



TUJIE  
XINPIAN  
JISHU

# 图解 芯片技术

田民波 编著



芯片人人都在用，谁也离不开

芯片是怎么生产的？方寸之间怎样集成亿万晶体管呢？

7nm，人类制造业的又一巅峰之作

世界上最大的芯片生产基地在中国

中国离自主研发芯片还远吗？



化学工业出版社



# 图解

# 芯片技术

TUJIE  
XINPIAN  
JISHU

田民波 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

针对入门者、应用者及研究开发者的多方面的需求,《图解芯片技术》在汇集大量资料的前提下,采用图文并茂的形式,全面且简明扼要地介绍芯片工作原理,集成电路材料,制作工艺,芯片的新进展、新应用及发展前景等。采用每章之下“节节清”的论述方式,左文右图,图文对照,并给出“本节重点”。力求做到深入浅出,通俗易懂;层次分明,思路清晰;内容丰富,重点突出;选材新颖,强调应用。

本书可供微电子、材料、物理、精密仪器等学科本科生及相关领域的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

图解芯片技术 / 田民波编著. —北京:化学工业出版社, 2019. 4

(名师讲科技前沿系列)

ISBN 978-7-122-33960-7

I. ①图… II. ①田… III. ①芯片-微电子技术-图解 IV. ①TN43-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第034682号

---

责任编辑:邢涛

文字编辑:陈喆

责任校对:宋玮

装帧设计:王晓宇

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京新华印刷有限公司

880mm×1230mm 1/32 印张9 $\frac{1}{4}$  字数294千字 2019年7月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

## 前言

半导体集成电路(IC)元件的核心是芯片,被称为“工业之米”。芯片已渗透到社会生活的各个领域,不仅机器设备,就连我们生活中不可或缺的电子手表、电冰箱、洗衣机、电饭锅、手机等也离不开芯片。

以大数据、云计算为支撑,人们正在逐步实现各种机器的智能化。这些机器具有人的感知,能收集、加工各种信息,主动地进行某种目的的操作,经过学习训练(机器学习)还能从事技术含量更高的工作等。而这一切,都是以各种芯片为基础的。

芯片大约以每3年一代(集成度翻两番)的速度日新月异地发展。尽管目前已有减速的迹象,但信息化、多媒体化、数字化、智能化的进程仍在继续。所有这些都依赖于电子技术及作为其核心的芯片技术的持续进展。

芯片除在装置、设备中扮演“部件”的角色外,其自身作为一个体系也在不断发展、进化。从这种意义上讲,将芯片形容为“进化中的细胞”或许更确切些。

时至今日,我国进口额最大的物资,不是石油、天然气,也不是粮食,而是芯片。我国每年芯片的进口额高达2600多亿美元,约折合1.7万亿元人民币。装备制造业的芯片相当于人的心脏,心脏不强,体量再大也不算强。我国要在芯片技术上加快实现重大突破,勇攀世界半导体科技高峰。

芯片是信息革命的核心技术和主要推动力,可以说,现在每一个信息产业的进步,都离不开芯片的发展。特别是当下的移动互联网和人工智能时代,表面上看是苹果手机、谷歌人工智能、互联网公司APP大行其道,但其背后,是许多芯片在支撑海量数据的计算、处理、传输和通信。

没有芯片的安全,就没有信息的安全。核心的技术是买不来的,必须依靠自主创新。经过多年努力,我国芯片研发已取得明显进步,一些领域有重大突破,但与西方国家相比,我们的芯片产业依然有很大差距。

目前,一方面芯片技术正日益广泛、深入和快速地应用到现代社会的各个领域,而另一方面,很多人对芯片技术的了解、对其本质的认识却一知半解,人云亦云。由于涉及大量尖端技术,难度极高,且芯片制作封闭于“与世隔绝”的超净工作间,普通人很难了解其中的奥妙。同时,由于多学科交叉,即使某一学科的专家,也难以做到“一专百通”。面对涉及面广、发展快、内容新而又相当深奥的半导体技术和芯片技术,迫切需要深入浅出、通俗易懂、内容广泛、学科交叉,既针对现实又照顾到历史由来和发展前景的科普读物。

《图解芯片技术》是“名师讲科技前沿”系列中的一册,其目的是全方位地介绍半导体及集成电路的基本知识。针对制造现场

出现的，生产者 and 使用者经常考虑的、想要知道的、经常听别人谈起的问题，简要地回答是什么和为什么，不仅能使读者入门，而且对于芯片的最前沿领域的现状和发展也有了解。本书可供从事芯片产业或关联领域，以及在芯片工艺、制造装置、制造材料等领域与技术或经营相关的读者学习借鉴。

针对入门者、应用者和研究开发者等多方面的需求，本书在汇集大量资料的前提下，采用图文并茂的形式，全面且简明扼要地介绍芯片工作原理，集成电路材料，制作工艺，芯片的新进展、新应用及发展前景等。采用每章之下“节节清”的论述方式，左文右图，图文对照，并给出“本节重点”。力求做到深入浅出，通俗易懂；层次分明，思路清晰；内容丰富，重点突出；选材新颖，强调应用。

本书得到清华大学本科教材立项资助并受到清华大学材料学院的全力支持。原稿承蒙蔡坚、吴华强教授审阅，并采纳了他们的宝贵意见，少部分内容还利用了吴华强教授的讲稿，在此表示衷心感谢。

芯片技术涉及电路设计、制作、封装、测试及材料等各个方面，作者水平有限，不妥之处，恳请读者批评指正。

田民波

# 目 录

## 第 1 章 集成电路简介

1.1 概述	2
1.1.1 从分立元件到集成电路	2
1.1.2 由硅圆片到芯片再到封装	4
1.1.3 三极管的功能——可以比作通过水闸的水路	6
1.1.4 n沟道MOS(nMOS)三极管的工作原理	8
1.1.5 截止状态下MOS器件中的泄漏电流	10
1.2 半导体硅材料——集成电路的核心与基础	12
1.2.1 MOS型与双极结型晶体管的比较	12
1.2.2 CMOS构造的断面模式图(p型硅基板)	14
1.2.3 快闪存储器单元三极管“写入”“擦除” “读取”的工作原理	16
1.3 集成电路元件的分类	18
1.3.1 IC的功能及类型	18
1.3.2 RAM和ROM	20
1.3.3 半导体器件的分类方法	22
1.4 半导体器件的制作工艺流程	24
1.4.1 前道工艺和后道工艺	24
1.4.2 IC芯片制造工艺流程简介	26

### 书角茶桌

集成电路发展史上的十大里程碑事件	28
------------------	----

## 第2章 从硅石到晶圆

2.1 半导体硅材料	36
2.1.1 硅是目前最重要的半导体材料	36
2.1.2 单晶硅中的晶体缺陷	38
2.1.3 pn结中杂质的能级	40
2.1.4 按电阻对绝缘体、半导体、导体的分类	42
2.2 从硅石到金属硅,再到99.99999999%的高纯硅	44
2.2.1 从晶石原料到半导体元器件的制程	44
2.2.2 从硅石还原为金属硅	46
2.2.3 多晶硅的析出和生长	48
2.3 从多晶硅到单晶硅棒	50
2.3.1 改良西门子法生产多晶硅	50
2.3.2 直拉法(Czochralski, CZ法)拉制单晶硅	52
2.3.3 区熔法制作单晶硅	54
2.3.4 直拉法中位错产生的原因及消除措施	56
2.4 从单晶硅到晶圆	58
2.4.1 晶圆尺寸不断扩大	58
2.4.2 先要进行取向标志的加工	60
2.4.3 将硅坯切割成一片一片的硅圆片	62
2.4.4 硅圆片有各种不同的类型	64
2.5 抛光片、退火片、外延片、SOI片	66
2.5.1 抛光片和退火片	66
2.5.2 外延片	68
2.5.3 SOI片	70

### 书角茶桌

“硅是上帝赐予人类的宝物”	72
---------------	----

## 第3章 集成电路制作工艺流程

3.1 集成电路逻辑 LSI 元件的结构 .....	74
3.1.1 双极结型器件的结构 .....	74
3.1.2 硅栅 MOS 器件的结构 .....	76
3.1.3 硅栅 CMOS 器件的结构 .....	78
3.1.4 BiCMOS 器件和 SOI 器件的结构 .....	80
3.2 LSI 的制作工艺流程 .....	82
3.2.1 利用光刻形成接触孔和布线层的实例 .....	82
3.2.2 曝光, 显影 .....	84
3.2.3 光刻工程发展梗概 .....	86
3.2.4 “负型”和“正型”光刻胶感光反应原理 .....	88
3.2.5 光刻工艺流程 .....	90
3.2.6 硅圆片清洗、氧化、绝缘膜生长——光刻 .....	92
3.2.7 绝缘膜区域刻蚀——栅氧化膜的形成 .....	94
3.2.8 栅电极多晶硅生长——向 n 沟道源-漏的离子注入 .....	96
3.2.9 向 p 沟道的光刻、硼离子注入——欧姆接触埋置 .....	98
3.2.10 第 1 层金属膜生长——电极焊盘形成 .....	100
3.2.11 铜布线的大马士革工艺 .....	102
3.2.12 如何发展我们的 IC 芯片制造产业 .....	104
3.3 IC 芯片制造工艺的分类和组合 .....	106
3.3.1 IC 芯片制造中的基本工艺 .....	106
3.3.2 IC 芯片制造中的复合工艺 .....	108
3.3.3 工艺过程的模块化 .....	110
3.3.4 基板工艺和布线工艺 .....	112

### 书角茶桌

世界集成电路产业发展的领军人物 .....	114
-----------------------	-----



## 第4章 薄膜沉积和图形加工

- 4.1 DRAM 元件和 LSI 元件中使用的各种薄膜 ..... 120
  - 4.1.1 元件结构及使用的各种薄膜 ..... 120
  - 4.1.2 DRAM 中电容结构的变迁 ..... 122
  - 4.1.3 DRAM 中的三维结构存储单元 ..... 124
  - 4.1.4 薄膜材料在集成电路中的应用 ..... 126
- 4.2 IC 制作用的薄膜及薄膜沉积(1)——PVD 法 ..... 128
  - 4.2.1 VLSI 制作中应用不同类型的薄膜 ..... 128
  - 4.2.2 多晶硅薄膜在集成电路中的应用 ..... 130
  - 4.2.3 IC 制程中常用的金属 ..... 132
  - 4.2.4 真空蒸镀 ..... 134
  - 4.2.5 离子溅射和溅射镀膜 ..... 136
- 4.3 IC 制作用的薄膜及薄膜沉积(2)——CVD 法 ..... 138
  - 4.3.1 用于 VLSI 制作的 CVD 法分类 ..... 138
  - 4.3.2 CVD 中主要的反应装置 ..... 140
  - 4.3.3 等离子体 CVD (PCVD) 过程中传输、  
反应和成膜的过程 ..... 142
  - 4.3.4 晶圆流程中的各种处理室方式 ..... 144
- 4.4 IC 制作用的薄膜及薄膜沉积(3)——各种方法的比较 ..... 146
  - 4.4.1 各种成膜方法的比较 ..... 146
  - 4.4.2 热氧化膜的形成方法 ..... 148
  - 4.4.3 热氧化膜的形成过程 ..... 150
  - 4.4.4 用于 VLSI 的薄膜种类和制作方法 ..... 152
  - 4.4.5 用于 VLSI 制作的 CVD 法 ..... 154
- 4.5 布线缺陷的改进和消除——Cu 布线代替 Al 布线 ..... 156

4.5.1	影响电子元器件寿命的大敌——电迁移	156
4.5.2	断线和电路缺陷的形成原因以及预防、修补措施	158
4.5.3	Cu布线代替Al布线的理由	160
4.5.4	用电镀法即可制作Cu布线	162
4.5.5	铝用于IC芯片的优缺点	164
4.6	曝光光源不断向短波长进展	166
4.6.1	如何由薄膜加工成图形	166
4.6.2	几种常用的光曝光方法	168
4.6.3	光刻对周边技术的要求	170
4.6.4	曝光波长的变迁及相关的技术保证	172
4.6.5	光刻系统的发展及展望	174
4.7	光学曝光技术	176
4.7.1	图形曝光装置的分类及变迁	176
4.7.2	光曝光方式	178
4.7.3	近接曝光和缩小投影曝光	180
4.7.4	曝光中的各种位相补偿措施	182
4.8	电子束曝光和离子束曝光技术	184
4.8.1	电子束曝光技术	184
4.8.2	低能电子束近接曝光(LEEPL)技术	186
4.8.3	软X射线缩小投影(EUV)曝光技术	188
4.8.4	离子束曝光技术	190
4.9	干法刻蚀替代湿法刻蚀	192
4.9.1	刻蚀技术在VLSI制作中的应用	192
4.9.2	干法刻蚀与湿法刻蚀的比较	194
4.9.3	干法刻蚀装置的种类及刻蚀特征	196

4.9.4	干法刻蚀(RIE模式)反应中所发生的现象	198
4.9.5	高密度等离子体刻蚀装置	200

## 书角茶桌

	世界芯片产业的十大领头企业	202
--	---------------	-----

## 第5章 杂质掺杂——热扩散和离子注入

5.1	集成电路制造中的热处理工艺	208
5.1.1	IC芯片制程中的热处理工艺(Hot Process)	208
5.1.2	热氧化膜的形成技术	210
5.1.3	至关重要的栅绝缘膜	212
5.2	用于杂质掺杂的热扩散工艺	214
5.2.1	LSI制作中杂质导入的目的	214
5.2.2	杂质掺杂中离子注入法与热扩散法的比较	216
5.2.3	求解热扩散杂质的浓度分布	218
5.2.4	热处理的目的——推进,平坦化,电气活性化	220
5.2.5	硅中杂质元素的行为	222
5.3	精准的杂质掺杂技术(1)——离子注入的原理	224
5.3.1	离子注入原理	224
5.3.2	离子注入装置	226
5.3.3	低能离子注入和高速退火	228
5.3.4	离子注入的浓度分布	230
5.4	精准的杂质掺杂技术(2)——离子注入的应用	232
5.4.1	标准的MOS三极管中离子注入的部位	232
5.4.2	基本的阱构造及倒梯度阱构造	234

5.4.3	单阱形成	236
5.4.4	双阱形成	238
5.4.5	离子注入在 CMOS 中的应用	240
5.4.6	离子注入用于浅结形成	242

## 书角茶桌

“核心技术是国之重器”	244
-------------	-----

## 第 6 章 摩尔定律能否继续有效

6.1	多层化布线已进入第 4 代	246
6.1.1	多层化布线——适应微细化和高集成度的要求	246
6.1.2	第 1 代和第 2 代多层化布线技术 ——逐层沉积和玻璃流平	248
6.1.3	第 3 代多层化布线技术——导入 CMP	250
6.1.4	第 4 代多层化布线技术——导入大马士革工艺	252
6.2	铜布线的单大马士革和双大马士革工艺	254
6.2.1	Cu 大马士革布线逐渐代替 Al 布线	254
6.2.2	大马士革工艺即中国的景泰蓝金属镶嵌工艺	256
6.2.3	从 Al 布线+W 柱塞到 Cu 双大马士革布线	258
6.2.4	Cu 双大马士革布线结构及可能出现的问题	260
6.3	摩尔定律能否继续有效?	262
6.3.1	半导体器件向巨大化和微细化发展的两个趋势	262
6.3.2	芯片集成度不断沿摩尔定律轨迹前进	264
6.3.3	“摩尔定律并非物理学定律”，“而是描述 产业化的定律”	266
6.3.4	“踮起脚来，跳起来摘苹果”	268

6.4	新材料的导入——“制造材料者制造技术”	270
6.4.1	多层布线层间膜, DRAM 电容膜, Cu 布线材料	270
6.4.2	硅材料体系仍有潜力 (1)	272
6.4.3	硅材料体系仍有潜力 (2)	274
6.4.4	化合物半导体焕发活力	276
6.5	如何实现器件的高性能?	278
6.5.1	整机对器件的高性能化要求越来越高	278
6.5.2	器件的高性能化依赖于新工艺、新材料	280
6.5.3	要同时从基板工艺和布线工艺入手	282
6.6	从 100nm 到 7nm——以材料和工艺的创新为支撑	284
6.6.1	纯硅基 MOS 管和多晶硅 /high- <i>k</i> 基 MOS 管	284
6.6.2	金属栅 /high- <i>k</i> 基 MOS 管和鳍式场 效应晶体管 (FinFET)	286
6.6.3	90nm——应变硅	288
6.6.4	45nm——high- <i>k</i> 绝缘层和金属栅极	290
6.6.5	22nm——鳍式场效应晶体管	292
6.6.6	7nm —— EUV 光刻和 SiGe-Channel	294

## 书角茶桌

集聚最强的力量打好核心技术研发攻坚战 .....296

参考文献 .....297

作者简介 .....298

# 第 1 章

## 集成电路简介

- 1.1 概述
- 1.2 半导体硅材料——集成电路的核心与基础
- 1.3 集成电路元件的分类
- 1.4 半导体器件的制作工艺流程

### 书角茶桌

集成电路发展史上的十大  
里程碑事件

## 1.1 概述

### 1.1.1 从分立元件到集成电路

“集成电路”的英文名称为 Integrated Circuits，简称 IC。顾名思义，集成电路是集多个电路元件为一体，共同实现各种电气（电子）功能的组合电路。

稍为年长者，大都见过甚至亲手装过矿石收音机。为能收到电台的广播，要把分立的三极管、电阻、电容、二极管等插在印制电路板上，通过引线组成电路。

与此相对，现在最为普及的半导体集成电路是在一个硅单晶基片上做成多个具有三极管、电阻、电容等功能的元件，用铝布线、铜互联连接在一起，所起的作用可以与上述矿石收音机电路的作用完全相同，只是做成一体，又小又细，用肉眼看不到而已。

截至 2018 年，在工业生产的 IC 中，最小线宽已达 7nm（最先进技术为 3nm）。若以 90nm 技术为例，与矿石收音机时代相比，尺寸仅为原来的 5 万分之一，面积仅为 30 亿分之一，由此可以想象其集成度高到什么程度。

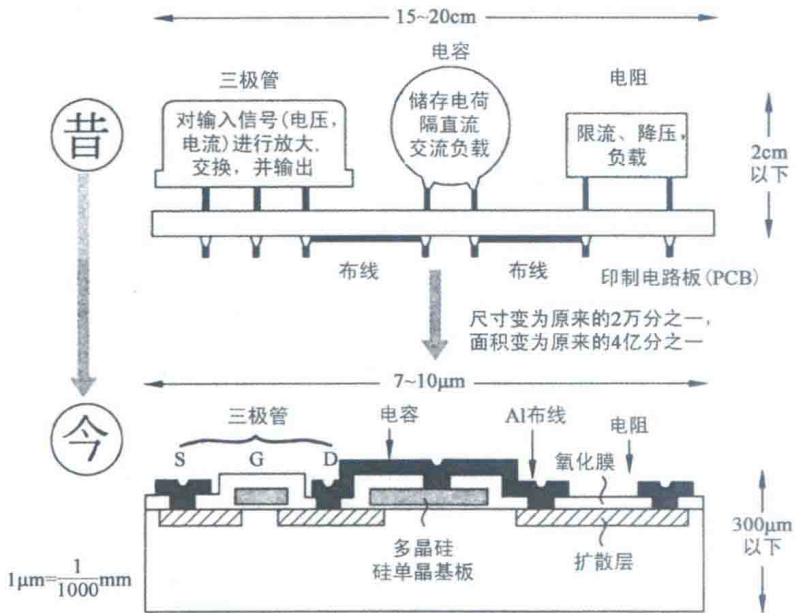
电路的高度集成，不仅极大地有利于电子设备的小型化，而且由于电路同时具备各种各样的功能，也有利于提高设备性能、降低功耗、增加可靠性。

我国是世界上最大的 IC 芯片市场，2017 年进口 IC 芯片 2600 亿美元（3770 亿块），年增 14.6%（10.1%），占大陆进口总额的 14.1%，平均进口单价为 0.69 美元（约 4.35 元人民币）。整体规模更是 1600 亿美元原油进口额的 1.6 倍以上。2017 年，全球半导体总销售额 4122 亿美元，同比增长 20.6%。其中 IC 芯片为 3402 亿美元，而中国进口了全球 76% 的芯片。

美国商务部 2018 年 4 月 16 日宣布，今后 7 年内，将禁止该国企业向中国电信设备制造商中兴通讯出售任何电子技术或通信元件。美国出口禁运触碰到了中国通信产业核心技术缺乏的痛点。如今，“禁令”已经解除，但它却成为一代人心中的痛。

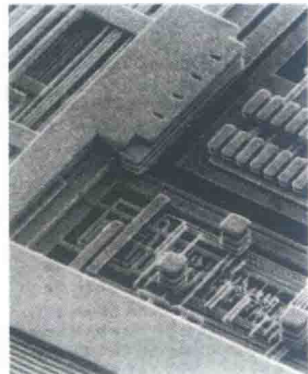
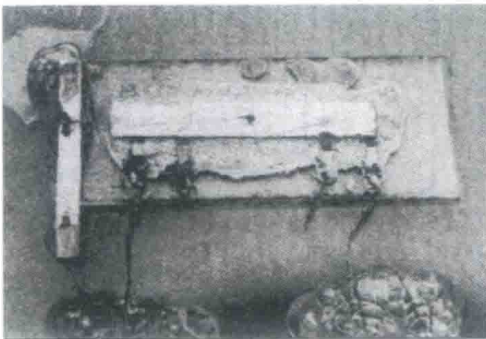
- (1) 目前 IC 实现产业化的特征尺寸（栅长或最小线宽）最前沿水平达到多少纳米？
- (2) 谈谈你对 IC 发展前景的认识。

集成电路的变迁及尺寸的比较



诞生于 1958 年的第一款集成电路

如今集成电路中的铜布线





### 1.1.2 由硅圆片到芯片再到封装

实际的硅 IC，一般要在—块很薄的圆盘形单晶硅片上同时做出很多个，再划分成一个—个的 IC 芯片，最后要做成封装器件，如图所示。

由于 IC 芯片小、薄而且脆，布线又细又密，因而芯片若不封装，直接与印制电路板电气连接十分困难。而且直接拿芯片操作也易产生裂纹甚至断裂等缺陷，因此封装是—个必不可少的。

封装是把 IC 芯片安置在基板上，经引线、键合、封接，最后封装成—个整体。封装具有电气特性保持、物理保护、散热防潮、应力缓和、节距变换、通用化、规格化等功能，涉及—薄厚膜、—微细连接、—多层基板、—封接封装等—几—大—类—关—键—技—术。

打开微机外壳，首先见到的可能就是这种被封装的 IC，常称为“封装芯片”。封装有各种形式，—般—都—有—多—条—“腿”（用于电气连接），容易使人联想起—蚰—蜒，故常有此称呼。实际上，IC 就隐藏在—其—中。

只要是电子产品，就离不开芯片。芯片通常分为—两—种：—种是功能芯片，比如我们常说的—中—央—处—理—器（CPU），就是带有计算功能的芯片；—另—种—就—是—存—储—芯—片，比如计算机里的—闪—存（Flash），—是—一—种—能—储—存—信—息—的—芯—片。

这两种芯片，本质上都是载有集成电路的硅片。怎么理解呢？就是我们在—块—硅—圆—片—上，按照设计刻出—些—凹—槽，在—凹—槽—里—填—充—一—些—介—质，从而—使—硅—面—上—形—成—许—多—晶—体—管、—电—阻、—电—容—和—电—感，在这—块—硅—圆—片—上—形—成—复—杂—的—电—路，再—经—划—片、—裂—片—得—到—一—个—一—个—的—芯—片，使—每—个—芯—片—实—现—一—些—特—定—的—功—能。所以，我们才会看到芯片放大图上有—那—么—多—弯—曲、—平—行—的—凸—起—和—纹—路。

听起来不难，做起来可不简单。芯片的诞生分—三—个—步—骤，分别是—设—计、—制—作—和—封—装，难度依次减弱。现在—全—球—芯—片—设—计—基—本—集—中—在—美—国，—制—作—集—中—在—中—国—台—湾—地—区、—韩—国—和—日—本。

现在看来，中国要真正做出自己的芯片，—顶—层—设—计（架构设计）和—光—刻—技—术—是—两—大—难—题。

- (1) 说明半导体器件从硅单晶、硅圆片到芯片再到封装的关系。
- (2) 给出电子封装的广义定义和狭义定义。
- (3) 封装有哪些功能？