

# 多量子阱光波导中非线性 TE 波的有限元解

赵安平 于荣金

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

**摘要** 本文提出一种以有限元法为基础的数值方法, 用于研究任意非线性介质的多量子阱(MQW)光波导中传输与强度有关的TE波性质。用简单的迭代过程得到自洽解。对于线性或非线性包层区的波导, 给出了与功率有关的TE模的数值结果。结果表明: 光的总功率在某一阈值以上时, 可以忽略非线性包层区对传播特性的影响。同时, 还考查了非克尔型介质与功率有关的行为。

**PACC:** 7865, 4280L, 4265, 0260

## 1 引言

由于 MQW 材料的一系列特点, 以及由这些材料制作的量子限制 Stark 效应调制器、自电光效应器件和光学双稳器件等具有十分优良的性能<sup>[1]</sup>, 因此 MQW 波导中与光强有关的导波及其器件, 引起人们的关注。一部分理论工作也就集中到多层结构的非线性导波研究。

最近, 文献已对这个问题引入了几种不同的处理方法: Cada 等人引用有效介质模型来描述 MQW 结构中的非线性导波<sup>[2]</sup>。Sakakibara 和 Okamoto 应用线性矩阵公式来研究由二个非线性层夹在三个线性介质层所构成的材料中 TE 非线性导波的性质<sup>[3]</sup>。Trutschel 等人发展了混合型线性/非线性矩阵公式来计算多层介质中的 TE 非线性导波, 其中混合的线性/非线性多层系统是夹在二个线性介质层之间<sup>[4]</sup>。虽然某些方法通过求解矩阵方程, 可得到精确解, 但它们只能应用于克尔型和折射率阶跃分布的非线性介质。而在现实中会经常遇到非克尔型和(或)任意折射率分布的非线性介质<sup>[5,6]</sup>, 因此, 要研究这类介质波导, 并需要发展适合于这类波导的数值方法。

以有限元法为基础的数值方法<sup>[7]</sup>, 在分析多层体系时, 对这类波导已提供了一个整体框架<sup>[6,8]</sup>。本文以有限元法为基础的数值方法, 对具有任意非线性介质(包括非克尔型)的 MQW 波导中 TE 非线性导波的模式传播特性进行分析。借助这种方法, 利用简单的迭代过程, 可得到自洽解。这种方法可计算任意混合型线性/非线性介质构成的 MQW 结构中场的分布和色散性质。

至今, 大多数与非线性多层体系模式分析有关的论文, 是针对线性包层区波导的。本文研究包层区可以是线性或非线性介质的 MQW 波导的数值结果。我们还研究了 MQW 中非克尔型介质的行为。

## 2 理论

本文考虑的 MQW 体系如图 1 所示。它由  $N+1$  个势阱和  $N$  个势垒所构成,  $t_a$  和

$t_b$  分别为势阱和势垒的厚度, 波导层的总厚度为  $T$ , 它上下被半无限的包层  $n_3'$  所束缚。对 TE 偏振光, 非线性介质的相对介电常数  $\epsilon_{i,x}'$  有如下关系

$$\begin{aligned}\epsilon_{i,x}' &= n_{i,x}^{1/2} = n_{i,x}^2 + a_i f(E_x), \\ a_i &= c_0 \epsilon_0 n_{i,x}^2 n_{2,i},\end{aligned}\quad (i=1,2,3, \text{MQW})$$

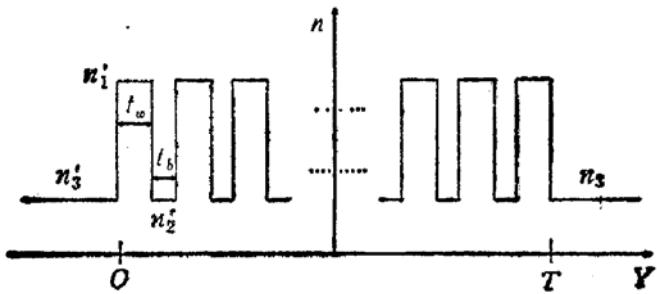


图 1 非线性 MQW 波导结构的折射率分布

式中,  $n_i$  代表每种介质的线性(低功率)折射率,  $n_{2,i}$  代表每种介质的非线性光学系数,  $c_0$  是光在真空中的速度 ( $c_0 = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ),  $\epsilon_0$  是真空介电常数 ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ),  $a_i$  是每种介质的非线性系数。当  $a_i > 0$  时, 是自聚焦非线性介质; 当  $a_i < 0$  时, 是自散焦非线性介质。 $f(E_x)$  是给定介质与局部场有关的函数:  $f(E_x) = |E_x|^s$ , 对于克尔型介质,  $s = 2$ 。本文不考虑吸收效应。

在这些波导中, TE 非线性导波模式满足下列波动方程:

$$\frac{d^2 E_x}{dy^2} + (k_0^2 n_x'^2 - \beta^2) E_x = 0, \quad (2)$$

式中  $k_0$  是真空中的波数,  $\beta$  是传播方向 ( $x$ ) 的传播常数。

把 MQW 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(2), 就可得到下列矩阵方程:

$$[k] \{E'_x\} = \beta^2 [M] \{E'_x\}, \quad (3)$$

式中,

$$[k] = \sum_e \left\{ \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right]_e \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right]_e^T - k_0^2 ([N]_e^T [n_x'^2]_e) [N]_e [N]_e^T \right\} dy$$

$$[M] = - \sum_e \{ [N]_e [N]_e^T \} dy$$

$$\{E'_x\} = \sum_e \{E'_x\}_e$$

$E'_x$  是每个节点算出的归一化电场,  $[N]_e$  是形状函数矢量,  $T$  代表矩阵的转置,  $\sum_e$  代表所有元素对整个矩阵的贡献。

方程(3)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  $\beta^2$  和  $\{E'_x\}$ 。线性问题的解提供  $\beta$  和  $\{E'_x\}$  的初值, 然后可自洽解。沿  $x$  轴每单位长度导波总

的光功率为

$$P = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} E_x H_y^* dy = \frac{c_0 \epsilon_0}{2} (\beta/k_0) \int_{-\infty}^{+\infty} |E_x|^2 dy, \quad (4)$$

式中  $E_x$  是每个节点的实际电场。实际电场和归一化电场 ( $E'_x$ ) 之间的关系为

$$|E_x| = \sqrt{\left(\frac{2P}{c_0 \epsilon_0}\right) (\beta/k_0)^{-1}} |E'_x|. \quad (5)$$

### 3 数值结果

我们以  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  MQW 体系为例。 $n_1^2 = 11.56$ ,  $n_2^2 = n_3^2 = 11.22$ , MQW 的非线性光学系数  $n_{2,\text{MQW}} = 2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{W}$ , 波导区的总厚度  $T = 610 \text{ nm}$ , 势阱与势垒的厚度相同 ( $t_w = t_b = t$ ), 势垒数  $N = 30$ ,  $t = 10 \text{ nm}$ , 波长为  $820 \text{ nm}$ 。

为了证明所用方法的有效性, 我们首先考查一下解对迭代次数的依赖关系。图 2 表示克尔介质 ( $s = 2$ )、线性包层区 ( $a_3 = 0$ ) 时, 波导中  $\text{TE}_0$  模有效折射率  $\beta/k_0$  的收敛性。从图 2 可以看出, 解对总光功率 ( $P$ ) 的任何值都收敛。

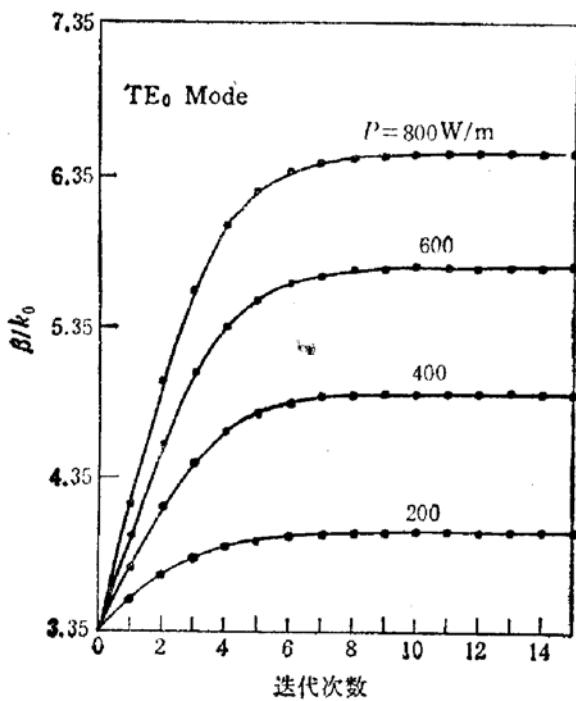


图 2 解(有效折射率)的收敛性

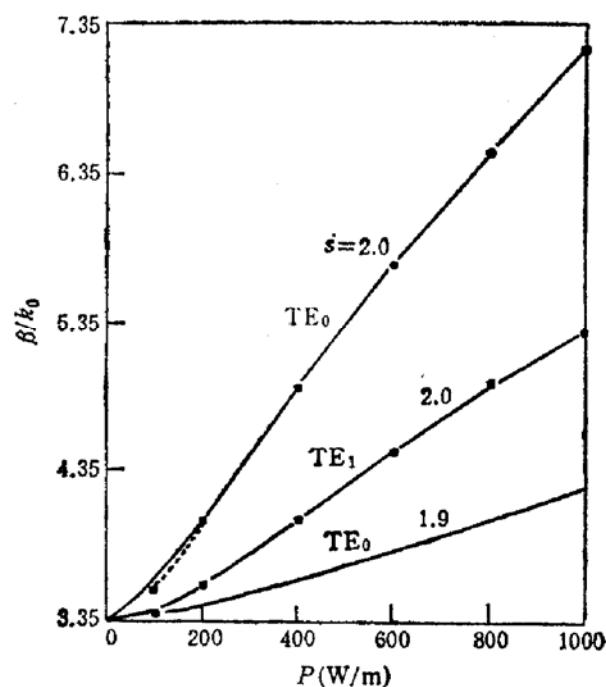


图 3 在 MQW 波导中, 有效折射率与总光功率的依赖关系 克尔型非线性相当于  $s = 2$ , 实线代表线性 ( $a_3 = 0$ ) 包层, 虚线代表非线性 ( $a_3 = a_{\text{MQW}}$ ) 包层区

图 3 表示在非线性 MQW 光波导中,  $\text{TE}_0$  模和  $\text{TE}_1$  模有效折射率 ( $\beta/k_0$ ) 对总光功率 ( $P$ ) 的依赖关系。实线和虚线分别代表线性 ( $a_3 = 0$ ) 和非线性 ( $a_3 = a_{\text{MQW}}$ ) 包层区的情况。考察这些结果可以发现: 在这些波导中, 非线性包层区对 TE 非线性导波传播特性的影响是很小的。如果总光功率在某一  $P_0$  值(约  $180 \text{ W/m}$ ) 以上, 这种影响可以忽略不计。对非克尔型介质 ( $s = 1.9$ ),  $\text{TE}_0$  模有效折射率  $\beta/k_0$  对总光功率的依

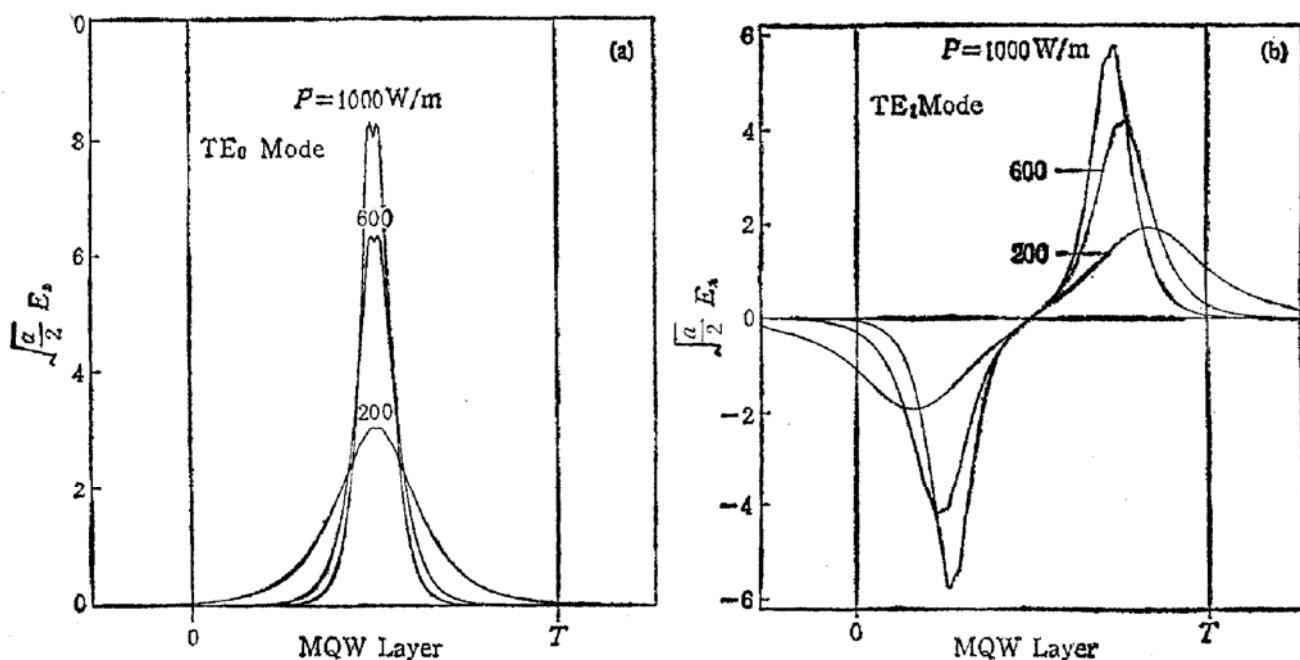


图 4 电场分布与总光功率的关系 (a)  $TE_0$  模, (b)  $TE_1$  模

赖关系也表示在图 3, 从图中可以看出,  $s$  的微小减少, 就显著改变 TE 非线性导波的特性。

非线性 MQW 波导一个吸引人的特征是场分布与功率有关。图 4(a) 和图 4(b) 分别表示  $TE_0$  模和  $TE_1$  模在这些波导 ( $s = 2, a_3 = 0$ ) 中电场分布与总光功率的依赖关系。从图 4 看出: 对  $TE_0$  模, 波导区中心 ( $y = 0.5T$ ) 的局部电场强度, 随总的光功率增加而出现小的凹陷; 而  $TE_1$  模局部电场强度的最大值, 随着总光功率的增加而增加, 并移向波导区中心。

#### 4 结论

本文提出了一种以有限元法为基础的数值方法, 用计算机模拟具有任意非线性介质(包括非克尔型介质)的 MQW 波导中 TE 非线性导波与功率有关的特性。在这些结构中, 对非线性导波的电场分布形式和色散特性给出了数值结果。我们考查了这些 MQW 波导中非线性包层区对非线性导波传播特性的影响, 这个问题以前文献并没有处理过。结果表明, 如果总光功率在某一水平以上, MQW 波导中非线性包层区对非线性导波特性的影响可以忽略。这个性质对设计 MQW 波导器件可能是很有用的。最后需要说明, 本文的方法可用于分析非线性 MQW 波导的不对称模式。

#### 参 考 文 献

- [1] D. S. Chemla, D. A. B. Miller and P. W. Smith. Opt. Eng., 1985, **24**: 556.
- [2] M. Cada, R. C. Gauhier, B. E. Paton and J. Chrostowski. Appl. Phys. Lett., 1986, **49**: 755.
- [3] T. Sakakibara and N. Okamoto. IEEE J. Quantum Electron., 1987, **QE-23**: 2084.
- [4] U. Trutschel, F. Lederer and M. Golz. IEEE J. Quantuin Electron., 1989, **QE-25**: 194.
- [5] G.I. Stegeman, et al. IEEE J. Quantum Electron., 1986, **QE-22**: 977.
- [6] B.L. Weiss and A.P. Zhao. IEEE Photonics Technology Lett., 1990, **2**: 801.

- [7] K.Hayata, M. Nagai and M. Koshiba. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1988. MTT-36:1207.  
[8] A.P. Zhao and S.R. Cvetkovic. Microwave and optical Technology Lett., 1991, 4:247.

## Finite-Element Solution of Nonlinear TE Waves in Multiple Quantum Well Waveguides

Zhao Anping and Yu Rongjin

(Changchun Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

### Abstract

This paper presents a numerical approach based on the finite element method for analysing intensity-dependent properties of TE waves guided by multiple quantum well (MQW) waveguides with arbitrary nonlinear media. Self-consistent solutions are obtained by a simple iterative procedure. The numerical results for TE power-dependent modes are presented for waveguides with either linear or nonlinear cladding regions. They reveal that, for values of total optical power above a certain threshold, the effect of nonlinear cladding regions on the propagation characteristics can be ignored. The power-dependent behaviour of a non-Kerr-like case is also examined.

**PACC:** 7865, 4280L, 4265, 0260