

doi: 10.3788/gzxb20164501.0104003

二极管组高性能光电探测器阵列的设计

柯昂¹, 文化锋¹, 龙丹桂¹, 刘春¹, 李健¹, LI Ying-feng²

(1 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

(2 Atech System, 6110W, Highway 290, Austin, TX 78735, USA)

摘要:针对行波光电探测器阵列仅提高了光电探测器的输出功率而输出带宽未得到改善的特点,提出了一种由光电二极管组构成的高性能行波光电探测器阵列新结构.即把两个光电二极管级联后再将两个级联支路并联,然后在光电二极管组上串联电容构成单个阵列单元,再按照阵列式结构将这些阵列单元用电感连接起来构成新型行波光电探测器阵列.对比分析了行波光电探测器阵列新旧结构的功率合成、频率响应和回波损耗特性.在应用同等数量二极管的条件下,新型行波光电探测器阵列输出功率减少了一半,但工作带宽提高了一倍.此外,回波损耗随着阵列中应用二极管数目的增加相对于原阵列而言改善得更加明显.研究表明,本文提出的行波光电探测器阵列新结构能够在增加输出功率的同时提高工作带宽,更好地满足未来光载无线通信对光电探测器高功率宽带宽的需求.

关键词:电子电路;光载无线通信;行波探测器阵列;功率合成器件;光纤;光电二极管;频率响应;微带线
中图分类号: TN29; O453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2016)01-0104003-7

Design of High-performance Diode Groups Traveling-wave Photodiode Arrays

KE Ang¹, WEN Hua-feng¹, LONG Dan-gui¹, LIU Chun¹, LI Jian¹, LI Ying-feng²

(1 College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(2 Atech Systems, 6110W, Highway290, Austin, TX78735, USA)

Abstract: Traveling-wave photodiode arrays can combine the output power of the diodes without increasing the bandwidth. To deal with such problem, a kind of high-performance diode groups traveling-wave photodiode arrays structure was proposed. Firstly, two-element near-ballistic uni-traveling-carrier photodiodes were cascaded, and then parallel these two cascaded branches. After that, we have a capacitor in series on these diode groups to form array units. Then these array units were cascaded and connected with inductors based on traveling-wave detector arrays to constitute new traveling-wave photodiode arrays. The power synthesis, frequency response and return loss of traveling-wave photodiode arrays were analyzed and compared. Under the condition of applying the same amount of diode, the output power of the new traveling-wave photodiode arrays is halved and its cut-off frequency is doubled. In addition, compared to traditional structure, the return loss improves more obviously with the number of diodes in arrays increasing. The results show that this new traveling-wave photodiode arrays structure can increase the output power while improve the working bandwidth, better meet the requirements of high-power and high-bandwidth photodetector in future radio-over-fiber wireless communication.

Key words: Electronic circuit; Radio-over-fiber; Traveling-wave photodiode arrays; Power combiner; Fiber; Photodiodes; Frequency response; Microstrip lines

OCIS Codes: 040.5160; 230.0040; 230.7020; 230.5170; 230.5160

基金项目:国家自然科学基金(No. 61371061)和浙江省自然科学基金(No. LY12F01010)资助

第一作者:柯昂(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为光载无线通信. Email:863259871@qq.com

导师(通讯作者):文化锋(1963-),男,副教授,博士,主要研究方向为光载无线通信. Email:wenhuaifeng@nbu.edu.cn

收稿日期:2015-08-27;录用日期:2015-10-30

0 引言

光载无线通信(Radio-Over-Fiber, ROF)技术是应高速大容量无线通信需求,将光纤通信和无线通信结合起来的无线接入技术.光电探测器作为光载无线通信技术的关键器件,一直是科研人员关注和研究的热点^[1-3].随着人们对通信容量增长的需求与日俱增,迫切需要高功率、宽带宽、高响应速度的光电探测器^[4-6].行波光电探测器阵列(Traveling-Wave Photodiode Arrays, TWDA)的出现为获得高性能光电器件开辟了新的研究方向^[7]. Charles L. Goldsmith 等人提出的 TWDA 毫米波功率合成结构^[8-10],是将光电二极管嵌入到人工传输线里,用匹配时延的延时光馈入网络连接光电二极管,在负载上得到合成的光电流信号. J. W. Shi, F. M. Kuo, 和 M. Z. Chou 等人提出的线性级联近弹道单行载流子光电二极管^[11-13]功率合成理论,成功地实现了高带宽和高饱和电流带宽积(Saturation-Current Bandwidth Product, SCBP)^[14-16].

本文提出了一种光电二极管组构成的 TWDA 新结构,并进行了理论分析与模拟验证,结果表明所提出的新型 TWDA 结构,能够在合成多个光电二极管输出功率的同时提高工作带宽,并且很好地改善电路匹配性^[17-19].

1 TWDA 结构分析

常见光电探测器的内部电路由单个光电二极管和一个阻抗匹配系统构成.典型的单个探测器电路通常连接 50Ω 的终端匹配电阻,该电阻与探测负载电路阻抗匹配,同时起到防止探测器负载开路时阻抗失配造成探测器电路传输响应起伏过大而损坏探测器的作用,其电路原理如图 1. 阻抗匹配时,光电二极管输出电流分流,此时负载输出电流只有光电二极管输出信号电流的一半.

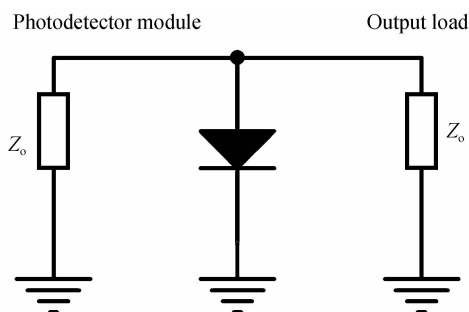


图 1 单个光电二极管阻抗匹配原理

Fig. 1 Schematic diagram of single photodiode using impedance-matched

N 个探测器并联构成行波光电探测器阵列即 N 元 TWDA,此时会导致结电容为单个光电探测器电容的 N 倍,其带宽也将减少 N 倍,为了解决这个问题,借

鉴微波分布式放大器的设计理念,使探测器通过电感相连,每个光电二极管电容不致相加.

应用这种结构,单个 RF 光电流在输出端合成时会有时间延迟,妨碍电流同相位合成.因此,给这些光电二极管使用适当延迟的光馈入网络,使加在二极管上的光延时与探测器间的电延时相等,每个光电二极管输出 RF 光电流同相位合成,获得相对单一探测器网络 N 倍的总电流,实现输出功率合成,整个阵列原理如图 2.

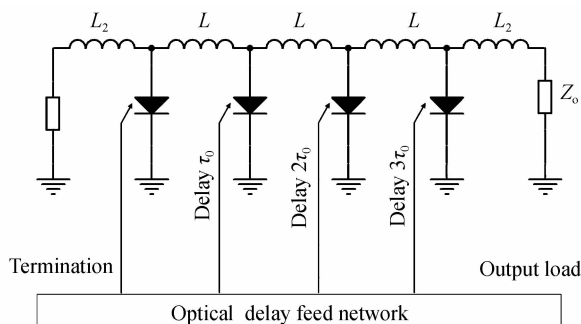


图 2 行波光电探测器阵列原理

Fig. 2 Schematic diagram of traveling-wave photodetector array

分析其电路结构,这种探测器阵列的每一个基本单元都是由两个电感和探测器的结电容构成,这种结构构成了一个定 K 型低通滤波器. N 元 TWDA 即 N 个定 K 型低通滤波器级联,构成了一个阶梯网络,这与传输线的集总参量十分相似.这种人工传输线的特征阻抗由电感与电容之比给出,即

$$Z_a = \sqrt{L/C_d} \quad (1)$$

式中, L 是每个滤波器串联部分的总电感, C_d 是光电二极管的结电容,这种网络的截止频率为

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{LC_d}} \quad (2)$$

单个 RF 光电流被定 K 型低通滤波器时间延迟而不能实现合成,电延时为

$$\tau_c \approx \sqrt{LC_d} \quad (3)$$

当输入光功率为 P_0 时,它被分成 N 路输出,则加在每个光电二极管上的光功率为 P_0/N ,光延时为 τ_0 ,每个光电二极管的光电转换效率为 R ,其中一半流向输出端,输出端的电流 I_n 为

$$I_n = e^{j(n-1)\omega\tau_c} \cdot \frac{RP_0}{2N} \cdot e^{j(N-n)\omega\tau_c} \quad (4)$$

式中, ω 是毫米波信号角频率, τ_c 是相邻光电二极管之间的电延时,等式右边第一项是光信号对光电探测器的延时,第二项是光电流的大小,第三项是光电二极管到负载的光电流时延.所有光电二极管在负载上的总电流为

$$I_0 = \sum_{n=1}^N I_n = \sum_{n=1}^N [e^{j(n-1)\omega\tau_c} \cdot \frac{RP_0}{2N} \cdot e^{j(N-n)\omega\tau_c}] \quad (5)$$

通过控制相邻馈光光纤的长度实现光延时等于相邻光电二极管输出光电流的电延时,实现光电二极管射频光电流在负载上的同相位合成,即

$$\tau_0 = \tau_c = \tau \quad (6)$$

使得

$$I_0 = \sum_N I_n = \frac{RP_0}{2} \cdot e^{j(N-1)\omega\tau} \quad (7)$$

即通过阵列结构,在负载上获得了 N 倍于单个光电二极管的光电流。

2 电路设计

SCBP 是衡量高功率光电二极管在光载无线通信系统应用中的重要参量. 为获得极高的 SCBP, J. W. Shi 等人提出了的线性级联光电二极管结构原理如图 3.

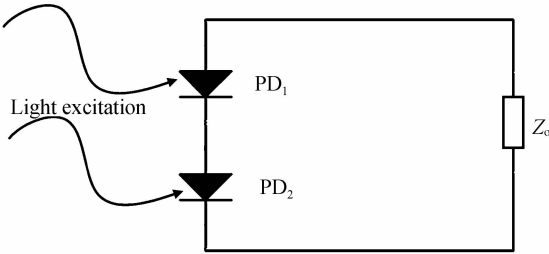


图 3 线性级联二极管原理

Fig. 3 Schematic diagram of linear cascade NBUTC-PDs

这种结构由两个串行连接的光电二极管构成,根据串联的光电二极管的数目会导致总的结电容值相应地减少,从而来提高工作带宽. 在工作过程中,分配给这两个装置的光功率必须保持相同以获得最大响应.

本文将这种方法的优点应用到传统 TWDA 结构中,提出了一种由光电二极管组构成的探测器阵列单元,其原理如图 4.

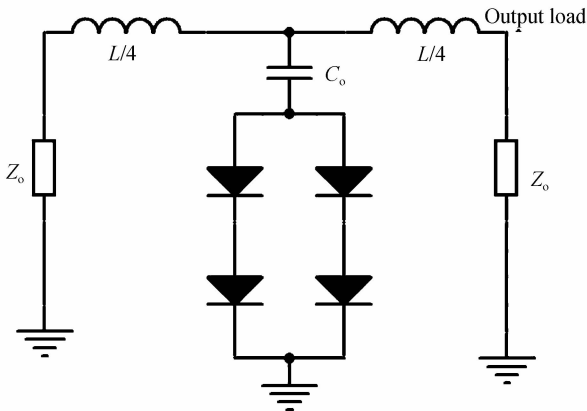


图 4 光电二极管组探测器原理

Fig. 4 Schematic diagram of photodetector which consist of photodiode groups

先将两个光电二极管线性级联,再将两个级联支路并联,然后在光电二极管组上串联一个与光电二极管结电容值相等的电容 C_0 来构成探测器阵列单元,这

样总的结电容只有单个光电二极管结电容的一半. 最后,将多个这种探测器阵列单元应用到阵列式结构中,构成一种新型 TWDA 结构. 与光路匹配后的电路原理如图 5.

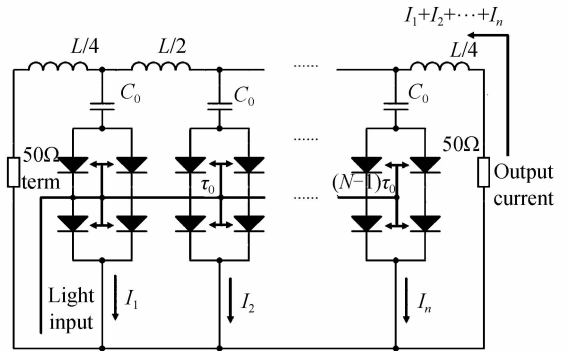


图 5 4N 元新型行波光探测器原理图

Fig. 5 Schematic diagram of 4N-element novel TWDA

此时取连接电感为图 2 中的一半,则人工传输线的特征阻抗为

$$Z_a = \sqrt{\frac{L/2}{C_d/2}} = \sqrt{\frac{L}{C_d}} \quad (8)$$

与式(1)相同,为实现阻抗匹配, $Z_a = Z_0 = 50 \Omega$

这种结构的截止频率为

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{L/2 \cdot C_d/2}} = \frac{2}{\pi \sqrt{LC_d}} \quad (9)$$

因此,它的截止频率比图 1 中的提高了 2 倍,也就是工作带宽增大了 2 倍.

3 对比分析

对本文 TWDA 结构进行深入研究,分别从结构和性能方面对两种行波光探测器阵列进行对比.

3.1 结构对比

图 4 为一组行波光二极管组构成的探测器,它相对于图 2 中传统四元光电探测器阵列而言,完全不需要复杂精准的延时网络,且减少了 3 个等效电感元件的使用. 该 TWDA 结构相比同等数量二极管的传统结构减少了 3 个电感器件的使用,精简了电路结构也减少了整个电路损耗. 该 TWDA 中的阵列单元由 4 个光电二极管组成,因此对于更多元的 TWDA,

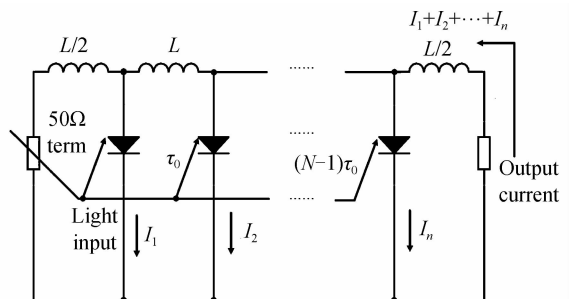


图 6 4N 元传统行波光探测器原理

Fig. 6 Schematic diagram of traditional 4N-element TWDA

选取 4N 元来进行对比分析。4N 元传统 TWDA 与光路匹配后电路原理如图 6。

同等情况下的 4N 元 TWDA, 采用传统结构需要 4N+1 个等效电感, 而应用该 TWDA 结构, 只需要 N+1 个等效电感即可完成设计。虽然增加了 N 个电容元件但能减少 3N 个电感元件的使用, 同时缩短了传输线的长度, 精简了电路结构。

3.2 性能对比

根据两种 TWDA 原理图, 在 EDA 平台上设计探测器阵列电路, 仿真分析同等数量光电二极管构成的阵列。即将四元传统 TWDA 与单个本文 TWDA 的阵列单元构成的探测器从性能上对比分析, 验证本文 TWDA 的新特性。选用 NBUTC-PD 作为 TWDA 结构的光电探测器, 取其结电容为 0.2 pF。设定单个光电二极管输出电流幅值为 100 mA。由式(3)、(8)分别计算出电感值 L 和电延时 τ_e 为

$$L = Z_a^2 \cdot C_d = 50^2 \times 0.2 = 500 \text{ pH};$$

$$\tau_e \approx \sqrt{LC_d} = \sqrt{500 \times 0.2} = 10 \text{ ps};$$

到 EDA 平台上进行仿真, 首先观察分析比较关心的功率合成特性, 仿真结果如图 7。

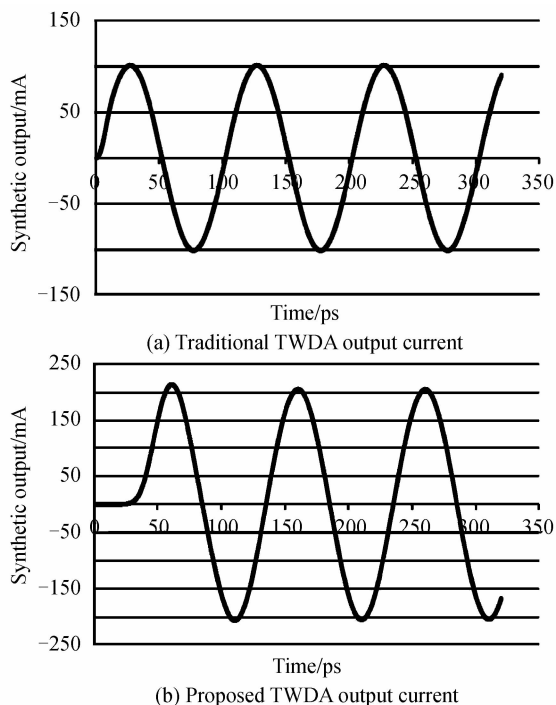


图 7 四元 TWDA 电路模型负载支路信号波形
Fig. 7 Waveform schematic diagram of traditional four-element detector TWDA

图 7(a) 表示所设计的 TWDA 负载支路上的信号波形图, (b) 表示原 TWDA 负载支路上的信号波形图。仿真实验表明: 两种行波探测器阵列结构均能将信号进行合成。由幅度可知, 本文 TWDA 的输出电流只有传统结构的一半, 说明本文结构带宽增加了, 但合成功率有所下降。

比较这两种阵列的频率响应及回波损耗, 其仿真结果如图 8 和图 9。

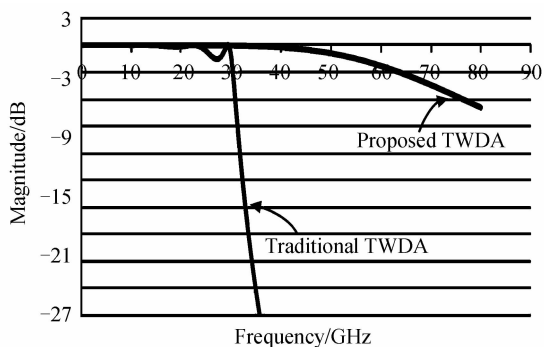


图 8 四元 TWDA 频率响应
Fig. 8 Frequency response of four-element TWDA

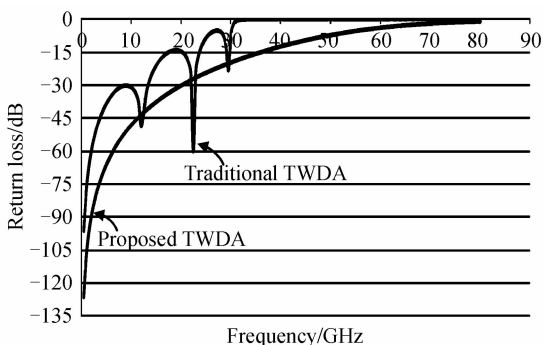
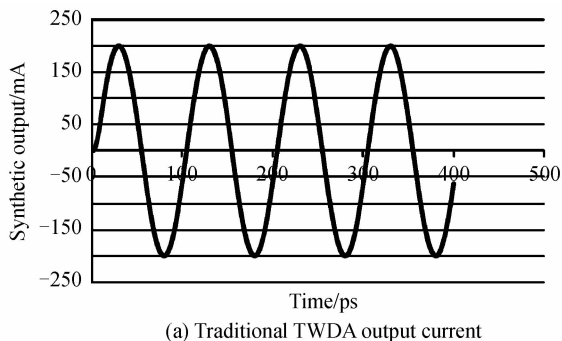


图 9 四元 TWDA 回波损耗
Fig. 9 Return loss of four-element TWDA

图 8 表示新旧四元 TWDA 的频率响应曲线对比图, 图 9 表示新旧四元 TWDA 的回波损耗曲线对比图。从图中可以看出, 本文 TWDA 的 3 dB 带宽得到了显著提高达到了 60 GHz, 而原探测器阵列仅为 31 GHz, 这与式(9)计算的结果一致。而从回波损耗图中可以看出, 其 -15 dB 带宽达到了 36 GHz, 而传统结构的 -15 dB 带宽仅为 19 GHz, 相比原探测器阵列也得到了显著提高, 说明电路的匹配性得到了很好的改善。

以上是 4 元 TWDA 的对比分析, 对于更多元即 4N 元的 TWDA, 继续从性能上展开对比分析。以 8 元 TWDA 为例, 其功率合成仿真结果如图 10。

图 10(a) 表示所设计的 TWDA 负载之路上的信号波形图, (b) 表示原来 TWDA 负载支路上的信号波形图。仿真结果表明: 两种行波探测器阵列结构均能将功



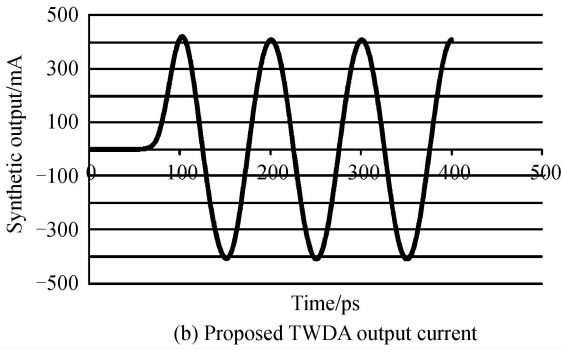


图 10 八元 TWDA 输出电流波形

Fig. 10 Output current waveform schematic of eight-element TWDA

率进行合成,本文提出的 TWDA 是以功率下降为代价得到带宽的提高.若要增大整个网络的输出功率,可以通过增加阵列单元的数量来实现,即达到输出功率和输出带宽同时增加的目的.

比较这两种阵列的频率响应及回波损耗,其仿真结果分别如图 11 和图 12.

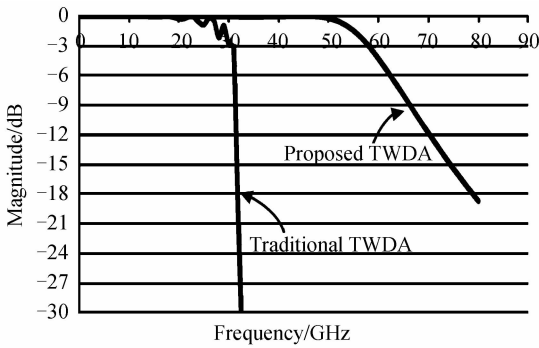


图 11 八元 TWDA 频率响应

Fig. 11 Frequency response of eight-element detector TWDA

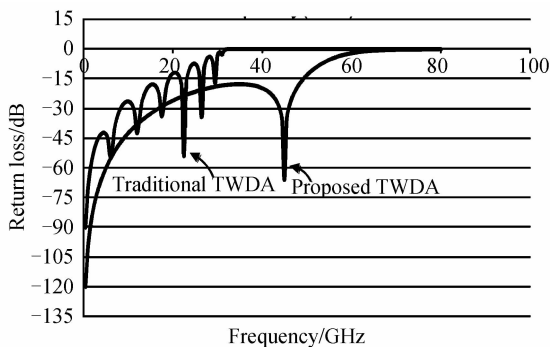


图 12 八元 TWDA 回波损耗

Fig. 12 Return loss of eight-element detector TWDA

图 11 表示新旧 8 元行波光探测器阵列的频率响应曲线对比图,图 12 表示新旧 8 元行波光探测器的回波损耗曲线对比图.从图中可以看出,随着光电探测器数目的增加,原 TWDA 的 3 dB 带宽维持在 30 GHz 附近,本文提出的 TWDA 的 3 dB 带宽则达到了约 59 GHz,与原探测器阵列相比得到了显著提高.而从回波损耗图中可以看出,其 -15 dB 带宽达到了

48 GHz,优势更为明显,说明随着阵列中应用光电二极管数目的增加,本文提出的 TWDA 电路的匹配性相对于原阵列而言会更好.

4 电路实现研究

在研究电路实现时,由式(3)计算出电感值非常小.电路在高频工作时,小电感一般用很短长度的高阻抗微带线来实现.假设高阻抗微带线的特性阻抗为 Z_L ,有效传播指数为 n_L ,长度为 d_L .那么根据 A 参量矩阵,这段高阻抗微带线可以等效成一个 π 型电路,如图 13.

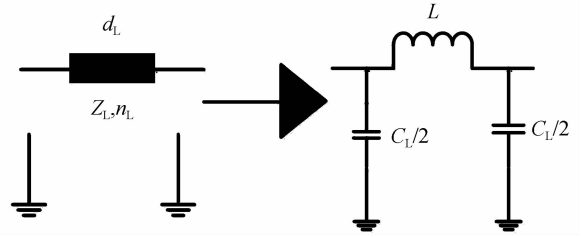
图 13 π 型等效电路

Fig. 13 Pi-Equivalent Circuit

等效电路中的电感和电容值由式(10)和(11)确定.

$$L = \frac{Z_L}{2\pi f} \sin \left[\frac{2\pi f n_L d_L}{c} \right] \sim \frac{Z_L n_L d_L}{c} \quad (10)$$

$$C = \frac{1}{\pi f Z_L} \tan \frac{\pi f n_L d_L}{c} \sim \frac{d_L n_L}{Z_L c} \quad (11)$$

式(10)和(11)中 c 是真空中光速,将这段微带线替换图 4 中所设计的光电二极管组探测器中应用电感,微带线的电容与电感和光电二极管组的结电容以及串联电容的等效电路如图 14.

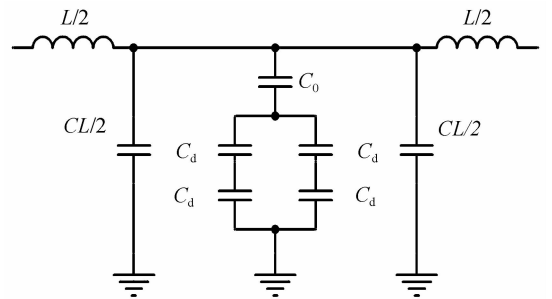


图 14 微带线替换后的等效电路

Fig. 14 Equivalent Circuit after using microstrip line replacement

图中 C_d 为光电二极管的结电容,按照设计参量 $C_d = C_0$,故此时其特性阻抗为

$$Z_a = \sqrt{\frac{L}{C_L + C_0/2}} = \frac{Z_L}{\sqrt{1 + \frac{c Z_L C_0}{2 d_L n_L}}} \quad (12)$$

传播指数为

$$n_a = \frac{c \sqrt{L(C_0/2 + C_L)}}{d_L} = \left[\frac{Z_L^2}{Z_0^2} - 1 \right].$$

$$\frac{2n_L^2}{cZ_L C_0} \sqrt{1 + \frac{cZ_L C_0}{2d_L n_L}} \quad (13)$$

截止频率为

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{L \left(\frac{C_0}{2} + C_L \right)}} = \frac{c}{\pi d_L n_L \sqrt{1 + \frac{cZ_L C_0}{2n_L d_L}}} \quad (14)$$

令 $Z_a = Z_0$, 由式(12)可计算出高阻抗微带线的长度为

$$d_L = \frac{cZ_L C_0}{2n_L \left[\frac{Z_L^2}{Z_0^2} - 1 \right]} \quad (15)$$

将式(15)分别代入式(13)和(14)可得

$$n_a = \frac{Z_L n_L}{Z_0} \quad (16)$$

$$f_c = \frac{2}{Z_0 \pi C_0} \left[1 - \frac{Z_0^2}{Z_L^2} \right] \quad (17)$$

由式(17)可知, 等效电路的截止频率与微带线的特性阻抗 Z_L 正相关, 随着 Z_L 的增大而增大, 与微带线的有效传播指数 n_L 无关. 为了提高截止频率, Z_L 越大越好. 增大 Z_L 则而由式(16)可知等效电路的 n_a 也增大, 这样会降低微波信号的传播速率. 为确保信号的完全传输, 等效电路的微波传输指数 n_a 与光纤中的光波传输指数 n_0 必须相等. 因此, 在保证 $n_a = n_0$ 的情况下, 可以通过选取尽可能小的 n_L 以最大化 Z_L .

微带线的特性阻抗 Z_L 和有效传播指数都是线宽 W 、介质衬底高度 h 之比 W/h 和相对介电常量 ϵ_r 的函数. 取 $h = 6 \text{ mil}$, $\epsilon_r = 8$, 作出 $n_a - W$ 曲线如图 15.

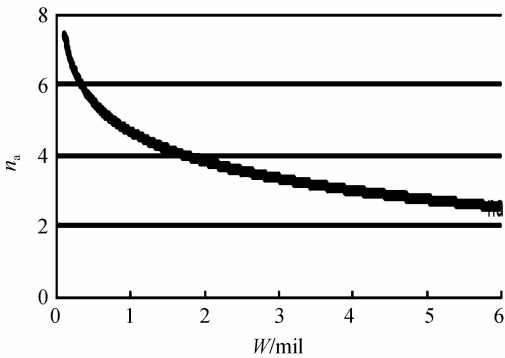


图 15 $n_a - W$ 曲线图

Fig. 15 $n_a - W$ graph

对于窄的微带线 ($w/h < 1$)

$$Z_L = \frac{Z_0}{2\pi \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln \left(8 \frac{h}{w} + \frac{w}{4h} \right) \quad (18)$$

式中, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 376.8 \Omega$ 是在自由空间的波阻抗, ϵ_{eff} 是等效介电常量.

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] \quad (19)$$

由匹配光纤 $n_0 = 3.4$ 可知 $n_a = 3.4$, 根据图 15 可

得 $W \approx 2.9 \text{ mil}$, 将其代入式(18)和(19), 求得 $\epsilon_{\text{eff}} = 5.70$, 故 $n_L = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = 2.38$, $Z_L = 71.43 \Omega$, 按分析取值 $C_0 = 0.2 \text{ pF}$, 将这些数据代入式(15), 得到微带线长度 $d_L = 70 \text{ mil}$. 在 EDA 仿真平台上, 用 $W = 2.9 \text{ mil}$, $\epsilon_r = 8.8$, $h = 6 \text{ mil}$, $d_L/4 = 17.5 \text{ mil}$ 的微带线替换图 4 中的电感 L 并进行仿真, 结果如图 16、图 17.

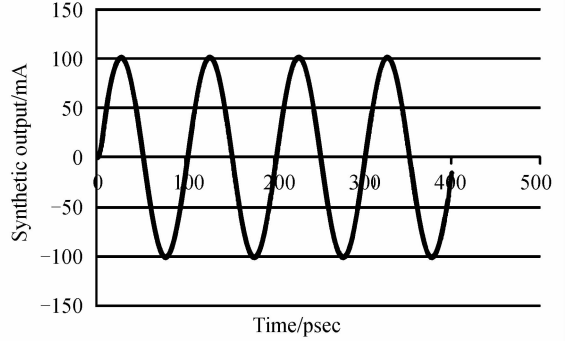


图 16 微带线替换后新型探测器输出电流波形

Fig. 16 Novel photodetector output current waveform after using microstrip line replacement

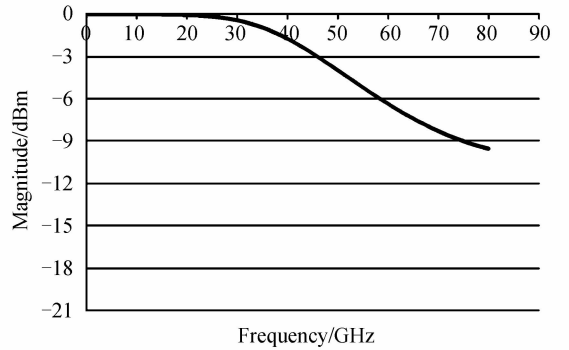


图 17 微带线替换后新型探测器频率响应

Fig. 17 Frequency response of novel photodetector after using microstrip line replacement

由图 16 仿真结果可知: 微带线替换电感后的新型探测器仍能够将多个光电二极管的输出信号进行合成. 图 17 显示了合成电路的频率响应, 其 3 dB 带宽大约为 46 GHz, 虽比理想电感情况下降低, 但与同等数量二极管的传统 TWDA 相比带宽依然提高了很多.

5 结论

本文提出了一种由光电二极管组构成的高性能 TWDA 结构, 在 EDA 平台上就单个及多个 TWDA 的阵列单元进行了分析与研究, 结果表明本文提出的结构工作带宽提高一倍, 回波损耗有较大改善, 电路匹配性变好. 就电路中的连接电感用高阻抗微带线实现进行了理论分析与模拟研究, 结果表明按此结构制造的光电探测器能够得到高输出功率和较大的带宽, 很好地满足未来通信的需要. 本文的设计方法也可为其它高性能的光电探测的设计提供借鉴.

参考文献

- [1] YAN Xin, WANG Tao, YIN Fei, *et al.* InGaAs-MSM photodetector with low dark current [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(6):0604002.
闫欣,汪韬,尹飞,等.低暗电流 InGaAs-MSM 光电探测器[J].光子学报,2015, **44**(6):0604002.
- [2] SHI Xiao-feng, CHENG Xiang, CHEN Chao, *et al.* Different structure integrated photodetectors applied in POF receivers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **43**(3):0313002.
史晓凤,程翔,陈朝,等.应用于塑料光纤通信接收芯片的集成光电探测器[J].光子学报,2015, **43**(3):0313002.
- [3] RUAN Yi, NING Ti-gang, PEI Li, *et al.* Study on mainstream photodetector in optical communication [J]. *Optoelectronic technology application*, 2008, **23**(3):9-12.
阮义,宁提纲,裴丽,等.光通信中主流光电探测器研究[J].光电技术应用,2008, **23**(3):9-12.
- [4] SHI Tuo, XIONG Bing, SUN Chang-zheng, *et al.* Applications of high-saturation-current photodiode in the ROF links with low noise figure and high gain [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, **24**(1):56-62.
石拓,熊兵,孙长征,等.高饱和和电流光电探测器在低噪声系数和高增益 ROF 光链路中的应用[J].光电子·激光,2013, **24**(1):56-62.
- [5] YAO Chen. Key technologies of high speed photodiodes [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications.
姚辰,高速光探测器的关键技术 [D]. 北京:北京邮电大学,2013.
- [6] YAN Qiang. Research on the design and measurement of high-performance semiconductor photodetector [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications.
颜强,高性能光探测器设计与性能测量研究 [D]. 北京:北京邮电大学,2012.
- [7] BELING A, CHEN H, PAN H P, *et al.* High-power monolithically integrated traveling wave photodiode array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(24):1813-1815.
- [8] GIBONEY K S, RODWELL J W, BOWERS J E. Traveling-wave photodetectors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, **4**(12):1363-1365.
- [9] GOLDSMITH C L, MAGEL G A, BACA R J. Principles and performance of traveling-wave photodetector arrays [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, **45**(8):1342-1350.
- [10] GOLDSMITH C L, MAGEL G A, GREGORY A, *et al.* Coherent combining of RF signals in a traveling-wave photodetector array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **9**(7):988-990.
- [11] MAGEL G A, GOLDSMITH C L, BACA R J. Four-element traveling wave photodetector array for high-performance analog fiber-optic links [C]. OFC'97 Technical Digest, 1997: 207-208.
- [12] ITO H, NAGATSUMA, T. ISHIBASHI T. Recent development on Uni-Travelling-Carrier Photodiodes and their applications [C]. The 14th Annual Meeting of the IEEE, 2001.
- [13] GUO Li-qing. Research on high speed uni-traveling-carrier photodiode(UTC-PD) and simulation design of transmission line in device packaging [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications.
郭丽庆.高速单行载流子光探测器和器件封装中传输线仿真设计的研究.北京:北京邮电大学,2012.
- [14] ITO H, MURAMOTO Y, FURUTA T, *et al.* High-speed and high-output-power uni-traveling-carrier photodiodes [C]. Lasers and Electro-Optics Society, The 18th Annual Meeting of the IEEE, LEOS, 2005.
- [15] SHI J W, KUO F M, WU C J, *et al.* Extremely high saturation current-bandwidth product performance of a near-ballistic uni-traveling-carrier photodiode with a flip-chip bonding structure [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, **46**(1):80-86.
- [16] SHI J W, WU C Y, HI P H, *et al.* A linear cascade near-ballistic uni-traveling-carrier photodiodes with extremely high saturation-current bandwidth product (6825Ma-GHz, 75Ma/91GHz) under a 50 ω load [C]. National Fiber Optical Engineers Conference, San Diego, 2010.
- [17] SHI J W, WU Y S, WU C Y, *et al.* High-speed, high-responsivity, high-power performance of near-ballistic uni-traveling-carrier photodiode at 1.55 wavelength [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(9):1929-1931.
- [18] GOLDSMITH C L, MAGNUSSON R. Bandwidth improvements for loaded-line traveling wave electro-optic modulators [C]. IEEE International Conference Microwave Microwave Symposium Digest, 1995:1499-1502.
- [19] WEN Hua-feng, NIE Qiu-hua, LIU Tai-jun, *et al.* Studying of output power combining for cascaded traveling-wave photodiode arrays [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3):0323001.
文化锋,聂秋华,刘太君,等.行波光电二极管级联阵列输出功率合成研究 [J].光子学报,2015, **44**(3):0323001.
- [20] 路德维格,波格丹诺夫.射频电路设计理论与应用 [M]. 王子宇,王心悦,译.北京:电子工业出版社,2013.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61307044), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No. BK20130321), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20133201120009), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Ministry of Education of China, the open project of Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy of Sciences (No. IIMDKFJJ-13-01), Research Innovation Program for College Graduates of Jiangsu Province (Nos. SJLX15-0600, SJLX15-0601)