的,可是,如果出现如图 4 粗箭头所表示的那种情况,存在一个恶性循环,

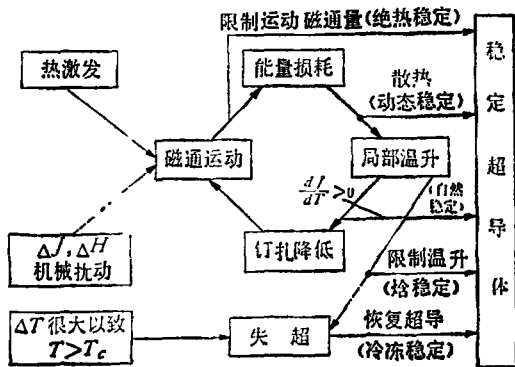


图 4 磁通线运动框图

则本来是少量的缓慢的磁通运动,由于周而复始地恶性循环,将可能变成大量的迅速的磁通运动。大量的迅速的磁通运动使其材料的温度骤升,升到一定程度就要导致材料失超,并产生焦耳热,从而又使正常部分迅速扩大。当发热量比较大时可能使磁体烧损或者由于电流骤减在螺线管的电感上产生高压而使螺线管部分被击穿。为了避免这些灾难性事故的发生,首先要减少内部扰动和机械运动。有人曾估算过,在 504 高斯的磁场下线径为 0.25 毫米载流 40 安培的导线只要移动 0.3 微米就会造成局部升温 10K。当然,这种估算是在理想绝热条件下得出的。但不管怎样,实验已经表明,由于机械扰动导致磁体不稳定确实明显存在,因此,必须加强磁体的机械稳定。倘若已经发生了磁通运动,那么我们就要想办法限制运动的磁通数

物理

量,从而限制发生的热量。这种办法通常叫绝热稳定。它的判据为

$$\mu_0 J_c^2 \frac{\delta^2}{3cT_0} < 1,$$

μ_0 是磁化率; c 是比热; T_0 是特征温度; δ 是磁场穿透深度; J_c 是临界电流密度。

如果我们采用很薄的扁带或很细的圆导线,让磁场穿透整个样品。在这种条件下,穿透深度与磁场 H 无关。这时稳定条件变为

$$d < \frac{\sqrt{3cT_0/\mu_0}}{J_c},$$

d 是样品的半厚度或线半径。

然而,由于磁场耦合的作用,往往使很多彼此平行的细丝相互关联,其结果象一根粗的线径一样,实际并不满足稳定条件。经过分析,线径不但要细,而且要在一定距离上扭绞,做成多股扭绞细丝线材。这种线材基本能满足绝热稳定的条件。用它制作的磁体获得了极好的效果。

倘若磁通运动已经引起了能量损耗,那么我们也可以把能量损耗所产生的热量迅速地散失掉。这主要是在超导材料上复上良导体铝、铜等。并使两者紧密结合达到电和热的良接触。由于这些导体的热扩散系数比超导材料高三到四个数量级,有利于热的逸散,同时,它们的磁扩散系数比超导材料低三到四个数量级,这样又可以延缓磁的扩散,从而降低了热量产生的速率。如果热量逸散的速率超过热量产生的速率就不致发生升温了,恶性循环就会中断。用这种办法达到的稳定叫动态稳定。对于复合导线来说,动态稳定的条件是

$$J_c^2 d^2 < 8 \frac{T_0 K_n}{\rho_n} \frac{1 - \lambda_s}{\lambda_s},$$

K_n 是超导材料的热传导系数; ρ_n 为铜基的电阻率; λ_s 是超导材料与总体的百分比。对于扁带来说,它有边冷和面冷两种情况(这里我们只考虑最不稳定的垂直场状态。如果是平行场,那么只要把式中的带厚 d ,换成宽度,把带宽 $2D$ 换成厚度就可以了)。这两种冷却的动态稳定条件分别为

$$\text{边冷: } J_c^2 D^2 < \frac{\pi^2 T_0}{4d_s} \left(K_n + K_n \frac{d_n}{d_s} \right) \left(\frac{d_n}{\rho_n} + \frac{d_s}{\rho_s} \right);$$

$$\text{面冷: } J_c^2 d_s^2 < \frac{\pi^2 T_0}{4d_s} K_n \left(\frac{d_n}{\rho_n} + \frac{d_s}{\rho_s} \right),$$

D 是带的半宽度; d_n 是复铜厚度; ρ_s 是磁流阻率; d_s 是超导层厚度; K_n 是铜的热扩散系数。

如果由于能量消耗在磁体中有了局部升温,为了不使材料磁通钉扎力下降,材料必须满足 $\frac{dJ_c}{dT} > 0$; 然而,现在我们实际应用的所有超导材料都不满足这个

条件。由于温度的上升, J_c 就要下降, 当 J_c 下降到与材料的载流密度 J_l 相等时, 就叫达到饱和。如果还没有达到饱和时磁通跳跃能被控制住, 那么, 磁体仍然能正常运行不会失超。设 Q_l 为磁通跳跃达到饱和时每单位体积发出的总热量, 那么,

$$Q_l = \frac{\mu_0 d^2 J_{cB}^2}{6} \left[1 - \frac{J_l^2}{J_{cB}^2} \left(1 + 6 \ln \frac{J_l}{J_{cB}} \right) \right],$$

J_{cB} 是在磁场 B 下材料的临界电流密度; J_l 是材料的载流密度。

设 Q_p 为超导材料的温度从 $T_B \rightarrow T_m$ 时每单位体积需要的热量。那么

$$Q_p = \int_{T_B}^{T_m} c(T) dT, \text{ 其中 } c(T) \text{ 为比热。}$$

在这种情况下, 稳定的条件是 $Q_l < Q_p$ 。

如果超导体局部温升骤然发生, 当温升超过临界温度 T_c 时, 材料失超, 因而传输电流大部分都要转移到和超导材料并联的铜层里去。这就大大降低了发热速率。同时铜又是热的良导体, 热量很快就能逸散出去。如果热量的逸散速率大于产生的速率时, 铜的温度进一步下降。当温度下降到临界温度以下之后, 超导材料又恢复了超导态, 这时传输电流又全部转移到超导材料中去。对于储有巨大能量的大型超导磁体来说, 这种稳定方法是十分安全的。通常把这种方法叫冷冻稳定。当然这种稳定不是对于一切磁体都适用。因为要达到冷冻稳定, 有时铜和超导材料之比高达 20:1 或 30:1。磁体的填充因子大大降低, 这对于小型实用磁体来说是极不合算的。冷冻稳定要求的条件为

$$l^2 \rho_n / S < A P T_0,$$

S 为铜的横截面积; l 为传输电流; A 为液氮的热传递系数, P 为铜接触液氮的面积。

总之, 要建立一个稳定的高质量的超导磁体, 就要把上述这些稳定方法综合利用起来并有机地恰如其分地决定取舍, 才能达到设计的预期目的。

四、超导磁体的应用

随着科学技术的发展, 超导磁体已成为固体物理研究的一个重要手段。当前它在高能物理, 受控热核反应, 等离子体物理, 生物物理, 低温物理, 磁学, 物质结构分析, 医学等很多学科的探索性研究中都得到了越来越广泛的应用。由于超导磁体有体积小, 运转费用低, 并能较易获得高磁场、高稳定性、高均匀度和操作简单等优点, 人们正在逐步或将要在一些部门用它来代替常规磁体。在高能物理实验中 CERN 的 BEBC 磁体 $\phi_m = 4.7$ 米, 中心场为 3.5 万高斯, 储能为 800 兆焦耳的大型汽泡室超导磁体已经建成并投入长期运转。在受控热核聚变方面国外也已成功地建造了由铌钛和铌三锡两种超导材料组合而成的超导强磁体, 在

内径为 51 厘米的磁体中心场强达到 884 高斯, 储能能达到 8.5 兆焦耳。随着高能物理的发展, 基本粒子的能量不断增加。所以, 探测和引导这些基本粒子所需要的磁场也必须做得比较大而且效力要高。由于技术和经济上的原因, 世界上几个大的高能物理研究中心正在越来越广泛地采用超导磁体装置。实际经验表明, 较大超导磁体装置的投资与常规磁体装置的投资差不多。但在装置非常大的情况下, 超导磁体装置运转费用就大大降低了。为了安全起见, 这些大型超导磁体装置大都采用冷冻稳定的方法。从总体上看, 采用这种方法在经济上也是合算的。

在受控和等离子体物理中, 把上亿度超高温等离子体压缩并约束在一个很小的特定空间里, 不用强磁场是不可能达到的。为此, 人们设计建造了很多异形超导磁体来达到上述目的。有些国家为了使地面交通搞得速度更快更舒适, 现在正在研制超导磁悬浮列车。用磁场的作用把整个列车悬浮在离地面十几厘米处, 速度可高达每小时 500 公里以上。像地面“飞机”一样, 也有人把磁悬浮应用到了风洞试验上, 被试验的物体用超导磁悬浮的办法悬浮在风洞里, 这样测出的数据既可靠又逼真准确, 不必为消除支杆的影响误差而去进行烦琐的计算修正。

由于在超导磁体中可获得高的磁通线密度, 因此它在电工方面的应用前景是很广阔的。在一些发达的工业国家里, 超导电机正在研制过程中, 有些样机还在运转。虽然它还处在实验阶段, 但发展前途是十分乐观的, 因为超导电机可以大大提高输出功率。

也有人正在把超导磁体安放到磁流体发电装置上。磁流体发电按理论计算比发电机的效率成倍提高, 如果再和超导磁体匹配起来其好处是可以想象的。但这些工作离真正的工业应用还要走相当长的路程。

如果贮能量在 10^6 焦耳以上, 超导电感贮能应比常规贮能更经济。超导贮能器主要是应用在高能、激光、等离子体加热等一些似稳定以及脉冲装置的能源上。这些装置的放电时间一般约为几秒到 10^{-3} 秒, 甚至更短。现在很多工作大都集中在超导贮能器的充电和放电的方法上。

磁分离也是超导磁体的一个重要应用。磁分离器现在被广泛用在精选磁矿石上。如果用超导磁体代替磁分离器中的常规磁体, 那末由于增大了磁场强度和梯度, 应用范围可以扩大到非铁磁矿和非铁磁金属的分离和精选上。用磁分离的办法去净化废水, 进行污水处理效果也很好。用磁化的水去灌溉, 可以促进植物的生长。几年来, 用大型超导磁体进行了大量的生物物理、生物化学、病理及生理技能方面的研究和实验, 得到了很多有趣的结果, 有些病理细胞在强磁场下生长活动受到抑制, 甚至在外科手术中也用上了它。

在国外, 250 兆赫, 350 兆赫的超导核磁共振波谱

仪已成商品。550兆赫左右的超导核磁共振波谱仪正在研制。最近得知,美国600兆赫超导核磁共振波谱仪研制成功。(所用超导磁体达到14.1万高斯)在这些波谱仪上,磁场部分都采用了超导磁体装置。这一技术的成功,对生物大分子物质结构的分析都将有重大革新式的发展。

由于现在几乎全部的超导磁体都要在液氮(4.2K)温度下工作,因此大大阻碍了人们更加广泛应用它的可能。如果将来人们能寻找出高温超导体(在液氮温度77.3K以上)并能制成实用的线材或带材,那么它的应用将引起电工方面的革命是毫无疑问的了。

本文所谈到的一些工作经验都是物理所五室和长沙矿冶所参加磁体工作的同志们集体努力的结果。李世恕等同志曾提过很好的建议。杨油然同志提出了保持力矩不变的具体方法。在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] M. D. Sauzade, S. K. Kan, *Advances in electronics and electron physics*, 34(1973), 1—55.
- [2] D. B. Montgomery, *Solenoid magnet design*, (1969).
- [3] 野口昭夫, *低温工学*, 11-6 (1976), 1—11.
- [4] 焦正宽等编译, *超导电技术及其应用*, (1974):
- [5] J. E. C. Williams, *Superconductivity and its Applications*, (1970), 47—136.
- [6] H. Brechna, *Superconducting Magnet Systems*, (1973).
- [7] H. R. Hart, *Proc. 1968 BNL Summer Study Part*, 11(1968), 571.
- [8] P. F. Chester, *Rep. Progr. Phys.*, XXX/11 (1967), 561.
- [9] H. C. Schindler, *Cryogenics*, 10(1970), 58.

电 子-空 穴 液 滴

韩 全 生

(中国科学院物理研究所)

空气中的水汽可以凝聚成水滴,这是我们常见的物质相变现象。有趣的是,近年来发现,半导体中的电子和空穴,在一定的条件下也有类似的相转变,形成所谓的电子-空穴液滴。

我们可用图1形象地表示半导体中电子-空穴系统相变过程中的能量变化。随着激发(如光照射、电子轰击、电注入等)强度的增大,半导体中非平衡载流子(电子和空穴)增多,在适当的温度下(例如对于Ge,约

相互作用就有可能导致形成激子分子(或称双激子)。当激发强度进一步增加,在足够低的温度下(例如对于Ge,大约在10K之下),这种类似于气相状态的激子(或激子分子)就会凝聚成具有一定密度的电子-空穴液。在这种液中,不再是一个电子和一个空穴相互束缚成一个激子,而是电子和空穴都可以自由移动,各自作为一个整体而相互有一定的作用,其中每一对电子和空穴的平均束缚能大于自由激子的束缚能。

通过对典型半导体锗和硅的研究,已经确证^[1],这种电子-空穴液在晶体中成微滴状态存在,滴的大小从几 μ 到几百 μ ,以至超过1mm;它能像金属液一样可以导电;滴可以通过辐射复合而衰变,寿命从几十 μ s到几百 μ s;它可以通过晶格而自由移动,晶格中的应力梯度、激子密度梯度等会使它受力而加速,速度可达到声速;一定大小的滴具有确定的表面能;滴的大小、形状、运动和分布等对压力、磁场、电场以及超声波等外界作用很敏感。我们可以把这种电子-空穴的凝聚相看作物质的新的态,它不仅

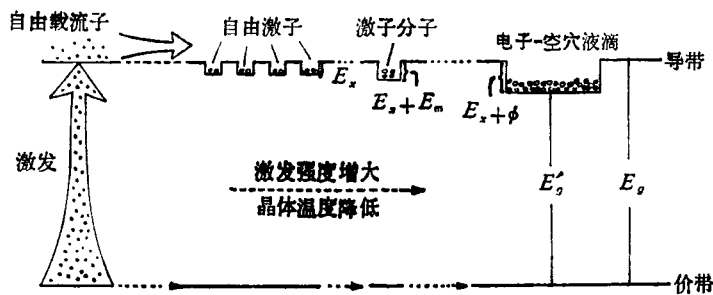


图1 电子-空穴能态示意图

E_x 是自由激子束缚能, $E_x + E_m$ 激子分子束缚能, $E_x + \phi$ 液中一对电子和空穴的束缚能。电子和空穴应分别处于导带和价带,这里考虑的是电子-空穴对的能量,一并由导带表示出来

10—70K),一个电子和一个空穴由于库仑相互作用而迅速形成一个弱的类似氢原子的束缚态,即所谓自由激子。由于激子密度的增大,激子之间吸引的共价相

给物理学的有关的基础研究提供了一个新的阵地,而且也给固体电子功能的应用展开了新的前景。