

有损耗介质中非线性光导波的数值模拟

赵安平 于荣金

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

摘 要 发展了一种以有限元法为基础的数值方法, 用它分析由损耗任意大小材料构成的平面非线性波导结构所传导的非线性有损耗光波。在这种方法中, 从给出的非线性有损耗波导直接得到 TE 和 TM 波与功率有关的复传播常数和局域电磁场分布。特别是对于 TM 波, 考虑了非线性折射率的双轴性, 没有任何近似。模拟和分析了很宽吸收系数范围内非线性有损耗波导系统 TE 和 TM 波与功率有关的色散关系。表明 TE 和 TM 波的色散关系都与功率密切相关, 尤其重要的是, 如果吸收损耗足够大, 双稳现象就不再存在。

关键词 非线性有损耗波导, 有限元法。

1 引 言

一般说来, 要计算非线性有损耗波导中的非线性波, 特别在有损耗介质的吸收系数比较大时, 是很困难的。至今, 用于研究含有损耗材料的界面或薄膜所传导的 TE 和(或)TM 波的方法^[1~4], 是以下述假定为基础的: 1) 对 TE 波和 TM 波, 每个波长下的光损耗是小的, 而且非线性有损耗波导所传导的 TE 和 TM 波的损耗系数, 是从它相应的非线性无损波导得到的; 2) 特别是对于 TM 波, 非线性折射率的性质由“单轴近似”加以描述。由于上述假定, 文献[1~4]所用的方法只能给出 TE 和 TM 偏振模的近似解, 只适用于吸收系数极小的非线性有损耗波导结构, 而实际经常会遇到吸收系数较大的非线性波导。因此对于较大吸收系数的非线性有损耗波导, 为了得到更精确和真实的结果, 需要发展一种能求解这种波导系统的技术。

本文为了分析非线性有损耗波导系统的 TE 和 TM 偏振波, 发展了一种以有限元法^[5, 6]为基础的数值方法。在这种方法中, 从给出的非线性有损耗波导直接得到 TE 和 TM 模的复传播常数和局域电磁场分布。特别是对于 TM 波, 考虑了非线性折射率的双轴性(因为 TM 模需要涉及二个非零电场分量), 没有任何近似。因此本方法可适用于具有损耗任意大小的材料所构成的非线性波导, 并首次分析了吸收系数范围很宽的非线性有损耗波导结构中 TE 模和 TM 模与强度有关的色散关系。

2 模拟技术

考虑的非线性有损耗平面波导结构, 如图 1 所示。波导层的厚度为 d , 它上下被半无限的

包层所束缚。第 i 层的线性(低功率)复折射率为 $n_i = n_{ic} - j\epsilon_i$ (n_{ic} 和 ϵ_i 分别为复折射率的实部和消光系数), 非线性光学系数为 n_i^* ($i = 1, 2, 3$)。

2.1 非线性有损耗 TE 偏振波

对 TE 偏振光, 克尔型非线性介质的相对介电常数为^[5]

$$\epsilon_{i,z} = n_{ic}^2 + a_i |E_x|^2 \tag{1}$$

式中 $a_i = c_0 \epsilon_0 n_{ic}^2 n_i^*$ 为 i 层的非线性系数, c_0 为光在真空中的速度, ϵ_0 为真空介电常数。因此 i 层非线性有损耗介质的复非线性折射率为

$$n_{i,z} = \sqrt{\epsilon_{i,z}} - j\epsilon_i \tag{2}$$

由麦克斯韦方程可推出在这类波导中, 非线性有损耗 TE 波满足下列波动方程:

$$\frac{d^2 E_x}{dy^2} + (K_0^2 n_z'^2 + r^2) E_x = 0 \tag{3}$$

式中 K_0 为真空中的波数, $\gamma = \beta + i\alpha$, γ 为传播方向(z)的复传播常数。 β 和 α 分别为复传播常数的实部和虚部。

把平面波导剖面分成若干二阶元, 并把标准一维有限元技术应用于方程(3), 就可得到非线性有损耗 TE 波的下列矩阵方程:

$$[K]\{E_x\} = \gamma^2 [M]\{E_x\} \tag{4}$$

式中,

$$[K] = \sum \int \left\{ \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_e \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_e^T - K_0^2 ([N]^T [n_z'^2]_e [N]_e [N]_e^T) \right\} dy,$$

$$[M] = \sum \int \{ [N]_e [N]_e^T \} dy, \quad \{E_x\} = \sum \{E_x\}_e.$$

式中 E_x 为每个节点算出的电场, $[N]_e$ 为形状函数矢量, T 代表矩阵的转置, \sum 代表所有元素对整个矩阵的贡献。方程(4) 代表一个广义非线性本征值问题, 它的本征值和本征矢分别相当于 γ^2 和 $\{E_x\}$ 。从它的线性和(或)非线性解开始迭代, 由迭代可自洽解。沿 x 轴每单位长度导波总的光功率为

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{+\infty} (E_x H_y^*) dy = \frac{C_0 \epsilon_0}{2} (\beta/K_0) \int_{-\infty}^{+\infty} |E_x|^2 dy \tag{5}$$

2.2 非线性有损耗 TM 偏振波

对 TM 偏振光, 克尔型非线性介质的相对介电常数 $\epsilon_{i,y}$ 和 $\epsilon_{i,z}$ 为^[6]

$$\epsilon_{i,y} = n_{ic}^2 + a_i |E_y|^2 + b_i |E_z|^2, \quad \epsilon_{i,z} = n_{ic}^2 + b_i |E_y|^2 + a_i |E_z|^2 \tag{6}$$

式中 a_i 为 i 层介质的非线性系数, b_i 值与特定的非线性机理有关, 例如对于电子畸变非线性机理, $b = a/3$ 。 i 层非线性有损耗介质的复非线性折射率为

$$n_{i,y} = \sqrt{\epsilon_{i,y}} - j\epsilon_i, \quad n_{i,z} = \sqrt{\epsilon_{i,z}} - j\epsilon_i \tag{7}$$

在这类波导中, 非线性有损耗 TM 波满足下列波动方程:

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{1}{n_z'^2} \frac{dH_z}{dy} \right) + \left(K_0^2 + \frac{\gamma^2}{n_y'^2} \right) H_z = 0 \tag{8}$$

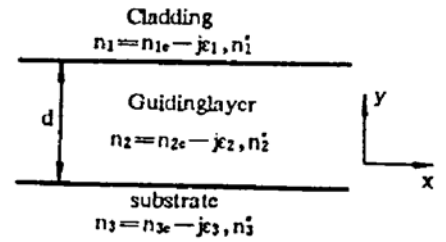


Fig. 1 Geometry of the lossy nonlinear planar waveguide and its coordinate system

式中 K_0 为真空中的波数, $\gamma = \beta + j\alpha$, γ 为传播方向 (z) 的复传播常数, β 和 α 分别为复传播常数的实部和虚部。

把标准一维有限元技术应用于方程(8), 就可得到下列矩阵方程:

$$[K] \{H_z\} = \gamma^2 [M] \{H_z\} \quad (9)$$

式中,

$$[K] = \sum \int \left\{ \left([N]^T \left[\frac{1}{n_y^2} \right] \right) \left[\frac{dN}{dy} \right] \left[\frac{dN}{dy} \right]^T - K_0^2 [N] \cdot [N]^T \right\} dy$$

$$[M] = \sum \int \left\{ \left([N]^T \left[\frac{1}{n_y^2} \right] \right) [N] \cdot [N]^T \right\} dy, \quad \{H_z\} = \sum \{H_z\}$$

H_z 为每个节点算出的磁场。方程(9) 代表一个广义非线性本征值问题, 它的本征值和本征矢分别相当于 γ^2 和 $\{H_z\}$ 。与 TE 偏振波类似, 它可以用迭代方式自洽解。

沿 x 轴每单位长度导波总的光功率为

$$P = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{+\infty} (E_y H_z^*) dy = -\frac{1}{2C_0 \epsilon_0 K_0} \int_{-\infty}^{+\infty} R_y \left(\frac{j\gamma}{n_y^2} \right) |H_z|^2 dy \quad (10)$$

一旦得到了 H_z , 通过方程(6) 计算 $\epsilon_{,y}$ 和 $\epsilon_{,z}$ 所需的电场分量 E_y 和 E_z , 就可从下列麦克斯韦方程求出:

$$E_y = \frac{1}{c_0 \epsilon_0} (j\gamma / K_0) \frac{1}{n_y^2} H_z, \quad E_z = j \frac{1}{c_0 \epsilon_0} (1/K_0) \frac{1}{n_z^2} \frac{dH_z}{dy} \quad (11)$$

3 数值结果和讨论

本文模拟的薄膜波导参数为^[2]: 线性折射率 $n_1 = 1.52$, $n_2 = 1.57$, $n_3 = 1.55 - j\epsilon$, 非线性光学系数 $n_1^2 = n_2^2 = 0$, $n_3^2 = 10^{-9} \text{ m}^2/\text{W}$, 薄膜的厚度 $d = 2.0 \mu\text{m}$, 光波长 $\lambda = 0.515 \mu\text{m}$ 。下面用不同的消光系数 ϵ 计算非线性有损耗 TE 波和 TM 波的数值结果。

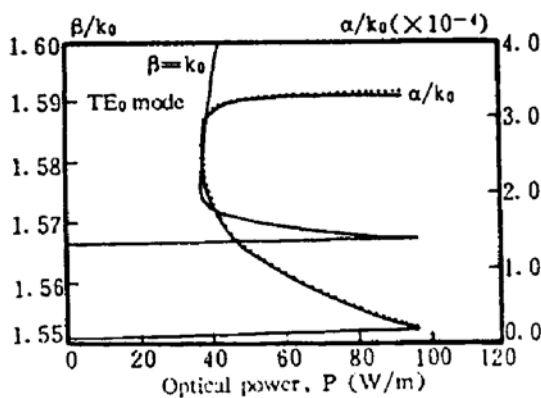


Fig. 2 Complex effective index of the TE₀ wave vs optical power for $\epsilon = 3.2258 \times 10^{-4}$, where dots and dashed curve represent the results obtained with the approximate method [2], for the real (β/K_0) and imaginary (α/K_0) parts, respectively

为了能够把本文的结果与近似方法^[2]的结果进行比较, 首先计算很小 ϵ 值 TE 偏振波与强度有关的色散关系。图 2 表示 $\epsilon = 0.001 / (2 \times 1.55) = 3.2258 \times 10^{-4}$, 即文献[2]中 $\epsilon_{ic} = 0.001$ 时, 有限元法和近似方法得到的非线性有损耗 TE₀ 模的数值结果。从图 2 可以看出: 有限元解与近似方法得到的结果一致, 特别是复有效折射率的实部 (β/K_0); 而且这两种方法都预示了虚部与功率无关的损耗。

图 3(a)和图 3(b)分别为 $\epsilon = 0.001$ 和 0.01 时, TE 波的复有效折射率与光功率的依赖关系。从图 3 可以看出: ϵ 从 0.001 增加到 0.01 时, 复有效折射率的实部 (β/K_0) 并没有很大的改变, 而虚部 (α/K_0) 却有明显的改变。图 3 也可观察到虚部与功率无关的损耗。此外, 随着吸收损耗的增加, 从下分支跳跃到它的上分支所需的阈值功率也增加。

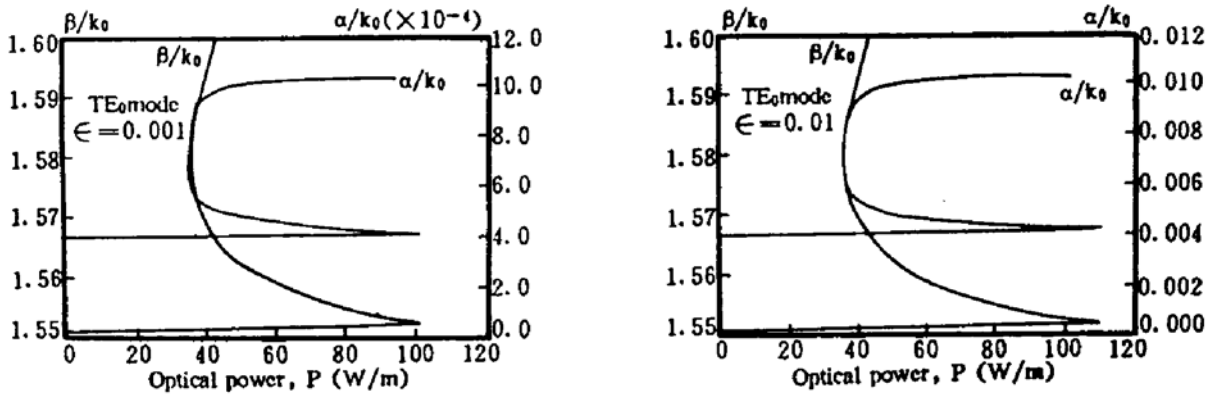


Fig. 3 Complex effective index of the TE₀ mode vs optical power; (a) $\epsilon = 0.001$, (b) $\epsilon = 0.01$

为了进一步研究增加 ϵ 值时与功率有关的色散特性，图 4 给出了 $\epsilon = 0.02$ 时 TE 波的数值结果。在这种情况下，从图 4 可以观察到实部和虚部的双稳行为不再存在。这是吸收系数足够大时，在吸收损耗和自聚焦作用之间的竞争中，吸收损耗起了重要作用的缘故。

对 TM 偏振波， $b = a/3$ ， $\epsilon = 0.01$ 和 0.02 时的数值结果，以及 TE 偏振波相应的结果分别表示于图 5(a) 和 5(b)。TM 模的特性与 TE 模相似，在导波区(即 $n_{3c} < \beta/K_0 < n_{2c}$)，TM 模实部和虚部的结果接近 TE 模结果。

最后，应该指出，所有图中非稳区(即实部 $d\beta/dp < 0$ ，而虚部 $d\alpha/dp < 0$)的曲线，都是用“非常规解技术”^[7]的迭代方式得到的。

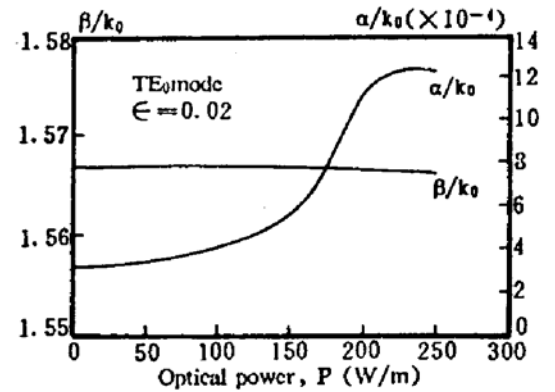


Fig. 4 Complex effective index of the TE₀ mode vs optical power for $\epsilon = 0.02$

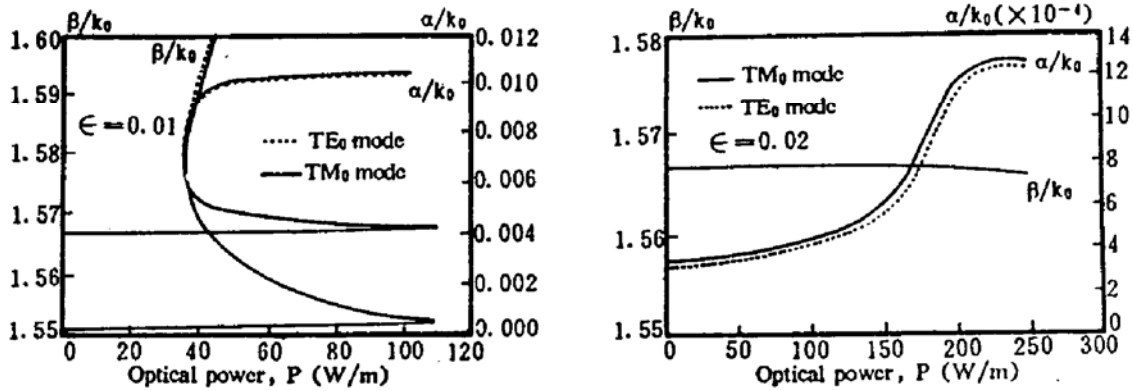


Fig. 5 Complex effective index for the TM₀ mode (for the case $b = a/3$) and comparison with its TE₀ counterpart vs optical power; (a) $\epsilon = 0.001$, (b) $\epsilon = 0.01$, (c) $\epsilon = 0.02$

结 论 本文提出了一种以有限元技术为基础的通用方法，用它分析由损耗任意大小材料构成的平面非线性波导。此方法可直接从给定的波导得到 TE 模和 TM 模的复传播常数和局域电磁场分布，特别是对于 TM 模，考虑了非线性折射率的双轴性，没有任何近似。作为这种方法的应用，对吸收系数较小和较大的有损耗介质，模拟和分析了非线性有损耗波导中 TE 模和 TM 模与功率有关的色散关系。结果表明：TE 波和 TM 波的损耗与功率密切相关；当吸收系数达到某一值时，双稳行为消失。由于本方法的通用性，因此它在各种非线性有损耗波导及其器件的计算机辅助设计中是很有用的。

参 考 文 献

- [1] G. I. Stegeman, C. T. Seaton, J. Ariyasu *et al.*, Nonlinear electromagnetic waves guided by a single interface. *J. Appl. Phys.*, 1985, **58**(7): 2453~2459
- [2] J. Ariyasu, C. T. Seaton, G. I. Stegeman, Power-dependent attenuation of nonlinear waves guided by thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(4): 355~357
- [3] J. Ariyasu, C. T. Seaton, G. I. Stegeman *et al.*, Nonlinear surface polaritons guided by metal films. *J. Appl. Phys.*, 1985, **58**(7): 2460~2466
- [4] Z. Jakubczyk, H. Jerominek, S. Patela *et al.*, Power-dependent attenuation of TE waves propagating in optical nonlinear waveguiding structures. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(11): 1921~1928
- [5] 赵安平, 于荣金, 多量子阱光波导中非线性 TE 波的有限元解. 半导体学报, 1994, **15**(3): 199~203
- [6] 赵安平, 于荣金, 多量子阱光波导中非线性 TM 波的有限元解. 光子学报, 1993, **22**(3): 221~225
- [7] X. H. Wang, G. K. Cambrell, Full vectorial simulation of bistability phenomena in nonlinear-optical channel waveguides. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1993, **10**(6): 1090~1095

Numerical Modelling of Lossy Nonlinear Slab-Guided Waves

Zhao Anping Yu Rongjin

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica, Changchun 130021)

(Received 28 September 1994)

Abstract A numerical approach based on the finite element method is developed for the analysis of lossy nonlinear optical waves guided by planar nonlinear waveguiding structures containing arbitrary lossy materials. In this approach, the power-dependent complex propagation constants and the local electromagnetic field distributions, for both TE and TM waves, are obtained directly from the given lossy nonlinear waveguides. In particular, for the TM case, the biaxial nature of nonlinear refractive index is considered without any approximation. The power-dependent complex dispersion relations for TE and TM waves in a lossy nonlinear guiding system with a wide range of absorption coefficients are simulated and analyzed. It is shown that the complex dispersion relations, for both TE and TM waves, are strongly power dependent and, most importantly, the bistability phenomena will no longer exist if the absorptive loss is high enough.

Key words lossy nonlinear waveguide, finite element method.