

# GaAs/AlGaAs 光学相控阵的优化分析

孙艳玲 陈敬业

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

**摘要** 对多层 GaAs/AlGaAs 波导光学相控阵进行了仿真和实验的对比分析。借助新型光子设计仿真软件, 利用有限元法和 2.5 维时域有限差分法(FDTD)法, 对器件分别进行了电学特性和光学特性模拟研究。在 p-i-n 器件结构下, 波导芯层存在的内建电场为  $2.53 \times 10^6$  V/m, 研究了此电场对总电场分布和光束输出特性的影响。给出了在 10 V 外加反向偏置电压下, 产生  $2\pi$  相移的光传输长度为 2416  $\mu\text{m}$ 。在单模光波导结构基础上, 考虑两波导芯层之间的耦合, 研究了芯包层折射率差对耦合长度的影响, 给出单模条件下器件合理的芯包层折射率差为 0.1。

**关键词** 光电子学; 光学相控阵; 有限元法; 2.5 维 FDTD 法

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s125001

## Analysis and Optimization of GaAs/AlGaAs Optical Phased Array

Sun Yanling Chen Jingye

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

**Abstract** The optical phased array consisting of multilevel GaAs/AlGaAs waveguides is analyzed in simulation and experiment. With the help of a novel photon design and simulation software, the finite element method and 2.5-dimensional finite-different time-domain (FDTD) are used to simulate the electrical and optical properties of the device respectively. The results indicate that the built-in electric field of the waveguide core has an influence on the total electric field and the property of emerging beam. The built-in electric field is up to  $2.53 \times 10^6$  V/m with the p-i-n structure. The phase modulation is up to  $2\pi$  with a reversed bias voltage ( $-10$  V) applied to the device with 2416  $\mu\text{m}$  long. Basing on single-mode structure, the coupling effect between adjacent cores is also taken into consideration. The influence of refractive index difference on the coupling length is also demonstrated and the proper effective index difference of 0.1 is given.

**Key words** optoelectronics; optical phased array; finite element method; 2.5-dimensional finite-different time-domain method

**OCIS codes** 250.7360; 230.7400; 160.2100; 260.1180; 230.4170

## 1 引 言

单个相位调制器可控制光波的相位, 光学相控阵技术则是利用多个相位调制器的阵列组合调制光信号, 在光束传输与控制领域有着相当重要的地位。20 世纪 80 年代末, 光学相控阵引发了研究的热潮, 多种材料、波导结构的相控阵相继出现。其控制光束偏转的特性可广泛应用于激光雷达、自由空间光通信、激光存储等多个领域。已经报道的光学相控阵有基于电光晶体材料如  $\text{LiNbO}_3$ <sup>[1]</sup>、 $\text{LiTaO}_3$ <sup>[2]</sup>, 但是这两种材料的线性电光系数较小, 因此所需驱动电压较大, 一定程度上限制了其发展。基于液晶的光学相控阵以其驱动电压较小、易于大面积阵列集成的优点吸引了人们的大量研究<sup>[3-5]</sup>, 但其主要缺点是扫描速度较慢(毫秒量级)。20 世纪 90 年代初, 出现了两种结构的 GaAs 光波导相位调制器阵列<sup>[6-7]</sup>。

本文研究的是基于 GaAs/AlGaAs 电光效应的光学相控阵。前期的研究已证明其能够实现光束的电控快速扫描<sup>[8-9]</sup>, 但由于制作工艺产生的器件电学和光学的非均匀性以及工作条件的非理想化, 导致出射光场

**收稿日期:** 2015-01-14; **收到修改稿日期:** 2015-03-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(11304240)

**作者简介:** 孙艳玲(1971—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光学相控阵、光电导开关技术等方面的研究。

E-mail: ylsun@mail.xidian.edu.cn

分布和光束实际偏转角度与理论值存在差异。在制作工艺误差不可避免的情况下,如何改进光束扫描特性,是当前需要重点解决的问题。本文针对此问题,研究了器件内建电场的存在对总电场分布和光束输出特性的影响,研究了波导间的耦合对光场分布的影响,结合实验对器件进行了仿真分析和优化,给出了更合理的器件结构参数和电压补偿条件。

## 2 基本原理

器件结构示意图如图 1 所示,在 GaAs 衬底上交替生长多层 GaAs/AlGaAs 平板光波导阵列结构。其中,芯层折射率高、损耗低作为光通道,低折射率的包层兼做电极层,对包层掺杂分别形成 p 型和 n 型半导体导电层。这样,每一波导周期构成 p-i-n 结构,相邻波导共用中间的电极层<sup>[8]</sup>。

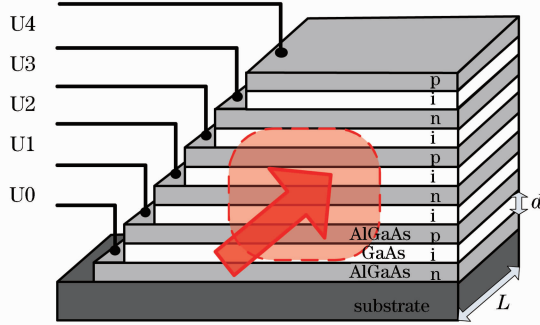


图 1 GaAs/AlGaAs 光学相控阵示意图

Fig. 1 Diagram of GaAs/AlGaAs optical phased array

对包层加电后使芯层偏置在一定的电场下,由于电光效应改变芯层的折射率,从而对各波导芯层中传输的光波进行相位调制。对各波导芯层外加不同的电压,由于各层相位变化不同,导致出射光束偏转,即形成光束扫描。各波导芯层的相位变化与外加电压的关系如下:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \frac{U}{d} L, \quad (1)$$

式中  $\Delta\varphi$  为电光相位延迟,  $\gamma_{41}$  为线性电光系数,  $U$  为外加电压,  $L$  为光传输方向的长度,  $d$  为波导芯层厚度。

## 3 实验与仿真结合优化

选用 Lumerical 公司的 DEVICE 和 MODE Solutions 对此光波导阵列器件进行了仿真和优化,结合软件各功能模块特点,分别研究器件的电学特性和光学特性。DEVICE 模块使用有限元算法求解漂移扩散方程得到器件的电学特性,即芯层内部电场(电压)信息;MODE Solutions 采用 2.5 维时域有限差分法(FDTD)算法模拟其光学特性,保证一定仿真精度的同时,一定程度上缩短器件结构开发周期<sup>[9]</sup>。

### 3.1 电学特性

GaAs 晶体的线性电光系数  $\gamma_{41}$  为  $1.1 \times 10^{-12}$  m/V, 芯片结构参数如下:  $L=5000 \mu\text{m}$ ,  $d=0.62 \mu\text{m}$ 。最高外加反向电压为 10 V。此外,包层 Al 组分为 0.15, 包层掺杂  $10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。

不考虑器件制作工艺误差的影响,认为各波导周期的结构相同,因此只取其中一个波导进行电学特性的仿真研究。无外加电压时,波导芯层内部电势和内建电场分布情况如图 2 所示。图 2(a)的该器件中芯层电势差为 1.57 V。图 2(b)表明,无外加电压时,波导芯层内部电场分布并非均匀且相对芯层中心向 n 型区偏移,电场最强处的大小为  $2.53 \times 10^6$  V/m。因此需要特别注意芯层电场为零和外加电压为零的区别,即外加电压为零并不代表芯层中电场为零。

根据此方法进一步得到外加反向偏置电压分别为 0、2、4、6、8、10V 时芯层中的电场强度,将其结果与理想值对比得到差值,如图 3 所示。在相同外加电压下,内部电场的仿真值与理想值的差值  $E_m$  接近常量  $2.53 \times 10^6$  V/m。可见,器件芯层电压的仿真值与理想值有所差别正是由于内建电场的存在。仿真过程中还发现,随着外加电压的增大,内建电压也增大。这是由于耗尽层的扩大造成的,但其增值较小,可忽略其变化。

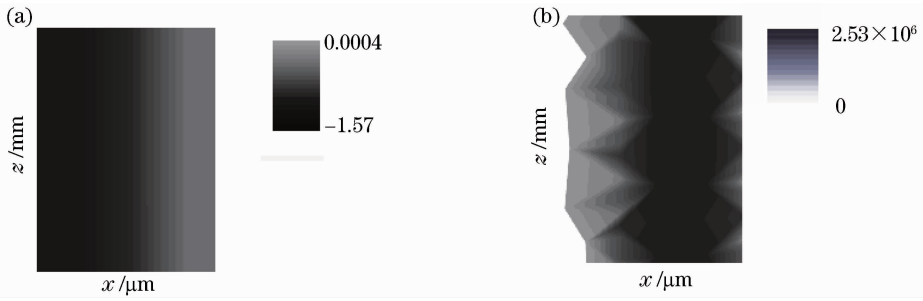


图 2 无外加电压时芯层内部的电场分布。(a) 内建电势;(b) 内建电场

Fig. 2 Electric field of the core without applied voltage. (a) Internal voltage; (b) built-in electric field

事实上,在实际中较难直接测出内建电场的准确值。但是,利用探针法可以较方便地测得光波导阵列每一单元的  $I-V$  特性曲线,如图 4 所示。从其开启电压相对零点有所偏移的现象,可以判断出每一波导周期 p-i-n 结构中的确存在内建电压,实际测得为 0.9 V 左右。欧姆接触势垒的影响和器件制作过程中工艺误差的存在导致仿真得到的内建电压与实际测量值有所差别。

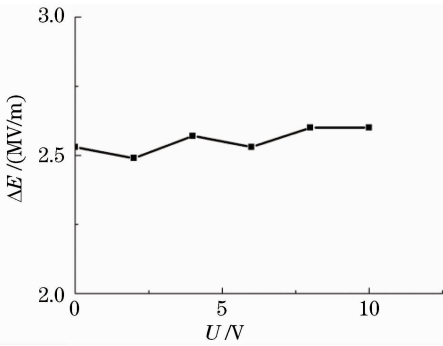


图 3 电场理想值与仿真值差值图

Fig. 3 Difference of the ideal electric field and simulated value

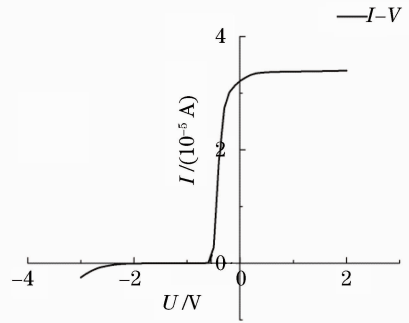


图 4 单周期波导的  $I-V$  特性曲线

Fig. 4  $I-V$  curve of a signal waveguide

电光效应调制原理的本质是电场的作用引起介质折射率的改变,而内建电场的存在会影响总的电场分布,导致实际中的光束偏转角度与理想值不符,因此精确控制光束扫描时必须考虑内建电场的影响。

其次,实际的芯层电场大小对设置器件的长度  $L$  也具有重要的指导意义。根据 (1) 式和仿真得到的芯层内部电场进行以下计算:令 (1) 式中的电场  $E_1 = U/d$ ,芯层内总电场强度  $E = E_{in} + E_1$ ,对于 GaAs 晶体,  $\gamma_{41} = 1.1 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。考虑到 pn 结的反向击穿电压,单周期波导所加最大电压为 10 V,此时芯层内部电场强度  $E = 1.86 \times 10^7 \text{ V/m}$ ,计算得到此时  $2\pi$  相移的器件光传输方向的长度  $L = 2416 \mu\text{m}$ 。

### 3.2 光学特性

对于器件光学特性的模拟,必须考虑单个波导对光场的限制作用和不同波导间的耦合作用。以下的研究建立在单模光波导( $\text{TE}_0$ 、 $\text{TM}_0$  模式简并)结构基础上<sup>[9]</sup>,考虑相邻波导之间的耦合。单周期光波导应选取单模临界条件,此情况下波导对光束限制相对较好。在不改变波导结构的条件下,这可以通过调节包层与芯层的折射率差实现。结合实际情况,芯层折射率取为 3.52,改变包层折射率(为保证单模,其值最小为 3.42),得到如图 5 所示的耦合长度与芯包层折射率差的关系曲线。

由图 5 可见,耦合长度与折射率差  $\Delta n$  成指数关系,若选取器件长度  $L = 5000 \mu\text{m}$ ,需使芯包层折射率差大于 0.1,以尽量减小在有限长光传播范围内波导耦合带来的相位影响。这可以通过增加包层材料的 Al 组分或掺杂等方式实现<sup>[10]</sup>。

另外,由于所研究的光波导阵列结构的特殊性,光束刚耦合进波导阵列时大部分光波会在包层中传输,需要考虑包层光的影响。光场随传输距离的变化情况如图 6 所示,其中,横轴代表光波导阵列中光场的相对位置,纵轴代表电场强度,四条曲线分别对应传输距离为 10、50、75、90  $\mu\text{m}$  时的光场分布情况。其中,传输距离为 75  $\mu\text{m}$  时光场分布与 90  $\mu\text{m}$  时几乎重合,这反映出光波场在阵列中传输距离达到 75  $\mu\text{m}$  之后便趋于稳定,即此距离之后光场就能被很好地限制在各芯层中传输。实际的器件光传输方向的长度较长,从而可以

忽略包层光的影响。

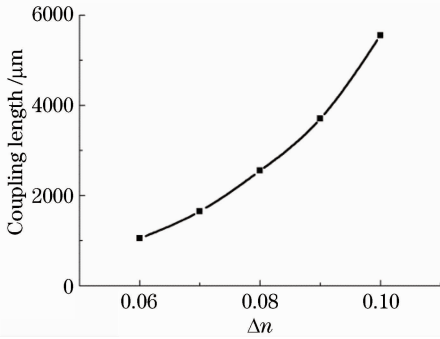


图 5 耦合长度与芯包层折射率差的关系

Fig. 5 Coupling length versus refractive index difference between core and cladding

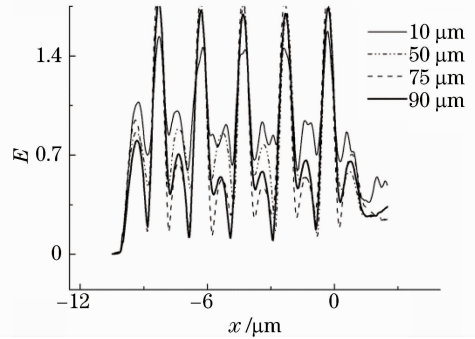


图 6 光场分布随传输距离变化的分布曲线

Fig. 6 Optical field distribution versus transmission distance

由以上分析可见,为减小波导间耦合对光场分布的影响,可通过减小耦合系数或者减小器件长度来实现,但是器件长度又影响着  $2\pi$  相移的实现。综合考虑这些因素后,在最高反向偏置电压 10 V 的条件下,选择器件长度为  $2500 \mu\text{m}$ ,其中初始  $80 \mu\text{m}$  左右可考虑对包层不进行掺杂,即对芯层不进行电调制,待光场稳定后再进行行波相位调制。这样可以极大地减小光传输方向器件的长度  $L$ ,并且远场光斑分布也会得到一定程度改善。

## 4 结 论

本文分析了 p-i-n 结构的光波导阵列的电学特性和光学特性,采用仿真和实验相结合的分析方法,增强了分析的可靠性。其中,器件仿真分析中使用有限元算法和 2.5 维 FDTD 法。在电学特性的分析中,主要指出了芯层中内建电场在进行光束扫描精确控制时必须加以考虑,且内建电场的存在一定程度上可以有助于减小器件长度。光学特性的分析中,综合考虑了相邻芯层光场的耦合和包层中光场的影响。其中,包层光场在较短的传输距离内便趋向于稳定,而相邻芯层间的耦合特性可以通过调节芯包层折射率差进行控制,进而达到优化芯层间耦合长度的目的,给出了合理的器件长度。研究结果为 GaAs/AlGaAs 光学相控阵的进一步优化制作提供了有意义的参考。

## 参 考 文 献

- 1 W Ronny Huang, Juan Montoya, Jan E Kinsky, *et al.*. High speed, high power one-dimensional beam steering from a 6-element optical phased array[J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 17311–17318.
- 2 R A Meyer. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. *Appl Opt*, 1972, 11(3): 613–616.
- 3 David Engström, Michael J O'Callaghan, Chris Walker, *et al.*. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(9): 1721–1726.
- 4 Xiangru Wang, Qinggui Tan, Ziqiang Huang, *et al.*. Liquid crystal optical phased array device with a fine steering precision of a few micro-radians[J]. *Opt Commun*, 2013, 313(2014): 360–364.
- 5 Zhou Yan. Wave-Front Phase Retrieval and Optimization Algorithm Study of Liquid Crystal Phased Array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 7–66.  
周 妍. 液晶相控阵波前相位恢复和优化算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 7–66.
- 6 F Vasey, F K Reinhart, R Houdré, *et al.*. Electrooptic AlGaAs spatial light deflector/modulator based on a grating phased array[J]. *Appl Phys Lett*, 1991, 58(25): 2874–2876.
- 7 D R Wight, J M Heaton, B T Hughes, *et al.*. Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology[J]. *Appl Phys Lett*, 1991, 59(8): 899–901.
- 8 Li Jiali. Study on Waveguide Optical Phased Array Technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2005: 20–44.  
李家立. 光波导光学相控阵技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005: 20–44.
- 9 Liang Huawei. Theory and Experiment Study on Waveguide Optical Phased Array Technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2007: 69–78.  
梁华伟. 光波导光学相控阵技术的理论和实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 69–78.
- 10 Sadao Adachi. GaAs, AlAs, and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ; material parameters for use in research and device applications[J]. *J Appl Phys*, 1985, 58(3): R1–R27.