微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022012903

超宽带光电子芯片技术研究

熊 兵*，刘学成，晁恩飞，孙长征，韩彦军，
王 健，郝智彪，汪 莱，李洪涛，罗 毅
（清华大学 电子工程系/北京信息科学与技术国家研究中心，北京 100084）

摘 要： 超宽带光电子芯片是下一代无线通信、先进电子信息装备中光纤传输与信号处理的关键元器件，芯片中光子、电子、电磁场之间的相互作用是决定芯片性能的核心因素。文章通过介绍超宽带光电探测器芯片、电光调制器芯片等方面的研究进展，分享课题组在破解上述核心科学问题、提高芯片性能的关键技术方案。

关键词： 光电子芯片；光探测器；电光调制器

中图分类号： TN36 **文章编号：** 1001－5868(2022)01－0056－05

Research on Ultra-Broadband Optoelectronic Devices

XIONG Bing, LIU Xuecheng, CHAO Enfei, SUN Changzheng, HAN Yanjun,
WANG Jian, HAO Zhibiao, WANG Lai, LI Hongtao, LUO Yi
(National Research Center for Information Science and Technology/Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, CHN)

Abstract: Ultra-broadband optoelectronic devices are key components for optical fiber transmission and processing signals in next-generation wireless communications and advanced electronics systems. The interactions between photons, electrons, and electromagnetic fields are the fundamental problems to determine performance of broadband optoelectronic devices. In this article, our recent progresses in ultra-wideband photo-detectors and electro-optic modulators are introduced to share key technical solutions of such problems to improve the device performance.

Key words: optoelectronic devices; photodetectors; optical modulators

0 引言

随着6G无线通信、先进电子信息装备中微波信号传输、产生和处理的工作频率和瞬时带宽不断增长，微波光子技术研究得到了越来越多的关注和应用，特别是超宽带微波光子技术及其核心光电子器件成为业界的研究热点之一[1-2]。例如，在面向6G的宽带无线通信中，采用超宽带光电探测器芯片结合光源设计有望实现载波大范围扫描、超大瞬时带宽的微波、毫米波信号，采用超宽带电光调制器＋光纤可以实现低噪声、超宽带的毫米波信号高保真接收和传输等。随着技术的发展，带宽超过100 GHz的超宽带光电探测器芯片、电光调制器芯片也相继被研究报道。

在探测器方面，基于单行载流子结构的光电探测器(Uni-Traveling-Carrier Photodiode)主要依靠快速的电子输运过程，具有宽带优势，因此是超宽带光电探测器的主流技术[3]。针对未来系统的应用需求，光电探测器除要求带宽提升外，高频下的更高输出功率也同样重要，但二者之间存在一定矛盾。要破解这一矛盾，进一步加快光生载流子输运、在同等光电流条件下减小载流子密度是主要路径。在之前的相关超宽带UTC探测器文献中，研究人员提出

收稿日期：2022－01－29.
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFB2201701)；国家自然科学基金项目(61927811).
* **通信作者：**熊 兵 **E-mail：** bxiong@tsinghua.edu.cn

了改进型单行光电二极管(MUTC-PD)结构[4]，将原本全部重掺杂的吸收区，变为部分轻掺杂的耗尽区，以加速光生电子的输运。例如，美国弗吉尼亚大学 Campbell 研究组报道的台面结构 MUTC-PD，在 160 GHz 带宽下输出功率为－2.6 dBm[5]。

在超宽带电光调制器方面，基于绝缘体上铌酸锂薄膜材料(LNOI)的薄膜铌酸锂调制器，较传统铌酸锂波导形成了强限制光波导结构，从而显著降低了器件长度，提高了芯片带宽。目前主流的调制器方案是利用 X 切薄膜铌酸锂脊波导以及共面波导电极形成并联推挽驱动的结构，例如 2018 年哈佛大学报道的薄膜铌酸锂调制器，在 5 mm 长度器件上实现了 4.4 V 半波电压，带宽为 100 GHz[6]；2021 年北京大学报道了在 5 mm 长度器件上实现 4.74 V 的半波电压、带宽超过 110 GHz 的超带宽调制器芯片[7]。

本文将介绍本课题组近年来在超宽带光电子芯片研究方面的进展情况。在超宽带光电探测器芯片方面，提出吸收耗尽区电场分布优化加速电子输运过程、感性共面波导电极结构调控芯片频率响应等关键技术，在超宽带性能、饱和功率特性提升方面获得了显著进展。在超宽带光调制器芯片方面，提出薄膜铌酸锂-二氧化硅混合波导结构、周期容性加载行波电极结构等关键技术，在降低器件半波电压、提高器件带宽等方面突破了技术瓶颈。

1　超宽带 MUTC 光电探测器芯片[8-9]

如前所述，要实现超宽带光电探测器芯片，必须加快光生载流子的输运。但除了载流子输运限制带宽以外，RC 常数对探测器的带宽限制也十分关键。对于超高速光电探测器芯片，为了追求较快的载流子输运，其耗尽区往往较薄，但这会造成器件的电容变大，导致 RC 限制的带宽越来越成为主要瓶颈。因此，设计合适的器件材料和 RF 电极传输结构对于补偿电容和优化最终的频率响应变得更为重要。

我们设计的台面 MUTC-PD 外延结构如图 1 所示，InGaAs 吸收层的总厚度为 180 nm，以确保足够的光吸收，整个耗尽区厚度为 250 nm，以缩短光生电子的运输时间，同时在 p 型吸收区采用梯度掺杂，以建立内建电场，帮助加快光生电子扩散。需要优化耗尽吸收层(图中绿色部分)的比例(厚度 x)，而耗尽区的总厚度在模拟过程中是固定的(250 nm)。

50 nm p^+-InGaAs,$2\times10^{19}cm^{-3}$
400 nm p^+-InP,$>2.5\times10^{18}cm^{-3}$
(90−0.5x)nm p^+-InGaAs,$5\times10^{18}cm^{-3}$
(90−0.5x)nm p^+-InGaAs,$1\times10^{18}cm^{-3}$
0.5x nm p^--InGaAs,$2.5\times10^{17}cm^{-3}$
0.5x nm p^--InGaAs,$1\times10^{16}cm^{-3}$
10 nm n^--InGaAs(Q1.4),$1\times10^{16}cm^{-3}$
10 nm n^--InGaAs(Q1.1),$1\times10^{16}cm^{-3}$
10 nm n^+-InP,$1\times10^{17}cm^{-3}$
(250−30−x) nm n^--InP,$1\times10^{16}cm^{-3}$
400 nm n^+-InP,$1\times10^{19}cm^{-3}$
20 nm n^+-InGaAs,$2\times10^{19}cm^{-3}$
500 nm n^+-InP,$1\times10^{19}cm^{-3}$
400 nm n^+-InP缓冲层,$>1.5\times10^{18}cm^{-3}$
SI-InP衬底

图 1　MUTC-PD 的外延结构

当耗尽吸收层的厚度为零时，仿真带宽相对较低(180 GHz)，此时即传统 UTC-PD 结构；然后随着耗尽吸收区增大，带宽将逐渐增加到最大值 450 GHz，厚度 x 在 100～120 nm。但厚度继续增加时，空穴传输的延迟成为主要限制，输运带宽逐渐降低到 330 GHz，因此最终选取吸收耗尽区设计厚度为 100 nm。

为了设计合适的 RF 传输电极并完全模拟出探测器带宽，我们采用图 2 所示的电路模型。首先，拟合区域 1 的 S_{21} 参数，使之与前面模拟的载流子渡越响应一致，提取代表传递时间延迟的参数 R_t 和 C_t 的值，获得 $R_t=32.7\ \Omega$ 和 $C_t=11.8$ fF。再根据探测器的结面积和材料介电常数，计算分别代表 InGaAs 耗尽吸收区和 InP 耗尽区的电容 C_u 和 C_j，串联电阻 R_1 和 R_2 分别设置为 3 和 5 Ω，并且寄生电容 C_p 估算为 10 fF。

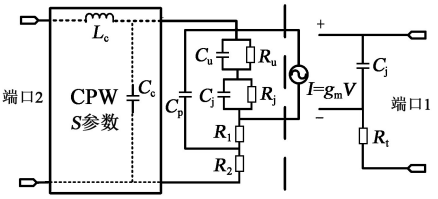


图 2　探测器频率响应仿真电路模型

如前所述，由于器件超薄耗尽区具有较大的电容，故而需要仔细优化共面波导(CPW)结构来调控频率响应的线型以提升器件带宽。我们先采用电路模型获得器件的本征频率响应，在此基础上研究了不同阻抗的 CPW 电极对频率响应的调谐作用。以直径为 4.5 μm 的器件为例，其对频响的调谐作用

如图 3 所示：可以看到随着传输线阻抗的变化，对频响的改善作用明显，其感性峰值的频率和强度都随着阻抗而改变。我们需要对完整的 CPW 结构进行系统设计：首先在电路中进行原理设计，然后采用基于有限元分析的三维电磁场仿真获得 CPW 电极的 S 参数，然后带回到上述电路模型中进行验证，以获得不同直径器件所需的频率响应优化结果。

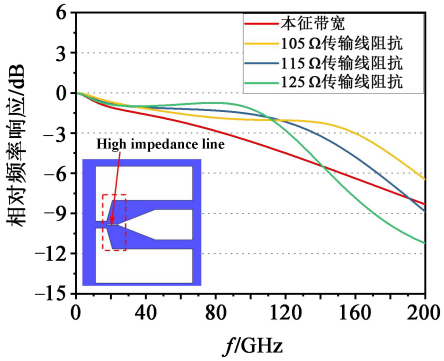


图 3 传输线的高阻抗对频率响应的调谐作用

在此基础上，我们进行了材料外延生长和工艺制作，直径 4.5 μm 器件的显微镜照片如图 4 所示。

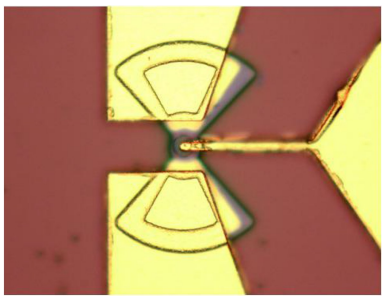


图 4 探测器芯片显微镜照片

台面直径为 4.5 μm 探测器芯片的频率响应测试曲线如图 5 所示。该器件的 3 dB 带宽达到 150 GHz@3 V-10 mA，响应度为 0.165 A/W，仿真曲线与实验结果吻合良好。此外，我们可以看出，器件从 140 GHz左右开始产生频率滚降，从直流到 170 GHz 时的功率滚降仅仅只有 4.6 dB，与设计基本吻合。

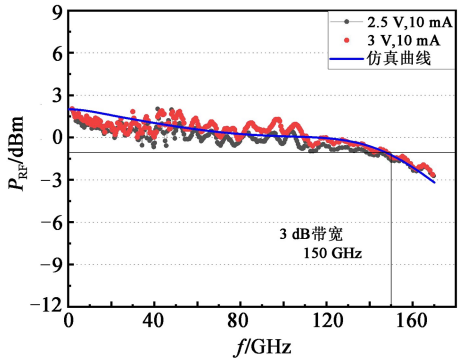


图 5 直径 4.5 μm 探测器芯片频率响应测试结果

在器件的 3 dB 带宽频点即 150 GHz 处进行了饱和功率性能测试，测试结果如图 6 所示。结果显示，在反向偏压为 3.5 V 时，饱和电流为 14.6 mA，RF 输出功率 P_{RF} 为 1.93 dBm。

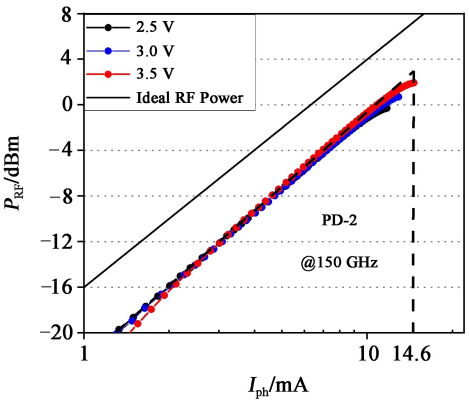


图 6 直径 4.5 μm 探测器芯片饱和特性测试结果

2 超宽带薄膜铌酸锂调制器芯片[10-11]

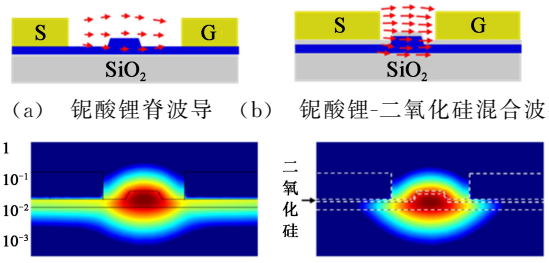
在超宽带光调制器芯片方面，我们提出了薄膜铌酸锂-二氧化硅混合波导结构、周期容性加载行波电极结构等关键技术，在降低器件半波电压、提高器件带宽等方面显著突破了技术瓶颈。

对于并联推挽驱动的 X 切型薄膜铌酸锂调制器来说，电极放置于光波导两侧实现水平方向的电场加载，调制效率会随着电极间距的减小而升高，但是电极间距减小会增加电极对于光场的吸收损耗。我们利用有限元方法进行光场横截面的模场分析，发现窄间距的电极会激励起电极底部与铌酸锂平板层之间的表面等离子体激元(SPP)模式，从而导致电极底部光场强烈吸收，这将成为光波导损耗的主要来源[10]。

为此，我们提出在薄膜铌酸锂脊波导上沉积二氧化硅薄层以形成铌酸锂-二氧化硅混合波导结构，二氧化硅层可将电极材料与铌酸锂平板层分隔开来，从而抑制 SPP 模式及其引入的损耗问题。经过优化设计，制作出混合光波导结构，如图 7 所示：在 600 nm 厚的铌酸锂薄膜层上刻蚀形成 1 μm 宽、300 nm 深的脊波导，并沉积 100 nm 厚的二氧化硅层，实现 3 μm 电极间距；调制器芯片的半波电压长度积为 1.6 V·cm[10]。

对于普通薄膜铌酸锂调制器的共面波导行波电极(CPW-TWE)来说，为了保证阻抗匹配，减小电极间距就需要减小信号电极宽度。但信号电极宽度减

小、横截面积减小，则会导致金属表面电阻增大，微波损耗将随之增大。



（a）　铌酸锂脊波导　（b）　铌酸锂-二氧化硅混合波导

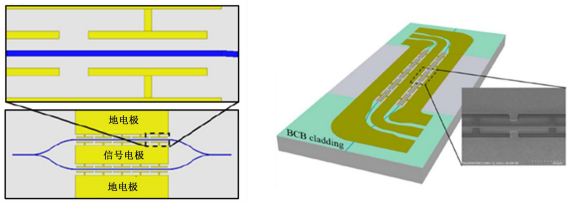
（c）　电极间距 3 μm 下光场分布(对数坐标)

（d）　半波电压测试曲线

图 7　薄膜铌酸锂-二氧化硅混合波导结构及调制器半波电压测试曲线

为解决这个问题，我们率先提出了在薄膜铌酸锂器件中采用周期容性加载行波电极（CL-TWE）[10-11]（获授权发明专利 ZL202010021720.1）以同时实现高效率和低损耗微波加载，如图 8 所示。此创新方案的原理是：通过在低损耗 CPW-TWE 的电极间隙之间加载微结构的窄间距 T 型电极，保证 T 型电极间距不变来实现高强度电场加载；同时增大信号电极宽度和未加载电极间距来满足阻抗匹配条件，由于信号电极宽度增大、表面电阻减小，从而降低了微波损耗。此方法将微波低损耗传输与高强度电场加载解耦合，则同时实现了低半波电压以及大调制带宽。

CL-TWE 本身还是一种微波慢波结构，会降低微波速度，所以我们又提出采用低介电常数石英衬底来实现微波与光波的速度匹配。同时还在实验中发现，与 Si 衬底的薄膜铌酸锂芯片相比，采用高绝缘的石英衬底可以避免硅衬底中界面电荷造成附加损耗，有助于实现微波的低损耗传输。上述精心设计的 CL-TWE 结构发明对于提高薄膜铌酸锂调制器带宽非常重要，国内外多家研究小组如哈佛大学[12]、中山大学相继引用和借鉴这一结构，并取得了带宽提升的显著效果。

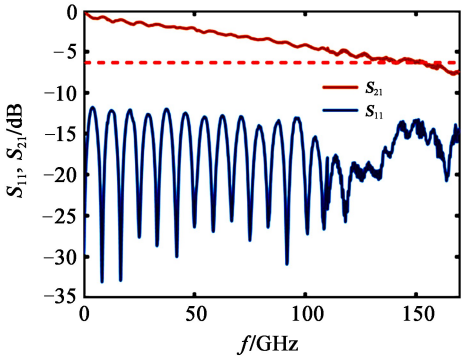


（a）　原理图　　（b）　局部放大图

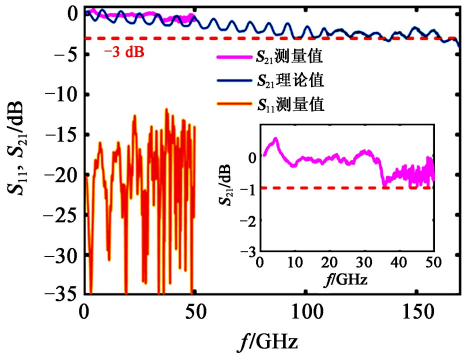
图 8　薄膜铌酸锂器件中引入周期容性加载行波电极

最近，我们在 8 mm 长的薄膜铌酸锂调制器器件上实现了超过 150 GHz 的测试电带宽及低至 2 V 的半波电压，在 50 GHz 内电光调制频响衰减仅为 1 dB(50 GHz 带宽受限于测试系统)，如图 9 所示。

我们针对电光调制器，系统地研究了影响器件半波电压、调制器带宽的主要物理机制，并率先提出铌酸锂-二氧化硅混合波导结构、周期容性加载行波电极结构，有效破解了限制电光相互作用的调制效率问题、微波损耗问题，为实现低半波电压、超高带宽性能提出创新路径，取得了显著效果。



（a）　8 mm 长电光调制器的微波传输 S_{21} 与微波反射 S_{11} 曲线



（b）　8 mm 长电光调制器的电光响应 S_{21} 与微波反射 S_{11} 曲线

图 9　带有周期容性加载行波电极的薄膜铌酸锂器件测试结果

3 结论

本文介绍了本课题组近年来在超宽带光电探测器芯片、薄膜铌酸锂调制器芯片方面的研究进展情况。针对超宽带探测器中高饱和功率和带宽提升之间的矛盾，提出吸收耗尽区电场分布优化以加速电子输运过程、感性共面波导电极结构调控芯片频率响应等关键技术，研制出带宽超过 150 GHz、输出功率约为 2 dBm@150 GHz 的超宽带 MUTC 探测器芯片。在超宽带光调制器芯片方面，我们提出薄膜铌酸锂-二氧化硅混合波导结构、周期容性加载行波电极结构等关键技术，研制出半波电压长度积为 1.6 V·cm，电带宽超过 150 GHz 的超宽带薄膜电光调制器芯片。

参考文献：

[1] Shi J W, Huang C B, Pan C L. Millimeter-wave photonic wireless links for very high data rate communication[J]. NPG Asia Materials, 2011, 3(4): 41-48.

[2] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate [J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 977-981.

[3] Renaud C C, Natrella M, Graham C, et al. Antenna integrated THz uni-traveling carrier photodiodes[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2017, 24(2): 1-11.

[4] Li Q, Li K, Fu Y, et al. High-power flip-chip bonded photodiode with 110 GHz bandwidth [J]. IEEE J. of Lightwave Technol., 2016, 34(9): 2139-2144.

[5] Beling A, Tzu T C, Gao J, et al. High-speed integrated photodiodes [C]// 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), 2019: 1-3.

[6] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. Nature, 2018, 562: 101-104.

[7] Yang F, Fang X. Monolithic thin film lithium niobate electro-optic modulator with over 110 GHz bandwidth[J]. Chin. Opt. Lett., 2022, 20: 022502.

[8] Chao E, Xiong B, Sun C, et al. Ultrafast modified uni-traveling carrier photodiode with 3 dB bandwidth of 150 GHz [C]// 2021 Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2021: SM1D. 3.

[9] Chao E, Xiong B, Sun C, et al. D-band MUTC photodiodes with flat frequency response[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2022, 28(2): 1-8.

[10] Liu X, Xiong B, Sun C, et al. Low half-wave-voltage thin film $LiNbO_3$ electro-optic modulator based on a compact electrode structure[C]// Asia Communications and Photonics Conf./International Conf. on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC), 2020: M4A. 144.

[11] Liu X, Xiong B, Sun C, et al. Broadband capacitive-loaded thin-film lithium niobate modulator with on-chip terminal resistor [C]// Asia Communications and Photonics Conference, 2021: T1I. 5.

[12] Kharel P, Reimer C, Luke K, et al. Breaking voltage-bandwidth limits in integrated lithium niobate modulators using micro-structured electrodes[J]. Optica, 2021, 8(3): 357.

作者简介：

熊 兵(1975—)，男，四川省达州市人，博士，长聘副教授，主要研究方向为高速/宽带半导体光电子器件技术。