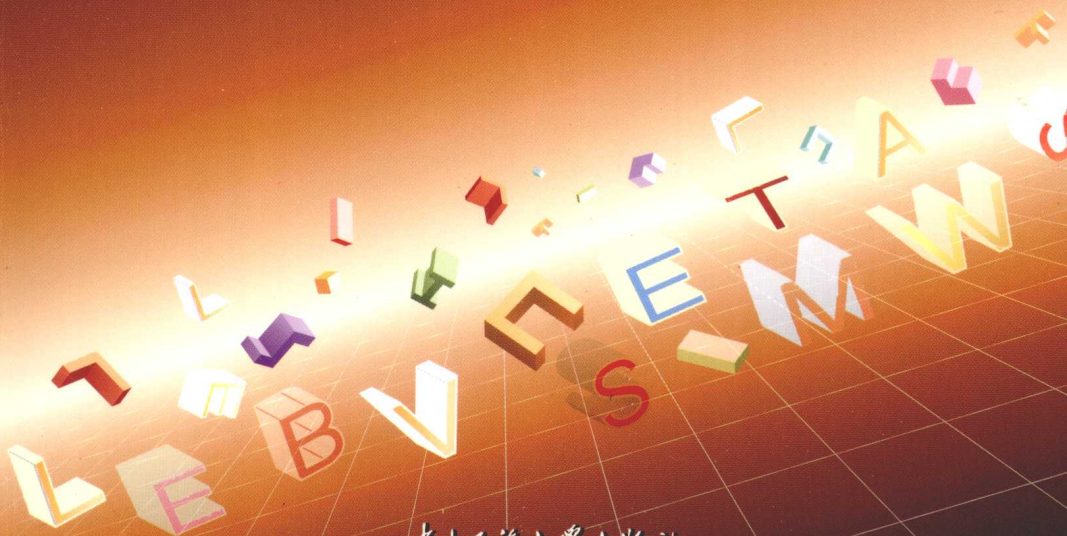


亚波长电磁结构材料

◎ 苏玉成 / 著



中央民族大学出版社
China Minzu University Press

亚波长电磁结构材料

Materials with Subwavelength Electromagnetic Structures

◎ 苏玉成 / 著

中国科技大学出版社
China University of Science and Technology Press

图书在版编目 (CIP) 数据

亚波长电磁结构材料/苏玉成著. —北京: 中央民族大学

出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-81108-892-2

I. ①亚… II. ①苏… III. ①光学晶体—光导纤维通信系统—研究②光学晶体—应用—电磁波传播—研究 IV. ①TN929.11②TP84

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 159273 号

亚波长电磁结构材料

作 者 苏玉成

责任编辑 方 圆

封面设计 莫日根布和

出 版 者 中央民族大学出版社

北京市海淀区中关村南大街 27 号 邮编: 100081

电话: 68472815 (发行部) 传真: 68932751 (发行部)

68932218 (总编室) 68932447 (办公室)

发 行 者 全国各地新华书店

印 刷 厂 北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本 880×1230 毫米) 1/32 印张: 6.5

字 数 160 千字

版 次 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-81108-892-2

定 价 20.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

电子器件的出现使人类社会进入了电子信息时代，把人们的生活质量提高到一个更高的水平。当前，随着电子器件集成度的不断提高，体积不断缩小，功能不断增强，速度不断增快。但是同时又出现了诸如电路阻抗和能量损耗的加大，高速信号处理对信号同步要求的提高等一系列问题。

传统电子信息产业的速度已经不能满足社会进一步发展的需要，人们对信息的传输提出了更高的要求。光子作为信息的载体，具有许多电子无法比拟的优势。最明显的优势就是光子在介质中的传播速度远远大于电子的传播速度。另外电介质材料的带宽比金属要大得多。通常的光纤通信系统的带宽都在 THz 数量级，然而有线电话的带宽只有几百 kHz；光子是电中性粒子，没有相互作用，因此能耗低；非电子性抗干扰能力强；光子具有频率和偏振等多种信息，因此具有更高的信息容量。

本书详细论述了光子晶体、光子晶体光纤、等离子体光子晶体以及基于表面等离子体的微纳金属复合结构等若干种新型亚波长电磁结构材料的特点及其性能，这些都是当前光学科学技术研究的热点领域。全书共四章：第一章介绍光子晶体的概念及其特性、相应的若干种理论分析和数值计算方法，以及光子晶体在不同领域的具体应用；第二章介绍光子晶体光纤导光的基本原理及其种类，重点介绍了光子晶体光纤的理论计算方法；第三章首先介绍了等离子体光子晶体的理论计算方法，然后重点论述了一维等离子体光子晶体和二维等离子体光子晶体。第四章首先论述了表面等离子体的产生、特征长度及其基

本特性，然后详细介绍了加工制备微纳金属复合结构的常用微加工技术及其测量装置，最后，就表面等离子体波导器件、Y型分束器和定向耦合器等基于表面等离子体激元的光学器件作了论述。

感谢中央民族大学理学院王义全教授和冯帅副教授在本书的编写和修改过程中对作者的鼎力帮助。

本书是在借鉴、吸收和总结国内外多个领域的相关专家学者和科研人员的相关研究成果的基础上完成的，作者在每一章后面都详细列出了相应的参考文献，在此向他们表示感谢。另外，由于作者水平有限，加之时间有限，不妥之处在所难免，恳望读者批评指正。

作 者

2010年7月28日于
中央民族大学理学院

目 录

第一章 光子晶体.....	1
1.1 光子晶体的概念.....	2
1.2 光子晶体的特性.....	5
1.3 光子晶体的理论计算方法.....	8
1.3.1 平面波展开方法.....	8
1.3.2 转移矩阵方法.....	12
1.3.3 基于平面波的转移矩阵法.....	16
1.3.4 多重散射方法.....	21
1.3.5 时域有限差分方法.....	30
1.4 光子晶体的应用.....	49
1.4.1 高性能反射镜.....	50
1.4.2 光子晶体滤波器.....	50
1.4.3 光子晶体偏振器.....	51
1.4.4 光子晶体波导.....	52
1.4.5 光子晶体波分复用器件.....	54
1.4.6 光子晶体微腔激光器.....	57
1.4.7 光子晶体传感器.....	60
1.4.8 光子晶体光开关.....	63
参考文献.....	72
第二章 光子晶体光纤.....	75
2.1 光子晶体光纤导光原理.....	75
2.2 光子晶体光纤的结构.....	79
2.2.1 普通结构的光子晶体光纤.....	79

2.2.2 多纤心结构的光子晶体光纤.....	80
2.2.3 空气孔直径改变的光子晶体光纤.....	81
2.2.4 混合结构材质光子晶体光纤.....	82
2.2.5 其它结构光子晶体光纤.....	84
2.3 光子晶体光纤的理论计算方法.....	85
2.3.1 向量波动方程及边界条件.....	85
2.3.2 变分原理.....	88
2.3.3 区域的离散及插值函数的建立.....	90
2.3.4 系统矩阵的生成和方程组的建立.....	99
2.3.5 边界条件的强加和特征方程的求解.....	103
参考文献.....	105
第三章 等离子体光子晶体.....	109
3.1 等离子体光子晶体的理论计算方法.....	109
3.2 一维等离子体光子晶体.....	113
3.2.1 色散关系式的推导.....	113
3.2.2 色散关系的验证.....	117
3.2.3 色散关系的模拟与分析.....	119
3.2.4 色散关系频带的规律.....	124
3.2.5 一维等离子体光子晶体的反常色散.....	126
3.2.6 截止频率.....	131
3.3 二维等离子体光子晶体.....	138
3.3.1 理想二维等离子体光子晶体.....	138
3.3.2 理想二维等离子体光子晶体单柱.....	142
参考文献.....	148
第四章 基于表面等离子体的微纳金属复合结构.....	152
4.1 表面等离子体简介.....	153
4.1.1 表面等离子体的产生.....	154
4.1.2 表面等离子体的特征长度.....	159

4.1.3 表面等离子体的基本特性.....	161
4.1.4 SPPs 的新现象.....	165
4.2 常用微加工技术及测量装置.....	168
4.2.1 传统光刻遇到的挑战.....	169
4.2.2 常用微加工技术.....	171
4.2.3 常用测量装置.....	180
4.3 基于表面等离子体激元的光学器件.....	182
4.3.1 表面等离子体波导器件.....	182
4.3.2 基于表面等离子体激元的 Y 型分束器.....	184
4.3.3 光定向耦合器.....	187
参考文献.....	194

第一章 光子晶体

在过去的—个世纪内，新思想、新发现层出不穷，科技产品的更新换代周期不断缩短。电子器件的出现给人类社会带来了一场科技大革命，把人们的生活进入更高的水平。当前，随着电子设备集成度和速度的提高，各种的体积不断缩小，功能不断增强。但是同时，由于集成度的增大，又出现了诸如电路阻抗和能量损耗的加大，高速信号处理对信号同步要求的提高等一系列问题。

传统电子信息产业的速度已经不能满足社会进一步发展的需要，人们对信息的传输提出了更高的要求。光子作为信息的载体，具有许多电子无法比拟的优势。最明显的优势就是光子在介质中的传播速度远远大于电子的传播速度。另外电介质材料的带宽比金属要大得多。通常的光纤通信系统的带宽都在 THz 数量级，然而有线电话的带宽只有几百 kHz；光子是电中性粒子，没有相互作用，因此能耗低；非电子性抗干扰能力强；光子具有频率和偏振等多种信息，因此具有更高的信息容量。

虽然光子比电子具有这么多的优势，但是全光回路却一直没有得到大范围的应用。光子晶体这一光学材料的出现将改变这一现状。目前，光子晶体已被应用于天线衬底、光子晶体光纤等多个领域。而且，随着对光子晶体研究工作的深入，科技工作者已逐渐认识到光子晶体材料在光波导、波分复用等光通信领域，低阈值激光器、光缓存、光开关等诸多领域的巨大潜在应用价值。广阔的应用前景使光子晶体的理论研究、相关实验和实际应用得到了迅速发展，这一领域已经成为当今世界范围内研究的热点。

1.1 光子晶体的概念

1987 年, 美国 Bell 实验室的 E.Yablonovith 在研究如何控制材料的自发辐射性质时提出了光子晶体的概念, 几乎同时, Princeton 大学的 S.John 研究光子在无序介质中的局域化效应时也独立提出了这个概念。他们指出, 材料的介电函数在空间周期性的变化能够调制材料中光子的状态模式。所谓光子晶体就是由两种或者两种以上的具有不同介电函数的材料在空间周期性排列而形成的一种人造晶体。

光子晶体也叫电磁晶体 (electromagnetic crystals) 或者光子带隙 (photonic band gap) 材料。光子晶体虽然是个新名词, 但自然界中早已存在拥有这种性质的物质, 盛产于澳洲的宝石蛋白石 (opal) 即为一例。如图 1.1-1, 蛋白石是由二氧化硅纳米(nano-sphere)沉积形成的矿物, 其色彩缤纷的外观与色素无关, 而是因为它几何结构上的周期性使它具有光子能带结构, 随着能隙位置不同, 反射光的颜色也跟着变化; 换言之, 是光能隙在玩变彩把戏。在生物界中, 也不乏光子晶体的踪影。以花间飞舞的蝴蝶为例, 其翅膀上的斑斓色彩, 其实是鳞粉上排列整齐的次微米结构, 选择性反射日光的结果(如图 1.1-2)。



图1.1-1 蛋白石

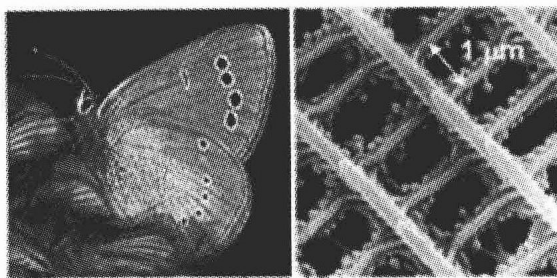


图1.1-2 蝴蝶翅膀上鳞粉的光子晶体结构

光子晶体按照材料的介电常数在空间中的周期变化,可分为以下三种类型:一维光子晶体即介电常数沿一个方向呈周期性的变化;类似地,二维光子晶体和三维光子晶体就是介电常数分别沿两个方向和三个方向上呈周期性的变化。图1.1-3 给出了一维、二维和三维光子晶体结构的示意图。其中A、B分别为介电常数不同的两种材料。

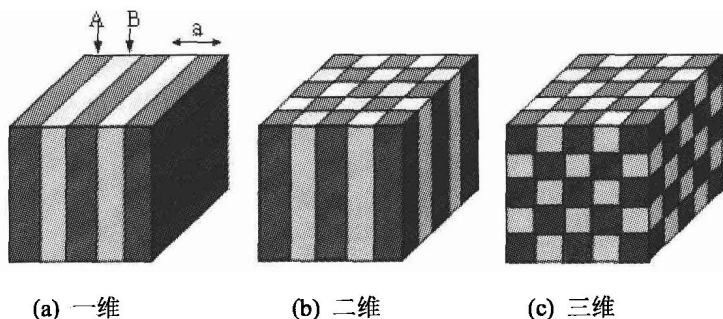


图 1.1-3 光子晶体结构示意图

(1) 一维光子晶体

一维光子晶体是指只在一个方向上具有光子禁带的材料,它是由介电常数不同的两种或两种以上介质交替迭层而形成的。这种结构在垂直于介质片的方向上介电常数是空间位置的周期性函数,而在平行于介质片平面的方向上介电常数不随空间位置而变化。这种结构实际已经广泛应用在各种光学系统上,比如布拉格反射镜,就是一种四分之一波长的一维光子晶体。

(2) 二维光子晶体

二维光子晶体是指在二维空间各方向上具有光子频率禁带特性的材料,一般是由许多介质柱平行而均匀地排列而成的。这种结构在垂直于介质柱的方向上介电常数是空间位置的周期性函数,而在平行于介质柱的方向上介电常数是不随空间位置而变化

的。由介质柱数组成的二维光子晶体的横截面存在多种结构，如矩形、三角形和石墨的六边形结构。在二维光子晶体中，电磁波只在二维平面上传播。二维光子晶体的镜面反射对称性使二维光子晶体的研究得到简化。此时描写电磁波在光子晶体中传播的本征方程可以分解为两个完全独立的方程。一个是关于电场向量平行于电介质柱轴线的 TM 波方程，另一个是关于磁场强度向量平行于柱轴线的 TE 波方程。

(3) 三维光子晶体

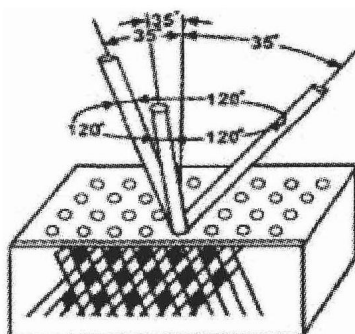


图 1.1-4 Yablonovitch 制造的三维光子晶体示意图

三维光子晶体结构是由两种或两种以上介质在空间三个维度上交替排列而成的空间周期性结构，它在三维空间各方向上都具有光子禁带，是最具有应用潜力的材料之一。美国贝尔通讯研究所的 Yablonovitch 采用精密机械加工技术在实验室制作出世界上第一块具有完全带隙的三维光子晶体结构。如图 1.1-4 所示，在一块高介质材料的底板平面上分布着呈三角点阵排列的空气洞，以偏离中心轴(与底板垂直)35.26 度的方向，用活性离子束依次对每个空气洞钻眼 3 次，这 3 次钻入方向彼此夹角 120 度。这样的结构具有金刚石结构的对称性，光子带隙从 10GHz 到 13 GHz，位于微波区域。

1.2 光子晶体的特性

我们知道原子是周期性有序排列的，这种周期性排列使得半导体中产生周期性的势场，而运动的电子受到周期性势场的布拉格散射，从而形成能带结构，带与带之间可能存在带隙。电子波的能量如果落在带隙中，就无法继续传播。

与之类似，光子晶体中材料折射率的周期性变化产生了光子带隙结构，从而由光子带隙结构控制着光在光子晶体中的运动。高低折射率的材料交替排列形成周期性结构就可以产生光子晶体带隙（band gap，类似于半导体中的禁带，*也可以理解为光受到布拉格散射引起的）。而周期的大小不同，导致了一定的光子晶体只对一定频率的光波产生能带效应。也就是只有某种频率的光才会在某种周期距离一定的光子晶体中被完全禁止传播。

光在光子晶体中的行为和电子在半导体中的行为类似还可以从电磁波和电子分别在光子晶体和半导体中所满足的方程来理解。光在光子晶体中传播时，电磁波在这种复合介质中传播将满足 Maxwell 方程组

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.2-1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.2-2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.2-3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (1.2-4)$$

其中， $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为宏观电场强度和磁场强度， $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别为

电位移向量和磁感应强度。 ρ 为自由电荷密度， $\mathbf{J}$ 为电流密度。

对于不考虑色散和损耗的介质，在无源区域满足： $\mathbf{J} = \rho = 0$ 。

则 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 之间的本构关系为

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \varepsilon_0 \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1.2-5)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (1.2-6)$$

其中 $\varepsilon(\mathbf{r})$ 是光子晶体的相对介电常数的分布， ε_0 和 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率。利用上述关系式，分别消去 $\vec{\mathbf{D}}$ 和 $\vec{\mathbf{B}}$ ，可以得到

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \varepsilon(\mathbf{r}) \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.2-7)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H} \right) = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.2-8)$$

对于具有 $e^{-i\omega t}$ 时谐特征的单色电磁波，则上式可改写为：

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E} \quad (1.2-9)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H} \right) = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{H} \quad (1.2-10)$$

将方程 1-3-9 式的左边展开得

$$-\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \frac{\omega^2}{c^2} [\varepsilon(\mathbf{r}) - 1] \mathbf{E} = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E} \quad (1.2-11)$$

在周期性介质中:

$$\varepsilon(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r} + \mathbf{R}_l) \quad (1.2-12)$$

电磁波在光子晶体中的传播与周期性半导体中电子的运动类似。在周期性半导体中，可以将电子的运动近似的看成在一个等效的势场中运动，它的波函数满足薛定谔方程：

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \Psi = E \Psi \quad (1.2-13)$$

$$V(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r} + \mathbf{R}_n) \quad (1.2-14)$$

在上式中， $V(\mathbf{r})$ 表示势能，具有周期性，其周期为晶格常数 $\mathbf{R}_n$ 。

比较上面两组方程式，可以建立以下的模拟关系：

$$\frac{\omega^2}{c^2} [\varepsilon(\mathbf{r}) - 1] \Leftrightarrow V(\mathbf{r}) \quad (1.2-15)$$

$$\frac{\omega^2}{c^2} \Leftrightarrow E \quad (1.2-16)$$

它们有类似的形式，即介电常数的周期性变化相当于势能的周期性变化，而 ω^2 / c^2 相当于能量本征值。

由于光子晶体和半导体晶体某些特性相似，固体物理中的许

多概念都可用于光子晶体，如能带、带隙、能态密度、激发态、缺陷态、束缚态（局域态）、施主态、受主态、倒格子、布里渊区、色散关系、布洛赫波等。很多用于研究半导体的方法也用于研究光子晶体。从光子和电子运动方程的可模拟性，可以得出以下的结论：在一个介电常数周期性变化的结构中，光子的运动类似于在周期势场中电子的运动。因此，在介电常数周期性变化的介电结构中具有光子能带结构，在一定的条件下具有光子能隙。光子晶体与半导体晶体有相同的地方，但也有本质的不同。首先，光子晶体与半导体晶体结构不同。光子晶体的结构是不同介电常数介质的周期性排列，而半导体内是周期性势场；光子晶体研究的对象是电磁波（光）在晶体中的传播，光子是自旋为 1 的玻色子，半导体研究的是电子的输运行为，电子是自旋为 1/2 的费米子；光服从的是 Maxwell 方程，电子服从的是薛定谔方程；光子波是向量波，而电子波是标量波；光子晶体中介质的周期尺寸是电磁波的波长，而半导体周期势场是原子尺寸；电子之间有很强的相互作用，而光子之间没有。

1.3 光子晶体的理论计算方法

1.3.1 平面波展开方法

平面波展开方法的基本思想是将电磁场以平面波的形式展开，可以将麦克斯韦方程组化成一个本征方程，求解该方程的本征值便得到传播的光子的本征频率。

在无源、无损耗的空间，时谐场的电场和磁场表达式写为：

$$\underline{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, t) = \underline{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) \exp(j\omega t)$$

$$\underline{\mathbf{H}}(\mathbf{r}, t) = \underline{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) \exp(j\omega t)$$

由关系式 $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon_0 \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ 以及

$\partial/\partial t \rightarrow j\omega$, 麦克斯韦方程写为以下形式:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = -j\omega\mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}) \\ \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = j\omega\varepsilon_0 \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) \\ \nabla \cdot \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0 \end{cases} \quad (1.3.1-1)$$

对于 $\mathbf{H}$ 场, 可以得到本征方程:

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (1.3.1-2)$$

对于 $\mathbf{E}$ 场, 本征方程为:

$$\nabla \times [\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})] = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1.3.1-3)$$

空间电场和磁场存在以下关系:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{j\omega\varepsilon_0 \varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (1.3.1-4)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{-j\omega\mu_0} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1.3.1-5)$$

根据布洛赫定理, 在周期结构中, 空间电场和磁场可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{H}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} h(\mathbf{r}) \mathbf{e}_k \\ h(\mathbf{r}) = h(\mathbf{r} + \mathbf{R}_l) \end{cases} \quad (1.3.1-6)$$

上式中, $\mathbf{R}_l$ 是实空间的格矢, $\mathbf{e}_k$ 是单位向量, 其垂直于向量 $\mathbf{k}$, 并与 $\mathbf{H}$ 向量平行。周期函数可以展开成傅立叶级数的形式, 因此 ε 、 h 可以表示为:

$$\varepsilon(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}_i} \varepsilon(\mathbf{G}_i) e^{i\mathbf{G}_i \cdot \mathbf{r}} \quad (1.3.1-7)$$

$$\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} = \sum_{\mathbf{G}_i} \varepsilon^{-1}(\mathbf{G}_i) e^{i\mathbf{G}_i \cdot \mathbf{r}} \quad (1.3.1-8)$$