

低温电子学问答

谢方金 编

电子工业出版社



低温电子学问答

谢方金 编

电子工业出版社

内 容 提 要

低温电子学是电子科学繁花丛中的一株新蕾。它以自己的特异性吸引着电子系统工程者。本书以非低温超导专业的电子工程技术人员、应用物理科技人员、技术管理干部、情报人员等为阅读对象，系统介绍该科学的基本概念，历史发展线索，低温器件物理知识，工程应用概况和技术竞争趋势。对从事低噪声电子技术、红外技术、应用物理、低温机械、宇航和计量科学等专业的广大科技人员、技术管理干部以及对该学科有兴趣的人员，该书起入门引导和技术渗透作用。

低温电子学问答

谢方金 编

责任编辑 龚兰方

★

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

※

开本：787×1092毫米1/32 印张：7.75 字数：154千字

1987年8月第1版 1987年3月第1次印刷

印数：1—3000册 定价：1.60元

统一书号：15290.441

前 言

为使更多同志，特别是非低温超导专业人员，了解“低温电子学”这门新学科，我们尝试以“问答”形式，浅近的语言，介绍该领域的有关知识。鉴于该学科新、知识面广、有关术语定义、概念，在国内外迄今尚不一致，因此，文中所述，必有争议之处。若能由此而引起兴趣者们的讨论，活跃该学科的学术气氛，以对学科知识有更全面、深刻的理解，亦是笔者所期望的。

本“问答”共分四部分：一、低温电子学总论；二、低温电子技术；三、超导电子学；四、低温电子系统制冷。明确学科基本概念，提供低温器件物理知识，促进国内工程应用发展，展现先进技术竞争趋势，是“问答”选题与材料取舍立足点。

本“问答”编写中，《低温与超导》编辑部罗美富同志参加了选题和部分编写；南京大学吴培亨、杨森祖老师，复旦大学张开达老师，对第一部分内容和某些概念、术语给予了有益讨论；北京大学崔广霁老师对选题、布局和文字内容的修改给予了具体指导。在此，笔者顺致感谢。

攻战在各专业课题的同志，各具有自己的专长与经验。笔者的工作，意将低温电子学科前沿的最新攻坚成果汇集一处。本“问答”若能为工程系统的总体构思起开迪思路之功或在新技术综合应用中起技术渗透之效，即已达到情报文稿编写的最高目的。

谢 方 金

1984年11月

目 录

第一部分 低温电子学总论	(1)
1.1 什么叫低温电子学?	(1)
1.2 低温电子学研究的内容包括哪些方面?	(2)
1.3 “低温”系指什么样的温度范围?	(3)
1.4 低温下固体的电子学特性主要有哪些?	(4)
1.5 从整机系统看,电子技术利用低温有哪些好处? 亦会带来什么样的弊病?	(5)
1.6 什么叫超导电子学?它已用在哪些领域?	(8)
1.7 低温电子系统制冷有何特点?其发展趋势怎样?	(9)
第二部分 低温电子技术	(12)
2.1 在低噪声微波接收机中,常被选用的低噪声零 部件有哪些?	(12)
2.2 低噪声微波场效应晶体管(FET)的现状如何? 对其低温冷却特性已进行了哪些研究?	(16)
2.3 低噪声混频二极管的发展近况怎样?低温冷却 能明显改善它的噪声性能吗?	(22)
2.4 如何测量微波接收机中的微弱噪声信号?在微 波计量的四大标准中,低温超导技术有哪 些应用?	(31)
2.5 电子元件的电学特性在低温下有何变化?适宜 于低温下工作的电阻器和电容器有哪些?	(36)
2.6 一块普通印制线路板,能直接插入 低温液体中吗?	(39)
2.7 半导体在低温下还能导电吗?适合于低温下	

	工作的半导体材料有哪些?	(40)
2.8	低温下二极管的特性有何变化? 隧道二极管的 导电性能为什么很少受温度影响?	(48)
2.9	低噪声电子线路的设计, 需要考虑哪些问题?	(50)
2.10	为什么远红外器件的发展总是离不开低温技术? 低温给红外技术带来哪些好处?	(56)
2.11	什么是低温真空泵? 为何集成电路制造厂商对 此很感兴趣?	(60)
第三部分 超导电子学		(70)
3.1	什么是约瑟夫森效应? 它对科学技术的发展 有何重大影响?	(70)
3.2	SQUID是什么器件? 它有哪些重要应用?	(77)
3.3	地球物理学家对SQUID磁力仪为何很感兴趣? SQUID在空间技术与基础物理研究中有何 出色应用?	(84)
3.4	SQUID在生物磁学研究中有何重要作用? 低温 给生物医学带来哪些福音?	(93)
3.5	超导电子器件有哪些种类? 卫星电子仪器能全 超导集成化吗?	(97)
3.6	在毫米波与远红外技术中, 超导器件有多大竞 争能力?	(102)
3.7	雷达系统能采用超导技术吗? 超导在国防中还 有何应用?	(110)
3.8	什么是准粒子与准粒子器件? SIS 准粒子混频 器接收机的噪声有多低?	(115)
3.9	超导在电学标准中有何重要应用? 约瑟夫森效 应的发现给计量科学带来一场深刻革命 吗?	(121)

- 3.10 美国IBM公司为什么要搞超导计算机? 这项工
程对超导技术和微科学的发展有何重大影
响?(126)
- 3.11 超导谐振器的Q值能达多高? 它有哪些出色应
用?(137)
- 3.12 什么是光敏约瑟夫森结? 它在计算机和光电子
学中很有用吗?(142)
- 3.13 电子学用超导材料有何特点? 高温约瑟夫森器
件及其电路何日上市?(145)
- 3.14 中、小超导磁体在电子工业和空间技术中有何
重要用途?(156)
- 3.15 超导能使极低频/甚低频天线小型化吗? 它在海
军装备中有哪些应用?(160)
- 3.16 有超导通讯电缆、超导高速脉冲信号传输线和
延迟线吗? 超导变压器为何能变换直流功
率?(164)
- 3.17 何谓细微加工技术? 制造超导电子器件要用到
它吗?(166)

第四部分 低温电子系统制冷.....(170)

- 4.1 在开发低温禁区中, 制冷技术有哪些重大发
展? 如何从温度观点来选择制冷方法?(170)
- 4.2 针对低温电子系统制冷问题, 低温专家们已作
了哪些重要努力?(175)
- 4.3 制冷系统如何分类? 电子系统工程应如何选择
制冷类型?(180)
- 4.4 超导电子系统制冷有何特点? 研制高效大容积
杜瓦和小型/微型制冷机是发展方向吗?(187)
- 4.5 何谓斯特林制冷机? 为什么空间技术与军用部

门对它特别重视?	(195)
4.6 为什么卫星地面站多用G-M制冷机? 而航天飞	
行器对VM制冷机特别热乎?	(207)
4.7 微型制冷机有多微?它是用光刻工艺制造的吗?.....	(211)
4.8 什么是磁制冷机? 长于技术竞争的日本为何对	
此抓住不放?	(214)
附录 I	(219)
一、周期表中的超导元素及其临界温度 T_c 、临界磁场	
H_c 的数值	(219)
二、低温液化气体的性质, 液氮、液氮的物理性能	(222)
三、摄氏温度、绝对温度、华氏温度、兰金温度换算	
表	(224)
四、低温电子工程书刊介绍	(225)
附录 II	(227)
低温电子工程用产品简介	(227)
一、小型/微型低温制冷机	(227)
二、中、小型低温容器	(235)
三、SQUID类电子仪器	(238)

第一部分 低温电子学总论

1.1 什么叫低温电子学?

低温电子学是基于低温下固体超导现象及其它一些特殊现象而发展起来的一门新兴电子科学。

随着无线电电子学和微电子学工艺技术的发展,今天,在电子技术某些方面,已面临着一种必须依靠低温才能解决问题的趋势。低温电子学单独作为一学科问世,主要由下述两因素促成:(1)1958年美国林肯实验室首次利用低温低噪声微波固体量子放大器,检测到从金星反射回来的信号,自此,凡在宇宙通讯、卫星通讯或遥感等特殊用途中,低温低噪声的微波接收机、低温红外探测器等渐受重视。(2)1962年英国剑桥大学的研究生约瑟夫森发现超导隧道效应,基于此效应而制作的各类超导元件很快在基础理论研究和实际应用中显露出锋芒,并诞生了超导电子学这门边缘科学。今天,低温电子学的新分枝——超导电子学,活跃于各先进技术领域,为低温电子学这颗新蕾大增异彩。可以认为,低温电子学形成于六十年代,发展于七十年代,现在已是它大放光彩之日了。

低温电子学并非是低温的制冷技术加上现有电子技术的简单机械结合。它研究的是低温固体的若干崭新电子运动现象,这些现象揭示了冷凝物质内部深刻的量子特性。低温环

境的提供仅是保证电子器件低温工作的基本条件，低温下的低噪声特性也仅仅只是低温固体大量崭新现象之一，低温电子学所涉及的内容要比这广泛得多。

这门年轻而又古老的科学，溯其源可追寻到1911年翁纳斯发现超导现象算起。但是，由于超导现象长期不被理解，固体电子运动现象未被充分研究，加之电子技术和微电子学工艺跟不上等原因，致使在六十年代以前，尽管也有诸如冷子管之类的超导电子器件问世，但其发展甚缓。自1955年以后，因低温物理研究取得若干重大成果，从而构筑起了低温电子学的理论基础；半导体工艺技术的发展又为它提供了充足的技术条件；低噪声微波接收机、超导电子器件和量子放大器等的应用，更刺激了这门科学的发展。因而，自六十年代这门学科创建开始，仅隔十年时间，它已在各先进仪器和特殊使命的应用中受到重用。今天，是它应占自己位置的时候了！

1.2 低温电子学研究的内容包括哪些方面

依据1.1题有关低温电子学的定义和目前发展状况看，低温电子学研究的内容，可概括为三个大的方面：

（1）低温电子技术。这主要有：低温低噪声微波接收技术（参量放大器、微波固体量子放大器、微波场效应晶体管放大器、低温混频器、低温铁氧体装置、低温振荡器、低温馈电装置等）；低温低噪声电子线路；低温低噪红外探测技术；低温噪声源及测量技术等。这部分内容，总的看来基本理论已臻成熟，有关物理效应及电子运动现象已被广泛研究，但工程应用中的大量技术问题尚待解决。

(2) 超导电子学。凡与超导现象有关的电子器件应用均属此范畴。这类应用,为与强电技术区别,在超导电技术中被列为弱电器件类。约瑟夫森器件是超导电子学的最基本元件,约瑟夫森效应和射频超导电基础是其应用的最基本理论。由超导电子元件组成的各类性能特异的电子仪表、接收整机等,即形成了繁花锦簇的各类超导电子学应用。今天,超导电子学已成了超导领域中的一颗明珠,在各先进技术和边缘学科中备受重视。

(3) 低温电子系统制冷及其它技术。低温电子技术依据目前工艺技术,可向微型化和集成化的方向发展,超导电子器件利用薄膜技术也可以作得更紧凑,体积更小,但目前的低温机械往往重量沉、体积大、与电子系统不相匹配。为此,低温电子系统特别要求重量轻、体积小、寿命长、振动小、工作稳定、结构紧凑以及能抗电磁干扰的小型 and 微型制冷机。为此目的,必须在制冷原理、材料、结构、工艺等问题上有重大的、关键性的突破。否则,低温电子学只能限于实验室和大型地面站应用。欲加以推广,特别是用于实战军事目的,困难和麻烦就太多了。

1.3 “低温”系指什么样的温度范围?

在广阔的温度世界中,“低温”二字在不同时期、不同领域有过不同的含义。目前通常指80K以下的温度区域。这段温区,一般又称作“深冷区”。而对200K到80K,在制冷行业中称其为“普冷区”。普冷技术在商品冷冻方面用得较多,而深冷技术目前发展很快,其应用正被各部门大力开拓。低温电子学亦属此发掘之列。在深冷区,从实用看,又

以三种常用的低温液体附近的温度用得最多：液氮(77K)、液氢(20K)、液氦(4.2K)。在实验室里，为测试低温电子器件和超导电子器件的性能，常在液氮、液氦的环境中进行，故实验数据以77K和4.2K温度点出现最多。

“低温”的英文字头“cryo-”，源出于希腊语“kryo-”，意“冰、冻”之意。“cryo-”最早见于1875年，但在1955年以后才在低温行业中出现。特别是1960年门德尔森博士主办“Cryogenics”(低温学)杂志之后，Low temperature(低温)一词就逐渐让位于“cryo-”。本来，“cryo-”原指 -100°C 以下的温度区域，但由于深冷技术的发展，大量实际应用多在200K以下的深冷区，故“cryo-”词头又常指深冷区的有关低温应用或物品。例如，Cryoelectronics(低温电子学)、Cryostat(低温恒温器)、Cryophysics(低温物理学)、Cryopump(低温泵)……。

1.4 低温下固体的电子学特性主要有哪些？

我们这里主要叙述低温下固体的电子学特性，而对电气特性提及相对较少。固体材料的电子学特性，大体可分为两类；

第一类：用于普通电子学中，但在低温条件下可改善其电子和量子特性。例如：降低温度后，材料的电阻率减小；绝缘介质的击穿电压提高，正切损耗减小；半导体的迁移率 μ 值增加；各种元器件的热噪声降低；材料的原子扩散、化学活性减弱，……。低温有获利的一面，但也带来若干弊病：冷变形有时使无线电元件遭到严重破坏；半导体器件不能正常工作（非低温专用器件）等。

第二类：固体在深低温下才呈现出某些崭新的量子特性。兹列表于下：

低温固体	金属	超导电效应；
		冷却金属的量子振荡；
		低居里点材料的铁磁现象；
	半导体	低温半导体材料的高电子迁移率； 过冷半导体内冲击电离； 半金属向半导体的低温过渡；
	绝缘体：晶体的低温铁电现象。	

目前，低温电子技术主要利用第一类固体材料特性，其中，又以利用热噪声随温度降低而降低的特性来改善电子器件的噪声性能为最多。第二类材料特性，以超导电效应研究得最多、应用也最广泛。其它若干效应或现象，低温物理学家们正在研究发掘之中。

1.5 从整机系统看，电子技术利用低温有哪些好处？亦会带来什么样的弊病？

不少电子工程的总体设计师，把“低温”与“包袱”等同视之。低温在给电子系统带来低噪声等好处的同时，却也增添了不少弊病：系统费用增多、维修操作不便、寿命将与低温机械同龄等。如何从整机系统看待低温的利与弊，可从下述三方面来分析：

第一：低温的利用大大提高了电子系统的灵敏度，增加了接收机的作用距离，使宇宙与卫星通信得以顺利进行。例如，在微波接收机中一旦利用了低温半导体器件放大器，或固体微波量子放大器时，接收机的噪声特性将会明显改善。

图1-1给出了各类微波装置的噪声——频率关系。今天，借助低温低噪声微波接收技术，我们已能接收到土星、甚至海王星反射回来的微波信号，作用距离达2869百万公里之遥。因此，在特殊用途时，低温将大显身手，“包袱”二字早已淡漠。因为总体师们只此一技，别无它法。但是，此种技术尽管在电子系统中只有一、二、三件低温部件采用，也会带来费用增加、维修困难等弊病。故在考虑问题时，凡能从其它方面解决问题时（如提高卫星应答机的发射功率），便不从低温角度解决；凡能普冷见效者（如用体积小、重量轻、寿命长且工作稳定可靠的半导体热电制冷），就不要采用深冷，即使系统灵敏度稍差些也应如此。

第二：为开辟电磁波谱新频段，当采用固体微波量子放大器、远红外探测器等量子电子器件时，低温是保证器件正常工作的必要条件。例如，在毫米波频段性能仍然很好的微波量子放大器，其心脏元件红宝石必须工作在4.2K的低温。这时，低温犹如给红宝石内的电子运动提供一个大好晴天，一旦有目标信号作用时，我们就能明察信号所激发的电子运动的能级跃迁。而在常温环境呢？须知， T_{300K} 产生的热激发能约为0.03eV，这是一份不小的能量（是微波电磁振子 h/f （ $f=20GHz$ ）的四百倍），这将使红宝石内的电子都进行无规则的热激发跃迁，即目标信号早已湮没于热噪声之中了。对远红外频段的光电探测器来说，低温亦必不可少。例如，欲探测40 μ 峰值波长的信号，按经典的维恩位移定律，目标信号即与一个72K左右的辐射体相当。因此，这类光电探测器，其一必须工作在低于72K的低温环境；其二是一定要采用掺杂的光导半导体器件（ T_{72K} 产生的热激发能约为0.007eV，本征

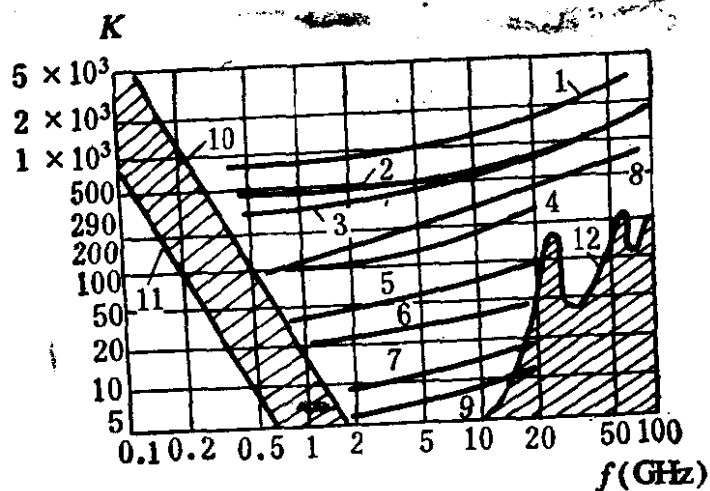


图1-1 银河系、大气层和各类无线电接收机
1975年的等效噪声温度与频率的关系
1. 常温混频器；2. 低温混频器
(77K)；3. 隧道二极管放 大器；
4. 常温参量放大器；5. 77K 冷
参；6. 20K冷参；7. 4.2K冷参；
8. 4.2K 混频器；9. 量子放
大器；10. 银河系中心；11. 银河系
边缘；12. 大气吸收层

材料能隙远比这大得多！)。

在开辟新频段的应用中，低温是保证器件正常工作的必要条件，与此同时，电子系统亦将获得低温低噪声的好处。目前，若无其它器件可选择时，必须、也只能来背这个低温“包袱”，非如此便不能获得更优异的总体性能。

第三：超导电效应是仅在深低温度下（约4K）才呈现的量子效应。凡属超导电子器件应用者，毫不例外地需要低温条件。超导技术带来的显著的优越性能，已远远大于低温带来的弊病。目前，这方面的应用正从实验室迈向工程应用。可以期望，随着低温技术的发展，各类可靠、长寿、高效的制冷装置将陆续问世，特别是在重量和体积上将有显著改

善。超导电子技术大量进入工程应用为时不太远了。

需特别提及一下，超导电子学对计量科学产生的影响，有人曾把它同激光技术相提并论：两者共同给计量科学带来一场深刻革命。只不过后者是在长度和时间方面；而前者是在电学计量标准中。目前，用约瑟夫森效应监视电压基准，几乎在所有工业大国都已建立，而且精度可提高到 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{V}$ （比电池原基准提高两个数量级）；SQUID 磁场仪，可测到 1×10^{-15} 特斯拉的微弱磁场；利用SQUID测量小电压，精度可达 $1 \times 10^{-15} \text{V}$ ；SQUID 的超导电流比较仪，准确度可达 1×10^{-9} ；另外，在射频电压、电流、功率、衰减以及红外频谱的测量中，亦做出了成功的尝试。总的看来，超导电子学在计量科学中的应用较成功，超导技术之长发挥得较充分，而低温之短迴避得较好（实验室，且短暂应用！）。与此类似的应用领域应尽力发掘。

1.6 什么叫超导电子学？它已用在哪些领域？

超导电子学建立在低温下固体超导电效应基础上而发展起来的一门新兴电子科学。按日本学者大塚太一郎的观点，超导电应该包括三大基本效应：零电阻效应；迈斯纳抗磁效应及磁通量子化效应。这些基本效应连同超导隧道效应和射频超导电性，共同构成了这门应用科学的理论基础。从某种意义上讲，超导器件与半导体器件犹如一对孪生姐妹。从其发展史看，巴丁既是晶体管之父，又是超导理论的创建者；从器件的特性看，它们之间存在着大量的相似对偶关系；从制造工艺技术看，前者沿袭或借用后者，只不过对细微加工技术提出了更高的要求而已；从其应用看，超导器件组成的各类

先进仪器，将把电子技术推到一个崭新的领域。

目前，超导电子器件除用在基础物理研究方面外，还在下述四大方面的应用研究比较活跃：（1）计量科学中电磁标准研究（ $2e/h$ 的约瑟夫森测定、约瑟夫森效应监视国家电压基准、超导磁悬浮建立绝对安培、超导高 Q 腔体稳频……）；

（2）高速计算机（约瑟夫森元件的低耗、高速响应，SQUID的固有数字特性）；（3）弱电（ 10^{-15}V ）、弱磁（ 10^{-15} 特斯拉）测量，特别是SQUID器件的各类应用；（4）高频信号的检测和混频。上述应用中，（1）的效果最显著，（3）的研究最活跃，当前也最受重视，（2）的争论较多，（4）的应用前景广阔，但目前困难较多。有关这四方面的详细介绍，将在本“问答”的第三部分给出。

如果从超导隧道效应发现的1962年算起，超导电子学的问世和发展迄今已20多年。今天，它已成为超导技术中的一颗明珠，在低温电子学范围内，亦是最大的分支。在各技术领域应用中，尽管它也背深低温“包袱”，但它却以特异的性能胜过竞争者。比较而言，超导电子学较之于超导磁体等大功率应用，花钱少而效果显著。故其发展速度较快。

1.7 低温电子系统制冷有何特点？其发展趋势怎样？

从目前已达实用的角度看，低温电子系统主要指：低温冷却的红外探测系统、低温参量放大器、低温微波固体量子放大器、低温混频器、低温电子线路、低温冷却场效应晶体管放大器，各类超导仪表、整机（SQUID磁力仪、磁化率测量仪、超导计算机和约瑟夫森电压基准）等。低温电子系统的冷却问题，有其通用性的一面，更有自己独特要求。