

太空半导体材料的开拓者

何春藩

——记物理学家林兰英教授



1987年,8月5日,在我国发射的又一颗返回式科学实验卫星上,成功地进行了一次熔体生长砷化镓单晶的科学试验。这一开创性半导体材料科学研究的倡导者和组织领导者,就是我国半导体材料物理学家林兰英教授。

研制我国第一根锗单晶、硅单晶

1957年春节过后,刚从美国归来的林兰英,在“向科学进军”这股大潮的席卷下,开始了祖国半导体材料科学事业的征程。这年4月,她到中科院应用物理所(后改名为物理所)报到后,就在半导体研究室材料研制组开始元素半导体锗单晶的研究工作。她在美国近10年的深造,在索菲尼亚公司从事材料物理研究经验的积累,都成了她报效祖国的智慧和根底。

在新生祖国这块贫瘠的科学园地里,从小就具有倔强性格的林兰英,加上侨乡人的精明干练,又深谙国外的单晶技术,满怀信心地开始创基立业。她与王守武研究员白手起家,一个潜心研究适合国情的单晶提拉工艺,一个设计土法上马的单晶炉,经过多次反复试验,不出数月,终于研制成功了我国第一根锗单晶。

新年伊始,林兰英和她的同事,在完成国家下达的重要任务——为我国刚建成的半导体器件工厂生产1千克N型锗单晶和1千克P型锗单晶供制作晶体管用的任务之后,又开始了从事硅单晶制备技术的研究里程。

在国外,制取硅单晶材料工艺,都是采用氢这一不活跃的气体充当炉膛的填充物,但当时国内还不能生产。林兰英大胆提出把炉体抽成真空的办法进行拉制。

为了得到N型的硅单晶,必须在炉体容器中掺以适量的磷。他们冥思苦想,终于找到一个适宜的数学公式,求得磷与硅的重量比。一分耕耘,一分收获。1958年的岁末,终于拉制成功了符合性能、质量要求的我国第一根硅单晶。

设计我国第一台硅单晶炉

为了满足制造硅器件的要求,林兰英提出重新设计单晶炉。1959年1月,林兰英赴苏联讲学,带回一套硅单晶炉图纸。她与同事们对图纸进行了研究,又

去有色研究院参观该炉体构成。林兰英觉得,炉体太笨重,决心自行设计开门式的单晶炉。

经过两年的辛辛苦苦,终于在1962年研制成功了我国第一台高水平的硅单晶炉。送去日本展出,获得新产品展览会奖。北京机械学院生产了70台,畅销全国,远销罗马尼亚。这在我国硅材料发展史上,是件了不起的成就。

1962年秋,在林兰英的具体指导下,采用新的单晶炉,拉制成功了无位错的硅单晶。单晶质量,已接近当时国际先进水平。正因为有了无位错的硅单晶,以及相继诞生的外延硅单晶,在1963—1964年间,才得以有高频小功率管、高频开关管、高频功率管及外延硅开关管等多种硅平面晶体管在我国问世。这些成果分别获得国家科委科研成果一等奖。

开创硅外延新工艺

1960年,半导体所刚成立,作为材料研究室主任的林兰英,高瞻远瞩,指派她室里的同事,从事硅外延材料的研制,在半导体研究所开创了硅外延工艺。

硅外延层的晶体缺陷,主要有位错、层错、以及点缺陷等多类。在探索硅外延工艺的过程中,林兰英组织科研人员进行电镜之类的观察分析,得出位错的来源主要有:由从衬底材料中的原有位错向外延层延伸的位错、外延生长时由热应力产生的滑移位错以及界面晶格失配所产生的失配位错等。在制得无位错硅单晶之后,使用无位错硅单晶作衬底进行硅外延,头一种外延层位错就不复存在了。

自1962年开始,林兰英指导她的同事,用掺砷无位错硅单晶作衬底,从事硅外延层的生长,研制出高质量的硅外延材料,并相继制成2mm、3mm、4mm等多种频段硅雪崩二极管及其振荡器,在现代雷达、通讯、遥感遥测等方面,发挥着重要的作用。

探索硅单晶体中的微缺陷

为了促进我国大规模集成电路的发展,1978年,林兰英接受了国家科委下达的《提高硅单晶质量的研究》任务。她率领研制小组,着力于硅单晶中微缺陷——主要是漩涡缺陷的形成机理、本性及其消除办法的研究。经过两年多的努力,采用化学择优腐蚀显示、

红外吸收光谱测量以及透射电子显微镜观察等方法,论证了原生直拉硅单晶中存在有位错环(或团)及堆垛层错结构之类的 I 型漩涡缺陷,板片状结构的氧化沉淀物之类的 II 型漩涡缺陷,以及尺寸小于 100 埃的高密度的 III 型缺陷,它们各自在不同温度梯度下形成。采取一系列工艺措施,解决了消除漩涡缺陷的难题,使直拉无位错无漩涡硅单晶的成品率可达 80%。他们还采取某些技术措施,降低了体层错密度,提高了少数载流子寿命。这一研究成果,获得国家“六五”攻关奖。80 年代初,半导体所采用这种无漩涡、低氧化层错密度的硅单晶材料,在我国首次研制成功了 16 K 位、64 K 位的大规模集成电路——硅栅 MOS 随机存储器。

开拓化合物半导体砷化镓新材料

在我国的山东,有着丰富的镓矿资源,常年大量出口日、美等国家。如能用砷与之合成砷化镓材料,再将其制成单晶体材料,这将对我国电子工业的一大贡献。

万事开头难。林兰英和她的同事,把砷和镓放在石英管的两端,再把石英管密封起来,依靠精密的温度控制来合成砷化镓材料。未能料到,一声沉重的闷雷声——石英管爆炸了,试验失败了。他们从物理角度,化学反应角度,查找了屡遭失败的主要原因,明白了其中的奥秘。后来,他们把镓单独盛在石英舟里,放在石英管的一端,而把砷放在石英管的另一端,分开加热,终于制得了链条状的砷化镓。

砷化镓材料虽已合成,但要发挥它的真正使用价值,还得另行拉制成单晶。林兰英研制组,克服重重困难,经历过无数次失败,直到 1962 年,采用水平生长方法,才成功制备了砷化镓单晶,表征单晶纯度的电子迁移率,达到当时国际的最好水平。但距室温下的理论值,还有很长的距离。

寻求提高砷化镓单晶质量的新途径

实践证明,采用水平生长法难以制得更高纯度的砷化镓单晶材料。1973 年,林兰英作出决断,放弃这一实验研究,采用外延生长法制备砷化镓单晶。

1976 年 6 月,一套高密性、抗强腐蚀的外延生长 Ga-AsCl₃-N₂ 系统研制成功。随后,他们弄清了对砷化镓系统有很大影响的某些热力学因素和动力学因素,解决了热处理过程中氧的玷污问题,确定了必须在富镓条件下进行生长才能得到高电子迁移率的外延层的认识。对制得的样品通过光致发光研究表明,影响其纯度的主要因素,是残留受主杂质碳,进而采取了抑制硅玷污的工艺措施,终于在 1981 年,得到了高质量的气相外延砷化镓单晶。

林兰英担任液相外延砷化镓材料研制组组长,充分调动组员的积极性,创建一套密封可靠的硬接系统,

并与物理测试相配合,进行外延生长条件影响外延层质量的研究,弄清了这一系统工艺中的主要残留杂质是氧、硅、碳,摸索出一套有利于减少杂质玷污的外延工艺,得以能重复制得高纯、高迁移率、低补偿度的液相外延砷化镓单晶。

这两种提高砷化镓单晶质量的工艺方法,使材料的电子迁移率和电子浓度两大指标,相继达到国际先进水平。美国有一位砷化镓材料专家,将中、美、日、德四国提供的样片进行材料参数的全面分析比较,结论是中国这一 N 型单晶材料的质量和纯度都是最好的。这在同行的国际会议上产生了大的反响。在国际半导体物理学界,还对唯独只有中国一家能生产 P 型砷化镓单晶材料给予了很高的评价。

实现砷化镓单晶的太空生长

为了寻求提高砷化镓单晶质量的有效途径,林兰英自 1986 年 2 月起,着手开创太空生长砷化镓单晶材料的研究工作。她提出在我国返回卫星上进行此项研究工作的倡议,得到国家科委的赞许,航空航天部五院的热情支持。自 1987 年 1 月始,双方分工合作。由半导体所负责生长容器的制备,提出温控要求及事后对晶体的测试分析。五院的 510 所负责炉子的制造,提供其他技术保障。

试验的日子到了。在 90 分钟的有限供电时间内,采用降温凝固法,成功地从熔体中生长出直径 1 cm,长度分别为 1 cm 和 0.7 cm 的两块火炬头状的砷化镓单晶(见封面照片)。学者们认为,这一奇特的外形,是在无重力情况下,熔融的砷化镓材料依靠表面张力的约束,在籽晶上再生长晶体时呈现出的特殊现象。经电解腐蚀表明,空间生长的该单晶材料无密排的杂质条纹,表征材料均匀性好;用深能级瞬态谱仪观察,深能级类型减少,其浓度也降低,说明在微重力下化学配比得到更为精确的控制;经阴极荧光、X 射线分析,晶体完整性比地面生长的好;透射电镜研究表明,微缺陷有较为明显的减少。

由林兰英倡导和组织领导的这一太空材料的研制成果,无论是试验材料品种及其困难度,生长晶体体积之大,所采用的熔体生长方法等,都居于国际领先地位。这一开创性的研究工作,曾得到日、美、德等国同行专家们的高度评价;这一研究成果,曾荣获中科院 1989 年科技进步一等奖。

名家谈物理学习方法(三)

概念、定律与现象。深入掌握各种物理概念和定律,弄通各种物理现象之间的内在联系。

徐克尊(中国科技大学教授)