

高功率半导体激光国家重点实验室

半导体激光器 原理

杜宝勋 著

半导体所

兵器工业出版社

责任编辑 / 郭 佳

张凤英

封面设计 / 底晓娟

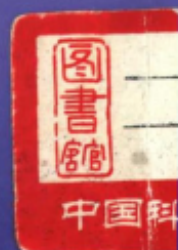
ISBN 7-80172-025-3



9 787801 720252 >

ISBN 7-80172-025-3/TN · 0

定价: 40.00 元



高功率半导体激光国家重点实验室

半导体激光器原理

杜宝勋 著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书全面深入地论述了半导体激光器的基本原理。主要内容包括：电子光跃迁和光子波发射的理论，光子波传播和光子波限制的理论，载流子注入和载流子限制的理论，以及普通半导体激光器和特种半导体激光器的理论。

本书可以作为光电子技术领域研究生学位课程的试用教材，也可以供有关专业的教师和科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

半导体激光器原理 / 杜宝勋著. —北京：兵器工业出版社，2001.6
ISBN 7-80172-025-3

I. 半… II. 杜… III. 半导体激光器—理论
IV. TN248.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 045955 号

出版发行：兵器工业出版社	封面设计：底晓娟
责任编辑：郭佳 张凤英	责任校对：王峰 全静
责任技编：魏丽华	责任印制：莫丽珠
社址：100089 北京市海淀区车道沟10号	开本：787×1092 1/16
经销：各地新华书店	印张：17.75
印刷：兵工印刷厂	字数：427.44千字
版次：2001年6月第1版第1次印刷	定价：40.00元
印数：1-550	

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

吉林大学高鼎三院士为本书题词

祝贺《半导体激光器原理》出版

培养高技术人才

发展光电子产业

高鼎三 2001.05.26

序

20 世纪 60 年代初，半导体激光器问世，揭开了半导体光电子学发展的序幕。经过近 40 年的努力开拓，已经发展成为一门渗透面很广交叉度很深的新兴学科。光电子学的应用，几乎遍及信息领域的各个方面，与微电子学一起成为当代信息技术的坚强支柱和国际高技术竞争的焦点，已经引起了世界各国对它的巨大关注。

半导体光电子学有其深厚的内涵，涉及诸多的功能器件和组件。然而，如同微电子学中的晶体管一样，半导体激光器是光电子学的核心。在半导体光电子学的应用中，首先必须掌握半导体激光器。熟悉了半导体激光器的基础知识，也能触类旁通地掌握其它光电子功能器件。因此，无论从人才培养还是从科研开发的角看来，迫切需要一本比较严密地系统地阐述半导体激光器基础知识的专门教科书。杜宝勋先生积累了近 40 年科研和教学的经验，在此基础上撰写的《半导体激光器原理》正是迎合了这一社会需求。

这本书的特点是：基础深厚、内容系统、概念清晰，分析透彻。这本书对物理问题的讨论，尽量采用数学分析表达式，以便读者深化对物理概念的理解，有利于收到举一反三和触类旁通的教学效果。这本书不仅系统地传授了半导体激光器的基础知识，而且使读者能够扎实地掌握分析和研究半导体激光器和其它半导体光电子器件的思路和手段，是一本很不多见的独具风格的著作。这本书尤其适合于作为研究生学位课程的基本教材，以及半导体光电子学研究和设计人员的主要参考读物，谨此向广大读者们衷心地推荐。

中国科学院半导体研究所

王启明 院士



2001 年 5 月 26 日

前 言

半导体激光器是以半导体材料为光增益介质的一类激光器，其核心是一个本身具有光反馈结构的 p-n 结二极管芯片，因而通常称为激光二极管。由 p-n 结注入电流激发，在芯片内产生受激辐射并建立起光振荡。半导体激光器与其它激光器相比，具有体积小、效率高、寿命长、可以直接调制、可以单片集成等优点。然而，输出功率较低、单色性和方向性较差。半导体激光器的应用，主要包括光纤通信、光盘存取、光谱分析和光信息处理等重要领域。而且，特别适用于激光夜视、激光引信、激光测距、激光雷达等军事应用。光增益介质只能是直接带隙半导体，主要包括 III-V、IV-VI 和 II-VI 族化合物及其固溶体材料。通过选择半导体的带隙，就可以获得不同波长的激光。迄今，已经获得了从可见光到远红外波长的激光。

1961 年，N. G. Basov 指出了在半导体内能够产生受激辐射。1962 年，R. N. Hall 采用扩散技术在 GaAs 内形成 p-n 结，将垂直于结平面的两个平行的端面抛光而形成法布里-珀罗谐振腔，获得了在低温下脉冲工作的 GaAs 同质结构激光器。此后，科学家们的的主要工作是研制在室温下连续工作的器件，这是半导体激光器实用化提出的最低要求。1963 年，N. Nelson 采用液相外延来生长 p-n 结，W. L. Bond 利用晶体的自然解理面来形成谐振腔。这两项技术，以后成为发展多种材料和多种结构的半导体激光器的基础技术。1967 年，J. C. Dymant 研制了电极条形激光器。此后，发展了各式各样的条形器件。

1963 年，H. Kroemer 提出了研制异质结构激光器的建议。1968 和 1969 年，Zh. Alferov 先后研制了以 GaAs 为光增益介质的 GaAs/AlGaAs 单异质结构和双异质结构激光器。异质结构器件，以后成为半导体激光器的主流。1970 年，GaAs/AlGaAs 双异质结构激光器实现了在室温下连续工作。此后，各式各样的 GaAs/AlGaAs 双异质结构条形激光器，均可以在 100℃ 以上的温度下连续工作，这标志着半导体激光器开始成熟了。

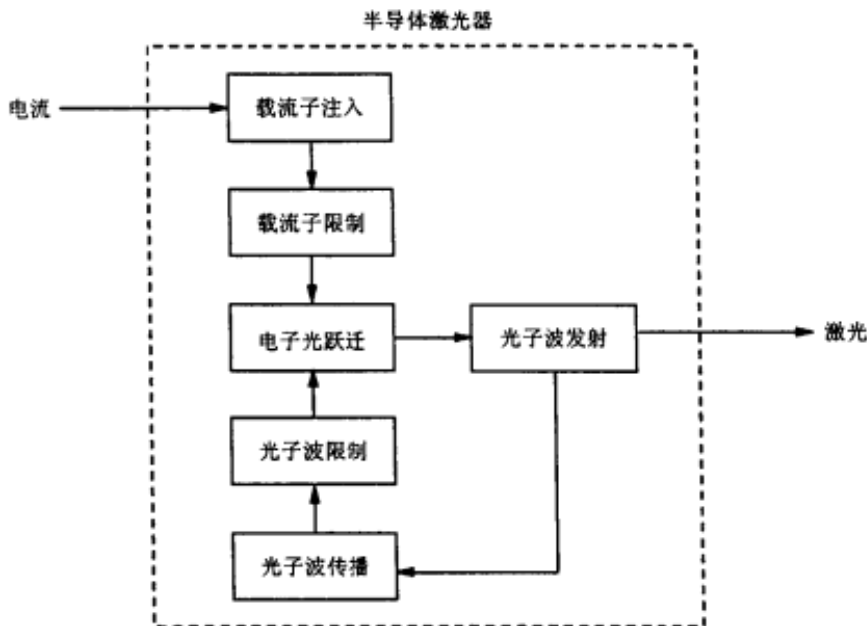
GaAs 的波长 $\sim 0.85\mu\text{m}$ ，恰巧与石英光纤的一个低损耗窗口 ($\sim 2\text{dB/km}$) 匹配，因而半导体激光器的主要应用是作为光纤通信系统的光源。显然，光纤通信系统提出的要求，就决定了半导体激光器的主要发展方向。这些要求是：①提高工作寿命；②控制激光模式；③扩展发射波长。70 年代，异质结构激光器迅猛发展，取得的主要成果是：①通过改进器件工艺，使器件的实测寿命超过了 10^3h ，由高温加速老化实验结果外推的寿命可达 $10^6\sim 10^7\text{h}$ ；②研制了多种具有内建条形波导的异质结构激光器(特别是掩埋异质结构器件)，以及量子阱激光器和分布反馈激光器，这些激光器都是单模器件；③为了使器件的波长与石英光纤的更低损耗窗口 $1.3\mu\text{m}$ ($\sim 0.5\text{dB/km}$) 和 $1.55\mu\text{m}$ ($\sim 0.2\text{dB/km}$) 匹配，研制了以 InGaAsP 为光增益介质的 InGaAsP/InP 异质结构激光器，其各项性能指标均与 GaAs/AlGaAs 器件相似。此外，为了满足其它方面应用的需要，还研制了可见光半导体激光器、远红外半导体激光器、高功率半导体激光器等。80 年代，上述多种异质结构激光器均已商品化了。特别应该指出的是，70 年代末和 80 年代初，超薄层材料生长技术(分子束外延、金属有机化学气相沉积)和超微细结构加工技术(电子束曝光、反应离子束刻蚀)，不仅加速了异质结构激光器的商品化进程，而

且还为研制新一代半导体激光器创造了条件。新一代半导体激光器包括垂直腔表面发射激光器和微腔半导体激光器。1977年，K. Iga提出了垂直腔表面发射激光器的设想；1988年，获得了在室温下连续工作的垂直腔表面发射激光器；90年代，这种器件进入了市场。1985年，T. Kobayash提出了无阈值微腔激光器的概念；1990年，Y. Yamamoto研制了微腔半导体激光器；目前，科学家们正在为获得接近于无阈值的器件而奋斗。

1998年，著者应高功率半导体激光国家重点实验室之邀讲授《半导体激光器原理》课程。听课的是该实验室的研究生和科技人员，还有吉林大学的研究生。

《半导体激光器原理》是该实验室的研究生学位课程。课程计划要求，只讲授器件理论，而不涉及器件工艺和器件应用。关于器件工艺和器件应用，已经另行授课。

半导体激光器是一种光振荡器。它是电流驱动的器件，当工作电流超过阈值电流时发射激光。下图表示半导体激光器内部的物理过程。



著者讲授的内容就是根据这些物理过程安排的，分为八章，共40节。每节讲授4学时，共160学时。

- 第一、二、五章，电子光跃迁和光子波发射的理论。
- 第三、四章，光子波传播和光子波限制的理论。
- 第六章，载流子注入和载流子限制的理论。
- 第七、八章，普通半导体激光器和特种半导体激光器的理论。

本书是根据当时撰写的讲义出版的。该讲义作为研究生学位课程的教材，已经在长春光学精密机械学院试用。

在本书出版之际，著者衷心感谢长春光学精密机械学院院长姜会林教授和高功率半导体激光国家重点实验室主任张兴德教授的支持和帮助，诚恳希望读者提出批评和建议。

著者

2001年2月，北京

目 录

第一章 电子光跃迁

§1	光子和电子	1
	1. 微观粒子	1
	2. 光子	2
	3. 电子	4
§2	电子光跃迁	6
	1. 与时间有关的微扰	6
	2. 跃迁几率	8
	3. 动量矩阵元	9
	4. 电偶极矩矩阵元	10
	5. 相互作用系数	11
	6. 跃迁速率分布	12
§3	介质电极化	12
	1. 复电极化率	12
	2. K-K 色散关系	15
§4	复介电常数	17
	1. 等效电极化率	17
	2. “自由”电子的贡献	19
	3. 振子强度	20
§5	光子吸收和发射	22
	1. 共振吸收、受激发射和自发发射	22
	2. 一个始态只对应一个终态	22
	3. 一个始态对应所有的终态	24
	4. 爱因斯坦关系	25
	5. 折射率色散的效应	27
	参考文献	28

第二章 半导体发光

§6	半导体知识	29
	1. 半导体物理知识	29
	2. 载流子密度	31
§7	矩阵元计算	34

1. 本征半导体——有 k 选择条件	34
2. $k \cdot \hat{p}$ 微扰近似	35
3. 重掺杂半导体——无 k 选择条件	36
4. 常数矩阵元近似	37
§8 本征半导体发光	39
1. 光增益系数	39
2. 振子状态密度分布	40
3. 名义电流密度	41
4. 发光特性计算	42
5. 载流子在能带内弛豫的效应	44
§9 重掺杂半导体发光	46
1. 能带尾巴	46
2. 光增益系数	48
3. 名义电流密度	49
4. 发光特性计算	50
§10 载流子复合	51
1. 辐射复合	51
2. 有杂质参与的复合	53
3. 俄歇复合	56
4. 量子效率	59
参考文献	59

第三章 光子波传播

§11 电磁辐射	60
1. 麦克斯韦方程	60
2. 玻印廷矢量	61
3. 相速度和群速度	63
4. 折射率随掺杂和组分变化	63
§12 界面反射和折射	64
1. 斯涅耳定律	64
2. TE 波的非涅耳公式	65
3. TM 波的非涅耳公式	68
§13 界面全内反射	71
1. 横向电场波	71
2. TE 波的古斯—汉欣位移	72
3. 横向磁场波	75
4. TM 波的古斯—汉欣位移	76
§14 薄膜内多次反射	76
1. 上下界面的反射率和透射率	77

2. 介质薄膜的反射率和透射率	78
3. 合成波分析	80
§15 高斯光束	82
1. 波函数	82
2. 光束性质	83
3. 厄米—高斯光束	86
参考文献	88

第四章 介质光波导

§16 介质光波导特性	89
1. 光子波横向限制	89
2. 光子波端面反射	91
3. 光子波端面出射	94
§17 折射率平板波导	97
1. 三层波导分析	97
2. 四层波导分析	101
3. 五层波导分析	104
4. 模式厚度	105
§18 折射率长条波导	106
1. 矩形波导分析	106
2. 圆形波导分析	110
§19 光增益平板波导	114
1. 光增益波导分析	114
2. 光增益的贡献	116
3. 等相位面弯曲	119
§20 光增益平方波导	121
1. 折射率波导分析	121
2. 光增益波导分析	122
3. 光增益的贡献	124
参考文献	126

第五章 速率方程

§21 速率方程推导	127
1. 光子速率方程	127
2. 载流子速率方程	129
3. 光子和载流子均匀分布近似	130
§22 稳态分析	132
1. 单纵模分析	132
2. 多纵模分析	135

§23	瞬态分析	137
	1. 延迟时间和启动时间	138
	2. 弛豫振荡	139
	3. 自发发射因子的效应	141
	4. 小信号调制	143
§24	条形结构效应	145
	1. 基本方程	146
	2. 稳态分析	146
	3. 小信号调制	148
§25	激光谱线宽度	153
	1. 自然展宽	153
	2. 相位涨落和强度涨落	153
	3. 噪声展宽	155
参考文献		158

第六章 异质结构

§26	p-n 同质结	159
	1. 电场分布	159
	2. 电势分布	160
	3. 能带图	161
	4. 结电容	163
	5. 结电流密度	164
§27	p-N 异质结	166
	1. 电场分布	166
	2. 电势分布	167
	3. 能带图	168
	4. 结电容	170
	5. 结电流密度	170
§28	p-P 异质结	171
	1. p 侧电势分布	172
	2. P 侧电势分布	173
	3. 能带图	174
	4. 渐变异质结	176
§29	载流子输运	177
	1. 体内激发	177
	2. 单边注入	179
	3. 局部体内激发	180
	4. 漂移电子流	182
§30	载流子限制	184

1. N-p-P 双异质结构	184
2. 注入电子流和漏出电子流	184
3. 漏出空穴流	186
4. 载流子限制因子	187
5. n-p-P 单异质结构	188
6. N-n-p-P 大光腔结构	189
参考文献	190

第七章 普通半导体激光器

§31 半导体激光器工作特性	191
1. 光振荡条件	191
2. 主要特性参数	193
§32 单异质结构激光器	197
1. 有效载流子密度	197
2. 阈值电流密度	199
3. 近场图形和远场图形	201
§33 双异质结构激光器	204
1. 阈值电流密度	204
2. 载流子侧向扩散和电流侧向扩展	207
3. 近场图形和远场图形	213
§34 外腔半导体激光器	216
1. 光注入锁模	216
2. 外腔反馈锁模	219
3. 激光谱线变窄	221
§35 双区半导体激光器	223
1. 基本公式	224
2. 自脉动和双稳态	226
参考文献	228

第八章 特种半导体激光器

§36 分布反馈半导体激光器	229
1. 耦合波分析	229
2. 光振荡条件	232
3. 耦合系数	233
§37 量子阱半导体激光器	234
1. 能带分裂为一系列子带	235
2. 能带状态密度分布	236
3. 载流子密度	238
4. 电偶极矩矩阵元	239

5. 量子阱半导体发光	242
6. 阈值电流密度	243
7. 多量子阱激光器	246
8. 载流子在能带内弛豫的效应.....	249
§38 垂直腔表面发射激光器	249
1. 工作特性	250
2. 布拉格反射镜	254
§39 微腔半导体激光器	256
1. 有效光子状态密度分布	256
2. 载流子寿命减小和光放大本领增大.....	260
3. 速率方程分析	261
4. 工作特性	262
§40 半导体激光器的热效应	264
1. 连续工作条件	264
2. 芯片内温度分布	266
参考文献	269

第一章 电子光跃迁

§ 1 光子和电子

激光器是以光子系统和电子系统相互作用为基础的。当然，半导体激光器也不例外。因此，我们首先复习一下光子和电子的性质。

1. 微观粒子

光子和电子均为微观粒子，具有波动性和粒子性，称为波粒二象性。在强调粒子性时，分别称为光子和电子；在强调波动性时，分别称为光子波和电子波。

令 p 和 E 分别表示粒子的动量和能量， k 和 ω 分别表示粒子波的波矢和频率，将粒子性和波动性联系起来的关系是：

$$p = \hbar k \quad (1-1)$$

$$E = \hbar \omega \quad (1-2)$$

其中 $\hbar = h/2\pi$ ， h 是普朗克常数。

粒子的动量是：

$$p = mv \quad (1-3)$$

其中 m 和 v 分别是粒子的质量和速度。

能量和动量的关系是：

$$dE = v \cdot dp \quad (1-4)$$

粒子波由波函数 $\Psi(r, t)$ 来描述，它是空间 r 和时间 t 的复函数。波动方程是：

$$\frac{1}{k^2} \nabla^2 \Psi(r, t) = \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi(r, t) \quad (1-5)$$

其中

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1-6)$$

(1-5)式的平面波解是：

$$\Psi(r, t) = A e^{\pm i(\omega t - k \cdot r)} \quad (1-7)$$

其中振幅 A 为常数。

(1-7)式为元波，它是自由粒子的波函数。任何波函数，均可以写成许多元波线性叠加。

波数和频率分别为：

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1-8)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1-9)$$

其中 λ 和 T 分别是波长和周期。

因此，粒子波的速度是：

$$u = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (1-10)$$

在有限体积 V 内, 波矢和频率均取一系列分立值, 即本征值 k_n 和 ω_n , 这是由边界条件决定的。因此, 我们有一系列本征波函数 $\Psi_n(\mathbf{r}, t)$ 。

这些本征波函数满足正交条件:

$$\int_V \Psi_m^*(\mathbf{r}, t) \Psi_n(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} = 0 \quad (1-11)$$

现在考虑各边长均为 L 的立方体介质, 令其中心为坐标原点。波函数满足周期性边界条件, 求出 k 的三个分量的本征值为:

$$k_i = n_i \left(\frac{2\pi}{L} \right) \quad (1-12)$$

其中 $i=x, y, z, n_i=0, \pm 1, \pm 2, \dots$

就粒子性而言, 不同的 k 值表示粒子处于不同的状态; 就波动性而言, 不同的 k 值表示粒子波具有不同的模式。显然, 状态和模式是一一对应的, 只是对一件事情的两种说法而已。

在 k 空间内, k 的每个本征值表示一个状态, 因而每个状态占有的 k 空间体积是:

$$\delta_V = \left(\frac{2\pi}{L} \right)^3 = \frac{8\pi^3}{V} \quad (1-13)$$

半径为 k 的球体积是:

$$\Delta_V = \frac{4}{3} \pi k^3 \quad (1-14)$$

由(1-13)和(1-14)式求出该体积内的状态数为:

$$N = 2 \left(\frac{\Delta_V}{\delta_V} \right) = \frac{Vk^3}{3\pi^2} \quad (1-15)$$

其中因子 2 表示粒子具有两个自旋状态。

因此, 单位体积单位波数的状态数为:

$$\rho(k) = \frac{1}{V} \left(\frac{dN}{dk} \right) = \left(\frac{k}{\pi} \right)^2 \quad (1-16)$$

在后面的分析中, 通常采用单位体积单位能量的状态数:

$$\rho(E) = \frac{1}{V} \left(\frac{dN}{dE} \right) = \rho(k) \left(\frac{dk}{dE} \right) \quad (1-17)$$

$\rho(k)$ 和 $\rho(E)$ 均称为粒子状态密度分布。

2. 光子

对于光子, v 保持不变, 由(1-3)和(1-4)式求出:

$$E = vp = v\hbar k \quad (1-18)$$

$$v = \frac{\omega}{k} = u \quad (1-19)$$

(1-18)和(1-19)式表明, 光子的 E 和 k 是直线关系, 光子的速度等于光子波的速度。

$$\text{令} \quad u = \frac{c}{n} \quad (1-20)$$

$$\text{则有:} \quad k = nk_0 \quad (1-21)$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c} \quad (1-22)$$

其中 n 是介质的折射率, c 和 k_0 分别是光子在真空中的速度和波数。

由(1-5)、(1-21)和(1-22)式求出光子的波动方程:

$$\nabla^2 \Psi(\mathbf{r}, t) = \left(\frac{n}{c}\right)^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi(\mathbf{r}, t) \quad (1-23)$$

这是经典波动方程。

对于光子波, 采用经典波描述, 它只能是 \mathbf{r} 和 t 的实函数。因此, 我们约定, 光子波场 $U(\mathbf{r}, t)$ 由 $\Psi(\mathbf{r}, t)$ 的实部来表示。在习惯上, 我们将光子波函数写作:

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = A e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (1-24)$$

因此
$$U(\mathbf{r}, t) = A \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad (1-25)$$

令平面波沿 z 方向传播, 则(1-24)和(1-25)式分别改写为:

$$\Psi(z, t) = A e^{i(\omega t - kz)} \quad (1-26)$$

$$U(z, t) = A \cos(\omega t - kz) \quad (1-27)$$

光子波通过单位面积的平均功率为:

$$I = \langle U^2(z, t) \rangle = \frac{1}{2} A^2 \quad (1-28)$$

这是光子波的强度, 其中符号 $\langle \dots \rangle$ 表示对时间取平均值。

在有损耗介质内, 采用复折射率:

$$\tilde{n} = n - i n' \quad (1-29)$$

其虚部 n' 表示损耗。

因此, (1-21)和(1-23)式分别改写为:

$$\tilde{k} = k - i k' = (n - i n') k_0 \quad (1-30)$$

$$\nabla^2 \Psi(\mathbf{r}, t) = \left(\frac{\tilde{n}}{c}\right)^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi(\mathbf{r}, t) \quad (1-31)$$

(1-26)、(1-27)和(1-28)式分别改写为:

$$\Psi(z, t) = A e^{-k'z} e^{i(\omega t - kz)} \quad (1-32)$$

$$U(z, t) = A e^{-k'z} \cos(\omega t - kz) \quad (1-33)$$

$$I(z) = \frac{1}{2} A^2 e^{-\alpha z} \quad (1-34)$$

在(1-34)式中

$$\alpha = 2k' = 2n'k_0 \quad (1-35)$$

α 是介质的损耗系数。

将定态波函数写作:

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = f(t) e^{-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \quad (1-36)$$

利用(1-21)和(1-22)式, 将(1-36)式代入(1-23)式中得到:

$$\frac{d^2}{dt^2} f(t) + \omega^2 f(t) = 0 \quad (1-37)$$

这是振荡方程, 即时域亥姆霍兹方程。