

超导体和低温量 热核辐射探测器

丁洪林 编著

(理412)

原子能出版社

超导体和低温量热 核辐射探测器

Superconductor
and
Cryogenic Calorimetric
Nuclear Radiation Detectors

丁洪林 编著
Ding Honglin

原子能出版社
Atomic Energy Press

超导体和低温量热核辐射探测器

Superconductor and Cryogenic Calorimetric

Nuclear Radiation Detectors

丁洪林 编著

Ding Honglin

责任编辑 袁祖伟

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

空军指挥学院印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/32·印张 3.75·字数 90 千字

1993 年 2 月北京第一版·1993 年 2 月北京第一次印刷

印数 1—500

ISBN7—5022—0840—2

TL·544 定价: 3.85 元

内容简介

本书较系统地叙述了超导体和低温量热核辐射探测器的种类、工作原理、应用和应用前景。内容共分 6 章：第一章介绍低温、低温量热核辐射探测器和超导、超导体核辐射探测器及其有关的一些特性；第二章介绍低温量热核辐射探测器的工作原理、种类和它的特点；第三章介绍低温超导体核辐射探测器的种类和工作原理；第四章介绍高 T_c 超导体核辐射探测器的种类、工作原理、研究现状和它的应用前景；第五章介绍低温量热核辐射探测器和超导体核辐射探测器的应用；第六章介绍用于构成低温量热核辐射探测器和超导体核辐射探测器谱仪的低温前置放大器。

本书内容比较系统，可供从事核辐射探测器研究和制造的技术人员，从事天体物理学、粒子物理学和核物理学研究的研究人员和其它有关科技人员及大专院校有关专业的师生参考。

Synopsis

This book systematically describes kinds ,operating principles, application and prospects of superconductor and cryogenic calorimetric nuclear radiation detectors. The book includes six chapters; the first chapter introduces some characteristics of superconductivity and cryogenics as well as superconductor and cryogenic calorimetric nuclear radiation detectors, the second chapter introduces kinds and operating principles of cryogenic calorimetric nuclear radiation detectors, the third chapter introduces kinds and operating principles of cryogenic superconductor nuclear radiation detectors, the fourth chapter introduces kinds, operating principles , present research situation and prospects of high critical temperature superconductor nuclear radiation detectors, the fifth

chapter introduces the applications of superconductor and cryogenic calorimetric nuclear radiation detectors, the sixth chapter introduces the cryogenic preamplifier of a nuclear radiation spectrometer.

The content of this book is more systematic. The book can keep it for reference for persons engaging in fabricating and researching nuclear radiation detectors and working in celestial physics, particle physics and nuclear physics, and other scientists and engineers as well as teachers and students in universities.

前 言

随着国民经济和科学技术的发展,在天体物理学、粒子物理学、核物理学和原子物理学等学科的交叉性前沿领域的研究中,人们都需要一种具有极高能量分辨的核辐射探测器,这种核辐射探测器能探测和测量极小致电离甚至不致电离的核事件的能量。在多种核辐射探测器中,低温量热核辐射探测器(Bolometer)和超导体核辐射探测器是极有竞争力的候选探测器。尽管它们的工作温度很低($<1\text{K}$),严重阻碍了它们的推广应用,但与其它探测器相比,由于它们具有极高的能量分辨和低的工作阈能,能对极小致电离甚至不致电离的核事件进行精细的能量测量,所以它们仍然被人们不断探索并不断取得进展和成果。随着高 T_c 超导体的出现和高 T_c 超导体厚膜、薄膜材料的研制成功与性能的不断提高,以及其它工艺技术水平的发展和提高,工作在 77K 温度下并具有高分辨能力的 NIS 或 SIS 超导隧道结核辐射探测器也必将会取得不断的进展。因而它们的应用将日趋广泛,其发展也将更加迅速和深入。

本书较系统地叙述了低温量热核辐射探测器和超导体核辐射探测器的种类、工作原理及应用(包括应用前景)。内容共分 6 章。首先介绍了低温、低温量热核辐射探测器和超导、超导体核辐射探测器及其有关的一些特性。然后着重介绍低温量热核辐射探测器的种类和工作原理;超导体核辐射探测器的发展历史和它的种类、工作原理及其应用,并根据编著者

本人的研究工作介绍了高 T_c 超导体核辐射探测器的种类、工作原理、研究现状和它的应用前景。最后介绍这些探测器构成谱仪时所需的两种低温前置放大器。

在本书的编写过程中，核物理学家孙汉城研究员给予了支持与鼓励，并审读了全部书稿，提出了许多宝贵意见。编著者在此表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，书中难免有不少缺点和不妥之处，恳请读者不吝指教。

编著者

1992 年 11 月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 低温和低温量热核辐射探测器	(1)
1.2 超导和超导体核辐射探测器	(3)
1.3 超导体和低温量热核辐射探测器对材料的要求	(12)
1.3.1 引言	(12)
1.3.2 超导体材料为什么能用来制备核辐射探测器	(13)
1.3.3 为什么要开发超导体核辐射探测器？ 它对超导体材料的要求	(14)
1.3.4 气体、半导体、超导体三种材料构成探测器后的 参数比较	(17)
1.3.5 低温量热核辐射探测器对材料的要求	(19)
参考文献	(20)
第二章 低温量热核辐射探测器	(21)
2.1 引言	(21)
2.2 低温量热核辐射探测器的工作原理	(22)
2.3 低温量热核辐射探测器的种类、结构和特点	(23)
2.3.1 高灵敏度硅低温量热核辐射探测器	(24)
2.3.2 NTD 锗低温量热核辐射探测器	(25)
参考文献	(30)
第三章 低温超导体核辐射探测器	(31)
3.1 引言	(31)
3.2 低温超导体核辐射探测器的发展概况	(32)
3.3 低温超导体核辐射探测器的种类和工作原理	(34)
3.3.1 超导薄膜和超导丝核辐射探测器	(35)
3.3.2 超导微颗粒（超导胶体）核辐射探测器	(46)
3.3.3 超导隧道结核辐射探测器	(50)
3.4 低温超导体核辐射探测器的研究现状和它的前景	(55)

参考文献	(56)
第四章 高 T_c 超导体核辐射探测器	(58)
4.1 引言	(58)
4.2 高 T_c 超导体用于核辐射探测器的可能性	(59)
4.3 高 T_c 超导体核辐射探测器的种类和工作原理	(60)
4.3.1 高 T_c 超导约瑟夫森结 (桥结) 核辐射 探测器的工作原理	(61)
4.3.2 热敏型高 T_c 超导薄膜或约瑟夫森结 核辐射探测器的结构和工作原理	(64)
4.4 高 T_c 超导体核辐射探测器的研究现状	(67)
4.4.1 引言	(67)
4.4.2 高 T_c YBCO 氧化物超导薄膜和厚膜 约瑟夫森结的制备	(67)
4.4.3 高 T_c 氧化物超导薄膜和厚膜约瑟夫森结 对核辐射的响应	(69)
4.4.4 小结	(74)
参考文献	(76)
第五章 超导体和低温量热核辐射探测器的应用	(77)
5.1 引言	(77)
5.2 超导体和低温量热核辐射探测器的能量分辨和 它们在核能谱学中的应用	(79)
5.3 在极小致电离或不致电离核事件或粒子 能量测量中的应用	(83)
5.3.1 引言	(84)
5.3.2 反冲核能量的测量	(85)
5.3.3 中微子质量的测量	(86)
5.3.4 暗物质能量的测量	(90)
5.3.5 非平衡声子的测量	(92)

5.4	在天体物理学和宇宙 X 射线研究中的应用	(95)
5.5	在高能物理中的应用	(96)
	参考文献	(98)
第六章 用于超导体和低温量热核辐射探测器谱仪的		
	低温前置放大器	(100)
6.1	引言	(100)
6.2	在低温下工作的前置放大器的前级元件的选择	(101)
6.3	GaAs MESFET 的性能和选择	(104)
6.4	由 P-35-1101 GaAs MESFET 和 3SK-166 GaAs 双 栅极 MESFET 构成的用于超导体和低温量热核辐射 探测器的前置放大器	(108)
	参考文献	(110)

第一章 绪论

1.1 低温和低温量热核辐射探测器

在日常生活中，人们为了确定自然界的冷热程度，规定了温度的标准——温标，日常使用的摄氏温标也称为国际温标。该温标以水的沸点为 100°C ，水的冰点为零度 (0°C)，而 0°C 以下就进入了低温世界。随着人类的探索、科学的进展，人们能够获得更低的温度，低温领域正在逐渐扩大。

通常摄氏零度以下属低温。但按其获得的方法、应用的情况以及在这些温度下所呈现的不同的物理现象，可分为普冷、低温（深冷）和极低温三个温区。按 1971 年国际制冷会议的建议，这三个温区的温度范围为：

普冷 $273-120\text{K}$ ；

低温（深冷） $120-0.3\text{K}$ ；

极低温、超低温 0.3K 以下。（注：热力学温度与摄氏温度之间的换算关系为： -273°C 为热力学温度 0K ； 0°C 为 273K ； -196°C 为 77K ，其它可按此进行推算。）

在这三个温区采用不同的制冷方法或工艺，可得到不同的温度，其结果列于表 1.1 中。当物质进入低温（深冷）温区会有许多新颖的物理现象出现，如有些在室温下坚韧的物质在 77K 低温下会变脆；而另外一些物质例如 Hg 、 In 、 Sn 、 Pb 等在低温下电阻消失，呈现超乎寻常的导电能力，称为超导现象。除此之外，还有一些物质（例如高纯硅）在低温下，它的比热随温度以 T^3 的速率急速下降。比热是物质重要的热

表 1.1 三个温区中不同的制冷方法或工艺所得到的温度

温区	物质名称	101.325kPa 气压下的沸点
普 冷 制 冷 技 术	二氟二氯甲烷 R ₁₂	-29.8°C
	氨 R ₇₁₇	-33.4°C
	干冰 (固态二氧化碳) R ₇₄₄	-78.5°C
	三氟一氯代甲烷 R ₁₃	-81°C
	固态二氧化碳+乙醚	-100°C
	四氟甲烷 R ₁₄	-128°C
深 冷 低 温 技 术	液化天然气 LNG	120K
	液氧 LO ₂	90K
	液氮 LN ₂	77K
	液氢 LH ₂	20.4K
	液氦 L ⁴ He	4.2K
	液氦 L ³ He	3.2K
极低温	方 法	所能得到的最低温度
	1) 顺磁盐绝热去磁	0.001—0.005K
	2) 核绝热去磁	10 ⁻⁴ —50nK
	3) L ³ He—L ⁴ He 混合液稀释	0.004K

学性能参数，比热的定义为单位质量物质温度升高一度所需要的热量，比热

$$c = Q/G\Delta T$$

式中：c 为比热；

Q 为加在样品上的热量；

G 为样品的质量；

ΔT 是温度上升的增加值。

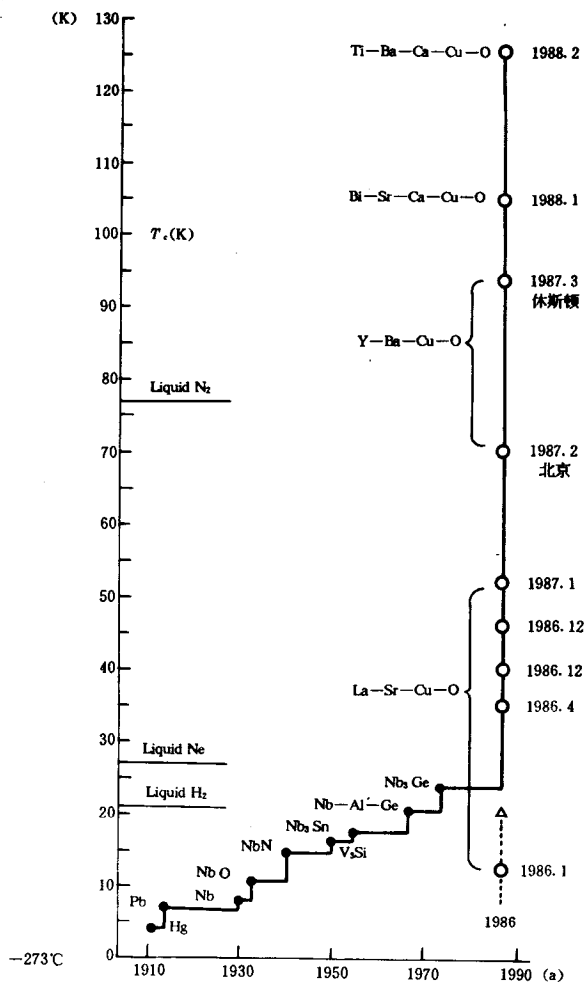
例如,当高纯硅在极低温时由于其比热 c 随温度以 T^3 的速率急剧减少,这就是说在此温度下只要给硅极微量的热就能引起高纯硅的温度有较大的上升。利用物质在低于某一极低温时其比热急速减少这一热学性能来研制的核辐射探测器,我们称之为低温量热核辐射探测器 (Bolometer 或叫 Calorimetric detector),有关这种核辐射探测器的工作原理、结构类型等将在第二章加以介绍。

1.2 超导和超导体核辐射探测器

荷兰科学家于 1911 年在研究物质的电阻随温度变化关系的实验中,发现汞(水银)在液氮温度 (4.2K) 的低温下其电阻突然消失,这意味着它具有超乎寻常的导电能力,因而称为超导现象。自此以后,提高超导临界温度的进展很缓慢,直到 1986 年发现 LaSrCuO 氧化物超导体后,超导体的超导临界温度发生了跳跃式的进展,见表 1.2。

众所周知,超导电性是某种物质(如金属、金属合金、氧化物)的一种特殊状态,这时有几种典型的物理性质发生变化。在超导态,材料的电阻为零,也就是说电流通过超导体没有功耗。另外,各种超导体都具有它自己的特定的零电阻温度 T_c 、电流密度 J_c 、磁场强度 H 等,也称阈值,当超过这些阈值,超导体便由超导态转变到正常态。1933 年,迈斯纳 (Meissner) 和奥森费尔德 (Oshonfeld) 在研究超导效应时发现,超导体在超导态不仅具有电阻消失的特性,而且还具有抗磁性;外界磁场不能渗入超导体内,这称为迈斯纳效应。超导体处于超导态时磁场不能进入超导体内部,即超导体内部的磁感应强度 B 为零。另一方面,当置于磁场中的超导体在

表 1.2 超导体的超导临界温度随时间 (a) 变化的列线关系



温度下降到临界温度 T_c 以下, 达到超导态时, 磁场就被排斥于超导体外。这一迈斯纳效应和超导现象统称为超导效应, 也就是说超导体在超导态时具有如下两个特性: 1) 电阻 R 为 0; 2) 体内磁场 B 为 0。

超导体按其磁化特性可以分成两大类, 即 I 类超导体和 II 类超导体。而 II 类超导体根据晶体相是否均匀和是否有晶格缺陷又分为理想的 II 类超导体和非理想的 II 类超导体 (或叫硬超导体)。

I 类超导体具有理想的抗磁性, 它只有一个临界磁场 H_c , 其值小于 $0.1T$ 。当外界磁场 $H < H_c$ 时超导体内部磁场为零 (即迈斯纳效应), 超导电流分布在表面层以维持体内的完全抗磁性。这类超导体主要是一些金属元素, 故又称为金属超导体, 表 1.3 中所列的一些金属是 I 类超导体。

I 类超导体在无磁场情况下发生超导-正常态的转变时没有潜热出现, 但是如果 I 类超导体在磁场中发生超导-正常态的转变时就存在有潜热, 这个潜热的存在是由于超导体在 T_c 与 $0K$ 之间的温度下, 正常态的熵大于超导态的熵, 因此如果要使相变在恒温下发生就必须加热。所以 I 类超导体在均匀磁场中从超导态到正常态的过渡是一级相变。I 类超导体的相图如图 1.1 所示。

另外, 由于 I 类超导体从超导态到正常态的过渡是一级相变, 在 I 类超导体中可能存在过热态。它们在大于临界磁场 $H_c(T)$ 和低于过热磁场 $H_{c*}(T)$ 的区域内仍保持其超导电性; 而当外磁场 H 大于过热磁场 $H_{c*}(T)$ 后, 超导体由超导态转变成正常态是不可逆的。实际上在大块的 I 类超导体中或是形状不是真正球形的微颗粒 I 类超导体中是不可能形成过热

表 1.3 I 类超导体材料和它的 T_c

元 素	T_c (K)	元 素	T_c (K)	元 素	T_c (K)
薄膜 Be	8.4	Tl	2.38	Cd	0.54
薄膜 Ga	8.4	Re	1.699	Ru	0.49
Pb	7.19	Mg	1.40	Ti	0.42
薄膜 Bi	6.0	Th	1.368	Hf	0.165
La (β)	6.06	Al	1.183	Ir	0.14
La (α)	4.80	Mo	0.915	W	0.012
Ta	4.48	Zn	0.851	Pt	<0.001
Hg (α)	4.153	U (α)	0.68	Rn	<0.001
Hg (β)	3.9	U (β)	1.80		
Sn	3.722	Tb	0.655		
In	3.407	Zr	0.546		

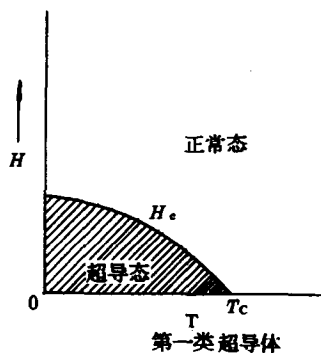


图 1.1 I 类超导体的相图

态的，而且只有在直径小于 $50\mu\text{m}$ 的、形状是真正球形的 I 类超导体颗粒并在将这些微细颗粒与绝缘介质一起构成超导胶体的情况下，才观测到了过热态（或称它为亚稳态^[1,2,3]）。由这些直径小于 $50\mu\text{m}$ 的理想的球形微颗粒构成超导胶体后的相图如图 1.2 所示，这是 I 类超导体微颗粒用于核辐射探测

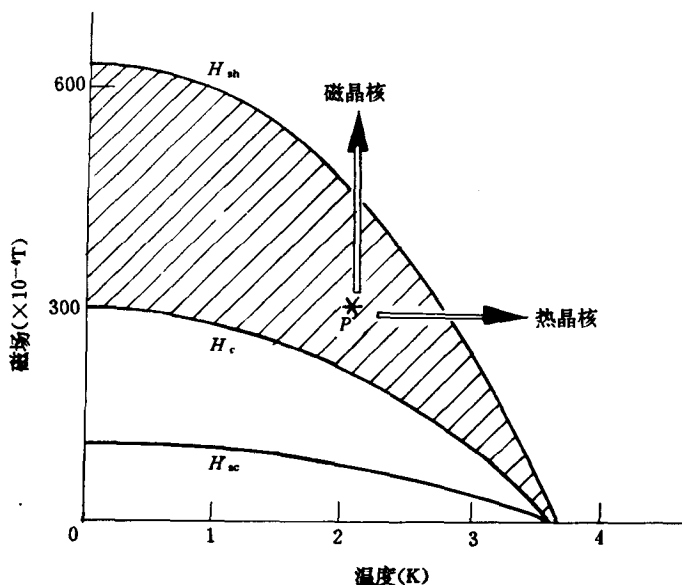


图 1.2 I 类超导体球形微颗粒超导体的相图^[4]

的理论基础。

II 类超导体有两个临界磁场即 H_{c1} 和 H_{c2} ，当外磁场 H 小于 H_{c1} 时它同 I 类超导体一样，体内没有磁力线穿过；当外磁场 H 大于 H_{c1} 、小于 H_{c2} 时，II 类超导体处于超导态和正常态