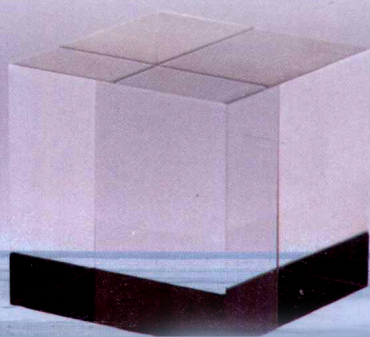


高纯金属材料

High-pure Metallic Materials

郭学益 田庆华 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 提 要

本书是一本系统介绍各种有色金属、黑色金属和半金属高纯材料的专业书籍。全书共十章,从介绍高纯金属材料的定义、基本物理化学性质和常用提纯制备方法出发,全面详尽地阐述了高纯重有色金属、高纯轻有色金属、高纯稀有金属、高纯贵金属、高纯黑色金属和高纯半金属的性质、应用和制备工艺,涵盖了常见的数十种金属材料。本书还集中介绍了高纯水和高纯试剂的制备方法,及高纯金属材料的分析方法。本书旨在突出科学性、系统性、新颖性和实用性,内容丰富、层次合理。

本书适用于冶金、材料、化工等专业的研究人员及相关专业的技术人员参考使用。也可作为高等院校冶金、材料类专业本科生、研究生的专业课教材。

图书在版编目(CIP)数据

高纯金属材料/郭学益,田庆华编著. —北京:冶金工业出版社, 2010. 1

ISBN 978-7-5024-5086-1

I. ①高… II. ①郭… ②田… III. ①高纯金属—金属材料 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 213180 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 张媛媛 版式设计 孙跃红

责任校对 侯 珊 责任印制 牛小波

ISBN 978-7-5024-5086-1

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 1 月第 1 版, 2010 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 23.5 印张; 564 千字; 361 页; 1-2000 册

69.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序

人类进入 21 世纪后，科学技术以前所未有的速度突飞猛进地发展，在世界范围内出现了对高纯金属材料制备和应用技术的研究热潮，我国科技工作者和产业界也对这一领域给予了足够的关注和积极的响应。现在，高纯金属材料以其特异的性能展示了广阔的应用前景，成为材料科学与工程领域发展最为活跃的重要分支之一，它为传统材料的提质升级提供了新的机遇。在这种形势下，人们迫切需要系统了解和掌握高纯金属材料的科学知识。由郭学益教授等完成的《高纯金属材料》正是适应这种需要而编著出版的。

该书作为一部系统介绍高纯金属材料的学术专著，详尽阐述了各种有色金属、黑色金属和典型半金属高纯材料的特异性能、制备技术及应用领域，对高纯材料制备过程中所必需的洁净环境、高纯水及高纯试剂进行了论述，并介绍了高纯材料各种分析检测手段及先进设备仪器。该书集中反映了国内外高纯金属材料的最新科技成果，并展望了高纯金属材料未来的发展。

郭学益教授一直致力于有色金属材料冶金方面的科学研究及技术开发应用工作。近年来，他带领他的研究团队积极探索，不断实践，在有色金属提取及高纯金属材料制备领域开展了一系列的前沿性工作，取得了卓有价值的成果。并且结合所取得的研究成果，他为冶金材料及相关专业的研究生讲授了“高纯金属专论”课程，对高纯金属材料国内外进展有比较全面的了解和深入的认识，这些为该书的成稿及出版奠定了坚实的基础。

该书层次分明，内容翔实，不但具有很高的学术价值，而且对高纯金属材料产业实践具有实际意义。我相信，该书的出版对促进我国高纯金属材料研究开展、提升新材料产业水平和推动有色金属行业可持续发展具有积极的作用。

中国工程院院士



前 言

高纯金属是指当其纯度达到一定程度后的金属。金属高纯化后展示了与常规金属不同的非凡性能，因而应用到现代电子信息、航空航天、国防军工等领域，并推动这些行业的发展。同时，随着现代科学技术的发展，金属高纯化技术的不断创新，金属的纯度飞速提高，并展示出了金属高纯及超高纯化后的特异性能。现在，高纯金属的研究及应用成为金属材料领域最热门的研究方向，许多的科学研究者及工程技术人员正在从事这方面的研究和工程实践工作，每年有大量的论文文献发表。但是至今尚未有一本系统全面阐述高纯金属材料方面的专著，给广大从事这方面工作的专业技术人员带来了不便。

作者及其研究团队成员长期从事有色金属提取及其相关高纯材料的教学、科研和产业实践工作，多年来积累了大量的文献资料及研究成果。近年来，作者为冶金材料及相关专业的研究生讲授“高纯金属专论”课程，受到了大家的一致好评，并形成了专门的讲稿。为了与大家分享关于高纯金属材料的最新进展并展望其发展前景，现应冶金工业出版社之邀，作者及研究团队成员一道在原讲稿的基础上，做了大量系统深入的工作，终于奉献上《高纯金属材料》一书，希望能对从事相关研究及工程技术工作的专家学者有所裨益。

本书力求内容丰富全面，系统涵盖了各类有色金属及黑色金属高纯材料。非金属如硅、砷、锑、磷等，基于其高纯材料的广泛应用，也作为重要内容包括在本书中。全书共分10章，第一章为高纯金属材料概述，第二章为高纯金属材料提纯制备方法，第三章为高纯半金属的制备，第四章为高纯重有色金属，第五章为高纯轻有色金属，第六章为高纯贵金属，第七章为高纯稀有金属，第八章为高纯黑色金属，第九章为高纯水及试剂，第十章为高纯金属材料分析方法。

本书的编写过程中参阅了大量的文献及专著，许多关于高纯金属材料的最新成果都包含在本书的内容中，其中重要的资料都作为参考文献列于书中正文

之后。作者对长期从事高纯金属材料及相关研究的科技工作者表示崇高的敬意，对大家的无私奉献表示衷心的感谢。

本书是作者及研究团队集体智慧的结晶。作者研究室先后有数十位研究生参与了本书的文献资料收集及整理工作，特别值得提出的是李钧、梁莎、钟菊芽、梁永宣、郑磊、冯庆明、刘生长、李栋、肖彩梅、李菲、吴展、杨英等为本书的出版做了大量的工作，对他们的辛勤劳动表示诚挚的谢意。

感谢刘业翔院士为本书作序。感谢中南大学的领导、老师及同学们，他们一直的鼓励、支持和帮助，是我们力量之源泉。感谢冶金科学与工程学院大力支持及出版资助。

作者力图向大家奉献一本系统而完美的著作，但由于作者知识的局限性，加之高纯金属材料领域快速发展，很多新的知识和成果在本书中反映得还不够全面，一些应用领域也还未涉及，敬请读者原谅。书中不足之处，恳请读者赐教和批评指正。

郭学益 田庆华
2009年8月26日

目 录

1 高纯金属材料概述	1
1.1 高纯金属材料的定义及性质	1
1.1.1 高纯金属材料的定义	1
1.1.2 高纯金属材料的性质	3
1.2 高纯金属材料的应用及发展状况	4
1.2.1 高纯金属材料的应用	4
1.2.2 高纯金属材料的发展状况	7
参考文献	9
2 高纯金属材料提纯制备方法	12
2.1 物理提纯制备方法	12
2.1.1 偏析提纯法	12
2.1.2 区域熔炼提纯法	15
2.1.3 真空熔炼提纯法	18
2.1.4 真空蒸馏提纯法	21
2.1.5 固相电解法	23
2.1.6 悬浮区熔提纯法	26
2.1.7 氢等离子弧熔炼法	28
2.1.8 其他物理提纯法	29
2.2 化学提纯制备方法	31
2.2.1 电解精炼法	31
2.2.2 离子交换膜电解法	33
2.2.3 离子交换法	34
2.2.4 溶剂萃取法	35
2.2.5 萃取色层法	37
2.2.6 其他化学提纯法	39
参考文献	40
3 高纯半金属的制备	43
3.1 高纯硅	43
3.1.1 高纯硅概述	43
3.1.2 高纯硅原料的制备	48

3.1.3 高纯硅原料的提纯	51
3.1.4 高纯硅的制备	54
3.1.5 多晶硅的制备	62
3.1.6 单晶硅的制备	71
3.2 高纯砷	75
3.2.1 高纯砷的概述	75
3.2.2 高纯砷的制备	76
3.2.3 高纯砷烷的制备	79
3.3 高纯磷	83
3.3.1 高纯磷的概述	83
3.3.2 高纯磷的制备	85
3.4 高纯硒	95
3.4.1 高纯硒的概述	95
3.4.2 高纯硒的制备	96
3.5 高纯碲	99
3.5.1 高纯碲的概述	99
3.5.2 高纯碲的制备	99
参考文献	102
4 高纯重有色金属	105
4.1 高纯铜	105
4.1.1 高纯铜的性质	105
4.1.2 高纯铜的用途	105
4.1.3 高纯铜的制备	106
4.2 高纯锌	114
4.2.1 高纯锌的性质	114
4.2.2 高纯锌的用途	114
4.2.3 高纯锌的制备	116
4.3 高纯镍	120
4.3.1 高纯镍的性质	120
4.3.2 高纯镍的用途	120
4.3.3 高纯镍的制备	121
4.4 高纯钴	127
4.4.1 高纯钴的性质	127
4.4.2 高纯钴的用途	127
4.4.3 高纯钴的制备	128
4.5 高纯铈	134
4.5.1 高纯铈的性质	134
4.5.2 高纯铈的用途	135

4.5.3 高纯铈的制备	136
4.5.4 高纯铈化物的制备	139
4.6 高纯铋	141
4.6.1 高纯铋的性质	141
4.6.2 高纯铋的用途	142
4.6.3 高纯铋的制备	143
4.6.4 高纯氧化铋的制备	144
4.7 高纯锡	144
4.7.1 高纯锡的性质	144
4.7.2 高纯锡的用途	145
4.7.3 高纯锡的制备	146
参考文献	151
5 高纯轻有色金属	155
5.1 高纯铝	155
5.1.1 高纯铝的性质	155
5.1.2 高纯铝的用途	156
5.1.3 高纯铝的制备	157
5.2 高纯氧化铝	164
5.2.1 高纯氧化铝的性质	164
5.2.2 高纯氧化铝的用途	164
5.2.3 高纯超细氧化铝的制备	165
5.3 高纯镁	167
5.3.1 高纯镁的性质	167
5.3.2 高纯镁的用途	168
5.3.3 高纯镁的制备	169
5.4 高纯氧化镁	172
5.4.1 高纯氧化镁的性质	172
5.4.2 高纯氧化镁的用途	172
5.4.3 高纯氧化镁的制备	173
参考文献	175
6 高纯贵金属	178
6.1 高纯金	178
6.1.1 金属金概述	178
6.1.2 高纯金的制备	179
6.2 高纯银	184
6.2.1 金属银概述	184

6.2.2 高纯银的制备	185
6.3 高纯铂族金属	190
6.3.1 铂族金属概述	190
6.3.2 高纯铂族金属的制备	193
参考文献	201
7 高纯稀有金属	203
7.1 高纯镓	203
7.1.1 高纯镓概述	203
7.1.2 高纯金属镓的制备	204
7.2 高纯铟	209
7.2.1 金属铟概述	209
7.2.2 高纯铟的制备	212
7.2.3 高纯铟化合物制备	220
7.3 高纯锗	224
7.3.1 金属锗概述	224
7.3.2 高纯锗的制备	228
7.4 高纯钛	233
7.4.1 金属钛的概述	233
7.4.2 高纯钛的制备	234
7.5 高纯钨	238
7.5.1 金属钨概述	238
7.5.2 高纯仲钨酸铵的制备	239
7.5.3 高纯钨的制备	241
7.6 高纯钼	242
7.6.1 金属钼概述	242
7.6.2 高纯钼的制备	243
7.7 高纯钽	248
7.7.1 金属钽概述	248
7.7.2 高纯钽的制备	249
7.8 高纯铌	250
7.8.1 金属铌概述	250
7.8.2 高纯铌的制备	252
7.9 高纯稀土材料	255
7.9.1 稀土金属概述	255
7.9.2 稀土材料应用现状	255
7.9.3 稀土元素的分离和提纯	257
参考文献	264

8 高纯黑色金属	267
8.1 高纯铁	267
8.1.1 金属铁概述	267
8.1.2 高纯铁概述	267
8.1.3 高纯铁的制备	269
8.2 高纯锰	273
8.2.1 金属锰概述	273
8.2.2 高纯锰及锰氧化物的应用	274
8.2.3 高纯电解锰的生产	274
8.2.4 锰氧化物的制备	276
8.3 高纯铬	283
8.3.1 金属铬概述	283
8.3.2 高纯铬概述	283
8.3.3 金属铬的制备	283
参考文献	287
9 高纯水及试剂	289
9.1 高纯水	289
9.1.1 高纯水的概述	289
9.1.2 高纯水的传统制备方法	294
9.1.3 高纯水的制备新方法	320
9.2 超净高纯试剂	326
9.2.1 超净高纯试剂概述	326
9.2.2 超净高纯试剂的制备方法	331
参考文献	334
10 高纯金属材料分析方法	337
10.1 高纯金属材料分析概述	337
10.1.1 高纯金属材料的纯度分析原则	337
10.1.2 高纯金属材料纯度的玷污控制	337
10.2 高纯金属的分析方法	341
10.2.1 高纯金属材料纯度的化学分析方法	342
10.2.2 超纯金属材料纯度的物理测定方法	357
参考文献	358

1 高纯金属材料概述

高纯金属材料是指化学纯度高、杂质含量少、与常规金属相比具有优异物理化学性能的新型材料；是在超净环境下，利用现代冶金技术获取的高纯净化的材料（介于金属和非金属的高纯半金属，包括硼、硅、磷、砷、碲、硒等在本书中统称为高纯金属材料）。高纯金属材料是现代高新技术发展的综合产物，是衡量一个国家或地区高新技术发展水平的重要指标。

近年来，随着电子、光学和光电子等尖端科学技术的发展，提高金属材料的纯度以获得新的性能已成为现代材料行业发展的重要方向。从某种程度上来说，高纯金属材料可以认为是现代高新技术发展的基础。

1.1 高纯金属材料的定义及性质

1.1.1 高纯金属材料的定义

高纯金属材料的定义是动态发展的，人们对金属纯度的概念在不同的年代、对于各种不同的金属和使用目的以及材料高纯化制备技术水平和分析检测精确度的不同有着不同的认识。随着金属材料提纯技术和检测水平的提高，金属的纯度在不断提高，如在过去高纯金属材料的杂质含量为百万分之几（ppm 级），而目前超纯半导体材料的杂质含量仅为十亿分之几（ppb 级），甚至发展到万亿分之几（ppt 级）。同时，各个金属的提纯难度不尽相同，如半导体材料中硅、锗 99.999999% 以上称为高纯，而难熔金属达 99.9999% 已属超高纯。但总的来说，金属材料的纯度是相对于其杂质含量而言的。

金属材料中的杂质在广义上包括两大类。第一类是化学杂质，比如高纯铜材料中的微量 Pb、Ni、Co、Fe 等就属于此类；另一类就是物理杂质，这主要是指金属材料晶体的缺陷，按几何形式可将这类物理杂质晶体中的缺陷分为点缺陷、线缺陷、面缺陷和体缺陷。其中点缺陷包括空位、错位原子、变价原子和包心等。最重要的线缺陷是位错。面缺陷反映在堆积层错、晶粒和双晶的界面、晶畴的界面上。体缺陷反映为晶体中出现空洞、包裹物、沉积物等。物理杂质对高纯金属材料的力学性能以及电、磁、光等性能均有很大的影响，但只有在金属材料的化学杂质含量极低时，物理杂质才具有真正的意义。因此，在实际应用中我们通常用金属材料的化学杂质含量作为其纯度的标准，即用质量分数表示，如式 1-1 所示，其常用 nine 的第一个字母 N 来表示，如 99.999% 用 5N 表示，99.9999% 就用 6N 表示。

$$Q = \frac{M - m}{M} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 Q ——金属材料的纯度；
 M ——金属材料的质量；

m ——金属材料中的化学杂质的总质量。

高纯金属材料的纯度除用质量分数表示外，用得较多的就是金属的剩余电阻率 RRR 和纯度级 R (rein-heitgrad)。其表达式分别为式 1-2 和式 1-3。

$$RRR = \frac{\rho_{298K}}{\rho_{4.2K}} \quad (1-2)$$

式中 ρ_{298K} ——金属材料常温下的电阻率；

$\rho_{4.2K}$ ——金属材料在液氮 4.2K 下的电阻率。

$$R = - [\lg(100 - W)] \quad (1-3)$$

式中 W ——主体金属含量。

根据 Mathiessen 定则的描述，金属中多种散射机制导致的电阻率是各种散射机制对应的电阻率之和，对高纯金属而言，由于含有杂质元素原子的浓度很小，以致可略去它们之间的相互作用，其电阻率可由式 1-4 来表示。

$$\rho = \rho_0 + \rho_1(T) \quad (1-4)$$

式中 $\rho_1(T)$ ——声子贡献的电阻率，由点阵热振动对电子的散射决定，并随温度的降低而减小；

ρ_0 ——剩余电阻率，由静态点阵缺陷产生的电阻率，与温度无关。

因为高纯金属的 $\rho_1(T)$ 值与杂质含量近似无关，而与温度成正比，所以低温下 ρ_1 迅速降低， ρ_0 所占比重则迅速增加。在温度 T 趋近于 0K 时， ρ_1 趋近于 0，金属材料的总电阻率只与 ρ_0 有关，即与剩余电阻率相关。而剩余电阻率只依赖于金属中的各种物理和化学缺陷。因此，通常定义一个参量 RRR 来描述高纯金属的纯度，其定义为室温下样品电阻率与液氮温度下电阻率之比，即式 1-2。

对于高纯半导体材料纯度的表示，还可用载流子浓度 (cm^{-3}) 和低温迁移率 ($\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s}^2)$) 表征其纯度。

对高纯金属材料纯度的定义国际上目前尚无统一的标准，本书所提及的金属纯度是一个相对的定义，反映了现阶段高纯金属材料制备技术上所能达到的标准。目前，高纯金属材料产品的标准纯度见表 1-1。

表 1-1 目前高纯金属材料产品的标准纯度

标准纯度	元 素
7N	Ga, Hg, In
6N	Ag, Al, As, Bi, Cd, Ge, P, Sb, Se, Si, Sn, Pb, Tc, Zn
5N	Au, B, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pd, Pt, Rh, W
4N	Be, La, Mn, Mo, Nb, Re, Se, Ta, Zr
3N	Ce, Cs, Dy, Er, Eu, Gd, Hf, Ho, Ir, K, Li, Lu, Mg, Na, Nd, Os, Pr, Rb, Ru, Sm, Tb, Ti, V, Y, Yb

现在已实用化或开发中的如 II 族、III 族、VI 族、V 族等族的高纯金属的纯度可达到很高的水平。但是这种标准纯度，例如 6N 纯度的金属材料，只表示程度的意义，实际上，化学纯度为 6N 并不是保证纯度，而是定量分析金属中所含的指定杂质，减去其质量值，

以质量分数表示,即6N。而从一些国家的各生产厂家的样本发现,分析的指定杂质和杂质数量大多不一样。比如纯度都为6N的超高纯锌,各厂家分析的指定杂质及杂质数量不完全一样,有的主要杂质是铅,而有的可能是铜。这主要是由于各生产厂家采用的原料、工艺方法、分析方法等的不同所致。另外,一些厂家生产的高纯金属不分析气体杂质,如被称做5N的高纯铬,其中含氧0.5%,则纯度下降到99.5%。因而,市场上出售的某公司5N制品比其他公司6N制品纯度高或者在使用场合具有更好特性的情况也是常见的。甚至于相同生产厂家的高纯金属材料,由于购入时间不同,纯度不一样的情况也是有的。

综上所述,金属材料的高纯、超纯或超高纯目前尚无严格的定义,有人把部分金属的纯度,以5N表示高纯,6N表示超纯,7N表示超高纯,但这种划分不严格。为了叙述方便,本书将高纯、超纯和超高纯金属都称为高纯金属。

1.1.2 高纯金属材料的性质

目前,许多金属材料由于纯度不高,其许多优异的性能在应用中未充分表现出来。金属纯度的提高,将使其展示出新的性能。比如有些高纯化的金属材料,其耐腐蚀性和延展性有很大的提高,再结晶温度将降低,晶粒大小及磁性也会发生变化。表1-2列出了常用的高纯铝的主要特性。

表 1-2 高纯铝的主要特性

特 性		铝纯度/%	数 值
熔点/℃		99.996	660.24
线膨胀系数/℃ ⁻¹		99.996	23.86×10^{-6}
热导率(25℃)/W·(m·K) ⁻¹		99.996	237
比热容(100℃)/J·(g·℃) ⁻¹		99.996	0.93
相对铜的导电度(25℃)/%		99.996	64.94
电阻率/ $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	20℃	99.996	2.6548
	-269℃	99.992	3.3×10^{-3}
	-269℃	99.9975	1.3×10^{-3}
	-269℃	99.9999	1.0×10^{-4}
抗拉强度(冷加工材,90%)/MPa		99.999	120~140
延伸率/%		99.999	50~70
冷加工材(90%)的伸长率/%		99.999	8~12
反射率/%	$\lambda = 250\text{nm}$	99.996	85
	$\lambda = 1000\text{nm}$	99.996	95

从表1-2可以看出,与常规金属铝相比,高纯铝具有不同的特性。高纯铝比金属铝柔软、延展性好,但其力学性能劣化,强度和硬度随着纯度的提高而下降。

对于金属镁而言,由于纯度提高,高纯镁难于腐蚀,而金属镁易腐蚀。高纯高熔点的金属如钒、铌、钽、钼等容易加工,但其常规金属因性脆而难于加工。铁是大量被使用的金属,但是超高纯度的铁可以称做“稀有金属”,如除去铁中氧,室温下的高纯铁柔软程度接近铜,再结晶温度下降到200℃,便完全成为一种新铁,这种高纯铁耐腐蚀。如果金

属或合金的纯度得到进一步提高，将其中的杂质含量降到极低值，这些高纯金属材料将展示出意想不到的性质。

1.2 高纯金属材料的应用及发展状况

1.2.1 高纯金属材料的应用

随着金属材料纯度的提高，其化学、电学、光磁性能以及力学性能等得到增强。高纯金属材料更充分地显现出了金属固有的物理化学性能，作为重要的基础材料，在电子信息、航空航天、精密仪表等高新技术领域得到了广泛的应用和飞速的发展。高纯金属材料最初是应用于半导体工业，随着光电学、航天航空、原子能等领域的发展，这些高新行业对高纯金属材料的需求量越来越多，而且对高纯金属材料纯度的要求也越来越高。图 1-1 揭示了高纯金属材料与高新技术产业相互促进发展的关系。总之，高纯金属材料的应用范围必将随着科技的发展而越来越广泛，其所能达到的纯度也将越来越高。下面简要介绍了高纯金属在现代工业中的应用。

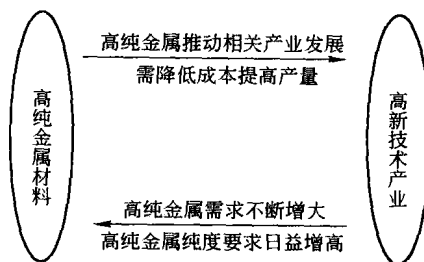


图 1-1 高纯金属材料与高新技术产业发展关系图

1.2.1.1 用于制备化合物半导体晶体或外延片

在半导体材料中如含有微量杂质元素，则半导体器件的电性能将受到严重影响。因而，半导体行业对其材料的纯度要求很高。由高纯金属制备的高纯化合物半导体晶体是一类重要的半导体基础材料，这些化合物半导体晶体具有独特的能带结构和性质，在微波器件、光电器件、霍尔器件和红外元件等方面得到了广泛的应用，且随着传统石化能源资源的枯竭、人类生存环境的日益恶化和能源需求的增长，开发利用太阳能这类清洁可再生能源成为世界各国的必然选择，而利用化合物半导体晶体的光伏发电器件是规模利用太阳能的主要手段，因此高纯金属在化合物半导体晶体材料制备方面的应用将迅速发展。表 1-3 列出了高纯金属材料制备的主要化合物半导体晶体材料及其应用。

表 1-3 高纯金属化合物半导体晶体材料及其应用

高纯金属	应用形式	用 途
Ga、P	GaP 化合物	用于可见光发光二极管，即发光显示元件等
In、Sb	InSb 化合物	用于红外探测器、霍尔器件、红外敏感器件、数字/模拟转换器、磁阻元件等
In、As	InAs 化合物	用于霍尔器件、光通信感光器、红外敏感器件、电磁变换器件、红外线检测元件和红外滤光片等
Ga、Sb	GaSb 化合物	用于光通信长波激光器、超晶格器件、雪崩二极管等
In、P	InP 化合物	用于光通信激光器、多光器件、二极管、光伏电池等
Ga、As、In、P、Al	GaAsP、InGaAs、AlGaAs、GaInP、GaInAsP、AlGaAsP、GaInAsAl 等	用于微波光电二极管、光通信双异质结激光器、高电子迁移率晶体管、异质结双级晶体管、应变层超点阵结构半导体等
Te、Bi、Sb	BiTe、BiSbTe 化合物	用于电子致冷、热电转换元件等

1.2.1.2 与氧、硫和氯制备高纯金属化合物

高纯金属与氧、硫等元素反应制备的高纯金属化合物是新材料领域一类重要的基础关键材料。这些高纯金属化合物是高性能陶瓷器件的基础原料或前驱体；是光致发光、电致发光等各类发光材料的基本组分；也是信息储存、吸波涂层和光催化等材料的主体。且随着科技的进步，这类高纯亚微米、纳米级金属化合物及其复合粉末材料将广泛应用于高性能陶瓷工业、微电子工业、航空航天、国防军工、化学化工等领域。表 1-4 列出了这类高纯金属化合物的主要用途。

表 1-4 高纯金属化合物及其主要应用

高纯金属	应用形式	用 途
Ga、In、Te、Bi、Sb、Pb、Zn、Ge、Si	Ga_2O_3 、 In_2O_3 、 TeO_2 、 Bi_2O_3 、 Sb_2O_3 、 PbO 、 ZnO 、 Ge_2O_3 、 SiO_2 等高纯氧化物	应用于高能物理、宇航技术、核技术、核物理与核医学等领域，主要制备磁泡存储器、固体激光器、微波多晶硅榴石、卫星元件、透明电极、摄像管光电导薄膜材料、近红外摄像管，可用作助溶剂、特种玻璃、防光剂、电子元件材料、特种光电子材料和压电与声光晶体材料等
Sb、Cd、Zn、Pb、As、Sn	Sb_2S_3 、 CdS 、 ZnS 、 PbS 、 As_2S_3 、 SnS 等高纯硫化物	用于摄像管靶面材料、透光材料、光敏电阻、紫外线探测器、红外线探测器、场致发光、可见光激光器和太阳能电池等
As、Sb、P、Sn、Ge、Si	AsCl_3 、 SbCl_3 、 PCl_3 、 POCl_3 、 SnCl_4 、 GeCl_4 、 SiHCl_3 、 SiCl_4 等高纯金属氯化物	用于制备半导体材料、化合物半导体外延材料等的重要原料，以及作为光纤通信材料、摄像管靶面材料和晶体管扩散源等

1.2.1.3 溅射靶材

高纯金属溅射靶材是一类重要的特殊功能材料，被广泛应用于集成电路、显示器件等微电子高科技行业。特别是近年来，随着电子、光伏电子等高新技术的进步，尤其是表面技术和薄膜材料的发展，高纯金属溅射靶材的种类越来越多，对其需求量也越来越大。表 1-5 列出了主要高纯金属材料在溅射靶材领域的应用，表 1-6 列出了我国生产的高纯金属溅射靶材，表 1-7 列出了日本生产的溅射靶材。

表 1-5 高纯金属材料在溅射靶材领域的应用

高纯金属材料	用 途
高纯 Al、Al-Si、Al-Cu、Al-Si-Cu 等	半导体用溅射靶材
氧化铟锡 (ITO)、 SnO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2	太阳能电池、各种光学膜等光学用溅射靶材
6N 和 7N 的高纯金属 Ga、In、Cu、Zn、Sb 和 Tb	大规模集成电路用溅射靶材
Co-Ni、Co-Cr、Te、Te-Se、Sb-Se、AlN	光磁盘、光盘、硬盘、薄膜磁头等光磁记录用溅射靶材
氧化铟锡 (ITO)、 ZnS 、 Al_2O_3 等	场致发光元件、液晶显示器、等离子显示板等显示元件用溅射靶材
Cr-Si、Ni-Cr-Al、Ni-Cr-Si 等	传感器、薄膜电阻、热磁头等电子器件用溅射靶材

表 1-6 我国生产的主要高纯金属溅射靶材

产 品	成 分	纯 度
高纯铝合金靶材	Al、Al-Si、Al-Si-Cu 等	5N
高纯金、金砷靶材	Au、AuAs	5N
高纯银靶材	Ag	4N
其他材质靶材	Pt、Ta、Ni、Cu 等	5N

表 1-7 日本生产的溅射靶材

用 途	靶 材
半导体光掩膜	Cr、Al、Mo、Ta、W、MoSi ₂ 等
硬磁盘	Co-Ni、Co-Ni-Cr、Co-Cr 等
光 盘	Te-Se、Se-Sb、Te-Bi、Te-Ge-Sn、Zn-Sb、Te 等
光磁盘	Fe-Co、Fe-Co-Tb、Fe-Co-Gd、Fe-Co-Gd-Tb、Tb、Gd 等
磁 泡	Fe-Al-Si、Fe-Ni、Co-Nb-Zr 等
透明导电膜	In-Sn(IT)、In-Sn ₂ O(ITO)、Zn、Sn、ZnO 等
显示元件	ZnS、ZnS-Mn、ZnS-RE、CaS、SrS 等
保护膜、导电膜	Al ₂ O ₃ 、SiO ₂ 、ZrO ₂ 、TiO ₂ 、Ta ₂ O ₃ 、Y ₂ O ₃ 、AlN、Si ₃ N ₄ 、Si 等
电阻膜	Ni-Cr、Ni-Cr-Si、Ni-Cr-SiO、Cr-Si、Ta-N、Ta-SiO ₂ 等
其 他	Ni、Cu、In、Pb、Pd、Ag、Au、Pr、Nb 等超导用氧化物等

1.2.1.4 电容器材料

高纯金属材料是制备高性能电容器的关键基础材料，其中用于制备电容器的主要材料是高纯铝和高纯钽。它们分别用于制备高充放电性能的铝电解电容器和钽电解电容器。大容量高性能铝电解电容器的阳极箔要求使用 99.9% 以上的高纯铝，目前掌握和能够生产这种高纯阳极用铝箔技术的主要有日本、法国、意大利、德国、美国、中国等少数几个国家，其中以日本电容器用铝箔的制造技术较为领先，产品的稳定性最好。表 1-8 列出了铝电解电容器用高纯铝箔规格和实用材料的分析结果。钽电解电容器制备材料要求钽粉的质量很高，如果钽粉中杂质含量高，这些杂质对钽电解电容器的击穿电压和漏电流均有不良影响，高纯钽粉可以很好地降低钽电解电容器的漏电流和提高其击穿电压，对钽电解电容器的生产合格率、电性能和可靠性都具有重要的意义。

表 1-8 高纯铝箔的化学成分和分析实例

(%)

材 料		Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Al
规 格	IN99	$\leq 40 \times 10^{-7}$						≥ 99.99
	IN90	$\leq 300 \times 10^{-7}$	$\text{Si} + \text{Cu} \leq 800 \times 10^{-7}$					≥ 99.9
分析实例	高压贯通型腐蚀箔用	7×10^{-7}	10×10^{-7}	33×10^{-7}	1×10^{-7}	0.5×10^{-7}	0.65×10^{-7}	99.994
	高压芯残型腐蚀箔用	51×10^{-7}	40×10^{-7}	18×10^{-7}	2×10^{-7}	0.5×10^{-7}	36×10^{-7}	99.987
	低压用 (99.9%)	40×10^{-7}	36×10^{-7}	26×10^{-7}	2×10^{-7}	6×10^{-7}	16×10^{-7}	99.985

1.2.1.5 制备高纯金属合金

制备优良使用性能的合金是高纯金属材料的一类重要应用。表 1-9 列出了常用来配制各种合金的高纯金属。

表 1-9 常见高纯金属合金

高纯金属合金	靶 材
金基合金	Au-Sb、Au-Ga、Au-Sn、Au-B-Ga、Au-B-Pd-Bi
银基合金	Ag-Au、Ag-Co-Sb、Ag-Cu-Zn、Au-Cu-Sn
铜基合金	In-Ga、In-Al、In-Sn、In-Sn-Pb、In-Ga-Sn、In-Ga-Au-Sb、In-Ga-Ag、In-Ga-Pb-Sb
铅基合金	Pb-Sb、Pb-Ag、Pb-Ag-Sn、Pb-As-Sb、Pb-In-Sn、Pb-Ag-Sb、Pb-Sb-Ga
锡基合金	Sn-Ag、Sn-Pb、Sn-P、Sn-As、Sn-Cd-Pb、Sn-Ag-Sb
铝基合金	Al-Si、Al-Cu、Al-Si-Ga
其他合金	Hg-Tl-In、Te-In、As-Sb、Zn-Hg、Au-Ge-Ni

1.2.1.6 其他用途

高纯金属是一类重要的新材料，除了以上用途外，高纯金属材料还具有一些特殊用途。例如，高纯铜箔由于对高频信号有良好的传导性能，因此在电子计算机、照相机、印刷、音响等行业有广泛应用；而纯度达 7N 的高纯铜，其维氏硬度在 42 以下，拉伸率达 30% 以上，与金的性质接近，因此可以用它来代替金作搭接导线，从而降低产品的生产成本。高纯铜可用作晶体管的阴极或封管材料、过载信号器与脉冲电极材料。高纯锌可用作滤光片或 X 光探头。高纯铟可用作光电倍增管电极、蒸发源和微光材料。高纯砷可用作红外线透射玻璃和氧族玻璃等。高纯镓、铟、碲、镉等还可用来制备高纯金属有机化合物 (MO 源)，是制造半导体激光器、探测器、光电阴极和大规模集成电路等复杂器件所用的新型光电功能材料的关键原料。

高纯金属材料用途多种多样，现已广泛应用于现代高新技术的各个领域，特别是其作为半导体行业发展的重要原料的作用不可取代。且随着科学技术的发展，高纯金属材料的应用领域必将扩大。

1.2.2 高纯金属材料的发展状况

“高纯物质”一词最早出现在 20 世纪 30 年代。第二次世界大战后，高纯金属材料的研究得到了迅速的发展，并取得了一系列成果。高纯金属材料是随着原子能研究的出现而发展起来的。在 50 年代初，开发了“区域熔炼”、“气相色谱”等可以把金属提高到前所未有的高纯度的高效提纯方法，高纯金属材料的研究和生产获得迅速发展。

1.2.2.1 国外生产状况

国外对高纯金属材料的开发研究较早，日本、美国、英国和俄罗斯等国家一直以来十分重视高纯金属材料的研制、生产和应用，其生产的高纯金属材料产品品种齐全、质量高、产量大。

日本：早在 20 世纪 40 年代，日本就对高纯金属材料进行了研究和生产，现在已是世界高纯金属材料的主要生产国。在日本生产制备高纯金属材料产品的主要公司有住友化学、同和矿业、古河矿业、三菱金属、信越半导体公司和高纯度化学研究所等。生产销售的高纯金属有 Ga、As、In、P、Sb、Si、Ge、Te、Cd、Se、Zn、Pb、Sn、Cu、Bi、Au、Ag 及其相关高纯材料等。日本既是高纯金属材料的生产大国，也是高纯金属材料消耗最多的国家。