

文章编号 1000-5013(2005)03-0225-06

# 信息产业发展中的若干物理问题

戴 闻<sup>①</sup> 张渭滨<sup>②</sup>

(① 中国科学院理化技术研究所, 北京 100080; ② 华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 为庆祝爱因斯坦创造奇迹 100 周年, 2005 年被确定为“世界物理年”。1905 年爱因斯坦工作的论题涉及光电效应、布朗运动、特殊相对论和固态量子论。这些贡献推动诸多领域的进步并使每一个人从中受益, 例如电视、激光、手机、计算机、互联网, 乃至全球定位系统。此篇综述强调物理学在几乎所有工程技术领域的基础作用, 内容包括巨磁电阻效应、自旋晶体管、纳米离子导体开关、单电子晶体管、碳纳米管、超导单光子探测器、SQUID 器件和超导微波通信滤波器等。

**关键词** 信息产业, 自旋电子学, 纳米技术, 超导电子学

**中图分类号** O 4 105

**文献标识码** A

1905 年是爱因斯坦生命中的奇迹年。作为伯尔尼专利局的小职员, 这一年他年仅 26 岁, 然而却一举在《Annalen Der Physik》上发表了 4 篇划时代的学术论文。这些论文涉及布朗运动、光电效应和狭义相对论, 分别开启了 20 世纪物理学的一个个重要分支。为了纪念爱因斯坦突破性论文发表 100 周年, 联合国大会于 2004 年 6 月 10 日通过决议, 将 2005 年定为“国际物理年”(International Year of Physics)。这是联合国首次针对一个学科安排的全球性纪念活动, 其宗旨是在全球范围内争取公众对物理学的理解和支持, 推动物理教育, 使物理学在社会、经济、技术、文化的发展中发挥更大的作用。物理学是一门最基础的自然科学。在今天的信息时代, 每个人都会亲身感受到(从电视、激光、手机、计算机、互联网, 乃至全球定位系统)人类从认识自然中所得到的丰厚回报。作为物理工作者, 我们愿在此强调物理学与技术之间的“源流”关系。在这篇综述中, 我们将简要介绍一些相关物理专题的最新进展。尽管文章主要是谈信息产业, 人们不难发现其中包含有许多爱因斯坦贡献的闪光点。

## 1 自旋电子学

### 1.1 巨磁电阻效应

在传统的微电子器件中, 信息的载体是荷电量为  $e$  的电子(或空穴)。电荷在电场的操控下, 按照给定的设计在线路中运动, 实现器件的功能。在这里, 电子的另一本征属性(即自旋)没有被利用——在自旋未被事先极化的条件下, 无论在线路的什么地方, 自旋向上( $\uparrow$ )的电子态密度总是等于自旋向下( $\downarrow$ )的态密度<sup>[1]</sup>。电子自旋自由度的工业规模应用, 可以说是从 1992 年开始的。这一年, IBM 公司将各向异性磁电阻材料( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 坡莫合金)引入到计算机硬盘的读出头, 使硬盘的存储密度上了一个新台阶(从 1980 年的  $1.4 \text{ Mb} \cdot \text{cm}^{-2}$  增长到 1992 年的  $15.5 \text{ Mb} \cdot \text{cm}^{-2}$ )。在硬盘驱动器中采用基于多层膜巨磁电阻(GMR)效应的读出头, 导致了存储密度更快的发展。GMR 效应 1988 年在实验室中被发现<sup>[2]</sup>, 不过在当时它只是一个低温效应。IBM 的技术人员看到了 GMR 潜在的应用价值, 在努力阐明这一效应基础物理的同时, 下大力量研制可在室温下工作的 GMR 敏感器。1995 年, 第一只 GMR 磁场敏感器进入市场; 1997 年 IBM 的硬盘驱动器用上了 GMR 读出头; 今天这项技术已经扎根于每年数千万台产量的计算机

收稿日期 2004-11-09

**作者简介** 戴 闻(1945-), 男, 研究员, 主要从事凝聚态物理的研究。张渭滨(联系人), 男, 教授, E-mail: zhw b@hqu.edu.cn

**基金项目** 国务院侨务办公室科研基金资助项目(04QZR 10)

©1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

中. 从 1998 年到 2002 年, 商品硬盘的存储密度从  $0.5 \text{ Gb} \cdot \text{cm}^{-2}$  增长到了  $7.8 \text{ Gb} \cdot \text{cm}^{-2}$ . 所谓多层膜 GMR 器件, 实际上是由铁磁 (FM) 金属层 (例如 Fe) 与顺磁 (PM) 层 (例如 Cu) 交替堆垛而成. 在外磁场为零时, 相邻 FM 层磁化的相对取向反平行, 器件呈高电阻状态, 当硬盘中存储的磁比特场 (约为数十个奥斯特) 强迫 FM 层的磁化平行取向, 读出头呈低电阻状态. 读出头的功能就是将磁比特信号转换成计算机易于处理的电信号. 一种广泛应用的读出头结构是“自旋阀”<sup>[3]</sup>, 在应用中它的工作电流平行于膜面. 现在把话题转到计算机的内存. 1970 年以前, 计算机使用磁芯作为内存硬件. 以这种方式存储的信息是非易失性的. 后来, 由于 MOSFET (MOS 场效应晶体管) 在高密度、低能耗和可靠性方面的优势, MOS 平面器件成了计算机随机存储器 (RAM) 的基础. 不过, 这样的内存是易失性的, 即一旦供电终止, 所存数据会全部丢失. GMR 效应在硬盘读出头中获得应用 (1997 年) 之后, 人们试图以类似的办法解决 RAM 中的易失性问题. 研究表明, 磁性随机存储器 (MRAM) 有望在不久的将来成为下一代的内存硬件. 在硬盘读出头中, 最基本的组成是“FM-PM-FM”三层膜, 而对于未来的 MRAM, 其基本组成将是“FM-薄绝缘层-FM”三层膜. 在后一种情况下, 工作电流将垂直于膜平面, 电流以隧穿的方式通过绝缘层. 当绝缘层两边的 FM 层磁化方向一致, 器件呈低阻状态; 当两边 FM 层的磁化方向反平行, 器件呈高阻状态<sup>[4]</sup>. 在 MRAM 的基础上, 对一个硬件逻辑单元通过编程实现不同的逻辑运算 (AND, OR, NAND 和 NOR) 是研究人员的下一个梦想. 为此, 需在 3 层膜隧穿工作电流引线以外, 再附加用于逻辑运算的若干输入线. 例如, 在 3 层膜的上方添加两条电流输入线 (不妨称之为 A 线和 B 线); 无论是 A 线还是 B 线, 通入其中的电流所单独产生的磁场都不足以强迫两个 FM 层磁化方向平行; 只有当 A 线和 B 线的电流方向一致, 两者共同产生的场才能迫使两个 FM 层磁化方向一致. 这样一来, 就可实现对 A 线和 B 线的 AND 运算和 OR 运算<sup>[5]</sup>.

## 1.2 自旋晶体管

在传统的 FET 中, 门电极电压可以控制源和漏两极之间的“通-断”. 其原理是门电场能够将电子从通道中驱赶出去, 从而使通道变成绝缘体. 在自旋 FET 中, 门电极所控制的是通道内快速前进的载流子自旋的进动. 因此, 它被预期具有更快的速度, 并消耗更少的能量. 当一个电子在两块平行电容极板之间高速飞过, 按照狭义相对论, 它不仅会感受到极板所产生的静电场, 而且会感受到一个附加的有效磁场 (磁场方向既垂直于电场方向又垂直于速度方向). 电子飞行的速度越高, 则有效磁场越强. 这个有效磁场将使电子自旋绕磁场方向进动. 上述效应同样会发生在自旋 FET 中. 假设源极和漏极中的电子均已自旋极化 (两者均为自旋向上  $\uparrow$ ). 在电子从源极到漏极的旅途中, 如果附加的有效磁场所导致的进动, 恰好使电子自旋的取向翻转, 则电子在到达漏极时将受到排斥, 以至于传输电流受阻. 于是, 便可通过门电极的电压控制自旋 FET 的“通-断”. 不过, 在半导体中输运电子的速度不是很高 ( $\sim 1\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 结果有效磁场的作用非常小. 2004 年, 美国加州大学自旋电子学和量子计算中心的 Awschalom 小组, 通过改进 GaAs 薄膜的制备工艺, 使有效磁场一举提高了几个量级. 结果, 在一个中等强度的电场下 ( $100 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ), 利用时间和空间分辨的法拉第旋转磁光技术, 研究人员定量地测定了电子自旋在有效磁场作用下的进动——在 GaAs 膜内, 在一个  $60 \mu\text{m}$  的旅途中, 电子自旋进动转过了一周半, 即  $3\pi$ . 这一结果为最终打造出有实用价值的自旋 FET 开辟了道路<sup>[6]</sup>. 自旋电子学中的一个重要参量是自旋扩散长度  $l_{\text{sd}}$ . 假定在自旋 FET 的源极中电子自旋已经完全极化, 当这些电子流向漏极, 即使没有门电极电场的影响, 自旋极化率也会因种种散射机制而逐步丧失.  $l_{\text{sd}}$  表征自旋极化能够保持的距离, 它同样可以用法拉第旋转技术予以测量. 对于  $n$  掺杂 GaAs 的测量表明, 低温 ( $T = 1.6 \text{ K}$ ) 下的  $l_{\text{sd}}$  可高达  $150 \mu\text{m}$ . 现今微电子器件的线宽约为  $70 \text{ nm}$ , 上述  $l_{\text{sd}}$  的测量结果意味着, 对于自旋电子学器件来说, 在自旋相干性丧失之前, 原则上可以被操作上千次<sup>[7]</sup>.

## 1.3 应用举例

近地宇宙飞船一般靠太阳能电池板提供电能, 但对于比木星更远的星际旅行, 用于探测仪器、计算机以及通信的电力, 或许只能通过温差发电装置提供. 目前距地球  $12.72 \text{ Tm}$  (约 85 个天文单位) 的 Voyager I 飞船于 1977 年发射升空, 它仍在向地球发回科学数据. 该飞船所使用的电能是利用 Pu-238 的放射性热能, 经“Ge-Si”热电材料的转化而得来的. 最近的研究表明, 一种新型层状 Co 氧化物材料 ( $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$ ), 其热电性能已经能与“Ge-Si”温差发电材料相媲美. 而  $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$  中热电势的增强, 主要得

益于自旋自由度所携带的熵流<sup>[8]</sup>。电子学器件尺度的日异减小,使得器件的性能甚至会受到单原子杂质的影响。因此,对材料作出原子尺度的三维表征成为必要。进而,在未来的固态量子计算机中,也将要求对单个电子自旋进行探测。最近,IBM-Almaden 研究中心的科学家,将三维磁共振成像(MRI)技术与高灵敏度的原子力显微镜(AFM)结合在一起,实现了对单个电子自旋的观察与定位<sup>[9]</sup>。

## 2 纳米器件

### 2.1 离子导体开关

$\text{Ag}_2\text{S}$  是性能优越的离子导体,它的电导不仅基于其中的电子而且基于  $\text{Ag}^+$  离子,特别是它还能在室温下工作。在  $\text{Ag}_2\text{S}$  和 Pt 电极之间留出 1 nm 的间隔,进而用微量的单质 Ag 填充这一间隙。当 Pt 电极为正,  $\text{Ag}_2\text{S}$  一端为负,间隙 Ag 中的电子将流入 Pt 电极,而  $\text{Ag}^+$  离子本身反向运动,被氧化成为  $\text{Ag}_2\text{S}$ 。结果,间隙中的金属 Ag 损失,器件处于“关断”状态。当外加电压翻转方向,  $\text{Ag}_2\text{S}$  中的  $\text{Ag}^+$  离子将向 Pt 电极运动,结果可在 1 nm 的间隙中重新生长出金字塔状的 Ag 原子桥。这个桥可以如此狭窄,以至于重新建立的“导通”状态其电导只有一个量子电导单位  $G_0$  ( $G_0 = 2e^2/h$ , 其中  $e$  是电子电荷,  $h$  是普朗克常数,  $1/G_0 = 12\,906.4\,\Omega$ )。最近,日本科学家将上述 2 个  $\text{Ag}_2\text{S}$  开关与电阻、电容结合在一起,实现了 3 种基本逻辑操作为 AND, OR 和 NOT。专家预测,这项技术的进一步发展,将指向纳米尺度可寻址比特的“写入”和“读出”<sup>[10]</sup>。

### 2.2 单电子晶体管

金属氧化物场效应晶体管(MOSFET)是现代计算机的基础单元。目前,在大规模集成电路中,晶体管单元的尺寸已经减小到 70 nm。随着器件的进一步微型化,预计到 2015 年微型化的进程将受到量子力学限制的挑战,如量子隧穿效应。一种应对的办法是干脆把隧穿效应利用起来,打造出在室温工作的单电子晶体管(SET)。利用 GaAs/AlGaAs 异质结(或其它半导体材料的)二维电子气,可以构成量子点——二维电子气首先被分割成源、漏和中间小岛 3 部分。采用在小岛上方淀积门电极的办法便可制备出一个容纳电子的小箱,即量子点(直径约 12 nm)。上述器件基本上与传统的 FET 类似,两者之间的根本差异在于,量子点与源、漏之间分别有势垒阻断,以至于电荷载流子进出量子点,只能以量子隧穿的方式进行。按照量子力学,量子点内的能级是量子化的。能级  $E(n)$ ,  $E(n+1)$ ,  $E(n+2)$ , ..., 分别对应量子点内所容纳的电子总数  $n$ ,  $n+1$ ,  $n+2$ , ...; 而能级的间隔,可由门电极电压进行控制。假定源极电子的静电能  $eV_s$  恰好高于量子点中最高被占能级  $E(n+1)$ , 并且  $E(n+1)$  又恰好高于漏极的静电能  $eV_d$ , SET 将处于导通状态。然而,导通的模式非同寻常。量子点只有在把第  $(n+1)$  个电子转移到漏极之后,才能接受下一个来自源极的电子。因此,导通是周期产生的,每次通过一个单电子。改变门电极电压(加大能级间隔),使得  $eV_s$  和  $eV_d$  均位于  $E(n)$  和  $E(n+1)$  之间。此时,量子点内的电子数将保持为  $n$ , 库仑阻塞发生,器件处于关断状态。第一个在室温工作的 Si 基 SET 于 1998 年研制成功。涉及量子点内更多能级的测量表明,源-漏之间的电流随门电压而单调变化,但其中叠加有电流不变的库仑阻塞平台<sup>[11]</sup>。从理论上讲,SET 有可能被用于检测流过线路的电子数,并发展成为“电流标准”。不过,由于量子隧穿过程具有某些不确定性,要想最终实现可靠的电子计数,还有一段长路要走<sup>[12]</sup>。

### 2.3 碳纳米管

多层碳纳米管和单壁碳纳米管(SWCNT)相继于 1991 年和 1993 年被成功制备。近年来碳纳米管在信息产业中的应用发展迅速。碳纳米管具有承载大电流的优良性能,最高可达  $10^9\,\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 比 Cu 导线高出 2 个数量级。SWCNT 的热导率高达  $6\,000\,\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ , 比公认的高性能导热材料兰宝石高出近 1 倍,从而有助于载流时焦耳热的散发。由于碳纳米管具有尖锐的顶端,使用相对低的激励场便可使之发射电子。已经制成了碳纳米管簇场发射器件,每平方厘米的发射电流超过 1 A。预计的应用包括液晶显示器、高频开关驱动和场致发光照明等。碳纳米管还可以用作原子力显微镜的针尖,使显微镜的横向分辨率大大提高。

在 2.2 节中曾提到,对于量子点而言,如果源极电子的静电能和漏极静电能分别高于和低于量子点的最高被占能级  $E(n+1)$ , SET 将处于周期性导通状态,每次通过一个电子。那里,没有详谈库仑排斥

项.事实上,当  $E(n+1)$  能级为单电子占据,为要从源极添加一个电子到量子点,源-漏极偏压  $V_{s,d}$  应满足  $eV_{s,d} > U$ ; 而当  $E(n+1)$  能级已经被自旋  $\uparrow$  和自旋  $\downarrow$  一对电子占据,为要添加一个电子到量子点,  $V_{s,d}$  则应满足  $eV_{s,d} > E(n+2) - E(n+1) + U$ . 总之,  $U$  是观察到单电子效应的关键参量,当热扰动能量  $k_B T$  与  $U$  大小可比,库仑阻塞电流平台将变得模糊不清<sup>[11]</sup>. 利用 SWCNT 也可以构成单电子器件,不过为要让它室温下能够工作,必须使 SWCNT 的有效电容特别小,以至于  $U \gg k_B \times 300\text{ K}$ . 2001 年,荷兰 Delft 大学的科学家,通过在 SWCNT 中引入缺陷的办法,制成了有效长度(缺陷与缺陷之间的距离)仅 25 nm 的 SWCNT 量子点.进而,在室温下观察到了单电子效应<sup>[13]</sup>.

### 3 超导电子学

#### 3.1 概述

近年来,基于超导的器件在仪器和设备中的应用越来越广泛<sup>[14]</sup>. 超导器件往往是用于仪器的前端,例如探测器、混频器以及 SQUID 磁强计等. 它的特点在于,有其他手段望尘莫及的能量分辨灵敏度. 然而,在整台仪器中超导线路的制造成本并不占有大的份额,仪器制造的主要花费往往是低温环境的产生. 从这个意义上讲,最好将各类超导线路集成使用,让它们共用一套制冷系统,以至于整个系统有好的性能价格比. 除了指向量子极限的能量分辨灵敏度,超导线路还有许多其他独特性质. (1) Josephson 效应.  $I = I_c \sin \varphi$  和  $d\varphi/dt = 2eV/\hbar$  (其中  $I_c$  是 Josephson 结的临界电流,  $\varphi$  是结两边波函数的位相差,  $e$  是电子电荷,  $V$  是结两端的电压,  $\hbar$  是普朗克常数被  $2\pi$  除). (2) 高频响应.  $f_{\text{Josephson}} = 2e/h = 483\text{ GHz} \cdot \text{mV}^{-1}$ . (3) 极高的开关速度. (4) 低功耗和低噪声. 现阶段,利用超导电子学技术可构成比较成熟的系统. 它包括用 Josephson 结组成的电压计量基准, SQUID 磁强计或梯度计,热电子热辐射计,数字电路 (RSFQ——快速磁通量子) 的逻辑应用,基于 Josephson 效应的振荡器、滤波器等<sup>[15]</sup>.

#### 3.2 单光子探测

天文观测涉及不同的电磁波频段. 频率低于 100 THz 的信号属于射电信号,对该频段比较有效的接收前端有: 超导体-绝缘体-超导体 (SIS) 混频器和热电子热辐射计 (HEB) 混频器. 前者适用于 0.07~1 THz, 后者适用于 1~100 THz. 频率高于 100 THz (波长  $\lambda \approx 3\text{ }\mu\text{m}$ ) 的信号通常被称为光子信号. 随着波长  $\lambda$  的减小分为红外光、可见光、紫外光和 X 光等. 在现行的天文观测中,最常用的光探测器是电荷耦合器件 (CCD). 不幸 CCD 技术不能分辨单个光子 (因为读出电路中噪声太大),也不能区分光子的能量 (即颜色). 1980 年代,基于 Si 片的单光子探测器被发展: 当一个光子被处于低温环境 ( $T \approx 0.05\text{ K}$ ) 的 Si 片吸收, Si 片的温度先上升而后下跌,通过记录 Si 片温度随时间的变化,可以决定 X 射线光子的能量 (约 6 keV). 然而, Si 片器件的灵敏度较低 (约 5 eV),不能用于探测可见光,因为可见光子的能量仅为 X 射线的 1/1 000~1/100. 在过去的 10 年中,发展起来的高灵敏度光探测器有两类,其一是基于超导膜在它的转变温度附近电阻急剧的变化 (超导转变边敏感器); 其二也是基于超导膜 (如 Nb) 的特性——入射光子的能量越大,拆散的库柏对越多,器件输出的准粒子 (单电子) 越多. 不幸,由于加工技术方面的原因,这两类器件有类似的弱点. 对于每一个像素需要一条专门的读出线,以至于敏感器阵列的像素数难于达到 1 000. 最近,美国喷气推进实验室的科学家发展了一种新型的单光子探测器. 它是由淀积在蓝宝石上的超导铝膜以及共面的波导线路构成的. 超导铝膜是微波 LC 共振线路的一部分. 当入射光子击中铝膜,铝膜中的准粒子密度增加,这导致膜表面阻抗  $Z_s = R_s + i\omega L_s$  的变化. 表面电感  $L_s$  的增大,将导致 LC 共振频率向低频方向漂移. 借助于附加的探测信号,通过分析共振频率的漂移  $\delta f$ ,共振功率幅值的变化  $S_p$  以及探测微波位相的移动  $\delta\phi$ ,研究人员实现了能量分辨的单光子探测. 新器件的优势在于当它们组成阵列,诸多像素可以共用 1 个前置放大器,以至于容易构成上千个像素的设备<sup>[16]</sup>.

#### 3.3 SQUID 器件

一个超导环其间被 1 个或 2 个 Josephson 结阻断,便构成了 SQUID 敏感器. Josephson 结可以是超导体之间的极薄绝缘层,它允许微小超导电流流过而不产生任何电压降. 环路中有 1 个结时,称之为射频 (RF) SQUID; 有 2 个结时,称直流 (DC) SQUID. 从外部给 DC SQUID 的 2 个结通入偏置电流,并使其幅值稍大于结的临界电流, SQUID 环的输出电压便会随着穿过环的磁通周期变化. 振荡周期是 1 个

磁通量子  $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \text{ fWb}$ . 利用 DC SQUID 的上述性质, 加上磁通锁相环读出电路, 可以探测极其微弱的磁场. 任何物理量, 只要它事先能够被转换成磁通变量, 都可以用 SQUID 进行高分辨探测. 目前, 最为成熟的应用有: 磁强计, 用于生物医学或地球物理的 SQUID 梯度计. SQUID 环路本身不适于直接探测生物体电流所产生的磁场, 因为 SQUID 本身的电感不能与生物磁信号有效地耦合. 为此, 需要用特殊制备的拾音线圈接收信号, 然后通过一个与拾音线圈并联的线圈将信号耦合到 SQUID. 这一部件被称为磁通变换器. 由于这一部分是超导的, 它保证了低噪声增益和平坦的频率响应. 拾音线圈的形状由探测对象决定, 分为磁强计线圈和梯度计线圈. 在脑磁图的应用中, 为了探测大脑神经细胞电流元所产生的径向(即垂直于大脑皮层方向)磁场梯度, 一个双圈拾音线圈被使用. 该线圈用一根超导线绕成, 第1圈右手螺旋, 第2圈左手螺旋, 两圈同轴, 间隔为  $\Delta x$ , 并且使用时令线圈轴与大脑皮层垂直. 显然, 对于一个脑神经细胞产生的磁场来说, 双圈拾音器中贴近脑皮的一圈感受到的场要比离开脑皮的一圈感受到的场大得多. 这一机制有助于对环境磁场噪声的抑制. 因为环境场的源距双圈拾音器往往较远, 在拾音器附近, 场强已经充分衰减, 结果双圈拾音器的二圈中的感生电流幅值接近, 相互抵消. 在脑磁图测量中, 数百个拾音器以阵列方式被布置在脑壳周围. 首先探测神经电流在脑壳表面不同位置所产生的磁场分量, 然后利用毕奥-萨伐尔定律通过反演计算出脑电流的分布<sup>[17]</sup>. 在 SQUID 基础上构成的电流或电压放大器, 已经被用于材料的无损检测、监测高压漏电, 以及侦察水下潜艇. 以扫描方式工作的 SQUID 显微镜, 可以对观察对象的磁分布进行成像. 这一技术已被 IBM 公司用于半导体芯片的质量监控. 此外, 在医学磁共振成像(MRI)中, 将超导拾音回路与 SQUID 读出线路结合在一起, 可以改进仪器的信噪比, 以实现 MRI 系统的低场运行(以永久磁体取代超导磁体), 大幅度地降低成本<sup>[18]</sup>.

### 3.4 基于高温超导膜的微波通信滤波器

高温超导体的一个重要特性, 是在一台小型制冷机可以达到的低温( $T \approx 20 \text{ K}$ )下, 它对微波的吸收特别低. 这使得高温超导膜在微波通信中可以发挥作用, 如以高温超导膜制成滤波器用于移动通信的基站, 将大大减小插入损失并提高  $Q$  值. 从应用角度看, 使用高温超导滤波器将提高手机通信基站的灵敏度和选择性, 从而降低手机的辐射率、改善通话质量、扩大基站的覆盖范围. 1998 年美国超导技术公司研制成第一台超导滤波器样机, 到 2002 年底已经售出了 3 000 多台这样的设备. 据专家预测, 目前在世界范围内, 使用高温超导滤波器的基站数可能已经接近 9 000. 随着第三代和第四代(3G/4G)移动通信技术的开发, 对上述设备的要求将更大. 到 2010 年, 以高温超导滤波器为基础的接收机前端, 有望成为高温超导应用的龙头产业. 而高温超导电子学应用的市场将具有 680 M 欧元的规模<sup>[18]</sup>. 对于一般微带平面滤波器的应用来说, 微带传输线的长度应是微波半波长的整数倍, 而宽度一般小于微波波长. 由于在微带线中, 传输电流密度主要集中在微带的边缘, 一般微带线承受大功率的能力是有限的. 应对的办法是采用“无边流几何”设计, 使用大面积高温超导膜(在介电材料基片的双面蒸镀超导膜)制成圆盘谐振器. 平面高温超导谐振器(作为滤波器的组件)分为两类. 一是上述的微带传输线; 二是集总元件谐振器. 它的电感( $L$ )部分可以由超导膜刻蚀而成, 而电容( $C$ )可以是另配的数字电容器. 集总谐振器的共振频率是  $f = 1/(2\pi \sqrt{LC})$ . 无论是第一类或第二类, 为了获得高的  $Q$  值, 地线都应由大面积超导膜构成. 因此, 一般说来, 最好选用双面高温超导膜. 尽管单面膜也能构成共面谐振器, 但至今没人能构成基于单面膜的多阶滤波器. 高温超导体的一个致命弱点是晶粒之间的连通性差. 因此, 为要达到器件的高效, 膜的质量是最为基本的制约因素. 在微波通信系统的应用中, 基于高温超导膜的器件主要是带通滤波器. 它们具有尺寸小, 低损耗和频率选择性强等优势. 表征谐振器性能的指标, 包括谐振频率  $f$ , 空载品质因子  $Q_0$ (对于特定的共振模式, 如  $\text{TM}_{010}$ ) 和谐振器的噪声模式谱. 为了提高选择性, 多阶滤波器被发展. 它是由  $N$  个谐振器经链式耦合而成. 2000 年德国 Cryoelectra 公司在实验室构成了一个 17 阶椭圆滤波器, 在  $1.92 \sim 1.94 \text{ GHz}$  的通带范围内, 带边陡度高达  $85 \text{ dB} \cdot \text{MHz}^{-1}$ .  $1 \text{ MHz}$  仅仅相当于通带宽度的  $1/20$ , 在如此窄的频率范围内实现对通带外信号  $85 \text{ dB}$  的抑制, 是其他技术不可能达到的<sup>[19]</sup>.

### 参 考 文 献

- 1 戴 闻, 高政祥. 混价锰氧化物超巨磁电阻材料研究进展[J]. 物理, 1998, 27(4): 343~349
- 2 Baibich M N, Broto J M, Fert A. Giant magnetoresistance of Fe/Cr magnetic superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1988, 61: 2472~2475

- 61(20~22): 2 472~ 2 475
- 3 卢正启. 自旋巨磁电阻效应[J]. 物理, 1998, 27(4): 373~ 376
  - 4 Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A, et al. A spin based electronics vision for the future[J]. Science, 2001, 294(5 546): 1 488~ 1 494
  - 5 Ney A, Pampuch C, Koch R, et al. Programmable computing with a single magnetoresistive element[J]. Nature, 2003, 425(6 957): 485~ 487
  - 6 Kato Y, Myers R C, Gossard A C, et al. Coherent spin manipulation without magnetic fields in strained semiconductors[J]. Nature, 2004, 427(6 969): 50~ 53
  - 7 Awschalom D D. Spintronics[J]. Scientific American, 2002, (6): 66~ 73
  - 8 Wang Y, Rogado N S, Cava R T, et al. Spin entropy as the likely source of enhanced thermopower in  $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$ [J]. Nature, 2003, 423(6 938): 425~ 428
  - 9 Rugar D, Buda Kian R, Mamin H J. Single spin detection by magnetic resonance force microscopy[J]. Nature, 2004, 430(6 997): 329~ 332
  - 10 Terabe K, Hasegawa T, Nakayama T, et al. Quantized conductance atomic switch[J]. Nature, 2005, 433(7 021): 47~ 50
  - 11 Glatthil D C. Single electronics in silicon drops[J]. Nature, 1998, 393(6 685): 516~ 517
  - 12 Watson A. Measurement and the single particle[J]. Science, 2004, 306(5 700): 1 308~ 1 309
  - 13 Postma H W, Teepen T, Yao Z. Carbon nanotube single electron transistors at room temperature[J]. Science, 2001, 293(5 527): 76~ 79
  - 14 戴 闻, 冯庆荣, 高政祥.  $\text{MgB}_2$  中的超导电性[J]. 自然科学进展, 2002, 12(9): 897~ 902
  - 15 Braginski A I. ISEC 2003 reflection on the conference[J]. Supercond Sci Technol, 2003, 16: 1 315~ 1 319
  - 16 Day P K, Le Duc H G, Mazin B A, et al. A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays[J]. Nature, 2003, 425(6 960): 817~ 821
  - 17 Vrba J. SQUID sensor array configurations for magnetoencephalography applications[J]. Supercond Sci Technol, 2002, 15: 51~ 89
  - 18 Winkler D. Superconducting analogue electronics for research and industry[J]. Supercond Sci Technol, 2003, 6: 1 583~ 1 590
  - 19 Klein N. High frequency applications of high temperature superconductor thin films[J]. Rep Prog Phys, 2002, 65: 1 387~ 1 425

## Several Physical Problems in the Development of Information Industry

Dai Wen<sup>①</sup>      Zhang Weibin<sup>②</sup>

(<sup>①</sup> Technical Institute of Physics and Engineering, Chinese Academy of Sciences, 100080, Beijing, China;

<sup>②</sup> College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** To celebrate the centenary of Einsteins creating miracles, the of year 2005 has been defined as “World Physics Year”. The propositins of Einstein’s working in 1905 involved photoelectric effect, Brownian motion, special relativity and quantum theory of solids. These contributions triggered the revolution of a lot of fields and made everybody to be benefited therefrom, for example television, laser, kand set, computer, internet, and even global position system (GPS). The present review stresses that, physics is fundamental to nearly all fields of engineering with the inclusion of giant magnetoresistance effect, spin transistor, nanoswitch based on ionic conductor, single electron transistor, carbon nanotube, single photon detector based on superconductor, SQUID device and superconduction filter for microwave communication.

**Keywords** information industry, spintronics, nanotechnology, superconducting electronics