



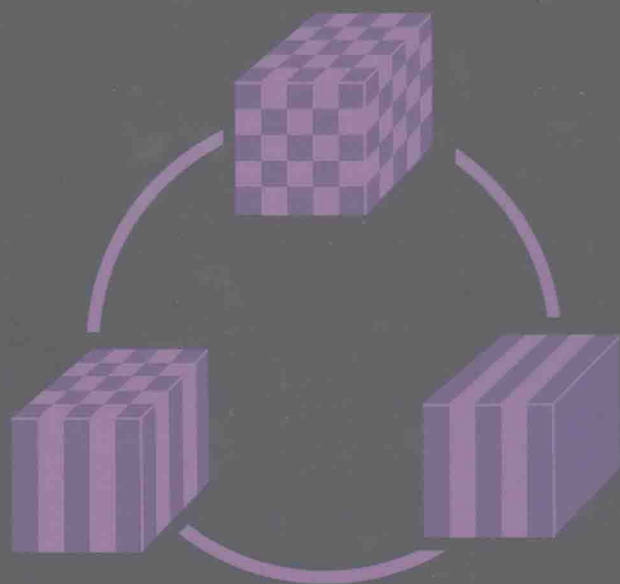
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

纳米材料前沿 >

Structural Color Materials

结构色纳米材料

顾忠泽 赵远锦 谢卓颖 编著



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

纳米材料前沿 >

Structural Color Materials

结构色纳米材料

顾忠泽 赵远锦 谢卓颖 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书依据作者研究团队以及国内外结构色材料的最新研究进展,在介绍生物结构色和光子晶体结构色的基础上,系统介绍了光子晶体结构色纳米材料的仿生制备,包括微加工制备、有序单元的制备及组装、喷墨打印制备,并介绍了其仿生调控研究,详细介绍了结构色材料在生物检测和细胞研究中的应用,阐述了结构色材料的未来发展方向和应用潜力。

本书可供从事结构色材料研究的人员及高等院校相关专业学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

结构色纳米材料/顾忠泽,赵远锦,谢卓颖编著. —北京:
化学工业出版社,2017.8

(纳米材料前沿)

ISBN 978-7-122-29830-0

I. ①结… II. ①顾…②赵…③谢… III. ①纳米材料—
研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第126342号

责任编辑:韩霄翠 仇志刚

文字编辑:向东

责任校对:宋玮

装帧设计:尹琳琳

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:北京瑞禾彩色印刷有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张23 字数393千字

2018年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

(传真:010-64519686)

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:128.00元

版权所有 违者必究

NANOMATERIALS

纳米材料前沿

编委会

主 任 万立骏

副主任 (按姓氏汉语拼音排序)

包信和 陈小明 成会明

刘云圻 孙世刚 张洪杰

周伟斌

委 员 (按姓氏汉语拼音排序)

包信和 陈小明 成会明

顾忠泽 刘 畅 刘云圻

孙世刚 唐智勇 万立骏

王春儒 王 树 王 训

杨俊林 杨卫民 张洪杰

张立群 周伟斌

总序

SERIES
PREFACE

纳米材料是国家战略前沿重要研究领域。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中明确要求：“推动战略前沿领域创新突破，加快突破新一代信息通信、新能源、新材料、航空航天、生物医药、智能制造等领域核心技术”。发展纳米材料对上述领域具有重要推动作用。从“十五”期间开始，我国纳米材料研究呈现出快速发展的势头，尤其是近年来，我国对纳米材料的研究一直保持高速发展，应用研究屡见报道，基础研究成果精彩纷呈，其中若干成果处于国际领先水平。例如，作为基础研究成果的重要标志之一，我国自2013年开始，在纳米科技研究领域发表的SCI论文数量超过美国，跃居世界第一。

在此背景下，我受化学工业出版社的邀请，组织纳米材料研究领域的有关专家编写了“纳米材料前沿”丛书。编写此丛书的目的是为了及时总结纳米材料领域的最新研究工作，反映国内外学术界尤其是我国从事纳米材料研究的科学家们近年来有关纳米材料的最新研究进展，展示和传播重要研究成果，促进学术交流，推动基础研究和应用基础研究，为引导广大科技工作者开展纳米材料的创新性工作，起到一定的借鉴和参考作用。

类似有关纳米材料研究的丛书其他出版社也有出版发行，本丛书与其他丛书的不同之处是，选题尽量集中系统，内容偏重近年来有影响、有特色的新颖研究成果，聚焦在纳米材料研究的前沿和热点，同时关注纳米新材料的产业战略需求。丛书共计十二分册，每一分册均较全面、系统地介绍了相关纳米材料的研究现状和学科前沿，纳米材料制备的方法学，材料形貌、结构和性质的调控技术，常用研究特定纳米材料的结构和性质的手段与典型研究结果，以及结构和性质的优化策略等，并介绍了相关纳米材料在信息、生物医药、环境、能源等领域的前期探索性应用研究。

丛书的编写，得到化学及材料研究领域的多位著名学者的大力支持和积极响应，陈小明、成会明、刘云圻、孙世刚、张洪杰、顾忠泽、王训、杨卫民、张立群、唐智勇、王春儒、王树等专家欣然应允分别

担任分册组织人员，各位作者不懈努力、齐心协力，才使丛书得以问世。因此，丛书的出版是各分册作者辛勤劳动的结果，是大家智慧的结晶。另外，丛书的出版得益于化学工业出版社的支持，得益于国家出版基金对丛书出版的资助，在此一并致以谢意。

众所周知，纳米材料研究范围所涉甚广，精彩研究成果层出不穷。愿本丛书的出版，对纳米材料研究领域能够起到锦上添花的作用，并期待推进战略性新兴产业的发展。

万立骏

识于北京中关村

2017年7月18日

颜色在自然界中无处不在，其中最为丰富的就是来自于动物和植物等生物体的颜色，它们把大自然装扮得色彩斑斓，多姿多彩。生物体颜色的形成主要来源于色素色和结构色，或者两者的结合。结构色，又称物理色，是指光和与光波长量级相当的结构相互作用而产生的颜色。不同于色素，自然界中的结构色是生物体中蜡层、刻点、沟缝或鳞片等细微结构使光波发生折射、漫反射、衍射或干涉，从而产生特殊颜色的光学效应。结构色材料主要由光子晶体结构组成。根据生物能否对颜色进行控制，结构色可以分为静态结构色和动态结构色。古生物的研究发现，早在5.15亿年前，古生物具有的微纳结构就可以产生结构色，其中很多结构色在生物进化过程中已经消失了。今天我们所看到的丰富的生物结构色是生物在长期的异性吸引、隐身和警戒等因素的竞争作用下进化而成的。近代的结构色研究可追溯到1665年，Hooke解释了一种蠹虫的颜色来自于微结构。1730年，Newton解释了孔雀羽毛的结构显色原理。而详细的结构色机理阐述是1942年由Anderson和Richards完成的，该研究的进步归功于电子显微镜等纳米观测手段的应用。2001年，Parker第一次报道了生物光子晶体。自此以后生物结构色纳米材料的研究得到了快速发展。人们相继在蝴蝶、甲虫、海老鼠、墨鱼等多种生物中发现了结构色。

人们惊奇地发现自己绞尽脑汁设计的各种理论模型以及据此制备的引以为豪的纳米结构早就存在于生物体中了。在生物体中甚至还发现了一些从未被人类设计过或制造出来过的纳米结构。这些结构非常精妙和复杂，很难用现有的技术制备或量产。此外，人们还发现具有动态结构色的生物体还可以非常精妙地控制颜色及图案，以实现动物的性信息传递、警告和伪装等功能。这些变色细胞可以直接被应用于可调制光学器件的构建，而其色彩在亚细胞层次的调制方式也给人们研制可调制显示器件提供了很好的原型。总之，自然界中生物体通过各自的途径发展了各具特色的、结构丰富的光子晶体结构色纳米材料。

通过对这些结构色纳米材料的研究,可为开发新一代光子材料、信息存储材料以及显示材料等提供重要的指导作用。研究这些生物光子晶体材料并从研究中汲取营养来设计和发展光子材料,将是纳米材料研究的一个重要途径。这些生物灵感纳米材料在生物、电子、环境、材料等多个领域都有着十分广泛的应用。

本书从生物结构色入手,试图对光子晶体结构色纳米材料进行尽可能全面的介绍,并重点讨论光子晶体结构色纳米材料的仿生制备及其在生物医学领域的应用研究。第1章介绍自然界中的生物结构色;第2章介绍光子晶体结构色相关的理论分析;第3~5章介绍光子晶体结构色纳米材料的仿生制备,包括自上而下的微加工方法以及自下而上的自组装等方法;第6章介绍光子晶体结构色纳米材料的仿生调控研究;第7~9章介绍结构色纳米材料的应用研究,特别强调其在生物医学领域的最新研究进展;第10章为展望。

笔者将科普与专业相结合,在总结大量中外相关文献的同时,也介绍了自己团队近年来在结构色纳米材料研究方面取得的成果。希望本书能够引起相关科研、教学领域的专业人员以及相关专业大学生对结构色纳米材料的注意与兴趣,并向其传递一些基本的专业知识。

本书还得到了许多同行的大力帮助和支持,在此表示由衷的感谢!同时还要特别感谢赵祥伟老师、朱存老师、徐华老师、李家奇老师,研究生程瑶、叶宝芬、牟忠德、王德龙、柏凌、刘盼苗、仲启凤、刘慈慧、郑付印、丁海波、陆洁、顾洪成、赵泽、王欢、商珞然、王洁、孙良栋、李艳娜、唐淑颖、徐琼华、吴子谦、余筠如等在本书编著过程中所做的大量图片处理、文献查找和文字校对的工作!

由于笔者学识有限,加之时间仓促,书中难免会有疏漏及不完善之处,恳请读者批评指正!

编著者

2017年10月

Chapter 4

Chapter 1

第1章

生物体中的结构色

001

Chapter 3

第3章

光子晶体结构色

001

Chapter 2

第2章

光子晶体结构色理论

027

1.1 概述 002

1.1.1 颜色的产生 002

1.1.2 生物体中颜色的进化 003

1.1.3 生物结构色的分类 004

1.2 具有一维光子晶体结构的生物结构色 005

1.2.1 干涉薄膜 005

1.2.2 衍射光栅 009

1.2.3 复合结构的蝴蝶鳞片 011

1.3 具有二维光子晶体结构的生物结构色 015

1.4 具有三维光子晶体结构的生物结构色 019

1.5 生物体中的动态结构色 021

1.6 小结 023

参考文献 024

2.1 概述 028

2.2 光子晶体的基本性质 030

2.2.1 光子禁带特性 030

2.2.2 光子局域 032

2.2.3 偏振特性 033

2.2.4 抑制自发辐射 033

Chapter 3

第3章

光子晶体结构色材料的微加工制备

055

2.3 光子晶体的电磁场理论 033

2.4 光子晶体的能带 034

2.5 光子晶体研究的理论方法 035

2.5.1 时域有限差分法 036

2.5.2 散射矩阵法 043

2.5.3 平面波展开法 047

2.5.4 光子晶体理论分析软件 048

2.6 小结 052

参考文献 052

3.1 概述 056

3.2 反应离子刻蚀 057

3.3 快速成型微加工 059

3.4 激光微加工 061

3.4.1 激光产生的物理基础 061

3.4.2 激光的特点及其在光子晶体制备方面的进展 062

3.4.3 激光LIGA工艺及其应用 067

3.4.4 激光双光子直写 068

3.4.5 激光全息光刻 071

参考文献 075

4.1 概述	078
4.2 单分散胶体粒子的合成	079
4.2.1 单分散无机胶体粒子的合成	079
4.2.2 单分散聚合物胶体粒子的合成	084
4.2.3 单分散复合胶体粒子的合成	086
4.2.4 单分散胶体粒子的表面修饰	094
4.3 单分散胶体粒子的密堆积有序组装	096
4.3.1 传统的垂直沉积法及改进	096
4.3.2 场力诱导作用自组装	101
4.3.3 其他方法	106
4.4 单分散胶体粒子的非密堆积有序组装	107
4.4.1 静电场力	107
4.4.2 磁场力	107
4.5 多种纳米粒子的分步组装和共组装	108
4.5.1 溶剂蒸发法及改进	108
4.5.2 分步旋涂法	109
4.5.3 场力诱导共组装	109
4.6 胶体粒子的限域组装	110
4.6.1 物理模板法	110
4.6.2 化学模板法	116
4.6.3 液滴中的组装	118
4.6.4 二维界面	119
参考文献	119

Chapter 4

第4章

结构色材料中有序单元的制备及组装

077

Chapter 5

第5章 喷墨打印制备图案化结构色材料

127

5.1 概述	128
5.2 传统图案化结构色材料制备方法	128
5.2.1 基于模板聚合法的图案化结构色材料制备	128
5.2.2 基于微接触法的图案化结构色材料制备	135
5.2.3 基于界面诱导的图案化结构色材料制备	138
5.3 基于压电喷墨打印技术的图案化结构色材料制备	140
5.3.1 喷墨打印技术简介	141
5.3.2 喷墨打印技术的应用	142
5.3.3 喷墨打印制备自组装结构色图案	144
5.4 电喷打印技术制备图案化结构色材料	158
5.4.1 工作原理	158
5.4.2 针对结构色材料的电喷印系统改进	160
5.4.3 电喷印的加工模式	162
5.4.4 图案化打印	166
参考文献	168
6.1 概述	174
6.2 电调控	176
6.3 机械力调控	181
6.4 磁调控	183
6.5 温度调控	186
6.6 离子与分子调控	189
6.7 光调控	192
6.8 填充介质调控	194
参考文献	196

Chapter 3

第3章 光子晶体结构色材料的微加工制备

Chapter 6

第6章 结构色的调控方法

173

7.1 概述	202
7.2 基于结构色材料的非标记检测	203
7.2.1 基于折射率变化的非标记检测	203
7.2.2 基于晶格间距改变的非标记检测	205
7.3 基于光子晶体的荧光增强检测	217
7.4 光子晶体编码检测	219
7.4.1 编码标记检测	219
7.4.2 编码非标记检测	225
7.5 基于结构色材料的生物分子分离	229
7.6 结构色微流控芯片	231
7.7 小结	234
参考文献	234
8.1 概述	240
8.2 细胞在结构色材料表面的取向及诱导分化	241
8.2.1 基于拉伸反蛋白石的细胞诱导	241
8.2.2 基于胶体晶体的神经细胞诱导分化	246
8.3 基于结构色材料的细胞检测	253
8.3.1 基于多孔硅结构色材料的细胞检测	253
8.3.2 全息水凝胶细胞传感器	265
8.3.3 基于表面压印结构色材料的细胞传感	266
8.4 基于结构色微载体的细胞研究	269
8.4.1 结构色细胞微载体的基本特性	269

Chapter 7

第7章

结构色纳米材料在生物检测中的应用

201

Chapter 8

第8章

结构色材料在细胞研究中的应用

239

Chapter 9

第9章

结构色材料在其他领域中的应用

291

8.4.2 细胞培养微载体的多元评价体系	272
8.4.3 细胞捕获微载体的细胞多元评价体系	275
8.5 基于反蛋白石结构大孔支架的细胞 三维培养	280
8.6 小结	285
参考文献	285
9.1 结构色材料在信息显示中的应用	292
9.1.1 结构色静态显示材料	292
9.1.2 结构色动态显示材料	294
9.2 结构色隐形眼镜	297
9.2.1 结构色隐形眼镜的制备工艺	298
9.2.2 结构色隐形眼镜的应用	302
9.3 结构色材料在无源光学器件中的应用	304
9.3.1 基于结构色材料的光栅	305
9.3.2 结构色材料在光谱分析中的应用	306
9.3.3 基于结构色材料的滤光片	308
9.4 结构色材料在光纤波导中的应用	311
9.4.1 一维光子晶体光纤	312
9.4.2 二维光子晶体光纤	314
9.4.3 三维光子晶体光纤	316
9.5 结构色材料在激光器中的应用	318
9.5.1 基于一维光子晶体结构的激光器	319

9.5.2 基于二维光子晶体结构的激光器	320
9.5.3 基于三维光子晶体结构的激光器	321
9.6 结构色材料在光催化中的应用	324
9.6.1 光能转换基本原理	325
9.6.2 结构色光催化材料	327
9.6.3 TiO_2 光子晶体结构在光解水中的应用	331
9.6.4 TiO_2 光子晶体结构在染料敏化太阳能电池中的应用	333
参考文献	335

Chapter 10

第10章

展望

341

Chapter 1

第1章

生物体中的结构色

1.1 概述

1.2 具有一维光子晶体结构的生物结构色

1.3 具有二维光子晶体结构的生物结构色

1.4 具有三维光子晶体结构的生物结构色

1.5 生物体中的动态结构色

1.6 小结