

本文引用格式:位健,牛慧娟,陈庆涛,等.具有新型低损耗电极 PIN 光探测器的研究[J].聊城大学学报(自然科学版),2025,38(1):23-33.

Citation format:WEI Jian, NIU Huijuan, CHEN Qingtao, et al. Research on PIN photodetector with novel low-loss electrode [J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(1): 23-33.

文章编号 1672-6634(2025)01-0023-11

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024040016

具有新型低损耗电极 PIN 光探测器的研究

位健¹, 牛慧娟^{1,2}, 陈庆涛³, 李沅昊¹, 刘凯⁴, 段晓峰⁴, 黄永清⁴

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 聊城大学 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059; 3. 蒙特利尔综合理工学院 电气工程系, Poly-Grames 研究中心, 加拿大 蒙特利尔 H3T 1J4; 4. 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 基于一种具有微孔-槽结构的 PIN 光探测器结构, 设计了一种低损耗电极并与之进行联合优化。该方法不但为制备低损耗电极提供了有效的解决方案, 还进一步提升了光探测器的 3 dB 带宽。首先, 通过优化电极衬底与厚度、引入绝缘层、增加金属材料以及在衬底中加入矩形槽结构等方式, 设计了一款新型低损耗的光探测器电极, 降传输损耗降至 -1.15 dB。然后, 将新型电极与 PIN 光探测器的等效电路进行联合设计优化。结果表明, 与未使用该新型电极相比, 光探测器的 3 dB 带宽提升了近 32%。该新型电极的设计可以为不同结构及不同波段光探测器的性能改进提供参考。

关键词 光探测器; 低损耗电极; 联合优化; 3 dB 带宽; 传输损耗

中图分类号 TN929.1; TN15

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research on PIN Photodetector with Novel Low-Loss Electrode

WEI Jian¹, NIU Huijuan^{1,2}, CHEN Qingtao³, LI Yuanhao¹,
LIU Kai⁴, DUAN Xiaofeng⁴, HUANG Yongqing⁴

(1. School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 3. Department of Electrical Engineering, Poly-Grames Research Center, Polytechnique Montréal, Montreal H3T1J4, Canada; 4. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract In this paper, a low-loss electrode is designed and optimized based on a PIN photodetector with a micro-pore and slot structure. This method not only provides an effective solution for the experimental preparation of low-loss electrodes, but also further improves the 3 dB bandwidth of the photodetector.

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(62374020); 山东省自然科学基金项目(ZR2022MF305, ZR2022MF253, ZR2021MF053, ZR2021MF070); 信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)开放基金项目(IPOC2021B07); 山东省高校 2021 年青年引进与培养计划; 科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC2570); 教育部产学协同育人项目(220605160271242, 221002802140950, 220906093200103)资助

通信作者: 牛慧娟, 女, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 新型高速大功率光探测器、微纳结构光电器件、毫米波天线, E-mail: supernhj@lcu.edu.cn.

Firstly, by optimizing the electrode substrate and thickness, introducing insulation layer, adding metal material and adding rectangular groove structure in the substrate, a new type of low-loss photodetector electrode is designed, and its transmission loss is reduced to -1.15 dB. Then, the new electrode and the equivalent circuit of the PIN photodetector are designed and optimized. The results show that the 3 dB bandwidth of the photodetector is improved by nearly 32% compared with the non-use of the new electrode. The new electrode can be used as a reference for improving the performance of optical detectors with different structures and different bands.

Key words photodetector; low-loss electrode; joint optimization; 3 dB bandwidth; transmission loss

0 引言

随着大数据、人工智能、“互联网+”等技术领域的高速发展,数据中心对高速数据处理、通信速率和大带宽有了更高的需求^[1,2]。光纤通信以其大带宽、高速传输、抗干扰能力强、保密性好、损耗低、原材料资源取之不竭等诸多优点,一直被广泛应用^[3]。光探测器作为光通信系统接收端必不可少的器件,也需要进一步优化来满足更高的速率需求^[4,5]。目前,对光探测器的设计通常聚焦于光探测器内部层结构的设计上^[6-10],但光探测器外部电极结构及其寄生参数也会影响器件的高速性能^[11,12],因此很有必要作进一步的研究。

为了提升光探测器的性能,需要为其设计一款阻抗匹配良好且低损耗的电极^[13]。光探测器电极的设计通常聚焦于衬底与电极的厚度、电极的形状、金属材料的选择等参数,通过仿真可以得到电极的传输损耗 S_{21} 和特征阻抗 Z_0 。 S_{21} 表示传输损耗,传输损耗与信号的转化效率有关,效率为1时,传输损耗为0 dB,通常 S_{21} 要在-3 dB以上来保证信号的传输质量, S_{21} 越接近0 dB越好^[14]。在工程上,通常选择50 Ω 作为高频传输线的特征阻抗,因为50 Ω 是基于损耗、功率容量和抗击穿电压综合考虑的最佳平衡值^[15-17]。

当前针对光探测器与电极结合的设计方式主要有以下几种:垂直结构、平面结构、波导结构、表面等离子体结构,以及混合结构等^[2,18-22]。这几种结构各有自己的优缺点,比如垂直结构由于载流子垂直于光入射方向移动,因此可以实现高效的光吸收和载流子收集,易于实现高量子效率和快速响应,但是制造工艺复杂、成本较高。平面结构的特点是光探测器和电极在同一平面上,光通过表面进入器件,因此这种设计简单,易于制造,但是光吸收路径较短,可能导致量子效率较低。波导结构利用光波导将光引导至探测区域,提高光吸收效率达到提高探测效率和响应速度的目的,但是设计和制造难度大,成本较高。表面等离子体结构通过金属纳米结构增强光吸收和局域电场,提高探测器性能,并且在特定波长范围内可以显著提高光探测效率,但是需要精密的纳米制造技术,成本较高。混合结构是将上述几种结构结合,优化探测器性能,因此可以结合多种结构的优点,使器件性能提升显著,但是设计和制造复杂性高,成本较高。本文主要讨论两种类别的光探测器与电极结合的设计方法:一种是将共面波导(Coplanar waveguide, CPW)电极通过有限元法模拟得到CPW的回波损耗(S_{11})与传输损耗 S_{21} ,通过这些参数可以提取出CPW等效的电容与电感,然后参与到电路中进行设计及优化^[23]。另一种是将电极在高频结构仿真器HFSS(High Frequency Structure Simulator)中设计与优化,使其满足传输损耗大于-3 dB、特征阻抗在50 Ω 左右,接着在ADS(Advanced Design System)中对光探测器等效电路进行设计与优化^[24]。为了更聚焦于电极在光探测器性能优化中的作用,本设计使用第二种研究方法以研究、设计并分析低损耗电极对光探测器高速性能的影响。

考虑到实际制备,在金属层与衬底层之间加入一定厚度的苯并环丁烯(Benzocyclobutene, BCB)绝缘层。此外,在金属层与绝缘层之间加入了钛(Titanium, Ti)金属层,以提升器件稳定性。最终,通过在电极结构中加入矩形槽结构来进一步优化电极的 S_{21} 。依次对衬底、金(Au)电极厚度及加入上述各层的新型电极进行优化仿真,得到性能最优的 S_{21} 与 Z_0 。最后,将优化好的电极与光探测器等效电路进行联合仿真,显著提升了光探测器的3 dB带宽。

1 电极结构的设计

为了进一步提升光探测器的高速特性,除了对光探测器的内部层结构进行优化设计,还需要对光探测器

外部电极进行具体的设计。磷化铟(InP)是一种 III-V 族半导体材料,具有优良电子迁移率和高电子饱和速度,使其非常适合用于制造高速电子器件和光电子器件。实验室也常用 InP 材料作为高速光探测器的衬底,因此本文在电极设计过程中也选择了 InP 作为电极衬底材料。电极外形如图 1 所示,其中信号线(Signal line)与地线(Ground line)构成共面波导 CPW 电极,即 GSG(Ground-Signal-Ground)大电极,是专门为了器件直流和交流特性的测试而设计的。此处,地线的宽度为 $80\text{ }\mu\text{m}$,信号线的宽度为 $70\text{ }\mu\text{m}$,电极的长 h_1 为 $250\text{ }\mu\text{m}$,宽 h_2 为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 2 为新型电极的侧视图,自上而下分别为: Au 层、Ti 层、绝缘层(Insulating layer)、InP 衬底层。 t_0 为 Au 层厚度、 t_1 为 Ti 层厚度、 t_2 为绝缘层厚度、 t_3 为衬底层厚度。假设 W 为信号线与地线之间距离(槽宽), d 为信号线宽度,并考虑实验用 GSG 测试探针间距为 $150\text{ }\mu\text{m}$, W 与 d 需要满足 $(W+d/2)<150\text{ }\mu\text{m}$ 。一般的电极设计中通常没有使用绝缘层与 Ti 层,但为了使设计的电极更贴近实验制备需求,本设计在金属层与 InP 层之间加入了绝缘层 BCB,并加入了 Ti 层来提升金属与绝缘层之间的附着力,增强器件的稳定性^[25]。

2 电极结构的优化

2.1 电磁仿真软件 HFSS 的介绍

在确定了光探测器电极的组成部分以及需要设计的结构参数后,我们将采用电磁仿真软件 HFSS 对电极进行建模仿真。HFSS 是美国的 Ansoft 公司开发的全波三维电磁场仿真软件,广泛用于三维电磁场的设计与分析。它采用有限元分析法(Finite Element Method, FEM)为工程师提供了一个强大的平台,用于精确模拟和分析高频电子设备,如天线、微波器件、高速互连结构等。

HFSS 特别擅长处理复杂的三维电磁场问题,能够计算和预测电磁波在各种结构中的传播、辐射和散射特性。计算结果准确可靠,是业界公认的三维电磁场设计和分析的工业标准^[26]。随着技术的发展,HFSS 不断更新,引入新功能以适应新的工程挑战,如光电器件仿真和高速数字系统设计等。其高频解决方案覆盖了从系统到电路乃至组件级的快速而精确的设计方法,是现代电子设备高频/高速电子组件设计的首选工具。

2.2 光探测器电极的建模与仿真

2.2.1 光探测器电极结构创建。首先,在 HFSS 中建立一个工程文件并选择以微米为固定单位。接着,在软件材料库中添加衬底材料 InP 与金属层材料 Au。然后,在 InP 衬上创建由 Au 组成的电极,并通过布尔运算得出所设计的电极外形(图 3 中黄色部分),电极结构如图 3 所示。

2.2.2 边界条件与端口激励设置。在设计好基础电极结构后,由于 HFSS 默认的求解域为无限大,因此需要为电极求解设置一个特定区间,即在电极外部添加一个材料为空气的空气盒子(Air box),其边界条件设定为辐射(Radiation)边界条件,如图 4(a)所示。为了保证计算结果的精确度,避免边界条件对电磁场分布的影响,通常设置空气盒子大小至少为工作波长的 $1/4$ 。

设置好边界条件,接下来为电极结构设置激励源,用来计算 S 参数(即为文章中 S_{21})。在电极结构中添加两个激励,一个为波端口激励(Wave Port),另一个为集总端口激励(Lumped Port)。波端口激励设置为与电极结构侧面共面的矩形,需要与地线和信号线接触,如图 4(b)中波端口激励外形所示,波端口激励是仿真模型与外界能

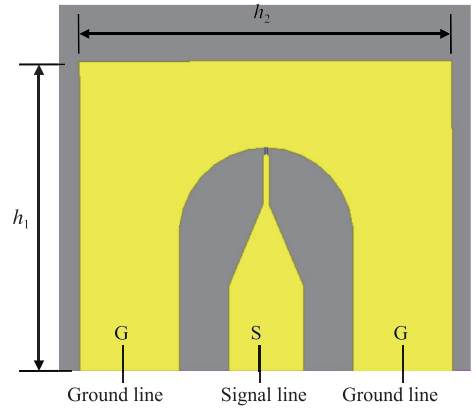


图 1 新型电极俯视图

Fig. 1 Top view of the new electrode

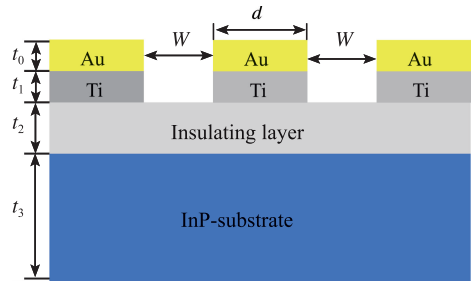


图 2 新型电极的侧视图

Fig. 2 Side view of the new electrode

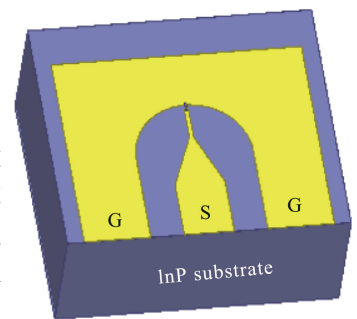


图 3 电极结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the electrode structure

量交换的窗口。集总端口激励设置在地线与信号线之间,如图 4(b)中集总端口激励外形所示,主要用于仿真模型内部的能量交换。

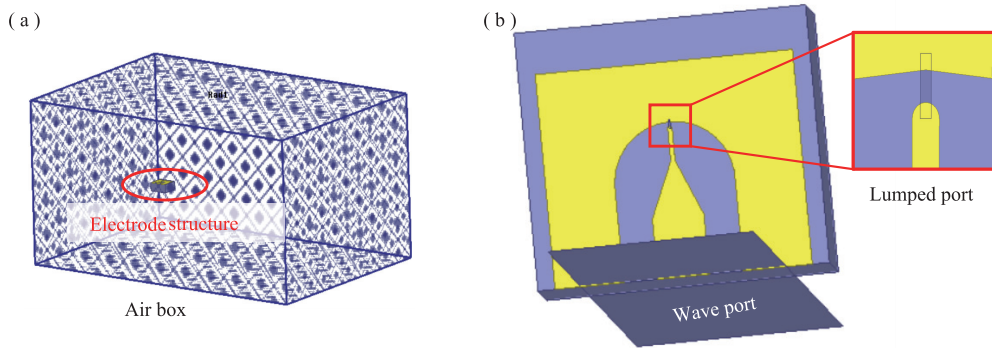


图 4 (a) 加入空气盒子后的电极结构;(b) 设置好激励后的电极结构

Fig. 4 (a) Electrode structure after adding air box; (b) Electrode structure after setting excitations

2.2.3 扫频参数设置。完成上述步骤后,需要在 HFSS 中设置扫频方式与扫频范围。扫频方式共有 3 种:快速扫频(Fast Frequency Sweep)、离散扫频(Discrete Frequency Sweep)和插值扫频(Interpolating Frequency Sweep)。作为经验准则,当最大频点与最小频点之比小于 4 时,扫频类型一般选择快速扫频;对于最大频点与最小频点之比大于 4 的宽带问题,扫频类型一般选择插值扫频;离散扫频通常较少使用,只在频点很少时才会使用。由于本设计的频率范围为 1~100 GHz,最大频点为 100 GHz、最低频点为 1 GHz,最大频点与最小频点之比大于 4,因此选取插值扫频模式进行运算。

2.3 基础电极的优化

基础电极结构包括衬底与 Au 电极部分。衬底厚度范围设置为 150~300 μm ,在该范围内每间隔 50 μm 进行一次仿真,结果如图 5 所示。传输损耗取频率为 100 GHz 时对应的纵坐标值,通过图 5(a)可以看出,衬底厚度为 150、200、250、300 μm 时,传输损耗 S_{21} 分别约为 -0.67、-0.88、-1.16、-1.28 dB,四个衬底厚度均满足 S_{21} 大于 -3 dB 的设计要求。特征阻抗取其随频率变化趋于平缓时对应的纵坐标值,通过图 5(b)可以看出,当衬底厚度为 300 μm 时(如浅蓝线所示),特征阻抗发生突变,不满足应用要求。当衬底厚度为 150、200、250 μm 时(分别如红线、绿线、蓝线所示),特征阻抗约为 50 Ω ,满足应用要求。综上所述,衬底厚度为 150 μm 时,传输损耗与特征阻抗性能最好,因此在本设计中将衬底厚度设置为 150 μm 。

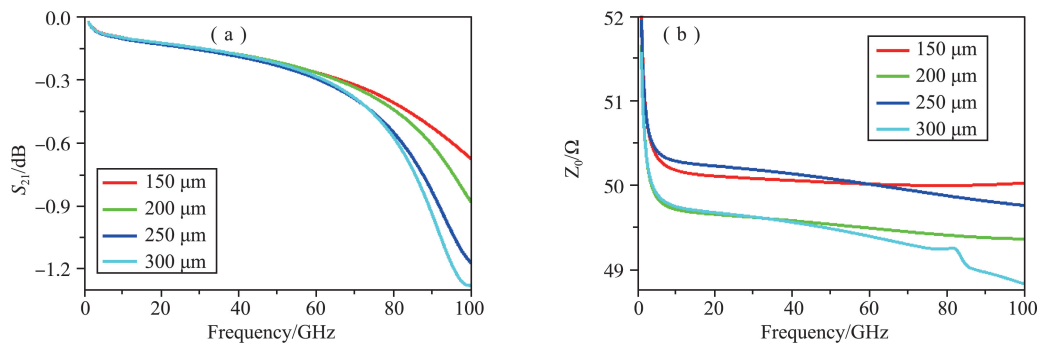


图 5 (a) 不同厚度衬底时电极的传输损耗;(b) 不同厚度衬底时电极的特征阻抗

Fig. 5 (a) Transmission loss of electrodes with different thickness substrates; (b) Characteristic impedance of electrodes with different thickness substrates

电极材料选取 Au,厚度从 0.1~0.5 μm 每间隔 0.1 μm 进行仿真。如图 6(a)所示,当电极厚度为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 μm 时,传输损耗分别约为 -1.5、-0.9、-0.65、-0.45、-0.67 dB,当电极厚度为 0.4 μm 时(如蓝线所示),传输损耗最低。如图 6(b)所示,不同厚度电极的特征阻抗差异不明显,在厚度为 0.2、0.3、0.4 μm 时更接近 50 Ω 。综上所述,本设计选择 Au 电极的厚度为 0.4 μm 。

2.4 新型低损耗电极的优化

2.4.1 绝缘层的设计与优化。为了更满足实验室制备 GSG 电极的实际需求,本设计在 GSG 大电极的金属层与 InP 衬底层之间加入绝缘层。在实际应用中,GSG 电极中绝缘层厚度通常在 $0.5\ \mu\text{m}$ 以内,因此本设计采用了厚度在 $0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 的绝缘层,并以间隔为 $0.1\ \mu\text{m}$ 进行遍历。制备中常用的绝缘材料有:聚乙烯(Polyethylene, PE)、BCB、二氧化硅(Silicon dioxide, SiO_2)、聚酰亚胺(Polyimide, PI)等。接下来,在 GSG 电极和 InP 衬底层之间分别加入不同绝缘层材料,对频率在 $100\ \text{GHz}$ 的电极特性进行分析。

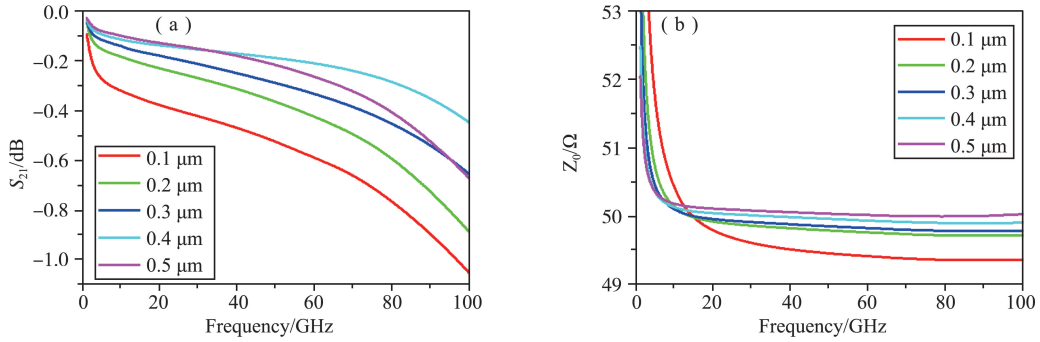


图 6 (a) 不同厚度电极对电极传输损耗的影响;(b) 不同厚度电极对电极特征阻抗的影响

Fig. 6 (a) Influence of electrode thickness on electrode transmission loss; (b) Influence of electrode thickness on characteristic Impedance of electrode

在图 7 中,展示了电极特性随 PE 厚度变化示意图。从图 7(a)可以看出,设置 PE 厚度为 $0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 且间隔为 $0.1\ \mu\text{m}$ 进行遍历,发现添加不同厚度的 PE 时电极的传输损耗仅有细微差别,当 PE 厚度为 0.1 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,电极传输损耗最优,约为 $-0.8\ \text{dB}$ 。从图 7(b)中可以看出,当 PE 厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 时,电极的特征阻抗约为 $49.2\ \Omega$,而当 PE 厚度为 0.2 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,电极特征阻抗约为 $51.4\ \Omega$ 。当绝缘层材料为 PE 时,选择厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的 PE 能够获得最佳的电极性能,因为此时电极传输损耗最优,且电极特征阻抗更贴近 $50\ \Omega$ 。

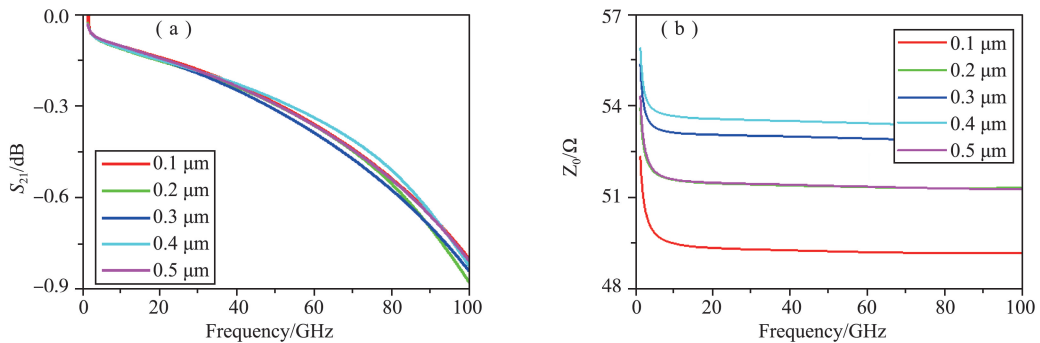


图 7 (a) 不同厚度聚乙烯(PE)下电极传输损耗;(b) 不同厚度聚乙烯(PE)下电极特征阻抗

Fig. 7 (a) Transmission loss of polyethylene electrode with different thickness; (b) Characteristic impedance of polyethylene electrode with different thickness

当绝缘层材料为 BCB 时,电极特性如图 8 所示。从图 8(a)可以看出,当 BCB 厚度为 $0.4\ \mu\text{m}$ 时,传输损耗最差,为 $-0.92\ \text{dB}$,而在 $0.5\ \mu\text{m}$ 时效果最好,达到 $-0.65\ \text{dB}$ 。而从图 8(b)可以看出,BCB 绝缘层厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 时,特征阻抗约为 $50\ \Omega$,而在 $0.5\ \mu\text{m}$ 时为 $51.5\ \Omega$, $0.3\ \mu\text{m}$ 时达 $54\ \Omega$ 。因此,电极中加入厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 BCB 不仅拥有特征阻抗贴近 $50\ \Omega$ 的良好特性,还具有遍历范围内最低的传输损耗。当绝缘层材料为 BCB 时,优先选用的厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$,此时电极的性能达到最佳。

当绝缘层材料为 SiO_2 时,电极特性随 SiO_2 厚度变化示意图如图 9 所示。从图 9(a)可以看出,当 SiO_2 厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,电极传输损耗约为 $-0.74\ \text{dB}$,效果最好。在图 9(b)中,当 SiO_2 厚度为 0.1 、 0.2 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,电极的传输损耗均贴近 $50\ \Omega$ 。当电极中加入厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 作为绝缘层时,电极不仅具有最优

的传输损耗,且电极特征阻抗贴近 $50\ \Omega$ 。因此,当绝缘层材料为 SiO_2 时,选取其厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$,电极的性能为最优。

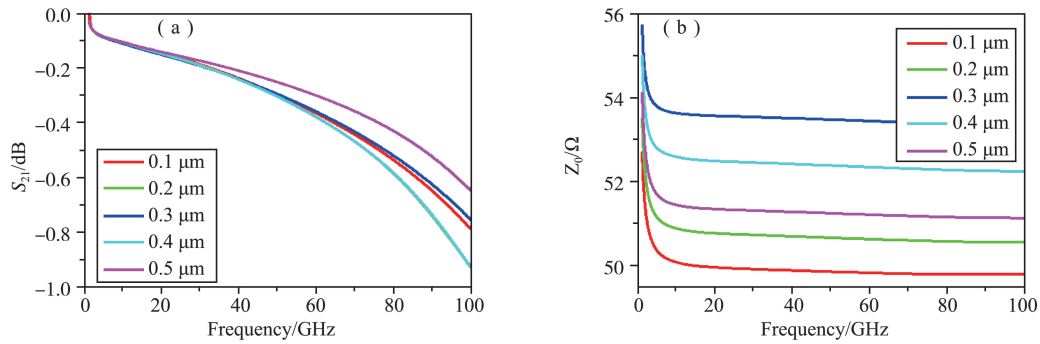


图 8 (a) 不同厚度苯并环丁烯(BCB)下电极的传输损耗;(b) 不同厚度苯并环丁烯(BCB)下电极的特征阻抗

Fig. 8 (a) Transmission loss of electrodes with different thickness of benzocyclobutene; (b) Characteristic impedance of electrodes with different thickness of benzocyclobutene

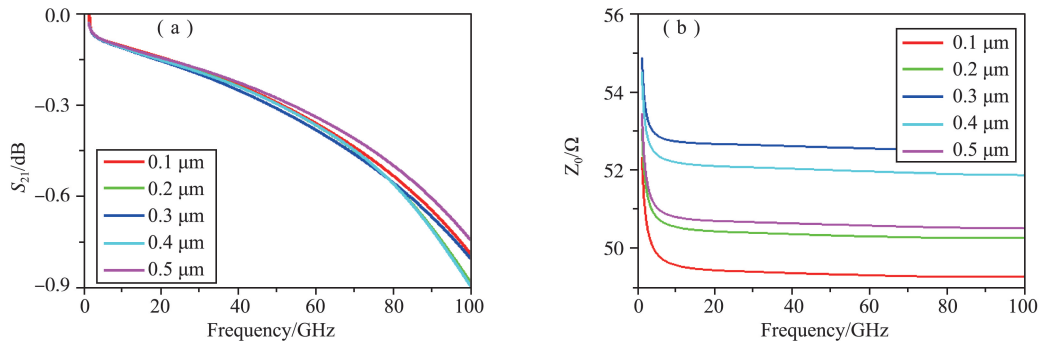


图 9 (a) 不同厚度二氧化硅(SiO_2)下电极的传输损耗;(b) 不同厚度二氧化硅(SiO_2)下电极的特征阻抗

Fig. 9 (a) Transmission loss of electrodes under different thicknesses of silica; (b) Characteristic impedance of electrodes with different thicknesses of silica

当绝缘层材料为 PI 时,电极特性如图 10 所示。从图 10(a)可以看出,添加不同厚度的 PI 并没有明显改变电极的传输损耗,当 PI 厚度为 0.1 、 $0.4\ \mu\text{m}$ 时,电极传输损耗性能最好,达到 $-0.89\ \text{dB}$,在 PI 厚度为 0.2 、 0.3 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,传输损耗均低于 $-0.92\ \text{dB}$ 。从图 10(b)可以看出,当 PI 厚度为 0.1 、 0.2 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,电极特征阻抗贴近 $50\ \Omega$ 。当电极中加入厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的 PI 作为绝缘层时,电极不仅具有最优的传输损耗,且电极特征阻抗贴近 $50\ \Omega$ 。当绝缘层材料为 PI 时,优先选取 PI 的厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$,此时电极性能最优。

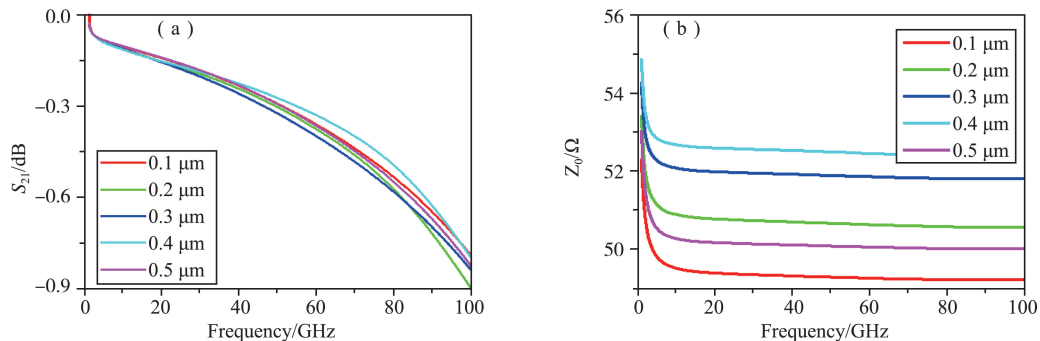


图 10 (a) 不同厚度聚酰亚胺(PI)下电极的传输损耗;(b) 不同厚度聚酰亚胺(PI)下电极的特征阻抗

Fig. 10 (a) Transmission loss of polyimide electrode with different thickness; (b) Characteristic impedance of polyimide electrode with different thickness

分别选取上述 4 种材料中每种综合性能最好的电极,并进行对比分析。当绝缘层为 PE 时,添加厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 时电极性能最优;当绝缘层为 BCB 时,添加厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 时电极性能最优;当绝缘层为 SiO_2 时,添

加厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 时电极性能最优;当绝缘层为 PI 时,添加厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 时电极性能最优。图 11(a)显示了添加不同绝缘层材料时电极的传输损耗。由图可知,添加厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 BCB 时,电极传输损耗最优,约为 $-0.65\ \text{dB}$ 。图 11(b)展示了添加不同绝缘层材料时电极的特征阻抗。由图可知,添加不同的绝缘层材料后,电极的特征阻抗均在 $50\ \Omega$ 附近。综合考虑,添加厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 BCB 时,电极不仅具有最低的传输损耗,而且特征阻抗也在 $50\ \Omega$ 附近,因此选取添加厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 BCB 来参与电极优化。

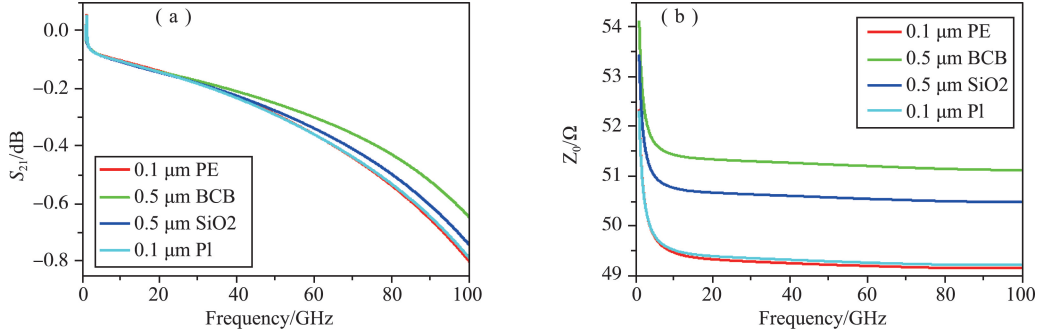


图 11 (a) 不同绝缘层材料下电极的传输损耗; (b) 不同绝缘层材料下电极的特征阻抗

Fig. 11 (a) Transmission loss of electrodes under different insulating layer materials; (b) Characteristic impedance of electrode under different insulating layer materials

2.4.2 复合金属电极的设计与优化。Ti 层的引入是为了增加绝缘层与金属层之间的附着力,防止电极脱落。实验室采用的 Ti 层厚度一般不低于 $0.05\ \mu\text{m}$,因此在该结构中引入的 Ti 层厚在 $0.06\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间,且间隔为 $0.01\ \mu\text{m}$ 。加入 Ti 层的电极特性随 Ti 层厚度的变化如图 12 所示。从图 12(a)可以看出,在 $0\sim 20\ \text{GHz}$ 之间,电极的传输损耗变化不明显,在 $20\ \text{GHz}$ 后电极传输损耗出现明显差别,且加入厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 时 Ti 层电极的传输损耗特性最好。而从图 12(b)可以看出,在 $30\ \text{GHz}$ 之前,电极中加入厚度为 $0.07\ \mu\text{m}$ 的 Ti 层的特征阻抗最好,而在 $30\sim 100\ \text{GHz}$ 之间,电极中加入厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的 Ti 层的特征阻抗最贴近 $50\ \Omega$ 。综合考虑,选择厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的 Ti 层参与电极的优化。

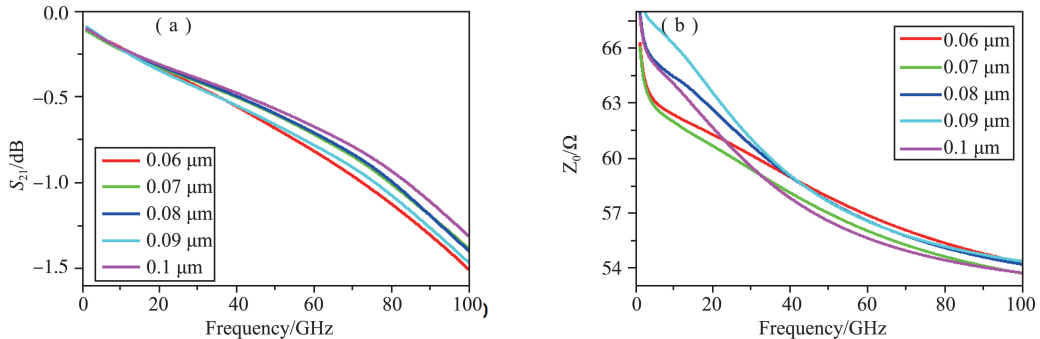


图 12 (a) 不同厚度 Ti 层下电极的传输损耗; (b) 不同厚度 Ti 层下电极的特征阻抗

Fig. 12 (a) Transmission loss of electrode under Ti layer of different thickness; (b) Characteristic impedance of electrode under Ti layer of different thickness

经过上述设计与优化,本文中电极结构对各种层结构材料和厚度的选取如下:衬底选取厚度为 $150\ \mu\text{m}$ 的 InP,电极层选取厚度为 $0.4\ \mu\text{m}$ 的 Au,绝缘层选取厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 BCB,金属粘合层选取厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的 Ti 金属。

2.4.3 沟槽结构电极的设计与优化。光探测器的传输损耗由金属导体损耗 α_c 和介质衬底损耗 α_d 构成,总传输损耗 α 与介质衬底损耗 α_d 分别为^[27]

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d, \quad (1)$$

$$\alpha_d = \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{\epsilon_r}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} q \tan \delta_e, \quad (2)$$

式中 q 为填充因子, $\tan\delta_e$ 为损耗正切值, ϵ_r 为衬底的介电常数, ϵ_{eff} 为整体的有效介电常数, ϵ_r 与 ϵ_{eff} 关系为

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 + q(\epsilon_r - 1), \quad (3)$$

由公式(2)和(3)可知,衬底的介电常数会影响整体的有效介电常数,进而会影响介质衬底损耗。

由此,可以通过改变衬底的介电常数以减小整体的有效介电常数,能够达到减小介质衬底损耗的效果。考虑在衬底和绝缘层上加入微结构,不但可以抑制电磁耦合,还可以起到降低衬底的介电常数、减小插入损耗的效果^[28]。本文中设计了矩形槽结构,有效提升了电极性能。

具有矩形槽结构的电极如图 13(a)所示,在地线与信号线之间加入矩形槽结构,由于探测器为台面结构,需要将矩形槽结构的长度设置为信号线底部矩形的高,其长度设置为 $70\ \mu\text{m}$ 。添加矩形槽结构的侧视图如图 13(b)所示,矩形槽结构的宽度为 a ,高度为 b 。图 13 给出了具有矩形槽结构的电极在 HFSS 下的仿真设置,其中 13(c)为加入空气盒子后的电极,而 13(d)则是设置好集总端口激励和波端口激励的电极结构。

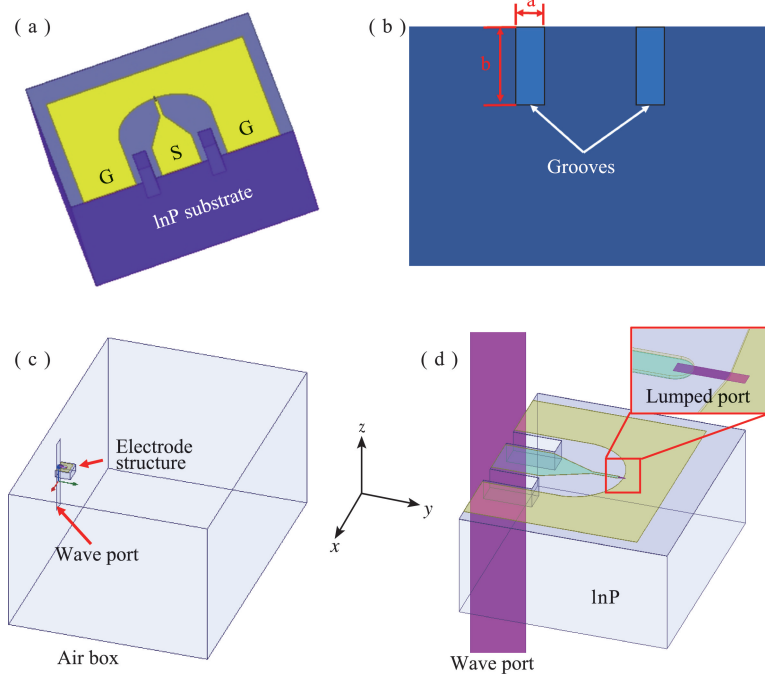


图 13 (a) 具有矩形槽结构的电极; (b) 矩形槽结构侧视图; (c) 加入空气盒子后的具有矩形槽结构的电极; (d) 设置好激励后的具有矩形槽结构的电极结构

Fig. 13 (a) Electrode with rectangular groove structures; (b) Side view of the rectangular groove structure; (c) Electrode with rectangular groove structure after adding air box; (d) Electrode with rectangular groove structure after setting excitations

确定好矩形槽结构的长度之后,考虑设置矩形槽结构的宽度 a 与高度 b 来进行性能优化。本文选择了 6 组具有代表性的宽度和高度数据(如表 1 所示)进行性能仿真分析。

图 14 展示了 6 组不同矩形槽宽度 a 和高度 b 的仿真结果,从图中可以看出当 $a = 30\ \mu\text{m}$ 、 $b = 40\ \mu\text{m}$ 时,传输损耗最低,大致为 $-1.15\ \text{dB}$,较未优化前的 $-1.32\ \text{dB}$ 提升了 $0.17\ \text{dB}$,因此沟槽参数选取该组数据。在针对矩形槽的遍历过程中,实际尝试了更多组数据,发现加大矩形槽的体积可以无限降低电极的传输损耗,但是通过研究矩形槽大小对器件 $3\ \text{dB}$ 带宽性能的影响,发现当 a 为 $30\ \mu\text{m}$ 、 b 为 $40\ \mu\text{m}$ 时,光探测器带宽最高,且此时矩形槽体积相对较小,更容易制备。

3 电极与光探测器等效电路的联合仿真设计

对光探测器的传统设计方法通常聚焦于外延层结构、掺杂等参数的优化,但事实表明,电极对探测器整

表 1 沟槽结构的设置参数表

Tab. 1 Setting parameters of the groove structure

$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$
10	10	20	30
15	15	30	30
20	20	30	40

体性能的影响是不可忽视的。将光探测器内部结构与外部电极进行联合仿真,可以同时优化器件性能参数,减少繁琐的实验制备尝试,降低成本。本文基于光探测器等效电路并使用联合仿真技术,将在 HFSS 中优化好的电极参数导入 ADS 软件进行光探测器性能的联合仿真,最终获得光探测器性能的提升。

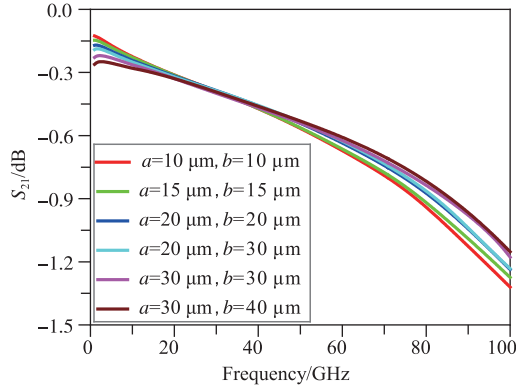


图 14 不同尺寸沟槽电极的传输损耗

Fig. 14 Transmission loss of different size grooved electrodes

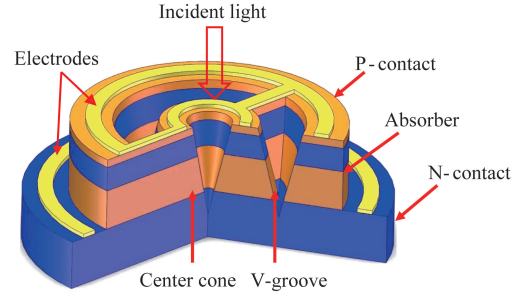


图 15 文献中的 PIN 光探测器结构图^[29,30]

Fig. 15 Schematic diagram of the PIN photodetector in literature^[29,30]

基于本实验室已研制的 PIN 光探测器进行与电极的联合设计优化^[29,30],该光探测器结构如图 15 所示。器件的有源区直径为 36 μm ,光探测器结构自上而下分别为:厚度为 50 nm 的 InGaAs 欧姆接触层、厚度为 250 nm 的高掺杂(P^+)InP、厚度为 1 300 nm 的 InGaAs 本征吸收层、厚度为 300 nm 的高掺杂(N^+)InP,并在光探测器有源区台面中心加入倒锥形槽结构,并在倒锥形槽结构周围加入 V 型槽结构。

$$\frac{1}{f_{3\text{ dB}}^2} = \frac{1}{f_{3\text{ dB, tr}}^2} + \frac{1}{f_{3\text{ dB, RC}}^2}, \quad (4)$$

$$f_{3\text{ dB, RC}} = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (5)$$

$$C = C_p + C_j, C_j = \frac{\epsilon A}{W}, \quad (6)$$

从式(4)可以看出, PIN 光探测器的 3 dB 带宽由载流子渡越时间限制带宽 $f_{3\text{ dB, tr}}$ 和 RC 时间限制带宽 $f_{3\text{ dB, RC}}$ 共同决定。其中, R 为器件的串联电阻,取值为 50 Ω ; C 为总电容,由外部寄生电容 C_p 与结电容 C_j 共同决定; ϵ 为 InGaAs 的介电常数; A 为有源区面积; W 为耗尽区厚度。当在上述 PIN 光探测器中加入微结构后,有源区面积减小,使得电容减小,进而扩大了 $f_{3\text{ dB, RC}}$,最终达到提升器件 3 dB 带宽的目的,并将器件的 3 dB 带宽从 18 GHz 提升至 21.72 GHz。

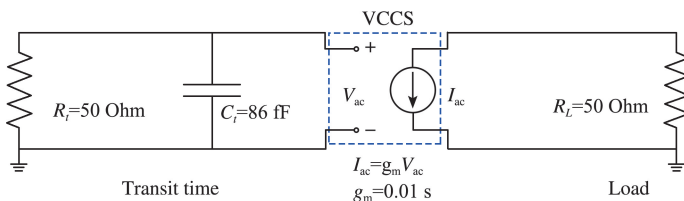


图 16 光探测器 RF 小信号等效电路模型

Fig. 16 RF small-signal equivalent circuit model for photodiodes

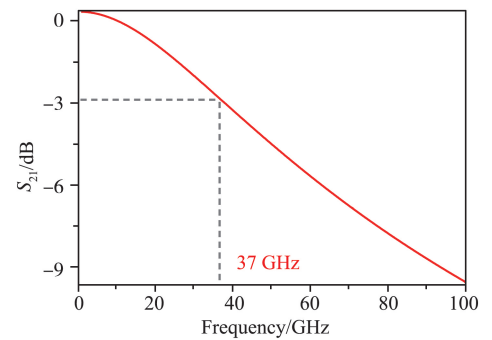


图 17 用 ADS 拟合得到的载流子渡越时间限制带宽

Fig. 17 Carrier transition time limited bandwidth fitted by ADS

在进行联合仿真之前,为了得到最终电路的部分元件参数,可以利用图 16 所示的 RF 小信号等效电路模型来确定。通过修改图 16 中的元件参数,当得到与引用文献一致的载流子渡越时间限制带宽时,就可以

确定光探测器的 R_i 与 C_i 值。然后使用 ADS 软件对器件的渡越时间限制带宽进行仿真,结果如图 17 所示,渡越带宽约为 37 GHz,与文献中锥形半径为 5 μm 时得到的载流子渡越时间限制带宽非常吻合^[29,30],此时便可以确定 R_i 与 C_i 的取值,其中 R_i 为 50 Ω , C_i 为 86 fF,负载电阻 R_L 通常设定为 50 Ω 。

设计好的光探测器与电极联合仿真电路如图 18 所示,左端为输入端,右端为输出端,结电容 C_j 与结电阻 R_j 通过计算所得。其中,结电阻 R_j 一般设置为 500 M Ω ,负载电阻 R_L 为 50 Ω ,欧姆接触电阻 R_s 与空气桥电感 L_b 参数是通过实验室加工经验所得,在本设计中分别为 12 Ω 和 25 pH。S2P 文件由 HFSS 仿真得出,里面包含 CPW 变量设置以及频率、S 参数、幅度和相位等参数的求解。

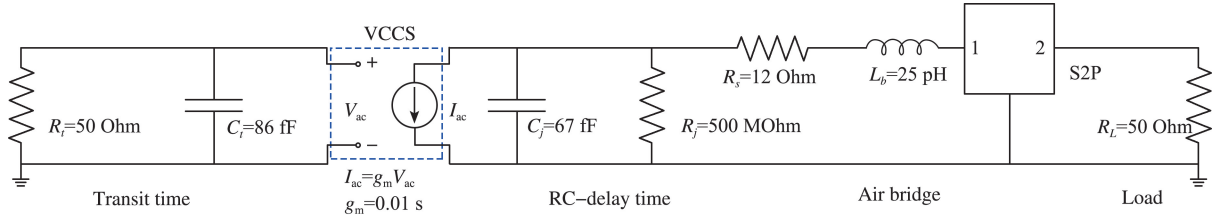


图 18 光探测器与电极联合仿真电路模型

Fig. 18 Photodetector-electrode co-simulation circuit model

将设计好的电极与探测器等效电路结合,频率从 1~100 GHz 每间隔 0.1 GHz 扫描一次,可以拟合出器件的 3 dB 带宽,如图 19 所示。未使用本文设计低损耗电极时,光探测器 3 dB 带宽约为 21.72 GHz^[29,30],而引入该低损耗电极后的光探测器 3 dB 带宽为 28.5 GHz,较未引入电极前提升了近 7 GHz。

4 结论

通过优化介质衬底与金属层厚度、增加绝缘层、增加金属层以及在介质衬底上引入矩形槽的方法,本文设计了一款新型低损耗的光探测器电极。经过大量的仿真与分析,该电极结构实现了一 1.15 dB 的传输损耗,在光探测器领域具有较高的应用价值,并对设计光探测器的电极提供了参考。为了验证该电极结构能够进一步提升光探测器高速性能,本文采用了光探测器等效电路与电极联合仿真的技术。将一种具有微孔-槽结构的 PIN 光探测器等效成电路与本文设计的电极进行联合仿真,最终结果表明该电极将光探测器的 3 dB 带宽提升了近 32%。

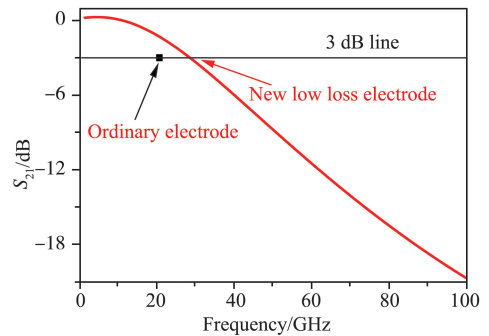


图 19 联合仿真 3 dB 带宽图

Fig. 19 Co-simulation 3 dB bandwidth diagram

参 考 文 献

- [1] WINZER P J, NEILSON D T. From scaling disparities to integrated parallelism: a decathlon for a decade[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(5): 1099-1115.
- [2] CHEN Q, ZAHNG X, SHARAWI S M, et al. Advances in high-speed, high-power photodiodes: from fundamentals to applications[J]. Applied Sciences, 2024; 14(8):3410.
- [3] 顾晓仪, 黄永清, 陈雪, 等. 光纤通信[M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [4] 陈庆涛. 光通信系统中新型单行载流子光探测器的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [5] 陈静. 光通信中高性能光探测器的结构优化及特性研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [6] LI J, XIONG B, LUO Y, et al. Ultrafast dual-drifting layer uni-traveling carrier photodiode with high saturation current[J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8420-8428.
- [7] NIU H, HUANG Y, YANG Y, et al. Influence of the incident optical field distribution on a high-speed PIN photodetector and horizontal optimization[J]. Applied Optics, 2021, 60(3): 727-734.
- [8] CHEN Q, FANG W, HUANG Y, et al. Uni-traveling-carrier photodetector with high-contrast grating focusing-reflection mirrors[J]. Applied Physics Express, 2020, 13(1): 016503.

- [9] MENG Q, WANG H, LIU C, et al. High-speed and high-responsivity InP-based uni-traveling-carrier photodiodes[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2017, 5(1): 40-44.
- [10] CHEN Q, HUANG Y, ZHANG X, et al. Uni-traveling-carrier photodetector with high-reflectivity DBR mirrors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(14): 1203-1206.
- [11] 王绍宇. 高速光探测器电极模型优化设计及其传输性能的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- [12] LIU T, HUANG Y, FEI J, et al. Influences of contact electrode shape and incidence direction on p-i-n photodiodes[J]. IET Optoelectronics, 2019, 13(4): 151-154.
- [13] 焦泓玮, 黄永清, 赵康, 等. 叉状光电探测器阵列电极的设计与优化[J]. 光子学报, 2019, 48 (11): 175-181.
- [14] MATTHEWM R. Radio Frequency and Microwave Electronics Illustrated[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2001.
- [15] ERIC B. Signal Integrity-Simplified[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2003.
- [16] 赵康. 光纤通信中高速大功率光探测器阵列的电极模型设计及传输性能的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [17] 焦泓玮. 光通信中高速光探测器的电极传输线设计及其性能的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [18] KATO K. Ultrawide-band/high-frequency photodetectors[J], IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 1999, 47(7): 1265-1281.
- [19] BELING A. Periodic travelling wave photodetectors with serial and parallel optical feed based on InP[D]. Berlin: Technical University of Berlin, 2006.
- [20] NAGATSUMA T, ITO H, ISHIBASHI T. High-power RF photodiodes and their applications[J]. Laser and Photonics Reviews, 2009, 3(1-2): 123-137.
- [21] 刘宇, 林志诚, 王鹏飞, 等. 超宽带光电探测器研究进展[J]. 红外与毫米波学报, 2023, 42(2): 169-187.
- [22] 吴培培, 付永启, 杨俊. 基于表面等离子激元的石墨烯光电探测器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0700002.
- [23] HAN Y R, XIONG B, LUO Y, et al. Distributed parameter circuit model for wideband photodiodes with inductive coplanar waveguide electrodes[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(6): 061301.
- [24] WANG S Y, HUANG Y Q, REN X M. Research on the groove structure of InP-based photodetector electrode[C]. // 20th International Conference on Optical Communications and Networks, August, 2022, Shenzhen, ICOCN, 2022.
- [25] LI Q, LI K, FU Y, et al. High-power flip-chip bonded photodiode with 110 GHz bandwidth[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(9): 2139-2144.
- [26] 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [27] 田建柏, 熊兵, 王健, 等. 应用于 40 GB/s 电吸收调制器的 Al₂O₃ 高速热沉研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006(2): 105-108.
- [28] 付佳辉, 吴群, 顾学迈. 微机械传输线的毫米波应用[J]. 电子器件, 2003, 26(2): 6-15.
- [29] NIU H, HUANG Y, Yang Y, et al. High bandwidth-efficiency product MPIN photodiode with parallel-connected microstructure[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2020, 56(5): 1-5.
- [30] 牛慧娟. 基于光场调控和微结构的高性能光探测器的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.

(责任编辑:赵海军)

(上接第 13 页)

- [22] AHMAD R, SRIVASTAVA A. Sequential load balancing for link aggregation enabled heterogeneous LiFi WiFi network[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2022, 3: 138-148.
- [23] 郑浩天, 季新生, 黄开枝, 等. 基于等效 SINR 的 VLC 与 WiFi 垂直切换算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(3): 832-835.
- [24] ZHANG H, LIU H X, CHEN P, et al. Cycle-based end of queue estimation at signalized intersections using low-penetration-rate vehicle trajectories[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(8): 3257-3272.
- [25] SEKHAR K R, MIRAMIRKHANI F, MITRA R, et al. Generic BER analysis of VLC channels impaired by 3D user-mobility and imperfect CSI[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(7): 2319-2323.
- [26] WANG Y, CHEN W, POOR H V. Ultra-reliable and low-latency wireless communications in the high SNR regime: a cross-layer tradeoff[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(1): 149-162.
- [27] ZHAN N, GAN C, HUI J, et al. Fair resource allocation based on user satisfaction in multi-OLT virtual passive optical network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 134707-134715.
- [28] XU Z, GAN C, WU L, et al. Self-adaptive resource-allocation scheme combining traffic prediction with user satisfaction in multi-wavelength VPON[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 1-12.
- [29] CHATTERJEE S, SABUI D, KHAN G S, et al. Signal to interference plus noise ratio improvement of a multi-cell indoor visible light communication system through optimal parameter selection complying lighting constraints[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2021, 32 (10): 4291.

(责任编辑:赵海军)