

Surface Acoustic Wave Devices  
in Telecommunications  
Modelling and Simulation  
声表面波器件模拟与仿真

Ken - ya Hashimoto 著  
王景山 刘天飞 孙 玮 译



A1020462

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2001-002号

图书在版编目(CIP)数据

声表面波器件模拟与仿真/王景山等译. —北京:国防工业出版社 2002.9

(先进通信技术译丛)

书名原文 Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications Modelling and Simulation

ISBN 7-118-02823-1

I. 声... II. 王... III. ①声表面波器件-模拟  
②声表面波器件-仿真 IV. TN65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 011724 号

Translation from the English language edition:

Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications by Ken-ya Hashimoto

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000

Springer-Verlag is a company in the Bertelsmann Springer publishing group.

All Rights Reserved.

本书中文版由 Springer 出版社授予国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11 1/8 294 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1-3000 册 定价:22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 前 言

早在 1885 年瑞利 (Lord Rayleigh) 就已经论述了声表面波 (Surface Acoustic Wave, SAW) 的存在<sup>[1]</sup>, 但是很长一段时间内它并没有引起工程师们的兴趣。1965 年, 这种情况大大改变了。怀特 (White) 指出, 通过沉积在压电基片上的叉指换能器 (Interdigital Transducer, IDT) 可以有效地激励和检测声表面波<sup>[2]</sup>, 这是因为可以用制造半导体器件的光刻技术, 大批量生产出质量很好的叉指换能器, 而且, 正确设计的叉指换能器使横向滤波器器件具有十分出色的性能。后来欧洲和美国都投入了大量人力、物力、财力研究开发军用和通信用 SAW 器件, 比如雷达中的延迟线和脉冲压缩滤波器, 时钟发生器中的高稳谐振器。专刊<sup>[3-5]</sup>和会议会报<sup>[6]</sup>上刊登了各种有关 SAW 器件的科技论文。但是, 随着以微型计算机为代表的数字设计和生产技术的建立和飞速发展, SAW 器件在军事上的重要性逐年下降, 大部分国家研究机构和大学的研究人员, 在下降或削减了他们的科研经费后, 离开了这个领域。冷战结束后, 许多公司的 SAW 研究人员也不得不离开。

从 20 世纪 60 年代开始, 日本的研究人员对 SAW 器件给予了高度重视, 但是主要集中在商业和通信领域。在 70 年代中期, 从电视中频滤波器<sup>[7]</sup>开始, 开发并生产了大量的各种滤波器和谐振器。此后, 由于价格下跌和市场份额的稳定, 使许多公司退出了竞争, 同样的原因使成功的公司也被迫削减了在这方面的研究开支。于是, 直到 20 世纪 80 年代中期日本的 SAW 研究工作也减少了。

在 20 世纪 80 年代后期, 移动通信市场的飞速发展再次改变了 SAW 的研究状况, 许多新人加入到幸存的公司中, 激烈的竞争

#### IV

又开始了<sup>[8]</sup>。在日本,目前有二十多家公司生产 SAW 器件。膨胀的市场也促进了研究工作的开展,在后来的十年里,涌现了许多富有创新性的工作成果。

这次发展克服了 SAW 器件原先的不足,比如插入损耗大、功率承受能力低等。SAW 器件现在已经能够用于移动电话的天线双工器,而移动电话天线双工器的各项指标要求都十分严格。

直到最近,研究人员还相信,批量生产的 SAW 器件实际应用频率范围限制在 1GHz 左右。然而,随着由 LSI 生产引入的微制造技术的快速发展和制造工艺的改进,批量生产的 SAW 器件其频率已经能达到 2.5GHz 左右<sup>[9]</sup>。

期望 SAW 器件的技术规格比一般迅速发展的数字通信技术规格还要严格,这并不是不合理的。

顺便介绍一下,我于 1977 年作为一名大学生进入 Chiba 大学, Yamaguchi 是我的指导老师,在以后的 20 年里,我在同一实验室继续工作。最近的主要课题是开发精确快速的 SAW 器件模拟器,因此有很多机会与对这方面工作感兴趣的研究人员讨论。讨论时他们常常问我这样的问题“有没有这方面的教科书?”或“这些观点是在哪儿报道的?”但是遗憾的是,我很难回答他们,因为大部分与 SAW<sup>[10~18]</sup>有关的书是在移动通信市场迅速发展之前出版的,它们主要是讨论横向滤波器,很少涉及到目前广泛使用的谐振器。另外,SH 型 SAW 器件和计算机模拟技术也极少提到。

本书的目的是介绍 SAW 技术最新的发展概况,比如 SH 型漏 SAW 谐振器的设计和模拟。虽然有些技术知识不是十分数学化,但是详细解释了精确模拟和设计中的各种理论基础。

本书并不是一本完全介绍 SAW 器件的教科书,它主要是补充其他文献没有充分讨论的课题。由于这个原因,许多重要技术,比如器件的制造、封装、计算、最优化设计等,本书都没有讨论。

本书尽量使读者能够很容易地理解书中的内容,甚至有时书中的解释和论述与原著有所不同。我毫不怀疑书中存在许多错误和出入。我欢迎任何评论、疑问和错误指正。当然,本书的大部分

内容不是我自己的成就,而是全世界所有 SAW 研究人员大量努力的结晶。虽然我怀疑我是否是写这样一本书的最佳人选,但准备工作中花费的大量心血使我这样去做了。

随后的早期创新工作是在 Chiba 大学 Masatsune Yamaguchi 教授的合作和指导下完成的。当然,我必须对他的支持和指导表示特别的感谢。不懈的努力和创新思想来自我们实验室的工作人员和学生。没有他们的支持,我们不能成功做好任何事情。

另外,我必须特别感谢 Linz 大学的 Robert Weigel 教授,他强烈建议我出版这本书并把我热情引荐给 Springer - Verlag 的 Merkle 博士。没有他们的理解和鼓励,这本书不可能出版。

感谢以 Tohoku 大学的 Emeritus Kimio Shibayama 教授和 Tokyo 技术研究社的 Yasutaka Shimizu 教授为代表的日本所有的 SAW 研究人员,感谢他们的指导和支持。另外,我还要感谢全世界的许多朋友,与他们富有成果的讨论和评论给我的激励和鼓励。

在他们当中,我要特别感谢 Fujitsu 实验室有限公司的 Yoshio Sato 教授,Fujitsu 多媒体器件有限公司的 Hideki Omori 先生和 Yoshiro Fujiwara 先生,Mitsubishi 材料有限公司的 Akihiro Bungo 先生和 Siemens 公司技术部的 Clemens Ruppel 博士,他们为本书提供了大量的实验数据。

我很高兴能对以下三位表示特殊的感谢。Tohoku 大学的已故教授 Hiroshi Shimizu 以身作则,教导我一名大学研究人员应该是怎样的。Motorola 有限公司的 Fred Cho 博士从我工作生涯的早期就鼓励我,并培养了我在这个世界上生存的能力。RF SAW 器件有限公司 Clinton Hartmann 先生则教我成为一名真正的工程师,与他的讨论一直很严肃,他渊博的知识和丰富的经验是给我的礼物,通过这些讨论我获得了许多的新思想。再次表示感谢。

最后,感谢我的父母,我的妻子 Kaoru 和女儿 Hirono,感谢他们不懈的支持、鼓励和理解。

Ken - ya Hashimoto

2000 年 1 月,于 Chiba 大学

## 译 者 序

声表面波是沿着弹性固体表面或界面传播的弹性波,声表面波技术是集声学、光学、电子学和半导体平面工艺相结合的一门新兴的边缘性科学。近年来,随着通信事业的发展,特别是半导体工艺水平的提高,使高频声表面波滤波器和谐振器的生产成为可能,其应用领域不断扩大,发展越来越快。从卫星通信、雷达制导、无线遥控、广播电视到移动通信、无绳电话等,都广泛的采用声表面波器件。由于其独有的高频特性,声表面波器件越来越得到重视。世界各国对声表面波器件的研究和应用发展迅速,发表了许多有价值的论文,但目前我国这方面的论著出版得较少。本书较为详细地介绍了声表面波的理论基础和各种模型,条理清晰、图文并茂,对从事声表面波器件研究和生产人员及大专院校学生,有较大的参考价值。因此,我们精心翻译了这本《声表面波器件模拟与仿真》,期望对大家有所帮助。

本书详细论述了声表面波器件的原理、设计和模拟仿真,通过理论分析,阐述了声表面波器件中反射栅、叉指换能器、基片材料等各部分的基本理论,介绍了滤波器、谐振器的原理和设计。

全书共分八章。

第一章提供预备知识,包括对体声波和声表面波的介绍。

第二章详细论述了反射栅,介绍了反射栅的原理、结构、等效电路等基本知识。

第三章讲述了声表面波器件的关键部分——叉指换能器(IDT),介绍了叉指换能器的原理、结构、等效电路模型、三角函数模型、外围电路的影响等。

第四章介绍了横向滤波器,讲述了加权设计原理、假响应等基

基础知识,并着重介绍了低插损横向滤波器。

第五章介绍了谐振器,包括单端谐振器、双端谐振器、 $\pi$ 型滤波器、梯形滤波器等。

第六章配以大量实例,介绍了基片材料的选择。

第七章介绍了声表面波器件的 COM 理论,并给出了相应实例。

第八章讲述了 SH 型声表面波器件,包括它的物理特性、COM 理论、近似频散关系的推导等。

参加本书编译的三位同志均是多年从事声表面波器件研究和生产的专业人员,在编译过程中得到了业内专家的热心支持,在此深表感谢。同时特别感谢曾令祉、王敬元两位专家在翻译过程中给予的大量帮助,以及王亚怀、刘卫东等同志为本书所做的工作。

由于译者水平有限,不足之处敬请广大读者批评指正。

译 者

# 目 录

第一章 体表波和声表面波 .....	1
1.1 体声波 .....	1
1.1.1 固体中的弹性波 .....	1
1.1.2 波矢和群速 .....	4
1.1.3 边界上体声波的特性 .....	5
1.1.4 衍射 .....	8
1.1.5 压电现象 .....	8
1.1.6 迅衰场 .....	11
1.1.7 波导 .....	12
1.1.8 波导界面上的特性 .....	14
1.1.9 开路波导 .....	16
1.2 半无限厚介质中波的传播 .....	17
1.2.1 L波和SV波的激励 .....	17
1.2.2 SH型波的激励 .....	19
1.2.3 漏波 .....	20
1.2.4 漏声表面波和非漏声表面波 .....	21
1.2.5 浅体声波 .....	22
参考资料 .....	23
第二章 栅 .....	25
2.1 基本结构 .....	25
2.1.1 基本原理 .....	25
2.1.2 反射中心 .....	26



3.4.3 能达到的带宽 .....	79
3.5 $p$ 矩阵 .....	80
3.5.1 概述 .....	80
3.5.2 用 $p$ 矩阵分析 IDT 的特性 .....	82
3.5.3 用 $p$ 矩阵分析单向换能器的特性 .....	84
3.6 体声波辐射 .....	86
3.6.1 相位匹配条件 .....	86
3.6.2 辐射特性 .....	88
参考资料 .....	91
<b>第四章 横向滤波器 .....</b>	<b>94</b>
4.1 基本原理 .....	94
4.1.1 加权 .....	94
4.1.2 加权 IDT 的基本特征 .....	98
4.1.3 外电路的影响 .....	100
4.2 横向滤波器设计 .....	106
4.2.1 傅里叶变换 .....	106
4.2.2 雷米兹交换法 .....	110
4.2.3 线性程序设计法 .....	112
4.3 假响应 .....	113
4.3.1 衍射 .....	113
4.3.2 体声波 .....	119
4.3.3 其它寄生效应 .....	123
4.4 低损耗横向滤波器 .....	124
4.4.1 多个 IDT 结构的低损耗横向滤波器 .....	124
4.4.2 单相单向换能器型横向滤波器 SPUDT .....	127
4.4.3 SPUDT 与反射器构成的低损耗横向滤波器 .....	129
参考资料 .....	133
<b>第五章 谐振器 .....</b>	<b>135</b>

2.2 周期性栅阵中波的特性 .....	27
2.2.1 布拉格反射 .....	27
2.2.2 能量存储效应 .....	31
2.2.3 Fabry-Perot 谐振器 .....	32
2.3 等效电路分析 .....	33
2.3.1 等效电路分析 .....	33
2.3.2 反射特性与参数的函数关系 .....	36
2.4 金属栅 .....	41
2.4.1 基本特性 .....	41
2.4.2 SAW 频散特性 .....	42
2.4.3 近似计算频散特性 .....	44
参考资料 .....	49
<b>第三章 叉指换能器 .....</b>	<b>50</b>
3.1 基本原理 .....	50
3.1.1 双向叉指换能器 .....	50
3.1.2 单向叉指换能器 .....	51
3.2 静态特征 .....	55
3.2.1 电荷分布 .....	55
3.2.2 机电耦合系数 .....	57
3.2.3 单元因子 .....	58
3.2.4 复杂的电极结构 .....	61
3.2.5 IDT 边界效应 .....	64
3.3 IDT 模型 .....	65
3.3.1 $\delta$ 函数模型 .....	65
3.3.2 等效电路模型 .....	70
3.3.3 其它模型 .....	72
3.4 外电路的影响 .....	73
3.4.1 概述 .....	73
3.4.2 史密斯圆图和阻抗匹配 .....	76

6.3.5	$\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ .....	200
6.4	薄膜 .....	201
	参考资料 .....	205
<b>第七章</b>	<b>耦合模型论</b> .....	<b>208</b>
7.1	基本原理 .....	208
7.1.1	共线耦合 .....	208
7.1.2	周期性栅阵的 COM 理论 .....	213
7.1.3	激励 .....	218
7.2	SAW 器件的 COM 理论 .....	218
7.2.1	推导 .....	218
7.2.2	其它形式的 COM 方程 .....	221
7.2.3	包括电极电阻的 COM 方程 .....	222
7.2.4	举例 .....	224
7.3	计算 COM 参数 .....	233
7.3.1	微扰理论 .....	233
7.3.2	波分析理论 .....	235
7.3.3	多指 IDT 的 COM 理论分析 .....	242
7.4	COM 模拟器 .....	248
7.4.1	SAW 器件模拟 .....	248
7.4.2	包括外电路的 SAW 器件模拟 .....	251
7.4.3	模拟结果 .....	253
	参考资料 .....	257
<b>第八章</b>	<b>SH 型 SAW 器件模拟</b> .....	<b>258</b>
8.1	SH 型 SAW 的物理性质 .....	258
8.1.1	引言 .....	258
8.1.2	SAW 在基片表面上的传播和激励 .....	259
8.1.3	SAW 在栅阵中的激励和传播 .....	264
8.1.4	IDT 的电学特性 .....	267

5.1 单端谐振器 .....	135
5.1.1 引言 .....	135
5.1.2 Fabry-Perot 模型 .....	139
5.2 假响应 .....	142
5.2.1 波束衍射和横向模 .....	142
5.2.2 横向模分析 .....	144
5.2.3 体声波辐射效应 .....	151
5.3 双端 SAW 谐振器 .....	154
5.3.1 概述 .....	154
5.3.2 Fabry - Perot 模型 .....	156
5.3.3 双模谐振器型滤波器 .....	158
5.3.4 串联谐振器型滤波器 .....	163
5.4 阻抗元件滤波器 .....	163
5.4.1 $\pi$ 形滤波器 .....	164
5.4.2 X形滤波器 .....	166
5.4.3 梯形滤波器 .....	168
参考资料 .....	176
<b>第六章 基片材料的选择 .....</b>	<b>178</b>
6.1 基片材料和器件特性 .....	178
6.1.1 定向 .....	178
6.1.2 基片材料和电极材料的影响 .....	179
6.2 用有效介电常数计算声学特性 .....	183
6.2.1 有效介电常数 .....	183
6.2.2 有效介电常数的近似表达式 .....	189
6.3 单晶 .....	190
6.3.1 石英 .....	190
6.3.2 $\text{LiNbO}_3$ .....	192
6.6.3 $\text{LiTaO}_3$ .....	195
6.3.4 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ .....	198

B.2.1	单电极栅阵的 Bløtekjær 理论 .....	321
B.2.2	斜向传播时的 Wagner 理论 .....	324
B.2.3	双电极栅阵的 Aoki 理论 .....	325
B.2.4	多电极栅阵 .....	330
B.3	有限膜厚金属栅的分析方法 .....	333
B.3.1	有限元法 .....	333
B.3.2	Bløtekjær 推广理论的应用 .....	336
B.4	栅阵中声波的激励和传播 .....	340
B.4.1	栅阵的有效介电常数 .....	340
B.4.2	离散格林函数的计算 .....	343
B.4.3	$\delta$ 函数模型 .....	346
B.4.4	无限长 IDT .....	347
	参考资料 .....	349

8.1.5 背向散射 BAW 的影响 .....	269
8.1.6 栅边界的影响 .....	270
8.2 SH 型 SAW 器件的 COM 理论 .....	271
8.2.1 推导 COM 参数 .....	271
8.2.2 器件模拟 .....	276
8.2.3 瑞利波的 COM 参数 .....	285
8.3 近似频散关系的推导 .....	288
8.3.1 Plessky 频散关系的推导 .....	288
8.3.2 Abbott 频散方程的推导 .....	289
参考资料 .....	292
<b>附录 A 声波物理学基础</b> .....	<b>294</b>
A.1 固体的弹性形变 .....	294
A.2 压电效应 .....	300
A.3 声表面波(SAW) .....	302
A.4 有效声导纳矩阵和有效介电常数 .....	308
A.5 6mm 晶体的声波特性 .....	310
A.5.1 6mm 晶体中的瑞利波 .....	310
A.5.2 6mm 晶体中 BGS 波的有效介电常数 .....	312
A.5.3 6mm 晶体的有效声导纳矩阵 .....	314
A.6 声波的激励 .....	315
A.6.1 积分路径 .....	315
A.6.2 静电耦合 .....	316
A.6.3 BGS 波的激励 .....	316
A.6.4 SSBW 的激励 .....	318
参考资料 .....	319
<b>附录 B 声波在栅阵中传播特性的分析方法</b> .....	<b>320</b>
B.1 概述 .....	320
B.2 金属栅中的 Bløttekjær 理论及其推广 .....	321

# 第一章 体声波和声表面波

这一章介绍声波，包括声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)，在不同介质中的激励、检测和传播。我将尽可能简单地解释它们的物理学原理，不过对于那些把声表面波器件看成电子元件的读者来说，这部分内容还是有些难度。读者不要略过这一章，它是后面几章的理论基础。

## 1.1 体声波

### 1.1.1 固体中的弹性波

体声波(Bulk Acoustic Wave, BAW)是在固体中传播的弹性波，分为纵波和横波，如图 1.1(a)和 1.1(b)。纵波又称为压缩波，横波又称为剪切波。

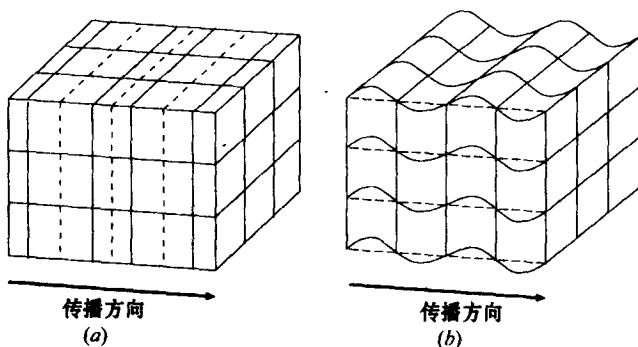


图 1.1 固体中的体声波

(a)纵波；(b)横波。

相速是波阵面的传播速度，即使在各向同性传播介质中，纵波和剪切波的相速也是不同的。纵波的相速  $V_l$  和剪切波的相速  $V_t$  分别为<sup>[1]</sup>

$$V_l = \sqrt{c_{11} / \rho} \quad (1.1)$$

$$V_t = \sqrt{c_{44} / \rho} \quad (1.2)$$

这里  $c_{ij}$  是介质的弹性刚度常数， $\rho$  是物质密度。在传播过程中纵波会引起介质体积的改变，剪切波则不会。通过质点位移方向即波的偏振方向可以把纵波和剪切波区别开，纵波的偏振与传播方向平行，剪切波的偏振与传播方向垂直。

弹性波在传播过程中振幅会衰减，下面是引起衰减的几个原因。

(1) 传播介质内部不均匀引起的散射损耗。这种损耗一般与温度无关，是由传播介质材料决定的。这种衰减在大部分多晶材料中都会发生。

(2) 晶格振动引起的相干波散射损耗。这种损耗甚至存在于理想晶体中，并随温度的增加而增加。

(3) 热扩散引起的能量转移和体积变化引起的温度变化。剪切波在传播过程中不会引起传播介质的体积变化，这种衰减损耗只发生在纵波中。

当波长与散射微粒的大小可比拟时，振幅衰减变得十分明显，这说明声波衰减随着频率的增大而增大。因此，为降低传播损耗，使用传播速度快的介质材料效果会好一些。

压电材料广泛用于弹性波的激励和检测。由于压电材料各向异性，弹性波的性质与它的传播方向和偏振方向有关。以普通的 NaCl 为例：NaCl 是立方体结构，就像层叠放置的小方块，显然，当小方块受到垂直于表面的应力和受到面对角线方向的应力时，产生的弹力是不同的。受到斜应力时，拉伸应力会引起剪切应变，而剪切应力会引起压缩应变。这就意味着，各向异性材料的大多数传播方向并不存在纯纵波和纯剪切波，这两种波相互耦合成全



纵波和准剪切波，它们的偏振方向分别近似与传播方向平行和垂直。一般地，准纵波比两种剪切波的波速都快。

剪切应变的弹力与质点运动方向有关，因此存在快剪切波和慢剪切波两种准剪切波，从名称就可以知道它们有不同的相速和偏振方向。一般地，在特定的方向上存在着三种彼此独立的声波，它们的偏振方向互相垂直，与传播介质的各向异性无关<sup>[2]</sup>。

研究声速在基片不同方向上的变化情况十分重要，这将在第七章中详细讨论。如果用图表的形式表示这种变化关系，惯例是给出速度的倒数，即慢波  $S(S = V^{-1})$ ，这是因为多数分析结果依赖于波数( $\beta = \omega S$ ， $\omega$  是角频率)，而波数与慢波成正比。

图 1.2 是硅(001)面上慢波  $S$  与传播方向的函数关系图。快剪切波沿 $\langle 001 \rangle$ 方向偏振，相速与传播方向无关，它的慢波面构成一个圆。慢剪切波和纵波的传播速度随传播方向的改变而改变，在 $\langle 110 \rangle$ 方向上慢剪切波更慢，纵波则更快。这个慢波面具有与硅晶体结构对称性相关的四重对称性。

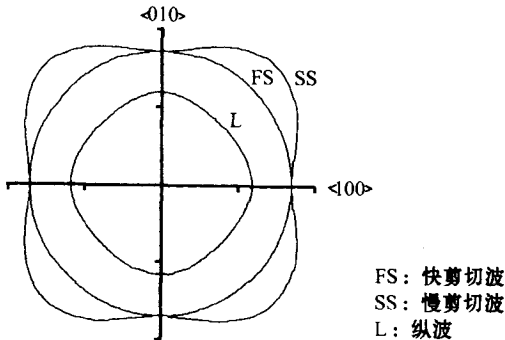


图 1.2 Si (001)面的慢波面图 (每格为  $1 \times 10^4 \text{ s/m}$ )

图 1.3 是  $\text{TeO}_2$ (001)面的慢波面。  $\text{TeO}_2$  有很强的各向异性，体声波的波速随传播角度不同有很大差异。纵波和剪切波的波速在 $\langle 100 \rangle$ 方向上几乎相同，但剪切波的波速在 $\langle 110 \rangle$ 方向上减小到  $650 \text{ m/s}$ 。因为波速很慢，  $\text{TeO}_2$  常用于延迟线和声光器件中<sup>[3]</sup>。

不仅  $\text{TeO}_2$ ，  $4 \text{ mm}$  晶系中立方体结构的各种单晶，如  $\text{TiO}_2$  和