



第2弹

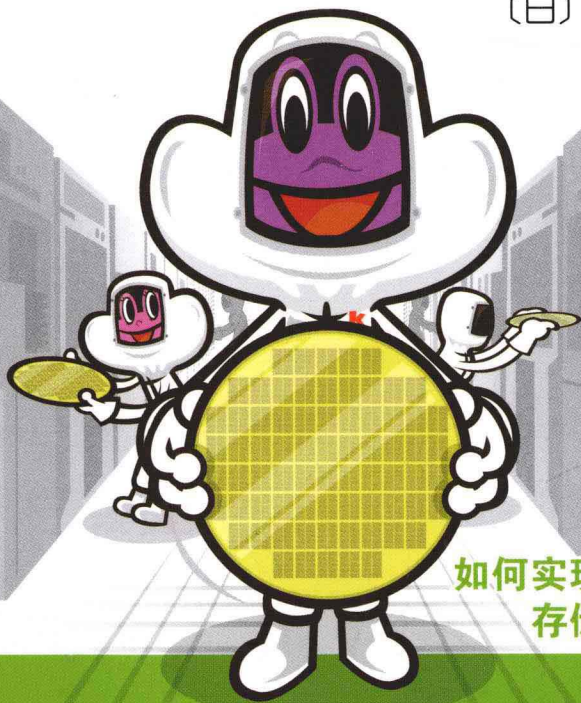
四色全彩



科技时代的先锋：

# 半导体 面面观

〔日〕菊地正典/著  
史蹟 譚毅/译



如何实现在方寸之间  
存储海量信息？

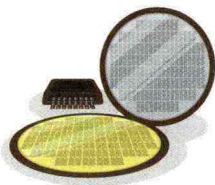
导体电学特性的基本知识

手机强大功能的CMOS的革新性

存储器等最新科技进展



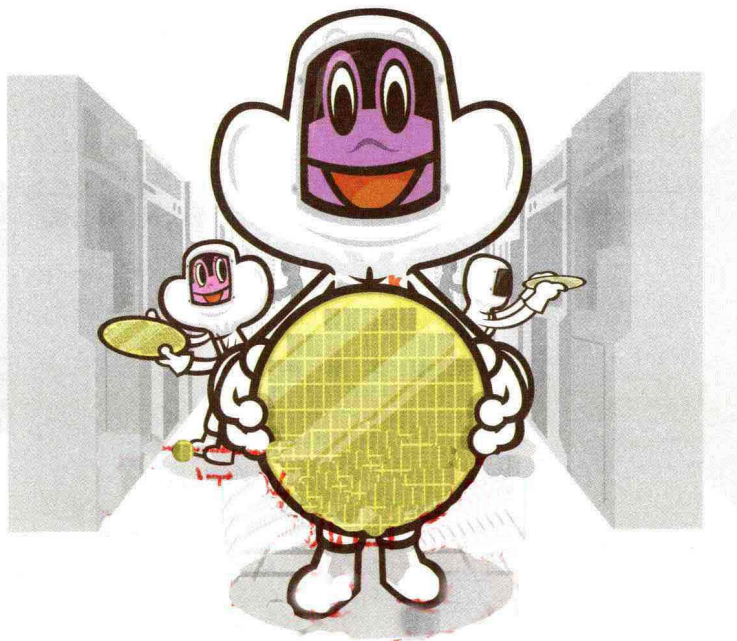
科学出版社



科技时代的先锋：

# 半导体 面面观

〔日〕菊地正典/著  
史蹟 譚毅/译



科学出版社  
北京

图字：01-2012-3181号

## 内 容 简 介

在我们生活的世界中，各种各样形形色色的事物和现象，其中都必定包含着科学的成分。在这些成分中，有些是你所熟知的，有些是你未知的，有些是你还一知半解的。面对未知的世界，好奇的你是不是有很多疑惑、不解和期待呢？！“形形色色的科学”趣味科普丛书，把我们身边方方面面的科学知识活灵活现、生动有趣地展示给你，让你在畅快阅读中收获这些鲜活的科学知识！

笔记本电脑中CPU的存储功能当然不必说了，从先进的智能家电到高性能的汽车，几乎所有的设备中都必不可少半导体器件和集成电路。正是技术人员们无穷的创意、智慧和辛勤，我们才享受到了如此尖端的科技，就让我们从这些丰富的彩图当中来了解一下半导体以及这其中凝结着的人类智慧吧！

本书适合青少年读者、科学爱好者以及大众读者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

科技时代的先锋：半导体面面观/(日)菊地正典著.史蹟,  
谭毅译. —北京：科学出版社，2012

(“形形色色的科学”趣味科普丛书)

ISBN 978-7-03-034713-8

I.科… II.①菊… ②史… ③谭… III.半导体-通俗读物

IV.047-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第121902号

责任编辑：唐璐 赵丽艳 / 责任制作：董立颖 魏 谨

责任印制：赵德静 / 封面制作：泊 远

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京美通印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年7月第 一 版 开本：A5(890×1240)

2012年7月第一次印刷 印张：6.5/8

印数：1—5 000

字数：207 000

定价：32.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

“Handoutai”no Kihon

Copyright © 2011 by Masanori Kikuchi

Chinese translation rights in simplified characters arranged with

SOFTBANK Creative Corp., Tokyo

through Japan UNI Agency, Inc., Tokyo

## 「半導体」のキホン

菊地正典 ソフトバンククリエイティブ株式会社 2011

### 著者简介

菊地正典

1968年毕业于东京大学工学部物理系。就职于日本电器株式会社后，一直从事半导体设备、制作工艺的开发。有了半导体开发和生产的经验之后，担任同一公司的半导体事业组主席技师长，NEC电设备主席技师长。从2002年起担任社団法人、日本半导体制造装置协会专业理事，2007年起任株式会社半导体能源研究所顾问。著作有《电学入门》、《最新半导体详解》、《图解电子电路》、《简明半导体》、《半导体用語辞典》(合著)(日本实业出版社)等。

坂本纪子 (Design Studio Palette) 美术指导。

野边Hayato 封面绘图。

保田大介 红谷桃衣 佐藤萌 高山真季子(株式会社JOLLS) 内文插图。

### 译者简介

史 蹟

1984年毕业于大连理工大学金属材料专业，1997年获东京工业大学金属工学博士学位，2004年任东京工业大学材料工学副教授，2012年4月升任教授至今。现从事金属物理、功能材料、结构分析等材料科学的研究。

譚 毅

1993年3月获东京工业大学金属工学博士学位，1997年与2001年分别在日本超高温材料研究所和美国加利福尼亚大学洛杉矶分校任研究员；2009年受聘于大连理工大学，任材料学院教授、能源研究院副院长至今。现从事冶金法提纯多晶硅材料、薄膜材料、高温材料等新能源材料的研究。





## 拥抱科学，拥抱梦想！

伴随着20世纪广域网和计算机科学的诞生和普及，科学技术正在飞速发展，一个高度信息化的社会已经到来。科学技术以极强的渗透力和影响力融入我们日常生活中的每一个角落。

“形形色色的科学”趣味科普丛书力图以最形象生动的形式为大家展示和讲解科学技术领域的发明发现、最新技术和基本原理。该系列图书色彩丰富、轻松有趣，包括理科知识和工科知识两个方面的内容。理科方面包括数学、理工科基础知识、物理力学、物理波动学、相对论等内容，本着“让读者更快更好地掌握科学基础知识”的原则，每本书将科学领域中的基本原理和基本理论以图解的生动形式展示出来，增加了阅读的亲切感和学习的趣味性；工科方面包括电子电路、半导体、太阳能电池、无线电、薄膜、金属等方面的内容，从基本原理、组成结构到产品应用，大量照片和彩色插图详细生动地描述了各工科领域的轮廓和特征。“形形色色的科学”趣味科普丛书把我们生活中和身边方方面面的科学知识，活灵活现、生动有趣地展示给你，让你在畅快阅读中收获这些鲜活的科学知识！

愉快轻松的阅读、让你拿起放不下的有趣科学知识，尽在“形形色色的科学”趣味科普丛书！

## 出场人物介绍

### ★ 青蛙：跳跳



本书的主角。擅长制作各种小玩意儿，对任何事物都抱有浓厚的兴趣。渴望着将来亲自制造出具有划时代意义的产品。

### ★ 向导



#### M先生 Tori先生

来自未来王国的两个人。憧憬硬汉生活的他们，穿着独特的长大衣，戴着太阳镜，实际上是喜欢盖饭的平民派。

## 前 言

半导体被应用于几乎所有的电子设备中，可以说半导体从根本上支撑着现代社会。例如，个人计算机、手机等便携设备，复印机等办公自动化设备，以及家电、游戏机、数码相机、导航系统、汽车、飞机、电车、IC卡等，不胜枚举。很难找到不使用半导体的电子设备，因此半导体被称为“产业的食粮”。

生活里不可或缺的半导体材料中最具有代表性的是硅，其在地壳中的含量位居第二，含量丰富，可以说是“天赐良材”。

这本书可以让更多人了解半导体，特别是关于硅和硅的集成电路（IC）。

为了让中学生也能很好地理解半导体的相关内容，本书以“说明尽可能简单通俗”为第一目标，同时注意“正确地把完整面貌呈现给读者”。

本书从“半导体究竟是什么”开始，进而说明“半导体有什么性质和功能、具有这些性质和功能的原因”、“由半导体构成的集成电路是什么”、“半导体和集成电路有哪些种类、是什么构造”、“集成电路是如何制成的”、“半导体和集成电路在哪些领域使用”，最后介绍了“半导体技术领域的前沿”。

同时专栏（COLUMN）等内容，也介绍了一些半导体产业的相关事项。如果读者通过这本书对半导体的兴趣和理解能稍有加深，笔者将不胜欣慰。

菊地正典



# 半导体 面面观

## 目 录

### 第 1 章

### 半导体基础

001

- 001 介于导体和绝缘体之间的物质——半导体 ..... 002
- 002 半导体也有很多种① 半导体的种类 ..... 004
- 003 半导体也有很多种② 半导体的骄子——硅 ..... 006
- 004 固态硅的三种形态 单晶、多晶、非晶 ..... 008
- 005 硅半导体内的电传导① 自由电子导电的n型硅 ..... 010
- 006 硅半导体内导电的物质② 空穴导电的p型硅 ..... 012
- 007 半导体中的电子和空穴是如何运动的? 能带和能带理论① ..... 014
- 008 半导体中的电子和空穴是如何运动的? 能带和能带理论② ..... 016
- 009 具有与硅不同特征的半导体 由2种以上元素构成的  
“化合物半导体” ..... 018

### COLUMN

### 氧化物半导体和有机半导体

020

### 第 2 章

### 半导体器件

021

- 010 能阻碍电流流动的电阻 半导体制造的“电阻元件” ..... 022
- 011 能暂时储存电的电容 半导体制造的“电容元件” ..... 024
- 012 使电流单向流动的器件 pn结二极管 ..... 026
- 013 把光变成电的半导体器件 光电二极管 ..... 028
- 014 把电变成光的半导体器件 发光二极管 ..... 030
- 015 通信和存储方面的广泛应用 半导体激光 ..... 032
- 016 晶体管是什么 代表性晶体管的种类 ..... 034
- 017 以电子作为载流子的MOS晶体管 n沟道型 ..... 036



018	以空穴作为载流子的MOS晶体管 p沟道型	038
019	让移动设备成为可能 CMOS	040
020	用pn结作为栅极的晶体管 JFET	042
021	利用肖特基栅极的晶体管 MESFET	044
022	利用电子与空穴的晶体管 双极型晶体管	046

COLUMN	晶体管的诞生	048
--------	--------	-----

### 第3章 半导体集成电路——逻辑电路 049

023	将电子元器件和线路制作在半导体电路板上 集成电路	050
024	各种各样的IC 根据结构、基板、信号不同而不同	052
025	芯片上能够装多少个元件 根据集成度进行的MOS-IC分类	054
026	IC都有什么样的功能 按功能对MOS-IC分类	056
027	逻辑电路的数学基础 布尔代数	058
028	逻辑电路的基本组成要素“门电路”① NOT电路	060
029	逻辑电路的基本组成要素“门电路”② OR电路	062
030	逻辑电路的基本组成要素“门电路”③ AND电路	064
031	进行加法运算的电路 加法电路	066
032	进行减法运算的电路 减法电路	068
033	比较判断信号大小的电路 比较电路和异或电路	070
034	实现作为计算机大脑功能的IC MPU	072
035	实现微机功能的IC MCU	074
036	处理数字信号的特殊处理器 DSP	076
037	根据使用者、用途不同而被专用化的IC ASIC	078
038	用户可自己变更功能的逻辑电路 可编程逻辑器件PLD	080
039	在IC芯片上实现系统功能 系统LSI	082
040	被称作电子眼的IC CCD	084

COLUMN	最早电子计算机	086
--------	---------	-----

## 第4章 半导体集成电路——存储器 087

041	暂时记录数据的电路 触发器和暂存器	088
042	记忆信息的半导体的结构	090
043	计算机的主要存储器 DRAM	092
044	不需要保存过程的高速存储器 SRAM	094
045	制造阶段记录数据的存储器 掩模式只读内存	096
046	切断电源也可以持续记忆的存储器 闪存	098
047	相同数量的存储单元记忆容量增加 多值内存	100

COLUMN	微型化的指导原理——定标原理	102
--------	----------------	-----

## 第5章 IC的开发和设计 103

048	IC开发流程 从市场调查到上市	104
049	IC的分层设计 从系统设计到版图设计	106
050	关于IC的元件尺寸与位置关系的规则 设计标准	108
051	设计IC的结构和电特性 设备设计	110
052	设计IC的制造方法 流程设计	112

COLUMN	半导体业的分化	114
--------	---------	-----

## 第6章 硅晶片的制作方法 115

053	硅元素无处不在	116
054	多晶硅是硅石经还原、转化、蒸馏而成的	118

055	使单晶硅棒生长的CZ法	120
056	单晶棒切片以及磨面加工	122
057	以毒制毒 晶体吸杂	124
058	硅晶片派生物 外延生长晶片和SOI	126

COLUMN	硅晶片的性能要求	128
--------	----------	-----

## 第7章 IC的制作方法①——前工序 129

059	IC的整体制造过程概观 前工序和后工序	130
060	原件形成前工序的前半部分① FEOL	132
061	原件形成前工序的前半部分② FEOL	134
062	配线形成前工序的后半部分 BEOL	136
063	导体、绝缘体、半导体的薄膜形成技术 成膜工程	138
064	把掩膜形式转变成晶片 光刻技术	140
065	材料膜腐蚀去除 蚀刻法	142
066	半导体里加入杂质 热扩散和离子注入	144
067	各种热处理的作用 推进、回流、退火	146
068	晶片表面完全平整化 CMP	148
069	清洁晶片 清洗	150
070	判定晶片上芯片的优劣 晶片检测和修饰	152

COLUMN	净化车间	154
--------	------	-----

## 第8章 集成电路的制作方法2——后工序 155

071	把晶圆切割成一个个芯片 切割	156
072	芯片封装 安装	158

073	芯片电极和包装接线柱的连接 金属丝焊接	160
074	芯片封装 密封	162
075	封装接线端识别IC 引线镀金、盖印、成形	164
076	包装的种类 通孔安装和表面安装	166
077	IC的形状和特性检测 检查和分类	168

COLUMN	IC的可靠性和筛选	170
--------	-----------	-----

## 第9章 半导体尖端技术 171

078	晶圆的大尺寸化 下一代晶圆是450mm	172
079	MOS晶体管高速化 应变硅技术	174
080	新结构MOS晶体管 被称作最终的晶体管结构	176
081	光刻技术的未来① 浸没式曝光和双重曝光	178
082	光刻技术的未来② EUV	180
083	光刻技术的未来③ ML2和纳米压印	182
084	万能的功能存储器可以实现吗① 功能存储器的候选技术	184
085	万能的功能存储器可以实现吗② 强电介质存储器和 磁性存储器	186
086	万能的功能存储器可以实现吗③ 相变存储器和可变电阻式 存储器	188
087	新材料引进带来的突破① 高-k栅极绝缘膜和金属栅极	190
088	新材料引进带来的突破② DRAM大容量膜和低-k层间 绝缘膜	192

COLUMN	“More Moore”和“More than Moore”	194
--------	--------------------------------	-----

参考文献	195
译后记	197



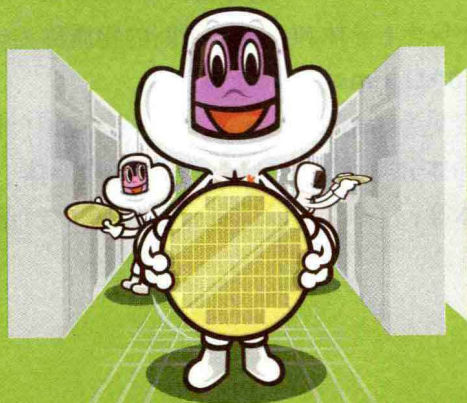
第

1

章

# 半导体基础

硅是具有代表性的半导体，  
本章将会说明半导体的各种性质、介绍化合物半导体，  
同时，本章会简单介绍以半导体理论基础为前提的能带理论。





物质分为易导电和不易导电两大类。能够很好导电的物质称为**导体**，几乎不导电的物质称为**绝缘体**。导体也称为导电体或良导体，代表性的导体有金、银、铜、铝等金属。绝缘体有聚乙烯、橡胶、硫、玻璃等。

作为物质的固有性质，导电性用**电导率**来表示。电导率用符号 $\sigma$ （西格玛）表示，单位为S/m（西门子/米）。此外，电导率的倒数 $1/\sigma$ 称为**电阻率**。电阻率用 $\rho$ （肉）表示，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ （欧姆·米）。电阻率 $\rho$ 是用来表示物质导电难易程度的物理量。

在单位横截面积、单位长度的试样两端加上电压 $V$ （伏特）时，若接线柱之间的电流为 $I$ （安培），有下式成立：

$$V = \rho I, I = \sigma V$$

根据电阻率 $\rho$ 的大小，大体可按以下方法将导体和绝缘体分类：

**导体：** $\rho < 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ， **绝缘体：** $\rho > 10^7 \Omega \cdot \text{m}$

另外，电阻率处于导体和绝缘体之间的物质称为**半导体**，即

**半导体：** $10^{-6} \Omega \cdot \text{m} \leq \rho \leq 10^7 \Omega \cdot \text{m}$

半导体的英文为semiconductor，意思是semi（半）+conductor（导体）。半导体分为元素半导体、化合物半导体、氧化物半导体以及有机半导体等，（002）以后将分别说明。表1给出了以电阻率分类的各种物质。



- 半导体电阻率的变化范围是 $0 \sim 10^{13}$ 。
- 半导体有单元素、化合物、氧化物、有机等许多种类。

表1 根据电阻率的物质分类

电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )												
导体			半导体				绝缘体					
$10^{-15}$	$10^{-12}$	$10^{-9}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	1	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$	$10^{15}$	$10^{18}$	$10^{21}$
(飞)	(皮)	(纳)	(微)	(毫)	(千)	(兆)	(吉)	(太)	(拍)	(艾)	(泽)	
银 (Ag)			$1.6 \times 10^{-8}$			元素半导体			聚乙烯			$10^7 \sim 10^{12}$
铜 (Cu)			$1.7 \times 10^{-8}$			锗 (Ge)	$6.9 \times 10^{-1}$		玻璃			$10^9 \sim 10^{11}$
金 (Au)			$2.2 \times 10^{-8}$			硅 (Si)	$4.0 \times 10^3$		氧化铝 ( $Al_2O_3$ )			$10^9 \sim 10^{12}$
铝 (Al)			$2.7 \times 10^{-8}$			化合物半导体			橡胶			$10^{10} \sim 10^{15}$
钨 (W)			$5.3 \times 10^{-8}$			氧化物半导体			金刚石			$10^{12}$
钴 (Co)			$5.8 \times 10^{-8}$			有机半导体			硬橡胶			$10^{13} \sim 10^{16}$
镍 (Ni)			$7.0 \times 10^{-8}$						硫 (S)			$10^{14} \sim 10^{15}$
铁 (Fe)			$1.0 \times 10^{-7}$						聚苯乙烯			$10^{15} \sim 10^{19}$
铬 (Cr)			$1.3 \times 10^{-7}$						聚四氟乙烯			$10^{15} \sim 10^{19}$
铅 (Pb)			$2.1 \times 10^{-7}$						石英 ( $SiO_2$ )			$10^{16}$
钛 (Ti)			$4.3 \times 10^{-7}$									
汞 (Hg)			$9.6 \times 10^{-7}$									

根据导电难易程度，处于导体和绝缘体之间的为半导体，电阻率为几  $\mu\Omega \cdot m \sim 10M\Omega \cdot m$  的半导体可分为元素半导体、化合物半导体、氧化物半导体、有机半导体4类。

导体中存在许多能够自由移动的电子，绝缘体中的电子不能自由移动，半导体中同时存在能够自由移动的电子和不能自由移动的电子。



## 半导体也有很多种①

### 半导体的种类

(001)中,我们已经对半导体是具有导体和绝缘体之间的电导率(或是电阻率)的物质进行了说明。半导体也是有很多种类的,在这里,我们看一下半导体的种类。

如表1所示,半导体分为无机半导体和有机半导体,无机半导体又分为元素半导体、化合物半导体、氧化物半导体。元素半导体,顾名思义,是由单一元素形成的半导体,包括硅(Si)、锗(Ge)、碳(C)、碲(Te)等。

化合物半导体是由两种以上元素组成的化合物形成的半导体。化合物半导体根据构成元素的数量分为二元化合物半导体、三元化合物半导体等。二元化合物半导体,如砷化镓(GaAs)、氮化镓(GaN)、磷化铟(InP)、碳化硅(SiC)等。三元化合物半导体,如铝镓砷(AlGaAs)等。

氧化物半导体是由某种金属的氧化物构成的半导体,如氧化锌(ZnO)、铟锡氧化物(ITO)、铟镓锌氧化物(IGZO)等。

有机半导体由有机材料构成,如并四苯、蒽等。

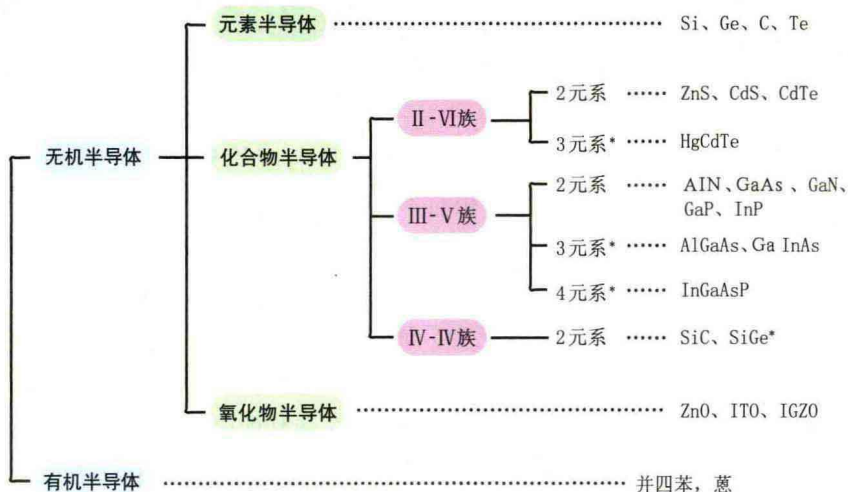
半导体也分为不含杂质(导电型杂质)具有半导体性质的**本征半导体**和掺入一定量杂质具有半导体性质的**杂质半导体**。

半导体这种物质除了电阻率介于导体和绝缘体之间以外,根据物质特有形态(如纯度、存在形状)和环境(如温度、压力、加速度)等的不同,电学性能也有很大变化。后续提到的很多电子装置正是很好地利用了半导体的这些性质。



- 半导体分为不含杂质的本征半导体和含有杂质的杂质半导体。
- 半导体根据状态和环境的不同,电学性能也有很大变化。

表 1 半导体的种类



(\*) 混晶或者固溶体：组成元素不规则地排列，全部均匀地混合在一起的固体，组成元素的组成比例可变

- 本征半导体 ..... 只由组成元素形成的半导体
- 杂质半导体 ..... 含有导电型杂质的半导体

半导体分为有机半导体和无机半导体。被广泛应用的无机半导体分为单元素半导体、化合物半导体、氧化物半导体。化合物半导体根据组成元素所处元素周期表中族和种类、数目进行详细划分。与这种分类方法不同的还可以将半导体分为不含导电型杂质的本征半导体和含杂质的杂质半导体



## 名词解释

ITO → Indium Tin Oxide, 铟锡氧化物

IGZO → Indium Gallium Zinc Oxide, 铟镓锌氧化物