

科学无止境 魅力在创新

——记中国科学院院士田昭武

吴清玉¹, 吴奕纯²

(1. 厦门大学化学化工学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门日报社, 福建 厦门 361009)

田昭武(1927~), 福建福州人. 物理化学家. 1980年当选为中国科学院院士, 1996年当选为第三世界科学院院士. 英国威尔士大学名誉理学博士. 注重学科交叉渗透及电化学技术的实际应用, 努力推动全国电化学事业的发展. 20世纪50年代, 科研方向为电极过程的基础理论和仪器创新, 至80年代总结为专著《电化学研究方法》. 主要包括: 发现电化学自催化过程并系统地解析其奇异现象; 直接比较法解得电极“绝对等效电路”; 提出多孔电极每个子过程“特征电流”的概念, 进而提出气体扩散多孔电极“不平整液膜”模型; 研制的“DHZ-1型电化学综合测试仪”, 成为首批国产仪器; 研制的“XYZ型离子色谱抑制器”取代了DIONEX公司老一代产品. 90年代后, 致力于从电化学出发解决其他领域的难题. 提出约束刻蚀剂层技术, 可应用于半导体和金属的微米级复杂三维加工, 实现半导体阵列微透镜的复制; 设计集成化阵列点样头以制作微阵列生物芯片, 可供普通医院快速诊断疾病. 21世纪以来, 提出新型超级电容器, 可回收汽车制动能量以缓解市内汽车油耗和污染. 获得1980年第四机械工业部科技成果一等奖、1986年国家教委科技进步一等奖、1987年国家自然科学三等奖、2007年福建省科技重大贡献奖等多项奖励和荣誉. 历任厦门大学校长、中国化学会理事长、国际电化学会副主席.

一. 成长经历

在教学、科研的第一线, 田昭武耕耘了60个春秋. 他在《科学的道路》一书上发表过一篇“浅谈继承与创新的一些体会”: “我对创新的一些看法, 比较全面地概括应该是‘立志、奋斗、创新、求实’四个方面. ……如果青年读者从我的看法中有所借鉴, 我将感到十分欣慰.”

1927年田昭武出生在福州一个普通职员家庭. 父亲曾当过多年的教师. 家里有7个兄弟姐妹, 田昭武排行老六. 家庭对田昭武的影响很大, 尤其是大哥, 勤奋好思, 成绩出众, 大学时代是全省仅有的两名“清寒奖学金”获得者之一, 在田昭武心中极有权威. 大哥对田昭武也非常关心, 田昭武读中学的时候, 他经常会出一些大学数学题让田昭武试解. 田昭武也是偶然看到大哥的一本大学化学书以后, 被书中充满奥妙的化学知识所吸引, 才对化学产生了特别浓厚的兴趣.

田昭武的中学时代是在艰苦的抗日战争中度

过的, 他深知灾难深重的祖国呼唤青年学子努力自强报国. 大哥经常勉励和引导他更加努力地锻炼自己的意志, 学习科学知识, 争取当个发明家. 1945年抗日战争终于胜利了, 田昭武被保送进入厦门大学化学系, 有幸遇到卢嘉锡、钱人元、蔡启瑞等著名化学家. 浓郁的学风、名师的指点, 田昭武像鱼儿进了大海, 尽情畅游在知识的海洋. 他说: “在他们的熏陶指引下, 我不仅学到化学专业知识, 更重要的是领会了名师治学的精粹和要领, 为以后的科学事业打下基础.”

田昭武的学习方法与众不同, 他喜欢独立思考、深入钻研, 不愿意亦步亦趋、墨守成规. 他的笔记本上常常写满密密麻麻的批注, 那往往是对某一问题的深入思考或独到见解. 他的书本上也常常画着大大小小的问号, 那是针对某一科学结论的不理解和大胆质疑. 1949年, 田昭武大学毕业留校任教, 成为卢嘉锡先生的助教. 卢先生的科学精神、爱国情怀, 深深影响着田昭武.

“万事开头难”, 田昭武初战便遇上碘酸根“自

催化”这个劲敌。该怎样阐明这一现象呢? 以往的知识储备难以解答。恰好这时, 系里派他到南京听一位前东德电化学专家的讲学。他踏上了北上的列车, 在等待专家到来的日子里, 田昭武从书店买来《数理方程》和《热传导理论》, 如痴如醉地跋涉在科学王国里。两个月过去了, 东德专家却因故无法到来。虽然田昭武唯一的脱产学习机会落空了, 但他却另有收获, 也是满载而归。因为他利用这段时间掌握了数理方程和热传导两门理论知识, 找到了利用数学和物理的理论对电化学“自催化”的问题进行解析的途径。回厦门后, 田昭武在《中国科学》发表了“自催化电极过程理论分析”一文。有了电子学技术和数理方程这两样“法宝”, 厦门大学电化学科科研走出了一条新路, 形成了自己的特色。

初战告捷, 坚定了田昭武的决心。新中国初期, 没有机会出国留学, 田昭武说: “在国内也能做出一番事业。”没能赶上读研究生, 田昭武说: “好老师就在身边, 我可以学他们的科学思想、治学方法。”没有时间脱产进修, 田昭武说: “挤时间学。”结合科研工作的需要, 田昭武走出了一条独立探索之路, 用智慧和汗水筑起了成功的塔基。他在 70 年代自学了半导体电路和固体物理, 在 80 年代自学了计算机、光谱学和微系统技术等。每学习一门新的科学知识, 他的电化学研究就上了一个新台阶。

20 世纪末, 现代科技进入了生命科学与信息科学时代, 田昭武又把眼光瞄准这两个领域。尽管年事已高, 但仍坚持自学, 利用物理化学为实现微纳加工技术和生物芯片技术提供技术平台。环境、能源、交通是当前人类活动中的重大问题, 最近他又涉足这一领域, 开创性地提出一种全新的以液相活性物质储能的新型超级电容器的思路, 它的成功将会有效地解决现在所用储能器功率低、寿命短、价格高的缺点, 用于城市快速公交, 电动汽车等可大大地减少污染, 节约能源。

多年的努力, 田昭武成绩斐然。1980 年获得第四机械工业部科技成果一等奖; 1986 年获得国家教委科技进步一等奖; 1987 年获得国家教委科技进步二等奖; 1982 年获得福建省科技成果一等奖; 1986 年获得全国五一劳动奖章; 1986 年获得全国先进教育工作者称号; 1986 年获得福建省劳动模范称号; 1987 年获得国家自然科学基金三等奖; 1989 年

获得国家教委科技进步二等奖; 1990 年获得国家发明三等奖; 1991 年获得全国高等学校先进科技工作者称号; 2007 年获得福建省科技重大贡献奖; 2007 年获得卢嘉锡化学奖等。

敏锐的目光和强烈的创新意识使田昭武的科研之树长青。虽年逾八十高龄, 他仍然保持着科学家的一颗“童心”, 充满对未知世界的好奇心, 不断向未知的科学领域发出挑战。

二. 主要学术成就和特色

(一) 广泛汲取相邻学科知识, 进行物理化学基础研究, 更深入地认识电极过程

1. 电化学自催化过程

“电化学自催化过程”是 50 年前田昭武最早期的研究课题。他先是从指导学生的毕业论文实验中发现碘酸根阴极还原时稳态实验浓度极化很反常, 不是随时间而加剧(普通过程中反应物逐渐减少所致), 也不是随时间而保持基本不变(催化过程中反应物再生所致), 而是奇特地随时间而浓度减少极化(暗示反应物反而增多?)。这是当时任何理论无法解释的。它是一种尚未为人们所知的“电化学自催化”现象吗? 如何从理论上定量地解释并全面预言其行为特点且用实验予以证实呢? 一方面, 他加紧自学数理方程、运算微积和热传导理论方法, 以此为工具研究上述电极的暂态过程, 系统完整地把电化学自催化过程的理论用数学表达出来。不但从理论上解释了已观察到的电化学自催化过程稳态实验的奇特现象, 而且定量地预示在暂态实验中必然出现各种奇异的极大点和极小点, 完全不同于已知的普通过程和催化过程。另一方面, 他自学电子学技术, 着手解决暂态实验的仪器问题。按实验要求, 他自行设计出“充电曲线繁用仪”(后来发展为 DHZ-1 型电化学综合测试仪), 不仅可以满足各种电化学暂态实验的要求, 而且还创新发展了测量瞬间阻抗的“选相调辉法”和“选相检波法”。在理论和实验两方面, 系统地解析并验证了电化学自催化过程的各种奇异的极大点和极小点现象。在此过程中, 田昭武体会到科学研究中学科交叉的优势和必要性, 并为厦门大学电化学科研究工作配备上所必需的数学、物理和电子学的工具, 奠定了有特色科研群体的扎实基础。



2. 电极阻抗的绝对等效电路的新解法

把电极过程的暂态行为用电容和电阻串联/并联组合的电路网络的总阻抗表达出来,称为电极阻抗,对应的电路网络称为等效电路. 电极的反应及传输全过程阻抗的传统解法是按其规律写出微分方程组,然后进行特定的单谐交流激励边界条件下的解析解或数值解,由此找出等效电路. 这种传统解法的难度很大,而所得结果的物理意义不够简明,而且局限于单谐交流激励的情况,电阻电容之数值还随频率而变化. 20 世纪 60 年代,田昭武经过深入分析传统的解题过程,发现复杂电路网络中的电容和电阻的行为对应着电极的反应及传输过程的行为,电路网络暂态的微分方程组与电极暂态的微分方程组相互对应. 只要按照电极的反应及传输行为直接找出对应的电路网络中的电阻电容关系,就可以很方便地得到电极用电容和电阻串联/并联组合的“等效电路”,无须花费大力气求微分方程组的解,也不涉及激励信号及边界条件. 所以电路可适用于任何频率的单谐或多谐交流激励,甚至方波或脉冲激励,可称为“绝对等效电路”.

3. 气体扩散多孔电极

燃料电池中燃料燃烧效率远高于任何热机,是能源合理利用的至关重要问题. 燃料电池的气体扩散多孔电极,是结构最复杂的电极. 除固液界面电化学反应之外,其主要传质过程至少包括液相扩散、气相扩散和离子导电等 3 个相互交叉的子

过程. 表述总过程的 3 个联立微分方程有关的物理参数有十余个且相互交叉,甚为复杂,物理图景不清晰. 80 年代初,田昭武创造性地提出多孔电极“特征电流”的概念,将每个子过程的有关参数“无量纲”化,并进一步分别集成一个具有电流量纲的子过程“特征电流”,联立微分方程组只包括“无量纲”化的参数以及工作电流与子过程“特征电流”的无量纲比值. 各子过程的“特征电流”只决定于有关电极参数而与电极的具体工作电流无关,数学表达和物理图景都更为清晰. 更重要的是,无量纲化后的数值模拟表明,工作电流与“特征电流”的无量纲比值即可衡量该子过程在此工作电流条件下对总过程的影响程度. 在上述研究成果的基础上,田昭武又对气体扩散多孔电极提出气体扩散多孔电极“不平整液膜”模型,认为成团的催化剂团粒凹凸不平,其表面覆盖液膜厚度不平整,气体必须从气相溶入溶液,再经过扩散穿过液膜,到达催化剂团粒表面,才能进行电化学反应. 电极含水量过多则影响液膜厚度及气体扩散速率,从而使电极的极化性能恶化. 模拟计算的结果定量地解释了极化曲线实用电流区直线段斜率的影响因素,并通过缺水型气体扩散多孔电极实验予以验证.

以上 3 方面的例子表明,田昭武在进行电化学基础研究时,通过艰苦的自学,广泛汲取相邻学科知识为工具,获得有自己特色的成果.

(二) 基于科学原理发展新研究方法, 从而研制出原理性全新的仪器

田昭武认为发展新的研究方法和仪器是提高理论和应用水平的重要环节. 创新的研究方法往往导致原理性全新的仪器. 例如在 20 世纪 70 年代国内只有极少数科研单位拥有昂贵进口的电化学测试仪器,田昭武在已有的采用电子管的“充电曲线繁用仪”基础上,边学边干地研制采用晶体管和集成电路的“DHZ-1 型电化学综合测试仪”. 它既有传统的稳态极化和暂态极化的测量功能,又有原理上基于田昭武自己创新的“选相调辉法”和“选相检波法”,具有国外仪器所不具备的测量瞬间交流阻抗的功能,可用以追踪测量快速变化的阻抗并分离出容抗成分和电阻成分,是测量电极阻抗的重要创新. DHZ-1 型电化学综合测试仪交付仪器工厂批量生产供应全国,成为全国电化学

科研单位和生产单位的首批国产电化学综合测试仪器. 这台仪器的生产, 改变了我国当时电化学仪器主要依靠进口的历史, 解决了因受进口仪器高昂费用的限制而使电化学实验进展缓慢的实际困难. 从 DHZ-1 型电化学综合测试仪问世以后, 电化学研究如雨后春笋蓬勃发展起来. 该仪器获 1978 年全国科学大会奖. 此外, 他研制的“DD-1 型电镀参数测试仪”交付工厂大批量生产, 对全国的电镀行业更科学化地评估电镀液组成发挥了较大的作用.

田昭武还利用电化学原理设计并研制用于其它学科的测量仪器. 例如他在 20 世纪 80 年代研制的“XYZ 型离子色谱抑制器”就是根据电渗析原理, 去除离子色谱洗脱液中的高电导的离子, 使洗脱液电导率大幅度降低. 这种抑制器可长期连续使用, 无须再生, 从原理上区别于已有的第一代和第二代离子色谱抑制器而成为性能更好的第三代离子色谱抑制器, 获 1990 年国家发明奖并批量生产供应全国, 在国产离子色谱行业取代了当年占领我国市场的 DIONEX 公司老一代离子色谱抑制器产品.

此外, 田昭武还基于电化学原理而创造新的研究方法, 指导课题组发展了超低腐蚀速率测量、金属微区腐蚀的测试、流动体系高效率电流检测和库仑检测、微型电渗泵、逆流聚焦电泳和电化学扫描隧道显微镜 (ECSTM) 等等. 发展新的研究方法和仪器, 已形成厦门大学电化学科群引人注意的一个特色. 田昭武认为, 在“理论”和“应用”两个环节之外加上“研究方法和仪器”第三环节, 成为“三套马车”, 可以跑得更快更好.

(三) 急社会之所急, 迎难而上, 逆向思维 独辟蹊径, 把物理化学应用于其它领域

探索解决重大难题的新途径是科学研究的重要使命之一, 从新途径的探索直到重大难题的解决有赖于多学科的协作和分工, 各显所长. 既然是重大难题, 必然有许许多多的人花费长时间研究过, 随大流容易陷入同水平的重复. 作为理科的学者, 更必须拓宽学科视野, 敏锐地抓住难点关键. 在解题方案和技术路线方面要敢于打破传统观念, 独辟蹊径, 有时甚至需要逆向思维. 田昭武根据以上的观点, 对某些科技重大难题, 进行了源头性的试探, 提出了与众不同的解决方案. 主要研究

成果为:

1. 可应用于金属和半导体的复杂三维微纳尺度工件加工的“约束刻蚀剂层技术”

在微米纳米机械加工技术领域, 光刻技术和 LIGA 技术已被长期而广泛地接受为传统的技术, 也已取得很大的成效. 然而, 这些技术的局限性是只能将二维模板的图像转移到加工件, 而不便于复杂三维微纳尺度工件的批量加工. 要打破全世界多年来公认的传统技术的局限, 显然是一件非常困难的工作. 需要抓到关键问题所在, 找出解决问题的方向, 才有成功的希望. 上述技术采用具有方向性的高速物理射线以保证高分辨率二维模板的图像转移, 却不能控制第三维方向的刻蚀深度, 所以不便加工复杂三维微纳尺度工件. 化学刻蚀剂在溶液中运行速度低且各向同性, 不具有方向性, 不宜用于二维模板的图像转移, 分辨率公认为不高. 但是田昭武采用逆向思维, 化不利为有利, 认为低速移动的化学刻蚀剂粒子行走最大距离受控于其寿命, 而亚微秒寿命的化学刻蚀剂粒子行走距离约为亚微米, 如果能够在复杂三维微纳尺度模板的表面连续生成亚微秒寿命的化学刻蚀剂粒子, 就可以把化学刻蚀剂基本约束在模板表面微米/纳米尺度的薄层内, 这个化学刻蚀剂薄层逐步靠近被加工件时所刻蚀成的加工件就具有近似复杂三维微纳尺度模板的三维结构, 只需一个步骤就可完成复制任务, 避免了多次对准套刻的困难, 成为光刻技术和 LIGA 技术的重要补充. 模板的表面连续生成化学刻蚀剂粒子的任务可利用电化学的原理完成, 而化学刻蚀剂粒子的寿命可选择适当的捕捉剂进行快速均相化学反应加以控制. 这样的全新思路, 使他应邀在 1992 年以“高分辨率液固界面”为专题的法拉第讨论会 (Faraday Discussions) 上提出约束刻蚀剂层技术 (Confined Etchant Layer Technique, 简称 CELT), 被列为该会议第三个报告, 受到关注和热烈讨论. 经过课题组的长期努力, 该技术现已可应用于硅、砷化镓等半导体材料和铜、镍、钛等金属及合金材料的微纳米复杂三维加工, 并成功地用于半导体材料的阵列微透镜的复制. 田昭武把一向不被看好的化学刻蚀技术推上微纳加工技术的舞台成为新的主角. 约束刻蚀剂层技术具有距离敏感性, 并可控制刻蚀深度, 为微系统各种部件的设计和制造提供新

的机动性和可能性,独立于 IC 和 LIGA 两大技术之外而互为补充。

2. 能够回收城市汽车制动动能使其成为节油洁净汽车的“新型超级电容器”

随着国家经济水平的提高,汽车使用变得愈加广泛而不可缺少。但汽车消耗燃油,使中国的石油消费大增。预测 2020 年全国汽车燃油消耗将达 2.3 亿吨,占石油总需求的 57%,导致石油大量进口,严重影响国家安全和外汇支出。汽车耗油的同时,对城市环境也形成了威胁,机动车尾气排放占了城市大气污染中的 70% ~ 80%。汽车在行驶过程用于启动加速和爬坡能量占总能耗的 2/3,其中一部分能量在制动和下坡时理应回收而尚未回收,占总油耗的 30% ~ 40% 被浪费。回收的困难在于:汽车每次启动加速和每次制动经历的时间的数量级约为 10 秒,要求电化学储电具有快充电和快放电的特性而且具有万次以上的循环寿命,现有的电化学蓄电池都不能满足这些要求。田昭武深入分析后,发现当前蓄电池充放电慢而且循环寿命短的根本原因在于其充放电过程涉及固相反应或固相的离子传输和嵌入,容易导致活性物质脱落或变性。针对当前蓄电池的缺点,他首次提出了基于液相中电化学活性物质的超级电容器。该技术利用薄液层电化学活性物质在电极表面发生电化学氧化/还原反应来储存和释放能量。具体说,就是在充电过程中,电能转换为液相中活性物质的化学能,而放电过程中,则液相中的化学能转化为电能,整个过程不涉及固相反应,也不涉及固相的离子传输和嵌入。因此,该技术具有以下突出的优点:具有很高的功率密度(以十秒数量级的高倍率充放电);其电化学储能本领(能量密度)远大于电化学双电层超级电容器,也大于含有固相过程的超级电容器,具有较高的单次充放电能量密度;由于充放电时不涉及固相变化,循环性能优异,寿命长,比蓄电池的循环寿命高两个数量级;可更有效地回收汽车的制动能量,改善启动性能,减少汽车对环境的污染。新型超级电容器不仅可以作为混合动力型电动汽车回收制动能量和提供启动加速能量的理想配套电源,而且可以作为快速公共交通停靠车站(上下客时段内)快速充电的纯电动车的主能源,也可以作为军用和民用高功率配套能源等等。已经得到实验室验证并申请了

国内外发明专利。

3. 能够快速而又廉价地生产微阵列生物芯片的“集成化阵列点样头”

微阵列生物芯片已日益成为生命科学研究和医学快速诊断的利器,要求在面积十余平方厘米的生物芯片上密密麻麻地点上各种样品,排成阵列。然而由于点样仪器和点样钢针群价格昂贵而点样过程复杂且效率低,制作微阵列生物芯片所需时间很长而价格很贵,至今只能主要用于高级的科学研究实验室,而不能大量地应用于普通医院快速诊断疾病,尤其是不能应对危急的传染病大流行时的全人类紧急需要。田昭武利用物理化学的优势,考虑到微米系统中的液体行为的主导因素已从重力转变为表面张力,设计出一种基于表面张力原理而运作的集成阵列点样头以替代昂贵的点样钢针群(中国国家发明专利,专利号:02126729.4)。这种集成阵列点样头的材料为高分子,价格低廉,可一次性使用,无需反复洗涤,绝无交叉污染。整体尺度近似于微阵列生物芯片,却集成了数百组的点样单元,每个点样单元相当于一根昂贵的点样钢针而性能更好。点样过程简单、快速,获得的每点液体体积可以控制得更精确。采用这种集成阵列点样头的点样仪器大为简化,价格大为降低而所制作的微阵列生物芯片既快又便宜,提供给普通医院作为一般患者快速诊断疾病,用途和市场都可得到极大的拓展。

以上 3 个应用技术的例子分别属于微纳技术领域、能源技术领域和生命科学领域,都算得上该领域的多年未解难题之一,研究者众多,但是年迈的田昭武不畏困难,抓住问题的关键,从物理化学原理出发独辟蹊径,发挥学科交叉的优势,提出的解题方案和技术路线走出了自己的特色。

(四) 关注并努力推动我国电化学科学技术事业和队伍茁壮成长和国际地位的提高

1978 年,DHZ-1 型电化学综合测试仪无偿交付仪器工厂批量生产数百台,解决了一向依靠国家宝贵外汇以采购进口设备之困难,使更多研究单位得以利用国产仪器开展电化学科研和教学工作,结束了中国人未能制造电化学综合性仪器的历史。

1984 年,专著《电化学研究方法》(科学出版

社)出版,系统介绍电化学研究方法之外,书中十余处大篇幅详细介绍田昭武所领导的科研群体的科研成果,堪称中国现代电化学科学经典著作之一,成为国内研究生及广大电化学科学研究工作者的教材或参考书。

1988 年夏,田昭武与吴浩青、查全性共同发起成立中国化学会电化学专业委员会,以健全组织加强协作,制定章程使定期举行全国电化学学术年会规范化。

1995 年初,受中国化学会委托,田昭武创办《电化学》(Electrochemistry)期刊并任主编。旨在促进国际学术交流,及时反映我国电化学科学最新研究成果和近期进展,并为电化学科技工作者开辟更为专业性的科学论文发表园地。至今已在国内外产生广泛积极影响。

1995 年,由田昭武等争取到的国际电化学会第 46 届年会在中国召开,并任年会主席。与会代表来自世界 45 个国家和地区,其中,国外代表 510 人。提交大会论文总数为历届年会之最,盛况空前。这标志着我国电化学科学研究水平已经跻身国际先进行列。1996 年,田昭武当选为国际电化学会(ISE)理事会副主席,为担任该职务的第一位中国人。

1995 年,配合国际电化学会议,国家教委委托厦门大学举办“电化学高级研讨班”,田昭武任研讨班主持人。研讨班人选大部分是高级职称中青年教师及海归学者。

田昭武长期并多方面的努力正在推动全国电化学科技队伍和科技事业的不断提高。

田昭武先生主要论著:

- [1] Lin TsuKeng, Chen YenChen, Tien ChaoWu. Autocatalytic Electroreduction of Iodate in Acidic Solution. *Scientia Sinica*, 1966, 15: 792.
- [2] 田昭武, 陈体街, 林仲华等. DHZ-1 型电化学综合测试仪. 厦门大学学报, 1978, 17: 150.
- [3] 田昭武, 蔡加勒, 邱贞花等. DD-1 型电镀参数测试仪. 厦门大学学报, 1979, 18: 68.
- [4] Tian Z W. Polarization Theory of Porous Electrode—Characteristic Currents for Transport inside Porous Electrode. *Scientia Sinica*, 1981, 24: 1103.
- [5] Tian Z W, Lin Zugeng, You Jinkua. Polarization Theory of Porous Electrode Uneven Liquid Film Model for Gas Diffusion Porous Electrode. *Scientia Sinica*, 1981, 24: 1391.

- [6] 田昭武, 林仲华, 林祖赓等. 1984. 电化学研究方法. 科学出版社.
- [7] Tian Z W, R. Z. Hu, H. S. Lin, et al. Effect of Suppression Efficiency on Sensitivity in Ion Chromatography. *Journal of Chromatography*, 1988, 439: 151157.
- [8] Tian Z W, R. Z. Hu, H. S. Lin, et al. High Performance Electrochemical Suppressor for Ion Chromatography. *Journal of Chromatography*, 1988, 439: 159-163.
- [9] You J K, Lin Z G, Tian Z W. High-Performance Gas Diffusion Porous Electrode Starved of Electrolyte Solution. *Chinese Chemical Letters*, 1990, 1: 151-160.
- [10] Bao L Y, Tian Z. W. A New Approach To Coulometry for Flow Through Systems. *J. Electroanalysis*, 1991, 3: 49-51.
- [11] 包立源, 田昭武. 一种高性能流动体系电流检测器. 分析化学, 1991, 19: 253-256.
- [12] Tian Z W, X. D. Zhuo, J. Q. Mu, et al. A New Electrochemical Scanning Tunneling Microscope. *Ultramicroscopy*, 1992, 42-44, : 460-463.
- [13] Z. W. Tian, Z. D. Fen, Z. Q. Tian, et al. Confined Etchant Layer Technique for Two-Dimensional Lithography at High Resolution Using Electrochemical Scanning Tunneling Microscopy. *Faraday Discussion*, 1992, 94: 37-44.
- [14] 田昭武, 田中群, 林仲华等. 复杂三维超微图形的复制加工技术的困难及对策. 仪器仪表学报, 1996, 17(1): 14-19.
- [15] Sun J J, Huang H G, Tian Z Q, et al. Three-Dimensional Micromachining for Microsystems by Confined Etchant Layer Technique. *Electrochimica Acta*, 2001, 47: 95-101.
- [16] 田昭武, 林华水, 周勇亮. 2005. 表面张力驱动液流的芯片化的高密度微阵列液体转移装置: 中国. 02126729. 4.
- [17] Zhang L, Ma X Z, Lin M X, et al. A Comparative Study on Electrochemical Micromachining of *n*-GaAs and *p*-Si by Using Confined Etchant Layer Technique. *J. Phys. Chem. B*, 2006, 110: 18432-18439.
- [18] 田昭武, 董全峰, 郑明森等. 2009. 基于液相中的电化学活性物质的超级电容器: 中国. 专利号: ZL200610087625. 1; 美国专利, 申请号 PTO 12/303, 193; 欧洲专利申请号 EPO 07720728. 0. [田昭武院士论著选集 p182].
- [19] Zhang L, Ma X Z, Zhuang J L, et al. Microfabrication of a Diffractive Microlens Array on *n*-GaAs by an Efficient Electrochemical Method. *Advanced Materials*, 2007, 19: 3912-3918.

(作者参考资料从略)