



中华人民共和国国家标准

GB/T 39722—2020/IEC 61788-22-1:2017

超导电子器件 传感器和探测器通用规范

Superconducting electronic devices—
Generic specification for sensors and detectors

(IEC 61788-22-1:2017, Superconductivity—Part 22-1: Superconducting
electronic devices—Generic specification for sensors and detectors, IDT)

2020-12-14 发布

2021-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	4
5 术语和分类	4
5.1 术语	4
5.2 分类	7
6 低温工作条件	8
7 标记	8
7.1 器件识别	8
7.2 包装	8
8 测试和测量步骤	8
附录 A (资料性附录) 相干探测	9
A.1 超导热电子测辐射热计(SHEB)类型	9
A.2 超导隧道结(STJ)类型	10
A.3 超导量子干涉器件(SQUID)类型	10
附录 B (资料性附录) 直接探测	12
B.1 金属磁热量计(MMC)类型	12
B.2 微波动态电感(MKI)类型	12
B.3 超导带线(SS)类型	13
B.4 超导隧道结(STJ)类型	14
B.5 转变边传感器(TES)类型	15
附录 C (规范性附录) 设备和图表用图形符号	17
C.1 超导区域,单端超导连接	17
C.2 超导区域,单端常导连接	17
C.3 正常态-超导态边界	17
C.4 一种变形的连接形式	17
C.5 约瑟夫森结	18
参考文献	19
图 A.1 SHEB 混频器	9

图 A.2	STJ 混频器	10
图 A.3	直流 SQUID	11
图 B.1	MMC 探测器	12
图 B.2	MKI 探测器	13
图 B.3	SS 探测器	14
图 B.4	STJ 探测器	15
图 B.5	TES 探测器	16
图 C.1	超导区域,单端超导连接	17
图 C.2	超导区域,单端常导连接	17
图 C.3	超导区域,一端超导连接和一端常导连接(正常态-超导态边界, 见 IEC 60417-6370:2016-09)	17
图 C.4	串联连接	18
图 C.5	超导区域,两端超导由非常小的非超导区域连接(约瑟夫森结, 见 IEC 60417-6371:2016-09)	18
表 1	被测量	4
表 2	被测量的分类	5
表 3	超导传感器和探测器命名法:类型、全称和英文缩写范例	6
表 4	探测原理分类	7

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用翻译法等同采用 IEC 61788-22-1:2017《超导电性 第 22-1 部分:超导电子器件 传感器和探测器通用规范》。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下:

- GB/T 2987 电子管参数符号 (IEC 60027 (all parts), NEQ)
- GB/T 2900.100—2017 电工术语 超导电性 (IEC 60050-815:2015, IDT)
- GB 3100—1993 国际单位制及应用 (ISO 1000:1992, EQV)
- GB/T 4728(所有部分) 电气简图用图形符号 [IEC 60617]
- GB/T 5465(所有部分) 电气设备用图形符号 第 1 部分:概述与分类 (IEC 60417)
- GB/T 16273(所有部分) 设备用图形符号 第 1 部分:通用符号 (ISO 7000)

本标准做了下列编辑性修改:

- 将标准名称修改为《超导电子器件 传感器和探测器通用规范》。
- 在 5.2 下增加了一个注释对“相干检测”做出说明。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国科学院提出。

本标准由全国超导标准化技术委员会(SAC/TC 265)归口。

本标准起草单位:浙江赋同科技有限公司、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国科学院物理研究所、南京大学、南开大学。

本标准主要起草人:尤立星、李洁、张彩虹、张国峰、季鲁、杨晓燕。

引 言

超导特性如超导能隙、窄超导态-正常态转变、非线性电流-电压曲线、超导相干态、磁通量子化等，会受到电磁场、光子、离子等的影响。利用这些不同超导特性已研发出多种超导传感器和探测器。它们在能量分辨、时间响应、噪声特性等方面具有其他非超导器件难以实现的极高性能。

“传感器”一词通常是指用来测量静态或缓变电磁场、电流和温度等物理量的器件或装置。而“探测器”则通常是指对单量子状态进行观测和记录的装置，例如从红外到 γ 射线的光子、单粒子等。但是，“传感器”与“探测器”之间的边界是模糊的。因此，在本文档中两个词都会用到。另外，将传感器用于探测器也是可行的，例如将超导转变边传感器(TES)用于X射线探测器，通过测量由被测量能量累积导致的温升实现探测。因此，在本标准中用术语“超导转变边传感器X射线探测器”来表示利用TES实现X射线探测的器件或装置。

超导传感器和探测器已应用于很多领域，包括医学诊断、通讯、矿产勘测、天文仪器、量子信息处理以及分析仪器等。对用户而言，目前缺乏统一的相关专业术语、图例符号和测试方法等的规范，因此很有必要建立统一的标准化文件。

超导电子器件 传感器和探测器通用规范

1 范围

本标准给出了超导传感器和探测器的通用规范,这些是 IEC 61788 其他部分中对各种类型传感器和探测器的规范的基础。所述传感器和探测器主要由超导材料组成并依赖于超导或相关现象。被测目标(物理量)包括磁场、电磁波、不同能量光子、电子、粒子、 α 粒子及其他。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60027(所有部分) 电子管参数符号 (Letter symbols to be used in electrical technology)

IEC 60050-815 国际电工词汇 第 815 部分:超导电性 (International Electrotechnical Vocabulary—Part 815: Superconductivity)

IEC 60417 电气设备用图形符号 [Graphical symbols for use on equipment (见: <http://www.graphicalsymbols.org>)]

IEC 60617 电气简图用图形符号 [Graphical symbols for diagrams (见: <http://std.iec.ch/iec60617>)]

ISO 1000 国际单位制及应用 (SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units)

ISO 7000 设备用图形符号 收录符号 [Graphical symbols for use on equipment—Registered symbols (见: <http://www.graphical-symbols.info>)]

3 术语和定义

IEC 60050-815 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

以下是 ISO 和 IEC 维护的用于标准化工作的术语库网址。

- IEC 电工百科: <http://www.electropedia.org/>
- ISO 在线浏览平台: <http://www.iso.org/obp>

3.1

附加正反馈 additional positive feedback; APF

利用电阻和 SQUID 环耦合线圈来提高电压-磁通变换率的方法。

3.2

临界电流调制系数 critical current modulation parameter

β_L

对于直流 SQUID, $\beta_L = 2LI_c/\Phi_0$, 其中 L 为 SQUID 的垫圈电感, I_c 为约瑟夫森结临界电流, Φ_0 是磁通量子;对于交流 SQUID, $\beta_L = 2\pi LI_c/\Phi_0$ 。

注: 本系数也可称为“屏蔽系数”。

3.3

回滞系数 **Stewart-McCumber parameter**

β_C

$\beta_C = 2\pi I_c R_n^2 C / \Phi_0$, 其中 R_n 为约瑟夫森结正常态电阻, C 是约瑟夫森结电容。

3.4

桥结 **bridge junction**

通过小截面超导桥连接两块超导体形成的结。

注: 也可称作“微桥”。

3.5

临界电流 **critical current**

I_c

在超导体或约瑟夫森结中, 可视为几乎是无阻流动的最大直流电流。

注: 改写 IEC 60050-815:2015, 定义 815-12-01。

3.6

临界电流密度 **critical current density**

J_c

临界电流除以流经超导体或约瑟夫森结的横截面积。

注: 改写 IEC 60050-815:2015, 定义 815-12-03。

3.7

反馈线圈 **feedback coil**

在磁通锁定环(FLL)模式下, 与 SQUID 感性耦合的线圈。

3.8

磁通锁定环 **flux locked loop; FLL**

通过负反馈来保持 SQUID 环中的磁通量恒定来提高 SQUID 线性度和动态范围的方法。

3.9

梯度计 **gradiometer**

耦合到一个 SQUID 磁强计的超导环路结构或多个 SQUID 磁强计组成的结构, 仅对梯度磁场敏感或不对均匀磁场敏感。

3.10

金属磁热量探测器 **metallic magnetic calorimetric detector**

一种通过检测金属吸收体磁化强度变化来测量其温升的超导器件, 这种变化源于被测量导致的器件能量累积。

3.11

微波动态电感探测器 **microwave kinetic inductance detector**

一种检测超导带线微波表面阻抗变化的超导器件, 这种变化源于被测量导致的器件能量累积。

3.12

正常态电阻 **normal state resistance**

处于正常态下的超导体或约瑟夫森结电阻。

注 1: 对于超导体或 TES, 该电阻对应略高于超导转变温度时的电阻。

注 2: 对于约瑟夫森结, 该电阻对应于偏置电压远高于 $2\Delta/e$ 时的隧道电阻。

3.13

平面梯度计 **planar gradiometer**

一种与 SQUID 耦合的磁通探测环路, 用于测量与检测环路共平面的梯度磁场。

3.14

准粒子 quasiparticle

通过破坏超导体中库珀对而形成的具有电子和空穴融合性质的一种激发态。

3.15

超导热电子测辐射混频器 superconducting hot electron bolometric mixer

一种通过检测超导微桥电阻的变化来实现测量辐射能量的外差混频式超导器件,这种变化源于被测量导致的器件能量累积。

3.16

超导量子干涉器件传感器 superconducting quantum interference device sensor

SQUID 传感器 SQUID sensor

一种利用包含一个或多个约瑟夫森结的闭环电路中的量子干涉效应的超导器件。

注:凡是能变换为穿过超导结构的磁通的被测量,例如磁场或电流,都可以利用 SQUID 进行探测。

3.17

SQUID 阵列 SQUID array; SQA

一种由多个 SQUID 以串联和/或并联阵列形式组成的器件。

3.18

纳米 SQUID nano-SQUID

最大环路尺寸一般不超过 500 nm 的 SQUID。

3.19

SQUID 环 SQUID ring

包含一个或多个约瑟夫森结的多重超导结构。

注:也可称作“SQUID loop”。

3.20

SQUID 放大器 SQUID amplifier

利用单个 SQUID、SQUID 阵列或其他基于 SQUID 的电流传感器电路组成的电流-电压转换器。

3.21

亚能隙区域 subgap region

位于隧道结 I - V 回滞曲线的底部分支上,该区域电压小于 2Δ 。

3.22

亚能隙电流 subgap current

隧道结在亚能隙区域的准粒子隧穿电流。

注:在约瑟夫森隧道结中,当直流约瑟夫森效应被平行于结平面的磁场压制时能够观测到完整的亚能隙区域。

3.23

超导带线探测器 superconducting strip detector

一种检测长超导带线中的局域电阻变化的超导器件,这种变化源于被测量导致的器件能量累积。

注 1:对于光子探测器,多数情况下不推荐使用“超导纳米线光子探测器”的名字,是因为超导体的尺寸与当前 ISO/TS 80004-2:2015 中对于“纳米线(nanowire)”的定义不一致,其中“纳米线”或“纳米纤维”被定义为具有两个外部纳米维度的物体,约从 1 nm 到 100 nm,而第三个维度明显更大。多数情况下,超导带的尺寸满足“纳米线”或“纳米带”的定义。

注 2:“纳米线(nanoribbon)”或“纳米带(nanotape)”仅有一个外部维度在纳米尺度,另外两个外部维度则要大得多(通常 3 倍以上)。另外,这两个大的维度也互不相同。“纳米带线(nanostrip)”比“纳米线”和“纳米带”更适合超导传感器和探测器。

注 3:超导纳米线的例子:10 nm×30 nm×10 μm。其中厚度和宽度的差别在 3 倍以下的超导体可以称为“超导纳米线光子探测器”。

3.24

超导隧道结探测器 superconducting tunnel junction detector

一种检测两块被势垒层隔开的超导体或超导体和正常导体之间隧穿电流的变化的超导器件,这种变化源于被测量导致的器件能量累积。

注: 改写 IEC 60050-815:2015,定义 815-16-54。

3.25

温度灵敏度 temperature sensitivity

超导转变边斜率,由 $d\ln R/d\ln T$ 来定义。其中 R 、 T 分别为 TES 的电阻和温度。

3.26

超导转变边传感探测器 transition edge sensor detector

一种通过检测陡峭的超导态-正常态电阻变化来测量温升的器件,这种变化源于被测量导致的器件能量累积。

注: 改写 IEC 60050-815:2015,定义 815-16-53。

4 符号

单位、图形和字母符号应来自以下标准:

- IEC 60027 (所有部分);
- IEC 60417;
- IEC 60617;
- ISO 1000;
- ISO 7000。

设备和图表使用的图形符号,例如超导区、正常连接、超导连接、正常-超导边界、约瑟夫森结等,在附录 C、IEC 60417 和 IEC 60617 中做出了定义。而对于特定使用在其他传感器或探测器的图形符号在 IEC 61788 的其他部分做出了定义。

5 术语和分类

5.1 术语

表 1 列出了引起能量累积而能被超导传感器和探测器感应或探测出来的被测量,包括测量种类、测量对象和物理量。按照测试种类英文字母顺序排列,分别是:原子和分子、基本粒子、物理量和辐射。表中的每一个词条不仅代表被测量本身,还表示其时间或空间的分布。

凡本标准中涉及到的某器件特有的任何专业术语都应采自相关的国际电工委员会(IEC)或国际标准化组织(ISO)标准。

表 1 被测量

测量种类	测量对象	物理量
原子和分子	原子	计数、能量、通量、时间
	有机分子	计数、能量、通量、时间
	无机分子	计数、能量、通量、时间
	其他(指定)	

表 1 (续)

测量种类	测量对象	物理量
基本粒子	暗物质	计数、能量、通量、时间
	电子	计数、能量、通量、时间
	中微子	计数、能量、通量、时间
	中子	计数、能量、通量、时间
	光子	计数、能量、通量、时间
	质子	计数、能量、通量、时间
	正电子	计数、能量、通量、时间
	其他(指定)	
物理量	电容	幅值
	电流	幅值
	电感	幅值
	磁场	强度,分布
	磁通量	密度,分布
	磁化率	幅值
	极化强度	幅值
	电阻	幅值
	电压	幅值
	其他(指定)	
辐射	α -粒子	计数、能量、通量
	β -粒子	计数、能量、通量
	电磁波	幅值
	γ -射线	计数、能量、通量
	光学辐射	计数、能量、通量
	X-射线	计数、能量、通量
	其他(指定)	

表 2 中将被测量分为两大类:一类是场和物理量、一类是粒子。基于此分类,探测机制可分为对场和物理量的相干探测以及对粒子的直接探测。

表 2 被测量的分类

分类	被测量种类
场和物理量	物理量
	辐射(电磁波)
粒子	原子和分子
	基本粒子
	辐射(单个电磁辐射量子)

表 3 列出了多种类型的传感器和探测器(按英文字母顺序)。这些传感器和探测器将被测量转换为电信号。“传感器”一词常用于描述测量场和物理量的器件,而“探测器”一词则倾向于描述测量单个粒子的器件。当给传感器或探测器起名时,命名法宜遵循下述的组词顺序:器件结构或功能;被测量;探测器、磁强计、混频器、传感器或其他名词。表中也列出了全称和相应英文缩写的范例。

表 3 超导传感器和探测器命名法:类型、全称和英文缩写范例

类型	全称和英文缩写范例
金属磁热量(MMC)类型	金属磁热量 α -射线探测器 (MMC α -射线探测器或 MMCAD)
	金属磁热量 γ -射线探测器 (MMC γ -射线探测器或 MMCGD)
	金属磁热量 X-射线探测器 (MMC X-射线探测器或 MMCXD)
微波动态电感(MKI)类型	微波动态电感光子探测器 (MKI 光子探测器或 MKIPD)
	微波动态电感 X-射线探测器 (MKI X-射线探测器或 MKIXD)
超导热电子测辐射(SHEB)类型	超导热电子测辐射光子探测器 (SHEB 光子探测器或 SHEBPD)
	超导热电子测辐射太赫兹混频器 (SHEB 太赫兹混频器或 SHEBTM)
超导量子干涉器件(SQUID)类型	超导量子干涉放大器 (SQUID 放大器或 SQUIDA)
	超导量子干涉电流传感器 (SQUID 电流传感器或 SQUIDCS)
	超导量子干涉梯度计 (SQUID 梯度计或 SQUIDG)
	超导量子干涉磁强计 (SQUID 磁强计或 SQUIDM)
	超导量子干涉滤波器磁强计 (SQIF 磁强计或 SQIFM)
	超导量子干涉阵列磁强计 (SQUID 阵列磁强计或 SQUIDAM)
超导带线(SS)类型	超导带线电子探测器 (SS 电子探测器或 SSED)
	超导带线离子探测器 (SS 离子探测器或 SSID)
	超导带线粒子探测器 (SS 粒子探测器或 SSPD)
	超导带线光子探测器 (SS 光子探测器或 SSPD)
	超导纳米带线光子探测器 (SNS 光子探测器或 SNSPD)

表 3 (续)

类型	全称和英文缩写范例
超导隧道结(STJ)类型	超导隧道结粒子探测器 (STJ 粒子探测器或 STJID)
	超导隧道结太赫兹混频器 (STJ 太赫兹混频器或 STJTM)
	超导隧道结光子探测器 (STJ 光子探测器或 STJPD)
	超导隧道结 X-射线探测器 (STJ X-射线探测器或 STJXD)
	超导体-绝缘体-超导体太赫兹混频器 (SIS 太赫兹混频器或 SISTM 等效于 STJTM)
	超导体-常规导体-超导体混频器 (SNS 混频器或 SNSM)
转变边传感器(TES)类型	转变边 α -射线探测器 (TES α -射线探测器或 TESAD)
	转变边 γ -射线探测器 (TES γ -射线探测器或 TESGD)
	转变边光子探测器 (TES 光子探测器或 TESPD)
	转变边 X-射线探测器 (TES X-射线探测器或 TESXD)
其他	指定

注：命名法按照(器件结构或功能)—(被测量)—(探测器、磁强计、混频器、传感器或其他名词)的组词顺序。“纳米线”一词只能用于特殊情况，即超导带线的两个外部尺寸在大约 1 nm 到 100 nm 之间的纳米量级时，第一个与第二个外部维度差别通常少于 3 倍，且第三个维度比另外两个要大很多：例如一个 $10\text{ nm} \times 30\text{ nm} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ 的纳米线。在 IEC 61788-22 中，因大多数情况下第一个与第二个外部维度之差要远大于 3 倍，虽然纳米带或者纳米线也可以描述，但还是统称为“纳米带线(nanostrip)”或“带线(strip)”。可参考国际标准化组织(ISO)在线浏览平台：<https://www.iso.org/obp/ui#home>。

5.2 分类

传感器和探测器的探测原理可分为两类：相干探测和直接探测(见表 4)。用于相干探测类的器件包括测辐射热计、传感器或者混频器，而用于直接探测类的器件包括热量计或者探测器。工作原理参见附录 A(相干探测)和附录 B(直接探测)。

表 4 探测原理分类

探测原理	类型
场和物理量的相干探测	SHEB, SQUID, STJ
粒子的直接探测	MMC, MKI, SS, STJ, TES

值得注意的是直接探测类的器件对单个粒子敏感，同时也可测量粒子的通量。问题在于超导器件

的响应时间和单个粒子能量吸收时间间隔的差别。对于利用因能量吸收而致温度上升的超导传感器和探测器,依据响应时间称之为“测辐射热计”或者“热量计”。当能量吸收间隔比响应时间短很多的时候,“测辐射热计”一词适用于通量测量。另一方面,当能量吸收间隔比响应时间长很多的时候,“热量计”一词适用于粒子计数。

注:原文中用的是“Coherent detection”,此处翻译为“相干探测”。该分类方法并不严谨,原文提到的3种相干探测器包含不同的工作原理。SQUID工作原理是波函数的量子相干,而非信息处理中的相干检测。

6 低温工作条件

超导传感器和探测器工作在低于 T_c 或者是正常态-超导态转变中点的温区,目的是利用保持超导态或利用陡峭的正常态-超导态转变沿来进行感应或检测被测量。工作温度范围由传感器或探测器的类型决定。IEC 61788-22 的其他部分针对各种类型的传感器和探测器,宜描述每一种传感器或探测器的特定低温操作条件。

低温可通过下述方式获得:液氦或其他冷冻剂、吉福德-麦克马洪(Gifford-McMahon,简称 GM)制冷机、脉冲管制冷机、绝热退磁制冷机(ADR)、 ^3He 制冷机、 ^4He - ^3He 稀释制冷机以及其他制冷机。

传感器和探测器的性能会受到低温环境和装置的影响。低温环境和装置宜在每个传感器或探测器的标准和其他单独的标准里指定。

7 标记

7.1 器件识别

器件或包装上的标记应能使器件被清晰地识别出来。每个器件都应有一个追踪码,由此可以追踪到特定的生产或检验批次。

7.2 包装

包装上的标记应阐明下述内容:

- a) 器件识别码;
- b) 被测量、类型、名称、探测原理以及表 1、2、3、4 里的详实信息;
- c) 内含器件个数;
- d) 工作温度范围;
- e) 补充说明;
- f) 注意事项(如有,则需说明)。

8 测试和测量步骤

测试和测量方法宜在每个传感器或探测器的标准和其他分立的标准中描述。

附录 A

(资料性附录)

相干探测

A.1 超导热电子测辐射热计(SHEB)类型

SHEB 类型传感器能够探测亚毫米波和远红外(0.3 THz 到 10 THz)辐射。尽管 SHEB 可以用于直接探测,但是它更常用作间接探测器(即相干探测或混频探测)。用作混频器时,信号光子(ω_s)的电磁场与本地产生的频率在 ω_0 (称之为本振,LO)的电磁场混频。混频后的信号是一个差频信号,又叫中频信号 ω_{IF} ,即 $\omega_{IF} = \omega_0 - \omega_s$ 。亚毫米波段的原始信号因此降频至微波波段,该波段的信号可通过更多传统的低噪声电子电路放大和处理。SHEB 由一个纳米级或亚微米级尺寸的超导微桥构成,该微桥连接着厚的金属电极。亚毫米波辐射信号通过一个透镜和片上天线或者馈源喇叭耦合进微桥里。外差混频过程利用了辐射信号加热引起的超导微桥的超导态与正常态之间的阻性转变。这种转变会产生一个热点。探测机制里有两种热点弛豫类型:在扩散制冷型 SHEB 里热电子扩散至周边的热储,而在声子制冷型 SHEB 里热电子通过快速的电子-声子相互作用而冷却。

测辐射热计是将被测量转变成热的电子器件,而热可以通过温度计来探测。尽管传统的测辐射热计通常有单独的天线形状的吸收器、温度计、热沉以及热连接等分立元件,但在 SHEB 类型里这些不同元件都组合在一起。热阻 $R = 1/G$, (其中 G 是热导)是入射功率 P 和温度变化 ΔT 之间关系式系数,即 $\Delta T = PR$ 。设计测辐射热计时需要考虑的一个重要因素是恢复时间,即 $\tau = RC$ 其中 C 为热容。在低温时,SHEB 材料中的电子系统与声子系统解耦,导致 R 变大,而电子的热容 C 变小且正比于温度 T 。

从器件工作的物理学角度看,SHEB 类型可以归为 TES 一类。在常规 TES 中,入射光子或者电磁波会引起晶格和电子温度升高,而 SHEB 类型只有电子温度会升高。除非极低温度,一般 SHEB 类型的电子热容 C 并不会比晶格热容 C 大,因此它比常规的 TES 对入射信号响应更快速。

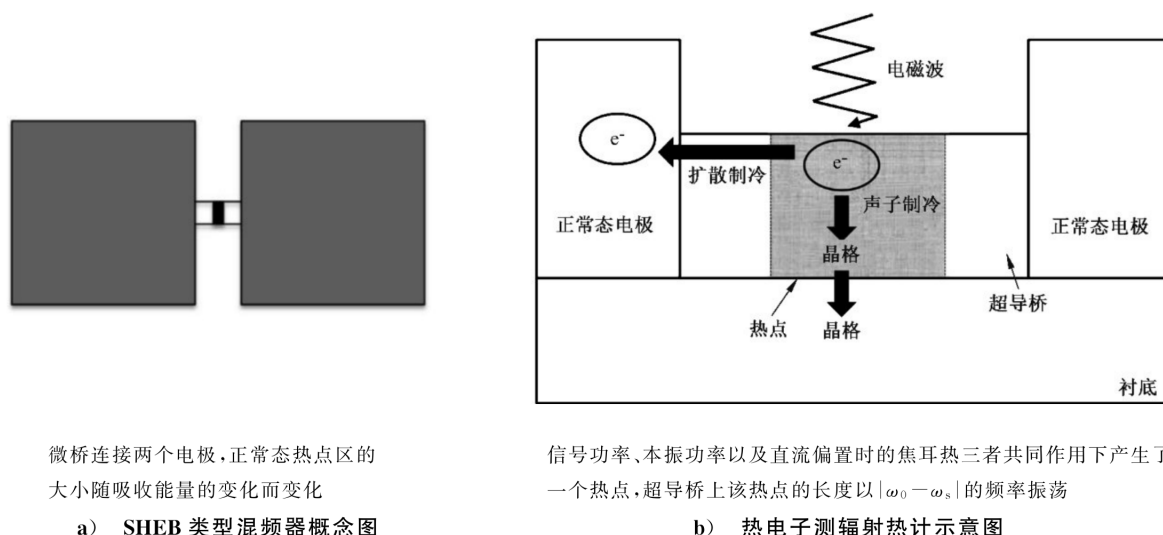


图 A.1 SHEB 混频器

SHEB 类型的一个例子是由两个厚金属电极通过一个小的氮化铌(NbN)超导微桥连接构成的器件,微桥厚 3.5 nm、宽 400 nm、长 4 μm [见图 A.1 a)和图 A.1 b)]。如 Nb, NbTiN, Al 和 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 等

其他的材料也会用到。

SHEB 类型的一个优点是它可以通过快速的声子或电子扩散制冷,从而工作速度非常快。这个优点使其能对超过 1 000 GHz 频率的辐射进行外差相干探测,而 STJ 混频器因为超导能隙之上的准粒子激发却对这个频段不能有效接收。此外,SHEB 也用于非相干直接探测,但其主要应用还是外差相干探测。

A.2 超导隧道结(STJ)类型

STJ 结构与约瑟夫森隧道结完全相同[图 A.2 a)],但是约瑟夫森效应需要通过与结平面平行的磁场来抑制。STJ 型能够利用强非线性 I - V 曲线,实现基于毫米波和亚毫米波段的电磁波与本振频率的外差混频,将频率降到微波波段进行相干探测[图 A.2 b)]。由于具有三明治的夹层架构,STJ 混频器经常被称作超导体-绝缘体-超导体(SIS)混频器。由于 1 000 GHz 以下频段没有合适的低噪声放大器,低温(例如 4 K)下工作的 STJ 混频器对于该频段的信号探测必不可少,降频频率通常在微波频带,低噪声半导体放大器可适用。

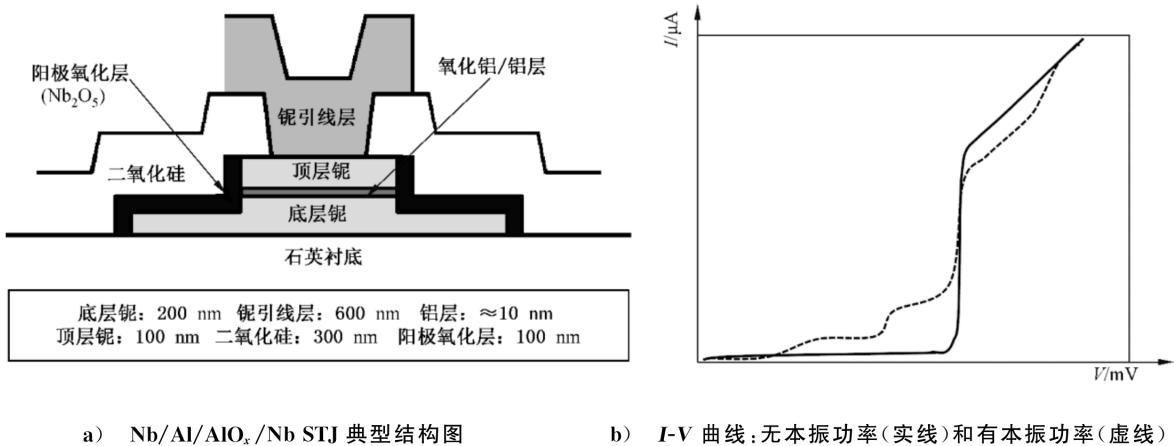


图 A.2 STJ 混频器

STJ 的一个例子是 Nb/Al/AIO_x/Nb 结,如图 A.2 a)所示。随着信号频率的增加,尺寸和临界电流密度分别减小和增大,以保持正常态电阻大致恒定。500 GHz(波长 0.6 mm)下结的典型尺寸和临界电流密度分别约为 1 μm 和 $100 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ (@4.2 K)。

与直接探测光子相比,STJ 混频器的优点是具有非常高的光谱分辨率,但是在灵敏度方面不足。

A.3 超导量子干涉器件(SQUID)类型

SQUID 类型传感器能够进行磁通或磁场的灵敏检测。它是基于超导体所具有的磁通量子化和约瑟夫森效应。通常由包含一个约瑟夫森结(交流 SQUID)或两个约瑟夫森结(直流 SQUID)的超导环路构成。当穿过 SQUID 环路的外界磁通发生变化时,SQUID 器件的电感(交流 SQUID)和临界电流(直流 SQUID)会发生相应的变化,因此可以用交流和直流的方法分别来探测外界磁通变化。利用该磁通耦合,任何可以变换为穿过 SQUID 环路的磁通的被测量都可以利用 SQUID 传感器来测量。其中比较突出的例子就是极其灵敏的 SQUID 磁强计或电流传感器。另外,SQUID 传感器还可以用于测量材料的磁化率和磁矩。屏蔽电流或穿过 SQUID 超导环路的磁通量子($\Phi_0 = 2.0678 \times 10^{-15} \text{ Wb}$)使 SQUID 电压-磁通或电流-磁通曲线出现周期性振荡。振荡的周期就是一个磁通量子 Φ_0 。但是,SQUID 的灵敏度可以好于 Φ_0 ,其本身或与反馈电路共同组成磁通零值探测器。

铌基合金的低温 SQUID 通常工作在 4.2 K(例如液氮),而高温 SQUID 则工作在 77 K(液氮)。从根本讲,两种 SQUID 工作原理相同只是灵敏度不同。低温 SQUID 噪声水平在 $1 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级,而高温 SQUID 则要高 10 倍以上。

图 A.3 a)是典型的直流 SQUID 磁强计示意图。其中一个大的探测线圈和一个螺旋输入线圈组成了磁通变换器。外部磁场通过磁通变换器变换成穿过 SQUID 环的磁通。这样就得到了以 Φ_0 为周期的电压-磁通响应[图 A.3 b)]。

简化的直流 SQUID 等效电路图如图 A.3 b)所示。单个直流 SQUID 通常工作在恒流偏置条件下。偏置电流(I_B)被分流成两条支路,每支电流为 $I_B/2$ 。两个约瑟夫森结位于超导环中。每个约瑟夫森结都有一个正常态电阻 R 。如果直流 SQUID 环路内穿过的磁通密度与环外磁通密度相同,则不会发生任何变化。但如果各密度存在差异,则会感应出屏蔽电流 I_S 并在回路中流动以补偿其不平衡。 I_S 表示为 $I_S = \varphi/L_s$ (φ 为穿过 SQUID 环的总磁通; L_s 为 SQUID 环路电感)。

屏蔽电流 I_S 在超导环路的一个支路中与 I_B 方向相同,在另一支路中与 I_B 相反,这样总电流在一个支路中成为 $(I_B + I_S)/2$,另一个支路成为 $(I_B - I_S)/2$ 。只要任一分支中的电流超过约瑟夫森结的临界电流 I_c ,结两端就会出现电压。

结两端的电压随环路中磁通周期性变化。如果采用反馈技术 FLL(磁通锁定环),FLL 输出电压将与穿过 SQUID 环的磁通变化量成正比。

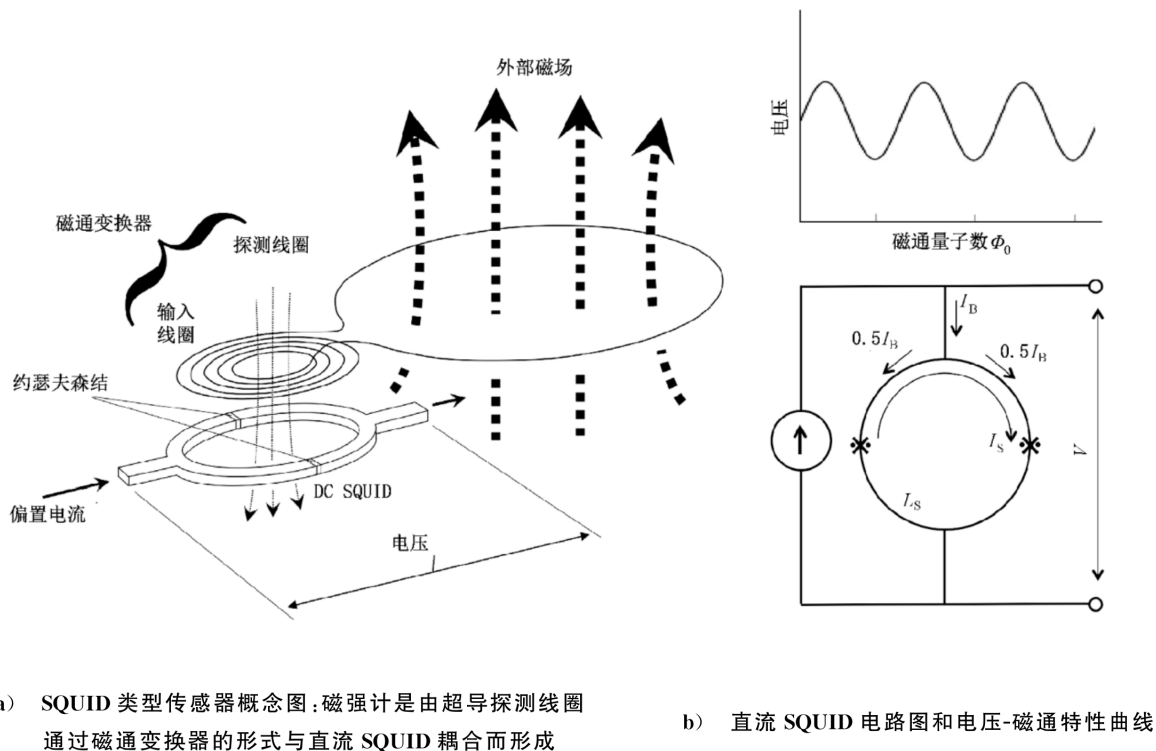


图 A.3 直流 SQUID

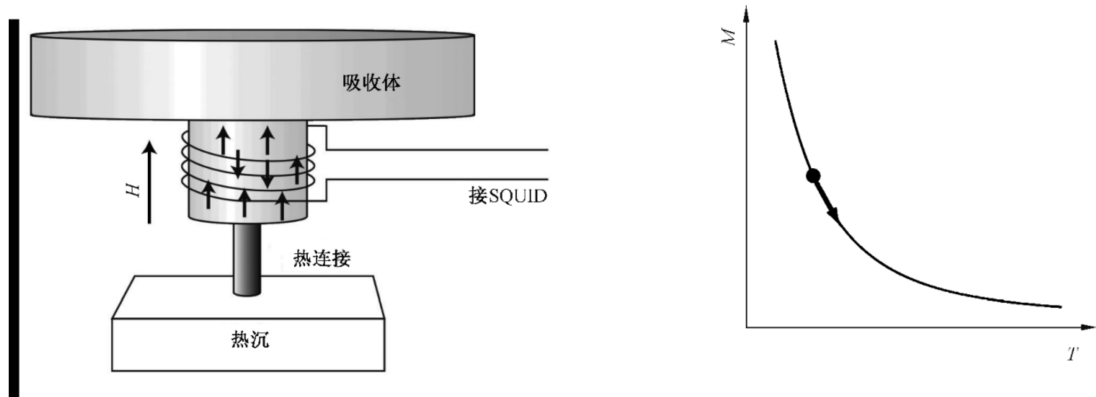
SQUID 的一个例子是铌超导环包含两个 Nb/Al/AlO_x/Nb 约瑟夫森结,结尺寸 $1 \mu\text{m}$,临界电流密度为 $25 \times 10^6 \text{ A}/\text{m}^2$ (@4.2 K),结正常态电阻 R 为 8Ω 。通常,用于产生磁场的螺旋输入线圈集成在 SQUID 芯片之上。

从根本讲,SQUID 对磁通敏感。然而,使用输入线圈和磁通变换器也可以测量其他物理量,如磁场和电流。

附录 B
(资料性附录)
直接探测

B.1 金属磁热量计(MMC)类型

MMC 是通过测量小磁场中顺磁性传感器在被测能量累积后磁化强度变化,从而实现直接探测。MMC 由一个顺磁性传感器和一个超导电路构成,顺磁性传感器在温度升高时磁化强度会改变,超导电路可读出磁化强度的变化。每个被测量(例如一个光子)的能量可引起贴附在顺磁性传感器上吸收器的温度升高。温度的升高导致吸收器磁化率的改变(或磁化强度的减小,如图 B.1 所示),并通过磁强计在弱磁场下测出。吸收器与低温热沉热隔绝,从而使磁化强度的改变与磁强计的噪声电平相比足够大。



吸收器连接顺磁性材料,该材料磁化强度随温度的升高发生改变。 吸收被测量的能量最终导致吸收器磁化强度下降,从而由 SQUID 读出。

a) MMC 探测器概念 b) 顺磁性传感器材料磁矩与温度的关系(例如 Au:Er)

说明:

H —— 磁场强度;
 M —— 磁化强度;
 T —— 温度。

图 B.1 MMC 探测器

顺磁性传感器的一个例子是 Au:Er 顺磁性金属合金,该合金是在金母体中掺入 300 ppm 至 1 000 ppm 低浓度的铒(1 ppm 即是一百万分之一)。顺磁性传感器和吸收器放置于低温下弱磁场中,通常温度为 25 mK,磁场强度在 1 mT 至 10 mT 之间。金吸收器的温度升高导致其磁化强度的减小,如图 B.1 b) 所示。这个改变由采用 SQUID 的超导电路读出。由于金属中磁自旋和传导电子间的强耦合,Au:Er 中自旋体系有快速的响应时间(100 mK 时小于 1 μ s)。MMC 信号的衰减时间取决于探测器到低温热沉之间的热连接。

MMC 探测器的一个优点是能量分辨率(ΔE)与吸收器的热容(C)弱关联。预期是 $\Delta E \propto C^{1/3}$,这意味着磁热量计适合应用于需要大尺寸吸收器的场合。

B.2 微波动态电感(MKI)类型

MKI 通过测量超导薄膜在被测能量累积时的表面阻抗变化实现直接探测,表面阻抗变化源自动态

电感效应。一个微波动态电感探测器(MKID)由形成谐振器的电学元件构成,该谐振器激发出一个微波频率范围内的谐振频率(图 B.2 所示)。当一个被测量(例如一个光子)的能量累积在超导电感器里时,库珀对的破坏使动态电感发生变化,谐振曲线也会变化。如果谐振器在谐振频率处被激发,则电阻变化会引起相位和谐振振幅的变化,通过测量这种变化的程度来确定吸收的能量[图 B.2 b)所示]。

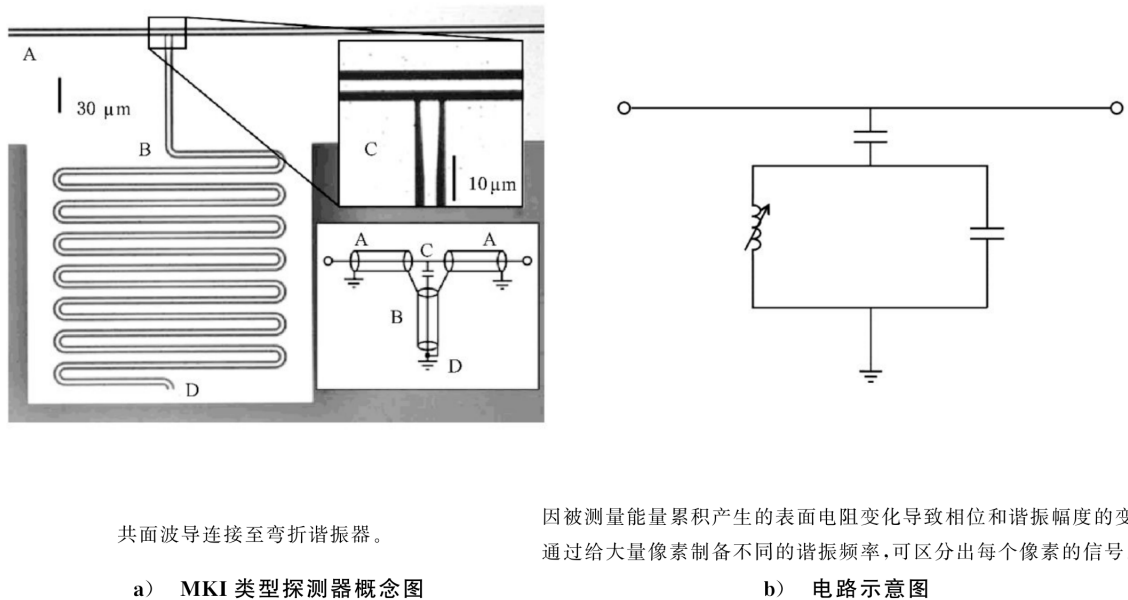


图 B.2 MKI 探测器

一个吸收器的例子是工作温度在 0.1 K,厚 60 nm,长 3 mm 的 TiN_x 带线。 TiN_x 带线形成一个弯折线电感,该电感与一个谐振器电容耦合。谐振器连接到一个共面波导并通过一个耦合电容读出信号(图 B.2),其中共面波导的作用是使频率范围在 0.1 GHz 至 20 GHz 的微波激发谐振器。谐振器激励和相位、谐振幅度变化的测量都由一个室温精密微波元件控制。

MKIDs 的一个优点使大规模阵列成为可能。谐振器(像素)的谐振频率可以调谐在单个谐振器谐振曲线之间无交叠的一个确定间隔区间上。成千上万的像素即可通过放置在低温和室温之间的单根微波电缆读出。

B.3 超导带线(SS)类型

SS 通过测量制备在衬底上的超导带线在被测能量累积时产生的有阻态实现直接探测,有阻态源自热点形成或其他物理现象。其工作时,偏置电流设置在带线的临界电流值以下。探测器工作时相当于一种超导转变边缘器件。当产生的热点尺寸足够大以至于周围区域的电流密度超过临界电流密度时,在带线的整个宽度上将出现一片有阻区域(图 B.3)。产生的内部热能会以远低于 1 ns 的时间通过衬底弛豫和扩散掉,与此同时电阻带也随之消失。

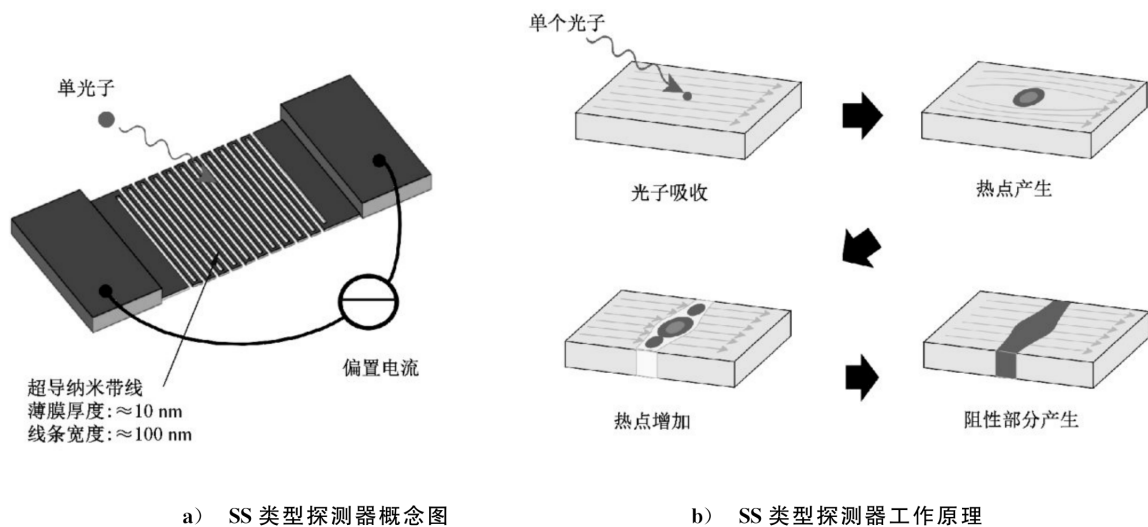


图 B.3 SS 探测器

SS 的一个例子是厚 5 nm、宽 100 nm 的 NbN 带线。NbN 带线工作在 4 K 或以下的温度。为了得到一个适当的探测器尺寸,带线一般做成单根曲折线或多根平行线的结构。

比起其他的传感器和探测器,SS 的一个优点是其快速的响应时间(低于几纳秒)。响应时间主要由带线的动态电感决定,因为超导态的本征弛豫时间远比由动态电感制约的响应时间要短得多。另一方面,其谱分辨率特性不如预期或者说较差。

B.4 超导隧道结(STJ)类型

STJ 也能基于被测能量吸收引起的准粒子激发实现直接测量。STJ 结构与约瑟夫森结完全相同,但是约瑟夫森效应需要通过与结平面平行的磁场来抑制[图 B.4 a)]。结被偏置在小于 $2\Delta/e$ 的亚能隙区域,并且冷却至远低于 T_c ,以避免通过热激发产生准粒子。当超导电极吸收被测量的能量时,库珀对遭到破坏从而产生多余的准粒子。多余的准粒子隧穿过两个超导电极(S1 和 S2)之间的绝缘层(I)造成隧穿电流增加[图 B.4 b)]。准粒子数量与 E/Δ 成正比。该电流以准粒子寿命恢复到零。

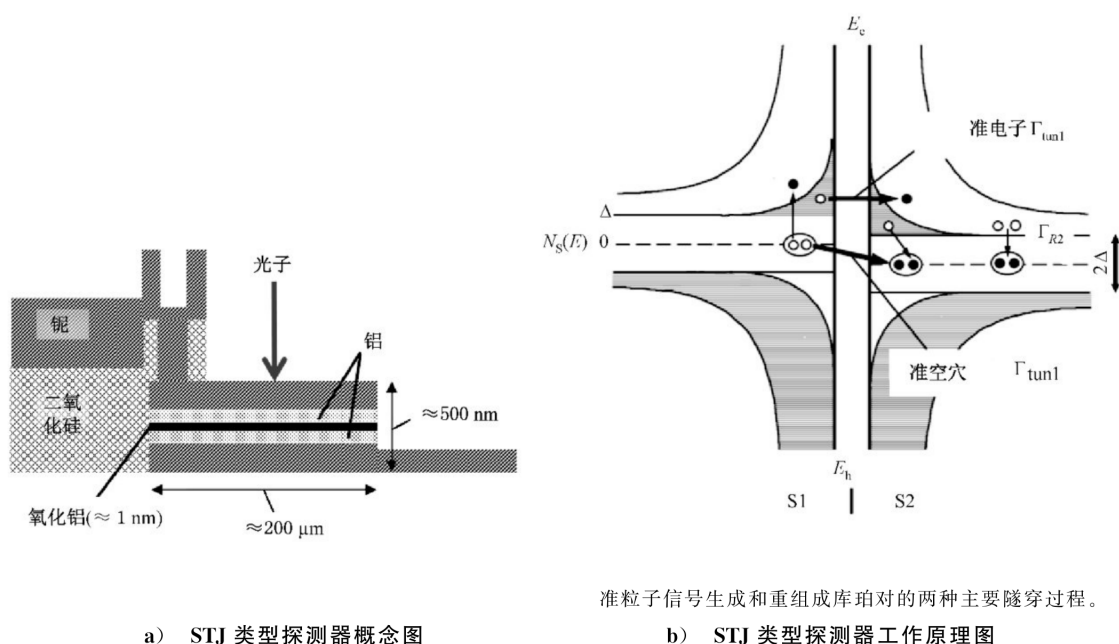


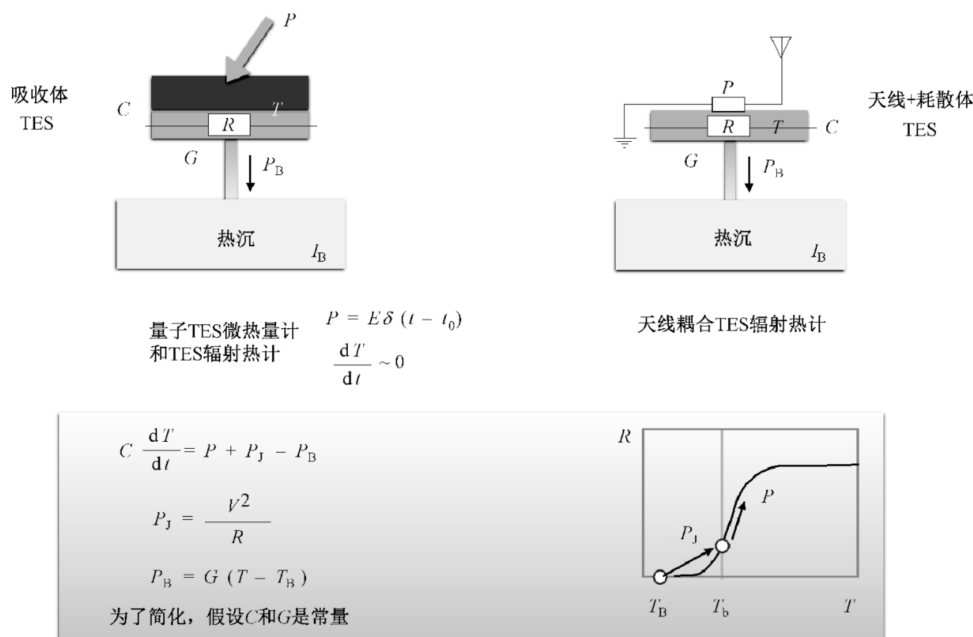
图 B.4 STJ 探测器

STJ 的一个例子是 Nb/Al/ AlO_x /Nb 结, 结尺寸 $200\ \mu\text{m}$, 临界电流密度为 $2 \times 10^6\ \text{A}/\text{m}^2$ (4.2 K 下), 正常态电阻为 $20\ \Omega$ 。结尺寸要比 SIS 混频器大得多, 是因为需要相对较大的敏感面积。

STJ 的一个优点是基温漂移保持在超导电极约 $10\%T_c$ 范围内时, 超导能隙能够确保高稳定性, 而不受基温漂移影响。

B.5 转变边传感器(TES)类型

TES 传感器基于薄膜在被测能量累积时的电阻变化实现直接测量, 电阻变化源自正常态-超导态转变过程中平衡温度的变化(图 B.5)。TES 的温度被保持在正常态-超导态转变的中间位置, 可以通过精确调节温度实现, 也可以使温度略低于超导薄膜的临界温度 T_c 。并在薄膜两端施加恒定电压 V 。在后一种情况下, 自热功率 $P_J = V^2/R$ 将与从薄膜到热沉的热逸出 P_B 保持平衡。在正常态-超导态转变区域内, R 值随温度增加而增加, 从而造成 P_J 降低。因此, 薄膜温度稳定在转变边缘的偏置点 T_b 处, 具体由 V 值确定的。例如, 当 TES 吸收体吸收光子后会造成温度上升, 此时自热功率下降。这样提供了一种负反馈使 TES 比热时间常数更快地返回到偏置点。该效应被称为电热反馈(ETF)(图 B.5)。吸收被测量导致的负电流脉冲将由 SQUID 电流放大器读出。



TES 类型探测器概念图和工作原理图

说明:

- C —— 吸收体热容;
- E —— 被测功率;
- G —— 吸收体和热沉之间的热导;
- P —— 被测能量累积导致的外部热功率;
- P_B —— 通过吸收体和热沉之间连接的热流;
- P_J —— 由 TES 偏置电压和电阻导致的焦耳热功率;
- R —— TES 电阻;
- T —— 温度;
- T_B —— 基温;
- T_b —— TES 工作温度;
- t —— 时间;
- V —— 偏置电压。

图 B.5 TES 探测器

TES 的一个例子是 Mo(60 nm)/Cu(200 nm) 的双层膜, 面积为 $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, 生长在 250 nm 厚的 Si_3N_4 膜上, 工作温度 70 mK。TES 由一个 0.2 mΩ 的铜电阻并联分流, 该阻值远低于偏置点的电阻 R , 以实现恒压偏置。被测量能量的单次吸收产生的负电流脉冲通过串联 SQUID 阵列放大器转换成电压脉冲。

TES 的优点融合了极高能量分辨率的热量计性能和正常态-超导态窄转变宽度中间的稳定偏压, 其中陡峭的 R - T 曲线可当作是一种高度灵敏的温度传感器。而且, ETF 还可以补偿热量计固有的缓慢响应, 并缩短脉冲弛豫时间。

在本标准中, TES 薄膜被定义为超导薄膜, 尽管具有有限的电阻, 但它仍然受到超导特性的影响。受超导特性影响的器件统称为超导器件。能量分辨率取决于 C 。

附 录 C
(规范性附录)
设备和图表用图形符号

C.1 超导区域,单端超导连接

见图 C.1。

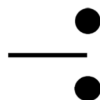


垂直两点表示超导区域,直线和直角楔形表示超导连接。

图 C.1 超导区域,单端超导连接

C.2 超导区域,单端常导连接

见图 C.2。

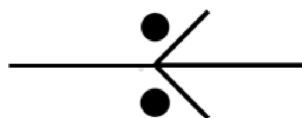


垂直两点表示超导区域,直线表示常导连接。

图 C.2 超导区域,单端常导连接

C.3 正常态-超导态边界

见图 C.3。



垂直两点表示超导区域,右手边直线和直角楔形表示超导连接,左手边直线表示常导连接。

图 C.3 超导区域,一端超导连接和一端常导连接(正常态-超导态边界,见 IEC 60417-6370:2016-09)

C.4 一种变形的连接形式

见图 C.4。



图 C.4 串联连接

C.5 约瑟夫森结

见图 C.5。



垂直两点表示超导区域,两端直线和直角楔形均表示超导连接,非超导区域(即两个超导连接之间的常导或绝缘层)非常小。

图 C.5 超导区域,两端超导由非常小的非超导区域连接(约瑟夫森结,见 IEC 60417-6371:2016-09)

IEC 60417 设备用图形符号已经收录图 C.3 和图 C.5 的符号,IEC 60617 简图用图形符号的收录工作正在进行中。

参 考 文 献

- [1] ISO/TS 80004-2:2015, Nanotechnologies—Vocabulary—Part 2: Nano-objects
 - [2] 100 Years of Superconductivity, Horst Rogalla, Peter H. Kes (Editors) CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011
 - [3] The SQUID Handbook, Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems, Volume I, John Clarke, Alex I. Braginski (Editors), Wiley, 2004
 - [4] The SQUID Handbook, Applications of SQUIDs and SQUID Systems, Volume II, John Clarke, Alex I. Braginski (Editors), Wiley, 2006
 - [5] Cryogenic Particle Detection, Christian Enss (Editor), Topics in Applied Physics (Book 99) Springer; 2005
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准

超导电子器件

传感器和探测器通用规范

GB/T 39722—2020/IEC 61788-22-1:2017

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2020年12月第一版

*

书号: 155066 · 1-66794

版权专有 侵权必究



GB/T 39722-2020