



当代
杰出青年
科学文库

光纤光栅原理及应用

饶云江 王义平 朱 涛 著



科学出版社
www.sciencep.com

当代杰出青年科学文库

光纤光栅原理及应用

饶云江 王义平 朱 涛 著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了光纤光栅的基本原理、理论及应用,全书共分11章。第1章阐述了光纤光栅的发展历程;第2~7章,详细介绍了光纤布拉格光栅的写入方法、耦合理论、基本特性及其在光纤通信和传感中的应用等几个方面的内容;第8~11章则从耦合理论、写入方法、基本特性及在传感和通信中的应用等方面系统介绍了长周期光纤光栅的发展动态。

本书主要作为从事光纤通信和光纤传感技术方面工作的科技人员和工程技术人员的参考书,也可作为大专院校研究生的专业课教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤光栅原理及应用/饶云江,王义平,朱涛著.—北京:科学出版社,2006

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 7-03-016754-6

I. 光… II. ① 饶… ② 王… ③ 朱… III. 光学纤维-光电传感器
IV. TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 000922 号

责任编辑:胡 凯 马长芳 贾瑞娜/责任校对:赵桂芬

责任印制:安春生/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第一版 开本: B5 (720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张: 26 1/2

印数: 1-3 000 字数: 499 000

定 价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《当代杰出青年科学文库》编委会

主 编 白春礼

副主编 (按汉语拼音排序)

程津培 李家洋 谢和平 赵沁平 朱道本

编 委 (按汉语拼音排序)

柴玉成 崔一平 傅伯杰 高 抒 龚健雅

郭 雷 郝吉明 何鸣鸿 洪友士 胡海岩

康 乐 李晋闽 罗 毅 南策文 彭练矛

沈 岩 万立骏 王 牧 魏于全 邬江兴

袁亚湘 张 杰 张 荣 张伟平 张先恩

张亚平 张玉奎 郑兰荪

前 言

光纤光栅经过 20 余年的发展, 现已成为光纤通信和传感中最重要的器件之一, 已形成了一个数亿美元的产业和一个稳定的研究领域。光纤光栅在光纤通信及传感领域中获得了广泛应用, 并且随着全光通信网络和光纤传感技术的发展将会发挥越来越重要的作用。光纤光栅在商业化方面已广泛应用于半导体激光器的选频, 光纤激光器反射镜, 掺铒光纤放大器增益平坦及降噪, DWDM 系统中的波分复用器, 高速光通信系统中的色散补偿, 以及大型结构的应变及温度准分布式测量, 油(气)井下压力和流量的测量, 航天飞机运行状态监测, 桥梁变形测量等, 并且光纤光栅的应用范围随着研究的深入在不断扩大。光纤光栅就其本身来说在技术上已趋于成熟, 国内外从事光纤光栅研究和应用的人员数以万计, 已发表论文上千篇, 在光纤光栅的理论、形成机理、制造方法以及应用等方面已取得大量的研究成果, 特别是近年来发展很快的长周期光纤光栅。为了更好地推动光纤光栅的发展, 有必要对过去的研究成果进行一次总结, 以形成较为完整的光纤光栅原理及应用的学科体系。

鉴此, 我们拟在本书中就光纤光栅的理论及应用作一全面、系统的介绍, 帮助光纤通信及传感方面的科研和工程技术人员更好地研究和应用光纤光栅这一重要技术, 以推动光纤光栅学科进一步向前发展。

饶云江

2005.9.10

2.6.4	结构重组模型	44
2.7	其他种类光纤的光敏性	46
2.7.1	共掺氮光纤	47
2.7.2	非掺锗硅氮氧化物光纤	47
2.7.3	光敏塑料光纤	47
2.8	光致折变的清除与保持	48
	参考文献	49
第3章	光纤光栅写入方法	55
3.1	内部法写入光纤布拉格光栅	55
3.2	干涉法制作光纤布拉格光栅	56
3.2.1	分振幅干涉法	56
3.2.2	分波前干涉法	58
3.3	相位模板法制作光纤布拉格光栅	59
3.3.1	相位模板中的拼接误差	63
3.3.2	改变相位模板的周期	65
3.4	逐点法写入布拉格光栅	67
3.5	模板成像投影法	68
3.6	光纤光栅写入中的激光光源	69
3.6.1	干涉技术用激光源	69
3.6.2	非干涉技术对激光源的要求	72
3.7	特殊光栅的制作过程	73
3.7.1	单脉冲写入光纤光栅	73
3.7.2	在光纤拉制过程中写入布拉格光栅	76
3.7.3	具有复杂反射率分布的长光纤布拉格光栅	78
3.7.4	啁啾光栅	80
3.7.5	相移光栅	83
3.7.6	光栅变迹	84
3.8	氢载对制作光纤光栅的影响	84
3.9	透过聚合物敷层制作光纤布拉格光栅	85
3.10	长周期光纤光栅写入法	86
3.10.1	紫外光写入法	86
3.10.2	腐蚀刻槽法	88
3.10.3	离子束入射法	89
3.10.4	机械微弯变形法	90
3.10.5	局部加热写入法	91

3.10.6 高频 CO ₂ 激光脉冲写入法	92
3.10.7 CO ₂ 激光写入法的机理	96
参考文献	104
第 4 章 光纤布拉格光栅理论	110
4.1 光纤布拉格光栅的耦合模理论	111
4.2 非均匀光栅中的双模耦合	117
4.3 倾斜光栅	123
4.4 包层模耦合	126
4.5 辐射模耦合	128
4.6 光纤布拉格光栅的数值算法	130
4.7 布洛赫波	131
4.8 非线性光栅效应	133
4.9 讨论	134
参考文献	134
第 5 章 光纤布拉格光栅的特性	136
5.1 均匀光纤布拉格光栅	136
5.1.1 均匀光纤布拉格光栅的波导结构	136
5.1.2 均匀光纤布拉格光栅的反射率	137
5.1.3 均匀光纤布拉格光栅的应变与温度灵敏性	138
5.2 光纤布拉格光栅的种类	140
5.2.1 普通布拉格反射元件	140
5.2.2 闪耀光纤布拉格光栅	141
5.2.3 啁啾光纤布拉格光栅	143
5.2.4 其他类型光纤布拉格光栅	144
5.3 光纤布拉格光栅的脉冲响应	147
5.3.1 超短波脉冲的传输响应	147
5.3.2 高强度脉冲的传输响应	150
5.3.3 光纤布拉格光栅的非线性机理	152
5.4 光纤布拉格光栅的寿命和可靠性	153
5.4.1 光纤布拉格光栅的热衰减	153
5.4.2 光纤布拉格光栅的机械强度	154
参考文献	156
第 6 章 光纤布拉格光栅在传感中的应用	160
6.1 概述	160
6.2 传感原理	161

6.2.1	应变	161
6.2.2	温度	163
6.2.3	压力	163
6.2.4	动态磁场	164
6.2.5	应变和温度的同时测量	165
6.3	FBG 传感系统中的探测解调技术	168
6.3.1	探测解调方法原理	169
6.3.2	基于边缘滤波器的探测系统	171
6.3.3	基于可调滤波器的探测系统	173
6.3.4	基于干涉扫描法的探测系统	175
6.3.5	基于双腔干涉扫描法的探测系统	176
6.4	FBG 复用技术	178
6.4.1	波分复用	178
6.4.2	时分复用方法	181
6.4.3	空分复用(SDM)	182
6.5	FBG 传感器的应用	184
6.5.1	大型复合材料和混凝土结构健康监测应用	184
6.5.2	在电力工业中的应用	193
6.5.3	医学应用	195
6.5.4	油井应用	200
6.5.5	化学传感	201
6.6	其他应用	201
	参考文献	202
第 7 章	光纤布拉格光栅在通信中的应用	208
7.1	光纤激光器	208
7.1.1	掺铒光纤激光器	208
7.1.2	包层泵浦光纤激光器	214
7.1.3	拉曼光纤激光器	215
7.1.4	锁模光纤激光器	216
7.2	光纤放大器	218
7.2.1	改善掺铒光纤放大器性能	218
7.2.2	增益平坦和增益控制	219
7.2.3	拉曼光纤放大器	221
7.3	光纤布拉格光栅二极管激光器	222
7.3.1	单模激光器	223

7.3.2 锁模激光器	224
7.3.3 coherence-collapsed 激光器	225
7.3.4 基于布拉格光栅的光纤激光器新发展	226
7.4 光纤布拉格光栅滤波器	226
7.4.1 简单布拉格光栅滤波器	227
7.4.2 环形器型光纤光栅滤波器	227
7.4.3 干涉型光纤光栅滤波器	228
7.4.4 莫尔型光纤光栅滤波器	229
7.4.5 相移型光纤光栅滤波器	229
7.4.6 Fabry-Perot 型光纤光栅滤波器	230
7.4.7 梳状结构和超结构光纤光栅型滤波器	230
7.4.8 闪耀型光纤光栅滤波器	230
7.4.9 受抑耦合型光纤光栅滤波器	231
7.5 波分复用/解复用器	231
7.5.1 一种结构简单的光纤光栅波分复用器	231
7.5.2 干涉型光纤光栅波分复用器	232
7.5.3 非干涉型光纤光栅波分复用器	235
7.6 密集波分复用器	239
7.7 色散补偿器	240
7.8 光纤布拉格光栅的其他应用	243
7.9 小结	244
参考文献	244
第 8 章 长周期光纤光栅理论	251
8.1 长周期光纤光栅理论模型的发展	251
8.2 耦合模理论	252
8.3 长周期光纤光栅的模式耦合 I	253
8.3.1 自耦合率和交叉耦合率	253
8.3.2 谐振波长和带宽	255
8.3.3 传输谱的模拟计算	257
8.4 长周期光纤光栅的模式耦合 II	259
8.4.1 纤芯基模和包层模的有效折射率和传输常数	260
8.4.2 纤芯基模和包层模的模场分布和归一化常量	263
8.4.3 耦合系数和耦合常数	265
8.4.4 长周期光纤光栅的模式耦合方程	266
8.4.5 长周期光纤光栅的谐振波长	268

8.4.6	长周期光纤光栅透射谱的模拟计算	269
8.5	级联长周期光纤光栅	271
8.5.1	级联长周期光纤光栅的模式耦合	272
8.5.2	级联长周期光纤光栅透射谱干涉峰间距	274
8.6	小结	277
	参考文献	277
第9章	长周期光纤光栅的特性	279
9.1	长周期光纤光栅的温度特性	279
9.1.1	温度特性的理论分析	279
9.1.2	紫外光写入的长周期光栅的温度特性	284
9.1.3	高频 CO ₂ 激光写入的长周期光纤光栅的温度特性	288
9.2	长周期光纤光栅的轴向应变特性	292
9.2.1	轴向应变特性的理论分析	292
9.2.2	紫外光写入的长周期光纤光栅的轴向应变特性	294
9.2.3	高频 CO ₂ 激光写入的长周期光纤光栅的轴向应变特性	295
9.3	长周期光纤光栅的弯曲特性	296
9.3.1	紫外光写入的长周期光纤光栅的弯曲特性	297
9.3.2	纤芯偏移的光纤中写入的长周期光纤光栅的弯曲特性	299
9.3.3	B-Ge 共掺的单模光纤中的长周期光纤光栅的弯曲特性	301
9.3.4	高频 CO ₂ 激光写入的长周期光纤光栅的弯曲特性	303
9.3.5	弯曲特性的理论分析	306
9.4	长周期光纤光栅的扭曲特性	310
9.4.1	腐蚀刻槽法写入的长周期光纤光栅的扭曲特性	310
9.4.2	电弧放电写入的 LPFG 的扭曲特性	315
9.4.3	高频 CO ₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅的扭曲特性	316
9.4.4	光纤扭曲特性的分析	321
9.4.5	局部加热法写入的长周期光纤光栅的扭曲特性分析	324
9.5	长周期光纤光栅的横向负载特性	326
9.5.1	紫外光写入的 LPFG 的横向负载特性	326
9.5.2	高频 CO ₂ 激光脉冲写入的 LPFG 横向负载特性	329
9.5.3	光纤横向负载特性分析	335
9.5.4	高频 CO ₂ 激光写入的 LPFG 横向负载特性分析	338
9.6	小结	340
	参考文献	342
第10章	长周期光纤光栅在传感中的应用	345

10.1 温度应变同时测量传感器	345
10.1.1 单个长周期光纤光栅实现温度应变同时测量	345
10.1.2 LPFG 和 EFPI 集成实现温度应变同时测量	347
10.2 长周期光纤光栅高温传感器	351
10.3 弯曲不敏感的长周期光纤光栅传感器	352
10.4 能判别弯曲方向的弯曲传感器	353
10.5 高灵敏度的弯曲传感器	356
10.6 能判别扭曲方向的扭曲传感器	357
10.7 温度和负载同时测量传感器	359
10.8 动态横向负荷传感器	360
10.9 级联长周期光纤光栅在传感领域中的应用	364
10.9.1 级联长周期光纤光栅弯曲传感器	365
10.9.2 级联长周期光纤光栅横向负载传感器	366
10.9.3 级联长周期光纤光栅化学传感器	367
10.9.4 级联长周期光纤光栅温度传感器	368
10.10 长周期光纤光栅的其他传感应用	371
10.11 小结	371
参考文献	372
第 11 章 长周期光纤光栅在通信中的应用	376
11.1 增益均衡器	376
11.1.1 EDFA 增益均衡器	376
11.1.2 基于弯曲和温度特性的可调谐增益均衡器	378
11.1.3 基于横向负载和温度特性的可调谐增益均衡器	380
11.2 ASE 噪声滤波器	382
11.2.1 低噪声前置放大器	382
11.2.2 低噪声、高增益线路放大器	383
11.2.3 利用 ASE 滤波器优化掺铒光纤放大器的特性	385
11.3 集成长周期光纤光栅的光纤耦合器	386
11.4 长周期光纤光栅偏振相关性的利用和补偿方法	389
11.4.1 长周期光纤光栅波长选择偏振滤波器	389
11.4.2 扭曲降低 LPFG 的偏振相关损耗	390
11.4.3 光纤旋转器补偿 LPFG 偏振相关性	391
11.5 级联长周期光纤光栅构成的梳状滤波器	392
11.6 WDM 通道隔离器	395
11.7 多波长光纤光源	397

11.8 通信应用中长周期光纤光栅温度敏感性的补偿方法	400
11.8.1 应变特性补偿谐振波长的温度敏感性	400
11.8.2 封装补偿谐振波长温度敏感性	401
11.8.3 弯曲效应降低温度灵敏度	403
11.9 长周期光纤光栅的其他通信应用	403
11.10 小结	405
参考文献	406

光纤布拉格光栅具有潜在的使用价值。但是,这种写入方法对光源和周围环境的稳定性要求较高,并且对光源的相干长度要求很严格,因此实用起来也比较困难。

1993年, Hill^[4]等人又提出了紫外光垂直照射相位掩模形成的衍射条纹曝光氢载光纤写入光纤布拉格光栅的相位掩模法,这使得光纤光栅真正走向实用化和产业化。该方法的一个很大的优点是写入光栅的周期仅仅取决于相位光栅周期而与辐射光的波长无关,因此这种方法对激光光源的相干性要求大大降低,使采用低相干光源写入光纤光栅成为可能。相位掩模法是目前为止最成熟的光纤布拉格光栅写入方法,该方法降低了写入装置的复杂程度,简化了光纤光栅的写入过程,并且对周围环境的要求大大降低,这使得大规模批量生产光纤光栅成为可能,极大地推动了光纤光栅的发展及其在光纤通信和传感领域中的应用。

目前,周期为几十至几百微米的能实现同向模式间耦合的长周期光纤光栅(long-period fiber grating, LPFG)得到了人们越来越广泛的重视,实际上能够实现正向模式间耦合的周期较长的光纤光栅在20世纪90年代就已出现,它被用于实现多模光纤中的模式转换或单模光纤中的偏振模式转换^[5,6],然而现在通常意义上的纤芯基模耦合到同向传输的包层模的长周期光纤光栅是由 AT&T 贝尔实验室的 A. M. Vengsarkar 等人^[7]于1996年用紫外光通过振幅掩模板照射氢载硅锗光纤首先研制而成的,这标志着长周期光纤光栅的诞生。1996年 Bhatia 等人^[8]详细研究了长周期光纤光栅的各种特性,提出了其在通信与传感领域中的应用。T. Erdogan^[9,10]于1997年相继在 *J. of Lightwave Technology* 和 *J. Opt. Soc. Am. A* 发表两篇论文从模式耦合的角度深入研究了长周期光纤光栅的光谱特性,从而奠定了长周期光纤光栅的理论基础。

自从 K. O. Hill 等人于1978年首次研制出世界上第一个光纤光栅——光纤布拉格光栅以来^[2],无论是光纤光栅的写入方法^[11,12]、理论研究还是应用都获得了飞速发展。在光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅的基础上人们已先后研制出一些具有特殊结构的光纤光栅,比如啁啾光纤光栅^[13]、高斯光纤光栅^[14]、高斯变迹光纤光栅^[15]、相移光纤光栅^[16]、超结构光纤光栅^[9]、倾斜光纤光栅^[18]等,可以相信,随着研究的深入和应用的需要,光纤光栅必将在通信、传感及其相关领域获得进一步的发展和更加广泛的应用。

1.2 光纤光栅分类

在光纤光栅出现至今的短短20多年里,由于研究的深入和应用的需要,各种用途的光纤光栅层出不穷,种类繁多,特性各异。人们从不同的出发点提出了多种分类方法,各种分类方法虽不完全相同,但归结起来主要可以从光纤光栅的周期、相位和写入方法等几个方面对光纤光栅进行分类。



1.2.1 按光纤光栅的周期分类

根据光纤光栅周期的长短,通常把周期小于 $1\mu\text{m}$ 的光纤光栅称为短周期光纤光栅,又称为光纤布拉格光栅或反射光栅;而把周期为几十至几百微米的光纤光栅称为长周期光纤光栅,又称为透射光栅。短周期光纤光栅的特点是传输方向相反的模式之间发生耦合,属于反射型带通滤波器,其反射谱如图 1.1(a)所示。长周期光纤光栅的特点是同向传输的纤芯基模和包层模之间的耦合,无后向反射,属于透射型带阻滤波器,其透射光谱如图 1.1(b)所示。

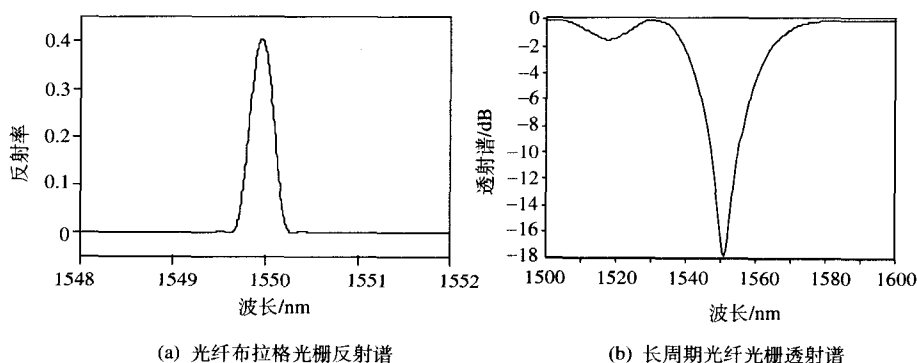


图 1.1 光纤光栅的反射谱和透射谱

1.2.2 按光纤光栅的波导结构分类

根据光纤光栅的波导结构即光栅轴向折射率分布,如图 1.2 所示,光纤光栅可分为^[9]以下几类。

(1) 均匀光纤光栅。特点是光栅的周期和折射率调制的大小均为常数,这是最常见的一种光纤光栅,其反射谱具有对称的边模振荡。

(2) 啁啾光纤光栅^[13]。特点是光栅的周期沿轴向长度逐渐变化,该光栅在光纤通信中最突出的应用是作为大容量密集波分复用(DWDM)系统中的色散补偿器件。啁啾光纤光栅可以是线性的也可以是非线性的。线性啁啾光纤光栅的平均色散与光纤长度的平方成正比,与啁啾量成反比。

(3) 高斯变迹光纤光栅^[14]。特点是光致折射率变化大小沿光纤轴向为高斯函数。高斯变迹光纤光栅的反射谱不具有对称性,在长波边缘光谱平滑,在短波边缘存在边模振荡结构,并且光栅长度越长振荡间隔越密,光栅越强(折射率调制越大),振荡幅度越大。

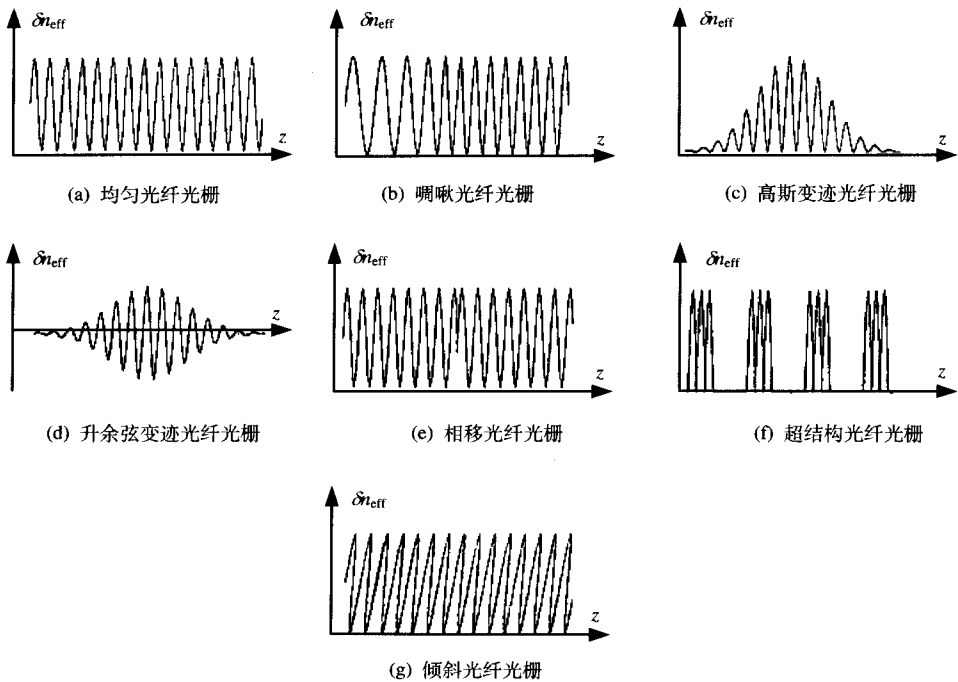


图 1.2 按波导结构光纤光栅的分类

(4) 升余弦变迹光纤光栅^[15]。光致折变大小沿光纤轴向分布为升余弦函数，且直流“DC”折射率变化为零。变迹对均匀光栅反射谱的边模振荡具有很强的抑制作用，选择不同的变迹函数能起到不同的抑制效果。这种光纤光栅在 DWDM 中有很重要的应用。常用的变迹函数有高斯函数(Gaussian)、双曲正切函数(tanh)、余弦函数(cos)和升余弦函数(raised cos)等。

(5) 相移光纤光栅^[16]。特点是光栅在某些位置发生相位跳变，通常是 π 相位跳变，从而改变光谱的分布。相移的作用是在相应的反射谱中打开一个缺口，相移的大小决定了缺口在反射谱中的位置，而相移在光栅波导中出现的位置决定了缺口的深度，当相移恰好出现在光栅中央时缺口深度最大，因此相移光纤光栅可用于制作窄带通滤波器，也可用于分布反馈式(DFB)光纤激光器^[17]。

(6) 超结构光纤光栅^[9]。特点是光栅由许多小段光栅构成，折变区域不连续，如果这种不连续区域的出现有一定周期性则又称为取样光栅，其反射光谱出现类似梳状滤波的等间距尖峰，且光栅长度越长则每个尖峰的带宽越窄，反射率越高。

(7) 倾斜光纤光栅^[9, 18]。也称为闪耀光纤光栅，其特点是光栅条纹与光纤轴成一小于 90° 的夹角。光栅条纹倾斜的主要影响是有效地降低光栅的条纹可见度并显著影响辐射模耦合，从而使布拉格反射减弱，因此合理选择倾斜角度可增强辐