

当代科技重要著作·信息领域

〔美〕 W. T. TSANG 主编

半导体光电子技术丛书

半导体注入型激光器(I)

江剑平等译 杜宝勋 校



清华大学出版社
电子工业出版社

73-7717
373

半导体光电子技术丛书

半导体注入型激光器 (I)

[美] W. T. TSANG 主编

江剑平等译 杜宝勋校

清华大学出版社
电子工业出版社

内 容 简 要

本书全面、系统地介绍了近二十年半导体光电子技术领域中的主要研究成果。本册共五章，包括半导体激光器的动态特性、高频电流调制和光谱特性、动态单频分布反馈激光器和解理耦合腔半导体激光器及脉冲锁模等。该书对我国从事半导体光电子技术的科研、教学及工程技术人员是一本具有借鉴和启迪作用的参考书。

0411/107
半导体光电子技术丛书

半导体注入型激光器 (I)

[美] W. T. TSANG 主编

江剑平等译 杜宝勋校

☆

清华大学出版社 出版
电子工业出版社

北京昌平振南排版厂排版

中国科学院印刷厂印装

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：850×1168 1/32 印张：12 字数：332 千字

1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷

印数：0001~1500

ISBN 7-302-00686-5/TN·21

定价：8.50 元

半导体光电子技术丛书
编 审 组

王启明 周炳琨 杜宝勋
江剑平 孙宝寅 吴金生

出版前言

由美国 AT&T 贝尔实验室 W.T.TSANG 主编的《光通信技术》丛书是一套在世界享有声誉的学术专著。该套丛书共分七册，前五册讨论的是半导体光电子技术，载入《半导体与半金属》第22卷，后两册讨论的是光纤技术及传输系统，载入《光纤通信》论文集。现在我们出版了前五册的中文版，并将原书各册的顺序作了调整，旨在介绍国外光电子技术领域研究的新成果，并定名为《半导体光电子技术丛书》。它包括：

- 第一册 半导体注入型激光器（I）
- 第二册 半导体注入型激光器（II）和发光二极管
- 第三册 半导体光检测器
- 第四册 半导体集成光电子学
- 第五册 半导体材料生长技术

原书由美国、日本、法国的 38 位专家撰稿，全面、系统地总结了近 20 年来半导体光电子材料、器件与集成技术研究方面的重要成果、既有理论和技术的论述，又提供了大量的数据、资料，对我国从事半导体光电子技术的教学、科研及工程技术人员，将是一套具有借鉴和启迪作用的参考书。

丛书得以出版，要感谢国家高技术光电子专家组的推荐与支持，感谢杜宝勋副研究员、江剑平副教授在组织这套丛书的翻译及审校方面所作的大量工作。欢迎读者对本书存在的缺点和错误给予批评指正。

1990 年 3 月

• II •

原书序言

当印第安人利用烟火传递信息时，便蕴育着现代光通信的想法。当时由一个山顶上放出断断续续的青烟就是一种数字信号；这信号是以青烟的出现与消失为编码，确实是二进制的。光是信息载体，空气是传输介质，人眼是光检测器。信号由一个山顶传向另一个山顶，其作用相当于是信号的再放大，正如今天的中继器。1880年，亚历山大·格拉汉·贝尔采用太阳光束作为载体将声音信号传递了200米以上的距离，称之为光话。远在这个历史性实验之前，人类就设计并使用了光通信。然而直到1977年才敷设了第一个商用光通信系统。这项新技术的完善，包括研制坚固耐用的近红外光源—可对信息进行调制，低损耗的传输介质，灵敏的光检测器—可无误地恢复并再现光源发出的信息。

1958年，激光器的问世及演示性实验在光通信方面立即引起了新的兴趣和广泛的研究，然而光通信实用化的美好前景，只有当三个主要技术问题日趋成熟后才展现出来。第一个技术问题是1962年研制成功电流注入型半导体激光器，1977年可做到其连续工作寿命达一百万小时以上；第二项技术是在1970年获得了光损耗为20 dB/km的掺杂石英光纤，证实了高纯石英与同类介质相比具有最低的光损耗。1973年发现，经过适当热处理的掺硼石英的折射率低于高纯石英的折射率。最近又研制成功了超低损耗(0.12dB/km)的掺铈石英光纤；第三项技术是在七十年代研制成功了低噪声光检测器，它使超高灵敏度光接收机变为现实。可以说，高可靠的注入型半导体激光器、低损耗光纤及低噪声光检测器的研究进展，促进了光波通信技术的实用化，并显示出了比普通的电传输系统的优越性。

由于光纤通信涉及到许多技术问题，包括电通信系统、玻璃及半导体光电子技术等，在过去的 20 年内人们进行了大量的研究工作，我们试图在这套丛书中总结所积累的知识，并定名为《光波通信技术》。这套丛书由七册组成，前五册讨论半导体光电子技术，据其内容载入《半导体与半金属》；而后两册，一册是讨论光纤技术，另一册是讨论传输系统，他们被载入厉鼎毅和 W.T.TSANG 编著的《光纤通信》。

本卷第一册讨论半导体生长技术，详细说明了各种 III-V 族化合物半导体的外延生长技术和材料缺陷，包括液相外延、分子束外延、常压和低压金属有机化学汽相沉积、以及卤化物和氯化物输运汽相沉积。每种技术单独成章，而半导体材料缺陷则另有一章专门讨论。

本卷第二册和第三册讨论光谱范围为 $0.7\text{--}1.6\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 以上的注入型激光器和发光二极管的制作、特性和应用。具体地说，第二册各章包括半导体激光器的动态特性与亚皮秒脉冲锁模、高速电流调制和光谱特性、动态单频分布反馈激光器和解理耦合腔半导体激光器。第三册各章介绍的有关内容是，半导体激光器方面的是评述激光器结构及其性能比较、横模稳定方案、半导体激光器发射机的功能可靠性以及波长超过 $2\mu\text{m}$ 的半导体激光器。发光二极管方面的讨论分为三章，即发光二极管器件设计、发光二极管的可靠性及它在传输系统中的应用。第二册和第三册应被视为一个整体，而不是分别独立的两册。

本卷第四册专门讨论光检测技术，详细地介绍了雪崩光二极管的原理，采用 Si、Ge 和 III-V 族化合物制作的雪崩光二极管及光晶体管。还有一章讨论用于高速率长波长光通信系统的雪崩光二极管接收机的灵敏度。

本卷第五册讨论集成光电子学和半导体光电子器件的其它应用，详细说明可以集成的有源和无源光器件的原理和性能以及集成光电子器件的性能。还有一章讨论半导体激光器在光传输系统中作

为光放大器的应用，这是其最新应用的一个示例。

由于题材不同，本丛书的后两册载入不同的论文集为宜。讨论光纤技术的一册，包括光纤的设计和制作、光学特性及非线性光学等。最后一册讨论光传输系统，包括光波系统基础，光发射机和光接收机设计理论，半导体激光器在相干光传输系统中的频率调制和相位调制。

所以，这套包括七册的丛书全面地讨论了整个光波通信技术。丛书的每位作者均来自从事该领域研究和发展的单位。

作为一名客座编辑，我衷心感谢 R. K. Willardson 和 A. C. Beer，他们给了我一个宝贵的机会，把这样一个重要的、具有爆炸性的技术在《半导体与半金属》上介绍给读者。我也衷心感谢诸位作者及其所在的单位，正是在他们的努力和支持下本丛书才得以问世。最后，我要向 AT & T Bell 实验室为完成此项工作所提供的一切方便和必要的条件表示敬意，也向 C.K.N. Patel 为本丛书撰写前言表示敬意。

W. T. Tsang

目 录

出版前言

原书序言

第一章 半导体激光器的锁模	1
I 引言.....	2
II 半导体激光器的锁模理论.....	3
III 实验工作述评.....	21
参考文献.....	66
第二章 半导体注入型激光器的高频电流调制	72
I 引言.....	74
II 激光器的动力学, 速率方程及其应用范围.....	75
III 半导体注入型激光器的瞬态响应和小信号调制特性.....	82
IV 半导体注入型激光器的频率响应极限.....	96
V 高频调制下的寄生元件和电路的一些考虑.....	121
VI 超辐射和端面反射率的降低对调制响应的影响.....	132
VII 其它调制方式和效应.....	137
VIII 结论和展望.....	147
参考文献.....	148
第三章 半导体激光器的光谱性质	155
I 引言.....	157
II 吸收、发射和增益.....	158
III 模式强度谱.....	172
IV 光谱涨落.....	188

参考文献	204
第四章 具有分布反射器的动态单模半导体激光器	207
I 引言	208
II 动态单模 (DSM) 激光器的结构和理论考虑	211
III DSM 激光器的制作和激光特性	237
IV 讨论	250
参考文献	254
第五章 解理耦合腔 (C³) 激光器	262
I 引言	264
II C ³ 激光器的制作	268
III 高比特率调制下的单频工作	275
IV 不连续单频调谐	282
V 模拟频率调制	287
VI 利用反馈回路实现光谱稳定	293
VII C ³ 激光器的工作特性	297
VIII 采用 1.55 μm C ³ 激光器的单频传输实验	301
IX 多级多路光频移键控 (FSK)	318
X 光开关和程序系统	320
XI 利用光谱双稳态的频移键控	323
XII 具有电控吸收器的门控锁模半导体激光器	325
XIII 具有集成腔内调制器的 Q 开关 C ³ 激光器	330
XIV 放大器-调制器与 C ³ 激光器的集成	333
XV 光逻辑运算	337
XVI 自对准激光器-探测器组件	342
XVII C ³ 激光器的理论分析	345
XVIII 结论	362
参考文献	364

第一章 半导体激光器的锁模

J. P. Van der Ziel

美国 贝尔实验室

黄小康 译

I. 引言	2
II. 半导体激光器的锁模理论	3
1. 锁模过程	3
2. 锁模模型	5
III. 实验工作述评	21
3. 主动锁模	21
4. 被动锁模	47
5. 注入锁模	61
参考文献	66

I. 引言

对于各种激光器，其工作有一个共同的方面，就是要产生超短脉冲。在多数情况下，至少在初期，激光器的阈值非常高，只能在低占空比下脉冲工作。脉冲工作可以产生很高的峰值功率，因此有广泛的应用。例如在光学非线性和脉冲激发荧光的时间响应的研究中都需要短脉冲激光。事实证明，进一步向窄脉冲宽度和高重复频率发展超短脉冲是极其重要的，也是富有成效的。

采用激光器在外腔内锁模的办法得到了最短的脉冲。本章专门讨论半导体激光器的锁模。Au Yeung 和 Johnston (1982a) 以及 Inaba (1983)，已经对半导体激光器锁模的实验研究作过简要的回顾。最早报导的锁模是用 AlGaAs 激光器实现的，脉冲宽度 23ps，重复频率 3GHz (Ho *et al.*, 1978a,b)。1.21 μ m 波长的 InGaAsP 激光器的锁模，在 2.1GHz 的重复频率下，得到 18ps 的超短脉冲 (Glasser, 1978)。激光器工艺和实验技术的改进，已经使脉冲宽度进一步变窄到 0.5—0.6ps (Van der Ziel *et al.*, 1981b, c; Yokoyama *et al.*, 1982)。在这样短的时间内，脉冲宽度减小了近 40 倍，这是一个很显著的成就。进一步使脉冲宽度变窄将更为困难，因为锁模脉冲受变换的限制，更短脉冲的产生伴随着光谱宽度的增大。在半导体激光器内群速度的色散很大，因而增益谱宽度导致了脉冲宽度的自然极限。

在 1978 年以前，人们就已经对半导体激光器的锁模作了许多尝试。在一些情况下观察了对应于开关时间的光调制 (Morozov *et al.*, 1968; Mohn, 1969 a, b; Broom, 1969; Broom *et al.*, 1970; Paoli 和 Ripper, 1970; Harris, 1971; Morikawa *et al.*, 1976; Risch 和 Uoumard, 1977; Risch *et al.*, 1977; Ikushima 和 Maeda, 1978; Salathe, 1979)。在外谐振腔内引入一个色散法布里-珀罗元件，得到了单模发射谱，并消除了自脉动 (Uoumard,

1977)。此外，还研究了由外腔反射波引起的噪声特性 (Hirota 和 Suematsu, 1979)。在这一时期内，由于激光器本身的特性不是很好，而且没有采用二次谐波自相关技术和条纹照相技术来精确测量宽度小于 200ps 的光脉冲的可能性，使锁模工作受到了很大影响。

目前获得的超短脉冲宽度已超过了光通信系统当前的要求。如果与外调制器和复用器相结合，则锁模技术可以满足未来光通信系统的要求，为超短脉冲宽度和超高比特速率传输提供很有希望的光源。还有一些技术可以用来产生脉冲宽度略宽的脉冲。如果总电流超过阈值，则用正弦微波或短脉冲电流注入来直接调制增益可以造成张弛振荡。当频率足够高或电流脉冲足够窄时，在一定的电流范围内，可以得到宽度为 20—50ps 的单脉冲。第二章将讨论这些技术。本章的第二节着重叙述主动和被动锁模的理论；第三节讨论锁模的实验工作。

II. 半导体激光器的锁模理论

1. 锁模过程

大量的早期理论工作是针对产生超短脉冲的固体激光器和染料激光器的锁模。然而对于半导体激光器的锁模也是适用的。用于分析锁模行为的理论模型可以分为锁模过程的光谱分析和时间分析两种。两者的方法不同，但是互相补充。在光谱分析模型中，要考虑激光器的驻波腔模式和外腔模式的总效果 (图1)。模式 ν_m 和 ν_{m+1} (m 是复合腔的纵模指数) 的频率间隔是，

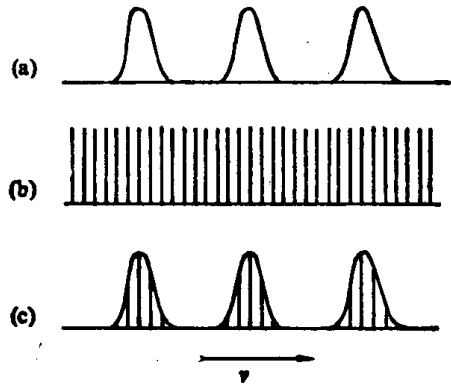


图 1 具有外腔的激光器的模式。(a) 间隔为 $\Delta\nu_L$ 的法布里-珀罗模式，(b) 间隔为 $\Delta\nu_m$ 的等效外腔模式，(c) 复合腔模式

$$\Delta\nu_m = c / (2 \sum_i n_i l_i) \quad (1)$$

其中 c 是光速, $\sum_i n_i l_i$ 是由 i 个长度为 l_i 和折射率为 n_i 的谐振腔组成的复合腔的总光学长度。

非线性(例如与谐振时间有关的增益或可饱和吸收)引起了极化边带,它们与原来模式的间隔也是 $\Delta\nu_m$ 。在相应模式间隔的频率处,极化边峰的存在引起了模式之间的能量交换,并使模式之间具有一个固定的相干相位关系。相位锁定在半峰全宽(FWHM)为 $\Delta\nu$ 的有限光谱范围内,它对应于复合腔内 N 个模式锁定:

$$N = \Delta\nu / \Delta\nu_m \quad (2)$$

脉冲宽度由驻波腔模式之间的干涉来决定,其半峰全宽是锁模的变换极限

$$\tau_p = \alpha (\Delta\nu)^{-1} \quad (3)$$

其中 α 是与脉冲形状有关的数值因子。

在锁模理论的另一个模型中,腔内的锁模驻波分解为行波。这些模式之间的干涉产生一个在腔内传播的光脉冲,其宽度为 τ_p 。这个理论描述了光脉冲在腔内传播时其包络的变化。在稳态下,在每次变化后,这个包络可以再现。端面透射、内部吸收和散射所造成的损耗由增益来补偿。有限带宽和色散引起的色散效应由导致脉冲内相移的时间延迟来补偿。

锁模过程是一种工作方式,它与正弦或脉冲电流直接调制激光器有很大差别。在后一种工作方式中,激光器的光子和载流子浓度方程的动态响应产生张弛振荡,它是由自发发射速率决定的,响应时间为 30—50 ps。然而,当激光器工作在锁模状态时,内部光脉冲在腔内往返,在它再入增益介质时,因载流子分布反转而造成了闪电般的受激发射。因此,这个光脉冲只需要在往返损耗造成的原来水平上加以放大。激光器的光子和载流子浓度方程对于决定脉冲宽度并不重要。这一点在利用一个很慢的饱和吸收体的被动锁模中非常明显。在这种情形下,只在一个短暂的时间内具有净增益,这是由增

益耗尽和吸收体饱和之间的细致平衡决定的，与光脉冲再入增益介质时的强度有关。在被动锁模激光器中，观察到了亚微微秒光脉冲。这一事实表明，锁模过程比由光子和载流子浓度方程决定的弛豫振荡过程快两个量级。

2. 锁模模型

已经报导了一些关于半导体激光器主动锁模和被动锁模的理论分析 (Haus 和 Ho, 1979; Aspin 和 Carroll, 1979; Glasser, 1980; Haus, 1980a, b. 1981; Van der Ziel, 1981b; Au Yeung, 1981; Au Yeung 和 Johnston, 1981)。在这些理论中，载流子浓度 (增益) 的正弦调制，由再入脉冲导致的受激发射引起的增益耗尽，以及可饱和吸收区的存在，是造成脉冲变窄的原因。

这里阐述的是半导体激光器锁模的时间分析模型，它是以光脉冲在腔内传播为基础的。由激光器的载流子浓度方程导出光增益。在脉冲峰值附近的时间范围内展开增益和损耗求出脉冲宽度的表达式。这一理论与第 III 节介绍的实验结果非常一致。

半导体激光器锁模的脉冲重复频率一般为 0.5—2GHz。这个频率不是任意的，而由脉冲间隔内增益恢复的时间响应来决定。如果没有强烈的受激发射，则增益恢复取决于载流子注入速率和电子寿命。电子寿命的典型值约 2ns。因而，在脉冲间隔内，增益恢复已经基本完成。在很低的重复频率下，增益将会很高，它使自发发射变强，并产生导致脉冲变宽的自脉动。在很高的重复频率下，没有充分的时间恢复到足够高的增益，因而脉冲变弱并展宽。当注入电流比阈值电流高很多时，这个限制可以放宽。

半导体激光器内可饱和吸收体的响应时间比脉冲重复周期快得多，但是假定它大于脉冲宽度，这种可饱和吸收体为慢可饱和吸收体 (New 1972, 1974; Haus, 1975a)，它不同于响应时间小于脉冲宽度的快可饱和吸收体 (Haus, 1975b)。用慢可饱和吸收体进行锁模，其工作条件没有用快可饱和吸收体那样苛刻，而且得到的脉

冲较短，因此是非常有利的。

本节的主动锁模理论引用Haus(1981)和Van der Ziel (1981b)的工作。而这些工作又以同步锁模染料激光器理论 (Auschnitt 和 Jain 1978; Auschnitt *et al.*, 1979; Haus, 1975a-c, 1976)为基

础。被动锁模理论引用 Haus (1981) 的工作。

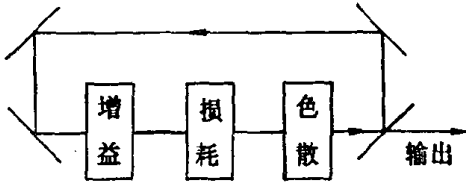


图 2 材料参数对在外外部环形谐振腔内单向传播的脉冲的影响示意图

a. 脉冲包络方程

锁模过程可以用脉冲包络函数与时间的关系来描述。为简单起见，假设有一个如图 2 所示的环形腔，腔内有一个单方向传播的单脉冲 (Haus,

1981)。光脉冲在腔内循环 m 次后的光场为

$$E_m(t) = v_m(t) \exp(j\omega_0 t) + c.c., \quad (4)$$

其中 j 表示虚数， ω_0 是中心频率， $v_m(t)$ 是与时间有关的包络函数， $c.c.$ 表示共轭复数。环形腔包括一个长度为 l_g ，增益为 $G(t)$ 的增益区和一个有效长度为 l_l 、吸收为 $L(t)$ 的损耗区，后者包括固定损耗、与光谱有关的损耗和可饱和吸收。色散效应包括在相位因子 Φ 内。循环一次后脉冲包络的变化可以用一个算符作用在脉冲包络上来表示：

$$v_{m+1}(t) = D \exp(Gl_g - Ll_l - j\Phi) v_m(t) \quad (5)$$

算符 D 使脉冲延迟一个循环的渡越时间为 T_R 。假设脉冲包络的净变化很小，则 (5) 式中的指数函数可以展开，并取一级近似

$$\begin{aligned} v_{m+1}(t) &\approx D(1 + Gl_g - Ll_l - j\Phi) v_m(t) \\ &\approx D(1 + O) v_m(t) \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$O = Gl_g - Ll_l - j\Phi \quad (7)$$

它是描述循环一次后 $v_m(t)$ 变化的算符。

在平衡时，每次循环后脉冲必须完全重复。腔内有源介质的动

态特性使脉冲形状得到恢复。因此，实际上一个循环的渡越时间与脉冲形状始终保持不变的渡越时间 T_R 相差一个小量 δT_R 。在主动锁模和被动锁模理论中，都把这一时间差当作未知参数来考虑。考虑到这个时间差，脉冲再现的条件可以写成

$$v_{m+1}(t) \approx Dv_m(t - \delta T_R) \approx D[1 - \delta T_R(\partial/\partial t)]v_m(t) \quad (8)$$

由(5)和(8)式可以得到算符方程

$$[O + \delta T_R(\partial/\partial t)]v_m(t) = 0 \quad (9)$$

(9)式描述锁模对模式幅度的影响，算符 O 是与时间有关的函数。对于主动锁模和被动锁模，算符 O 包含内部因素决定的时间关系，这是由受激发射引起的增益降低和可饱和吸收体透明引起的。它还包含了增益与时间的明确关系，这是由增益恢复和外部调制引起的。对于主动锁模，由(9)式可以解出厄米-高斯脉冲 (Haus, 1981; Van der Ziel, 1981 b); 对于具有慢可饱和吸收体的被动锁模，脉冲具有 $\text{Sech}^2(t/t_p)$ 的形状 (Haus 1981)。在下面各节中，增益调制当作具有可饱和吸收体的情况来处理。增益项和损耗项都具有一个有限的光谱带宽。在下面的讨论中，设损耗项为最小带宽限制项。当激光器与外腔的界面具有剩余的法布里-泊罗反射，或在外腔内插入一个附加的带宽限制元件时，都属于这种情况。

b. 损耗函数

损耗由三部分组成：

(a) 固定的与时间无关的损耗 L_0 ，它包括激光器的端面损耗，激光器和外腔内的散射损耗，以及激光器与外腔不完全耦合引起的损耗。这个损耗定义了腔的品质因素 Q ：

$$L_0 = \omega_0 T_R / 2Q \quad (10)$$

(b) 与光谱有关的损耗，它描述有效长度 l_s 上的滤波元件的效应。假设它在频域内为洛仑兹分布，其中心波长为 ω_0 ，则可以写成

$$L_s l_s = L_0 l_s \left(1 - \frac{1}{1 + j(\omega - \omega_0)/\omega_s} \right) \quad (11)$$