

文章编号:1004-4213(2011)05-0794-4

线性对称耦合器的几何表示

时坚¹, 马瑞琼¹, 王翀¹, 杨祎¹, 段作梁¹, 苗润才²

(1 西安邮电学院 电子工程学院, 西安 710121)

(2 陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710062)

摘要:利用线性对称耦合器两个波导中光场的电矢量构建了布洛赫矢量模型. 通过布洛赫矢量的旋转变化使得光在两个波导通道中“跃迁”的过程非常直观. 研究发现, 随着线性对称耦合器的相位失配变得越严重, 光能量在波导间的转换频率越快且转换效率降低, 与传统的求解线性对称耦合器耦合波方程所得到的结果是一致的.

关键词:光学开关; 线性对称耦合器; 耦合波方程; 布洛赫矢量

中图分类号: O431.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114005.0794

0 引言

在信息技术高速发展的现代社会中, 制造高性能的集成全光系统是科技发展的必然趋势, 开发性能优良、价格低廉的光器件成为时代的需求. 在光无源器件的应用中, 光耦合器已成为仅次于光连接器的最重要的一类器件. 近年来光耦合器的理论与应用研究已经取得了很大成就^[1-6], 很多研究中将光耦合器作为光学模拟相干原子内量子效应的工具^[7-9], 该理论基于光耦合器中光场行为与相干原子体系中原子行为的相似性.

线性对称耦合器是光学开关的基础, 线性对称耦合器由两个间距为微米量级的波导构成, 由于光能量在波导外是以指数衰减形式存在的, 当两个波导距离非常近时, 这个特殊的光场能够把一个波导中的光耦合到另一个波导中. 线性对称耦合器常见的理论分析是求解弱耦合条件下的耦合波方程^[10], 分析两个波导通道中光能量的变化. 这个系统和相干光与二能级原子的相互作用动力学行为^[11]相似.

不同于常见的理论处理, 本文利用线性对称耦合器两个波导中光场的电矢量构建了布洛赫矢量模型. 通过布洛赫矢量的旋转变化使得光在两个波导通道间的“跃迁”过程几何可视. 并且使得描述线性对称耦合器的耦合波方程的空间演化和相位失配效应得到直观的理解.

1 线性对称耦合器的一般理论分析

图 1 为线性对称耦合器结构. 波导 1 和波导 2 相距为微米量级, 初始时入射光从波导 2 输入, 波导 1 中无输入光信号, 当两个波导中传播常量相同时, 即 $\Delta\beta=0$ 条件满足. $z=0$ 时光信号在波导 2 内, $z=L$ 时光信号在波导 1 内, $z=2L$ 时光信号又重新出

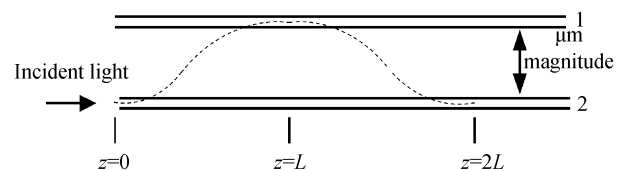


图 1 线性对称耦合器结构

Fig. 1 Linear symmetric coupler

现在波导 2 中, 随着传播距离的变化, 入射光信号在两个波导中发生周期性变化. 描述这个过程的耦合波方程组^[10]为

$$\begin{cases} \frac{dE_1(z)}{dz} = -i\kappa E_2(z) e^{-i\Delta\beta z} \\ \frac{dE_2(z)}{dz} = -i\kappa E_1(z) e^{i\Delta\beta z} \end{cases} \quad (1)$$

方程组(1)描述了两个波导中光波电矢量随位置坐标的变化关系, 通过方程的求解^[10]可以分析两个波导中光能量随位置坐标的变化关系, 如图 2. 式中 $E_1(z)$ 、 $E_2(z)$ 分别为波导 1、2 中光场电矢量的复振幅, z 为光传播方向上的位置坐标, κ 为模耦合系数, $\Delta\beta$ 为两波导间传播常量的失配. 当沿着光传播

基金项目: 陕西省教育厅自然科学基金(No. 09JK725)资助

第一作者: 时坚(1978—), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为光学测量、瞬态光学. Email: shijian-xiyou@tom.com

收稿日期: 2010-12-01; 修回日期: 2011-02-23

方向上两波导间传播常量的失配 $\Delta\beta=0$ 并且 $\kappa z = n\pi, n$ 为半奇数条件满足时,入射光能量由波导 2 完全转移到波导 1. 由图 2 可以看出光信号在两个波导中周期性的转换.

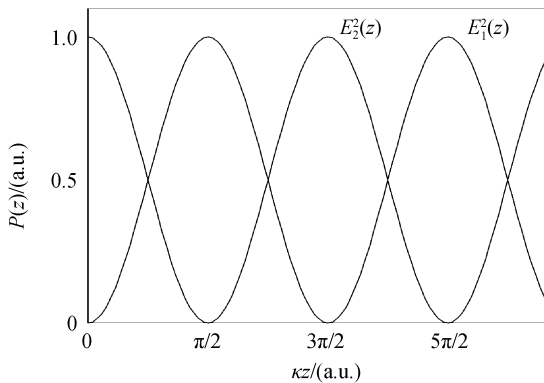


图 2 $\Delta\beta=0$ 时波导 1、2 中光能量随传播距离的变化关系
Fig. 2 The intensity of the light versus the propagation distance of the light

2 线性对称耦合器布洛赫矢量的构建

将试探解 $E_1(z) = \tilde{E}_1(z)e^{-i\frac{\Delta\beta}{2}z}, E_2(z) = \tilde{E}_2(z) \cdot e^{+i\frac{\Delta\beta}{2}z}$ 代入式(1)可以得到

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{E}_1}{dz} - i\tilde{E}_1 \frac{\Delta\beta}{2} = -i\kappa\tilde{E}_2 \\ \frac{d\tilde{E}_2}{dz} + i\tilde{E}_2 \frac{\Delta\beta}{2} = -i\kappa\tilde{E}_1 \end{cases} \quad (2)$$

定义布洛赫态矢量 $\rho = (U, V, W)$, 其中

$$\begin{cases} U = \tilde{E}_2^* \tilde{E}_1 + \tilde{E}_1^* \tilde{E}_2 \\ V = i(\tilde{E}_2^* \tilde{E}_1 - \tilde{E}_1^* \tilde{E}_2) \\ W = |\tilde{E}_2|^2 - |\tilde{E}_1|^2 \end{cases} \quad (3)$$

联立式(2)和布洛赫矢量定义式的三个分量式(3),得到

$$\begin{cases} \frac{dU}{dz} = V\Delta\beta \\ \frac{dV}{dz} = -U\Delta\beta + 2\kappa W \\ \frac{dW}{dz} = -2\kappa V \end{cases} \quad (4)$$

观察式(4),可以看出由 U, V, W 构成的矢量 ρ 满足矢量演化方程

$$\frac{d\rho}{dz} = \alpha \times \rho \quad (5)$$

式(5)中,转矩矢量 $\alpha = (-2\kappa, 0, -\Delta\beta)$. 利用两个波导中光场电矢量 $E_1(z), E_2(z)$ 构建了布洛赫矢量,研究布洛赫矢量的旋转,可以直观地看到两个波导中能量转换过程的物理图像. 光在线性对称耦合器两波导间的能量转换过程和相干光与二能级原子的

相互作用动力学行为具有很明显的相似性. 基态和激发态的粒子数布居分别对应于波导 2 和波导 1 中光波的复振幅的平方. 时间 t 对应于传播方向 z , 失谐量 Δ 对应于相位失配量 $\Delta\beta$, 表 1 将文中构建出的线性对称耦合器的布洛赫矢量与相干光与二能级原子相互作用的布洛赫矢量进行了详细地比较.

表 1 光与二能级原子相互作用的光学布洛赫矢量与线性对称耦合器布洛赫矢量的类比

Table 1 Analogy between the light in linear symmetric coupler and the dynamics of a two level atomic system, induced by coherent light

Parameter	Optical Bloch sphere	Bloch sphere of optical coupler
Evolution parameter	time	z axis
Population	$ c_g ^2, c_e ^2$	$ E_2 ^2, E_1 ^2$
Phase mismatch	$\Delta = \omega_0 - \omega_{eg}$	$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$
Torque vector	$\alpha = (-\Omega_0, 0, \Delta)$	$\alpha = (-2\kappa, 0, -\Delta\beta)$
Bloch vector ρ	$U = c_g^* c_e + c_e^* c_g$	$U = \tilde{E}_2^* \tilde{E}_1 + \tilde{E}_1^* \tilde{E}_2$
	$V = i(c_g^* c_e - c_e^* c_g)$	$V = i(\tilde{E}_2^* \tilde{E}_1 - \tilde{E}_1^* \tilde{E}_2)$
	$W = c_g c_g^* - c_e c_e^*$	$W = \tilde{E}_2 ^2 - \tilde{E}_1 ^2$
Evolution equation	$\frac{d\rho}{dt} = \alpha \times \rho$	$\frac{d\rho}{dz} = \alpha \times \rho$

3 讨论

式(5)中转矩矢量 α 表示两个波导中光能量的耦合, 矢量 ρ 表示沿着光的传播方向光能量在波导 1 和波导 2 之间的转换关系, 其中, W 分量包含了转换效率的信息. 因为初始光信号在波导 2 中输入, 所以转换效率为

$$\eta = \frac{E_1^2(z)}{E_2^2(0)} = \frac{2E_1^2(z)}{2E_2^2(0)} = \frac{E_1^2(z) + E_1^2(z)}{2} = \frac{E_1^2(z) + 1 - E_2^2(z)}{2} = \frac{1 - W}{2} \quad (6)$$

证明式(6)时考虑两个条件: 初始光信号从波导 2 输入, 波导 1 中无光信号输入, 即 $E_2^2(0) = 1$; 忽略此过程中能量损耗, 能量守恒关系满足, 即 $E_1^2(z) + E_2^2(z) = E_2^2(0)$. 初始时当入射光从外部耦合至波导 2 内时, 如果两波导间传播常量匹配, 即 $\Delta\beta = 0$ 条件满足, $E_2^2(z) = 1, E_1^2(z) = 0, W = 1$, 这时矢量位于球的顶部 $\rho = (0, 0, 1)$, 转换效率 $\eta = 0$, 光信号在波导 2 中传播. 当布洛赫矢量旋转到球的其它位置时, 两个波导中光能量的转换效率的值为 $\eta = \frac{1 - W}{2}$. 随着

布洛赫矢量的旋转, W 值连续变化, 当 $E_2^2(z) = E_1^2(z), W = 0, \eta = \frac{1}{2}$, 此时波导 2 中有 50% 的能量耦合到波导 1 中. 当 $E_2^2(z) = 0, E_1^2(z) = 1, W = -1$, 矢量位于球的底部 $\rho = (0, 0, -1)$, 转换效率 $\eta = 1$,

波导 2 中光能量完全耦合到波导 1 中去,此时光信号在波导 1 中传播. 布洛赫矢量 ρ 从球顶部旋转到球底部,在两波导中实现 100% 的光能量转换效率,矢量在布洛赫球面上的转动轨迹与相干光与二能级原子共振相互作用完全一样^[11]. 当 $\Delta\beta=0$ 时,转矩矢量 $\alpha=(-2\kappa, 0, 0)$,转矩矢量 α 沿 $-U$ 方向,布洛赫矢量 ρ 绕 $-U$ 轴在 V, W 平面内旋转时, $W = |\tilde{E}_2|^2 - |\tilde{E}_1|^2$ 从 +1 变化到 -1,这导致了光波在两个波导中的能量转换效应. 传播常量失配的转换过程与相干光与二能级原子失谐共振相互作用一致,这种过程在布洛赫球面上表示为一系列小圆轨迹,图 3 为传播常量相位失配 $\Delta\beta$ 分别为 $0, \pm\pi/2, \pm\pi, \pm 2\pi$ 时的布洛赫矢量 ρ 的旋转轨迹,从图 3 中可以看出,当 $\Delta\beta \neq 0$ 时,转矩矢量 $\alpha = (-2\kappa, 0, -\Delta\beta)$ 位于 U, W 平面内,随着相位失配 $|\Delta\beta|$ 值不断增大,转矩矢量和 W 轴的夹角不断减小,考虑到初始条件 $E_2^z(0) = 1$,布洛赫矢量 ρ 的轨迹为起始点在球的顶点的半径逐渐减小的小圆,光在两个波导中的能量的转换效率逐渐降低. 不可能再实现 100%

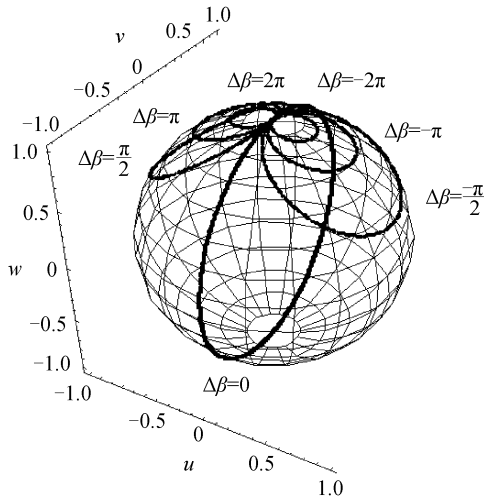


图 3 $\Delta\beta$ 分别为 $0, \pm\pi/2, \pm\pi, \pm 2\pi$ 时矢量 ρ 的进动轨迹

Fig. 3 Geometrical visualization of the linear symmetric coupler on Bloch sphere

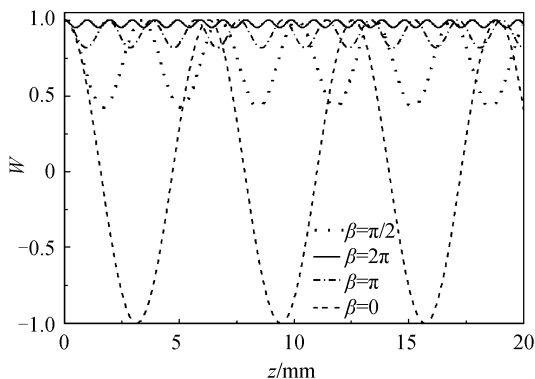


图 4 布洛赫矢量 ρ 的 W 分量随距离 z 的变化关系

Fig. 4 The projection of the Bloch vector onto the z axis yields the conversion efficiency

的光能转换,相位失配 $\Delta\beta$ 值正负相等时,布洛赫矢量 ρ 的运动轨迹的小圆对称分布在相位匹配条件满足时经过球的顶部和底部的大圆的两侧,图 4 为布洛赫矢量 ρ 的 W 分量随距离 z 的变化关系,从图中可以看出,相位失配越严重,光在线性对称耦合器中的转换频率越快且效率越低.

4 结论

将弱耦合条件下光在线性对称耦合器中的能量转换行为与相干光与二能级原子的相互作用动力学行为进行比较,发现这两个过程具有明显的相似性. 与线性对称耦合器的常见求解方程组的处理方法不同,通过两个波导中光场的电矢量构建了布洛赫矢量 ρ ,此矢量满足矢量进动方程,矢量的 W 分量包含了光在两个波导通道中的能量转换效率信息,这使得光在两个波导中“跃迁”的物理过程直观可视. 研究发现随着线性对称耦合器的相位失配变得越严重,光能量在波导间的转换频率增快且转换效率降低,这与传统的求解线性对称耦合器耦合波方程所得到的结果是一致的.

参考文献

- [1] ALMEIDA V R, BARRIOS C A, PANEPUCCHI R R. All-optical control of light on a silicon chip[J]. *Nature*, 2004, **431**(10): 1081-1084.
- [2] LOCATELLI A, MODDOTTO D, PALOSCHI D, *et al.* All-optical switching in ultrashort photonic crystal couplers[J]. *Optics Communications*, 2004, **237**(7): 97-102.
- [3] LI C F, DOU N. Optical switching in silicon nano-waveguide ring resonators based on Kerr effect and TPA effect[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(5): 054203.
- [4] LI C F, XU G M, MA L S, *et al.* An erbium-doped fibre nonlinear coupler with coupling ratios controlled by pump power[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, **7**(10): 540-543.
- [5] BARAK A, LAMHOT Y, FRIEDLAND L, *et al.* Autoresonant dynamics of optical guided waves[J]. *Physical Review Letters*, 2009, **103**(12): 123901.
- [6] XIANG Y, WEN S, DAI X, *et al.* Modulation instability in nonlinear oppositely directed coupler with a negative-index metamaterial channel[J]. *Physical Review E*, 2010, **82**(5): 056605.
- [7] VOROBICHIK I, NAREVICIUS E, ROSENBLUM G, *et al.* Electromagnetic realization of orders-of-magnitude tunneling enhancement in a double well system[J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(2): 176806.
- [8] LONGHI S. Coherent destruction of tunneling in waveguide directional couplers[J]. *Physical Review A*, 2005, **71**(6): 065801.
- [9] LONGHI S. Optical analog of population trapping in the continuum: Classical and quantum interference effects[J]. *Physical Review A*, 2009, **79**(2): 023811.
- [10] 亚里夫 A. 现代通信光电子学[M]. 陈鹤鸣,施伟华,张力,译. 5 版. 北京:电子工业出版社,2004:391-392.
- [11] 李福利. 高等激光物理学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2006:37-46.

Geometrical Representation of the Linear Symmetric Coupler

SHI Jian¹, MA Rui-qiong¹, WANG Chong¹, YANG Yi¹, DUAN Zuo-liang¹, MIAO Run-cai²

(1 *School of Electronic Engineering, Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China*)

(2 *School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

Abstract: A Bloch vector model was set up using the light field electric vector in two waveguides of the linear symmetric coupler. The light “transition” process in two waveguide channels was quite directly with the Bloch vector rotation changing. It was found that the more serious the propagation constant mismatches, the faster the frequency of light energy exchanges and the lower efficiency exchanges, which is equal to the results solved by the traditional equations.

Key words: Optical switching; Linear symmetric coupler; Coupled-wave equation; Bloch vector