

• 科学技术史 •

黑暗中的微光：中国第一支硅靶视像管研制历程

Glimmer in the Dark: The Development History of China's First Silicon Target Image Tube

赵轲 / ZHAO Ke

(电子科技大学电子科技博物馆, 四川成都, 611731)

(Electronic Science and Technology Museum, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan, 611731)

摘要: 20世纪70年代, 夜视技术的国际竞争形势激烈。1972年, 中国启动关键夜视器件研发。成都电讯工程学院依托电子束管与半导体基础, 承接四机部任务, 突破靶面制造、制管工艺、测试评估三大技术, 于1974年研制出中国首支硅靶视像管。性能达国内先进, 部分参数超国际同期。随后六年间, 成电建成生产线, 为全国50余家单位生产百余支管, 应用于国防、科研、医疗等军民领域。该成果奠定了增强型硅靶微光摄像管基础, 推动我国夜视技术从主动式向被动式转型。其创新路径呈现三个特征: 以国家战略需求为牵引、技术研发与产线建设同步、多单位多学科协同攻关。作为我国夜视技术自主突破的关键点, 对光电技术后续发展具有一定意义。

关键词: 夜视技术 硅靶视像管 成都电讯工程学院

Abstract: In the 1970s, international competition in night vision technology in the field of defense was extremely intense. In 1972, China initiated the development of key night vision components. Building on its expertise in electron beam tubes and semiconductors, the Chengdu Institute of Telecommunication Engineering (CITE) undertook a research task assigned from the Ministry of Electronics and achieved breakthroughs in three core areas: target-surface manufacturing, tube-making processes, and testing and evaluation. In 1974, CITE developed China's first silicon target image tube, whose performance reached an advanced domestic level and even surpassed that of some international counterparts of the same period. From 1974 to 1980, the institute built a production line and manufactured over one hundred tubes for more than 50 institutions nationwide, which were applied in military and civilian fields such as national defense, scientific research, and medical imaging. This achievement also laid the foundation for the development of the enhanced silicon-target low-light camera tube and propelled a shift in China's night vision technology from active to passive modes. Its innovative pathway exhibited three characteristics: being driven by national strategic needs, the parallel advancement of technological research and development and production-line construction, and coordinated collaboration across multiple institutions and disciplines. As a key breakthrough in China's independent development of night vision technology, the project was of certain significance for the subsequent development of optoelectronic technology.

Key Words: Night vision technology; Silicon target image tube; Chengdu Institute of Telecommunication Engineering

中图分类号: V243; N09 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2026.02.007 CSTR: 32281.14.jdn.2026.02.007

收稿日期: 2025年2月12日

作者简介: 赵轲(1988-)男, 四川成都人, 电子科技大学电子科技博物馆副研究员, 研究方向为科学技术史、科学传播。

Email: zhaoke@uestc.edu.cn

夜视技术作为战场夜间活动的“眼睛”，自二战起便在现代高新技术局部战争中变得至关重要。^[1]1970年，美国在越南战场已投入第二代夜视仪，广泛装配在坦克、飞机以及单兵上。^[2]这一时期，日本、英国、荷兰等国，纷纷研制出第二代“主动式”夜视仪。因暂未突破高分辨率的微光摄像管技术，中国夜视仪仍停留在第一代。面对复杂紧急的国际形势，1970年2月4日，国务院、中央军委成立二四会战^①办公室，决定集中全国力量研制第二代坦克装甲车辆，^[3]必须装配第二代夜视装置，于是指定六家重点单位攻关微光夜视技术，尤以新型的微光摄像管为研制目标。

1972年，成都电讯工程学院^②（后简称“成电”）主动申请研制关键夜视器件增强型硅靶微光摄像管。同年，四机部部长王诤予以批准，下达研制任务。1974年，成电率先研制出中国第一支硅靶视像管，可在低照度下成像，成为增强型硅靶微光摄像管的基础结构和关键主体。随后，又按四机部下达的生产任务，迅速建立生产工艺线，三年内向全国五十多家单位生产一百多支硅靶视像管。虽然，二四会战试制的第二代坦克装甲车辆全部下马。^[4]但是，成电不仅完成了军事科研任务，还辐射全国，促进了电视跟踪、电视制导、电视电话、医疗成像等工业、科研和民用领域的发展。

过往中国夜视技术的研究，主要是集中在整机系统在军事上应用的爬梳，或某部分关键技术的研究。未见对关键夜视器件演进过程的历史钩沉，难以从科技史内史角度一窥夜视器件从无到有的演进全貌。本文以电子科技大学电子科技博物馆收藏的中国第一支硅靶视像管为研究对象，尝试厘清其从无到有的历史进程，以期探讨激烈国际竞争形势下中国进行技术突破的有效路径和实现模式。

一、夜视技术及硅靶视像管历史背景

夜视技术是将物体的不可见辐射转变为可见光，或将低照度的光照增强，成为人眼可视的应用技术。^[5]赫兹于1887年发现光电发射现象，爱因斯坦于1905年提出光电效应，为光成像技术在夜视领域应用点亮了理论源头。1934年，荷兰人霍尔斯（Gilles Holst）提出了光成像技术的新原理，实现光学图像-电子图像-光学图像的转换，成为现代夜视技术的理论基础。^[6]此后不久，霍尔斯就发明了红外变像管，夜视技术跨入实用阶段。夜视技术的实质，逐渐演变为在物镜与目镜、物镜与显示器之间放置夜视器件，将不可见的物像，转换为可见的目标图像。

按工作方式，夜视技术可分为主动式和被动式。主动式主要指红外夜视，利用红外探照灯“照明”目标，再通过红外变像管转换得到目标图像。德国、美国曾于1944年用于二战战场。^[5]朝鲜战场上，美国初步应用到单兵作战，视距100米。但必须配备红外探照灯，隐蔽性低，60年代后不再是研制重点。20世纪60年代，夜视器件发展为“被动式”微光摄像管，被动式夜视应运而生。^[7]按成像原理，被动式夜视又可分为微光夜视和热成像。微光夜视分为两种，第一种是直视微光，通过像增强器实现目标图像的增强，在60到70年代发展出第一代和第二代。^[8]1962年，美国研制出第一代微光夜视，如小型星光瞄准镜AN/PVS-2等，60年代末用于越南战场。1970年，美国装备第二代微光夜视仪送往越南战场启用。^[9]这些微光夜视仪采用微光摄像管，重量更轻，成本降低一半，灵敏度提高40倍。^[8]1970年至1971年，日本试制的微光夜视仪在星光下和月光下视距

①“二四会战”是指20世纪70年代，中国为研制第二代坦克装甲车辆，集中军工企业的第一次大规模的、多单位参与的坦克研制活动。历时五年，涉及单位84家，会战使得第二代轻型坦克完成设计定型试验，其他坦克车辆完成两轮或三轮试制和试验，多个部件取得阶段性成果。

②成都电讯工程学院，1956年在周恩来总理亲自部署下建立，是新中国第一所无线电大学，1988年更名为电子科技大学。

分别达到300米和550米。英国在70年代初开发CU-15型、CU17型微光夜视仪，星光下视距约250米。荷兰在1972年之前已开发出枪用瞄准具、微光观察仪、微光潜望式驾驶仪等三种微光夜视仪，星光下视距200米以上。这一时期，中国尚未研制出成熟的微光夜视技术，依然以“主动式”红外变像管为主，易暴露，处于劣势。

第二种微光夜视是微光电视，利用微光摄像管将物像增强，在靶面生成对应的电势起伏图像，经电子枪扫描产生视频信号，输出到观察屏。它能实现夜间远距离多人多点观察，广泛应用于车辆、飞机和船舰。

1. 国际竞争急迫需求

聚焦到微光摄像管，按光电转换原理，可分为光电发射式和光电导式。光电发射式摄像管，利用光电发射效应将光学图像转变为电势起伏图像，光阴极只用作发射电子作用，即光电转换和电荷储存分别由两个部件承担，因此两处可选材料自由度大。20世纪30年代的光电析像管、超光电像管、红外变像管，都属此类。光电导式摄像管也被称为视像管，依赖光电导效应完成光学图像到电势起伏图像转换。核心特征在于光电转换和电荷储存均由同一光电导体完成，光电导体（靶面材料）需同时满足高光电灵敏度与高电阻率要求，但是高光电灵敏度材料往往电阻率低，材料选择严重受限。尽管光电导效应早在1873年发现，但受限于材料矛盾特性，直到1950年美国RCA公司才成功研制首款硫化锑靶光电导式摄像管。1963年荷兰飞利浦公司开发出氧化铅靶光电导式摄像管，^[10]三年后推出产品，综合性能超越独占广播电视界二十多年的超正析像管。

硅的光电导效应早被学界认知，但其低电阻率特性长期阻碍其在摄像管中的应用。随着集成电路技术出现，光刻工艺可实现像素级嵌镶靶结构，物理隔离各像素单元，有效解决在像素单元独立存储电荷的难题。60年代末，硅

基材料凭借光刻工艺兼容性及性能优势，成为全世界高分辨率视像管靶面的研发方向。1967年贝尔实验室首创硅靶光电导式摄像管，^[11]亦称硅靶视像管。1970年RCA公司进一步推出增强型硅靶摄像管，显著提升灵敏度与分辨率。

激烈的国际竞争形势，迫使中国海陆空三军紧急请求研发微光夜视技术。党中央、国务院高度重视，自60年代初起多次召开全国夜视技术工作会议。1970年，党中央、国务院正式成立二四会战办公室，举行全国性的“二四会战”，集中全国力量研制第二代坦克装甲车辆，其炮镜和车长镜均需装配夜视仪。^[12]二四会战办公室于是指定中国科学院电子所、电子工业部第五十五研究所、虹光电子管厂、华东电子管厂、公安部29所等重点单位开展研制。确定攻关核心为微光夜视技术，关键在于研制出与国际同步的新型微光摄像管。RCA公司发明的增强型硅靶摄像管，因高性能特性，引发国内高校、研究所和生产企业的关注。这种半导体平面工艺与电子束器件结合的新型微光摄像，成为发展新型微光摄像管类型的理想目标。

2. 中国技术发展可行

自50至60年代，中国具备了电子束管和光阴极的技术基础。50年代后期，773厂已成功研制黑白显像管、示波管，逐步开展红外变像管、微光增强器等光电器件的研究。在1964年首次原子弹试验中，长春光机所改装的高速摄影机（3000次/秒）和光冲量计成功获取核爆数据，证明了其在光学与电子学的设计能力。60年代，741厂已能生产电子束管、光电倍增管等。1964年6月，773厂吴祖培^①率团队成功试制超正析像管，为成都市电台所试用。^[13]部分企业和研究所，已掌握阴极发射和光电转换的核心工艺。

生产条件建设与工业基础布局初步完成。773厂作为苏联援建的156项工程之一，当时已具有高标准洁净车间和真空设备，可支持硅靶管的精密制造。加之60年代末半导体平面工

^①吴祖培（1914-2014），浙江嘉兴人，中国工程院院士。曾任南京741厂、成都773厂、咸阳4400厂总工程师，中国著名真空电子技术专家，被誉为“中国电子束管之父”、“中国荧光灯之父”。

艺在国内逐步成熟,970厂和741厂均建设了硅平面工艺生产线。此外,中国在60年代已建立荧光粉、玻璃封装等配套产业链,为硅靶管的材料供应、制造和封装提供了可能。

至70年代初,基于以上技术和生产积累,中国基本具备硅靶微光视像管的初步研发条件和可行技术路径。多个研究机构、研究所和生产企业,基本掌握了靶面设计、电子倍增和真空封装技术等电子光学与真空工艺。对多碱阴极的改进、硅靶材料试制、光电材料应用的工艺,也为高灵敏度成像提供了可能。由此形成的科研和工业体系,促进了高校、研究所和企业的设备配置与人才储备,能够支撑技术转化。然而,当时的各单位分散攻关、工业基础薄弱等不利因素,依然为关键夜视器件的研制带来了巨大困难。

3. 成电具备研产基础

1956年,成都电讯工程学院按照国家部署,建立了全国最早的电子真空工程系之一。在首任系主任沈庆垓^①的带领下,成电10月完成了电子真空工程系(五系)的初步学科建设,为后续发展奠定基础。

1958年9月,11位苏联专家到校援建。其中,电子束管专家安·阿·日喀略夫(Anton Alexandrovich Zhikarev)^②,到校开展教学科研指导。^[14]他在教学方面,指导教师制订大纲,讲授三门课程,建立“理论-技术-测试”教学体系,编写前沿技术讲义,填补了中国当时仅有一本苏联学者暮良洛夫(Mikhail Yakovlevich Malyukov)撰写的电子束管译本的空白;亲手指导来自全国的12名教师。在科研方面,他建立电子束管实验室,指导制作电子束管模型。他尤其重视生产实践,带领教师

考察成都电子束管厂、南京灯泡厂的电子束管生产。日喀略夫全方位的教学-科研-生产指导,有效解决了我国长期缺乏电真空专业人才的问题,形成了教学、科研和生产的科技架构,将成电电子束管发展体系建立了起来。

1959年苏联专家撤走,成电电子束管研究团队自主发展起来。1960年以后,团队继续在已有基础上开展教学科研工作。仅过一年,就编写完成中国第一本《电子光学》教材,由人民教育出版社出版,获国家级教材奖。研制出误差仅有2%的电子轨迹仪,超越此前全国最小误差记录5%。成电电子束管领域,经过自主奋进,也迅速发展壮大起来。至70年代初,经历初建学科、苏联援建、自主发展的三个历史阶段,人才储备、学科基础、科研条件等逐步形成,成为日后研制硅靶视像管的充分条件。

二、攻克三大难关终寻解决之道

60年代末,成电的三系与五系都计划研发硅靶视像管。1969年,成电三系的陈星弼^③,经四个月攻关,在1970年元旦前夕研制出图像清晰的硅靶靶面。^[15]有了半导体工艺基础,电子束管和光阴极技术则是成电五系擅长领域。1972年初,成电五系的部分青年教师从米易“五七干校”轮调回校,铆足干劲希望有所作为,获悉国家急需微光夜视器件研发后,赶紧主动向二四会战办公室申请,尝试研制在国外新兴且国防急需的微光摄像管。

成电建校后,随着国务院机构改革进程,隶属单位虽有变化,但一直是军工院校。1961年划归国防部国防科学技术委员会管理,为七所国防工业院校之一;1970年划归第四机械工

①沈庆垓(1919-),浙江绍兴人,成都电讯工程学院教授,五系系主任,我国电子光学先驱之一。1942年毕业于浙江大学电机系。1943年公费赴英国留学,先后在英国马可尼无线电台、马可尼学院、标准电话电缆公司学习。1956年支援新建成都电讯工程学院,任电真空工程系系主任。1981年调回浙江大学任教授。著有《摄像管理论基础》(科学出版社,1984)。

②安·阿·日喀略夫(Anton Alexandrovich Zhikarev),副博士、副教授,电子束管专家,来自莫斯科工程物理学院。来华时间1958年9月11日至1959年9月5日。

③陈星弼(1931-2019),电子科技大学教授、博导,1999年当选为中国科学院院士。1983年任成都电讯工程学院电子科学与工程系系主任、微电子研究所所长。中国第一批学习及从事半导体研究的科技人员之一,电子工业部“半导体器件与微电子学”专业第一位博导,国际著名半导体器件物理学家、微电子学家,国际半导体界超结结构(Super Junction)的发明人。被誉为“中国半导体功率器件的领路人”。

业部（主要负责电子工业）和解放军总参通信兵部共同管理；1972年归四机部管理，在国务院里四机部又由军委办事组管辖。同年，当海军、国防科委、科学院等单位发出急需请求，四机部接到上级指示后，王诤部长考虑到，成电作为四机部直属军工院校、又建有全国最早的电子真空工程系和半导体零件与绝缘材料系，还主动请缨开展研发，便同意下达成电研制微光摄像管的任务。研究团队经过三个月调研，选定研制微光摄像管中的增强型硅靶微光摄像管为目标，这是当时国际上微光性能最佳的摄像管。他们认为这既是对国际最前沿技术理所应当的追赶，更是证明外国人行中国人一定行的绝好机会^①。因增强型硅靶微光摄像管由硅靶视像管和像增强器组成，作为必要条件，必须首先研制硅靶视像管。

这项技术在国内尚未被攻克，研制工作横跨电真空学、电子光学、半导体物理及工艺、材料科学等多个领域，对研究团队提出极大挑战。按照既定目标，需制成靶面为10欧-厘米的N型硅单晶片，并在其上制出密度至少达50个/mm的二极管阵列。^[16]技术攻关主要由五系牵头协同展开。五系的六个教研室，研究领域涉及电子管和离子管（501）、电子束管和电子光学（502）、微波技术和微波器件（503）、真空技术（504）、化学技术（505）、复杂工艺技术和材料（506）等。其中，502教研室专注电子光学和电子束管，自然是硅靶视像管的重要基础。因此，以502教研室为先锋，在校内形成多系多教研室攻关的“小协同”研发生态。

研究团队首先搭建研制工作的总体架构。

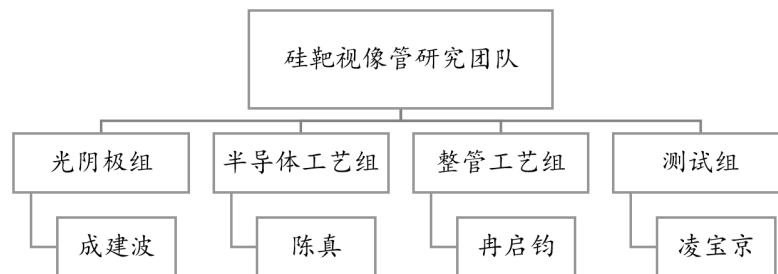


图1 硅靶视像管研制分工架构

团队以成建波为总负责人，分成四组，见图1。光阴极组组长成建波，负责光电阴极研制；半导体工艺组组长陈真，负责研制核心部件硅靶面；整管工艺组组长冉启钧，负责器件装配和整管密封，制造管内真空环境；测试组组长凌宝京，负责制成后的性能测试^②。还有其他教研室电路、化学领域的研究人员、制造工人，近30人组成硅靶视像管研究团队。

同年5月，研究团队开始按序做技术准备。所有人开始熟悉已有的理论和技术资料；进一步改造实验室，搭建必要的工艺条件；自制与购置必要仪器设备。1973年，研制工作正式启动。随着国内彩色电视的发展，国内已有研究所、工厂等科研和生产单位，在电真空器件、半导体工艺等方面具备基础，研究团队与这些单位协同攻关。

1. 攻克难点一：靶面研制

研究团队对于部分成熟技术，选择直接采用或者微小改进的方式。研制所需的电子枪，采用当时已经成熟的、通用性较好的1寸硫化锑视像管（SF-25）电子枪，由773和741厂生产。在此基础上改进为短枪、低功率分离网枪等，制造任务由生产单位完成。

攻关难点落在三项技术上。难点一便是靶面研制。摄像管靶面经历了硫化锑靶、氧化铅靶阶段。半导体平面工艺中的光刻技术，使得硅片上制作嵌镶靶成为可能，各单元像素产生物理隔离，达到独立储存电荷目的。硅靶不易损、寿命长、灵敏度更高；惰性小，能摄取运动图像。这项新兴技术，需要在很薄的硅片上光刻出上百万个光敏二极管，意味着每两个二

①赵舸、陈德利. 陈真教授访谈录（2025年1月17日，录音藏于电子科技大学电子科技博物馆）。

②赵舸、王念慈. 凌宝京教授访谈录（2022年12月1日，录音藏于电子科技大学电子科技博物馆）。

极管间的距离为 $10\mu\text{m}$ ，是全世界最先进的工艺水平。

硅靶组陈真、陈万通等人在准备阶段向全国多家单位学习硅靶靶面制作，掌握了当时国内先进的硅靶制造工艺，并对实验室改造，建立半导体工艺必需的超净间，建成完整的半导体硅靶制造工艺线。与集成电路平面工艺类似，他们将单晶硅碇切片后，经过磨片、抛光、清洗等完成衬底制备，然后进行氧化在表面生成一层 SiO_2 绝缘膜。用光刻法在绝缘膜上开出几十万个窗口，通过窗口进行硼扩散，形成 p 型岛（见图 2(b)）。如此，便制成了被 SiO_2 隔离开的几十万个 p-n 结。接着，将受光面进行腐蚀，减薄硅片使得厚度薄至 $10\text{--}20\mu\text{m}$ 。

此时，故意使得硅片边缘较厚，以保证机械强度。此后，在受光面进行磷扩散，形成 N+ 层，并进行烧氢。最后，在扫描面上蒸涂电阻海，避免扫描电子束工作时的电子不致于落于 SiO_2 上积累起来，妨碍扫描电子束继续工作^①。硅靶制作的挑战在于，如此高精度的工艺流程，均由陈真等研究人员和小组工人全手工制作而成。

最终，陈真小组成功制造的硅靶厚度只有 $10\text{--}20\mu\text{m}$ ，每两个 p-n 结二极管之间的距离为 $10\mu\text{m}$ ，结直径为 $8\mu\text{m}$ ，如图 2(a) 所示。在面积为 $17 \times 17\text{mm}^2$ 的靶面上，二极管数量从 36 万

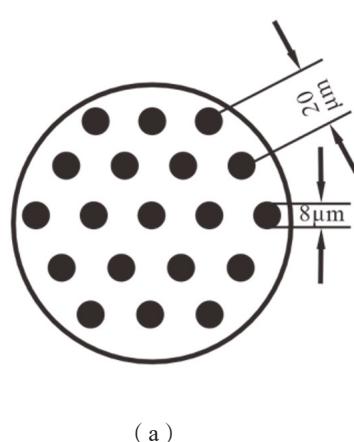
支提高至 80 万支。

当光学图像照射到硅靶的受光面时，由于光子的激发，在靶内产生光生载流。在反向偏压和势垒场的作用下，电子向受光面移动，空穴向扫描面移动，在扫描面上积累正电荷。扫描电子束进行换接，结果产生信号电流。由此，利用半导体硅的光敏特性，硅靶面完成了光学图像二维光学信号，到一维电流信号随时间变化的光电转换，可用于下一阶段图像的生成。

2. 攻克难点二：制管工艺

难点二是制管工艺。成建波考虑到进一步研制增强型硅靶摄像管的要求，又结合当时现有条件和硅靶特性，进行了工艺试验与分析改动，制定出新的制管工艺规范。首先，将冷钢封工艺改为可伐与玻璃热封工艺。当时，国内外普遍采取冷钢封的方法，而研究团队一方面由于条件受限，另一方面考虑到硅靶视像管是后续增强型硅靶微光视像管研制的第一步和主体结构，而后者光电阴极制造过程中，靶面要承受更高的温度。因此，选用具有较高升华温度的碲化镉作为电阻海材料代替原来的硫化锑电阻海，用高频封接工艺代替原来的冷钢封工艺，成功将环、玻片、玻筒三者熔封在一起^②，见图 3。

硅靶十分脆弱，安装中稍有不慎便会损坏。当时没有高精密仪器协助安装，研究团队采用一种机械结构配合手工的安装方法，解决这一



(a)

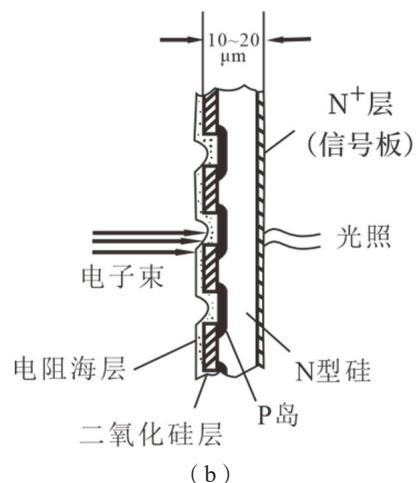


图 2 靶面结构图：(a) 阵列示意；(b) 硅靶的断面结构图

①赵轲、陈德利. 陈真教授访谈录(2025年1月17日, 录音藏于电子科技大学电子科技博物馆)。

②赵轲、王念慈. 成建波教授的访谈(2025年1月22日, 录音藏于电子科技大学电子科技博物馆)。

难题。通过两个特制的环将硅靶夹在中间，再经过组装的弹簧将硅靶安装在这一组环内，既方便拿取，也为装配到视像管上做提前准备，见图4。在后续生产中，研究团队干脆将硅靶片制成硅靶组件，通过弹簧机械固定在讯号环上，同时将芯柱与玻壳封接改作末道工序。并且改进原视像管的排气规范，改成整个管子放入烘箱中排气的热排气规范。

在国家高度重视下，通过跨单位协同与多学科合作，1974年硅靶视像管从靶面到制管工艺终于完成试制。四机部部长王诤两次亲临实验室和工艺线检查，作出工作指示和鼓励。^[17]不仅如此，研制工作还搭建起跨单位“大协同”机制，获得全国超过20家单位的毫无保留地帮助，它们提供了理论、技术的支持，或直接提供零件、材料等。理论学习方面，研究团队派人前往773厂、970厂、741厂、公安部1129所、长春光机所等兄弟单位学习。电真空器件核心部件方面，773厂、741厂、1431所、南开大学、上海电子管三厂、4403厂、五机部208厂等单位，支援了电子枪、零部件和玻璃材料。半导体材料方面，冶金部739厂、740厂、北京化

学试剂总厂、北京化工五厂，提供了单晶硅、碲化镉与光刻胶。流片材料和工艺方面，1424所、970厂、上海无线电五厂、上海冶金研究所，在制光刻掩膜板及衬底制备等方面给予援助。测试工作方面，773厂、741厂、公安部1129所、1431所、上海电子管三厂、中国科学院电子所、南开大学、中国科学院光电技术研究所等，对一批视像管进行了测试，对研制的准确性提供了有效反馈。所以，这场研制实际是在国家统一部署下，全国跨单位多学科协作攻关的自然结果。

3. 攻克难点三：测试评估

难点三在于测试评估。由于成电没有摄像管测试台，试制初期的测试任务主要由773厂承担。而自1975年硅靶视像管开始提供全国使用，性能主要以在工业电视上摄取测试卡图像质量来直观评定，同时也由使用单位的实际效果来直接评定，缺乏全面定量的数据。

当时国内的摄像管测试台分为四种类型。第一类，773厂和1431厂使用的苏制50年代测试台。第二类，741厂、中科院成都光技所、南开大学使用的1974年天津红光无线电厂试制的三台测试台。第三类，公安部1129使用的1978年购置的英国林克公司（LINK）测试台。第四类，长春光机所与上海电子管三厂自制的测试台。但是，这些测试台在光源、测试卡、测试方法与标准等方面均不统一，可测参数也不完整。

1977年至1979年底，冉启钧、凌宝京将12支管子送往以上单位集中测试，主要抽测了其中6支（编号为：7761、79213、5、70922、70073、70951）。1977年5月5日，在四机部于南京召开的“微光摄像管攻关会议”（即7755

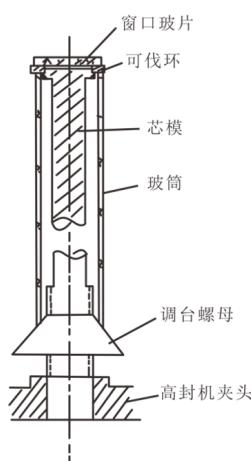


图3 高频封接示意图

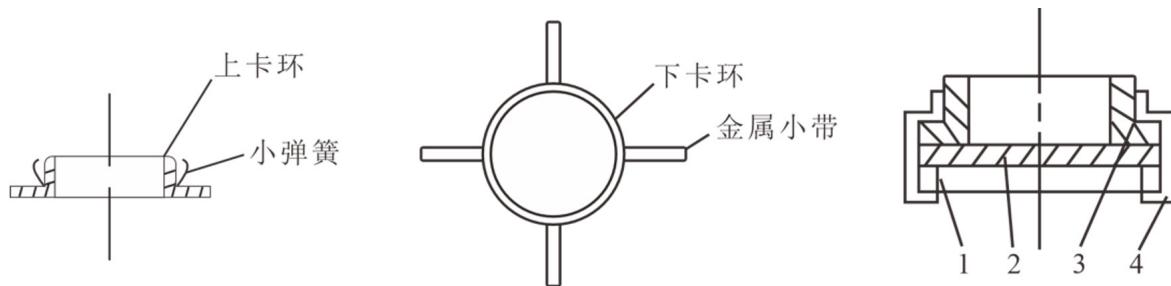


图4 硅靶机械安装方式图

会议)中,还与日本、法国的同类管进行对比测试。1979年底,研究团队分析所有测得数据后发现,各单位所测结果相差甚大。不仅参数绝对数值上差别大,被测试各管的相对关系(相同参数各管排序)也都不统一。研究团队考虑到公安部1129所测试台是当时最新进口的,而773厂生产摄像管历史最久,测试台性能也比较稳定,同时以上两家测试结果也较接近。因此,以在公安部1129所与773厂测得的数据为主,参考在其他单位测得数据以及在南京与法国、日本同类产品比测结果,综合得出客观的技术性能。

灵敏度测试显示,公安部1129所测得结果在 $5082\text{--}6721\mu\text{A}/\lambda\text{m}$,773厂测得 $4590\text{--}7377\mu\text{A}/\lambda\text{m}$,成都光技所数据高达 $7587\text{--}8359\mu\text{A}/\lambda\text{m}$,呈现显著差异。南京六次会议的比测更具说服力,成电管 $4262\mu\text{A}/\lambda\text{m}$ 虽低于国内部分测试值,但仍显著高于法国TH9820管 $3607\mu\text{A}/\lambda\text{m}$,日本管 $3279\mu\text{A}/\lambda\text{m}$ 。因此证实,成电管的灵敏度已达到国际基准线 $4000\mu\text{A}/\lambda\text{m}$,技术参数离散性反映了早期工艺的稳定性问题。

中心分辨率测试中,公安部1129所测得全是500行,773厂数据显示除#79213管(400行)外均为450行,上海电子管三厂与南开的复测确认450-500行较稳定。南京国际比测揭示了一定梯度差距,成电管500行优于日本管450行,但逊于法国管550行。表明中心分辨率可判断为450-500行。

在暗电流方面,靶压为10V时,在1129所测得结果:除#70951管为 22nA ,其余均小于 10nA ;在773厂测得:#70992在17V靶压时是 35nA ,#70073管在13V靶压时是 14nA ,#70951管在6V靶压时是 12nA ,其余是 10nA 以下;在南京比测结果:成电管 $8\text{--}12\text{nA}$,日本管十几 nA ,法国管 8nA ;在南开大学与741厂测的结果是在 $7\text{--}16\text{nA}$ 之间;因此,认为暗电流典型值在 10nA 左右较为可靠。

暗电流特性呈现复杂特征。10V靶压下,1129所多数管暗电流小于 10nA ,唯#70951管异常值 22nA ;773厂测得#70951在6V靶压时

暗电流降至 12nA ,其余均在 10nA 以下。南京比测显示,成电管暗电流($8\text{--}12\text{nA}$)与法国管(8nA)相当,且优于日本管。南开大学与成都光技所测得结果为 $7\text{--}16\text{nA}$,并建立暗电流与靶压关系曲线。多个单位的数据交叉验证,支持典型值 10nA 的可靠性。

靶压动态范围经系统验证达 $7\text{--}60\text{V}$,与荷日法产品指标持平。光电转换特性突出,在 $0.034\text{lx}\text{--}1.134\text{lx}$ 照度范围保持1:33光动态比,分辨率始终大于400行,灰度等级突破7级,能持续保持较好图像。惰性数据无法测出,从实际使用效果看,比国外同类产品大。^[18]

经过多机构联合测试和直接使用评估,成电硅靶视像管属于国内先进水平,多个参数与国外同类产品相当。其灵敏度高、频谱响应宽(在近红外区仍良好工作)、低暗电流等特性,可成功应用于工业电视、红外监控和可视电话系统。

三、成果转化全国广泛应用

1. 提供全国五十多家单位使用

1974年初,成电研发出具有较好性能的硅靶视像管,并在同年8月成都摄像管攻关会议上作了介绍与演示。1975年,王诤要求成电继续研制以解决军用夜视仪器件短缺问题,同时进行硅靶视像管的小批量生产,满足全国急需。1975年底,研究团队开辟了生产线,开始生产提供给全国使用。该生产线的工序由于流程复杂、难度高,无法移交其他单位生产,见图5。

1976年,四机部应使用单位的要求,正式下达成电进行硅靶视像管的小批生产任务。按照产品的性能优劣,分为一级管、二级管、三级管,分别价值3000元、2000元、1000元。全国各单位需开具介绍信到成电,由科技处审批通过后向五系下达生产任务,再按性能等级提供售出。直到1978年底,成电的生产线为630厂、京西电站、齐齐哈尔铁路局、南京邮电学院、六机部717所、中国科学院感光化学研究所、中国医学科学院儿科研究所等五十多家单位,提供了百余只硅靶视像管,见图6。^[19]

2. 应用多领域广泛辐射全国

1976年至1979年，成电研发的硅靶视像管迅速向全国扩散，渗透至国民经济关键领域，激发了自主关键微光夜视器件的多领域应用浪潮。在通信领域，南京邮电学院（现南京邮电大学）使用硅靶视像管率先搭建电视电话系统，用于工矿企业指挥调度，并于1977年广交会展出，被香港《大公报》报道，荣获全国科技大会奖。四机部1934所在基带4M的电视电话摄像部分搭载该管，图像清晰、效果良好。与此同时，中国科学院感光化学研究所与天津电视技术研究所采用该管，于1977年开发出中国首套红外电视监视设备，开创的国内“明室监视暗室”系统，次年登陆全国电子工业展览会。华中工学院（现华中科技大学）则将该管集成到红外显微镜，实现了硅晶圆工艺的缺陷检测，在集成电路工厂、晶体管厂推广使用。陕西机械学院（现西安理工大学）使用该管，进行硅材料缺陷和可控硅初始导通区及开区等离子体扩展探测。

工业安全生产领域，成为硅靶视像管技术落地的主战场。北京石景山发电厂、北京电力

试验研究所、天津气象海洋仪器厂协作，1976年首创高温高压锅炉工业电视监控系统，在30°C~50°C、采光差、强振动环境中，解决了云母水位计成像难题。^[20]广州广播设备厂从1975年开始，采用硅靶视像管工业电视，在轧延厂、水泥厂做过监视试验，效果优良。齐齐哈尔铁路局1977年使用硅靶视像管部署铁路驼峰调车场工业电视监视，降低事故率额的同时减轻工人劳动强度，大大节约电力。该系统还在铁道部电化工程局、哈尔滨铁路局、柳州铁路局等推广应用。

医疗领域的技术移植，更凸显硅靶视像管的社会价值。中国医学科学院儿科研究所1977年采用该管研发的“微循环研究用显微电视”，用于血管微循环观察和测量，应用于门诊。^[21]上海新跃仪表厂耦合该管与八十万倍电子显微镜，供多人同时分析研究。四川省实现国内首次在直线加速器癌治疗设备的监控，降低了医务人员的辐射暴露。

在尖端技术层面，中国科学院上海硅酸盐所1978年基于该管红光敏感特性，研制成QHF-1型全息光存汉字发生器，用于6328A激光全息衍射图像的汉字接收。在军事领域实现夜间观察突破、提升全天候作战能力，一些单位采用该管作电视跟踪、电视制导，做了多次室内外电视跟踪、监视军舰和飞机的试验，用于野外以及岸对海、室对海、地对空、海对空等场景。某单位的海上试验中，在18km距离锁定跟踪48×10×10m³的拖船，性能比肩日本同期装备。某单位的陆上试验，黄昏识别能力可达3500m外的30 cm物体。1978年，彩



图6 成功研制的硅靶视像管

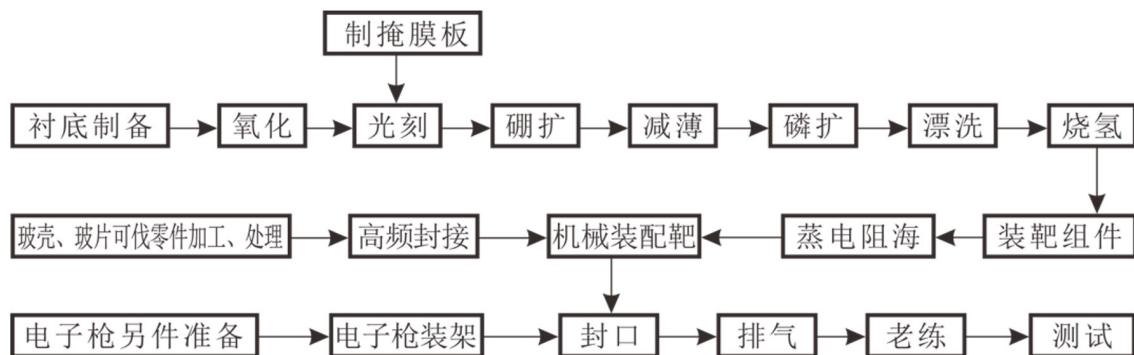


图5 硅靶视像管生产工艺流程

电制式PAL制式的重要贡献者,德律风根公司(Telefunken)专家格哈德·马勒(Gerhard Mahler)^①访问成电,观看硅靶视像管演示时惊叹,一所大学居然能够完成如此复杂的电真空和半导体工艺,并对该管在中国跨领域应用广度表示赞赏。

成电的硅靶视像管广泛应用于电视电话、近红外电视、电视跟踪、电视制导、电化教学、激光技术、医疗事业,以及大型厂矿、车站、水库等低照度条件下的电视摄像等领域,进一步促进多领域发展。

3. 鉴定达到国内先进、国际同步

1980年1月23日至26日,硅靶视像管的成果鉴定会召开。国务院国防工办、四机部科技局、四川省四机局、四川省高教局、四川省电子学会、773厂、公安部1129所、中国科学院长春光机所和成都电讯工程学院等全国24家单位^②50余名代表到成都参加了会议。四机部为此发来贺电并作指示,时任成都电讯工程学院副院长谢立惠致辞,国务院国防工办、四机部科技局等代表在会上讲话。成电裘明信担任组长,4403厂田野总工程师、中国科学院光电技术研究所朱焕文、四机部科技局刘雪梅为副组长。

会上,肖士璋等作了四个研制报告,包括综述、工艺、测试数据分析和使用情况。四家试用单位的代表,对使用测试情况作了报告。

大连仪表元件厂的代表,作了采用成电制靶工艺制管的经验报告。会后,代表们参观了硅靶视像管在工业电视闭路系统的使用和测试,还参观了与四机部联合设计的光纤面板微光摄像管暗室演示。

与会代表认为,成电研制的硅靶视像管性能良好,在国内属于先进水平,在灵敏度、靶压、动态范围等参数方面实现了国际同步,如表1所示。同时,与会代表希望进一步提高质量,降低成本,增加供应数量,继续研究低功率短电子枪摄像管。

除此之外,研究团队在1974年硅靶视像管试制成功后,便以此为基础,立即研制增强型硅靶摄像管。1976年初便试制出样管,达到技术指标,定型为SFW-0型,完成了四机部在1972年下达的任务。1976年初,该管在南海进行观测试验。1977年3月,又进行东海观测试验。1977年11月30日至12月9日,成电与长江航运管理局联合开展“微光电视夜航实验”,使用SWF-0型微光电视作为夜航助航仪器,从上海到南通港实施实验。在1/4月光度下,能发现10 km外狼山及山上庙宇的黑白围墙,能看清1000m处不点灯的小船,辨认能力超过当时夜航7×50望远镜。1977年12月13日至12月15日,在上海天文台徐家汇中星仪观测室进行了“微光电视星空观察联合试验”,在20点至凌晨2点期间,最小可见7等星,6.5等星以

表1 成电研制的硅靶视像管与国际同类产品对比

国别	厂家	型号	灵敏度	靶压值		分辨率	暗电流		时间
				典型	最大		典型	最大	
中国	成电	未定	>4000	8V	60V	450-500	10	20	1979 ^③
荷兰	飞利浦	XQ1400	4000	6-12V	25V	700	10	20	1978
日本	东芝	E5036	4100	10V	50V	500	10		1979

①格哈德·马勒(1931-2019),德国电视技术员,对PAL彩电制式的开发和发行做出重大贡献。PAL彩电制式是全球三大彩色电视标准制式之一。

②组成成果鉴定的全国24家单位:国务院国防工办、四机部科技局、四川省四机局、四川省高教局、四川省电子学会、七七三厂、公安部1129所、中科院长春光机所、1431所、4403厂、五机部二〇五所、大连仪表元件厂、冶金部739厂、970厂、1424所、中科院光电技术研究所、630厂、天津电视研究所、北京电力试验研究所、北京石景山发电厂京西电厂、中国医学院儿科研究所、四机部三所、齐齐哈尔铁路局科学技术研究所和成都电讯工程学院。

③实际研制成功时间为1975年,但因提供给全国各单位使用。经过四年生产制管和广泛使用,于1979年去函征询反馈意见和使用经验。最终于1980年1月完成成果鉴定。于是记录1979为研发时间。

上清晰可见，灵敏度比光电倍增管高10—100倍，比人眼观察高100倍，且使用该系统后天文观测可遥控，便于通过监视器拍照记录或电视录像。

1979年6月后，后续研制的重点转移到新设计的SFW-1型增强型硅靶微光摄像管，并在两年后完成。它具有很高的灵敏度和分辨率，被广泛应用于军事、航运、天文、医学等领域，成为国内最早研制的一种三电极移像段增强型硅靶微光摄像管。这是当时全世界最先进的微光摄像器件，标志着中国在微光摄像器件方面设计和研制能力的新水平。1984年之后，该项目系列成果获得了电子工业部科技进步奖二等奖、四川省科技进步奖三等奖。

结语

20世纪70年代初，面对复杂激烈的国际竞争形势，中国指派研究所和工厂研发关键夜视器件微光摄像管。四机部考虑到直属军工院校成都电讯工程学院具备电真空技术基础，加之成电主动请缨，便向其下达研制任务。成电研究团队攻克三重困难，完成硅靶视像管研制。在核心参数方面实现了国际同步，填补了国内高灵敏度硅靶视象管的空白，为后续进一步研制增强型硅靶摄像管完成关键第一步。成电按四机部指示，迅速建立一条生产工艺线，向全国五十多家单位提供一百多支管子，应用在电视电话、红外技术、工业电视监控等领域，保障了军用、科研和民用的需求。研究团队响应国家需求主动攻关，突破技术难点，快速将科研成果转化成产品，在条件受限时刻实现了一定的工艺创新。

国防战略需求牵引科技迭代，由此诱发科研和民用的更广泛应用。基于电子光学、电子束管和半导体的硅靶视像管研制，源于激烈的国际竞争形势导致的国防对微光夜视技术的急需。彼时，国防需求是科技快速迭代的牵引力，初期这股牵引力打破结构桎梏，突破条件束缚，促成多方合作，促使研制工作迅速走上快车道。无论快速迭代过程中是否出现不利局面，但从

长远来看，科技迭代引起创新扩散的过程，本身便会培养大量人才、提供技术储备，从而更广泛地应用在计划外领域。具备基础条件后，关键元器件所在的电子工业领域发展，突破理论先行的传统，尽快动手生产实践才能完成最终研制。

科技创新由单一趋向多元，更需要多单位多学科协同攻关完成。全国多家单位“大协作”、校内多个团队“小协作”模式，为研制提供了肥沃土壤和宽松空间。单一到多元的微小技术改进，汇聚成代际突破。一方面，细微正是不竭换代的内驱因子。硅靶视像管的研制，并没有过多理论层面的突破与跃迁，重点在技术层面的改进、材料的替换、工艺的尝试，甚至有时还需人的手动与机械化自动这种“古老的”协同。另一方面，微小的尝试由最初的电子束管单一领域，延伸到光电子学、半导体、化学、机械等多元协同。不断大胆尝试、持续创造微小改进，往往可能突破单一领域的瓶颈，纵深发展为多元方向融合协同，促成系统级的革命性创新。这种国家战略牵引、响应科技和工业动态需求的多元协同式创新，会应用到更广泛的领域，产生更长远的影响，或许可为我国当下某些“卡脖子”领域的突破提供一定借鉴。

〔参考文献〕

- [1] 艾克聪. 微光夜视技术的进展与展望 [J]. 应用光学, 2006, 27 (4) : 303—307.
- [2] 佚名. 侵越美军所用微光器件及红外光器件 [J]. 发光学报, 1971, (4) : 9—10.
- [3] 于学驷. “二四会战”——中国军工的第一次坦克科研大协作 [J]. 兵器, 2017, (2) : 4.
- [4] 王军. 中国下马主战坦克型号内幕试金石 [J]. 国际展望, 2005, (23) : 6.
- [5] 佚名. 科技之“眼”化夜为昼——夜视技术在军事上的应用 [J]. 中国民兵, 2001, (2) : 2.
- [6] 周立伟. 夜视技术的现状与发展前景 [J]. 半导体光电, 1985, (1) : 3—25.
- [7] 冯炽熹. 夜视成像器件及其整机的发展 (一) [J]. 红外技术, 1983, (6) : 1.
- [8] De Haan, E. F. 'The "Plumbicon", A New Television Camera Tube' [J]. Philips Technical Review, 1963, 24(2): 57—58.

- [9] Crowell, m. H., Labuda, E. F. 'The Silicon Diode Array Camera Tube' [J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, 48(5): 1481-528.
- [10] 王文祥. 真空电子器件 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012, 232-234.
- [11] Via, D. L., Rejan, W. A. *History of Army Communications and Electronics at Fortmonmouth, New Jersey, 1917-2007* [M]. Washington: Government Printing Office, 2010.
- [12] 孔凡清、将言、王丽琴. 道是无情却有情: 我国WZ132轻型坦克的研制过程与特点 [J]. 坦克装甲车辆, 2006, (1): 5-6.
- [13] 李斌. 吴祖培: 点亮中国自主创新第一盏“灯” [N]. 中国科学报, 2015-02-06 (3).
- [14] 成都电讯工程学院. 安·阿·日喀略夫专家卡片 [Z]. 成都: 电子科技大学档案馆, 1964.
- [15] 电子科技大学党委宣传部. 中国半导体功率器件领路人: 中国科学院院士陈星弼传略 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2010, 42
- [16] 成都电讯工程学院显示专业. 视像管研制动态 [J]. 电子技术应用, 1977, (3): 44-48.
- [17] 成都电学工程学院502教研室. 硅靶视像管研制报告(一) 综述 [Z]. 成都: 电子科技大学档案馆, 1980.
- [18] 成都电讯工程学院502教研室. 硅靶视像管研制报告(三) 测试数据分析 [Z]. 成都: 电子科技大学档案馆, 1980.
- [19] 成都电讯工程学院502教研室. 硅靶视像管研制报告(四) 使用情况报告 [Z]. 成都: 电子科技大学档案馆, 1980.
- [20] 石景山发电厂京西电站、北京电力试验研究所. 用工业电视监视大型机组的运行 [J]. 中国电力, 1979, (4): 28-29.
- [21] 张叔伦、马连华、王石筠. 微循环研究用显微电视装置 [J]. 中国医学科学院学报, 1979, (1): 97-99; 107.

[责任编辑 王大明 柯遵科]