

光 波 导 原 理

石 守 勇

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是著者在厦门大学授课讲义基础上结合科研实际经验编写而成的。内容包括电磁场理论基础、平板介质波导、周期性平板波导、圆柱型光波导(即光纤)的传播理论、光波导的结构、制造工艺及应用、耦合波理论,以及变折射率光学介质的成象理论等。可供高等院校物理系、无线电系及其它理工科有关专业的教师、研究生和高年级学生作为选修课教学参考书使用,也可供从事光纤通信、光电子学、半导体光器件及传感技术研究和应用工作的科技人员参考。

光波导原理

石守勇

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷二厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 12.25 字数 290 000

1989 年10月第1版 1989 年10月第1次印刷

印数 0001 -- 1 360

ISBN 7-04-000769-X/O·300

定价 6.80 元

引 言

由于激光技术问世,光学发展进入了一个新的阶段.新兴光学的一个广泛而又最富有生命力的应用领域就是光波导纤维通信.

象无线电波、微波、以及毫米波一样,光波也可用来携带信息.光波具有 10^{14} Hz 的频率,比毫米波高一万倍,比无线电波高 10^8 倍.因此,光通信最突出的特点是具有极高的信息传输速率和极大的信息传输容量.在现代社会中,现代化的国民经济、国防和科学技术都需要极大量的信息传输和处理.所以,光纤通信受到国内外科技界、产业界和政府的极大重视,正处在迅速发展的阶段.

激光器的发明,提供了一种良好的相干光源,为发展光纤通信提供了可能性;然而,实现光纤通信的关键在于光传输介质.

由于光波具有极短的波长,光束传播的发散度比无线电波、微波和毫米波小得多,所以利用大气作为传输介质,既经济又方便.但是,由于大气中不可避免的雨、雾、灰尘、云等等的散射,和大气中悬浮微粒等的吸收引起的大气信道衰减特性大幅度涨落,以及大气密度扰动引起很高的信道噪音,所以,实际上是难于利用大气作为光通信的主信道的.这样,人们就把主要力量放在发展介质光波导上.

人们重视发展介质光波导的第二个原因是开拓集成光学的需要.集成光学这个崭新的领域是以外延和扩散技术为基础,致力于发展微光学线路.

介质光波导的发展,还成了变折射率光学的生长点.大家知道的麦克斯韦“鱼眼”^[1]是一种绝对仪器的理论模型,也就是一种

能够完美成象的变折射率介质。这说明,在一百多年前人们就注意到变折射率介质具有极其优良的光学特性。但是,在激光技术发展以前,变折射率介质在光学领域中并未得到发展,只是在微波天线中得到一些应用^[2]。自从介质光学波导发展以来,产生了各种微透镜和传象纤维。它们在光学仪器、电子技术、医疗器械等许多方面获得广泛的应用,并且已成为生物视觉模拟的重要元件。

在光波导纤维的非通信应用中,特别要提到光纤传感器,由于这种新型传感器已显示出来的极高灵敏度和其他优良特性,引起人们极大的兴趣,并且投入了大量的研究力量。

总的说来,目前光波导研究主要集中于光纤通信、集成光学、变折射率光学和光纤传感器等几个应用领域。当然,随着光波导研究发展起来的技术、材料和理论,也必将在其他领域得到应用。

把介质制成波导,最早还要追溯到微波技术。在微波技术向毫米波段发展的阶段,由于金属界面的吸收和不均匀性的影响随着波长的缩短变得愈来愈严重,人们就开始提出各种各样的介质波导模型。到了光波段,实际上只能利用介质波导了。因为实际上几乎不可能制造如此微小尺寸的金属波导,并且保证其界面满足低耗和光学平滑的要求。

在实验技术上,人们利用介质纤维传导光能的工作,最早是在1950年以前^[3],那是一种利用光学玻璃材料拉制成的套层圆柱纤维,纤维芯的折射率较高,外套层折射率较低,用于传输普通光线。由于当时的玻璃材料损耗大,这种纤维只能在几十米长度内传输光能。所以,早期的光波导实验研究工作,重点在于寻找低损耗的介质材料。1970年美国康宁公司研制成功了损耗低达 $20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 的石英套层型圆柱光波导纤维^[4],而日本板玻璃公司研制成功了损耗为 $60 \sim 120 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 的自聚焦型光波导纤维^[5]。这个飞跃性发展的关键,是超纯光学材料熔制技术的建立。现在已经能够

研制每公里零点几分贝的极低损耗的光波导纤维,这已经非常接近石英材料光损耗的理论极限。

玻璃材料制成的光纤波导,有阶跃型多模和单模圆柱波导,自聚焦型圆柱波导,梯度型多模圆柱波导以及W型圆柱波导。各种固体材料制成的薄膜波导。在探索研究过程中,还出现过液芯波导,有机塑料纤维波导,透镜束波导以及气体透镜波导等。目前看来,集成光学中以介质薄膜波导为宜,通信中倾向于采用梯度型多模圆柱波导、阶跃型单模圆柱波导以及W型圆柱波导等。而自聚焦型圆柱波导则用于传象和高信息速率传输。

在理论研究上,早在1961年,在视觉研究中已涉及到光纤维的传播问题^[6]。1965年K. C. Kao建议把光纤维应用于通信^[7],而A. W. Snyder的研究为分析光波导中的许多问题铺平了道路^[8]。最后,大量的工作是在贝尔实验室完成的^[9-13]。我们为了开展光波导纤维的研制工作,对于实现光波导传输的几个基本问题也做了系统的分析研究^[14]。

但是必须指出,上述的理论工作主要是集中分析规则波导的传输特性和某些特殊的微弱不均匀性,即,上述理论只描述了规则波导本征模式的特性、具有微小不规则性波导模式之间的弱耦合状态以及某些特殊的强耦合状态。对于一般的局部不均匀性的分析,即一般情况下模式强耦合的分析,则有待于今后进一步的研究,这在集成光学和波导器件研究中是特别重要的。

光波导纤维以及由它制成的光缆已成为现代通信产业的重要而先进的基础产品,正在大量取代同轴电缆、微波中继而进入通信干线;由于实现了波分复用,光纤维具有极高的传输速率和信息传输容量,通信及其他信息传输实现了数字化;一个崭新的、先进的光纤通信产业部门已经出现,它将成为未来通信产业的主体。由于光纤技术、半导体激光器件、集成光学和数字传输设备的进展,一

种新的通信网络模式——宽带综合数字服务网(BIDSN)已经提出,并且已完成了可行性研究^[15],它能够充分地满足全社会的信息传输、交换、显示等的需要。光纤通信技术不愧为现代信息社会的重要技术基础。

我们的目的是对现在已经建立起来的波导光传输理论进行归纳。在归纳分析中,从麦克斯韦电磁场理论的基本方程出发,同时考虑了模态分析方法,光线分析方法和波光学分析方法。为了使知识结构完整,同时归纳分析了光波导的制造工艺技术和波导结构理论。

第一章简要地描述了电磁场各个基本量之间的相互关系,平面波通过介质常数阶跃界面的传播,和在极短波长近似下得到的光线方程,最后讨论了光线在介质常数阶跃界面和一维变折射率介质中的传播。

第二、三、四、五章讨论平板介质波导、周期波导与光路集成技术;第六、七、八章讨论圆柱介质波导。这七章主要是讨论规则波导,给出本征值和本征函数系,其中第四、五两章讨论了周期波导和光路集成技术的一些基本问题;同时也讨论了波导结构及其制造工艺,以便使波导传播理论的研究和实验技术之间有密切的联系。

第九章讨论光波导损耗,第十章讨论光波导的脉冲展宽,第十一章讨论耦合波理论。这三章是讨论光波导的基本传播特性。

第十二章讨论变折射率光学介质的成象理论。

本书采用SI单位制。

每章都附有习题和参考资料。

参 考 资 料

- [1] J. C. Maxwell, *Cambridge and Dublin Math. J.*, 8(1854), 188.
- [2] R. Stettler, *Optik*, 12(1955), 529.
- [3] N. S. Kapany, *Fiber Optics*, 1967(Academic Press).
- [4] F. P. Kapron, D. B. Keck and R. D. Maurer, *Appl. Phys. Letters.*, 17(1970), 423.
- [5] J. Jap, *Soc. Appl. phys. (Supplement)*, 39(1970), 63.
- [6] J. M. Enoch and E. Snitzer and H. Osterberg, *J. Opt. Soc. Am.*, 51(1961), 499.
- [7] K. C. Kao and G. A. Hockham, *Proc. IEE*, 113(1966), 1151.
- [8] A. W. Snyder, *IEEE Trans. MTT*-17(1969), 1130, 1138.
- [9] J. A. Arnaud, *Bell Syst. Tech. J.*, 53(1974), 675.
- [10] D. Gloge, *Appl. Optics*, 10(1971), 2252, 2443 etc.
- [11] E. A. J. Marcatili and E. Mitter, *Bell Syst. Tech. J.*, 48(1969), 2161 etc.
- [12] D. Marcuse, *Bell Syst. Tech. J.*, 48(1969), 3233 etc.
- [13] S. D. Personick, *Bell. Syst. Tech. J.*, 50(1971), 843.
- [14] 石守勇, 物构所通讯, 1977, 2, 21~29.
- [15] *ELECTRONICS LETTERS*, 20(1984), 18, 735.

目 录

引言	1
参考资料	5
第一章 电磁场理论基础	1
§ 1-1 电磁场基本方程	1
§ 1-1.1 麦克斯韦方程组	1
§ 1-1.2 物质方程	3
§ 1-1.3 波动方程	4
§ 1-1.4 边界条件	6
§ 1-1.5 电磁场的能量	8
§ 1-2 平面波	10
§ 1-2.1 平面波的解	10
§ 1-2.2 平面波在介质常数突变界面上的反射与折射	13
§ 1-2.3 全反射和反射波的相移	18
§ 1-3 零波长近似	20
§ 1-3.1 光线方程	21
§ 1-3.2 光线在界面上反射时的 Goos Hänchen 位移	25
§ 1-3.3 光线在变折射率介质层中的传播	26
习题	27
参考资料	27
第二章 平板介质波导	29
§ 2-1 波动光学分析方法	30
§ 2-1.1 平板介质波导中的光线传播	31
§ 2-1.2 Goos-Hänchen 位移	34
§ 2-1.3 特征方程	35
§ 2-2 电磁场理论分析方法	37
§ 2-2.1 波动方程的解	37

§ 2-2.2 TE 模式	39
§ 2-2.3 TM 模式	43
§ 2-2.4 传导模式与辐射模式	46
§ 2-2.5 平板介质波导本征模式系的正交性和完整性	53
§ 2-2.6 传导模式场结构	54
习题	56
参考资料	57
第三章 变折射率平板介质波导	58
§ 3-1 波导结构	58
§ 3-1.1 各向同性均匀介质平板的离子交换	58
§ 3-1.2 各向同性均匀介质平板的电诱导离子迁移	61
§ 3-1.3 外扩散技术	64
§ 3-1.4 内扩散技术	66
§ 3-1.5 p-n 结的变折射率平板波导模型	66
§ 3-1.6 变折射率平板介质波导结构模型分类	67
§ 3-2 光线方程的解	69
§ 3-2.1 平方律介质中的光线轨迹	70
§ 3-2.2 指数律介质中的光线轨迹	71
§ 3-3 波动方程的近似解	75
§ 3-3.1 平方律介质	77
§ 3-3.2 指数律介质(TE 波)	81
§ 3-3.3 指数律介质(TM 波)	84
§ 3-4 传输函数法	86
§ 3-4.1 传输函数的确定	87
§ 3-4.2 高斯场的传播	89
§ 3-4.3 高斯场传播的特性	91
习题	94
参考资料	95
第四章 周期平板介质波导	97
§ 4-1 周期波导的耦合方程	97
§ 4-1.1 本征模式之间的耦合	97

§ 4-1.2 耦合模方程	99
§ 4-1.3 耦合模方程的解	101
§ 4-2 周期波导的工艺技术与结构	102
§ 4-2.1 周期图样掩膜的制备	102
§ 4-2.2 周期结构的蚀刻工艺	104
§ 4-2.3 周期波导的结构	106
§ 4-3 周期波导的基本特性	106
§ 4-3.1 周期波导耦合模的基本关系	106
§ 4-3.2 周期波导的基本特性	110
习题	111
参考资料	112
第五章 光路集成技术	114
§ 5-1 光学功能单元与光路集成	114
§ 5-2 集成光发射器	116
§ 5-2.1 同质 p-n 结激光器	117
§ 5-2.2 集成异质结激光器	118
§ 5-2.3 分布反馈激光器	120
§ 5-2.4 调制与激光器集成光发射器	122
§ 5-3 集成光电探测放大器	123
§ 5-4 集成光学工艺	125
习题	126
参考资料	127
第六章 套层型圆柱介质波导	129
§ 6-1 波动方程的解	130
§ 6-1.1 波动方程的精确解	130
§ 6-1.2 弱导波导近似	135
§ 6-1.3 套层型圆柱介质波导中的光传输模式	137
§ 6-2 特征方程的解	141
§ 6-2.1 $l=0$ 模式的特征方程和截止点	142
§ 6-2.2 $l>0$ 模式的近似特征方程和截止点	143

§ 6-2.3 特征方程的渐近解	146
§ 6-3 传导模式的场	147
§ 6-3.1 传导模式场的表达式及其模式场结构	147
§ 6-3.2 波导横截面上的场强分布和功率流	152
§ 6-3.3 传导模式的群速度	155
§ 6-4 套层模式与辐射模式	158
§ 6-4.1 套层模式	159
§ 6-4.2 辐射模式	160
§ 6-4.3 套层型圆柱介质波导本征模式的正交性和完整性	161
习题	162
参考资料	164
第七章 圆柱形介质波导的结构与制造工艺	165
§ 7-1 波导结构	165
§ 7-2 利用扩散规律制造圆柱形波导	169
§ 7-2.1 恒定边值下的扩散——熔盐法离子交换	170
§ 7-2.2 高温下玻璃体之间的扩散——双坩埚法离子交换	174
§ 7-3 梯度逼近抛物线型折射率剖面结构波导的制造	
工艺	178
§ 7-3.1 MCVD 工艺	179
§ 7-3.2 MCVD 法的基本关系	180
§ 7-3.3 MCVD 法的工艺流程	184
§ 7-3.4 MCVD 工艺的性能	186
§ 7-3.5 PMCVD 工艺与 PCVD 工艺	188
§ 7-3.6 OVD 工艺与 VAD 工艺	190
习题	191
参考资料	192
第八章 变折射率圆柱介质波导	194
§ 8-1 光线方程的解	194
§ 8-1.1 抛物线近似	195
§ 8-1.2 抛物线介质中的光线轨迹	197

§ 8-1.3 光线延迟差	198
§ 8-2 近似标量波动方程的解	200
§ 8-2.1 模态分析	200
§ 8-2.2 传输函数	203
§ 8-2.3 在离轴点上垂直入射高斯光束的传播	206
§ 8-2.4 光束路径	208
§ 8-2.5 光束横截面上的强度分布	213
§ 8-2.6 介质吸收的影响	215
§ 8-3 基本波动方程	217
§ 8-3.1 波动方程的一般形式	218
§ 8-3.2 各类模式的波动方程	221
§ 8-3.3 标量波动方程与边界条件	226
§ 8-3.4 在抛物线型圆柱介质波导中标量波动方程的解	227
§ 8-4 近似方法	232
§ 8-4.1 微扰法	232
§ 8-4.2 WKB 方法	241
§ 8-4.3 传播模数	245
§ 8-4.4 变分法	247
习题	248
参考资料	249
第九章 光波导的损耗	251
§ 9-1 材料的吸收损耗	252
§ 9-1.1 过渡元素离子的吸收	253
§ 9-1.2 羟基—OH 的吸收	257
§ 9-1.3 基质的吸收	258
§ 9-2 高纯原料与洁净条件	259
§ 9-3 材料的散射损耗	260
§ 9-3.1 不均匀性散射	260
§ 9-3.2 不均匀性散射引起的波导噪音	263
§ 9-3.3 应力的影响	265
§ 9-3.4 瑞利散射	266

§ 9-4 波导结构损耗	267
§ 9-4.1 杂模损耗	267
§ 9-4.2 弯曲损耗	269
§ 9-4.3 波导不均匀性损耗	272
习题	273
参考资料	273
第十章 光脉冲波导传输的展宽	275
§ 10-1 光波导中引起脉冲展宽的因素	276
§ 10-2 几何光学分析方法	278
§ 10-2.1 在套层型圆柱波导纤维中光源的脉冲响应	278
§ 10-2.2 在套层型圆柱波导纤维中光源时间和空间分布脉冲的响应	283
§ 10-2.3 在梯度折射率圆柱波导纤维中的光线延迟	284
§ 10-3 模态分析方法	285
§ 10-3.1 高斯时间脉冲的响应公式	286
§ 10-3.2 在平方律介质波导中高斯时间和空间脉冲的响应	289
§ 10-3.3 介质色散引起的脉冲展宽	293
§ 10-3.4 超低色散的波导结构	295
习题	299
参考资料	300
第十一章 耦合波理论	301
§ 11-1 光波导模式的激发	302
§ 11-1.1 椭圆高斯场的传播及其表达式的简化	303
§ 11-1.2 被激发的传导模式及其本征值	304
§ 11-1.3 模式激发效率及其在远截止态($a \gg \sqrt{2}w_0$)或近截止态($w_m \ll a/\sqrt{2}w_0$)时的近似解析表达式	305
§ 11-2 耦合模方程	308
§ 11-2.1 规则波导本征模式的耦合模方程	308
§ 11-2.2 本地规则波导本征模式的耦合模方程	315
§ 11-3 耦合模方程的微扰解	317

§ 11-4 耦合功率理论·····	322
§ 11-5 光波导纤维的连接·····	326
习题·····	329
参考资料·····	330
第十二章 变折射率光学介质的成象理论 ·····	331
§ 12-1 变折射率光学介质·····	332
§ 12-1.1 麦克斯韦鱼眼·····	332
§ 12-1.2 Luneburg 透镜·····	334
§ 12-1.3 Wood 透镜·····	334
§ 12-1.4 离子扩散型变折射率介质·····	335
§ 12-2 哈密顿成象理论·····	336
§ 12-2.1 光学哈密顿公式·····	336
§ 12-2.2 傍轴近似光学·····	340
§ 12-2.3 实例·····	350
§ 12-2.4 数值结果·····	354
§ 12-3 光线跟踪方法·····	357
习题·····	360
参考资料·····	361
名词索引 ·····	362

第一章 电磁场理论基础

光波也是电磁波, 因此, 我们可以从麦克斯韦方程组出发, 讨论光波导中的传播问题, 这也就是光波导的电磁场理论^[1]. 几何光学可以看作是电磁光学在极短波长近似下的一种简化处理方法. 在这一章中, 我们将归纳电磁场各基本量之间的关系, 并且讨论平面波和光线的传播问题, 以便以后的章节可以同时应用光线方法和波动光学方法分析波导的传输特性.

§1-1 电磁场基本方程

§ 1-1.1 麦克斯韦方程组

在自由空间中的电磁场表现为电场矢量 $\mathcal{E}$ 和磁感应强度 $\mathcal{B}$.

在介质空间中, 电磁场与介质相互作用表现为第二组矢量, 即电流密度 $\mathcal{J}$, 电位移矢量 $\mathcal{D}$ 和磁场矢量 $\mathcal{H}$.

这五个电磁矢量之间的关系, 在宏观领域和缓慢运动的介质中, 遵守经典的麦克斯韦方程组, 其微分形式是

$$\nabla \times \mathcal{E} = -\frac{\partial \mathcal{B}}{\partial t}, \quad (1.1a)$$

$$\nabla \times \mathcal{H} = \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial t} + \mathcal{J}, \quad (1.1b)$$

$$\nabla \cdot \mathcal{D} = \rho, \quad (1.1c)$$

$$\nabla \cdot \mathcal{B} = 0, \quad (1.1d)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (1.1e)$$

其中(1.1a)式是法拉第电磁感应定律的微分形式, 因为矢量的旋度就是沿无限小单位面积的围线积分; 而(1.1b)式是广义的安培电路定律(即毕奥-萨伐尔定律), 不过这里考虑了位移电流项 $\partial \mathbf{D} / \partial t$. (1.1c)式是高斯定律的微分形式. (1.1d)式说明没有独立磁荷存在, 所以磁力线总是闭合的. (1.1e)式是电荷守恒定律的微分形式.

我们还注意到方程组(1.1)中各个方程并不是全部线性独立的, 如果对(1.1a)式两边取散度就得到

$$\nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0,$$

这是因为任何矢量的旋度再取散度恒等于零. 交换上式的空间和时间微商后对时间积分, 取积分常数为零时, 就得到(1.1d)式, 即(1.1d)式可以由(1.1a)式推导出来; 同样也可以从(1.1b)式推导出(1.1c)式; 而(1.1e)式则可以从(1.1b)式和(1.1c)式导出. 所以, 麦克斯韦方程组实际上只有二个方程是线性无关的.

考虑到迭加原理, 在线性介质中, 场随时间的变化可以用 $\exp(j\omega t)$ 描写. 因此, 时间算符为

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega, \quad (1.2)$$

而电磁场量的时间函数 $f(t)$ 与频谱函数 $g(\omega)$ 之间的关系遵守傅里叶变换关系:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) \exp(j\omega t) d\omega, \quad (1.3a)$$

$$g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (1.3b)$$

这样, 我们用 E, B, D, H, J 等表示不含时间变化因子的场矢量,

它们只是空间坐标的复数函数，麦克斯韦方程组可以改写为如下
的形式：

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B}, \quad (1.4a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}, \quad (1.4b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (1.4c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1.4d)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -j\omega \rho. \quad (1.4e)$$

§ 1-1.2 物质方程

在麦克斯韦方程组中有五个基本场量 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{J}$ ，但是，方程组(1.4)中只有两个方程是线性无关的，要能够唯一地确定这些场量，还必须补充三个方程。

电磁场($\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$)在不同的物质中都有相应的场量 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{J}$ ，它们之间的相互关系是非常复杂的，在缓慢运动介质的情况下，它们通过下列的物质方程联系在一起：

$$\mathbf{D} = \hat{\epsilon} \cdot \mathbf{E}, \quad (1.5a)$$

$$\mathbf{B} = \hat{\mu} \cdot \mathbf{H}, \quad (1.5b)$$

$$\mathbf{J} = \hat{\sigma} \cdot \mathbf{E}, \quad (1.5c)$$

式中 $\hat{\mu} = \mu_{xx} \mathbf{a}_x \mathbf{a}_x + \mu_{xy} \mathbf{a}_x \mathbf{a}_y + \mu_{xz} \mathbf{a}_x \mathbf{a}_z$
 $+ \mu_{yx} \mathbf{a}_y \mathbf{a}_x + \mu_{yy} \mathbf{a}_y \mathbf{a}_y + \mu_{yz} \mathbf{a}_y \mathbf{a}_z$
 $+ \mu_{zx} \mathbf{a}_z \mathbf{a}_x + \mu_{zy} \mathbf{a}_z \mathbf{a}_y + \mu_{zz} \mathbf{a}_z \mathbf{a}_z,$

$\hat{\epsilon}$ 、 $\hat{\sigma}$ 也有类似形式的定义， $\hat{\mu}$ 叫做磁导率， $\hat{\epsilon}$ 称为介电常数(即电容率)， $\hat{\sigma}$ 是电导率，它们都是二阶张量。如果介质是各向同性的，而且是非磁性的，则(1.5)式简化为

$$\mathbf{D} = K \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad (1.6a)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad (1.6b)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (1.6c)$$