文章编号:1001-5078(2013)04-0414-04 ·光电技术与系统·

垂直方向耦合光波导探测器超模匹配条件的实现

古燕西,余学才,肖 峻
(电子科技大学光电信息学院,四川 成都 610054)

摘 要:在光控相控阵雷达系统中,光电探测器起着重要的作用,缺乏大功率高速光电探测器是制约光控相控阵雷达实用的瓶颈。近年来提出的垂直方向耦合光波导探测器,在满足超模匹配条件下,能解决光电流分布不均匀的问题,从而实现大功率高速工作。本文在选定了垂直方向耦合器结构的基础上,根据 BeemProp 软件模拟仿真结果确定满足超模匹配条件的结构参数,然后进一步用有效折射率法验证了此结构参数仍满足超模匹配条件。所采用的方法为设计大功率高速光电探测器提供了参考。

关键词:光波导探测器;垂直方向耦合;超模匹配;有效折射率
中图分类号:TN252 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.04.014

Realization of super mode matching of vertical direction coupled waveguide detector

GU Yan-xi, YU Xue-cai, XIAO Jun
(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Photodetector plays an important role in the optical phased array radar. Lacking of high-power and high-speed optical detector is the bottleneck that restricts the practical application of the optical phased array radar. The direction coupled photo diode, that has been put forward recent years, can solve the problem of uneven distribution of photocurrent under the super mode matching condition. As a result, the new photodetector must be able to work at high-power and high-speed. In this paper, based on the structure of vertical direction coupled waveguide detector, we determine the structural parameters which meet the super mode matching condition by using the simulation results of Beemprop software. In addition, using the effective index method, we verify that the structural parameters still meets the super mode matching condition. The method used in this paper provides a reference for the design of high-power and high-speed photodetector.

Key words: waveguide diode; vertical directional coupling; super mode matching condition; effective index

1 引 言

光电探测器是宽带通信系统、无线通信系统和高频测量系统中不可少的器件之一[1],也是光接收机中的核心器件[2]。目前,它在军事上的应用也逐渐受到各国的广泛重视。作为光控相控阵雷达上的关键组件,在整个雷达系统中起着非常重要的作用,直接决定了输出微波信号的质量和雷达探测的最终效果[3]。

20世纪80年代以来,围绕光控相控阵雷达的关键技术,美欧军方的一些研究所和包括大学在内

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61177036)资助。
作者简介:古燕西(1988-),女,硕士研究生,主要从事光波导探测器的研究。E-mail:gyxi19880406@126.com
收稿日期:2012-09-12

的学术机构开展了大量研究。到现在为止,焦点难题集中在大功率高速光探测器上,缺乏大功率高速光探测器是制约光控相控阵雷达实用的瓶颈。为了提高雷达的分辨率,一般要求电磁波的波长短,频率高。大功率光探测器要求线性大动态范围,线性动态范围越大,能够容许的光的线性变化范围越大,就可以容许光放大器输出更多的光功率馈入到探测器,解调出来的微波功率(或微波光电流)就越大。

大功率高速光电二极管的研制,开始是在传统的 PIN 光电二极管结构上进行改进;20 世纪 90 年代末提出了波导光电二极管(waveguide diode,WD)方案;最近两年提出了方向耦合光电二极管(directional coupling photo diode,DCPD)方案,这将是今后研究的重点。方向耦合器在国外研究的比较多,而在国内还在起步阶段。日本最先开始研究单载流子 PIN 光探测器,目前 3 dB 带宽达到 310 GHz[1]。单个 PIN 探测器目前的最大输出微波功率约 200 ~ 300 mW。

2　垂直方向耦合探测器的超模匹配条件

方向耦合光电二极管的工作原理是:方向耦合波导探测器,必须满足一个称为超模匹配的条件才能实现大功率运转;要满足这样一个超模匹配条件,必须采用垂直方向耦合器。

垂直方向耦合光波导探测器结构如图 1 所示,通过反复调整上下波导和耦合层的厚度,改变其耦合长度和吸收长度。光电流在波导中的分布达到最佳均匀状态的条件是实现超模匹配:方向耦合器基超模和一阶超模的耦合长度等于基超模的吸收长度,也等于一阶超模的吸收长度[4],即:

$$L_c = L_0 = L_1 \tag{1}$$

式中,L_0 为基超模的吸收长度;L_1 为一阶超模的吸收长度;L_c 为耦合长度。

$$L_c = \frac{\pi}{\mathrm{Re}(\beta_0 - \beta_1)} = \frac{\lambda}{2\mathrm{Re}(n_{\mathrm{eff},0} - n_{\mathrm{eff},1})} \tag{2}$$

$$L_0 = \frac{1}{2\mathrm{Im}(\beta_0)} = \frac{\lambda}{4\pi\mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff},0})} \tag{3}$$

$$L_1 = \frac{1}{2\mathrm{Im}(\beta_1)} = \frac{\lambda}{4\pi\mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff},1})} \tag{4}$$

式中,β 为传播模式的传播常数;λ 为光波长;n_{eff} 为该模式的有效折射率。

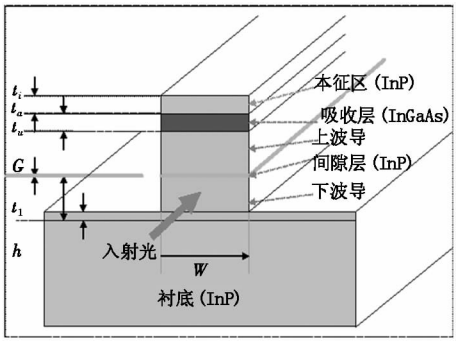

图 1　垂直方向耦合光波导探测器结构图

Fig. 1　the structrue of vertical directional coupling waveguide detector

实际上,光电流分布对超模匹配条件不是非常敏感,只要基超模的吸收长度和一阶超模的吸收长度以及耦合长度之间的差不超过 30%,光电流分布不会有很明显的差别,但当差别很大例如有 1 ~ 2 倍的差别时,光电流分布才会明显不均匀。

3　数值模拟仿真

运用 BeamPROP 软件进行数值模拟仿真,它可以模拟仿真任何波导结构中场的分布情况以及模式的分布,其核心方法为时域有限差分法,同时在计算过程中也加入了一些限制条件。利用该软件确定垂直方向耦合器的结构参数,其基本过程为:建立波导结构,改变各个参数,仿真观察波导中光功率的变化情况,检测是否满足模式匹配条件,确定结构参数。

垂直方向耦合光波导探测器结构折射率分布如图 2 所示,各膜层材料如表 1 所示,工作波长为 1.55 μm,通过反复调整上、下波导及间隙层的厚度,来改变垂直方向耦合光波导探测器的吸收长度和耦合长度,使其满足超模匹配条件。经过一系列的仿真后,最终我们确定结构参数,波导仿真结果如图 3 所示。

表 1　垂直方向耦合光波导探测器模层结构

Tab. 1　the layer structrue of vertical directional coupling waveguide detector

膜层名称	本征层	吸收层	上波导	间隙层	下波导	覆盖层	衬底
材料	InP	InGaAs	InGaAsP	InP	InGaAsP	InGaAsP	InP
厚度/μm	1	0.3	4.6	0.045	4.4	0.5	10 ~ 20

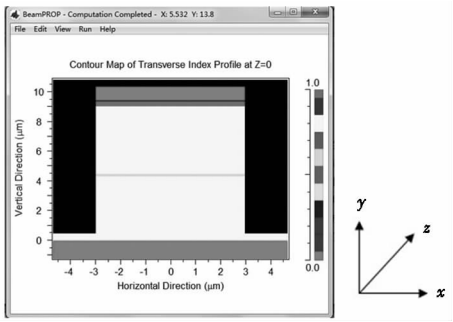

图 2 横截面折射率分布图

Fig. 2 figure of cross-sectional refractive index profile

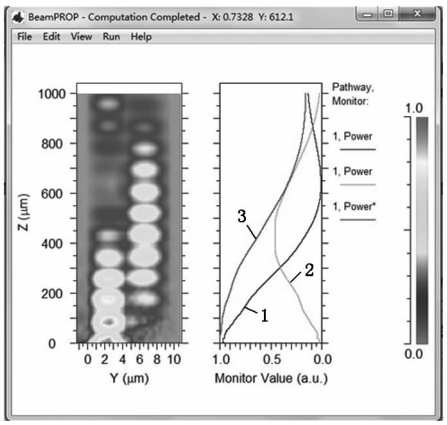

图 3 仿真结果图

Fig. 3 figure of simulation results

在图 3 仿真结果图中,左图代表方向耦合器内部光场分布沿 z 方向的变化,右图则为光功率的变化图,在图中,1 号线代表下波导中光功率的变化,2 号线代表上波导中光功率的变化,3 号线代表方向耦合器中总光功率的变化。由图中可以看出,光功率随着 z 的变化,下波导的能量逐渐耦合到上波导,并被吸收层吸收。由图可以得知,在 550 μm 左右的位置处,上波导光功率达到最大,下波导光功率最小,则其耦合长度在 550 μm 左右的位置处。从总功率曲线可计算出 650 μm 左右的位置处即为该方向耦合器的吸收长度。在给出该方向耦合器的耦合长度和吸收长度后,对比得到,由于耦合长度和吸收长度的差值不超过 30%,可以认为该结构满足超模匹配条件。

4 有效折射率法验证超模匹配条件

有效折射率法是以马卡提里近似为基础,但更为实用也更为精确的一种近似分析。这种分析仅适用于远离截止的模式。分析脊波导时,要先将其等效成 y 方向的平板波导,求出中心波导及两侧波导的有效折射率;然后在等效成 x 方向的平板波导,最终求出整个脊波导的有效折射率[5]。

下面通过有效折射率法来验证所得的结构参数是否满足超模匹配条件。编程求解有效折射率 n_e,在求解特征方程时,由于数据量太大,且方程的根很灵敏,因此无法直接搜索。故采用试探法进行求解,方法是:确定试探值,通过不断改变试探值的实部和虚部,寻找使特征方程最接近零的根,这个根便是我们要求得的有效折射率。具体过程如图 4 所示。

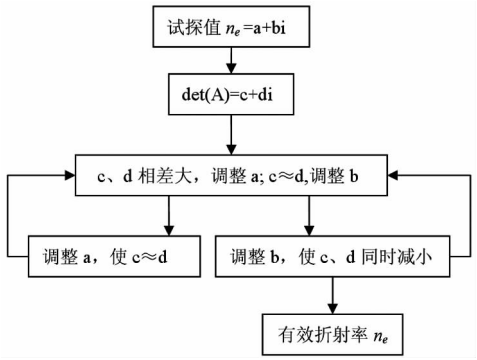

图 4 试探法框图

Fig. 4 flow chart of heuristics

大量运算后,得到中心波导层的零阶超模和一阶超模的有效折射率为:

$$n_{e,0} = 3.4875873552859 - 0.0001745950734\ \mathrm{i}$$

$$n_{e,1} = 3.4861267668879 - 0.0002718873186\ \mathrm{i}$$

同样的方法求得两侧波导零阶模的有效折射率为:$n_{ec,0} = 3.347664$。在这里由于覆盖层厚度太薄,导致一阶模截止。

垂直方向耦合器的零阶超模和一阶超模分别对应的等效波导的基模的有效折射率为:

$$n_{\mathrm{eff},0} = 3.485552282 - 0.000224538\mathrm{i}$$

$$n_{\mathrm{eff},1} = 3.484092543 - 0.000271678\mathrm{i}$$

将 $n_{\mathrm{eff},0}$,$n_{\mathrm{eff},1}$ 代入式(2)~式(4),得到垂直方向耦合器的耦合长度为 530.9168 μm,零阶超模的吸收长度为 549.3283 μm,一阶超模的吸收长度为 454.0120 μm。

以上结果所示,垂直方向耦合器的耦合长度、零阶超模的吸收长度和一阶超模的吸收长度不相等,但其差别在允许范围之内,近似满足我们的超模匹配条件。

5 结 论

在选定的垂直方向耦合光探测器结构的基础上,通过 BeamProp 软件对垂直方向耦合光探测器进行仿真,使其结构参数满足超模匹配条件,从而确定了垂直方向耦合光探测器的结构参数。并采用有效折射率法进行验证,垂直方向耦合光波导探测器的耦合长度、零阶超模的吸收长度和一阶超模的吸收长度差值不超过 30%,近似满足超模匹配条件。同

时,在此结构中,吸收层较薄,载流子能够很快的通过,渡越时间短,响应快,故能够满足大功率高速运转的条件。本文所采用的方法为设计大功率高速光电探测器提供了参考。

参考文献:

[1] Hiroshi Ito, Satoshi Kodama. High-speed and high-output InP-InGaAs unitraveling-carrier photodiodes [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(4): 709 – 724.

[2] Kazutoshi Kato. Ultrawide-band/high-frequency photodetectors[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1999, 47(7): 1265 – 1281.

[3] Jianchuan Guo, Yuhua Zuo, Qiming Wang. Progress in high-speed and lagre saturation photocurrent of 1.55 μm photodetector and its application in optical phased array radar[J]. China Integrated Circuit, 2008, 112: 19 – 26.

[4] Xuecai Yu. Waveguide design considerations for a high power and fast speed directional coupling photo diode [C]. The 5th SPIE International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, Dalian, 2010: 5 – 0288.

[5] Zhuangqi Cao. Guided wave optics[M]. Beijing: Science Press, 2007: 121 – 125. (in Chinese)
曹庄琪. 导波光学[M]. 北京:科学出版社, 2007: 121 – 125.

[6] Xin Wang, Ning Duan, Hao Chen, et al. InGaAs-InP photodiodes with high responsivity and high saturation power [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(16): 1272 – 1274.

[7] S M Madison, J J Plant, D C Oakley, et al. Slab-coupled optrical waveguide photodiodes[J]. OSA/CLEO/OLES, 2008.

[8] Shigetaka Itakura, et al. High currunt backside-illumilated photodiode array modulae for optical analog link[J]. J. Lightwave Technology, 2010, 28(6): 965 – 970.

[9] Xiao Weili. High speed and high saturation current partially depleted absorber photodiode[D]. Austin: University of Texas, 2004.

[10] Xiaowei Li, Ning Li, Xiaoguang Zheng, et al. High-saturation-current InP-InGaAs photodiode with partially depleted absorber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1276 – 1278.

[11] Hua Yang, Chris Daunt, Kohsin Lee, et al. High-speed and high-power InGaAs/InP photodiode [C]. Berlin: 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2011: 1 – 4.

[12] Hao Jiang, K L Yu. Waveguide integrated photodiode for analog fiber-optics links[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48 (12): 2604 – 2610.

[13] H Jiang, P K L Yu. Waveguide integrated photodiode for analog fiber optics link[J]. IEEE Mirowave Theo. Tech., 2000, 48(12): 2604 – 2610.

[14] Serge Jasmin, Nakita Vodjdani, Jean Chyarles, et al. Diluted and distributed absorption microwave waveguide photodiodes for high efficiency and high power[J]. IEEE, Tran. on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45 (8): 1337 – 1341.