

# DNA 分子结构发现者的机遇与追求\*

邓希贤†

(中国医学科学院基础医学研究所 北京 100005)

有人认为,20 世纪的生物学有两大革命性事件决定了两门影响深远的、新兴学科的诞生:其一为 1900 年孟德尔基本遗传定律(遗传因子及其所控制的性状分离与自由组合定律)的重新发现,奠定了遗传学诞生的基础;其二为 1953 年 DNA 双螺旋分子结构的发现,催化了分子生物学的诞生<sup>[1]</sup>。

## 1 历史的机遇

回顾历史,正是以孟德尔理论的重新发现为开端,在 20 世纪的前 50 年,围绕基因的定位、性质、结构和功能,遗传学家、物理学家、化学家、生物学家、微生物学家等纷纷介入,各方面取得长足进展,为 DNA 分子结构的发现创造了空前的历史机遇。

### 1.1 确立基因是遗传物质、定位在染色体上

孟德尔基本遗传定律的发现是数学统计分析用于群体(性状)遗传学研究的成功范例,其核心为遗传因子(1909 年后统称为基因)假说。1900 年,它的重新发现传播了“颗粒遗传”的科学思想,为后来基因突变的研究奠定了基础。对此前占统治地位的“融合遗传”与“连续变异”观点是一个重大突破。从此,基因是遗传的基本单位得到日益增多的认同<sup>[1,2]</sup>。

染色体是德国解剖学家 Flemming W 1879 年首次发现的。1903 年,美国生物学家 Sutton W S 在其《遗传中的染色体》一书中指出,细胞核内染色体的成对存在及其在细胞有丝分裂和减数分裂中的变化,与基因的行为有许多共同之处,提示基因可能就在染色体上。1905 年,美国细胞学家 Wilson E B 证明存在着决定(昆虫)性别的性染色体。1910—1915 年,美国胚胎学家 Morgan T H 在果蝇突变的研究中,相继发现了伴性遗传现象与基因连锁互换定律,并于 1919 与 1926 年先后出版《遗传的物质基础》和《基因论》两本专著,发展了染色体遗传学说,将孟氏群体(性状)遗传学推进到细胞遗传学的新阶段,证明基因作为遗传的基本单位,在染色体上按一定顺序排列<sup>[1,2]</sup>。他的学生 Sturtevant A N 还就此绘出果蝇全部 4 对染色体的连锁基因图<sup>[3]</sup>。

### 1.2 “四核苷酸假说”的突破

在细胞遗传学证明染色体是基因载体的同时,人们已经知道染色体的主要成分为脱氧核糖核酸(DNA)与组蛋白。其中谁是基因的物质载体,一直存在着争论。蛋白质早在 1938 年即被定名为生命系统最重要物质 protein(其拉丁语词根有首要之意),因为它参与或承担着生命活动的几乎所有生理功能,以致恩格斯将生命视为蛋白质存在的一种方式。此外,到 20 世纪 30 年代已基本弄清,蛋白质是呈长链构形的生物大分子,由 20 种氨基酸成百上千地以酰胺共价键彼此串联所构成,有千变万化、不计其数的排列组合,适于携带同样是变化无穷的遗传信息。因此,在相当长的一段时间内,有较多的人认为基因可能是蛋白质<sup>[1,4]</sup>。

反观 DNA,自 1868 年被发现以来,虽曾有人注意到它是染色体的重要组分,但作为遗传物质,其结构较之蛋白质似乎过于简单。只包含磷酸根、糖和碱基三种成分。碱基又只有 4 种,腺嘌呤(A)、鸟嘌呤(G)、胸腺嘧啶(T)、胞嘧啶(C)。加之早期提取技术不成熟,只能得到 DNA 的一些碎片,直到 20 世纪 40 年代末,都被误认为是生物小分子<sup>[5]</sup>。更有甚者,有一位美籍俄裔生物化学家 Levene P A 于 1900 年开始研究核酸化学,到 1934 年,他分析了各种不同来源的 DNA 组成后,得出了其所含 4 种核苷酸的克分子数均相等的结论,并据此提出“四核苷酸假说”,认为构成 DNA 的基本单位不是单个的核苷酸,而是按某种固定顺序(如 ACGT)排好的 4 个一组的所谓四核苷酸<sup>[5,6]</sup>。如果是前一种情况,4 种单核苷酸的组合排序还存在很大的变化空间,承载大量遗传信息应当不是问题;而在后一种情况下,四核苷酸式的组合序列便毫无变化,自然不会有储存信息的能力。

1946—1950 年,生物化学家 Chargaff E 应用最新的纸层析、紫外分光光度测量和离子交换层析等方

\* 2003-09-29 收到初稿,2003-10-23 修回

† E-mail: dxzhu22@hotmail.com

法,重新对各种不同来源的 DNA 成分作了精细分析,表明 DNA 中 4 种核苷酸的克分子数并不相等,从而推翻了“四核苷酸假说”,破了 DNA 不能携带大量遗传信息的紧箍咒。更为重要的是,他发现任何 DNA 样品中,4 种碱基的克分子数总是符合  $A = T$  和  $G = C$ ,或  $A : T = G : C = 1$  的比率,世人称之为“Chargaff 比率”<sup>[5]</sup>。尽管他本人并未意识到这一比率的重要意义,但却启发 Watson 和 Crick 最终解决了 DNA 双链间的碱基与碱基如何配对连结的问题,同时也为破解 DNA 自我复制之谜做出了贡献。

### 1.3 基因信息学派的出现

20 世纪 30 年代,有一些理论物理学家开始对生命现象、特别是遗传物质的奥秘产生了浓厚兴趣。如 1932 年玻尔作过“生命与光”的演讲;1935 年,Delbrück M 曾与遗传学家 Ressoovsky N T 合作著文论述基因突变和基因结构的性质<sup>[2]</sup>;1944 年,薛定谔的《生命是什么》一书的出版,影响更大。该书论述了生命的本质是遗传和变异,物理学和化学应能帮助生物学解决遗传信息的储存、传递、以及遗传物质如何自我复制等问题。同时他还认为,遗传性状很可能以密码形式通过染色体来传递。书中发展了 Delbrück 关于基因有如一个非周期性结晶体的观点<sup>[1]</sup>,认为基因乃遗传信息携带者,它可能由无数形态上相似但有微小差异的重复单位串联而成。这些单位在排列上的连续性和非周期性有如莫尔斯电码,可能决定它们具有遗传编码功能,而它们之间千变万化的排列组合顺序则可能决定其具有承载遗传信息的能力。

如蛋白质主链均为氨基酸的模式结构  $\cdots\text{HN}-\text{CR}_1\text{H}-\text{CO}-\cdots\text{HN}-\text{CR}_2\text{H}-\text{CO}-\cdots$ ,通过酰胺键( $\cdots$ )两两串联而成,仅  $\alpha$  碳原子上连接的特征基团  $R$  有所不同,可据以区分出(除脯氨酸以外的)19 种氨基酸。又如 DNA 的两条多核苷酸长链,也是由基本上相同的糖-磷酸基本单位通过磷酸二酯键( $\cdots$ )两两串联( $\cdots$ 糖 $\cdots$ 磷酸 $\cdots$ 糖 $\cdots$ 磷酸 $\cdots$ )而成,仅糖上所带的碱基(A, G, T, C)有所不同,可据以区别 4 种核苷酸。因此,无论蛋白质或者 DNA,都符合 Delbrück 有关非周期性晶体的基因分子特征<sup>[4]</sup>,虽未解决谁是基因载体的问题,但却为 Crick 和 Watson 以后提出中心法则的构想(即由 DNA 上碱基编码的遗传信息决定蛋白质合成中氨基酸序列的法则)提供了线索。当然,细胞生物学家 Beadle G 和生物化学家 Tatum E 于 1945 年进行的有关一个基因一个酶的工作才是提出中心法则的最为重要的

实验基础和理论依据<sup>[2]</sup>。

此外 Delbrück 还推论,基因由于具有晶格结构而十分稳定,即使在它上千万次的自我复制中,发生错误或突变的几率也很低。但是,一旦发生了突变或错误,它又能稳定地遗传下去<sup>[4]</sup>。什么样的物质结构才具有如此奇妙的功能呢?这个问题当时吸引了一批人,其中包括 Watson、Crick 和 Wilkins 等投入了遗传物质特殊结构的研究。

### 1.4 基因的化学性质初现端倪

1928 年英国微生物学家 Griffith F 发现有两种肺炎球菌,粗糙型(R)对小鼠无害,光滑型(S)则可致命。S 型菌经加热杀死变为无害以后,与原本无害的 R 型活菌混合接种小鼠,重又产生了致病力,使小鼠患肺炎死亡,同时从死亡小鼠体内检出了 S 型活菌,实验证明,这不是 S 型死菌的复活,而是携带 S 型菌毒性遗传信息的某种物质(转化因子)使得 R 型无害菌转化成了 S 型致命菌<sup>[4,6]</sup>。

1931 年,美国 Rockefeller 研究所细菌学家 Avery O T 着手研究转化因子的本质。他初步提纯了转化因子,发现其组成与 DNA 相近,用化学方法去除蛋白质或脂肪,或用核糖核酸酶处理均不影响其转化活性,惟有加入脱氧核糖核酸酶分解掉 DNA 后,转化活性才消失,从而初步证明上述具有遗传特性的转化因子可能是 DNA。以上结果于 1944 年一经发表,立即有很多学者出来质疑它的提纯技术,认为他们提纯的样品中不光是 DNA,还可能混有微量蛋白质在发挥着转化作用。同时,由于当时的主流观点仍然认为蛋白质是遗传物质,Avery 的工作未受到广泛重视<sup>[6]</sup>。但遗传物质的化学本质可能是 DNA 毕竟已初露端倪,并且引起了生物化学家 Chargaff 的关注,于 1946 年开始其重新精确分析 DNA 组分的工作,为推翻“四核苷酸假说”做出了贡献<sup>[4]</sup>。

其次,Avery 的工作也影响到美国冷泉港的微生物遗传学家 Hershey A 和 Chase M,他们于 1951—1952 年设计了著名的 T4 噬菌体标记实验,用<sup>35</sup>S 标记噬菌体的蛋白质外壳,用<sup>32</sup>P 标记噬菌体内的 DNA 后,再去感染细菌。发现只有带<sup>32</sup>P 的 DNA 进入了细菌体内,而含<sup>35</sup>S 的蛋白质外壳则留在细菌体外<sup>[6]</sup>,这一信息直接寄给了 Watson(该噬菌体小组的年青成员),使他们更加确信遗传物质是 DNA 而非蛋白质<sup>[7]</sup>。

### 1.5 生物大分子 X 射线晶体学的兴起

X 射线晶体学主要起源并发展于英国,由布拉格父子(Bragg H W 和 Bragg W L)于 1912 年首创并

成功用于矿物晶体结构的分析,因此而获得 1915 年度诺贝尔物理学奖。20 世纪 40 年代, X 射线衍射技术开始用于生物大分子的结构分析,最初是蛋白质,后来是核酸。1947 年, Bragg W L 的学生 Astbury W T 拍下第一张 DNA 的 X 射线衍射图,然后是 Wilkins 与 Franklin 于 1950—1951 年先后拍下 A 型和 B 型 DNA 分子 X 射线衍射照片,为了解 DNA 分子构形及计算有关各种参数做出了重要贡献<sup>[1]</sup>。1951 年,化学家泡令( Pauling L )将 X 射线衍射技术与结构化学的建模方法相结合,成功地揭示了蛋白质多肽链的  $\alpha$  螺旋结构,使得核酸分子结构的破解也露出了一线曙光<sup>[8]</sup>。至此,发现核酸分子结构的历史性机遇已经充分展现,就看谁能够相对成功地把握与理解这一切信息间的联系和深刻含义而捷足先登了。

## 2 狂热的追求

“狂热的追求”是 Crick 一本自传的书名,其副题为“科学发现之我见”<sup>[9]</sup>,主要讲他和 Watson 面对这一历史机遇,在构筑 DNA 分子模型的过程中,如何屡犯错误,又从错误中走出来并取得成功的故事。支持他们坚持到底的就是对既定目标的狂热追求和工作激情。在此之前, Watson 也写过有关的书<sup>[7]</sup>,之后,他又出版了《DNA 激情》一书<sup>[10]</sup>,也谈到了这段经历的一些类似体验。

二人年龄相差 12 岁,上大学时一个学的是物理,另一个学的是生物,都因为受到奥地利理论物理学家薛定谔的《生命是什么》一书的影响而立志要探索生命的奥秘,并都为此目标而几经曲折才先后来到卡文迪什实验室。其中 Crick 已过而立之年,不惜两次放弃已经到手的工作良机,还更换了一次工作单位,1949 年才辗转来到卡文迪什,发现这里由 Bragg W L 和 Perutz M 主持的蛋白质 X 射线晶体学工作比较接近他的目标,就争取到那里作了博士研究生<sup>[9]</sup>。Watson 在大学期间就喜欢上基因课程,毕业后投奔印第安那大学著名遗传学家 Muller H J 处攻读博士,但很快便感到当时 Muller 的工作离他想研究基因的目标甚远,于是果断地改投微生物遗传学家 Luria S E ( 前述噬菌体小组掌门人之一 ) 门下,研究噬菌体繁殖的辐射效应。1950 年获得博士学位时他年仅 22 岁,随后赴丹麦做博士后,先后在两个实验室作的工作都不与基因沾边。一次偶然的,机会他听了 Wilkins M 关于 DNA 的 X 射线晶体学报告而受到吸引,遂千方百计争取投奔 Wilkins 未

果,不得已乃求助于 Luria,辗转来到卡文迪什做博士后。为此,差点丢失了华盛顿奖学金委员会的资助,其目的也是为了有朝一日能将学到的 X 射线衍射技术去解决自己心仪已久的 DNA 分子结构问题<sup>[7,10]</sup>。

1951 年 9 月,二人在卡文迪什首次相识。经过交谈, Watson 对 DNA 的痴迷立刻引起 Crick 的共鸣。那时, Pauling 有关蛋白质多肽链  $\alpha$  螺旋结构的报告刚问世不久,他们了解到 Pauling 成功背后曾使用过分子建模的方法。受此启发,二人决心利用他们能从 DNA X 射线衍射图推测和计算出的分子构形和有限数据,立刻着手构建 DNA 的分子模型。从这时起到 1953 年 2 月,在他们终于取得成功的大约一年半的时间内,他们一共构建过 3 个模型,前面两个都是错误的。他们的错误包括:一开始低估 DNA 含水量约 10 倍之多,构建了一个错误百出的三螺旋模型,将糖-磷酸骨架放在中心,碱基则置于外围,三条多核苷酸链之间靠 Mg 离子与磷酸根形成的盐键相互连结;第二次改为建双螺旋分子模型,把糖-磷酸骨架放在外侧,碱基在内侧靠 H 键彼此连接,已接近正确,但碱基的配对又用了嘌呤对嘌呤、嘧啶对嘧啶的同配原则,如此等等。这些都是初学晶体学、不谙化学键、不掌握碱基比例新信息的新手容易犯的错误。这期间他们曾被 Bragg 爵士斥为不务正业,侵犯了属于伦敦 King's College 的“专属”研究领域;而他们构建的错误模型又被个别人戏称为 W. C. 结构,将注定要被倒进抽水马桶中冲走等等。但是所有这些打击加上他们的屡屡失败都没有动摇二人的信念和热情,他们继续关注和收集相关信息,修正已知的错误,边干边学,不懂就问,不会就学,如此坚持不懈,终于实现了他们追求的目标<sup>[7,9,10]</sup>。

## 3 成功的奥秘

1951 年秋,真正有实力问鼎 DNA 分子结构者当首推伦敦 King's College 的物理学家 Wilkins M 和 Franklin R。二人所在的生物物理学部是英国国家医学研究理事会( MRC ) 资助单位,成立于 1946 年,其利用 X 射线衍射技术,对 DNA 分子结构的研究在当时实处于世界前列。当时最好的 DNA X 射线衍射照片都出自这里。Watson 正是在意大利的那不勒斯听了 Wilkins 的报告和看到他演示的 DNA 分子照片后才跟踪到了伦敦,并且也正是依据这些照片推测出 DNA 分子的螺旋构形,并计算出他和 Crick 构建 DNA 分子模型所需的基本数据。在二人建模

的整个过程中,又曾多次主动和他们接触交流而受益匪浅.最后正是 Wilkins 及其合作者和 Franklin 与 Gosling 在同一期 Nature 分别发表的两篇文章,以清晰的 DNA 分子结构照片和相关数据直接支持了 Watson 等二人最终构建的 DNA 双螺旋分子模型,为他们后来(1962 年)共同获得诺贝尔奖奠定了基础<sup>[7,9]</sup>.那么,Wilkins 和 Franklin 自己为什么未成为此结构的最先构建者呢?据说根本的原因在于他们(特别是 Franklin)坚信利用 X 射线衍射技术才是解决 DNA 分子结构的正确途径(1953 年,她转入伦敦伯克贝克学院与晶体学家 Bernard J D 教授合作,用 X 射线衍射法确实解决了菸草花叶病毒 RNA 的分子结构问题)<sup>[3]</sup>.不幸的是她还拒绝同时尝试结构化学行之有效的建模方法,甚至给 Watson 造成建模有投机取巧之嫌的印象<sup>[7]</sup>.其次,他们研究的虽然是生物大分子 DNA 的结构,却几乎未联系这一结构的生物学功能来思考问题.但他们的工作总算没有白做,至少是给 DNA 分子建模提供了重要启示、基本数据、以及自始至终的宝贵支持.

另一位对 DNA 分子结构有兴趣并有实力的问鼎者为世界首屈一指的著名化学家、时任美国加州理工学院的化学系主任 Pauling. 20 世纪 20 年代,他在 X 射线衍射晶体学研究中多有重大发现.1939 年他出版《化学键本质》一书,对化学键本质的理解作出了重大贡献,奠定了其获得 1954 年诺贝尔化学奖的基础.20 世纪 40 年代,他转入蛋白质分子结构的研究,到 1950 年又发现肽链的  $\alpha$  螺旋结构,令人瞩目.他自述最初产生肽链  $\alpha$  螺旋构形的灵感来源于折纸<sup>[8]</sup>,纸上画有蛋白质主链已知的原子排列和化学键,他按键角大小将其反复折叠成各种立体构形,最后发现螺旋构形最完美.遂照此构建实物模型,用 X 射线衍射技术去检验后再作调整,然后再作检验,直到与真实分子的 X 射线衍射图吻合为止.这就是结构化学中常用的建模方法.既可以缩小探索的范围,又可以缩短探索的时间,被 Watson 和 Crick 借用过来构建 DNA 分子模型也取得了成功.那么,Pauling 自己构建的 DNA 分子模型为何失败了呢?Pauling 后来承认,1952 年 12 月 31 日他投到美国《国家科学院院刊》的论文“关于核酸分子的一个建议性结构”是一篇急就文章,文中提出的 DNA 三螺旋分子模型并未经过严格检验,他也没有详尽掌握 DNA 相关的最新信息.原因之一是当时他因参加世界反核运动正受到众院非美活动委员会调查,被禁止出国访问,失去与 Wilkins 等及时交流的机会;

同时政治活动也消耗掉他太多精力.另外最为重要的是,他对蛋白质的重视仍然超过核酸,没有对 DNA 的结构问题给予足够的关注<sup>[8]</sup>.

相比之下,Watson 和 Crick 无论在晶体学或结构化学方面都是新手,研究 DNA 分子结构并非他们的任务,因而一无经费,二无设备材料,也没有做过任何实验来直接获取有关数据,甚至还未全面掌握探讨此问题所需的各方面知识.可以说他们和前面两组人并不在同一起跑线上.但是,二人自 1951 年 11 月初次建模失败,到 1953 年 4 月联名发表《核酸的分子结构》一文,不过短短的 16 个月,竟然后来者居上,“主要根据已发表的资料和结构化学原理”(Crick 语)<sup>[9]</sup>建成 DNA 双螺旋分子模型,这不能不令世人惊讶.他们成功的奥秘何在呢?

首先,二人对 DNA 的巨大生物学意义有愈来愈明确的认识.既有认准方向就百折不回的精神,又能马上联系 DNA 分子应具有携带和传递遗传信息的功能去领悟 Chargaff 比率的真谛,并与 DNA 分子自我复制的可能机制挂钩,顺利地揭示了 DNA 双链之间碱基互补式连接的奥秘,堪称这一伟大发现的最为神来之笔.

其次,二人专业互补,配合默契,非常重视前人已经打造好的工作基础,以及其他两家工作进展的信息,并能融会贯通,为己所用.因此,他们成就的伟业既是历史机遇与个人追求完美结合的硕果,也是晶体学、结构化学、信息学、生物化学与遗传学等众多学科交叉发挥作用最为成功的范例.

最后,两个年青后生辈的成功还得益于卡文迪什实验室学术思想上深厚的底蕴、宽松的环境、开放的风气与活跃的氛围.他们虽然做着份外的事却没有感到压力,他们的许多灵感都来自于实验室内外、甚至咖啡厅中的自由争论(Crick 称之为闲聊)<sup>[9]</sup>;他们当时的物质条件并不丰厚,甚至还相当简陋,但他们的精神生活却十分充实和愉快.也许这一切对于创新性成果的形成也是不可或缺的.

值此 DNA 双螺旋分子结构发现 50 周年之际,造就这一伟大发现的历史经验值得我们很好的总结、汲取和借鉴.期望其在培养我国青年科学工作者继往开来与开拓创新精神方面能发挥有益的作用.

## 参 考 文 献

- [1] (美) 加兰·E·爱伦著. 田洛译. 20 世纪的生命科学史. 上海: 复旦大学出版社 2001
- [2] (美) 洛依斯·N·玛格纳著. 李雅, 崔极谦, 王水平译. 生命科学史(第 2 版). 天津: 百花文艺出版社 2002

[ 3 ] (美)里查德·奥尔森主编. 林永福等译. 科学家传记百科全书. 华夏出版社, 2000

[ 4 ] (英)约翰·格里宾著. 方玉珍等译. 双螺旋探秘——量子物理学与生命. 上海科技教育出版社, 2001

[ 5 ] (英)苏珊·奥尔德里奇著. 喻富根等译. 生命之线——基因与遗传工程. 南京: 江苏人民出版社, 2000

[ 6 ] 赵立平编著. 基因与生命的本质. 太原: 山西科学技术出版社, 2000

[ 7 ] (美)詹姆斯·沃森(Watson J D)著. 田洛译. 双螺旋——

发现 DNA 结构的个人经历(第 2 版). 上海: 三联书店, 2001

[ 8 ] (美)特德·戈策尔, 本·戈策尔著. 刘立译. 科学与政治的一生——Pauling L 传. 上海: 东方出版中心, 2002

[ 9 ] (美)弗朗西斯·克里克(Crick F)著. 吕向东, 唐孝威译. 狂热的追求——科学发现之我见. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994

[ 10 ] (美)詹姆斯·D·华特生(Watson J D)著. 迟文成, 赵永波译. DNA 激情. 沈阳: 辽宁画报出版社, 2002



· 物理新闻与动态 ·

## 角分辨光发射谱实验证实 $MgB_2$ 中的多能隙

对  $MgB_2$  超导机理的理解关键在于其超导能隙的性质(详见《物理》2003 32 325)。比热、光发射谱、隧穿谱和拉曼谱等实验已经提示: 在  $MgB_2$  中存在两种类型的超导能隙, 这一点既不同于传统超导体, 也不同于铜氧化物高温超导体。不幸的是, 上述实验不可能区分超导电子的动量, 因此只能提供在整个动量空间的平均信息。

另一方面, 能带计算给出了能隙对晶体波矢  $k$  的详细依赖关系。从这个意义上讲, 实验测定能隙在布里渊区内的分布, 对验证理论和理解  $MgB_2$  中的超导机制具有重要意义。按照 Choi (详见 Nature 2002 418 758) 的理论,  $\sigma$  带的电子与限制在 B 层内的声子强烈地耦合, 引起一个  $\sim 6.8meV$  的大能隙, 而  $\pi$  带电子与声子的耦合相对较弱, 相应的超导能隙较小, 约  $1.8meV$ 。

最近, 来自日本 Tohoku 大学的 Souma 等, 利用 28eV 同步辐射光, 对  $MgB_2$  单晶样品(尺寸约  $100 \times 100 \times 10\mu m^3$ )进行了角分辨光发射谱(ARPES)测量。实验者首先在  $T = 45K$  的温度下, 沿着  $\Gamma-K-M(A-H-L)$  方向, 分别对  $\sigma$  带、 $\pi$  带和另一个未知能带确定了正常态色散关系和费米面形貌。类空穴的  $\sigma$  带, 其束缚能作为基平面波矢的函数尖锐清晰, 表

现出强的二维特征; 类电子的  $\pi$  带, 其色散曲线较为弥散, 反映了弱的三维性质。第 3 条色散曲线是在对样品实施了超高真空原位切割之后, 在六方晶体的(0001)面上测得的, 实验者将其归结为表面电子态。

正常态测量完成之后, 实验者将样品温度降到  $T = 17K$  ( $MgB_2$  的  $T_c = 38K$ ), 在费米能级  $E_F$  附近测定束缚能谱。结果表明, 对于  $\sigma$  带, 在  $T = 17K$  有一个  $\Delta = 6.5meV$  的能隙打开; 对于  $\pi$  带  $\Delta = 1.5meV$ 。考虑到样品温度仍然远远高于绝对零度, 可以说, 这次实验结果定量地证实了 Choi 等的理论预言。

对于表面电子态能带, 实验者惊讶地发现, 相应的能隙竟然高达  $\Delta = 6meV$ 。尽管表面能带隙的起因目前尚不清楚, 但这一结果提示: 在以往隧穿谱的研究中, 给出的能隙幅值之所以相当离散, 很可能是由于隧穿测量对样品表面的条件更为敏感。Souma 等猜测, 按照  $MgB_2$  的层状结构(0001)表面能带与  $\sigma$  带之间的耦合应大于表面能带与  $\pi$  带之间的耦合。

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 Nature, 2003 423 65)

## 基于 $MgB_2$ 超导体的 SQUID 器件

自从 2001 年 1 月日本青山大学秋光纯(Jun Akimitsu)领导的小组发现  $T_c \sim 40K$  的  $MgB_2$  超导体以来, 有关的基础研究和应用研究已在许多方面取得了突破性进展。对于  $MgB_2$  的应用, 研究人员的注意力分别投向两个领域: (1) 强电应用——超导线; (2) 弱电应用——基于约瑟夫森结的 SQUID 器件。最近, 来自英国剑桥大学的 Burnell 等在 Superconductor Science and Technology 上撰文, 报告了他们使用聚焦离子束方法制备单层膜 SQUID 器件的研究进展。

对于氧化物超导体(例如 YBCO), 单层膜约瑟夫森结可以在双晶衬底上生长。然而, 对于  $MgB_2$ , 由于其晶粒边界不形成弱连接, 不可能制成  $MgB_2$  双晶结。Burnell 等通过聚焦离子束刻蚀和研磨技术, 在 1 个  $MgB_2$  单层膜超导环上成功

地制备了两个约瑟夫森结。这些结的临界电流被外磁场强烈地调制, 在  $7-17K$  的温度范围内, 当结被  $14.96GHz$  的微波辐照, 其  $I-V$  特性清晰地展示出夏皮罗台阶; 对于高质量的结, 其临界电流  $I_c$  与正常电阻  $R_N$  的乘积可达  $1mV$  (在  $T = 4.2K$ ), 从而证明了它们在超导电子学中的应用价值(在  $20-30K$  温区)。

在上述工作的基础上, Burnell 等构建了带有直接耦合探测环的 SQUID 器件。在  $T = 10K$  和偏置电流  $= 464\mu A$  的工作条件下, 器件端电压被外加磁通调制的幅度高达  $175\mu V$ 。实验者在  $T = 20K$  和环路磁通锁定的条件下测量了器件的噪声, 他们发现, 对于  $f = 10kHz$ , 噪声约为  $14\mu\Phi_0 Hz^{-1/2}$ , 与 YBCO 器件在  $77K$  时的白噪声水平相当。

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 Superconductor Science and Technology, 2003 16 254)