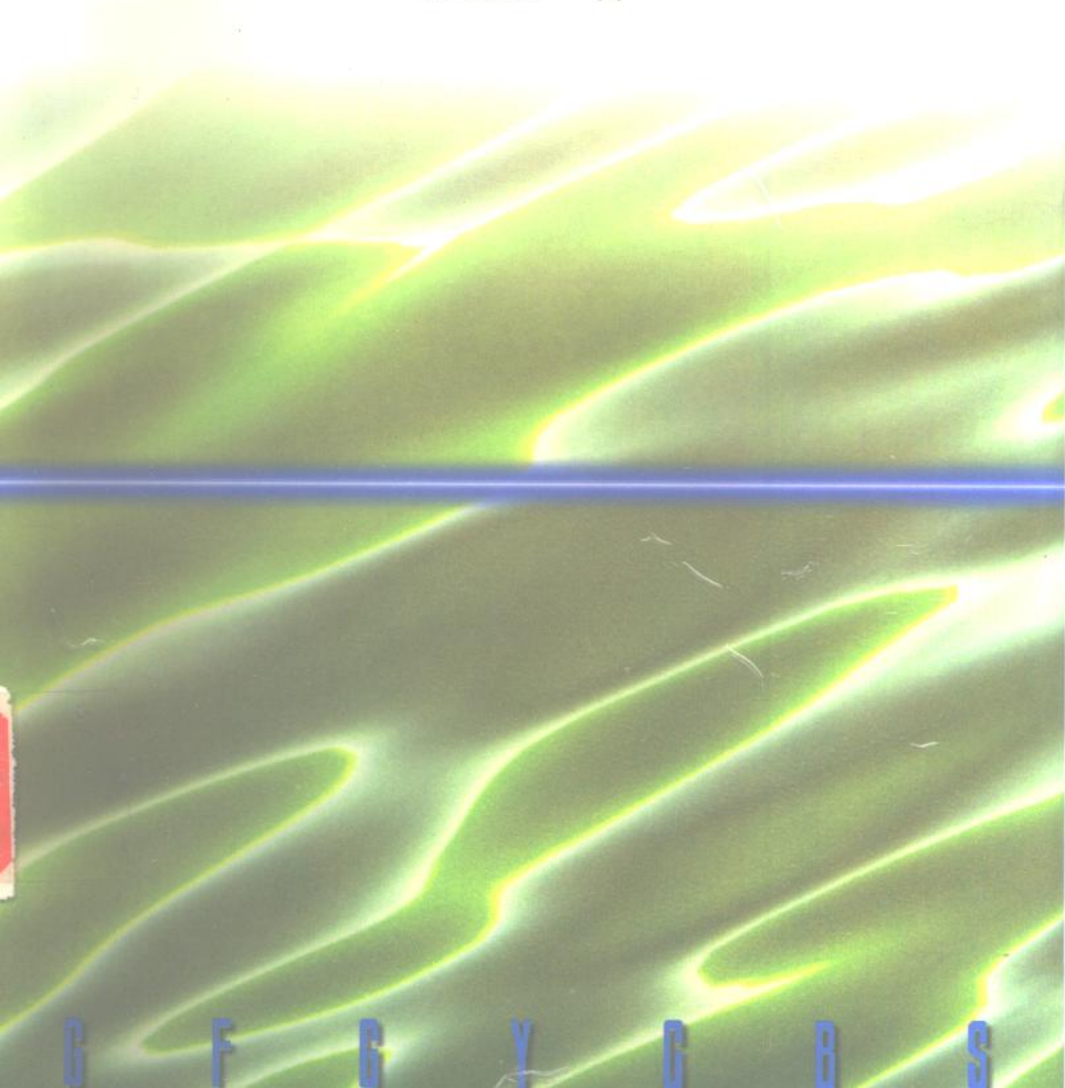


半导体激光干涉理论及应用

Theory and Application of
Interferometry using Laser Diode

孙晓明 著



17-02-11-4

半导体激光干涉 理论及应用

Theory and Application of
Interferometry using Laser Diode

孙晓明 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

半导体激光干涉理论及应用/孙晓明著. —北京:国防工业出版社, 1998. 1

ISBN 7-118-01796-5

I. 半… II. 孙… III. 半导体器件: 激光器-干涉-研究
IV. TN365

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 15207 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7% 193 千字

1998 年 1 月第 1 版 1998 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 16.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容明确、具体、有突出创见,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。
4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作,职责是:负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图

书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允
曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平
(以姓氏笔划为序)

冯允成 刘 仁 朱森元

朵英贤 宋家树 杨星豪

吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果

张均武 张涵信 陈火旺

范学虹 柯有安 侯正明

莫梧生 崔尔杰

前 言

本书系统阐述半导体激光干涉理论,介绍基于这些理论的技术及其在科研生产实践中的应用。

半导体激光干涉技术是一门新兴的技术学科,是光干涉技术的一部分。它是以半导体激光器为光源,在传统光干涉结构的基础上不断创新,综合应用现代光电子学、信号处理、精密机械等多个领域的新成果而成的,具有鲜明特色理论体系和实用性强、应用面很广的技术。作为高准确度计量测试的主要手段之一,不但可以用于光学量的测试,而且可以用于非光学量如振动、位移、长度、表面轮廓等几何量、力学量、热工量、声学量的高精度测量,具有准确度高、非接触、体积小、结构简单等优点。

半导体激光干涉技术成为专门研究的领域,只是近十年的事情,已经发表了许多论文,新方法、新原理不断出现,在一些专著中也有章节专门论及半导体激光干涉技术。但目前还没有一本以应用为背景,全面系统介绍半导体激光干涉理论及方法的著作。本书是以半导体激光器注入电流同输出光频之间的调制关系为基础,以讨论半导体激光干涉技术在长度测量方面的应用为主要背景的专著。书中所介绍的内容基本上反映了近十年来,世界上主要半导体激光干涉理论及应用方面的成果和水平。

全书共八章。第一章绪论,介绍半导体激光干涉的基本概念、分类、发展和应用概况;第二章介绍半导体激光的调制相干理论;第三章介绍对干涉有影响的半导体激光器特性及实用方法;第四章介绍线性调制干涉理论和技术;第五章介绍正弦调制干涉理论和技术;第六章介绍多波长干涉技术;第七章介绍外腔谐振干涉方法和理论;第八章介绍全息光栅干涉技术。

本书的部分内容是作者在哈尔滨工业大学攻读博士学位期间在导师强锡富教授指导下取得的成果,部分内容是作者近年来与同事及学生们一起取得的成果。作者自1989年开始从事这方面的研究工作,先后得到“国家自然科学基金(批准号59675077)”、“国家教委博士点基金(项目编号9321303)”、“航天基金”、“哈尔滨青年学科带头人基金”等多项科学基金的数次资助。

通过本书的介绍,使读者能全面地了解半导体激光干涉技术的基本原理、方法、实际应用,使该技术能更加广泛地为广大科研技术人员所熟悉,使之发挥更大的作用。

希望本书的出版能对在各种科学研究、工程技术领域中从事测量研究及应用的科技工作者,以及大专院校的有关专业师生有所帮助。由于作者水平有限,书中难免有不妥及错误之处,热忱希望读者批评指正。同时,对书中所引用的参考文献中的内容,在此向有关作者致以衷心谢意。

作者特别要感谢导师强锡富教授,先生在百忙之中详细披阅了全书,提出了许多中肯的意见,应该说本书凝聚着先生的心血。

作者对天津大学精密测试国家重点实验室主任叶声华教授、长春光机学院半导体激光国防重点实验室主任张兴德教授在百忙之中审阅了书稿并欣然向基金会推荐本书表示衷心感谢。

马军山博士对全书进行了认真的校对,指出了许多错误之处,为本书的成稿奠定了坚实的基础。

作者还要对朱茂华硕士、杨猛硕士、刘庆伟博士表示诚挚的谢意。

谨在此向给予过作者热情帮助的同志们表示最诚挚的感谢,没有这些帮助,要完成本书是不可能的。

作 者

1997.2

内 容 简 介

本书讨论以半导体激光器为光源的干涉理论及在几何量测量中的应用技术,全书共八章。以半导体激光器体积小,重量轻、输出光可调谐、易集成等优点为基础所形成的半导体激光干涉技术,为实现许多物理量的高精度、非接触、在线测量提供可能。本书作为半导体激光干涉理论及其应用技术的系统总结,详细介绍有关的理论基础、可能出现问题的具体解决方法,详细讨论了利用各种输出光调谐方式进行几何量干涉测量的理论及技术。

本书所讨论的内容基本上反映了近年来该领域的主要成就,涉及到了几何量测量的大部分内容,有广泛的适用性,可以作为从事精密仪器、光学仪器以及其他仪器仪表研究、应用的专业技术人员的参考书,对从事机械制造、航天航空、电子工业等领域的有关人员也一定会有较大的帮助。

Abstract

Interferometry in laser diode is a new and developing part in interferometry. In this book, applications in length metrology using LD interferometry are described, based on the relationship between the inject current and frequencies of LD. The whole book is divided into two parts: which are the fundamental principle, characteristics, application methods and the theory, technology of the interferometry in LD, separately.

The goal in writing this book is to make readers understand the fundamental principle, methods and application of the interferometry in LD, and to make this technology be comprehended by engineers and technicians.

ISBN 7-118-01796-5/TN · 279

定价: 16.00 元

目 录

第一章 绪论	1
1.1 激光干涉测量原理	1
1.2 半导体激光干涉同其他光干涉的比较	5
1.3 半导体激光干涉技术的分类	8
参考文献	12
第二章 半导体激光调制相干理论	15
2.1 LD 的调制理论	15
2.2 频率调制 LD 的相干原理	33
2.3 LD 的调制驱动方法	40
参考文献	46
第三章 影响干涉的半导体激光器特性	48
3.1 LD 温度特性及控制方法	48
3.2 LD 输出光束特性和改善方法	55
3.3 LD 的稳频特性及稳频方法	61
参考文献	68
第四章 线性调制干涉	70
4.1 线性调制 LD 外差干涉技术	70
4.2 参考技术	73
4.3 傅里叶变换技术处理干涉信号	76
4.4 多光束干涉技术	79
参考文献	103
第五章 正弦调制干涉	105
5.1 声光调制准外差 LD 干涉技术	105
5.2 压电陶瓷驱动准外差调制干涉技术	118
5.3 波长偏移外差 LD 干涉技术	136

5.4	双相位调制外差 LD 干涉技术	141
5.5	正弦调制外差干涉表面轮廓测量	147
	参考文献	156
第六章	多波长干涉	157
6.1	小数条纹确定长度的基本原理	157
6.2	小数重合法外差干涉技术	159
6.3	双波长合成波长干涉	166
6.4	LD 双波长合成波长稳定性分析	172
6.5	多模 LD 的三波长干涉技术	181
	参考文献	187
第七章	外腔谐振干涉	189
7.1	单模 LD 外腔谐振测量方法	189
7.2	双 LD 外腔谐振测量方法	193
7.3	多模 LD 外腔谐振测量方法	201
	参考文献	210
第八章	全息光栅干涉	211
8.1	全息光栅干涉位移测量原理	211
8.2	全息光栅干涉型触针传感原理	218
	参考文献	228

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1. 1 principle of laser interferometry	1
1. 2 comparison between interference using LD and other methods	5
1. 3 catalogue of interference using LD	8
Chapter 2 Coherent theory of modulated LD	15
2. 1 theory of LD modulation	15
2. 2 coherent theory of frequency-modulated LD	33
2. 3 drive methods of modulated LD	40
Chapter 3 Characteristics of LD	48
3. 1 temperature characteristics and control method	48
3. 2 characteristics of laser beam and improvement method	55
3. 3 characteristics of frequency stabilization of LD and stabilization method	61
Chapter 4 Liner modulation interference	70
4. 1 extrapolation interference technology using Fourier transform	73
4. 2 reference technology	73
4. 3 processing interference signals using Fourier transform	76
4. 4 multi-beam laser interference technology	79
Chapter 5 Sinusoidal phase modulating interference	105
5. 1 quasi-heterodyne interference technology using acoustic-optics modulation	105

5.2 quasi-heterodyne modulating interference technology driven by PZT	118
5.3 quasi-heterodyne interference technology using continuously phase shifting LD	136
5.4 heterodyne interferometer using dual-phase modulation	141
5.5 surface profile measurement in sinusoidal phase-modulated heterodyne interference	147
Chapter 6 Multi-wavelength interference	157
6.1 fundamental principle for detaching length from fractional coincidence	157
6.2 heterodyne interferometry in fractional coincidence	159
6.3 synthetic wavelength interferometry by two-wavelength ...	166
6.4 synthetic wavelength stabilization analysis for LD two-wavelength	172
6.5 trio-wavelength interferometry of multi-mode LD	181
Chapter 7 External-cavity interferometry	189
7.1 measuring principle of single mode LD external-cavity resonance	189
7.2 measuring method of dual mode LD external-cavity resonance	193
7.3 measuring method of multi mode LD external-cavity resonance	201
Chapter 8 Interferometry in holography grating	211
8.1 sensing principle of displacement by holography grating interferometry	211
8.2 sensing principle of holography grating interference type stylus	218

第一章 绪 论

1.1 激光干涉测量原理

一、光干涉基本原理

所谓光干涉是指两个或两个以上的相干光波在空间相遇时,某些地方的光强几乎为零,而另一些地方的强度则较各光波单独作用时的光强大得多的现象。

光干涉是有条件的,只有满足下列条件时才能产生干涉:

(1)频率相同的两个光波在相遇点有相同的振动方向和固定的相位差;

(2)两光波在空间相遇点产生振动的幅度相差不大;

(3)两光波在相遇点的光程差不能太大。

干涉测量正是建立在干涉现象基础上的一类测量技术。设 $A_1(x, y)$ 及 $A_2(x, y)$ 为两个同频率的单色线偏振光场的复振幅,一般可表示为

$$A_i(x, y) = a_i(x, y) \exp[j\varphi_i(x, y)] \quad i = 1, 2 \quad (1.1)$$

若这两个偏振光之间的夹角为 θ , 则合成强度为

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2 \sqrt{I_1(x, y) I_2(x, y)} \times \cos\theta \cos[\varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y)] \quad (1.2)$$

上式表明,两束光相互作用的干涉项受到两个偏振光之间的夹角 θ 的影响。当 $\theta = 90^\circ$ 时,干涉项消失;当 $\theta = 0^\circ$ 时,干涉项最强。所以,在实际中应尽可能使两支参与干涉的光束的偏振方向相同。从上式中还可知道:若知道了合成光强的分布,再辅以一定条件,完

全有可能对两束光的相对相位分布进行推断,这是干涉测量的基本依据。因此,干涉测量的实质就是通过一些人为设计的干涉现象将待测的客观信息反映在干涉场中,主要是反映在干涉项的相位中,进而通过对于干涉强度的分析来获知待测量信息的信息提取技术。相位与波长有直接关系,这决定了干涉测量是以波长为标尺的比较测量技术。它具有全场、非接触及高精度等特点。根据正弦函数的性质,干涉测量的固有缺点是只能给出主值区间内的相位值。

二、外差干涉基本原理

前面讨论的是两束同频率光波的叠加所产生的一个与时间无关的稳定干涉场,下面讨论利用两个不同频率的单色光形成的干涉测量问题。

设两个频率分别为 ν_1 和 ν_2 , 振动方向相同的线偏振光场的复数表示分别为

$$\begin{aligned} A_1(\mathbf{r}, t) &= a_1(\mathbf{r}) \exp\{-j[2\pi\nu_1 t - \varphi_1(\mathbf{r})]\} \\ A_2(\mathbf{r}, t) &= a_2(\mathbf{r}) \exp\{-j[2\pi\nu_2 t - \varphi_2(\mathbf{r})]\} \end{aligned} \quad (1.3)$$

它们叠加后形成的光强分布为

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}, t) &= |A_1(\mathbf{r}, t) + A_2(\mathbf{r}, t)|^2 \\ &= a_1^2(\mathbf{r}) + a_2^2(\mathbf{r}) + 2a_1(\mathbf{r})a_2(\mathbf{r}) \times \\ &\quad \cos\{2\pi(\nu_2 - \nu_1)t - [\varphi_2(\mathbf{r}) - \varphi_1(\mathbf{r})]\} \end{aligned} \quad (1.4)$$

若两光束偏振方向间的夹角为 θ , 则合成强度为

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}, t) &= a_1^2(\mathbf{r}) + a_2^2(\mathbf{r}) + 2a_1(\mathbf{r})a_2(\mathbf{r})\cos\theta \times \\ &\quad \cos\{2\pi(\nu_2 - \nu_1)t - [\varphi_1(\mathbf{r}) - \varphi_2(\mathbf{r})]\} \end{aligned} \quad (1.5)$$

以上两式表明,合成强度是由两光束各自的强度及一个以两束光的频率差为频率随时间做正弦变化的强度组成。两光束波的相位差表征在交流变化的强度项的初相位上。这就预示着一种通过测量交变量的初相位提取两光束相位信息的方法,一般称为外差干涉测量。比较式(1.2)和式(1.5)可以看出,一般的干涉测量技术是外差干涉测量技术当频差为零时的特例。

在实际测量中,一般将激光分为两束,其中至少一束应通过一个频率调制器引入一个频率差。两束光合成的测量场强度变化中交变量的频率必须足够低,以使实际的探测手段可以分辨,进而利用光电探测器将光信号转换为电学量。

在外差测量中,任一点处两束光的相位差值的探测只需利用该点交变的强度值。这是一个点测量过程,有别于一般干涉测量中必须利用整个测量场强度的空间分布来测量的过程。由于两束光波的振幅和相位分别表征在该点交变强度的振幅和初相位上,振幅对相位值检测的影响非常小,这就使得外差测量成为一种精度非常高的测量技术,测量的精度由电子相位测量系统的精度和环境稳定性决定。

三、准外差干涉基本原理

前面指出,从光干涉测量中获取相位信息只能从强度的空间变化中,即从所形成干涉条纹变化中推断。但是,干涉测量场的强度分布不仅受相位信息的影响,而且受所形成干涉条纹振幅信息的影响。这就使得获取相位信息的精度受到限制,一般不会超过条纹间距的四分之一所对应的量。外差干涉测量提供了一种只利用干涉测量场中一点的信息进行高精度测量的技术,它通过频率调制将相位差信息表征在周期变化的交变量的初相位上。由于它所采取的相位检测技术所需要处理的信息量极大,目前尚无可实用的并行面阵电子探测器件,相位信息的提取只能以点测量的方式进行。于是,寻找具备外差测量技术信息提取特点,同时又可以实现的全场方式实现的干涉测量技术就具有十分重要的现实意义。

外差干涉测量是一种引入了一个随时间线性变化的相位项的干涉场。因而外差干涉测量可以视为一种在时间域中引入相位调制的干涉测量技术。如果采用其他相位调制方法来取代频率调制达到外差干涉的效果,也会达到同样目的,而实现起来会容易一些。在时间域中,通过对两束光的相对光程差进行调制实现相位调制的一类方法,称为准外差干涉测量技术。

对一个周期已知的三角函数,其基本状态完全可以由其初相