

文章编号: 1001-5078 (2006) 03-0165-03

光子晶体光学频率变换技术

刘春恒, 吕跃广

(中国北方电子设备研究所, 北京 100083)

摘 要: 文章首先介绍了光子晶体光学频率变换技术的基本原理和技术特点; 然后简述光子晶体光学频率变换技术研究进展情况; 最后指出了光子晶体变频技术在可调谐激光器和其它领域中的应用前景。

关键词: 光子晶体; 光学频率变换技术; 可调谐激光器

中图分类号: O734 TN773 **文献标识码:** A

The Optical Frequency Conversion Technology Based on Photonic Crystals

LIU Chun-heng, LYU Yue-guang

(The Northern Institute of Electronics Equipments, Beijing 100083, China)

Abstract: The basic principle and characteristics of optical frequency conversion technology based on the photonic crystals are firstly summarized in the paper; then, the current developments of frequency conversion of photonic crystals are also presented; finally, its importance are pointed out in the tunable laser and other application fields

Key words: photonic crystal; optical frequency conversion technology; tunable laser

1 引 言

自 1960 年第一台激光器问世以来, 已经陆续出现了多种不同类型的激光器, 主要有固体激光器 (Nd:YAG、Nd 玻璃、红宝石等)、气体激光器 (He-Ne、Ar⁺、CO₂ 等)、半导体激光器 (GaAs、InGaAsP/InP 等)、准分子激光器 (XeCl、KrF 等) 以及自由电子激光器等。可以说激光器是品种繁多, 性能各异, 然而绝大多数激光器的输出频率是固定的或在很小的范围内变化^[1]。由于激光器的输出频点和调谐范围限制, 特别是有些频率的激光还难以通过普通方法产生出来, 在一些实际应用中仍需要与光学频率变换技术相结合以获得各种波长的相干辐射源。

光学频率变换技术是指不经过光电处理, 直接在光域内将某一波长 (频率) 的光信号直接变换到另外的一个波长 (频率) 上。自激光问世以来, 光学频率变换技术一直是研究的热点之一。它不仅具有重要的学术意义, 而且对于扩展激光波段, 开拓新的应用领域具有重要的实用价值。

近年来, 特别是以磷酸钛氧钾 KTiPO₄ (KTP)、偏硼酸钡 β -BaB₂O₄ (BBO)、三硼酸锂 LiB₃O₅

(LBO) 等为代表的新型优质非线性光学晶体的发明和基于这些晶体混频特性的光学参量振荡器 (OPO)、高次谐波等非线性光学频率变换技术的广泛应用, 使得光学频率变换技术成为激光、光电子技术领域内最活跃的研究方向^[2-4]。OPO 技术以其宽调谐范围、高重复频率、高分辨率及其小型固体化等特点成为可调谐激光的主流的有效手段。然而, 尽管非线性光学晶体频率变换技术采用了各种相位匹配技术, 其能量变换效率都很低, 这是以混频方式实现变频的技术固有的不足, 因此寻找更有效的光学频率变换技术始终没有停止。

光子晶体被认为是光子控制器件的基础, 如同半导体晶体是电子控制器件的基础一样。通过这些光子控制器件可以对光的幅度、相位、频率、传播方向及状态进行控制, 因此随着光子晶体理论的逐渐成熟^[5,6], 利用光子晶体实现光学频率变换又成为

作者简介: 刘春恒 (1977 -), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光学频率变换技术研究。E-mail: liuchunheng@mail.tsinghua.org.cn

收稿日期: 2005-08-31

光学频率变换技术的热点^[7,8],基于光子晶体的光学频率变换技术能量的变换效率非常高,几乎达到100%,这是因为光子晶体光学频率变换技术是基于光子晶体的禁带特性,而不是光子晶体的混频特性。在光子晶体禁带处所有的光能量被完全反射回去,光子不会被吸收,因此几乎没有能量损失。2003年5月美国麻省理工学院(MIT)以Joannopoulos教授为首的光子晶体研究组首次在《Physical Review Letters》上发表了利用入射光和冲击波在光子晶体中合成实现频率变换的新原理,揭开了基于光子晶体频率变换技术的序幕。

2 光子晶体频率变换技术原理

光子晶体(Photonic Crystals)的概念是由Yablonovitch和John在1987年各自提出的,它是一种周期结构的材料,具有控制光波传输的特性。光子晶体的最根本特征是具有光子禁带,在光子晶体中,由于介电常数存在空间上的周期性,当光波在其间传播时,受周期性势场的影响(类似于电子中的Bragg散射),光波色散曲线成带状结构,出现类似于半导体禁带的“光子禁带”(Photonic Bandgap),如图1所示。频率落在禁带中的光波是不能传播的,而落在禁带外的光波可以完全通过,也就是说利用光子晶体的禁带结构能够达到控制光子目的,因此光子晶体被称为“光的半导体”。这种周期结构的材料(光子晶体)已经以“介电体超晶格”的形式应用于准相位匹配技术上,从而大大提高了非线性光学频率转换效率,同时也可以应用于OPO频率转换方法,满足OPO相位匹配条件。然而迄今为止,光子晶体一直作为辅助材料应用于光学频率转换的相位匹配技术上,没有成为光学频率转换的主导方法。随着人们对光子晶体深入研究,其成为光学频率转换主导方法的潜力也逐渐引起人们的关注。

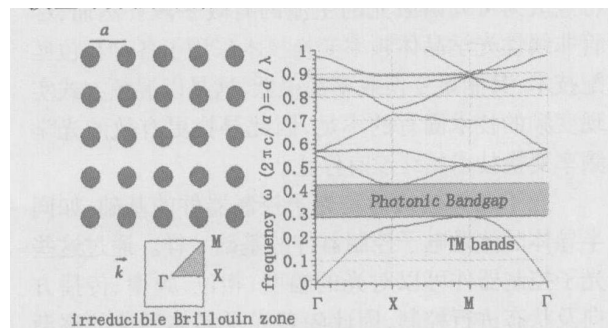


图1 2D光子禁带示意图

光子晶体频率变换技术是基于由冲击波的冲击作用引起光子禁带的周期变化和入射光与冲击波之间的Doppler频移。当冲击波通过光子晶体时,在光子晶体内部形成了以一定速度运动的波前。由于

冲击波的压缩,波前两侧的光子晶体具有了不同晶格常数和介电常数,因而两侧形成了不同位置和宽度的禁带结构。入射光和冲击光在同一光子晶体中做相对运动,当其在运动波前相遇时,入射光的频率将被Doppler频移到更高的频率,其立即被波前两侧不同的禁带形成的局域捕获,经过多次来回反射,当其频率足够高才能逃离波前两侧光子禁带局域捕获,从而实现了频率变换。其频率变换的原理图如图2所示。

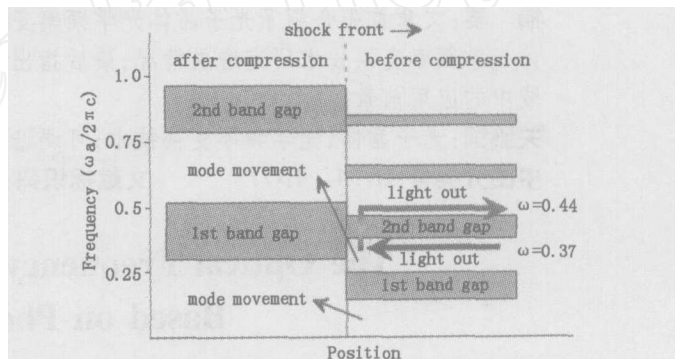


图2 频率变换原理图

另外,《Frontiers》杂志上也报道了利用光子晶体频率变换技术将红光变换成绿光的例子。它的基本情况是:未被冲击波压缩的光子晶体对于红光来说是透明的,却能够完全反射所有的更高频率的光;而压缩后的光子晶体对于绿光是透明的,却能够反射更低频率的光。当入射光和冲击波在波前相遇,由于Doppler频移效应,入射光被变换到更高的频率,这样就在压缩与未被压缩光子禁带之间发生多次Doppler频移直至逃脱压缩禁带的捕获,这样原来的红光将变成了绿光,实现了频率的变换。

频率变换范围可以通过冲击波前两侧的禁带位置与宽度等参数调节,同时由于冲击波对介质周期性的调节,使得连续输入波转变成离散的脉冲输出,脉冲速率决定于冲击波的速度,而脉冲宽度决定于光子晶体的结构。另外,由于在整个频率变换过程中都是利用光子禁带特性和Doppler频移特性,几乎没有能量的损失,因此能量变换效率极高。

3 光子晶体频率变换技术特点

与基于非线性光学晶体的变频技术相比,光子晶体频率变换技术的特点为:

1)光子晶体变频技术对入射光的强度没有要求,非线性光学晶体都存在能量阈值,因此需要较高的入射光强才引起非线性效应而实现频率变换,而基于光子晶体变频技术是利用冲击波与入射光波之间的Doppler频移和冲击波调制光子晶体的介电常数和晶格常数,从而引起冲击波前光子晶体两侧禁带位置和宽度的改变,实现对入射光频率的变换。

理论上在任何入射光条件下,都可以实现频率变换;

2)光子晶体变频技术能量变换效率非常高,几乎达到 100%,由于我们的光学频率远离于材料共振频率,光子不会被吸收,不会造成光波能量被光子晶体吸收;另外光波在波前两侧的光子禁带来回发射时,也没有能量损失,这是因为光子禁带的特性就是能够对落入光子禁带中的光波实现全发射。而非线性晶体的频率变换技术由于受相位匹配等条件限制和非线性晶体对能量的吸收,一般难以实现高效率的频率变换;

3)光子晶体变频技术的变频范围主要与冲击波前两侧光子禁带的宽度和冲击波速度有关,频率变换量可以通过调整冲击前光子晶体禁带的带宽和冲击波的速度进行控制;而基于非线性光学晶体的频率变换量依赖于光学晶体的非线性系数,其与材料、环境温度等有关,很难控制;

4)光子晶体变频技术只需要单频入射光,光子晶体实现频率变换只需单频入射光,而非线性材料一般需要两束光才能实现频率变换,如和频、差频的频率变换技术。

总之,基于光子晶体光学频率变换技术是一种新颖的非线性频率变换技术,与传统基于非线性光学晶体相比具有无比优势,但是目前尚没有成熟的理论可以利用,需要进行深入的理论探索。

4 光子晶体变频技术研究进展

如何得到具有波长调谐能力的激光源一直是各国科学家研究的重点问题,现有唯一的变频手段是基于非线性光学晶体材料的变频技术,但是该方法要求入射波具有很高的能量密度,变频的范围受入射波频率和相位匹配的限制,除特殊情况外,要求多个入射波源;同时,它的能量转换效率极低,能量损失严重,难以满足实际应用的要求。2003 年以 Joannopoulos 教授为首的光子晶体研究组的新研究进展,因其能量转化效率极高,从而引发了各国科学家对光子晶体研究的极大兴趣。

近年来,国内的大学 and 研究所(如复旦大学、浙江大学、国防科技大学、中科院等)也在光子晶体理论研究、模拟仿真和实验方面做了许多工作。我所光子晶体研究组紧密跟踪光子晶体频率变换技术的进展情况,已开展了利用高斯脉冲光和连续冲击波在一维光子晶体中实现了频率转换的理论分析和仿真研究,建立了理论模型,不仅得到了与 MIT 吻合的模拟结果,而且给出了合理的分析和解释,为进一步的深入研究与实验奠定了基础。仿真结果如图 3 所示:

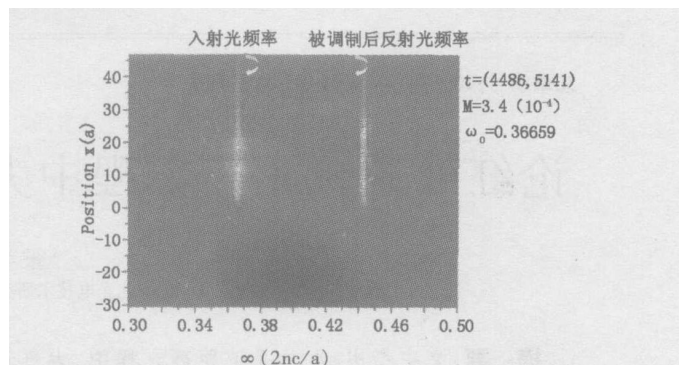


图 3 光子晶体频率变换仿真结果

5 总结

光子晶体光学频率变换技术具有很高的学术意义和极强的应用背景,其主要的方向是发展波长可调谐的激光器,同时,正在蓬勃发展的光子学,如基础光子学(量子光学、分子光子学、光子信息论等)、信息光子学(光通信技术、光子信息处理技术、光子探测技术等)、生物医学光子学也依赖于频率变换技术的发展,因此研究光子晶体频率转换技术在科学研究、工业应用和军事方面有着重大意义。

由于光子晶体频率变换技术的提出时间很短,尽管已经引起各国科学家的注意,但是仍处于理论探索阶段,到目前为止,尚没有成熟的理论指导实际的应用,因此具有很强的科研挑战性,但是光子晶体频率变换技术是一种光学频率变换技术革命性的新思路,它将极大促进波长具有调谐功能的激光器和相关技术的发展。

参考文献:

- [1] 蓝信钜. 激光技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 姚建铨. 非线性光学频率变换及准相位匹配技术 [J]. 人工晶体学报, 2002, 31(3): 201 - 207.
- [3] 姚建铨. 全固态激光及非线性光学频率变换技术 [J]. 世界科技研究与发展, (24) 5.
- [4] 姚建铨. 非线性光学频率变换和激光调谐技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [5] J D Joannopoulos, R D Meade, J N Winn. Photonic crystals: molding the flow of light [M]. Princeton University Press, 1995.
- [6] K Sokoda. Optical properties of photonic crystals [M]. Springer, 2001.
- [7] R. E. Slusher, B. J. Eggleston. Nonlinear Photonic crystals [M]. Springer, 2002.
- [8] E J Reed, M. Soljacic, J D Joannopoulos. Color of shock wave in photonic crystals [J]. Physical review letters, 2003, 19(20): 23.
- [9] E J Reed, M. Soljacic, J D Joannopoulos. Reversed Doppler effect in photonic crystals [J]. Physical review letters, 2003, 91(13): 26.