

# 紫外光电子器件 ——氮化物技术及应用

III-Nitride Ultraviolet Emitters:  
Technology and Applications.

(德) 迈克尔·尼塞尔 (Michael Kneissl) 主编  
延斯·拉斯 (Jens Rass)

段瑞飞 王军喜 李晋闽 译



化学工业出版社



Springer

# 紫外光电子器件

## ——氮化物技术及应用

III-Nitride Ultraviolet Emitters:  
Technology and Applications

(德) 迈克尔·尼塞尔 (Michael Kneissl) 主编  
延斯·拉斯 (Jens Rass)

段瑞飞 王军喜 李晋闽 译



化学工业出版社

· 北京 ·



Springer

本书全面介绍了基于Ⅲ族氮化物的紫外 LED、激光器和探测器的最新技术, 涵盖不同的衬底及外延方法, InAlGa<sub>N</sub> 材料的光学、电学和结构特性以及各种光电子器件, 如 UV-LED、紫外激光器和紫外日盲探测器。此外, 综述了紫外发光器件和探测的一些关键应用领域, 包括水净化、光疗、气敏、荧光激发、植物生长照明和 UV 固化。

本书含有大量翔实的图表和参考文献, 可供读者进一步了解和认识氮化物紫外光电器件及其应用。本书由德国、美国、日本、爱尔兰等国的知名专家共同执笔, 各章的作者都在相关领域有着丰富的经验, 其对技术发展的独到见解, 能够开拓读者思路, 为国内氮化物紫外光电子器件的发展提供借鉴和参考。

本书可供电气工程、材料科学、物理学研究生层次的学生、研究人员和科学家, 以及将紫外发光器件和探测器用到各种领域的开发人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

紫外光电子器件: 氮化物技术及应用 / (德) 迈克尔·尼塞尔 (Michael Kneissl), 延斯·拉斯 (Jens Rass) 主编; 段瑞飞, 王军喜, 李晋闽译. —北京: 化学工业出版社, 2017. 11

书名原文: III-Nitride Ultraviolet Emitters: Technology and Applications

ISBN 978-7-122-30359-2

I. ①紫… II. ①迈… ②延… ③段… ④王… ⑤李…

III. ①氮化物-应用-电致发光-发光器件-研究 IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 183858 号

III-Nitride Ultraviolet Emitters: Technology and Applications, Edited by Michael Kneissl and Jens Rass

ISBN 978-3-319-24098-5

Copyright © 2016 by Springer International Publishing Switzerland. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Springer International Publishing Switzerland

This Springer imprint is published by Springer Nature.

The registered company is Springer International Publishing AG.

本书中文简体字版由 Springer International Publishing Switzerland 授权化学工业出版社独家出版发行。

本版本仅限在中国内地 (不包括中国台湾地区和香港、澳门特别行政区) 销售, 不得销往中国以外的其他地区。未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分, 违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2017-3229

责任编辑: 吴刚

文字编辑: 项激

责任校对: 边涛

装帧设计: 关飞

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: 三河市延凤印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 26 彩插 4 字数 504 千字 2018 年 2 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: 198.00 元

版权所有 违者必究

## 撰稿人名单

Vera Abrosimova, JENOPTIK 聚合物系统有限公司, 德国柏林

Matthias Bickermann, 莱布尼茨晶体生长学会 (IKZ), 德国柏林工业大学化学研究所, 德国柏林

Moritz Brendel, 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林

Shigefusa F. Chichibu, 先进材料多学科研究所, 东北大学, 日本仙台

Martin Degner, 罗斯托克大学通用电气工程研究所, 德国罗斯托克

Anke Drewitz, 医学、生物和环保技术促进协会 (GMBU), 光子学与传感技术部门, 德国耶拿

Christian Dreyer, 弗劳恩霍夫高分子材料和复合材料研究院 PYCO, 德国泰尔托

Florian Erfurth, 医学、生物和环保技术促进协会 (GMBU), 光子学与传感技术部门, 德国耶拿

Hartmut Ewald, 罗斯托克大学通用电气工程研究所, 德国罗斯托克

Johannes Glaab, 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林

James R. Grandusky, Crystal IS, 美国纽约绿岛

Emmanuel Gutmann, 医学、生物和环保技术促进协会 (GMBU), 光子学与传感技术部门, 德国耶拿

Sylvia Hagedorn, 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林

Kazumasa Hiramatsu, 三重大学机电与电子工程系, 日本津市

Hideki Hirayama, 理化研究所, 量子光子器件实验室, 日本光州埼玉

Marcel A. K. Jansen, 科克大学生物, 环境和地球科学学院, 爱尔兰科克

Martin Jekel, 柏林工业大学, 水污染系, 德国柏林

Noble M. Johnson, PARC 帕洛阿尔托研究中心有限公司, 帕洛阿尔托, 美国加州

Therese C. Jordan, Crystal IS, 美国纽约绿岛

Arne Knauer, 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林

Michael Kneissl, 工业大学固体物理研究所, 德国柏林; 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林

Tim Kolbe, 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林

Marlene Lange, 柏林工业大学, 水污染系, 德国柏林

Neysha Lobo-Ploch, 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林

Martina C. Meinke, 查理特医科大学, 皮肤生理学实验和应用 (CCP), 皮肤病, 性病和变态反应系, 德国柏林

Inga Mewis, 植物质量部门, 大贝伦和埃尔福特蔬菜和观赏作物莱布尼茨研究所, 德国大贝伦

Franziska Mildner, 弗劳恩霍夫高分子材料和复合材料研究院 PYCO, 德国泰尔托

Hideto Miyake, 三重大学机电与电子工程系, 日本津市

Susanne Neugart, 植物质量部门, 大贝伦和埃尔福特蔬菜和观赏作物莱布尼茨研究所, 德国大贝伦

John E. Northrup, PARC 帕洛阿尔托研究中心有限公司, 帕洛阿尔托, 美国加州

Enrico Pertzsch, JENOPTIK 聚合物系统有限公司, 德国柏林

Rajul V. Randive, Crystal IS, 美国纽约绿岛

Jens Rass, 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林; 工业大学固体物理研究所, 德国柏林

Eberhard Richter, 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林

Armin Scheibe, 医学、生物和环保技术促进协会 (GMBU), 光子学与传感技术部门, 德国耶拿

Leo J. Schowalter, Crystal IS, 美国纽约绿岛

Monika Schreiner, 植物质量部门, 大贝伦和埃尔福特蔬菜和观赏作物莱布尼茨研究所, 德国大贝伦

Bernd Seme, 医学、生物和环保技术促进协会 (GMBU), 光子学与传感技术部门, 德国耶拿

Torsten Trenkler, JENOPTIK 聚合物系统有限公司, 德国柏林

Akira Uedono, 筑波大学纯和应用科学系应用物理部, 筑波大学, 日本茨城

Markus Weyers, 费迪南德-布朗学院, 莱布尼茨高频技术学院, 德国柏林

Melanie Wiesner, 植物质量部门, 大贝伦和埃尔福特蔬菜和观赏作物莱布尼茨研究所, 德国大贝伦

Uwe Wollina, 德累斯顿-弗雷德里希医院皮肤和变态反应系, 德累斯顿技术大学学术教学医院, 德国德累斯顿

Thomas Wunderer, PARC 帕洛阿尔托研究中心有限公司, 帕洛阿尔托, 美国加州

Rita Zrenner, 植物质量部门, 大贝伦和埃尔福特蔬菜和观赏作物莱布尼茨研究所, 德国大贝伦

## 译者前言

半导体领域中，Ⅲ族氮化物的发展一直是过去几十年，尤其是1993年以来至关重要的方向，特别是高能量光电子器件的技术进步和应用开发，是半导体领域最引人关注的研究工作。2014年，随着氮化物蓝光LED发明人获得诺贝尔奖，蓝光LED的研发已经达到巅峰。

与此对应，技术难度更大的Ⅲ族氮化物基紫外光电器件正逐步向人们走来，这其中紫外发光二极管、激光器以及相关的紫外探测器，其目标都是向更高Al组分、更短波长发展，以期实现AlGaN全系的高性能紫外光电器件。诺贝尔奖得主，日本名古屋大学教授天野浩就在蓝光之后一直从事紫外发光器件方面的研究，主要是波长为250~350nm的紫外LED，这种LED除了杀菌用途外，预计还可应用于印刷、医疗、科学等领域。使用AlGaN或InAlGaN制作紫外光源的主要优点是：

- ① 具有通过量子阱（QW）获得高效率光发射的可能性；
- ② 具有在宽带隙光谱区域内同时产生p型和n型半导体的可能性；
- ③ 氮化物硬度高并且器件寿命更长；
- ④ 材料中没有砷、汞和铅等有毒有害物质；

⑤ LED固有的优点，开关快速、能耗低、体积小等，不需要任何预热时间，并且可以几十纳秒或更快的切换速度开启和关闭。

根据光谱范围，人们划分了UVA（320~400nm），UVB（280~320nm）和UVC（200~280nm）的范围。而LED的优势使得研究人员预期了很广泛的应用领域：UVA光谱范围内的重要应用包括油墨、涂料、树脂、聚合物和黏合剂的UV固化，以及快速原型和轻型结构的3D打印。其他应用可以在感测领域找到，例如，增白剂或荧光增白剂，探测安全的功能，例如，身份证和纸币以及医疗应用如血液气体分析。UVB的关键应用是光疗，特别是牛皮癣和白癜风的治疗，以及植物生长照明，例如靶向触发次生植物代谢物。UVC的大规模应用是水净化（例如末端系统）、废水处理和回收，以及医疗器械和食品的消毒。UVB和UVC-LED也有许多传感应用，因为许多气体（如SO<sub>2</sub>，NO<sub>x</sub>，NH<sub>3</sub>）和生物分子在这些光谱区显示出吸收带，包括色氨酸、NADH、酪氨酸、DNA和RNA。UVC-LED也可以用于非视距通信，也是重力传感器领域中基础科学实验的兴趣所在，例如ESA/NASA激光干涉仪空间天线（LISA）任务中，用于实现电荷管理系统。

诸多优势需要面对的现实就是技术上尚未成熟，需要更多的研发和合作，让产学研、产业链上下游能够协同起来，把氮化物紫外发光器件推向如蓝光LED般

的高度。译者所在研发中心已有 10 多年深紫外 LED 的开发历程，深知其长产业链的难度以及技术开发积累的重要性。本书主编 Michael Kneissl 教授和 Jens Rass 教授均就职于德国柏林工业大学固体物理研究所与莱布尼茨高频技术学院，费迪南德-布朗学院。本书非常及时而且全面地总结了目前氮化物紫外发光器件的最新进展，对于我们进一步研发和产业化是很好的借鉴。希望本书的翻译出版能使更多的人了解这个领域，更多的人参与到这个领域，从而实现广泛的技术交流和应用开发，能够为 III 族氮化物紫外光电器件产业提供帮助。

因本书原著中采用英制学非国际标准的计量单位，为了保持原书中数据的直观性，翻译时并未对单位进行改变，读者使用数据时请用本书列出的单位换算表进行换算即可。

鉴于专业所限以及文学修养不足，书中疏漏难免，希望读者海涵并能够指正为盼。

这里要感谢中国科学院半导体照明研发中心的全体同事在氮化物材料、器件、封装、应用方面的工作，尤其是他们在紫外器件方面的工作，也让译者能够更贴切地表达出原文的专业术语。谢海忠老师等对翻译进行了校对，在此一并致谢。

段瑞飞 王军喜 李晋闽  
中国科学院半导体照明研发中心  
2018 年于北京

# 前言

过去的二十年中，Ⅲ族氮化物基紫外发光二极管（UV-LED）及其应用经历了飞速的发展。这可以通过许多方面来说明。例如，在紫外 LED 领域发表的文章数量正稳步上升，并在 2014 年时达到几乎每年 1000 篇期刊文章（图 1）。然而，我们发现，这样快速增长使得人们很难对所有研究进展有全面的概述。很多时候，当半导体材料和光电子器件领域的研究人员描述紫外发光器件的应用时，会发现这些信息的系统性不够。另一方面，在各个领域应用紫外发光器件和探测器的开发人员和工程师往往不理解材料和器件开发的复杂性。本书的目的就是把所有这些进展置于同一背景下，提供Ⅲ族氮化物材料、紫外光电器件及其应用的最新技术的全面综述。目标读者为研究人员和电气工程师，材料科学、物理学研究生以及科学家，将紫外发光器件和探测器应用到各领域的开发人员。本书提供了Ⅲ族氮化物材料的概述，包括其结构、光学和电学性质以及各种光电元器件，如 UV-LED、紫外激光器和光电探测器的关键性能。

本书还提供了一些关键紫外发光器件和探测器应用的介绍，包括水净化、光疗、气敏传感、荧光激发、植物生长照明和 UV 固化。虽然每个章节都是独立的，并可以不需其他章节的知识来理解，但对各章的组织也是有意选择的。首先集中于基础材料的属性，随后章节集中在紫外器件，而最后几个章节描述紫外发光器件和探测器的关键应用。在第 1 章，Michael Kneissl 介绍了Ⅲ族氮化物紫外发光器件的技术及其应用。第 2 章 Matthias Bickermann 回顾了氮化铝体衬底的生长和结构特性。第 3 章中，Eberhard Richter, Sylvia Hagedorn, Arne Knauer 和 Markus Weyers 回顾了使用蓝宝石作为衬底用于 UV 范围内氮化物基发光器件，尤其是氢化物气相外延生长低缺陷密度的 AlGaIn 模板。第 4 章中，Hideki Hirayama 讨论了蓝宝石衬底上低缺陷密度的 AlN 以及 AlGaIn 层晶体生长技术，并给出最先进的蓝宝石 DUV-LED 性能特性。第 5 章中，Shigefusa F. Chichibu, Hideto Miyake, Kazumasa Hiramatsu 和 Akira Uedono 深入讨论了位错和点缺陷对近带边发射 AlGaIn 基 DUV 发光材料内量子效率的影响。第 6 章理解缺陷对 UV-LED IQE 的作用对于提高紫外 LED 效率和输出功率至关重要。器件方面，UV-LED 的光偏振和光提取等由 Jens Rass 和 Neysha Lobo-

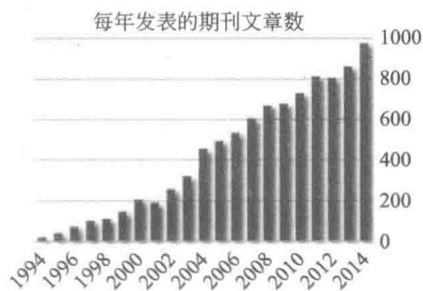


图 1 每年发表的期刊文章，关键字为“ultraviolet”和“light emitting diode”（来源 Web of Science。检索时间 2015 年 7 月 17 日，<http://apps.webofknowledge.com>）



Ploch 给予综述。AlN 体衬底上 UVC-LED 的同质外延生长及其在水消毒中应用由 James R. Grandusky, Rajul V. Randive, Therese C. Jordan 和 Leo J. Schowalter 在第 7 章综述。Noble M. Johnson, John E. Northrup 和 Thomas Wunderer 在第 8 章讨论了 AlGaIn 量子阱激光器异质结构中的光学增益, 并展示了 AlGaIn 基紫外激光二极管发展现状。而在第 9 章, 日盲和可见光盲紫外光电探测器由 Moritz Brendel, Enrico Pertzsch, Vera Abrosimova 和 Torsten Trenkler 进行了回顾。第 10 章中, Marlene A. Lange, Tim Kolbe 和 Martin Jekel 检查了 UVC-LED 的水消毒应用, 同时第 11 章中, Uwe Wollina, Bernd Seme, Armin Scheibe 和 Emmanuel Gutmann 描述了紫外发光器件在皮肤病光疗中的应用。第 12 章中, Hartmut Ewald 和 Martin Degner 回顾了紫外发光器件在气体传感中的应用, 而第 13 章 Emmanuel Gutmann, Florian Erfurth, Anke Drewitz, Armin Scheibe 和 Martina C. Meinke 讨论了化学和生命科学领域的紫外荧光检测和光谱系统应用。第 14 章, Monika Schreiner, Inga Mewis, Susanne Neugart, Rita Zrenner, Melanie Wiesner, Johannes Glaab 和 Marcel A. K. Jansen 综述了 UV LED 的植物生长照明应用, 特别是适用 UVB 光谱的次生植物代谢物诱导。最后一章中, UV LED 固化应用由 Christian Dreyer 和 Franziska Mildner 综述。

我们要感谢各章的所有作者及时且准备充分的贡献。没有他们的付出, 辛勤工作和持之以恒, 不可能会有这本书。我们也要特别感谢施普林格科学出版社的 Claus Ascheron, 他提供我们编辑这本书的机会并在此期间给予持续支持。

**Michael Kneissl**

**Jens Rass**

**德国柏林**

# 目 录

## 第 1 章 氮化物紫外光电子器件技术及应用概述 / 001

摘要 .....	001
1.1 背景 .....	002
1.2 UV 发光器件及其应用 .....	003
1.3 UV-LED 的最新技术和未来挑战 .....	004
1.4 UV-LED 的主要参数和器件性能 .....	007
1.5 缺陷对 UV-LED IQE 的作用 .....	008
1.6 UV-LED 的电注入效率和工作电压 .....	010
1.7 UV-LED 的光提取 .....	011
1.8 UV-LED 的热管理与退化 .....	012
1.9 展望 .....	013
1.10 小结 .....	014
致谢 .....	015
参考文献 .....	015

## 第 2 章 AlN 体衬底的生长与性能 / 025

摘要 .....	025
2.1 AlN 晶体的特性与历史 .....	026
2.2 PVT 法生长 AlN 体单晶: 理论 .....	027
2.3 PVT 法生长 AlN 体单晶: 技术 .....	029
2.4 籽晶生长与晶体长大 .....	031
2.5 PVT 生长 AlN 体单晶的结构缺陷 .....	033
2.6 AlN 衬底的杂质及相应性质 .....	034
2.7 结论与展望 .....	037
致谢 .....	038
参考文献 .....	038

## 第 3 章 蓝宝石衬底上氮化物 UV 发光器件用 AlGa<sub>N</sub> 层气相外延 / 044

摘要 .....	044
3.1 简介 .....	045

3.2	MOVPE 生长 Al (Ga) N 缓冲层 .....	046
3.3	减少 MOVPE 生长 Al (Ga) N 层 TDD 的技术 .....	048
3.4	HVPE 生长 AlGa <sub>x</sub> N 层 .....	050
3.4.1	HVPE 技术基础 .....	050
3.4.2	衬底的选择 .....	053
3.4.3	HVPE 选择生长 AlGa <sub>x</sub> N 层结果 .....	054
3.5	小结 .....	062
	致谢 .....	063
	参考文献 .....	063

## 第 4 章 AlN/AlGa<sub>x</sub>N 生长技术和高效 DUV-LED 开发 / 067

摘要 .....	067
4.1 简介 .....	068
4.2 DUV-LED 研究背景 .....	068
4.3 蓝宝石衬底上高质量 AlN 的生长技术 .....	073
4.4 内量子效率 (IQE) 的显著提高 .....	076
4.5 222~351nm AlGa <sub>x</sub> N 和 InAlGa <sub>x</sub> N DUV-LED .....	080
4.6 电注入效率 (EIE) 通过 MQB 的增加 .....	086
4.7 未来高光提取效率 (LEE) 的 LED 设计 .....	092
4.8 小结 .....	098
参考文献 .....	098

## 第 5 章 位错和点缺陷对近带边发射 AlGa<sub>x</sub>N 基 DUV 发光材料内量子效率的影响 / 101

摘要 .....	101
5.1 简介 .....	103
5.2 实验细节 .....	104
5.3 杂质和点缺陷对 AlN 近带边发光动力学的影响 .....	107
5.4 Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N 薄膜的近带边有效辐射寿命 .....	112
5.5 硅掺杂及引起的阳离子空位形成对 AlN 模板上生长 Al <sub>0.6</sub> Ga <sub>0.4</sub> N 薄膜近带边发光的发光动力学影响 .....	113
5.6 小结 .....	117
致谢 .....	118
参考文献 .....	118

## 第 6 章 UV-LED 的光偏振和光提取 / 122

摘要 .....	122
6.1 紫外 LED 光提取 .....	123
6.2 光偏振 .....	125
6.2.1 影响 AlGaIn 层光偏振开关的因素 .....	127
6.2.2 光学偏振与衬底方向的关系 .....	130
6.2.3 光学偏振对光提取效率的影响 .....	132
6.3 改善光提取的概念 .....	134
6.3.1 接触材料与设计 .....	134
6.3.2 表面制备 .....	138
6.3.3 封装 .....	144
参考文献 .....	145

## 第 7 章 半导体 AlN 衬底上高性能 UVC-LED 的制造及其使用点水消毒系统的应用前景 / 151

摘要 .....	151
7.1 简介 .....	153
7.1.1 UVC 光源类型 .....	153
7.1.2 什么是 UVC 光? .....	153
7.1.3 紫外杀菌如何工作? .....	155
7.2 AlN 衬底上 UVC LED 的制造 .....	156
7.3 提升 POU 水消毒用的 UVC-LED 性能增益 .....	162
7.3.1 UVT 效应 .....	162
7.3.2 设计灵活性 .....	164
7.3.3 流动单元建模 .....	165
7.3.4 流动分析案例 .....	165
7.3.5 UVC 光的使用 .....	168
参考文献 .....	169

## 第 8 章 AlGaIn 基紫外激光二极管 / 171

摘要 .....	171
8.1 简介 .....	172
8.2 AlN 体材上的最高材料质量生长 .....	174
8.2.1 AlN 体衬底 .....	174

8.2.2 同质外延 AlN .....	174
8.2.3 AlGa <sub>N</sub> 激光器异质结构 .....	175
8.2.4 多量子阱有源区 .....	176
8.3 宽带隙 AlGa <sub>N</sub> 材料的大电流能力 .....	177
8.4 大电流水平下的高注入效率 .....	180
8.5 光泵浦 UV 激光器 .....	183
8.6 紧凑深紫外 III-N 激光器的其他概念 .....	186
8.6.1 电子束泵浦激光器 .....	186
8.6.2 InGa <sub>N</sub> 基 VECSEL+二次谐波产生 .....	187
8.7 小结 .....	187
致谢 .....	188
参考文献 .....	188

## 第 9 章 日盲和可见光盲 AlGa<sub>N</sub> 探测器 / 192

摘要 .....	192
9.1 简介 .....	193
9.2 光电探测器基础 .....	195
9.2.1 特征参数与现象 .....	195
9.2.2 各种类型的半导体光电探测器 .....	202
9.3 III 族氮化物用于固态 UV 光电检测 .....	211
9.3.1 AlGa <sub>N</sub> 基光电导体 .....	213
9.3.2 AlGa <sub>N</sub> 基 MSM 光电探测器 .....	213
9.3.3 AlGa <sub>N</sub> 基肖特基势垒光电二极管 .....	214
9.3.4 AlGa <sub>N</sub> 基 PIN 光电二极管 .....	215
9.3.5 AlGa <sub>N</sub> 基雪崩光电探测器 .....	217
9.3.6 AlGa <sub>N</sub> 基光阴极 .....	219
9.3.7 高度集成的 III 氮族器件 .....	220
9.4 宽禁带光电探测器现状 .....	221
9.5 小结 .....	223
参考文献 .....	224

## 第 10 章 紫外 LED 水消毒应用 / 234

摘要 .....	234
10.1 简介 .....	235
10.2 紫外消毒的基本原则 .....	235
10.2.1 影响紫外能流的因素 .....	237

10.2.2 紫外反应器性能的建模与验证 .....	239
10.3 案例分析 .....	240
10.3.1 测试紫外 LED 的实验设置提案 .....	241
10.3.2 测试条件 .....	243
10.3.3 使用紫外 LED 测试的结果 .....	246
10.4 紫外 LED 水消毒应用潜力 .....	251
致谢 .....	252
参考文献 .....	252

## 第 11 章 紫外发光器件皮肤病光疗应用 / 256

摘要 .....	256
11.1 简介 .....	257
11.2 紫外光疗的光源 .....	257
11.2.1 自然日光 .....	258
11.2.2 气体放电灯 .....	259
11.2.3 激光器 .....	261
11.2.4 UV-LED .....	261
11.3 皮肤紫外光疗的变化 .....	262
11.3.1 补骨脂素加 UVA (PUVA) 治疗 .....	262
11.3.2 宽谱 UVB (BB-UVB) 治疗 .....	263
11.3.3 窄谱 UVB (NB-UVB) 治疗 .....	264
11.3.4 UVA-1 治疗 .....	265
11.3.5 靶向紫外光疗 .....	265
11.3.6 体外光化学治疗 (ECP) .....	266
11.4 主要皮肤适应证的作用机制 .....	267
11.4.1 牛皮癣 .....	268
11.4.2 特应性皮炎 .....	268
11.4.3 白癜风 .....	269
11.4.4 皮肤 T 细胞淋巴瘤 .....	269
11.4.5 扁平藓和斑秃 .....	269
11.4.6 全身性硬化症和硬斑病 .....	270
11.4.7 移植体抗宿主病 .....	270
11.4.8 多形性日光疹 .....	270
11.5 采用新型 UV 发光器件的临床研究 .....	271
11.5.1 使用无极准分子灯的研究 .....	271
11.5.2 使用紫外 LED 的研究 .....	272

11.6 总结与展望 .....	273
参考文献 .....	273

## 第 12 章 紫外发光器件气体传感应用 / 281

摘要 .....	281
12.1 简介 .....	282
12.2 吸收光谱 .....	284
12.3 吸收光谱系统 .....	288
12.4 紫外光谱仪光源 .....	291
12.5 光谱仪用 LED 的光学和电学性质 .....	295
12.6 UV-LED 吸收光谱仪的应用 .....	298
12.6.1 臭氧传感器 .....	299
12.6.2 臭氧传感器设计 .....	299
12.6.3 测量配置 .....	300
12.6.4 结果 .....	300
12.6.5 SO <sub>2</sub> 和 NO <sub>2</sub> 传感器 .....	301
12.6.6 SO <sub>2</sub> /NO <sub>2</sub> 气体排放传感器设计 .....	301
12.6.7 测量配置 .....	302
12.7 结论与展望 .....	303
参考文献 .....	304

## 第 13 章 化学与生命科学中的紫外荧光探测和光谱仪 / 306

摘要 .....	306
13.1 简介 .....	307
13.2 荧光检测和光谱仪的基础和装置 .....	308
13.3 实验室分析仪器用荧光 .....	313
13.4 环境监测和生物分析用荧光化学传感 .....	315
13.5 用自发荧光探测微生物 .....	322
13.6 皮肤病医疗诊断用荧光 .....	326
13.7 总结与展望 .....	329
参考文献 .....	329

## 第 14 章 UVB 诱导次生植物代谢物 / 339

摘要 .....	339
14.1 次生植物代谢物的本质和形成 .....	340

14.2	次生植物代谢物的营养生理学 .....	341
14.3	水果蔬菜消费与慢性病的关系 .....	342
14.4	植物-环境相互作用中的次生植物代谢物 .....	342
14.4.1	植物的 UVB 感知和信令 .....	342
14.4.2	UVB 应激源及植物生长调节剂 .....	344
14.5	结构分化 UVB 响应 .....	345
14.5.1	类黄酮和其他酚类 .....	346
14.5.2	硫代葡萄糖苷 .....	349
14.6	定制的 UVB-LED 次生植物代谢物 UVB 诱导 .....	351
14.6.1	研究现状: UVB-LED 用于植物照明 .....	351
14.6.2	UVB-LED 针对性植物属性触发的优势 .....	352
14.6.3	UVB-LED 针对性植物属性触发实验装置 .....	353
14.7	展望 .....	354
参考文献 .....		354

## 第 15 章 紫外 LED 固化应用 / 365

摘要 .....	365
15.1 简介 .....	366
15.2 光源 .....	367
15.3 化学机制 .....	368
15.4 动力学 .....	371
15.5 医学应用 .....	372
15.6 涂层、油墨和印刷 .....	375
15.7 光固化快速成型 .....	377
15.8 结论与展望 .....	378
参考文献 .....	379
专业术语中英文对照表 .....	383
单位换算表 .....	400



# 第 1 章

## 氮化物紫外光电子器件技术及应用概述

Michael Kneissl<sup>①</sup>

---

### 摘要

本章简要概述了Ⅲ族氮化物紫外发光二极管（LED）技术和一系列主要 UV-LED 的应用领域，涵盖了 UV-LED 技术的发展水平以及新的开发高性能 UV 发光器件方式的调研。

---

① M. Kneissl

工业大学固体物理研究所，德国柏林

电子邮箱：kneissl@physik.tu-berlin.de

费迪南德-布朗学院，莱布尼茨高频技术学院，德国柏林