

2002年上海大学博士学位论文 ⑤

周期介质中 Bragg 光孤子 的传播特性

作者: 李松茂
专业: 无线电物理
导师: 王 奇



上海大学出版社

2002

N533
Y302
2002

周期介质中 **Bragg** 光孤子的传播特性

作 者： 李松茂
专 业： 无线电物理
导 师： 王 奇

上海大学出版社

· 上海 ·

N533
Z302
2002

Shanghai University Doctoral Dissertation (2002)

The Property of Bragg Solitons Propagating in Nonlinear Periodic Structures

Candidate: Li Songmao

Major: Radio Physics

Supervisor: Prof. Wang Qi

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：黄肇明	教授，上海大学	200072
委员：丁良恩	教授，华东师范大学	200062
黄国翔	教授，华东师范大学	200062
李 英	教授，上海大学	200072
李春芳	教授，上海大学	200436
导师：王 奇	教授，上海大学	200436

评阅人名单:

鲍家善	教授, 上海大学	200436
黄肇明	教授, 上海大学	200072
丁良恩	教授, 华东师范大学	200062

评议人名单:

钱世雄	教授, 复旦大学	200433
黄国翔	教授, 华东师范大学	200062
张金仓	教授, 上海大学	200436
余曷鯢	教授, 上海大学	200436

答辩委员会对论文的评语

李松茂同学的博士学位论文讨论了电磁场与周期介质相互作用中呈现 Bragg 光孤子形式的非线性传播特性,是非线性电磁场理论与信息传输理论领域的前沿课题,具有重要的学术意义和应用价值,为探索新型光电器件提供了理论指导。

本论文的主要创新点在于:第一,从耦合模理论出发,导出了电磁波在周期介质中基本的非线性耦合模方程,并给出了主要参量的物理意义;第二,以耦合模方程为基础,给出了稳态条件下相应的物理图像和光双稳输出的严格解析解,并给出色散关系和群速度色散表达式;第三,在入射波频率位于禁带内的情况下,严格求解非线性耦合模方程,获得 Bragg 孤子解,并给出隙孤子解的判据;第四,对非线性耦合模方程和非线性薛定谔方程的适用条件作了有意义的比较。

论文数学推导严密,论证充分,图例制作精良,数据引用可靠详实。整篇文章层次分明,行文流畅,体现了李松茂同学扎实的数理基础和严谨的学风,有很强的分析问题和解决问题的能力。另外,论文反映出作者有较深的专业积累和很强的计算机应用能力,已初步具备独立科研能力。

李松茂同学在答辩过程中,能够准确地回答专家提出的有关问题,思路清晰,并对今后应该继续做的研究工作有清楚的了解,充分反映了该同学活跃的学术思想。

答辩委员会表决结果

经全体答辩委员无记名投票表决，全票通过，一致同意通过李松茂同志的博士论文答辩，并建议授予理学博士学位。

答辩委员会主席：**黄肇明**

2001年12月15日

摘 要

“周期介质中 Bragg 光孤子的传播特性”主要是研究电磁波与周期介质相互作用中呈现的以 Bragg 光孤子为代表的各种非线性传播特性以及应用前景. 近年来, 随着光刻技术的不断发展, 全光通信已成为将来发展的必然趋势, 光波微波与周期结构的非线性相互作用和相关的新型器件的研究已经成为国际上电磁场理论和信息传输理论的热点. 这些研究有助于进一步深化我们对电磁波与物质相互作用的认识和拓宽对新型光电器件研制的思路, 在学术研究和实际应用中都有重要的意义.

本文主要在理论上研究了一维无限大周期结构的非线性电磁波的传播特性, 包括连续波入射的稳态特性和脉冲入射的瞬态特性.

论文主要包括以下四部分内容和结果:

(1) 导出了非线性电磁波在周期结构中传播的基本方程——非线性耦合模方程. ①应用耦合模理论, 导出非线性耦合模方程, 给出方程中各参量的物理含义. ②在线性极限条件下, 讨论了线性周期结构的色散关系, 给出了群速度的表达式, 发现入射波频率远离禁带 (即远离布喇格频率) 时, 传播速度与均匀介质近似相同, 而越靠近禁带, 传播速度越慢, 在禁带边沿时, 速度降为零. 给出了群速度色散常数的表达式, 发现其值在禁带的两个边缘分别为一正一负, 并且幅值远大于材料色散.

(2) 研究连续波入射时, 传播于周期结构中的非线性电磁波的稳态特性. ①给出有限长度线性周期结构的反射谱. 发现耦

合系数对反射谱的影响很大,耦合系数越大,周期结构的反射比就越大.②定性给出了非线性周期结构稳态特性的物理图像.发现当入射波波长位于反射峰长波一侧时,随着入射波功率的增强,整个反射波段会向长波段方向移动,并且反射峰也会随之增高.当反射波段向着靠近入射波长的方向移动时,光输出将会产生门限效应.而当入射波波长位于反射峰短波一侧时,则会出现光的双稳输出.③严格求解了有限长度的非线性耦合模方程.得到用复杂的椭圆函数所表示的出射光强与入射光强的表达式.结果表明,双稳输出特性与耦合系数、非线性系数以及周期结构的长度等因素有关.

(3) 研究脉冲入射时,传播于周期结构中的非线性电磁波的动态特性.①给出了脉冲入射下非线性耦合模方程的解析解.发现入射波精确满足布喇格共振条件时,波包具有孤子的形式,故称之为孤波解或类孤子解.②讨论了非线性情况下周期结构的色散.发现在非线性作用的影响下,禁带宽度变小,频率落在禁带内的类孤子传播群速度不为零,其值小于均匀介质中的群速度,即所谓的隙孤子或慢布喇格孤子.禁带上下沿属于不同的色散区域,在靠近禁带边沿的地方,群速度色散非常大,而在禁带中央附近则接近于零色散.增强脉冲能量则会导致群速度色散效应的增强.脉宽增加和入射频率接近布喇格频率时,有效群速度降低.③讨论了非线性频移特性.非线性效应导致前向波和后向波的频率发生偏移,两者偏移量不相同,主要取决于失谐因子,传播速度、振幅强度以及非线性系数等参数,后面几个参数都和非线性作用光强有关.入射频率越靠近禁带边沿,频率偏移越大.入射波频率处于禁带下沿和禁带上沿时,频率偏移不对称.

(4) 研究了非线性耦合模方程和非线性薛定谔方程的异同与各自适用的范围. ①讨论多尺度法和由此导出的关于慢变振幅函数的非线性薛定谔方程. 发现其形式与普通的常规孤子的方程基本一致. 从新导出的非线性薛定谔方程的参数中看出, 周期结构中的孤子的行为与周期结构关系极大. 形成布喇格孤子的机理与常规孤子相同, 差别只在于周期结构提供了远大于材料色散的周期结构色散常数, 实质并未改变. ②分析和比较多尺度法和耦合模理论的差异. 多尺度法仅仅把非线性视作微扰, 周期调制作用精确体现在所选择的布洛赫函数中, 但这种方法对入射波频率有严格限制, 必须是处于禁带边沿. 而耦合模理论则是把周期调制和非线性效应都视作微扰, 要求被研究的周期结构调制度不能太深, 对一般典型的周期波导结构, 这个微扰条件满足. 所以, 从适用范围而言, 耦合模理论以及相应的非线性耦合模方程组是研究非线性周期结构的基本方程.

关键词 耦合模理论, 非线性, 孤子, 隙孤子, Bragg 孤子

Abstract

This thesis, the property of Bragg solitons propagating in nonlinear periodic structures, studies the properties and potential applications of nonlinear waves in periodic structures. In the past few years, as the rapid development in photoengraving, the interactions of nonlinear periodic structures with optical waves or microwaves have drawn much attention. Nonlinear periodic media exhibit many useful and interesting features that can be explored for the design of novel optical devices such as optical switches and logic gates. Continued interest in gap solitons and related phenomena is driven by both fundamental and practical considerations.

In this paper, we theoretically investigate the properties of electromagnetic waves propagating in a one-dimensional unlimited nonlinear periodic structures, including stationary and dynamic properties of the waves.

The paper is organized as follows:

(1) Nonlinear coupled-mode equations governing the propagating waves in the nonlinear periodic structures are obtained. (a) With the coupled-mode theory we got nonlinear coupled-mode equations. (b) In the linear limit, the dispersion relation of the linear periodic structure is obtained and discussed, and the analytical expression of group velocity is presented. It is shown that when the wave frequency is detuned from the Bragg frequency of the structure, the velocity of the waves increase. While at the two edges of the stop band, the velocity

decreases to zero. We found that the signs of the group velocities of the waves are opposite in the two edges of the stop band, and the group velocity dispersion is greater than the material dispersion in the structure.

(2) Stationary properties of nonlinear waves in periodic structures are investigated. (a) The reflection spectra of the finite linear periodic structure was obtained. The bigger the coupling coefficient is, the stronger the reflection is. (b) The qualitative description of stationary properties in the nonlinear periodic structures is presented. It is found that, as the input intensity increases, the reflection-band peak grows and shifts towards the longer wavelength. If the reflection band shifts towards the wavelength of the incident radiation, a limiting output effect will develop. And the bistability can be achieved when the radiation wavelength is on the short wavelength side of the reflection band. (c) The stationary solutions to the nonlinear coupled-mode equations are obtained. From the results, we found that the bistable output is depend on coupling coefficient, nonlinear coefficient and the length of the periodic structure.

(3) Aspects of the dynamics of nonlinear waves in periodic structures are studied. (a) We found an analytical solution to the nonlinear coupled-mode equations. The solutions describe the solitary or soliton-like waves. In the Bragg resonance limit, the field profile becomes a soliton. (b) The dispersion relation of the wave in the nonlinear periodic structures are analyzed. It is found that the stop band width would decrease due to the nonlinearity. The waves, whose frequency are within the stop band, would propagate at very slow but not zero velocity, and therefore can be called slow Bragg soliton. (c) The frequency shift characteristics of nonlinear waves are analyzed. The

frequency of the forward and backward waves would shift downwards and upwards due to the nonlinearity of the material, and the amount of the shifting depends on the detuning parameter and incident power. The closer of the wave frequency to the edge of the stop band, the larger the shifting amount is.

(4) The valid conditions for nonlinear coupled-mode equations and nonlinear Schrödinger equation respectively describing the waves properties are studied. (a) The nonlinear Schrödinger equation derived with the multiple scales method in the limit of slow amplitude variation is basically, the same, in form, as the normal nonlinear Schrödinger equation. The soliton propagation characteristics strongly depend on the periodic structure. The formation mechanism is the same as that of the ordinary optical soliton, and the periodic structure produces structure dispersion which is much larger than the material dispersion. (b) Studying the difference between the multiple scales method and coupled-mode method. In the approach of multiple scales, the nonlinearity is treated as a small perturbation, the periodic modulation effect is described by Bloch functions selected. This method is valid when the frequency of the wave is close to the edge of the stop band. While in couple-mode theory, both modulation and nonlinearity are considered as small perturbation and valid for the case that when the modulation of the structure is small, for ordinary periodical waveguide this condition is generally satisfied. To some extent, the coupled-mode equations are useful basic equations for describing wave behavior in periodic structures.

Key words coupled-mode theory, nonlinearity, soliton, gap soliton, Bragg soliton

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题研究的意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 应用前景	6
1.4 本文的主要工作	6
第二章 非线性耦合模方程	8
2.1 引 言	8
2.2 耦合模理论	10
2.3 周期结构	12
2.4 非线性耦合模方程	16
2.5 线性周期结构的色散关系	18
2.6 小 结	21
第三章 稳态特性	23
3.1 引 言	23
3.2 定性的物理图像	24
3.3 连续波入射求解	31
3.4 已有的实验结果	36
3.5 小 结	37
第四章 孤波解	39
4.1 引 言	39

4.2 求解	41
4.3 布喇格孤子解和隙孤子解	53
4.4 频率偏移	58
4.5 已有的实验结果	61
4.6 小结	62
第五章 非线性耦合模方程与非线性薛定谔方程	64
5.1 引言	64
5.2 多尺度法和非线性薛定谔方程	65
5.3 分析和比较	68
5.4 小结	71
第六章 回顾与展望	72
6.1 论文工作的回顾	72
6.2 存在的问题和对未来的展望	73
参考文献	75
致谢	81

第一章 绪 论

1.1 课题研究的意义

自 20 世纪 60 年代激光问世以来, 电磁场与物质的相互作用的研究已从线性领域跨入到非线性领域. 非线性理论的发展使人们对自然界中的许多复杂现象有了新的认识. 人们认识到, 就本质而言, 非线性才是自然界更为普遍的情况, 过去只是因为光源的强度和性能不足, 因而只能在线性近似的框架下研究电磁波在媒质中的传播. 现在采用高性能光源——激光作为辐射源, 可以很容易地激发出物质的非线性作用. 因此, 研究电磁波与物质的非线性相互作用已成为近几十年来人们的主要课题.

电磁波的传播媒质按均匀与否一般可分为均匀介质和非均匀介质两大类. 光与电介质的非线性相互作用是非线性光学的研究内容, 它已成为物理学、通信与信息科学的重要分支. 在过去的几十年中, 人们已经对电介质中的非线性波的传播特性及机理进行了非常详尽的研究^[1]. 人们认识到, 自相位调制(SPM)和群速度色散(GVD)效应在时间孤子(temporal solitons)的形成中起着关键性的作用, 而衍射效应和自聚焦效应则在激发空间孤子(spatial solitons)的过程中占着主导地位. 非线性光学的理论和应用研究已成为现代高科技发展的巨大推动力, 比如利用光纤

作为传输媒质的光孤子通信变为现实。

非均匀介质中人们研究得最多的是在波传播方向上呈现周期性变化的周期波导。当入射波长远大于空间周期或布喇格波长 λ_B 时, 周期介质可被视为均匀介质。而当两者可比拟且近似满足布喇格共振的条件时, 所有在不均匀表面处反射的波会由于相位一致而耦合成一束很强的反射波。这时就不能再将其视作为均匀介质来加以讨论, 一般要用耦合模理论来处理。

周期波导一般可以分为两种基本类型^[2]: ①波导表面光滑, 但其电学性质在传播方向上具有连续、周期性的变化, 比如, 在柱形波导内填充介电媒质, 并且其介电常数沿轴向呈周期性变化。②具有周期性边界条件的结构, 例如表面褶皱的波导, 或者均匀波导在等间隔处加载全同的膜片如滤波片所构成的周期波导等。周期结构的线性波导在很早就已被应用在多种器件中, 例如线性粒子加速器、行波管和微波滤波器网络等。

周期波导的最大特点是导波的色散关系会被周期性所调制, 在布里渊区的特殊点上色散关系将出现缺口, 这就形成了周期波导中的通带(pass bands)和禁带(stop bands)结构^[2,3]。在只考虑线性耦合作用的情况下, 入射频率位于禁带内的电磁波会发生强烈的布喇格反射, 其振幅随着传播距离的增大呈指数衰减; 而频率在禁带以外的入射波则可以不受阻碍地通过。由于传播于周期波导内的电磁波会在整段周期范围内被反射, 所以有时人们也把周期波导称作分布式反馈(DFB—distributed feed back)结构。

当入射波的强度足够强时, 非线性效应会变得明显, 具体来说, 就是通过交叉相位调制作用会使两种导波模式发生非线性耦合相互作用, 比如入射波与布喇格反射波之间的非线性耦