

# 分层复合材料光波导的非线性 二次增强效应\*

曹庄琪 王 强 沈启舜 陈英礼

(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

**摘 要** 通过对分层复合材料光波导 TM 模等效介电系数的分析, 清楚地预言了无限扩展分层复合材料结构中的非线性增强将因光波导的边界作用而引起进一步的加强。

**关键词** 分层复合材料, 光波导, 非线性增强。

## 1 引 言

分层复合材料具有完全不同于其构成材料的光学性质, 在非线性光学和光电子学领域中已引起广泛的重视。对无限扩展的分层复合材料可追溯到四十年以前。Rytov<sup>[1]</sup>建立了薄膜近似下(分层薄膜的厚度远小于光波长)该结构在 TE 和 TM 两种偏振状态下的等效介电系数公式。近年来, Boyd 等<sup>[2]</sup>又研究了无限扩展分层复合材料结构的非线性光学极化率, 对 TM 偏振, 他们发现了该结构在可实现的实验条件下的非线性增强效应, 并分别给出了描述二倍频(SHG)及普克尔(Pockels)效应的二阶非线性光学极化率和描述非线性折射率的三阶非线性光学极化率的增强公式。

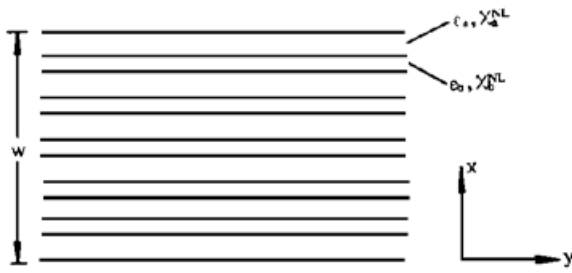
本文研究有限厚度(光波导)分层复合材料中的非线性增强效应。首先分析了几年前作者曾建立的多量子阱等效折射率的公式<sup>[3]</sup>, 得到了分层复合材料光波导和无限扩展复合材料两种结构等效介电系数的转换公式, 并得到一个重要结论, 即对 TM 偏振, 光波导结构的等效介电系数总是大于无限扩展结构的介电系数。由于在分层复合材料结构中, 有效非线性极化率是等效介电系数的单调递增函数, 因此, 在相同的条件下, 光波导结构中的非线性效应将进一步得到增强, 并称这种现象为非线性二次增强效应。

## 2 有效介电系数的理论分析

考虑如图 1 所示的分层复合材料光波导结构, 设光波导沿 Z 方向传播而光波导芯子层的厚度  $w$ , 它是由厚度分别为  $a$  和  $b$  的两种不同材料周期性地交替组成的, 且  $a$  和  $b$  远小于光波长  $\lambda$ (薄膜近似), 材料的介电系数和非线性光学极化率分别用  $\epsilon$  和  $\chi^{NL}$  表示。在  $w$  趋于无穷大

\* 上海市科学技术委员会重点基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 7 月 18 日; 收到修改稿日期: 1996 年 11 月 11 日



的情况下, 光波导退化为无限扩展的结构, 这时对应于 TE 模(电场沿 Y 方向偏振)的等效介电系数为<sup>[2]</sup>

$$\epsilon_{\text{eff}}^{\infty} = f_a \epsilon_a + f_b \epsilon_b \quad (1)$$

标有“∞”表示无限扩展结构。而对应 TM 模(磁场沿 Y 方向偏振, 电场沿 X 方向偏振), 等效介电系数定义为<sup>[2]</sup>:

$$1/\epsilon_{\text{eff}}^{\infty} = f_a/\epsilon_a + f_b/\epsilon_b \quad (2)$$

(1)、(2)两式中,  $f_a$  和  $f_b$  称为体积因子, 可分别定义为

$$f_a = a/(a + b), \quad f_b = b/(a + b) \quad (3)$$

当  $w$  为有限厚度时, 波导边界对 TM 模的电场具有约束作用, 这时对应 TM 模的等效介电系数由下式给出<sup>[3]</sup>:

$$\epsilon_{\text{eff}}^w = f_a \epsilon_a + f_b \epsilon_b - f_a f_b (\epsilon_a - \epsilon_b)^2 \epsilon_m / \epsilon_a \epsilon_b \quad (4)$$

式中  $\epsilon_m = (\beta/k)^2$  称为模介电系数,  $\beta$  为导波传输常数,  $k$  为自由空间波数。利用(2), (3)两式, 并经过简单的代数运算, 可得

$$\epsilon_{\text{eff}}^w = \epsilon_{\text{eff}}^{\infty} + f_a f_b [(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 / \epsilon_a \epsilon_b] (\epsilon_{\text{eff}}^{\infty} - \epsilon_m) \quad (5)$$

由于  $\epsilon_m$  是  $w$  的单调递增函数, 且当  $w \rightarrow \infty$  时, 有  $\epsilon_m \rightarrow \epsilon_{\text{eff}}^{\infty}$ 。因此对厚度  $w$  为有限的光波导, 不等式  $\epsilon_{\text{eff}}^w > \epsilon_{\text{eff}}^{\infty}$  总是满足的。即分层复合材料光波导的等效介电系数总是大于相应无限扩展结构的等效介电系数。

而对 TE 模, 由于波导边界对电场没有约束作用, 因此光波导的等效介电系数仍由(1)式确定。由(1), (4)两式可见, 两类模式的等效介电系数是不相等的, 这就是分层复合材料光波导具有本征双折射的物理原因。

### 3 非线性二次增强效应

为说明复合材料光波导结构中的非线性二次增强效应, 将参照文献[2]中所举例子分别加以讨论和比较。

#### 3.1 线性响应

考虑两种材料的介电系数相差较大的情况, 譬如  $\epsilon_b/\epsilon_a = 4$ , 这时, 由于电位移矢量在界面处法向连续即有  $\epsilon_a E_a = \epsilon_b E_b$ , 这说明  $a$  介质中的电场强度将是  $b$  介质中的 4 倍, 对一宏观电场  $E(w)$ , 则有<sup>[2]</sup>

$$E_a(w) = \epsilon_{\text{eff}}(w) E(w) / \epsilon_a(w) \quad (6)$$

式中  $\epsilon_{\text{eff}}(w)/\epsilon_a(w)$  可解释为介质  $a$  的局域场增强因子, 只要这个因子大于 1, 则将产生非线性增强效应, 对  $w = 0.12 \mu\text{m}$ , 图 2 显示了光波导的无限扩展结构中,  $a$  介质局域场增强因子随体积因子  $f_b$  的变化曲线。由图 2 可见, 当光波导芯子层厚度  $w = 0.12 \mu\text{m}$  时, 其局域场增强因子总是大于无限扩展结构局域场增强因子。

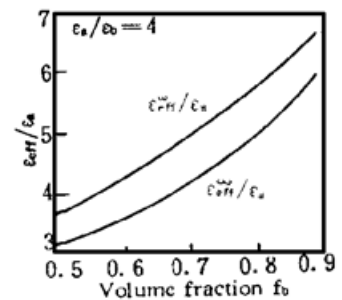


Fig. 2 Dependence of the local-field enhancement factor  $f_b$  on the volume fraction of the component  $b$ .  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ,  $\epsilon_a = 1.96$ ,  $\epsilon_b = 7.84$

### 3.2 二倍频

设介质  $a$  和  $b$  与 TM 偏振有关的二阶非线性极化率分别为  $\chi_a^{(2)} = \chi_a^{(2)}(2\omega = \omega + \omega)$  和  $\chi_b^{(2)} = \chi_b^{(2)}(2\omega = \omega + \omega)$ , 则关于二倍频的有效非线性极化率<sup>[2]</sup>

$$\chi_{\text{eff}}^{(2)}(2\omega = \omega + \omega) = \left[ \frac{f_a \chi_a^{(2)}}{\epsilon_a(2\omega) \epsilon_a^2(\omega)} + \frac{f_b \chi_b^{(2)}}{\epsilon_b(2\omega) \epsilon_b^2(\omega)} \right] \epsilon_{\text{eff}}^2(\omega) \epsilon_{\text{eff}}(2\omega) \quad (7)$$

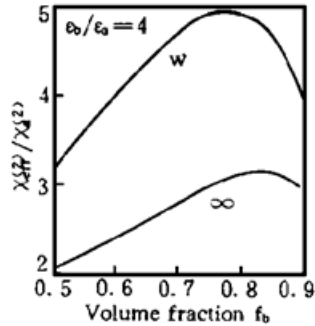


Fig. 3 Effective nonlinear enhancement factor for second-harmonic generation plotted versus the volume fraction of the component  $b$ .  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ,  $\epsilon_a = 1.96$ ,  $\epsilon_b = 7.84$

分别用  $\epsilon_{\text{eff}}^{\infty}$  和  $\epsilon_{\text{eff}}^w$  代入(7)式, 可得图3所示关于二倍频的有效非线性增强因子  $\chi_{\text{eff}}^{(2)}/\chi_a^{(2)}$  随体积因子  $f_b$  的变化曲线。为简单计, 假定只有介质  $a$  具有二阶非线性响应, 即假设  $\chi_b^{(2)} = 0$ , 并忽略介电系数的色散, 即有  $\epsilon(2\omega) = \epsilon(\omega)$ , 由图3可见, 在可实现的条件下, 当  $f_b = 0.75$  时关于二倍频的有效非线性一次增强因子  $(\chi_{\text{eff}}^{(2)}/\chi_a^{(2)})_{\infty}$  近似等于3, 而在光波导芯子  $w = 0.12 \mu\text{m}$  时, 二次增强因子  $(\chi_{\text{eff}}^{(2)}/\chi_a^{(2)})_w$  最大可达4.96。

通过相同的步骤, 可得到关于普克尔效应和三阶非线性折射率的二次增强因子, 因方法雷同, 这里不再赘述。

**结 论** 通过对分层复合材料光波导 TM 模有效介电系数的分析, 预言了此类结构具有非线性二次增强效应。在可实现的实验条件下, 非线性二次增强可达一次增强的1.57倍。

### 参 考 文 献

- [1] S. M. Rytov, Electromagnetic properties of a finally stratified medium. *Sov. Phys. JETP*, 1956, 2 (4): 466~ 475
- [2] R. W. Boyd, J. E. Sipe, Nonlinear optical susceptibilities of layered composite materials. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1994, 12(2): 297~ 303
- [3] Z. Cao, C. Hu, G. Jin, Method of equivalent refractive indices in multi-quantum-well waveguides with arbitrarily shaped base periods. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, 8(12): 2519~ 2522

## Second Enhancement of the Nonlinear Susceptibility in Optical Waveguides of Layered Composite Materials

Cao Zhuangqi Wang Qiang Shen Qishun Chen Yingli  
(Department of Applied Physics, Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 18 July 1996; revised 11 November 1996)

**Abstract** Enhancement of nonlinear optical susceptibility can occur in layered composite materials. The equivalent dielectric constant for TM modes in an optical waveguide of layered composite materials is analyzed. We find that under experimentally realizable conditions the nonlinear second enhancement of such a structure can exist because of the waveguide boundary effects.

**Key words** layered composite materials, optical waveguides, nonlinear enhancement.