

特约专栏

制备高温超导涂层导体的技术路线分析

冯峰¹, 史锴¹, 瞿体明², 魏俊俊¹,
吴蔚¹, 张燕怡¹, 肖绍铸¹, 韩征和¹

(1. 清华大学物理系 应用超导研究中心, 北京 100084)

(2. 清华大学机械系 北京 100084)

摘要: 钇系高温超导涂层导体具备优异的超导性能, 有广泛的应用前景, 因此成为国际上的研究热点之一。近年来涂层导体长带的研制在日本和美国等国家取得了巨大进展, 目前主要的技术路线为离子束辅助沉积 (IBAD) 和轧制辅助双轴织构基带 (RABiTS) 2 种, 其中 IBAD 技术路线的使用更为广泛而且产品性能处于领先地位。基于对上述 2 种技术路线进行的对比分析研究, 介绍了目前世界范围内主要研究单位的进展情况, 并对这 2 种技术路线在涂层导体结构的 3 个基本部分 (金属基带、过渡层、超导层) 的制备情况进行了具体对比分析。

关键词: 高温超导; 涂层导体; 离子束辅助沉积 (IBAD); 轧制辅助双轴织构基带 (RABiTS)

中图分类号: TM26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962 (2011)03-0009-07

Analysis of Technical Routes to Fabricate HTS Coated Conductors

FENG Feng¹, SHI Kai¹, QU Timing², WEI Junjun¹, WU Wei¹,
ZHANG Yanyi¹, XIAO Shaozhu¹, HAN Zhenghe¹

(1. Applied Superconductivity Research Center, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The YBCO coated conductor is an important material for application of high temperature superconductors in the future because of its excellent superconductivity properties. Therefore, lots of efforts have been made to develop coated conductors all over the world, especially the tremendous progresses made by Japan, USA and other countries for fabrication of coated conductor long tapes in recent years. There are two main technical routes to fabricate coated conductors, which are Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) and Rolling Assisted Biaxial Textured Substrates (RABiTS). IBAD was utilized more widely and has achieved better product performance. Comparative analysis of these two technical routes was carried out. The worldwide progresses were introduced, and the fabrication of three structural components (i. e. metallic substrate, buffer layers and superconducting film) was discussed for comparison of the two routes.

Key words: high temperature superconductor (HTS); coated conductor; Ion Beam Assisting Deposition (IBAD), Rolling Assisted Biaxial Textured Substrate (RABiTS)

1 前言

超导材料具备极其特殊的电性能与磁性能, 一百年来始终受到科研界的关注。人类对超导材料的研究由低温到高温、由实验到理论, 取得了数次重大突破, 因此与超导材料相关的科学研究先后 4 次获得了诺贝尔物理学奖, 各次获奖时间、获奖原因和获奖者分别为: 1911 年, 超导现象的发现, 昂纳斯; 1957 年, BCS 理论的

提出, 巴丁、库珀和施里弗; 1962 年, 超导电子对隧道效应, 约瑟夫森和贾埃弗; 1986 年, 高温超导材料的发现, 缪勒和柏德诺兹。可见超导材料是百年来长盛不衰的科研热点, 是自然界中最吸引人类兴趣的现象之一。

在经历了如此长时间的科学研究历程之后, 超导材料也逐渐走上了实际应用的道路, 其中高温超导材料因为可以在液氮温度 (77 K) 使用, 所以可以有效地控制使用成本; 而其他超导材料 (如 NbTi, Nb₃Sn 以及 MgB₂ 等) 的工作温度普遍在 20 K 以下, 较难在电力能源领域取得实质性应用。因此高温超导材料成为实现广泛应用

收稿日期: 2011-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50802047, 50902084)

通信作者: 韩征和, 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师

的最佳选择,可以用于制造各种高效节能,能量密度大的发电、输配电和用电设备。

由于高温超导材料在电力、能源、交通、信息各领域有着巨大的应用前景,因此高温超导技术被广泛认为是 21 世纪的战略技术,是欧美日等发达国家重点支持的能源、材料及军事技术,也被列入我国国家中长期科技发展规划。

美国奥巴马政府把大力发展新能源产业作为解决经济危机、更新美国产业结构和提升美国经济竞争力的主要手段。高温超导技术被列为“已证明可用的”新技术得到重点支持。日本财经省制定的 21 世纪高新技术发展路线图预期高温超导技术将在 2020 年从能源电力、生命医疗、信息通讯和工业交通 4 个领域全面进入日本社会。最近韩国宣布要建设世界上最先进的智能电网系统,在此背景下,韩国打算在今后 5 年中铺设 50 公里的高温超导电缆(这需要上万公里的高温超导导线)。

目前世界上已有近 20 组高温超导电缆已经或正在安装;最近高温超导风力发电机的项目也在丹麦、英国、美国等国启动,其中包括两台 8~10 MW 的高温超导风力发电机(目前最大的常规风力发电机为 5 MW,我国一般为 1.5 MW)。高温超导技术在军事上也得到了实际应用,美国海军新型驱逐舰用 36.5 MW 高温超导推进电机已试验成功。

目前具有产业化前景的高温超导导线有 2 个系列:铋系($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y/\text{Ag}$)高温超导导线和钇系($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$,简称 YBCO)高温超导涂层导体。其中,铋系高温超导导线已经实现了工业化生产,是目前高温超导应用的主要材料,我国在这方面基础较好,在未能批量生产钇系高温超导涂层导体之前还需要继续进行铋系高温超导导线的研发,以打破国外的垄断,保证我国的需求。钇系高温超导涂层导体(又称第二代高温超导导线)在国外目前已接近工业化生产的水平,然而价格还是铋系导体的 4~5 倍,我国在这方面与国际水平差距很大,基本上还处于实验室研究的阶段。与铋系高温超导导线相比,钇系涂层导体的潜在材料成本较低、超导性能较高,因此被认为是将来主要的应用产品,从而受到国内外的广泛重视。

近几年来,以铁基超导材料为代表的新型超导体受到了学术界的关注,而且我国在这方面研究工作的水平也较高。然而根据现在的认识水平,还不能预期这类新型超导材料何时能成为大规模应用的实用产品。因此,就目前的发展情况看来,钇系涂层导体仍然是最有应用前景的超导材料。

但是,钇系涂层导体的制备工艺非常复杂,研发和

设备投资很高,需要政府在研发过程的初期给以大力支持,例如日美两国十年来对钇系涂层导体的研发每年的投入力度都高达数千万美元,韩国在涂层导体方面的投入也超过了两千万美元。为了减小我国的钇系涂层导体研制水平与国外先进水平之间的差距,我国政府应该及时下定决心投入足够的资金并加强政策支持。

更为值得注意的是,现在美国、日本、欧洲、韩国等国家地区已经形成了组织形式非常紧密又分工合作的网络架构,特别是科研机构与公司之间积极配合,加上各国政府的大力财政支持,这些发达国家在钇系涂层导体制备方面可以实现非常高的研发效率与指标提升速度。相比之下,我国仍处在各研究单位的松散合作模式中。

2 主要技术路线

制备钇系涂层导体主要使用薄膜沉积技术。为了提高超导性能,钇系超导薄膜需要具备优良的双轴织构,即钇系超导薄膜的晶粒在 c 轴和 a/b 轴 2 个方向的排列需要尽可能的一致。钇系超导薄膜晶粒的随机取向、单轴织构和双轴织构的示意说明如图 1。为了实现双轴织构,需要钇系超导薄膜在已经具有双轴织构的基底上进行外延生长,利用晶格匹配使钇系超导薄膜获得双轴织构。

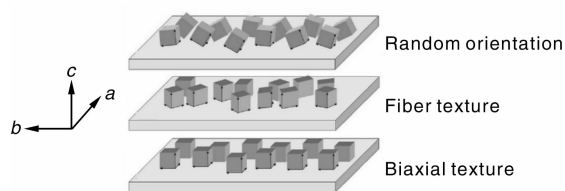


图 1 钇系超导薄膜晶粒排列的随机取向、单轴织构和双轴织构的对照图

Fig. 1 The sketch of random orientation, fiber texture, and biaxial texture of the crystalline grains in YBCO superconducting thin films

钇系涂层导体的基本结构如图 2 所示,可大致分为金属基底、过渡层和超导层 3 部分。其中金属基底的作用是使涂层导体获得更优良的机械性能,主要使用镍基合金等;过渡层的一个重要作用是阻隔金属基底与超导薄膜之间的元素扩散,另外与超导层最近的过渡层需要为钇系超导薄膜的外延生长提供模板,通过晶格匹配使超导层获得双轴织构。因此在制备钇系涂层导体时一般需要沉积多层氧化物过渡层,并且作为超导层生长模板的过渡层需要选择与钇系超导薄膜晶格常数接近的材料。目前已用于钇系涂层导体长带的超导层制备的方法主要有金属有机物气相沉积(MOCVD)、脉冲激光沉积

(PLD)、反应共蒸发沉积(RCE)和金属有机盐溶液沉积(MOD)等,这些方法各具优势,都可以制备出高质量的超导层。

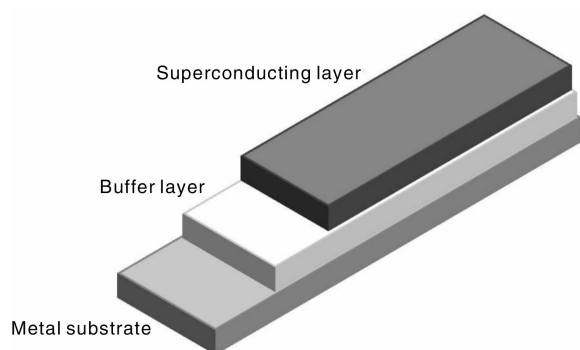


图2 钇系涂层导体的基本结构

Fig. 2 The brief structure of YBCO coated conductors

从上面的介绍可以看到,双轴织构是钇系涂层导体制备的核心。双轴织构可以在制备过渡层时产生,也可以在制备金属基底的过程中产生,基于这2种思路,目前制备钇系涂层导体存在2种主要的技术路线,它们分别是:离子束辅助沉积技术(Ion Beam Assisted Deposition,下文中使用其简称IBAD)和轧制辅助双轴织构基带技术(Rolling Assisted Biaxial Textured Substrate,下文中使用其简称RABiTS)。

IBAD技术:在没有双轴织构的金属基底上,通过离子束溅射的方法沉积MgO,YSZ,CeO₂等立方晶系的氧化物材料的薄膜,同时使用几百电子伏(eV)能量的离子束从特定方向(一般为立方晶系的面对角线或体对角线方向)轰击正在沉积中的薄膜,从而引导薄膜形成双轴的织构,如图3所示。1991年,日本Fujikura公司的Iijima等人开始使用IBAD技术制备钇系涂层导体,开辟了制备具有双轴织构的涂层导体的研究领域,首次解决了在无双轴织构的金属基底上制备高性能的钇系超导薄膜的问题。^[1]

RABiTS技术是对特定的金属基底进行轧制和热处理,从而使金属基底获得双轴织构,因此金属基底必须选择具有与钇系超导薄膜接近的晶格常数的材料。1996年,美国Oak Ridge国家实验室的Goyal等人最早使用RABiTS技术制备了钇系涂层导体。^[2]

基于IBAD技术和RABiTS技术制备钇系涂层导体是目前国际上最主要的2条技术路线。除了这2种技术路线之外,还有倾斜基底沉积(Inclined Substrate Deposition,简称ISD)等其他技术路线,但是与IBAD和RABiTS这两种技术路线相比,其产品性能、开发前景等都不具备优势,因此没有成为主流的技术路线。

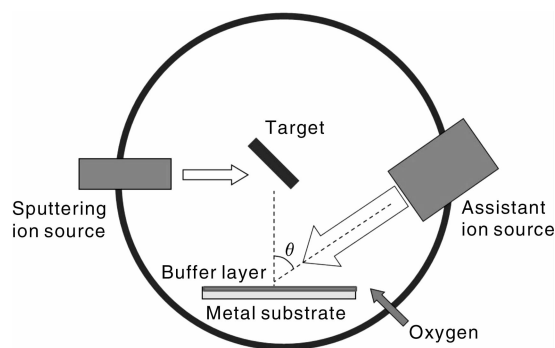


图3 离子束辅助沉积(IBAD)技术示意图

Fig. 3 The sketch of Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) technology

3 国际发展情况

目前在钇系涂层导体制备方面处于先进地位的国家是日本和美国,其中日本的Fujikura公司的产品指标目前处于世界第一位,并且Fujikura公司正在进行目标长度达到1 000 m,临界电流达到1 000 A的涂层导体的研制工作,预计将在2011~2012年期间实现。

在世界范围内近些年来参与了钇系涂层导体长带制备研发工作的主要包括如下单位:日本的Fujikura公司、Showa公司、Sumitomo公司、Chubu公司、SRL-ISTEC,美国的SuperPower公司、AMSC公司,韩国的SuNAM公司、KEPRI,德国的Bruke公司、Theva公司。这些研发单位制备的钇系涂层导体的典型结构与技术路线如表1所示^[3]。从表1可见,由于通过IBAD技术路线制备的钇系涂层导体具有高性能、高强度、制备工艺稳定、制备速度快等优点,IBAD技术路线成为世界上多数研发单位的选择。

钇系涂层导体超导性能的重要表征指标是临界电流(Critical Current,简称为 I_c),由于不同研发单位的制备产品宽度不同,一般使用1 cm宽度上的自场临界电流值作为表征指标。在实际应用中,很多场合下需要长度很大的超导线材,如电缆、电机、磁体等,因此钇系涂层导体长带的长度也是一个重要的表征指标。

所以,1 cm宽度上的临界电流值与长度值的乘积($I_c \times L$)被用来作为钇系涂层导体长带综合性能的表征指标,单位为千安培米(kA·m)。

世界上钇系涂层导体的长带制备处于领先位置的几个主要的研发单位最近的制备水平为:日本的Fujikura公司:2010年钇系涂层导体长带的1 cm宽度上的临界电流值与长度值的乘积($I_c \times L$)为374.5 kA·m(609 A/cm-w, 615 m);日本的Showa公司:2008年钇系涂层导体长带的1 cm宽度上的临界电流值与长度值的乘积

($I_c \times L$) 为 $155 \text{ kA} \cdot \text{m}$ (310 A/cm-w , 500 m)；美国的 SuperPower 公司：2009 年钇系涂层导体长带的 1 cm 宽度上的临界电流值与长度值的乘积 ($I_c \times L$) 为 $300.3 \text{ kA} \cdot \text{m}$ (282 A/cm-w , $1\,065 \text{ m}$)；美国的 AMSC 公司：钇系涂层导体长带的 1 cm 宽度上的临界电流值与长度值的乘积 ($I_c \times L$) 约为 $150 \text{ kA} \cdot \text{m}$ (300 A/cm-w , 500 m)。

表 1 在世界范围内钇系涂层导体长带制备的主要研发单位及其产品的典型结构与技术路线

Table 1 Main R&D groups who fabricate YBCO coated conductor long tapes in the world, their typical product structure and technical route

R&D groups	Typical product structure	Technical route
Fujikura	PLD – GdBCO/PLD – CeO ₂ /IBAD – GZO/Hastelloy	IBAD
Showa	MOD – YBCO/PLD – CeO ₂ /IBAD – GZO/Hastelloy	IBAD
Sumitomo	PLD – HoBCO/CeO ₂ /YSZ/CeO ₂ /RABiTS	RABiTS
Chubu	MOCVD – YBCO/PLD – CeO ₂ /IBAD – GZO/Hastelloy	IBAD
SRL – ISTEC	PLD – YBCO/PLD – CeO ₂ /IBAD – GZO/Hastelloy	IBAD
SuperPower	MOCVD – YBCO/LMO/MgO/IBAD – MgO/Hastelloy	IBAD
AMSC	MOD – YBCO/CeO ₂ /YSZ/Y2O3/RABiTS – NiW	RABiTS
SuNAM	RCE – SmBCO/LMO/MgO/IBAD – MgO/Hastelloy	IBAD
KEPRI	PLD – YBCO/CeO ₂ /IBAD – YSZ/CeO ₂ /RABiTS	RABiTS
Bruke	PLD – YBCO/PLD – CeO ₂ /ABAD – YSZ/SS	ABAD
Theva	Coevaporation – DyBCO/ISD – MgO/Hastelloy	ISD

韩国的 SuNAM 公司：2010 年钇系涂层导体长带的 1 cm 宽度上的临界电流值与长度值的乘积 ($I_c \times L$) 为 $60 \text{ k} \cdot \text{Am}$ (300 A/cm-w , 200 m)。

结合上述研发单位之前发表的相关数据，世界上钇系涂层导体的长带制备处于领先位置的几个主要研发单位的产品性能在最近 8 年的发展情况，如图 4 所示，可以看到处于领先位置的 5 家研发单位中有 4 家使用的是 IBAD 技术路线，并且钇系涂层导体的综合性能的前 3 位全部由 IBAD 技术路线占据了。

从图 4 中，可以看到世界上钇系涂层导体的长带制备处于领先位置的几个主要的研发单位的产品性能在最近 8 年的发展情况。同时可以看到当 1 cm 宽度上的临界电流值与长度值的乘积 ($I_c \times L$) 达到约 $50 \text{ kA} \cdot \text{m}$ 之后，各研发单位的产品性能提高速度明显加快，进入飞速发展的状态。目前韩国的 SuNAM 公司刚刚踏上了约 $50 \text{ kA} \cdot \text{m}$ 的“跳板”位置。

2010 年我国上海交通大学通过 RABiTS 技术路线可以制备 1 cm 宽度上的临界电流为 100 A 、长度 100 m 的钇系涂层导体，临界电流值与长度值的乘积 ($I_c \times L$) 为 $10 \text{ kA} \cdot \text{m}$ ，与“跳板”位置还有相当大的距离。

4 对比分析

在制备钇系涂层导体长带的过程中，IBAD 技术路线与 RABiTS 技术路线在钇系涂层导体结构中的 3 个主要部分（金属基带、过渡层、超导层）都有一定的差别。这 2 条技术路线在这 3 个结构部分的具体对照分析如下：

4.1 金属基带

目前 IBAD 技术路线和 RABiTS 技术路线中最常用的金属基带分别是 Hastelloy C276 和 Ni-5 % W（原子分数，下同）。这 2 种镍基合金，在拉伸性能、抗腐蚀和抗氧化能力、热膨胀系数、铁磁性、双轴织构、带材加工技术、价格成本和可代替的金属的选择范围各方面的对比分析如下：

4.1.1 拉伸性能

在室温下，IBAD 技术路线中所使用的 Hastelloy C276 合金基带的杨氏模量（Yield Strength at 0.2% off-set）为 356 MPa ^[4]；而 RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带的杨氏模量（Yield Strength at 0.2% off-set）则为 165 Mpa ^[6]。

由此可见，IBAD 技术路线所采用的 Hastelloy C276 合金基带的抗拉伸性能远强于 RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带。

4.1.2 抗腐蚀和抗氧化能力

IBAD 技术路线所采用的 Hastelloy C276 合金基带对乙酸、氯化铁、甲酸、盐酸、氢氟酸、硝酸、硫酸等物质有优良的抗腐蚀性，抗氧化性很强^[4]。

Hastelloy C276 合金基带在抗腐蚀和抗氧化方面的优秀性能有利于为最终的钇系涂层导体提供 stronger 的抗腐蚀能力，并且可以在钇系涂层导体制备过程中需要经历的高温氧化过程有足够的忍耐力。

4.1.3 热膨胀系数

IBAD 技术路线所采用的 Hastelloy C276 合金基带在

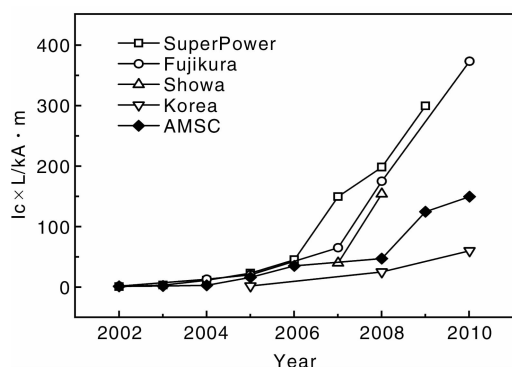


图4 世界上钇系涂层导体的长带制备处于领先位置的几个主要的研发单位的产品综合性能, 1 cm 宽度上的临界电流值与长度值的乘积($I_c \times L$)在最近 8 年的发展情况(其中使用空心图标曲线代表使用 IBAD 技术路线的研发单位, 而使用实心图标曲线则代表使用 RABiTS 技术路线的研发单位)

Fig. 4 The product combination properties of the leading R&D groups who fabricate the YBCO coated conductor long tapes in the world in recent eight years. The combination property is the arithmetic product of the critical current in one centimeter width and the tape length ($I_c \times L$) (The lines with hollow symbols represent the R&D groups utilizing the IBAD technical route and the line with solid symbols represents the R&D group utilizing the RABiTS technical route)

24 ~ 538 °C 范围内的热膨胀系数为 $13.4 \times 10^{-6}/K^{[4]}$ 。而钇系超导薄膜在约 100 ~ 300 °C 范围内的热膨胀系数约为 $14 \times 10^{-6}/K^{[7-9]}$ 。Hastelloy C276 合金基带与钇系超导薄膜的热膨胀系数非常接近, 这有利于减小钇系超导薄膜制备过程中产生的应力, 提高钇系超导薄膜的成膜质量, 获得更好的超导性能。

4.1.4 铁磁性

IBAD 技术路线所采用的 Hastelloy C276 合金基带是非铁磁性的; 而 RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带则是铁磁性的, 居里点为 335 K^[6], 磁化强度为 27.5 emu/g^[5]。

铁磁性物质的存在会改变钇系涂层导体内部和周围的磁场分布, 也会改变钇系涂层导体的磁滞回线。在交流情况下使用的过程中, 如果金属基底是铁磁性的, 钇系涂层导体的交流损耗会增加, 不利于实际应用^[10]; 而在直流情况下的使用过程中, 基底铁磁性的存在会降低钇系超导薄膜的临界电流, 也不利于实际应用。

在对钇系高温超导导线的研究中, 可以在带状导线的边缘电镀或裹制铁磁性物质(例如镍), 能够达到优化磁场分布、从而提高临界电流的目的^[11]。不过, 由于 RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带作为

铁磁性物质是均匀分布在钇系涂层导体内部的, 这种情况下临界电流则是下降的。

4.1.5 双轴织构

IBAD 技术路线所采用的 Hastelloy C276 合金基带本身不需要具有双轴织构; RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带需要双轴织构, 并且需要晶格常数与 YBCO 比较接近, 从而可以通过外延生长使过渡层和超导层也获得双轴织构。

因此 RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带需要的加工难度相对较大。

4.1.6 带材加工技术

IBAD 技术路线所采用的 Hastelloy C276 合金基带已经实现大批量商品化生产, 应用领域很广, 可以制造 Hastelloy C276 合金基带的公司比较多, 而且在购买之后只需要进行表面抛光加工; 而 RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带只在制备钇系涂层导体方面有应用, 因此需要专门设备, 其加工包括熔炼、热处理、轧制、抛光等复杂工艺过程, 能够生产的公司比较少。

因此, IBAD 技术路线所采用的 Hastelloy C276 合金基带相对简单, 并且购买更为方便, 这都使其在成本方面具备巨大的优势。

4.1.7 价格成本

IBAD 技术路线所采用的 Hastelloy C276 合金基带从德国的 ZAPP 公司小批量购买时的价格约为 800 元/kg, 在 1 cm 宽、0.08 mm 厚规格的时候, 基带长度价格换算约为 6 元/m; 而 RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带在 1 cm 宽、0.08 mm 厚规格的时候, 德国 evico 公司的价格约为 600 元/m。

由于上面提到的加工难度和市场广度的影响, IBAD 技术路线所采用的 Hastelloy C276 合金基带相比于 RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带具有巨大的价格优势, 价格只是其百分之一。

RABiTS 技术路线的主要优势在于产生双轴织构的过程中不需要使用真空设备, 从而降低了设备成本, 但是实际上 RABiTS 技术路线中所使用的 Ni-5 % W 合金基带本身的价格非常高; 而 IBAD 技术路线中产生双轴织构所需要的离子束辅助沉积设备由于是一次性的投入, 在生产速率足够高的时候, 折合在单位长度钇系涂层导体上的 IBAD 设备成本将会大大下降。因此对于未来的钇系涂层导体的工业化生产过程来说, 在产生双轴织构这一过程中, RABiTS 技术路线的金属基带成本相比于 IBAD 技术路线的设备成本其实并不具备相对优势。

4.1.8 可代替金属的选择范围

IBAD 技术路线的金属基带不需要有双轴织构, 所以金属基带的可选择范围非常宽, 除了上面讨论的 Hastelloy C276 合金基带之外, 还可以选择不锈钢等材料作为金属基带, 如目前日本的 Fujikura 公司和韩国的 Sunam 公司所尝试的 SUS 304 不锈钢基带等。

而 RABiTS 技术路线的金属基带必须满足双轴织构, 并且需要晶格常数与 YBCO 比较接近的要求。因此金属基带的可选择范围相对来说很狭窄, 目前主要是镍和一些镍基合金等金属材料, 它们大都与 Ni-5 % W 合金基带一样存在机械性能差、有铁磁性、成本高等缺陷。

由于 IBAD 技术路线在金属基带的选择范围方面比 RABiTS 技术路线具备非常明显的优势, 所以 IBAD 技术路线在未来找到具备机械性能更好、抗腐蚀和抗氧化性能更强、热膨胀系数与钇系超导薄膜更加接近的无铁磁性、加工难度更小、价格成本更低的金属基带的可能性相对高很多。

4.2 过渡层

在钇系涂层导体的结构中, 过渡层的一个重要作用是阻隔金属基带与超导层之间的元素扩散, 保护钇系超导薄膜的超导性能。而在元素阻隔能力方面, 非晶态薄膜要远强于晶粒较大的普通多晶薄膜, 因为晶粒较大的多晶薄膜中的晶界提供了有效地扩散通道, 而非晶态薄膜中有效扩散通道相对要少很多^[12]。因此要想达到足够的阻隔元素扩散的能力, 所需的非晶态薄膜的厚度相比于晶粒较大的多晶薄膜的厚度要小很多。

由于非晶态薄膜没有双轴织构, 因此只能应用于 IBAD 技术路线; 而 RABiTS 技术路线的所有过渡层都必须有双轴织构, 不能使用非晶态薄膜。因此 IBAD 技术路线所需要的过渡层总厚度可以比 RABiTS 技术路线的更小。例如美国的 SuperPower 公司的典型产品就是先沉积一层只有 80 nm 厚度的非晶态氧化铝薄膜, 实现阻隔元素扩散功能; 在其上再制备 IBAD-MgO 薄膜, 这一层薄膜的织构形成非常迅速, 只需要 10 nm 厚, 所以 IBAD-MgO 薄膜制备速率远高于其他种类的过渡层; 最终过渡层各层厚度相加约 147 nm 即可, 从而可以大大提高制备速度^[13]。而使用 RABiTS 路线的美国 AMSC 公司同样使用真空方法来制备各过渡层, 为了保证元素扩散的阻隔作用, 过渡层的总厚度需要 225 nm^[14]。过渡层总厚度的差异使得 IBAD 技术路线在过渡层制备速率方面也具有相对优势。

4.3 超导层

由于 IBAD 技术路线所使用的金属基带抗拉伸性能远强于 RABiTS 技术路线的金属基带, 因此在沉积钇系

超导薄膜的过程中, IBAD 技术路线的长带可以更加方便地实现多道同时沉积, 大大提高了制备速率; 另外, 样品架的形状结构也可以设计得更复杂同时保证带材的顺利传送, 使加热效率大幅度提高, 从而有利于制备高性能的大厚度的超导层。

5 结 论

钇系高温超导涂层导体长带的制备是应用前景巨大的关键性技术, 得到了世界范围内的广泛而持久的关注。相对于日本和美国等发达国家在过去几年内取得的巨大进展, 我国在这方面的研发任重而道远。

在制备钇系高温超导涂层导体的过程中, 核心技术是产生双轴织构。双轴织构可以在制备过渡层时产生, 也可以在制备金属基底的过程中产生, 基于这 2 种思路, 目前制备钇系涂层导体存在 2 种主要的技术路线, 它们分别是: 离子束辅助沉积 (IBAD) 和轧制辅助双轴织构基带 (RABiTS)。

通过分析目前世界范围内钇系涂层导体长带的进展情况, 可以看到 IBAD 技术路线是多数研发单位的选择, 使用 IBAD 技术路线的研发单位的产品性能也处于领先地位。

IBAD 技术路线领先于 RABiTS 技术路线的原因可以从它们在钇系涂层导体结构的 3 个基本部分 (金属基带、过渡层、超导层) 的制备差异中找到。通过具体的对比分析, 可以看到 IBAD 技术路线的确具有较大的相对优势, 可以成为我国进行钇系涂层导体长带制备重点支持的技术路线。

参考文献 References

- [1] Iijima Y, Tanabe N, Kohno O, et al. In-Plane Aligned YBa/sub 2/Cu/sub 3/O/sub 7-x/ Thin Films Deposited on Polycrystalline Metallic Substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 60(6): 769-771.
- [2] Norton D P, Goyal A, Budai J D, et al. Epitaxial YBa₂Cu₃O₇ on Biaxially Textured Nickel (001): An Approach to Superconducting Tapes with High Critical Current Density[J]. *Science*, 1996, 274(5288): 755-757.
- [3] Shi Kai (史 锴), Feng Feng (冯 峰), Wu Wei (吴 蔚), et al. IBAD 技术制备涂层导体用 YSZ 缓冲层长带的研究[J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics* (低温物理学报), 2010, 32(2): 116-120.
- [4] Haynes International Inc. Hastelloy C-276 Alloy Information[EB/OL]. (2011-01-04). <http://www.haynesintl.com>.
- [5] Evico GmbH. Ni-5% W-Evico-Standard[EB/OL]. (2011). <http://www.evico.de>.
- [6] Goyal A. Second-Generation HTS Conductors[M]. Norwell, Mas-

- sachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2004: 44 – 45.
- [7] Yamada Y, Kawashima J, Wen J G, *et al.* Evaluation of Thermal Expansion Coefficient of Twinned $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Film for Prediction of Crack Formation on Various Substrates[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, 39(3A): 1 111 – 1 115.
- [8] Kawashima J, Yamada Y, Hirabayashi I, *et al.* Critical Thickness and Effective Thermal Expansion Coefficient of YBCO Crystalline Film[J]. *Physica C*, 1998, 306(1 – 2): 114 – 118.
- [9] Kini N S, Umarji A M. Thermal Analysis and Thermal Expansion Studies on High Density $\text{YBa}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\Delta}$ [J]. *Solid State Sciences*, 2003, 5(11 – 12): 1 451 – 1 457.
- [10] Claassen J H, Thieme C L H. Magnetic Properties of Ni-Based Substrates for HTS Tape[J]. *Superconductor Science & Technology*, 2008, 21(10): 1 – 5.
- [11] Gu C, Alamgir A K M, Qu Timing, *et al.* Simulation of Ferromagnetic Shielding to the Critical Current of Bi2223/Ag Tape under External Fields[J]. *Superconductor Science & Technology*, 2007, 20(3): 133 – 137.
- [12] Gupta A, Wang H, Kvit A, *et al.* Effect of Microstructure on Diffusion of Copper in TiN Films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(9): 5 210 – 5 214.
- [13] Xiong X M, Lenseth K P, Reeves J L, *et al.* High Throughput Processing of Long-Length IBAD MgO and Epi-Buffer Templates at SuperPower[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, 17(2): 3 375 – 3 378.
- [14] Fleshler S, Buczek D, Carter B, *et al.* Scale-up of 2G Wire Manufacturing at American Superconductor Corporation[J]. *Physica C*, 2009, 469(15 – 20): 1 316 – 1 321.

Scientists Make Single-Mode Laser Out of a Single Nanowire

Although lasers come in all shapes and sizes, one of the most recent laser designs is especially intriguing, since it's made of just a single nanowire. Due to its small size and simplicity, the single-nanowire laser could be used as a nanoscale coherent light source for applications in optical communications, sensing, and signal processing.

The team of researchers, Yao Xiao, *et al.*, from Zhejiang University in Hangzhou, China, and Peking University in Beijing, has published their study on a new single-nanowire laser in a recent issue of *Nano Letters*. Although it's not the first laser made out of just one nanowire, it offers certain advantages since it operates in a controllable single-mode.

"Previously, single-nanowire lasers are mostly operated in multiple modes," coauthor Limin Tong of Zhejiang University told PhysOrg. com. "The single-nanowire laser reported in our work is single-mode, which is highly desired for practical applications."

Here, the laser's emission has a wavelength of about 738 nm (the upper end of the visible spectrum). The nanowire used to make the laser has a diameter of 200 nm, and a length of between of 50 and 75 μm . The researchers experimented with bending nanowires in different ways by peering under a microscope and folding the nanowire with fiber probes. For example, they folded nanowires so that they had loops at both ends, a loop at one end, and no loops.

To get the nanowire to act as a single-mode laser, the researchers excited the looped nanowire with a pulsed laser. As they explained, when the round-trip gain, which is sustained by feedback such as reflection, can compensate round-trip losses, lasing occurs. The researchers observed lasing in the single nanowires as two bright spots of light at both ends of the nanowire. They found that, for the nanowires that were folded into loops, the loops acted as loop mirrors, which not only offers the nanowire coupled cavities for mode selection, but also increases the nanowire's reflectivity and reduces the lasing threshold. Together, the high reflectivity and low threshold create a high-quality lasing cavity in the nanowire.

In addition, changing the size of the loops allows the researchers to tune the laser's wavelength. Using the fiber probes, the researchers could easily change the size of the loops. They found that decreasing the size of one of the loops changes the wavelength due to the reduction in the optical path of the lasing cavity.

The scientists hope that the single-nanowire laser, with its advantages of high mode quality and low lasing threshold, could enable new opportunities for practical applications of nanowire lasers. In addition, the study could provide a new design technique for fabricating low-threshold, single-mode lasers using other kinds of nanostructures.

"As a coherent optical source, this kind of nanowire laser does not only possess a miniaturized footprint (as many other nanowire lasers), but also offers single-mode laser output (difficult to realize in most other nanowire lasers but highly desired for practical applications)," Tong said. "Therefore, this kind of laser may offer great potential in applications such as nanoscale integrated optoelectronic circuits for optical data processing and optical sensing."

(From <http://www.physorg.com/news/2011-02-scientists-single-mode-laser-nanowire.html>)