

物理路上——每一天太阳都是新鲜的

赵建华[†]

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

作者简介 赵建华, 国家重大科学研究计划项目首席科学家, 国家自然科学基金重点项目、设备专项基金项目负责人。分别于1985年和1988年在吉林大学物理系获学士、硕士学位。1999年在中国科学院物理研究所获博士学位, 师从王文魁研究员。1988—1996年在燕山大学任教。1999—2000年在中国科学院半导体研究所做博士后, 合作导师郑厚植院士。2000—2002年在日本东北大学电气通信研究所做博士后, 合作导师Hideo Ohno教授。2002年9月至今在中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室工作。现任或曾任英国物理学会国际期刊*Semiconductor Science and Technology*和国内期刊《物理学进展》编委、中国物理学会磁学专业委员会委员、低温物理专业委员会委员、中国科学院半导体研究所学术委员会委员、10余个国际会议组委会委员。在*Phys. Rev. Lett.*, *Nano Lett.*, *Adv. Mater.*等期刊上发表论文152篇, 邀请综述5篇。SCI引用858次。国际会议上做邀请报告30余次。获2000年度国家技术发明奖二等奖。培养的研究生获国家奖学金、中科院院长奖学金优秀奖和中科院优秀博士学位论文等奖项。

时间像一个被娇惯透了孩子手里的零花钱, 太不经挥霍, 还没有来得及回头从容地望一眼自己从事科研的足迹, 转眼就到了知天命的年龄。《物理》杂志约我在“三·八”国际妇女节专题上写篇文章, 开始觉得自己的经历比较平淡, 恐怕辜负了编辑与广大读者, 后来琢磨正好借此机会, 梳理自己一路走来的经历, 或许能给喜爱物理学科的读者、尤其是年轻的女同胞们一点借鉴的经验。

之前读过一些从事物理研究的女同行们写的自传式文章, 受益匪浅。我与她们一样, 在中



2015-01-05收到

[†] email: jzhao@red.semi.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150303

学、大学读书阶段喜爱物理, 打下了扎实的基础。对这段经历不费笔墨细述, 在这里我想对近二十多年来从事物理研究的经历做些回顾剖析。

我科研入门的八十年代信息比较闭塞, 加之自己物理人文积淀浅显, 一路随波逐流地走来, 涉足的研究方向比较多, 包括高温超导、金属多层膜、微重力和半导体量子微腔等。其实换方向是很辛苦的, 每一次面对新方向都要花费大量精力去熟悉背景、研究进展、主要问题和相关实验手段等, 短时间内不容易在一个方向上做得深入, 所以一般我不鼓励学生们轻易调整方向。当然, 事情都是两个方面的, 换方向也不是一无是处, 不知不觉中会因为换方向拓展了知识面, 丰富了阅历。

我目前主要从事半导体自旋电子学基础实验研究。算起来进入这个方向已经15个年头了, 研究起点始于2000年日本东北大学(Tohoku University)大野英男(Hideo Ohno)教授的实验室。大野教授是这个方向创始人之一, 在他实验室了解到, 半导体自旋电子学是要改变当今信息加工处理、存储和传输各行其是的分离模式, 把这三个功能集成在单个芯片上, 形成功能强大的CPU, 为信息技术的发展注入新的生命力。一想到自己有幸进入到一个崭新的有着诱人应用潜力的学科, 我

就兴奋不已，每天都感觉身上有使不完的劲，工作到后半夜甚至凌晨是家常便饭。东北大学是当年鲁迅先生留学的学校，每天从家到实验室的路上经过鲁迅先生雕像前，我都会感觉到先生深邃的目光在鞭策着他的后辈。也许之前丰富的科研经历练就了我较强的动手能力，很快，我就能够上手操作复杂的分子束外延(MBE)系统，生长自己设计的样品结构了。接下来，便利用我独创的三步生长法在Si上制备出磁性半导体(Ga, Mn)As薄膜，并且首次在GaAs上外延生长出高质量的半金属闪锌矿结构CrSb薄膜。短时间内取得了不错的实验结果，获得了严谨苛刻的大野教授认可。正因为如此，我被派去参加各种各样的国际会议，经常被参会者围着提问，大野教授时常笑眯眯地开玩笑：“You like a star”。

我从日本回国时，国际上半导体自旋电子学正研究得如火如荼，我所在的半导体超晶格国家重点实验室把它列为一个重点研究方向，希望我回来后加快开展工作。我同刚从国外回来的很多学者一样，无经费、无现成设备、无研究生。幸运的是，黄昆院士创立的超晶格室有着优良的传统和作风，我得到了以郑厚植院士为首的同事们的大力支持和无私帮助。MBE是制备高质量磁性半导体薄膜的重要设备，超晶格室有一台旧MBE设备，是上个世纪八十年代的产品，我接手时，已经搁置多年，行将报废。MBE很复杂，修好它无疑是一项极其艰苦的工作。对美好未来的向往让我浑身充满活力，感觉每天的太阳都是新鲜的，每天的大部分时间都泡在实验室里。基于在日本修理MBE的经验，在一位老师傅的协助下，从最基本的检漏、开腔修理、更换配件、抽真空到烘烤，记不清多少遍重复这样的检修过程，记不清多少次离开实验室时已经后半夜……两年后，看着用这台设备成功地制备出的第一批样品，我欣喜不已，好像自己的孩子诞生一样。受这段经历的鼓舞，之后我的小组又连续修复与升级3台旧MBE设备。现在，组里有4台MBE设备，可以安装32种源材料，为拓展研究方向、生长独特结构样品提供了强有力的技术支撑。每当我在会议上晒出这些用

于材料生长的系统时，总是让同行们羡慕不已，经常感叹Amazing!

修复与升级旧设备的经历让我不自觉地养成了简朴的工作习惯，对于旧设备和旧物品总希望物尽其用。我告诫学生们不要浪费，即使科研经费充裕的时候也要把钱花到刀刃上。我常对他们说：生活就像一面镜子，你对它哭，它就对你哭；你对它笑，它就对你笑。科研与生活同理，虽然是旧的设备，但你细心呵护，它会以良好的运行状态回馈给你；若是不加爱护，即便是新设备，也会不停地修理，造成精力、经费和时间无端地消耗。

这些年来，我很大一部分精力放在提高磁性半导体(Ga, Mn)As的居里温度上。(Ga, Mn)As基自旋发光二极管等功能已在低温下被成功地演示，但是较低的居里温度限制了其实际应用，如何提高居里温度是一个关键点。十多年来我带领学生们不断地尝试各种途径提高其居里温度。功夫不负有心人，我们制备出的(Ga, Mn)As居里温度逐年提高。2011年采用微纳加工结合重Mn掺杂和低温退火方法，将其进一步提高到200 K，这个世界纪录一直保持到今天。

我们创造了(Ga, Mn)As居里温度的世界纪录，但是这种材料的原创思想是日本人提出的。不可否认，同行们包括我的大部分工作是在模仿和紧跟国外热点中进行的。那么我们怎样才能自主提出深刻的物理创新思想、拨开知其然不知其所以然的迷雾，的确对现阶段中国物理学者不是一件容易的事情。我的体会是在学习提高中发现，首先要跻身于世界一流水平的研究梯队中，在此基础上，才会深刻准确地把握学科的脉络，突破固有思想的束缚，提出自己新鲜的见解，并在实验上得以实施和突破。其次，要重视设计与改造设备，日本的研究人员重视动手能力，愿意花时间摆弄设备，这与我们大部分研究人员形成鲜明的对比。我在日本学习时深切地感受到了这一点，大野教授的助手松仓(现在也是东北大学的教授)和他的妻子阿部(当时是大野教授的硕士生)MBE操作得极其熟练，给了我很多帮助。

2014年诺贝尔物理学奖获得者中村修二先生更是典范，他勇于打破常规、改造设备，提出了双气流的外延生长方法，由此获得了连续均匀的GaN薄膜重大突破。如果我们借助精密设备，能够在理解中别具一格的设计改造，对我们的研究往往会有意想不到的帮助。

最近几年半导体自旋电子学研究似乎走到了瓶颈，当年一起在这个领域打拼的同行们如今大多已经转到其他方向。经常有好朋友关心地问我：你的磁性半导体居里温度世界纪录是不是已接近理论极限？实际应用是不是有不可逾越的障碍？……其实我也经常问自己：我的磁性半导体研究究竟还能走多远？疑问归疑问，我还是坚持下来。因为我觉得难做的事情才有价值，患得患失，左右摇摆，终将一事无成。记得在当年吉林大学物理系的新生开学典礼上，余瑞璜老院士用多种语言向我们高声朗诵法拉第的名言：“满怀希望往前走，比达到还要好。”老先生充满激情的声音至今还在我耳畔萦绕。让我坚持走下来还有另一个原因，我们在实验中设计生长不同的样品结构，经常有激动人心的新现象不经意地冒出来，而且有些不是现成的理论能解释的，这也许正是实验物理研究的魅力所在。假设我没有MBE这样强大的物理实验手段，没有循着实验分析归纳法的路子走下去，没准会走到过早老化的死胡同里。我珍惜所选择的实验研究方向，一个新的材料出来，既可以冲破传统物理理论的界限，又可以增加几分器件应用的想象力。比如，最近我们制备出了与半导体GaAs在结构和工艺上匹配兼容的 $\text{Li}_0\text{-MnGa}$ 薄膜，这种材料室温下具有超大的垂直磁各向异性等优异特征，这个材料体系的出现，使我们向实现室温半导体自旋电子器件的梦想又进了一步。

物理本身是一门实验的科学，实验中出现的新线索不仅是理论研究的源泉，也是工程技术诞生的摇篮。黄昆院士说：物穷其理，宏微交替。今天，物理学的新方向持续时间往往不及一个人的寿命，所以我的研究小组在开展基础实验研究

的同时，也注意增强器件应用的紧迫感。我常向学生们讲，即使做不了半导体技术发展全新时代的先行者，也不做目光短浅、随波逐流的过客。

最后，关于从事物理学研究的女性远远少于男性这个世界性的问题我也谈点切身感受。德国物理学会有过统计，读博士的女性占总数9.1%。但是大学物理学教授女性所占的比例要小于总数的2%，英国的情况类似，日本近1%。中国科学院物理研究所女研究员和北京大学物理系女教授目前约占总数的10%。在日本，不管女人受到多么好的高等教育，结婚后就很少有人再出来工作。比如我前面提到的阿部，那个手把手地教我操作MBE的漂亮女孩，她做实验细致认真，具有非常好的科研素质。可是她硕士一毕业，就与松仓结婚，从此不再抛头露面，安心居家相夫教子，我真有点为她感到惋惜。我也注意到，物理相关的学术会议上的女性往往很少，级别越高的会议，这种现象越严重，有时会议室中只有我一个女性，尤其是一些项目评审会。记得有一次在国际会议上我习惯地做了开场白：Good morning, ladies and gentlemen。有人笑曰：哪有ladies呀，除了你，会场上都是gentlemen。我苦笑，不免有些尴尬。

女性较早从物理学界退出，是科研界的损失。天下没有免费的午餐，女性应多发出提高自己社会地位的声音，呼吁社会为女性在职场上提供更多的平等机会，以减少损失。借此机会，感谢中国物理学会女性工作委员会以及《物理》杂志多年来在这方面为我们女同胞做出的很多有益的工作！

尽管青春像手里捧着沙子，从指缝间一点点无情地溜走，但作为女性物理学者，另一种青春是永驻的。因为我们没有依附于他人，我们属于自己，我们有独立的事业空间，在生命的所有季节都可以迎着明媚的阳光，从容地去思考，勤奋地去播种，尽情地享受收获的愉悦。

在2015年“三·八”国际妇女节到来之际，谨以此文向热爱物理的广大读者、尤其向对物理不离不弃的女同胞们致以崇高的敬意！