

doi: 10. 3788/gzxb20154411. 1123003

多元 T 型阵列探测器原理与性能

李健¹, 文化锋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 Systems, 6110 W. Highway 290, Austin, TX 78735, USA)

摘要: 针对行波探测器阵列只合成多个光电二极管的输出功率而不能提高工作带宽的问题, 提出了一种多元 T 型电路结构的阵列探测器. 通过在各个光电二极管支路串联电容降低等效电容, 减小结电容对探测器截止频率的影响, 再用电感连接各个光电二极管支路构成 T 型滤波器电路结构, 在合成多个光电二极管输出功率的同时增加了工作带宽. 仿真结果表明, 在光电二极管支路串联与光电二极管结电容相等大小的电容时, 四元 T 型阵列探测器相比四元行波探测器阵列输出功率减少了一半, 但工作带宽提高了一倍, 而相比于传统探测器则在输出功率和工作带宽上都提高了一倍, 此外八元 T 型阵列探测器与四元行波探测器阵列输出功率相同, 工作带宽提高了一倍.

关键词: 光电探测器; 功率合成; 行波探测器阵列; T 型电路结构; 工作带宽

中图分类号: TN29; O453

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)11-1123003-7

The Principle and Performance of Multi-photodiodes Type T Arrays Photodetector

LI Jian¹, WEN Hua-feng¹, LI Ying-feng²

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

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

Abstract: Traveling wave detector arrays combine the output power of photodiodes without increasing the operation bandwidth. A arrays photodetector based on multi-photodiodes type T circuit structure was proposed. Capacitor and photodiode were connected in series to reduce the effect of junction capacitance on the cut-off frequency. Then inductor was used to connect each photodiode in order to constitute the circuit structure which was similar to type T filter. The novel arrays not only combine multiple photodiodes output power but also increase operation bandwidth. In addition that the capacitance cascaded in the photodiode branch was equivalent to decrescence of the photodiode junction capacitance. Simulation results show that output power of four-photodiodes type T arrays is reduced by half and its cut-off frequency is doubled if compared to four-photodiodes traveling-wave photodetector arrays. The output power and the cut-off frequency are both doubled if compared to traditional photodetector. The output power of eight-photodiodes type T detector is the same as the output power of four-photodiodes TWDA, but its operation bandwidth is doubled.

Key words: Photodetector; Power combining; Traveling-wave detector arrays; Type T circuit structure; Bandwidth

OCIS Codes: 230.7020; 230.5170; 230.5160; 230.0040; 230.0250

0 引言

随着通信技术的不断发展, 人们对视频、图像、语

音等多媒体数据通信的需求越来越大, 光载无线通信 (Radio-Over-Fiber, ROF) 技术^[1-2] 是一种将光纤通信和毫米波通信结合起来的能够满足大带宽通信需求的

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: 李健(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光载无线通信. Email: 1273747482@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: wenhuafeng@nbu.edu.cn

收稿日期: 2015-03-25; 录用日期: 2015-08-17

<http://www.photon.ac.cn>

新型无线接入技术. 在传统 ROF 系统中, 光电探测器的输出功率及带宽较小, 通常在其后放置一个毫米波功放来放大光电探测器输出的射频信号, 以保证有足够的功率使信号能从天线辐射出去. 但是毫米波功放仅能实现功率的放大, 无法实现带宽的放大, 且价格昂贵, 限制了 ROF 系统的产业化应用.

光纤放大器的出现和通信频率的提高, 对光电探测器提出了高功率大带宽的设计要求. 有关其材料、结构等的研究成为热点^[3-6]. 高速、高饱和输出的单行载流子光电探测器 (Uni-Traveling-Carrier Photodiode, UTC-PD)^[7-11] 被提出, 然而单个光电二极管的性能改善有限, 将多个光电二极管的输出毫米波功率进行合成, 以此为基础可以极大地提高光电探测器的输出功率. 目前对多个光电二极管输出毫米波功率合成的研究有两类: 一类是基于线性级联近弹道单行载流子光电二极管功率合成研究 (Linear Cascade Near-Ballistic Uni-Traveling-Carrier-Photodiodes, NBUTC-PD)^[12-16]. 例如 J. W. Shi, F. M. Kuo 和 M. Z. Chou 等人将两个 NBUTC-PD 级联, 在 50Ω 的负载下, 实现了高饱和电流带宽积 (>6825mA-GHz, 91GHz). 另一类是基于 Charles L. Goldsmith 等人提出的行波光二极管阵列 (Traveling-wave Detector Arrays, TWDA) 毫米波功率合成^[17-20]. 行波探测器阵列功率合成技术的出现, 使得探测器的光功率处理能力得到极大提高, 且保持了单个光电二极管的带宽, 解决了直接并联 N 个光电二极管, 工作带宽会减少为原来 1/N 的问题. 但探测器的带宽依然受到单个光电二极管结电容的影响, 限制了探测器处理光信号能力. 本文采用多级级 K 型滤波器的 T 型电路结构实现了多个光电二极管的输出合成, 同时提高了工作带宽.

1 工作原理

传统的光电探测器, 其内部电路是由单个的光电二极管连接一个阻抗匹配系统组成, 如图 1. 典型的探测器单元电路通常连接 50Ω 的终端匹配电阻. 终端匹配电阻可以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. 为了实现整个探测器电路阻抗匹配, 负载阻抗值应等于终端电阻值, 因此光电二极管输出电流经过终端匹配电阻和负载电阻分流, 负载输出电流只有光电二极管输出信号电流的一半. 探测器的工作带宽由光电二极管结电容 C 与负载阻抗 R 的乘积决定. 探测器的截止频率 f_c 为

$$f_c = \frac{1}{\pi Z_0 C_d} \quad (1)$$

式中, C_d 是光电二极管结电容, Z_0 是匹配负载阻抗 ($Z_0 = 50\Omega$).

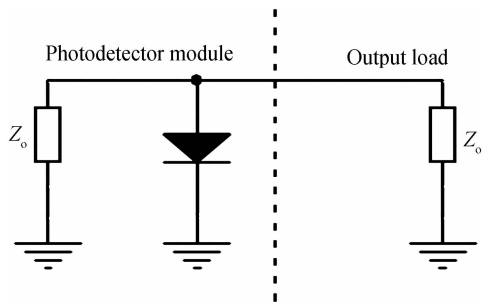


图 1 单个光电二极管阻抗匹配构成的传统光电探测器
Fig. 1 Schematic diagram of the photodetector that consists of impedance-matched photodiode

将多个光电二极管输出信号功率合成最简单的方法是将它们直接并联构成阵列型探测器, 如图 2. 直接并联可以使光电二极管输出电流按相位叠加, 各个输出信号功率得以合成, 但并联之后整个探测器的结电容是所有并联的单个光电二极管结电容的并联值, 即直接并联的探测器结电容是单个光电二极管结电容的 N 倍. 因此, N 个光电二极管并联将产生 N 倍于传统光电探测器 (单个光电二极管) 的输出电流, 但探测器总的结电容也将是单个光电二极管的 N 倍, 由式 (1) 可知探测器工作带宽将是传统光电探测器的 1/N.

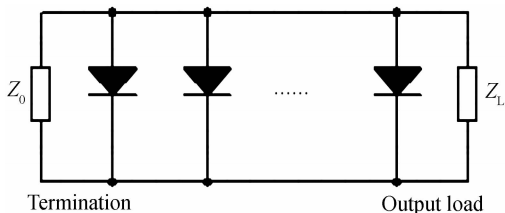


图 2 多个光电二极管直接并联构成的探测器
Fig. 2 Photodetector that consists of the diodes Connected in parallel

已有的一种解决办法是用电感元件级联多个光电二极管称为行波探测器阵列, 通过将光电二极管嵌入在一个用电感相互连接的人工传输线上能避免各光电二极管结电容叠加在一起, 行波探测器原理图如图 3. 行波探测器直接并联 N 个光电二极管, 探测器工作带宽减为传统光电探测器的 1/N 的同时, 合成了 N 个光电二极管的输出功率. 但行波探测器的工作带宽与传统光电探测器带宽相同, 依然受限于单个光电二极管结电容影响, 需要提高以满足对大带宽通信的需求.

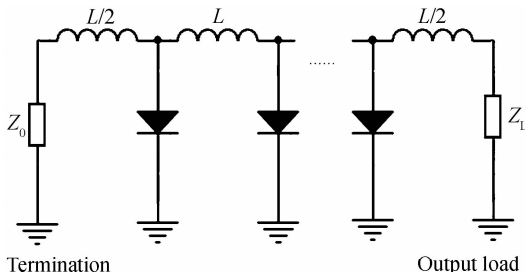


图 3 行波探测器阵列
Fig. 3 Traveling-wave photodetector array

在研究了行波探测器的基础上,本文提出了新型多元 T 型阵列探测器,该多元 T 型阵列探测器的每个探测单元是由两个电感和光电二极管支路的总电容构成的 T 型电路结构,基本 T 型电路结构和单个 T 型探测单元电路结构如图 4(a)所示,其中光电二极管支路总电容由光电二极管本身结电容串联一个电容组成.整个多元 T 型阵列探测器电路结构可看成多个定 K 型滤波器(T 型电路结构)的级联,多元 T 型阵列探测器原理图如图 4(b)所示.文献[21]介绍了定 K 型滤波器设计元件参数计算方法.这里的定 K 型滤波器网络结构的特征阻抗 Z_0 满足

$$Z_0 = \sqrt{L/C_e} \quad (2)$$

式中, L 是每一个 T 型探测单元的电感之和(每个 T 型滤波器单元的总电感), $C_e = \frac{C_c \cdot C_d}{C_c + C_d}$ 为光电二极管支路的总电容, C_d 是光电二极管本身结电容, C_c 是光电二极管支路所串联的电容($C_c > 0$).

为实现阻抗匹配,令 $Z_0 = 50\Omega$,则由式(2), L 的取值由 C_e 确定,即

$$L = Z_0^2 \cdot C_e \quad (3)$$

整个探测器的截止频率为

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{LC_e}} = \frac{1}{\pi Z_0 \cdot C_e} \quad (4)$$

由式(4)可知,多元 T 型阵列探测器带宽只与单个光电二极管支路总电容 C_e 有关且是反比例关系.由于 C_e 是 C_c 和 C_d 串联总和,故 $C_e < C_d$,因此相比于传统光电探测器或者行波探测器阵列,提高了多元 T 型阵列探测器的工作带宽.

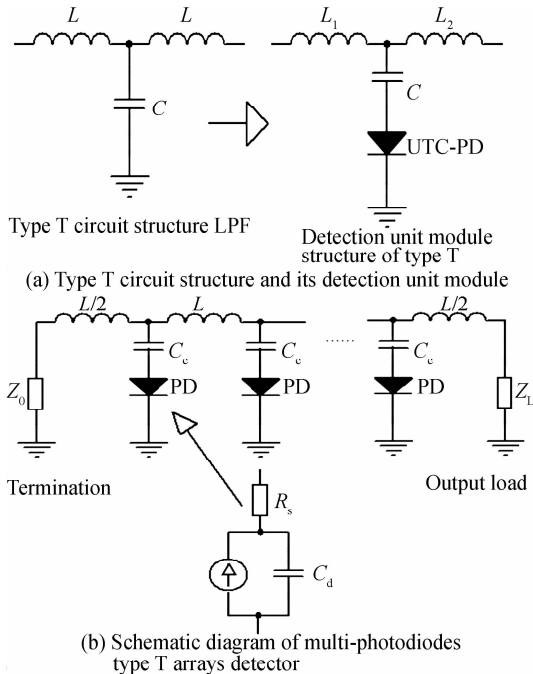


图 4 多元 T 型阵列探测器及单个 T 型探测单元结构
Fig. 4 Structure of multi-photodiodes type T arrays detector and detection unit module of Type T

各个探测单元输出的微波信号由于经过的 LC 电路(可等效为 T 型滤波器)个数不同到达输出端具有不同的电时延.单个 3 阶 T 型滤波器电传播时延 τ_c 可近似表示为

$$\tau_c \approx \sqrt{LC_e} \quad (5)$$

在低于截止频率 f_c 下都是有效的.

多元 T 型阵列探测器电路与光路匹配结构原理如图 5.在图 5 中,总光输入功率 P_{opt} 分成 N 等份,输出到 N 个光电二极管支路,每支路的输入光功率是 P_{opt}/N .各光路之间的光时延差设置为 τ_0 .每路光电二极管的响应度为 R ,每个探测单元产生一个射频电流,这些电流经过串联电容后分成两半,分别流向匹配终端和负载.每个探测单元按顺序级联后它们的输出电流就可以叠加起来,且提高了探测器的工作带宽.单个探测单元的输出电流 I_n 可表示为

$$I_n = e^{j(n-1)\omega\tau_0} \cdot \left[\frac{R \cdot P_{opt}}{2N} \cdot \frac{C_c}{C_c + C_d} \right] \cdot e^{j(N-n)\omega\tau_c} \quad (6)$$

式中 ω 是微波信号频率, τ_0 是各光电二极管支路输出之间的光时延差, R 是光电二极管的响应度, P_{opt} 是输入光功率, N 是探测器输出支路数, τ_c 是每个探测单元之间的电时延, n 表示从左到右光电二极管的序数.式(6)中第一部分是光输入到光电二极管的光时延,第二个是光电二极管输出的射频电流经串联电容后流向负载的电流幅度,第三个是光电二极管到探测器输出之间的电时延.各探测器单元输出的电流之和 I_o 为

$$I_o = \sum I_n = \sum_{n=1}^N \left[e^{j(n-1)\omega\tau_0} \cdot \left(\frac{R \cdot P_{opt}}{2N} \cdot \frac{C_c}{C_c + C_d} \right) \cdot e^{j(N-n)\omega\tau_c} \right] \quad (7)$$

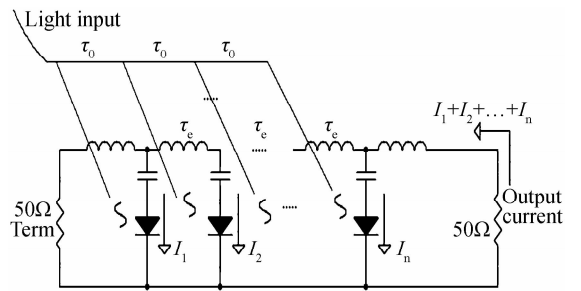


图 5 多元 T 型阵列探测器电路与光路匹配结构原理
Fig. 5 Schematic diagram of multi-photodiodes type T arrays detector and optical match structure

为了使各探测单元输出的射频信号电流能够最大程度的叠加在一起,则各光电二极管支路输出信号在探测器输出端相位要保持一致,馈光光路光时延应等于光电二极管输出到负载的电时延.令

$$\tau_0 = \tau_c = \tau$$

则探测器总的射频输出电流为

$$I_o = \sum_N I_n = \left[\frac{R \cdot P_{opt}}{2} \cdot \frac{C_c}{C_c + C_d} \right] \cdot e^{j(N-1)\omega\tau} \quad (8)$$

即在多元 T 型阵列探测器电路输出端得到了

$$\frac{C_c}{C_c + C_d} \cdot N \text{ 倍于传统光电探测器的输出电流.}$$

2 理论模拟分析

为了验证本文提出的多元 T 型探测器阵列电路的可行性,基于 EDA 技术,分别就电路的合成功率和工作带宽对四元、八元 T 型阵列探测器进行了模拟研究.常见光电二极管结电容为 0.15~0.2pF,取结电容 $C_d=0.2\text{pF}$,光电二极管支路所串联电容 C_c 取值与结电容 C_d 等值,由式(3)计算出电感 $L=250\text{pH}$.单个光电二极管输出电流幅值设置为 100 mA.

2.1 四元行波探测器阵列

图 6 和图 7 是传统的光电探测器与四元行波探测器阵列的模拟结果.图 6 中(a)图表示传统光电探测器输出电流波形,(b)图表示四元行波探测器输出电流波形.从图 6 可以看出四元行波探测器输出电流幅值(200 mA)是传统光电探测器输出电流幅值(50 mA)的 4 倍,即四元行波探测器阵列实现了各光电二极管输出的功率合成.图 7 中(a)图表示传统光电探测器通频带,(b)图表示四元行波探测器通频带.从图 7 可得出四元行波探测器和传统光电探测器工作带宽(-3dB

带宽)都约为 30 GHz,与理论计算结果一致.即相比于传统光电探测器,行波探测器在保持工作带宽的同时,合成了功率,且光电二极管数量越多,输出功率也越大,但无论增加多少个光电二极管,行波探测器的工作带宽都是不变的.

2.2 四元 T 型阵列探测器

图 8 和图 9 是四元行波探测器和四元 T 型阵列探测器的模拟结果.图 8(a)表示四元行波探测器通频带,图(b)表示四元 T 型阵列探测器通频带.从图 8 可得出四元 T 型阵列探测器工作带宽(约 60 GHz)是四元行波探测器工作带宽(约 30 GHz)的 2 倍,解决了行波探测器不能提高工作带宽的问题,且通过减小探测器支路串联电容的值可以继续增加带宽.图 9 中(a)图表示四元行波探测器输出电流波形,(b)图表示四元 T 型阵列探测器输出电流波形.从图 9 可得四元 T 型阵列探测器输出电流幅值(100 mA)是四元行波探测器输出电流幅值(200 mA)的一半,功率合成效率降低了一半.所以四元 T 型阵列探测器相比于四元行波探测器增加的一倍工作带宽是以牺牲一半的合成功率效率为代价换取的,但通过增加探测器个数可以提高输出功率,即同时实现探测器的输出功率和工作带宽的提高.

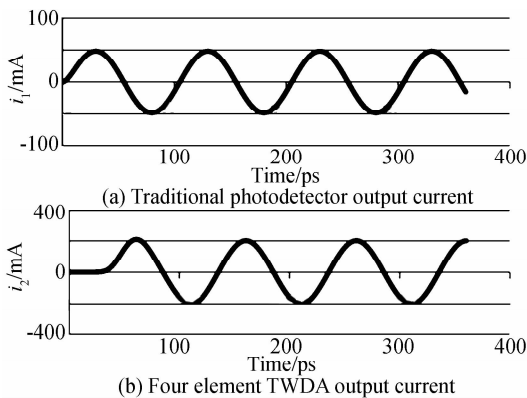


图 6 四元行波探测器和传统探测器输出电流波形
Fig. 6 Output current waveform scheme of traditional photodetector and four-element TWDA

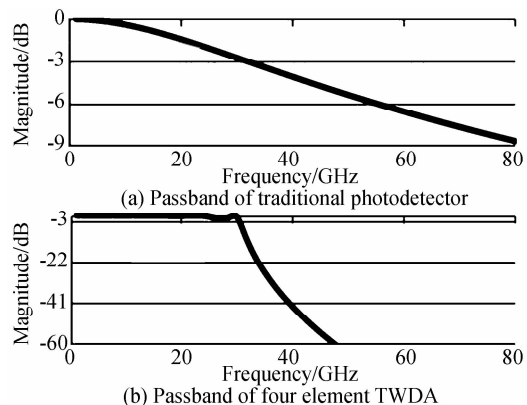


图 7 四元行波探测器和传统探测器工作带宽
Fig. 7 Bandwidth scheme of traditional photodetector and four-photodiodes TWDA

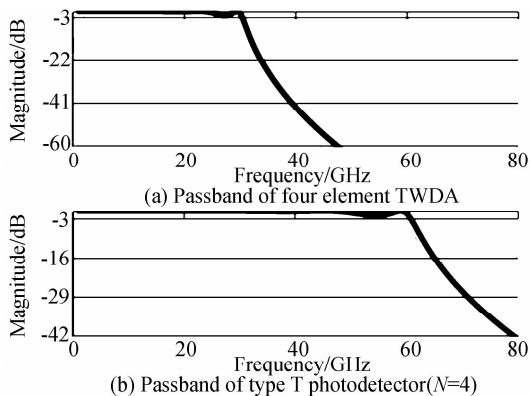


图 8 四元 T 型阵列探测器和四元行波探测器工作带宽
Fig. 8 Bandwidth scheme of four-element TWDA and four-element type T photodetector

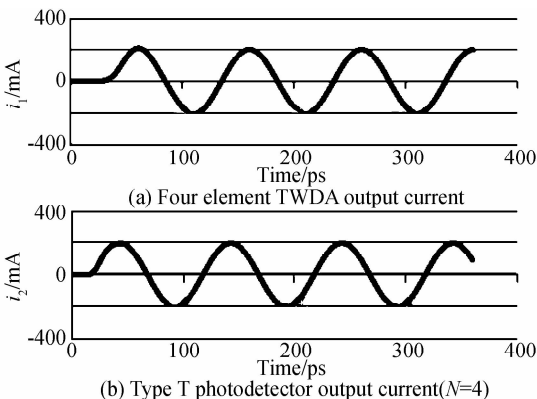


图 9 四元 T 型阵列探测器和四元行波探测器输出电流波形
Fig. 9 Output current waveform scheme of four-photodiodes TWDA and four-photodiodes type T photodetector

2.3 八元 T 型阵列探测器

图 10 和图 11 是四元行波探测器和八元 T 型阵列探测器的模拟结果. 图 10(a) 表示四元行波探测器输出电流波形, (b) 表示八元 T 型阵列探测器输出电流波形. 从图 10 可以看出四元行波探测器与八元 T 型阵列探测器输出电流幅值均为 200 mA. 图 11(a) 表示四元行波探测器通频带, (b) 表示八元 T 型阵列探测器通频带. 从图 11 可得出八元 T 型阵列探测器工作带宽 (约 60 GHz) 是四元行波探测器工作带宽 (约 30 GHz) 的 2 倍. 所以八元 T 型探测器相比于四元行波探测器, 在不减少输出功率的同时, 提高了一倍的工作带宽, 弥补了四元 T 型探测器增加带宽却降低输出功率的问题, 证明了通过增加光电二极管数目、选择合适的串联电容值可以使得多元 T 型阵列探测器同时具备高功率和大带宽, 而行波探测器无论增加多少光电二极管增加的只是输出功率, 探测器工作带宽是不变的.

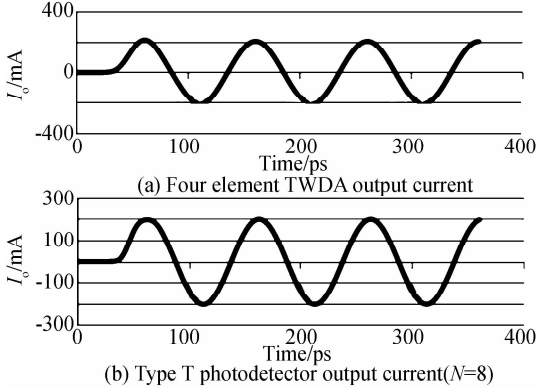


图 10 八元 T 型阵列探测器和四元行波探测器输出电流波形
Fig. 10 Output current waveform scheme of four-photodiodes TWDA and eight-photodiodes type T photodetector

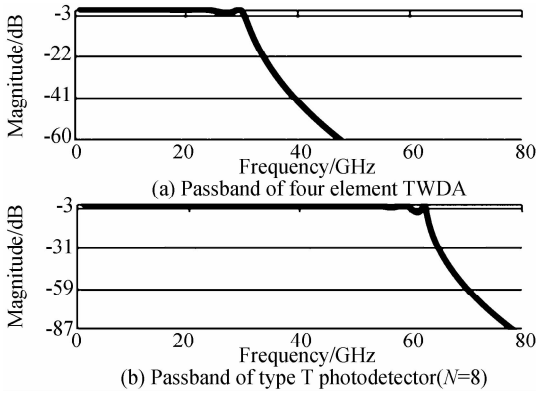


图 11 八元 T 型阵列探测器和四元行波探测器工作带宽
Fig. 11 Bandwidth scheme of four-photodiodes TWDA and eight-photodiodes type T photodetector

3 实现分析

在微波频段, 互感电感一般用短的高阻抗微带线实现, 设短长度的高阻抗微带线的特性阻抗为 Z_L , 长度为 d_L , 有效传播指数为 n_L . 根据 A 参量矩阵, 这一小段高阻抗微带线可以等效为一个 π 型电路, 如图 12.

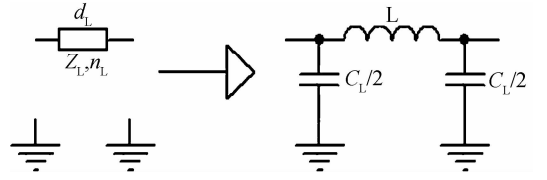


图 12 π 型等效电路

Fig. 12 Pi-Equivalent Circuit

π 型等效电路中的电感和电容值由式 (9) 和 (10) 确定^[22].

$$L = \frac{Z_L}{2\pi f} \sin\left[\frac{2\pi f d_L n_L}{c}\right] \sim \frac{Z_L d_L n_L}{c} \quad (9)$$

$$C_L = \frac{1}{\pi f Z_L} \tan\left[\frac{\pi f d_L n_L}{c}\right] \sim \frac{d_L n_L}{Z_L c} \quad (10)$$

式中 c 是真空中光速. 微带线替换后的单元 T 型等效电路如图 13.

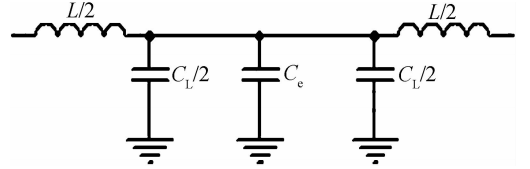


图 13 微带线替换后的单元 T 型等效电路

Fig. 13 Type T equivalent circuit unit after using microstrip line replacement

对于图 4 所示电路, 电感用微带线替换后其特性阻抗为

$$Z_a = \sqrt{\frac{L}{C_e + C_L}} = \frac{Z_L}{\sqrt{1 + \frac{c Z_L C_e}{d_L n_L}}} \quad (11)$$

传播指数为

$$n_a = \frac{c \sqrt{L(C_e + C_L)}}{d_L} = \left[\frac{Z_L^2}{Z_0^2} - 1 \right] \frac{n_L^2 d_L}{c Z_L C_e} \sqrt{1 + \frac{c Z_L C_e}{d_L n_L}} \quad (12)$$

截止频率为

$$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{L(C_e + C_L)}} = \frac{c}{\pi d_L n_L \sqrt{1 + \frac{c Z_L C_e}{d_L n_L}}} \quad (13)$$

令 $Z_a = Z_0$, 由式 (11) 可得高阻抗微带线的长度

$$d_L = \frac{c Z_L C_e}{\left[\frac{Z_L^2}{Z_0^2} - 1 \right] n_L} \quad (14)$$

将式 (14) 分别代入式 (12) 和 (13) 可得

$$n_a = \frac{Z_L n_L}{Z_0} \quad (15)$$

$$f_c = \frac{1}{Z_0 \pi C_e} \left[1 - \frac{Z_0^2}{Z_L^2} \right] \quad (16)$$

分析式 (15) 和 (16) 可以知: 1) 等效电路的截止频率随微带线的特性阻抗 Z_L 增大而增大, 与微带线的有效传播指数 n_L 无关, 因此, 从提高截止频率来看, Z_L 越大越好; 2) 增大阻抗 Z_L 则等效电路的 n_a 也增大, 则会降低微波信号的传播速率, 为确保信号传输, 等效电路的微波传输指数 n_a 必须等于光纤中的光波传输指

数 n_o , 由式(15)可知, Z_L 的增加必须伴随着 n_L 减小, 因此, 在保证 $n_a = n_o$ 的同时, 应选取尽可能小的 n_L , 从而最大化 Z_L .

在高速集成电路中, 电容的实现可以利用二极管和三极管的结电容, 故 T 型探测器光电二极管支路串联的电容采用和光电二极管材质、工艺相同的二极管实现。

4 实现仿真研究

微带线的特性阻抗 Z_L 和有效传播指数 n_L 都是线宽 W 、介质衬底高度 h 之比 W/h 和相对介电常数 ϵ_r 的函数。取 $h = 152.4 \mu\text{m}$ (6 mil), $\epsilon_r = 3.48$, 做出 n_o 与 W 的关系图如图 14。

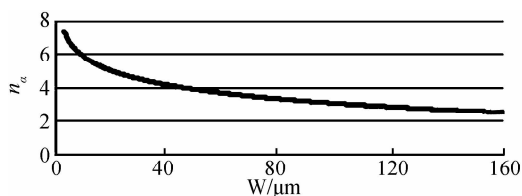


图 14 n_o - W 曲线图

Fig. 14 n_o - W graph

对于窄的微带线 ($w/h < 1$)

$$Z_o = \frac{Z_i}{2\pi \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln \left(8 \frac{h}{w} + \frac{w}{4h} \right) \quad (17)$$

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

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} + 0.04 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] \quad (18)$$

因匹配光纤 $n_o = 3.4$, 所以 $n_a = 3.4$, 则由图 14 可得 $W \approx 72.14 \mu\text{m}$ (2.84 mil), 再代入式(17)和(18)^[23]。求得 $n_L = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = 1.58$, $Z_L = 107.65 \Omega$, 按模拟分析取值 $C_c = C_d = 0.2 \text{ pF}$, 将这些数据代入式(14), 得到微带线长度 $d_L = 559 \mu\text{m}$ (22 mil), 由式(16)计算出截止频率 $f_c = 50 \text{ GHz}$ 。在 EDA 平台上, 用 $W = 72.18 \mu\text{m}$ (2.84 mil), $h = 152.4 \mu\text{m}$ (6 mil), $\epsilon_r = 3.48$, $d_L = 559 \mu\text{m}$ (22 mil) 的微带线替换图 4 中的电感 L , 同理替换 $L/2$ 进行仿真, 结果如图 15、图 16。

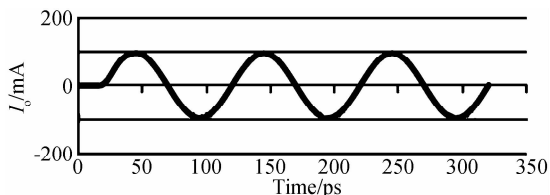


图 15 微带线替换后四元 T 型探测器输出电流波形

Fig. 15 Four-element type π photodetector output current waveform after using microstrip line replacement

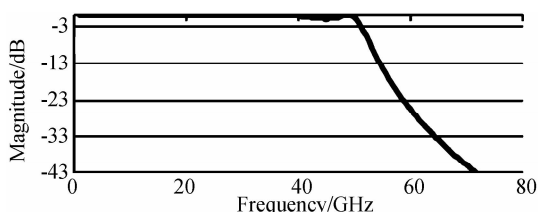


图 16 微带线替换后四元 T 型探测器工作带宽图

Fig. 16 Bandwidth scheme of four-photodiodes type T photodetector after using microstrip line replacement

由图 15 可知微带线替换电感后 T 型探测器电路仍能够将多个光电二极管的输出信号进行合成。如果要提高功率, 可通过增加光电二极管支路实现。图 16 显示了合成电路的通频带, 其 3 dB 带宽大约 50 GHz, 与式(16)计算的结果一致, 虽比理想电感情况下略微降低, 但相比与行波探测器, 其工作带宽依然提高了近一倍, 实现了带宽提高。

5 结论

本文针对行波探测器阵列只能提高探测器功率而不能增加带宽的情况, 提出了一种新型电路结构的探测器—多元 T 型阵列探测器。理论分析和模拟结果一致表明: T 型阵列行波探测器能够合成多个光电二极管输出功率; 在提高输出功率的同时提高了探测器的工作带宽。由于探测单元光电二极管支路串联的电容值可以自由选择, 所以带宽的增加幅度也可以选择, 且带宽增加是以减少功率合成效率为代价实现的, 探测器工作带宽增加的越多功率合成的效率就越低, 降低的功率可以通过增加探测器个数弥补。在实际应用中可根据具体情况选择合理的探测器个数以及电感值、串联电容值以实现阻抗匹配来满足系统工作带宽和输出功率的要求。

参考文献

- [1] RUAN Yi, NING Ti-gang, PEI Li, *et al.* Study on mainstream photodetector in optical communication [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, **23**(3): 9-12.
阮义, 宁提刚, 裴丽, 等. 光通信中的主流光电探测器研究[J]. 光电技术应用, 2008, **23**(3): 9-12.
- [2] ZHANG Chong-fu, CHEN Chen, JIN Wei, *et al.* Recent progress in broadband optical access networks at UESTC [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 8-17.
张崇富, 陈晨, 靳唯, 等. 宽带光接入网络理论与技术的研究进展[J]. 光子学报, 2014, **43**(S1): 8-17.
- [3] YUAN Zhao-lin. Properties of a hybrid photodiode based on well-aligned ZnO nanowire array and regioregular P3HT [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(1): 36-41.
袁兆林. 基于 ZnO 纳米线阵列和 P3HT 的混合光电二极管特性[J]. 光电子 • 激光, 2014, **25**(1): 36-41.
- [4] HU Wei, DOU Xian-an, SUN Xiao-quan. The analysis of the photo-carriers of the InGaAs p-i-n photodiode response to the high optical injection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0625001.
胡伟, 豆贤安, 孙晓泉. 强光照射下的 InGaAs 二极管内部光

- 生载流子分析[J]. 光子学报, 2014, **43**(6):0625001.
- [5] LIU Fu-hao, XU Jin-tong, WANG Ling, *et al.* GaN-based avalanche photodiodes and its recent development [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(4):1215-1221.
刘福浩, 许金通, 王玲, 等. GaN 基雪崩光电二极管及其研究进展[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(4):1215-1221.
- [6] CHE Xiang-hui, ZHANG Yu, NING Ji-feng, *et al.* A low dark current and high responsivity InGaAs/InP pin photodetector[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2014, **51**(4):214-218+248.
车相辉, 张宇, 宁吉丰, 等. 一种低暗电流高响应度 InGaAs/InP pin 光电探测器[J]. 微纳电子技术, 2014, **51**(4):214-218+248.
- [7] ITO H, ISHIBASHI T. Ultrafast uni-traveling carrier photodiode[C]. IEEE Device Research Conference, 2000:165-168.
- [8] ITO H, KODAMA S, MURAMOTO Y, *et al.* High-speed and high-output InP-InGaAs unitraveling-carrier photodiodes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10**(4):709-727.
- [9] SHI T, XIONG B, SUN C, *et al.* Back-to-back UTC-PDs with high responsivity, high saturation current and wide bandwidth[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(2):136-139.
- [10] 郭丽庆. 高速单行载流子光探测器(UTC-PD)和器件封装中传输线仿真设计的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2012.
- [11] ZHANG Ling-zi, ZUO Yu-hua, CAO Quan, *et al.* High-speed and high-power uni-traveling-carrier photodetector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(13):505-510.
张岭梓, 左玉华, 曹权, 等. 单载流子光电探测器的高速及高饱和功率的研究[J]. 物理学报, 2012, **61**(13):505-510.
- [12] 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.
- [13] KUO F M, CHOU M Z, SHI J W. Linear-cascade near-ballistic uni traveling-carrier photodiodes with an extremely high saturation current-bandwidth product [J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2011, **29**(4):433-438.
- [14] SHI J W, SHEU J K, WANG C K, *et al.* Linear cascade arrays of GaN based green light emitting diodes for high-speed and high-power performance [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(18):1368-1370.
- [15] WU Y S, SHI J W. Dynamic analysis of high-power and high-speed near-ballistic uni traveling carrier photodiodes at W-band[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(13):1160-1162.
- [16] SHI J W, WU C Y, WU Y S, *et al.* High-speed, high-responsivity, and high-power performance of near-ballistic uni traveling-carrier photodiode at 1.55 wavelength [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(9):1929-1931.
- [17] 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*, 2002, **45**(8):1342-1350.
- [18] GOLDSMITH C L, MAGEL G A, KANACK B M, *et al.* Coherent combining of RF signals in a traveling-wave photodetector array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **9**(7):988-990.
- [19] WEN Hua-feng, NIE Qiu-hua, LIU Tai-jun, *et al.* Studying of output power combining for cascaded travelling-wave photodiode arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3):0323001.
文化锋, 聂秋华, 刘太君, 等. 行波光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] MENG Q Q, WANG H, LIU C Y, *et al.* High-Photocurrent and wide-bandwidth UTC photodiodes with dipole-doped structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(19):1952-1955.
- [21] LIU Yan-tao, LIU Yu-bei, YIN Wei. Introduction of design methods of LC filter and simulation of responding characteristics [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, **33**(5):17-21.
刘砚涛, 刘玉蓓, 尹伟. LC 滤波器设计方法介绍及其仿真特性比较[J]. 电子测量技术, 2010, **33**(5):17-21.
- [22] POZAR D M. Microwave engineering [M]. 2nd Edition. USA: John Wiley & Sons Inc, 1998:356-357.
- [23] 王志功. 光纤通信集成电路设计 [M]. 北京:高等教育出版社, 2003.