



四色全彩



微小世界里的新天地：

# 神奇的薄膜

〔日〕麻苳立男/著

谭毅 史蹟/译



在原子级别的“方寸之间”创造未来  
电子产品制胜的关键——轻薄微小的薄膜叠层  
在等离子体与离子的微小世界中  
研制新产品



科学出版社



四色全彩



微小世界里的新天地：

# 神奇的薄膜

〔日〕麻苺立男/著

谭毅 史蹟/译



在原子级别的“方寸之间”创造未来  
电子产品制胜的关键——轻薄微小的薄膜叠层  
在等离子体与离子的微小世界中  
研制新产品



科学出版社

图字：01-2011-4315 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!

我们最新式的笔记本电脑和手机在变得越来越小的同时,性能却得到了几倍几十倍的提升。正是因为薄膜这种尖端的纳米技术,我们的生活中才有了大屏幕超薄液晶电视、超大容量存储媒介、越来越轻巧功能却越来越强大的各种电子产品。就让这本书为你生动地讲解一下这项支撑现代高科技社会的基础技术吧。

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

微小世界里的新天地:神奇的薄膜/(日)麻苒立男著;谭毅,史蹟译.  
—北京:科学出版社,2011.8

(“形形色色的科学”趣味科普丛书)

ISBN 978-7-03-031935-7

I. 微… II. ①麻…②谭…③史… III. 薄膜-普及读物  
IV. 0484-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 151009 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 / 封面设计:柏拉图创意机构

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

\*

2011年8月第一版 开本:A5(890×1240)

2011年8月第一次印刷 印张:6 1/4

印数:1—6 000 字数:148 000

**定 价: 32.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)



## 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；工科方面包括透镜、燃料电池、薄膜、金属、顺序控制等方面的内容，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！

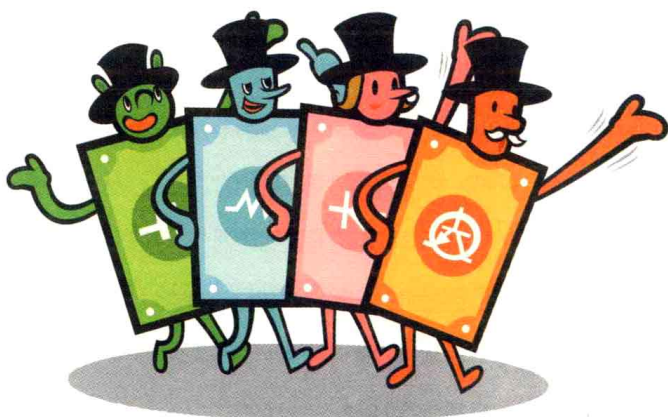
## 出场人物介绍

### ★ 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



电容 电阻 二极管 三级管

我们是“薄膜四兄弟”！别看我们外表很单薄，但我们将合力去开拓美好的未来！

## 前言

这个世界上一些异想天开的思维火花往往在三“上”之地迸发，即马背上、床榻上和马桶上。

相信很多人都会有这样的经验和体会：在登上电车的瞬间，忽然想到了某个问题的答案，禁不住“啊”地一声脱口而出；在床上一觉醒来，睁开眼睛伸个懒腰的时候，突然想通了一个久思不解的问题：“原来如此啊”；还有，如厕时也往往是我们恍然大悟、灵光闪现的时机。

但是如果不把这些恍然间悟到的事情及时记录下来，这些瞬间产生的火花就会立刻消失。这是以上三种情况的共同特征。

这种灵光一闪的现象之所以会产生，是因为当事人一直在围绕着某个主题不断地思索，这些问题始终萦绕在他们的脑海中。人们因为喜欢而从事这方面的工作，所以愿意穷其一生的智慧为之奋斗。一旦答案被找到，就会得到“会当凌绝顶”一样的极大满足感。人们正是因为喜欢，才会变得擅长。

在我们的日常生活中，很多人的脑子里都充斥着“薄膜”一词，他们围绕着薄膜夜以继日地开展工作，从事研究、学习和相互交流。可以说制作薄膜、使用薄膜以及从事薄膜相关产业的人遍布世界各地。

本书主要介绍了薄膜相关领域的前辈们留下的这一技术中的基础内容。如果读者希望更深入地了解和研究这一领域，可以查找卷末列出的参考书籍和参考文献，从中获取自己需要的相关信息。

对于书中较难理解的部分，作者根据自己的经验从身边的现象和事例入手进行说明，以帮助读者加深理解，可能有些地方会与物理学内容不一致，但还是请大家了解这些事例的列举仅仅是为了方便理解而已。

在本书编写过程中，我得到了各界朋友的悉心教诲和指导，并获得了大量宝贵的资料。在图书出版之际，谨向给予我帮助的各界人士表示深深的谢意。

麻蒨立男

## 暖瓶里藏着的奥秘

每个家庭都会使用暖瓶，尽管它没有热源，但是瓶内水的温度并不会很快地降低。那么暖瓶中究竟隐藏着什么奥秘呢？

如果将暖瓶打破，就会听见“嘭”地一声响，随后可以看见在破碎的玻璃内表面是闪闪发亮的。这些闪闪发光的地方镀有金属银薄膜，正是因为它的存在，热水中放射出来的热才会被反射回去，从而阻断了“辐射”导热。

发出“嘭”的声音是因为暖瓶内部空间为真空状态。真空同样也可以阻碍“热传导”，而使用玻璃是因为玻璃不易导热。因此，暖瓶中的奥秘就在于“薄膜”、“真空”以及“材料”等各部分的组合。

薄膜不仅仅被用在暖瓶中，它还可以用来模仿人类的各种感官，利用比人类记忆更发达、计算能力更强的集成电路制造出人工智能。我们相信在不久的将来，也许就会出现拥有这样创造力的人工智能。

前面一页是最先进的集成电路电子显微镜截面图，图的下半部分是超细的晶体管及电容器群，上面有很多层配线，它们使器件具有进行计算、记忆、数据处理等功能。这个多层结构就是利用薄膜技术制造出来的。

最下面的晶体管及电容器都是利用多项技术复合制造出来的，如果在它们的表面上直接放置一层配线的话，表面就会出现凹凸不平的现象，这时再进行多层加工的话，就会使凹凸程度加深，从而使多层化本身变得难以实现。在这种情况下，我们可以利用 CMP 法将凹凸处理平整之后再继续进行下一层加工，就可以完成多层结构的配线设置。这样即使进行多层加工，整体厚度也不会超过 1mm，因为每层厚度只有千分之几毫米。



# 神奇的薄膜

## 目 录

### 第 1 章 幸福生活从美丽与微观开始

- 001 展现缤纷色彩的颜料 用微小粉末描绘美丽世界 ..... 002
- 002 复制美丽——相片 彩色相片与数码相机 ..... 004
- 003 薄膜技术使机器人不断进化 利用薄膜材料与计算机  
进行精密制备 ..... 006
- 004 创造五种感官 视觉、听觉、嗅觉、味觉与触觉的创造 ..... 008
- 005 制造人工智能 ..... 010
- 006 我们身边的电子产品都在使用薄膜 ..... 012
- 007 利用不分解的压延技术,可以薄到什么程度 ..... 014
- 008 制造薄膜与制作精细图案 ..... 016

COLUMN 真空的含义 018

### 第 2 章 制备薄膜的重要环境条件——真空

- 009 真空——压强低于大气压的空间状态 ..... 020
- 010 真空的单位与压强的单位:帕斯卡(Pa) ..... 022
- 011 抽出和吸附——真空泵的分类 ..... 024
- 012 真空的分析和测量 真空计 ..... 026
- 013 真空装置的制造方法 ..... 028

COLUMN 质量瞬移 030

### 第 3 章 薄膜的制备

- 014 薄膜的形成——先气化,再固化沉积 ..... 032
- 015 四种气化源 ..... 034
- 016 单层生长与形核长大 薄膜的生长① ..... 036
- 017 薄膜内部缺陷 薄膜的生长② ..... 038
- 018 仅有薄膜还不够 薄膜与基板的结合 ..... 040



019	目标:单晶薄膜 .....	042
-----	---------------	-----

COLUMN	出身和教育同样重要	044
--------	-----------	-----

## 第4章 薄膜特有的性质

020	薄膜的密度和厚度会随时间减小 .....	046
021	薄膜电阻的变化比体材料大 .....	048
022	热稳定性降低 通过时效处理加以克服 .....	050

COLUMN	薄膜和基板的连接	052
--------	----------	-----

## 第5章 增强基板与薄膜结合的技术

023	制膜的基础:平整的基板 .....	054
024	前期处理:使基板表面完全裸露 .....	056
025	前期处理的最后工序:干燥 .....	058
026	制备附着强度更强的薄膜 .....	060
027	改变气化源、增加附着强度 .....	062
028	薄膜与基板的相合性更为重要 .....	064
029	着陆点:险峻的山地 .....	066
030	得到希望的薄膜组成 .....	068
031	制造用于大面积集成电路的非晶薄膜 .....	070
032	电迁移断线及其解决方法 .....	072

COLUMN	太阳之子——等离子体	074
--------	------------	-----

## 第6章 等离子体在薄膜制备中的重要性

033	等离子体的神奇之处及其应用 .....	076
034	通过放电获得等离子体 .....	078
035	低气压(良好真空)下的磁控放电 .....	080
036	产生薄膜用等离子体的五种方法 .....	082
037	薄膜制备的难题——尘埃 .....	084

COLUMN	望远镜和照相机视场变亮的奥秘	086
--------	----------------	-----



## 第7章 从古代沿用至今的蒸镀法

- |     |                             |     |
|-----|-----------------------------|-----|
| 038 | 蒸发源 .....                   | 088 |
| 039 | 加工等厚膜的方法 .....              | 090 |
| 040 | 离子镀的使用 .....                | 092 |
| 041 | 进一步发挥离子的作用 .....            | 094 |
| 042 | 防止蒸镀材料与薄膜间的成分变化 激光沉积法 ..... | 096 |
| 043 | 制作透明导电的薄膜 透明导电薄膜的蒸镀方法 ..... | 098 |

### COLUMN 活学活用

100

## 第8章 大面积气化源、适于批量生产的溅射法

- |     |                             |     |
|-----|-----------------------------|-----|
| 044 | 溅射率是由离子能量和薄膜材料的种类决定的 .....  | 102 |
| 045 | 溅射产生的原子遵循余弦法则且速度非常快 .....   | 104 |
| 046 | 溅射的主要方式 .....               | 106 |
| 047 | 以低电压、定压(高真空)为目标的磁控溅射 .....  | 108 |
| 048 | 支撑半导体 IC 高集成度发展的铝合金溅射 ..... | 110 |
| 049 | 利用反应溅射制作高性能电阻膜 .....        | 112 |
| 050 | 用溅射法制作氧化物高温超导膜 .....        | 114 |
| 051 | 低电压下制造透明导电膜(氧化物)ITO .....   | 116 |
| 052 | 薄膜加工的过渡——从平面成膜到微孔成膜 .....   | 118 |
| 053 | 利用离子进行超微细孔的填埋 .....         | 120 |
| 054 | 向高真空、无氩气溅射的过渡 .....         | 122 |

### COLUMN 神奇的过程——从气体到薄膜

124

## 第9章 由气体制作薄膜的气相沉积法

- |     |                             |     |
|-----|-----------------------------|-----|
| 055 | 气体向固体的转变:薄膜的气相沉积 .....      | 126 |
| 056 | 很多的 CVD 方法已被实用化 .....       | 128 |
| 057 | CVD 法制备 IC 中至关重要的硅系薄膜 ..... | 130 |
| 058 | 高清彩色电视用的硅薄膜 .....           | 132 |
| 059 | 高诱电率薄膜和低诱电率薄膜的制作 .....      | 134 |
| 060 | 用气相沉积法制备金属导体薄膜 .....        | 136 |

061	表面改性法制备氧化薄膜、氮化薄膜 .....	138
-----	------------------------	-----

COLUMN	从水(液体)中提取薄膜(固体)	140
--------	-----------------	-----

## 第 10 章 在液体中制作镀膜

062	镀膜技术的发展 .....	142
063	液相镀膜和真空薄膜中的核生长 .....	144
064	精密镀膜在电气领域的应用 .....	146

COLUMN	用世界上最小的刀进行切削加工	148
--------	----------------	-----

## 第 11 章 将薄膜加工成电路、晶体管等的蚀刻技术

065	蚀刻法制备图样:在正确的位置加工正确的形状 .....	150
066	用气体离子进行蚀刻 .....	152
067	最关键的一步——等离子体的制备 .....	154
068	反应气体是重要的 .....	156
069	决定蚀刻的条件 .....	158
070	利用极细离子束进行故障修理 .....	160
071	利用 CMP 进行平坦化处理 .....	162
072	无 CMP 的平坦化技术 .....	164

COLUMN	向伟大的梦想前进!	166
--------	-----------	-----

## 第 12 章 薄膜发展的无限可能性

073	操控原子,制造未来仪器 .....	168
074	薄膜——带动世界通信网络发展 .....	170
075	用微动同步器挽救生命 .....	172
076	生物计算机的使用 .....	174

参考文献	.....	177
------	-------	-----

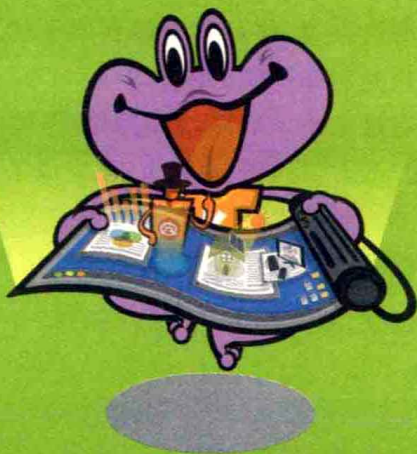
译后记	.....	180
-----	-------	-----



# 第 1 章

## 幸福生活从美丽与微观开始

世界上许多性能优异的物质都源自质地细腻的原材料（超微粒子）。  
薄膜技术就是以物质的最小单位——原子和分子为原材料，制造出各种器件与系统的技术总称。



## 展现缤纷色彩的颜料 用微小粉末描绘美丽世界

世界第一美女,因“微笑之谜”而誉满全球的“蒙娜丽莎”,出自意大利著名画家列奥纳多·达·芬奇笔下,可以说达·芬奇的这幅画创造了一个美的极致。

绘画是巧妙地利用色彩所创作出来的作品,而色彩就来源于被称为“颜料”的着色剂。本书的主题——“薄膜”,同样是创造出与我们生活息息相关的电子产品的“来源”。

在画布上绘画需要使用各种颜料,还有混合各种颜料的绘画工具。颜料是一种不易溶于水、酒精、油脂等各种溶剂的特殊物质,颜料中添加了各种无机物和有机物。绘画颜料、油墨以及化妆品等都是将被处理的具有颜料功能的微小颗粒(微小粉末)混入油脂、树脂、橡胶、有机溶剂中制造出来的。颜料最重要的功能就是可以提供给绘画者所希望的颜色(浓、淡、鲜艳),并能够长时间保持不变。浓艳的色彩大多情况下是通过将颜料微小粒子化得到了。不仅艺术领域如此,为了让彩色电视机等展现出浓艳的色彩,也需要根据颜料的微粒子化原理进行彩色滤光镜的研究和应用。如今我们已经可以实现10nm(纳米)级的微细化<sup>(参1)</sup>。对于本书的主要内容——薄膜来说,将材料分解到原子(0.3nm的长度;1nm=10<sup>-6</sup>mm)和分子量级是制作薄膜的根本。

大家小时候都有过像图2那样,利用刮膜作画的经历吧。先用蜡笔涂抹好多层,最后用“刮刀”将蜡笔色刮下,就完成了。同样的方法也被用在薄膜制品的制造上。制作薄膜时,如图2中的④所示,在上层绘画的同时不刮坏下层的情况下进行刮膜,可以进行100层的反复绘制。



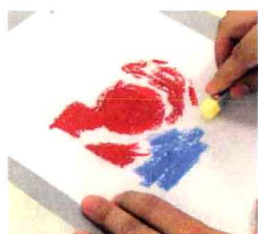
- 提供名画色彩的根本是颜料
- 为了使颜色浓烈鲜艳,需将颜料的粒子分解得非常小

图1 列奥纳多·达·芬奇的名画《蒙娜丽莎》



创作于1503~1505年  
(藏于巴黎卢浮宫美术馆)

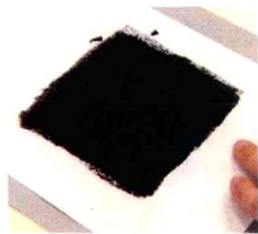
图2 刮膜画法



①使用明亮的颜色将画纸涂满,充分涂抹使白色部分被完全覆盖



②在这层颜色上面涂抹黑色或者茶色等浓暗的颜色



③充分涂抹使下层的颜色被完全覆盖



④用刮刀在涂了两层的蜡笔色上面进行绘画。随着上层颜色的刮落,下面的明亮颜色会逐渐显现

“Kurepasu”是樱花蜡笔株式会社的登记商标(樱花蜡笔株式会社提供)

### 名词解释

颜料的例子

白: 碳酸钙(微生物化石沉积物)、蛋壳及贝壳

红: 朱砂(红色硫化汞)、染色茜草(Rubia tinctorum, 植物)

蓝: 铜酞花青(有机物)

黄: 雄黄(砷化合物, 天然的黄色颜料)、钛黄( $\text{TiO}_2 \cdot \text{NiO} \cdot \text{Sb}_2\text{O}_5$  正方结晶),

相当于薄膜领域的铜和铝(导电材料)、石英(二氧化硅: 绝缘材料)、铁·镍(磁性材料)等。

如今已有超过100种材料被应用在薄膜技术中。

## 复制美丽——相片

### 彩色相片与数码相机

世界上只有一个真正的“蒙娜丽莎”，但使用了薄膜技术的电子元件及系统可以制造出几百万个甚至几亿个相同规格的产品来，这里应用的就是照相技术。使用彩色胶卷的照相技术在 20 世纪得到了空前的发展<sup>(参2)</sup>。拍摄细腻的照片，需要高性能的相机和高画质的胶卷。如图 1 所示，现在的胶卷是由超过 10 层的多层膜构成的，而各层中使用的银盐结晶粒的微细程度是最关键的。如图 2 所示，人们进行与此相关的研究来推进彩色胶卷的发展<sup>(参3)</sup>。事实上，薄膜技术的极限粒子是 0.1nm(构成物质的最小组成单位原子和分子的大小)。

在数码相机的新产品中，薄膜得到了越来越多的关注。图 3 是数码相机的示意图。因为单面镜头片反射入射光的 4%，那么双面就会反射 8%，这样通光量就会减少。如果有 8 枚镜头片的话，一半左右的入射光都会被反射，受光量只剩下一半。为了防止受光量不足，通常采用阻止光反射的薄膜。因为这种薄膜的存在，将镜头片倾斜一点的时候就会发现很漂亮的发光现象(在眼镜中被称为薄膜覆盖层)。这种薄膜使被拍摄对象的反射光几乎全部投向感光部。通过镜头片的图像会在摄像元件 CCD 图像传感器处转变为电子信号<sup>(参4)</sup>。CCD 本身也是利用薄膜技术经过几十回薄膜堆积而成的集成电路。进行高级图像处理的图像引擎搭载的薄膜半导体元件就利用了薄膜技术(图 3 的佳能相机就称为图像引擎)。这种技术是利用比 CCD 多 100 回以上的薄膜堆积而成的。按一下快门就可以轻松拍摄出漂亮照片的数码相机，随着薄膜技术的发展而得到了日新月异的改进。



- 应用照相技术可以制造很多尺寸相同的产品
- 薄膜被广泛应用在极微小粒子起关键作用的摄影领域

图1 彩色胶卷是超过10层的多层膜



图2 1993-2003年间照片粒子的微小化

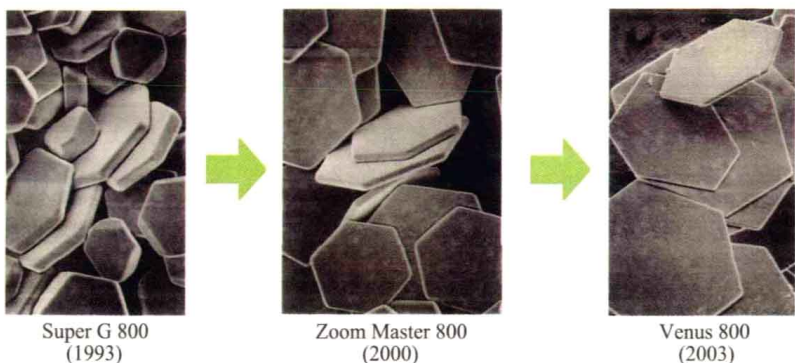


图3 数码相机的示意图



薄膜被广泛用在DIGIC(一般称图像引擎)中

(照片由佳能株式会社提供)



## 薄膜技术使机器人不断进化

### 利用薄膜材料与计算机进行精密制备

从东京市中心的饭田桥地铁站的售票口向右转,进入左侧的东京理工大学入学中心受理处,你就会发现一位面带微笑欢迎你的漂亮小姐。她会说:“我来为您提供博物馆等设施的接待服务”、她会跟人打招呼、懂得 300 个左右的单词以及 700 句左右的对话,也可以为你担任各个研究室的向导。这就是正在逐步完善的名叫“SAYA”(马来语中“我”意思)的机器人小姐。图 1 中展示了她歪着脑袋做各种可爱动作的样子。

对于那些腰部或膝盖有疾病,以及天生腿部残疾的人来说,每天工作搬运重物的工作实在是太辛苦了,我们能不能想出什么办法帮助他们呢?当你想掌握正确的高尔夫球击球方法时,如果有一种可以提供纠正你击球姿势的自动装置该多好啊!为了实现这些愿望,“肌肉套装<sup>®</sup>”(Muscle Suits,东京理工大学·小林研究室开发,注册商标)这个不错的想法(图 2)就应运而生了。

在火花飞溅的汽车生产车间里进行工作的焊接机器人、将集成电路嵌入印刷线路板中的机器人,还有我们耳熟能详的在国际空间站活跃工作的机器人。机器人被广泛应用于各个领域,薄膜同样被广泛地应用于机器人领域。

图 3 举了一个利用薄膜制成可变电阻的例子。根据安置在一端的电压  $V_0$ ,以及点  $P$  位置的电压  $V_P$  就可以知道点  $P$  前进的距离。在图 4 中同样可以通过电压  $V_r$  知道旋转角度。此外,对各种传感器信号进行处理的计算机就是采用薄膜技术制作的半导体集成电路制造而成的。

机器人离我们的生活越来越近了。使用这些机器人,利用人工智能对从传感器传出的信号进行判断并采取正确反应的系统也会随着薄膜技术的运用得到持续的发展。



- 机器人与我们的生活密不可分
- 薄膜被直接或间接地应用在机器人的各个部分