

面向射频信号 A/D 采样的高速光电导开关设计与研究

常明¹, 胡锐², 汪弋平^{1*}, 夏巍¹, 程云杰¹

¹南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023;

²北京无线电测量研究所, 北京 100854

摘要 对基于铟镓砷(InGaAs)材料体系的共面波导型光电导开关进行了理论分析,并研究了开关在无光照的暗态和激光照射的亮态情况下射频信号的传输性能。采用工作波长为 1550 nm、脉宽为 96 fs、重复频率为 103.2 MHz 的激光脉冲触发开关对 445 MHz 的射频信号进行采样,结果表明,该高速光电导开关能实现射频信号的带通采样,同时减小了开关的载流子寿命,有利于实现更高频率的信号采样。

关键词 光电导材料; 开关; 模数转换; 带通采样

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.092002

Design and Research of A/D Sampling High-Speed Photoconductive Switch for Radio-Frequency Signal

Chang Ming¹, Hu Rui², Wang Yiping^{1*}, Xia Wei¹, Cheng Yunjie¹

¹School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

²Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China

Abstract Theoretical analysis of the coplanar waveguide photoconductive switch based on InGaAs material system is carried out, and the transmission performance of the radio-frequency (RF) signal in the dark state without illumination and the bright state with laser irradiation is studied. A laser pulse trigger switch with a working wavelength of 1550 nm, a pulse width of 96 fs and a repetition rate of 103.2 MHz is used to sample the 445 MHz RF signal. Experimental results confirm that the high-speed photoconductive switch can realize the bandpass sampling of the RF signal, while reducing the carrier lifetime of the switch, which is conducive to achieving higher frequency signal sampling.

Key words photoconductive materials; switch; analog-to-digital conversion; bandpass sampling

OCIS codes 160.5140; 200.6715

1 引言

近年来,为了满足通信系统对数据传输速度的要求,射频(RF)信号处理急需突破传统模数转换器(ADC)的限制。传统电子 ADC 正面临带宽受限、损耗过大等电子瓶颈,而基于光子采样的 ADC 凭借优越的性能受到了研究者的青睐^[1]。利用光子技术对

RF 信号进行采样时,不仅能观察到信号的等效时间形状,而且在模数(A/D)转换后获得的信号信噪比较高^[2-4]。迄今为止,人们已经提出了一系列基于光子技术的 ADC 采样方案,包括多通道并行解复用技术^[5]、光子时间拉伸^[6]以及基于高速光电导开关等方法。多通道并行解复用的方法需要借助调制器、光电探测器等分立器件,实验系统体积庞大。光子时间拉

收稿日期: 2019-09-04; 修回日期: 2019-09-16; 录用日期: 2019-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(61975082)、江苏省自然科学基金(BK20161562)、江苏省高校自然科学基金重大项目(16KJA510001)

* E-mail: jeremy_ff@sina.com

伸的方法结构同样复杂,且信号容易失真。基于高速光电导开关则利用直接采样的方法,具有结构简单、集成度高以及成本低的优势,因此成为实现高频信号数字化的重要方法。其关键技术是超快光电导开关的设计与制作,光电导开关是一种基于光敏半导体材料和光电导效应的光电子器件,利用激光照射半导体时产生的自由载流子控制开关的通断^[7],在超宽带脉冲功率技术和超快电子学领域有广阔的应用前景^[8]。对高频微波信号的采样,如果能利用高重复频率的光脉冲触发光电导开关,就能实现高频微波信号的通断,从而对连续高频微波信号进行离散化处理。

目前,光电导开关的设计大多基于 Auston 结构^[9],原理是利用超快半导体材料吸收光子增加自身的电导,即用光信号控制开关的电导。其中,低温生长的砷化镓(LT-GaAs)因具有超快的载流子捕获速度和极低的泄漏电流,成为目前最常用的光电导开关材料,用其制作成的器件可当作 A/D 转换的超快光电采样器^[10]。GaAs 材料的禁带宽度约为 1.43 eV,需要使用 800 nm 波段钛蓝宝石飞秒激光器激发,此类激光器体积庞大且价格昂贵,难以满足产业应用需求。而铟镓砷(InGaAs)材料的禁带宽度较低(0.75 eV),可以采用 1550 nm 通信波长的激光器进行激发,易实现全光纤系统^[11]。除此之外,该材料还对 1550 nm 的光子响应度较高,具有较高的载流子迁移率,可与磷化铟(InP)基底材料晶格匹配,因此倍受关注。

本文设计和仿真了基于 InGaAs 材料的高速光电导开关,制作了不同叉指电极的开关器件,并对开关的传输性能进行了测试。测量了 1550 nm 波长的连续激光器在不同功率下的开关关断比,结果表

明,关断比随激光功率的增加而增大。在同一触发功率下,测量了不同叉指电极结构的开关关断比,结果表明,叉指数越多,关断比越大。为了测量开关的动态性能,对高频输入的 RF 信号进行光电混合与信号采样,利用脉宽为 96 fs,重复频率为 103.2 MHz 的锁模激光脉冲触发开关,并对 445 MHz 的 RF 信号进行欠采样,结果表明,该方法可对中心频率较高且频带较窄的信号进行直接带通采样。调节不同脉冲激光的平均输出功率,得到采样后的频谱幅度,分析了频谱幅度与脉冲激光平均输出功率的关系。最后,针对 InGaAs 材料载流子寿命较长的问题,在开关中注入了氮离子^[12-13],对比了注入氮离子前后信号的采样频谱,发现注入氮离子可大幅缩短材料中载流子的寿命,为实现更高频 RF 信号的 A/D 转换奠定了基础。

2 光电导开关的结构与工作原理

光电导开关的结构如图 1 所示。图 1(a)为开关示意图,开关表面为共面波导结构,光敏半导体缝隙位于共面波导中心。共面波导的总长度为 750 μm ,宽度为 300 μm ,光导缝隙尺寸为 25 $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$,叉指形状的电极沉积在光敏区域台面上,叉指电极与 25 μm 宽的信号线相连,与两侧地线形成了共面波导。实验所用的开关样片是利用分子束外延生长(MBE)技术在 Fe:InP 半绝缘衬底上生长的,使用电子束蒸镀工艺沉积叉指电极和共面波导,材料为 Cr 和 Au;然后利用光刻工艺刻蚀 InGaAs 台面结构,移除电极间的欧姆接触层,以便激光直接照射到 InGaAs 上。图 1(b)为开关的实物图。

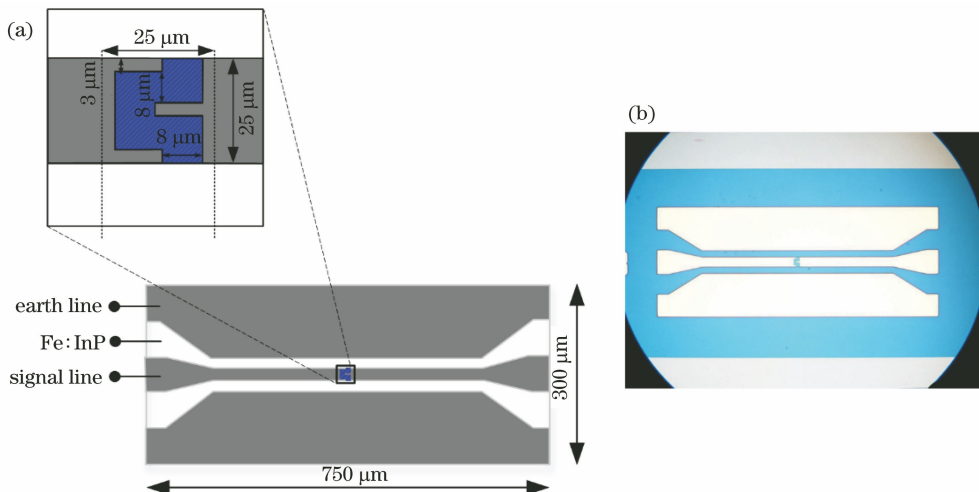


图 1 光电导开关结构图。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 1 Structure diagram of photoconductive switch. (a) Schematic diagram; (b) physical map

开关的工作原理是基于半导体材料的光电导效应。无激光照射光敏半导体时,开关处于关断状态,具有较高的隔离度;当高于半导体带隙能量的激光照射光敏半导体时,光敏材料表面和一定深度处会立即产生电子空穴对,从而形成光生载流子,开关处于导通状态。光电导开关的集总电路模型如图 2 所示^[14],当忽略边缘寄生电容和边缘泄漏电阻时,最终开关可等效为光生电阻 R_g 和耦合电容 C_g 的并联。

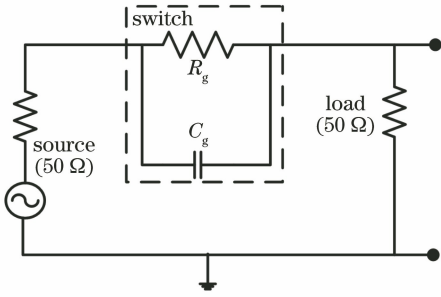


图 2 光电导开关集总电路模型

Fig. 2 Lumped circuit model of photoconductive switch

与光生电阻 R_g 成反比的光电导 G_g ,可表示为^[15]

$$G_g = \frac{W \Delta \sigma_{ph}}{L_g} \left(\frac{1}{\alpha} - L \frac{\alpha L^2 + v_s l}{L + v_s l} \right) (1 - \alpha^2 L^2)^{-1}, \quad (1)$$

式中, $\Delta \sigma_{ph} = \frac{e \lambda P_{opt}}{h c A} (\mu_n + \mu_p) \eta \alpha l (1 - R)$, α 为半导体衬底的光学吸收系数, l 为载流子寿命, L_g 为光敏区域间隙长度, W 为电极宽度, L 为扩散长度, A 为有效光照面积, v_s 为载流子表面复合速度, μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴迁移率, e 为电子电荷, h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为激光波长, P_{opt} 为激光功率, η 为光电效应量子效率, R 为光敏区域表面反射系数。

光电导开关实际是一个 A/D 转换器,根据矩形脉冲采样原理,设待采样信号为连续时间信号 $f(t)$,采样脉冲序列 $s(t)$ 的幅度为 1、脉宽为 τ ,重复周期为 T_s 的矩形脉冲序列为 $p(t)$,如图 3(b)所示。经傅里叶变换可得输出信号 $f_s(t)$ 的频谱函数为

$$f_s(j\omega) = \frac{\tau}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{Sa} \left(\frac{n\omega_s \tau}{2} \right) \delta(\omega - n\omega_s), \quad (2)$$

式中, n 为采样次数, ω_s 为采样角频率, Sa 为抽样函数, δ 为冲击响应函数。

图 3(a)为待采样信号时域波形,图 3(b)为矩形脉冲采样信号时域波形,图 3(c)为矩形脉冲采样时域相乘的波形,图 3(d)为待采样信号的频谱,图 3(e)为矩形脉冲采样信号的频谱,图 3(f)为频域卷积后最终输出信号的频谱,其中 ω_m 为待采样信号角频率。

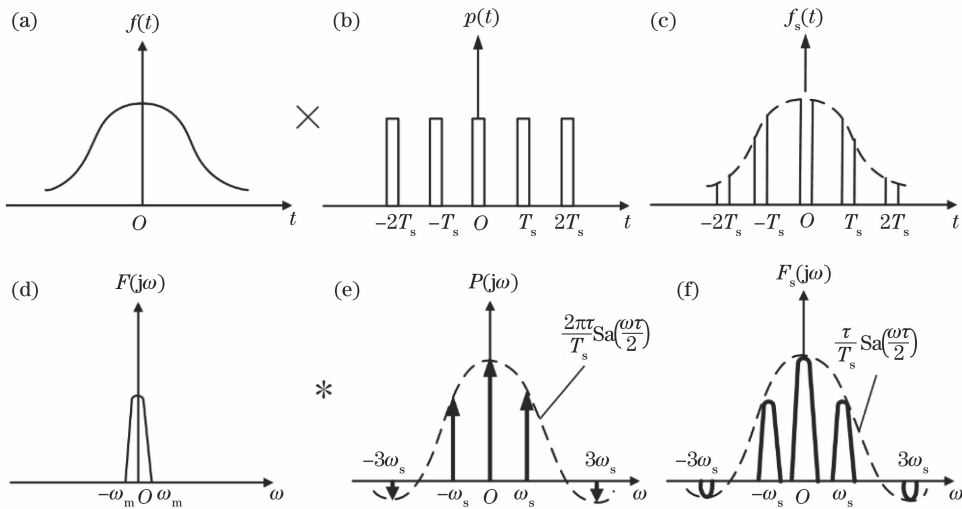


图 3 矩形脉冲采样原理。(a)待采样信号时域波形;(b)矩形脉冲采样信号时域波形;(c)矩形脉冲采样时域相乘的波形;
(d)待采样信号的频谱;(e)矩形脉冲采样信号的频谱;(f)频域卷积后最终输出信号的频谱

Fig. 3 Principle of rectangular pulse sampling. (a) Time-domain waveform of signal to be sampled; (b) time-domain waveform of rectangular pulse sampling signal; (c) waveform multiplied in the time-domain of rectangular pulse sampling; (d) spectrum of the signal to be sampled; (e) spectrum of the sampled rectangular pulse signal; (f) spectrum of the final output signal after convolution in the frequency domain

射频/中频信号的中心频率高,覆盖范围较宽,因此不能按照奈奎斯特采样定理对其进行采样。带

通采样法能找出高频带通信号无混叠采样的最低采样率 f_s ^[16],可表示为

$$\frac{2f_U}{k} \leq f_s \leq \frac{2f_L}{k}, \quad (3)$$

式中, f_U 为上限频率, f_L 为下限频率, k 为一个整数, 其取值范围为

$$1 \leq k \leq \text{int}\left(\frac{f_U}{B}\right), \quad (4)$$

式中, B 为带宽, int 为取整运算符号。

$$f_s = \frac{4f_0}{2k-1}, \quad (5)$$

式中, f_0 为待采样带通信号的中心频率, (5) 式为 (3) 式的一个特例, 即采样后信号频谱的中心频率恰巧落在奈奎斯特区间的中心位置, 最大程度上使采样后的频谱无混叠。A/D 采样频谱映射公式为^[17]

$$f'_a = \begin{cases} f_a - m_a \frac{f_s}{2}, & m_a = 2N \\ \frac{f_s}{2} - \left(f_a - m_a \frac{f_s}{2}\right), & m_a = 2N + 1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: f_a 为待采样信号频带里的任意频点, N 为任意自然数, f'_a 为 f_a 在采样后信号中对应的频点, m_a 为小于 $2f_a/f_s$ 的最大整数。当 f_s 确定时, 根据 (5) 式可以得到 k 值, 进而计算出采样后 f_0 在 $[0, f_0]$ 之间所有奈奎斯特区间的频谱延拓, 为开关的采样性能测试奠定了理论基础。

3 理论分析与实验结果

根据光电导开关的集总电路模型, 实验设计的光电导开关耦合电容为 12.8 fF, 暗态时, 开关的电阻约为 2.8 k Ω ; 亮态时, 由于产生了光生载流子, 电阻 R_g 迅速下降, 由阻抗匹配条件可知, 当 R_g 接近 50 Ω 时, 开关能实现微波信号的最佳传输。光生载流子的浓度决定了亮态时 R_g 的阻值, 且光生载流子浓度与入射光功率成正比, 即入射光功率最终决定了开关的传输性能, 图 4 为三根叉指电极在暗态和亮态情况下的 RF 信号正向传输系数 (S_{21}) 的仿真结果, 其中扫频范围为 0~40 GHz, 扫频间隔为 0.1 GHz。可以发现, 暗态时, 开关为一个高通滤波器; 亮态时, 开关的传输特性均匀, 可将 RF 信号稳定传输到输出端口。

根据理论分析, 首先测试开关的 RF 信号传输性能, 实验采用连续激光器 (EXFO FLS-2800)、矢量网络分析仪 (Agilent E8363B)、微波探针 (Cascade 40A-GSG-100-V)、光纤探针支架和聚焦光纤。分别在暗态和亮态情况下, 测量电极的 S_{21} 。

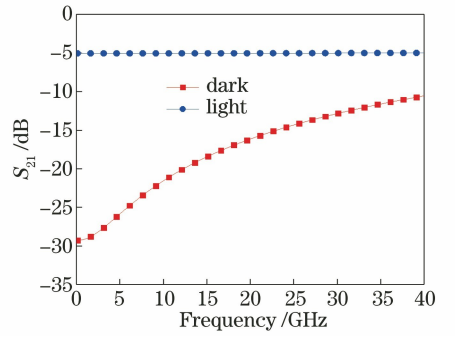


图 4 开关 S_{21} 参数的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of switch S_{21} parameter

图 5 为光电导开关 RF 信号传输性能测试的原理图。其中光开关芯片是一个三端口器件, 包括两个 RF 信号传输端口和一个激光控制端口。矢量网络分析仪 (VNA) 的输出端通过微波传输线与微波探针相连, 用探针夹持芯片的两端, 再通过微波传输线接回矢量网络分析仪形成回路, 连续激光器 (CW laser) 通过光纤探针与开关光敏区域耦合。

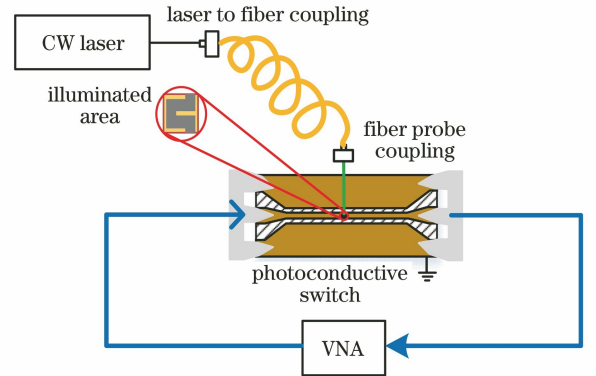


图 5 RF 信号传输性能实验原理图

Fig. 5 Schematic of RF signal transmission performance test

图 6(a) 和图 6(b) 分别为使用不同叉指电极数 (两根叉指和三根叉指) 在暗态和亮态环境下测量得到的 RF 信号传输性能。对比两幅图中暗态的 S_{21} 参数可以看出, 光敏区域电极的叉指数越多 (间隙越小), 器件的插入损耗越小, 原因是电导与载流子电流通路长度成反比。光敏材料被嵌入电阻为 50 Ω 的共面波导结构信号线中, 电阻为 50 Ω 的同轴电缆连接器件两端。结果表明, 无论是在高阻态, 还是功率为 20 mW 激光照射下的导通态, 两种器件在 0~40 GHz 检测带宽下都具有均匀的传输损耗。关断比 ΔS_{21} 为亮态和暗态 S_{21} 的差值, 由图 (6) 可得三叉指结构的器件关断比约为 7.5 dB, 而两叉指结构器件关断比约为 7 dB。

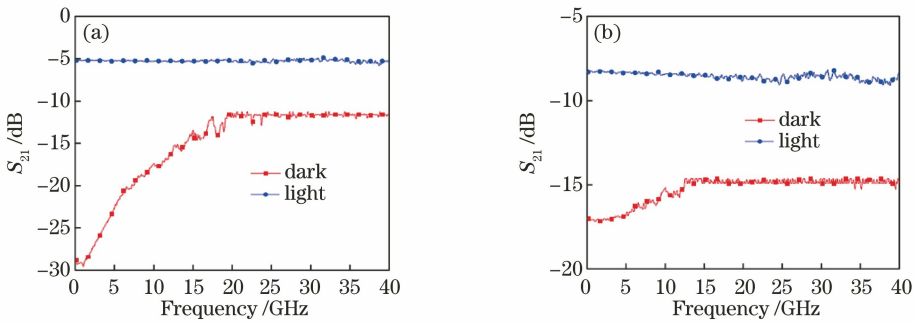


图 6 暗态与亮态下的传输性能。(a)三根叉指电极;(b)两根叉指电极

Fig. 6 Electrical transmission performance in dark and light. (a) Three interdigital electrodes; (b) two interdigital electrodes

为了分析入射光功率对关断比的影响,通过调节连续激光器的入射光功率,测量了光功率在 8~24 mW 范围内,每增加 4 mW 输入功率对应的关断比,结果如图 7 所示。可以看出,随着光功率的增加,关断比不断上升,符合理论分析结果。

为了验证开关采样 RF 信号的性能,搭建了光电导采样测试系统,同时建立了一个异步采样实验,RF 信号通过微波探针可在器件上自由传输,采样频率由飞秒脉冲激光的重复频率确定。实验使用脉冲宽度为 96 fs、重复频率为 103.2 MHz 的飞秒光纤激光器 (PriTel FFL-FR-100MHz),激光器通过光纤探针 (Cascade LWP)、聚焦光纤 (LEN-SM) 与开关芯片的光敏区域耦合。RF 信号由信号发生器 (Agilent E8257D, 250 kHz~40 GHz) 输入,经光脉

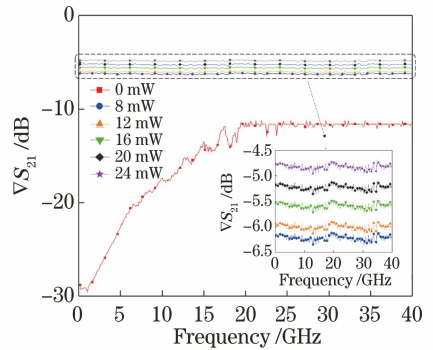


图 7 输入光功率对关断比的影响

Fig. 7 Effect of input optical power on on-off ratio
冲采样后的输出信号直接在频谱分析仪 (Agilent N9020A, 10 Hz~26.5 GHz) 上显示,实验搭建的采样系统如图 8 所示。

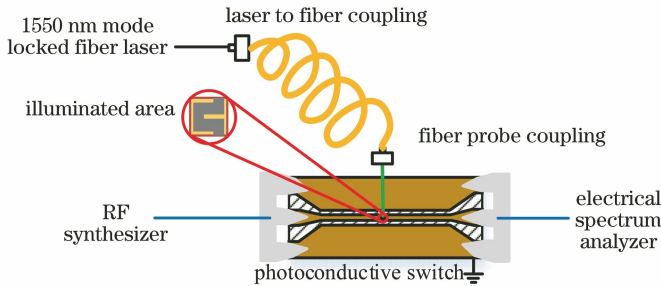


图 8 实验搭建的光电导采样系统

Fig. 8 Experimental photoconductive sampling system

实验中,开关不需要直流偏置,光激励信号是锁模激光器提供的脉宽为 96 fs、重复频率为 103.2 MHz、输出平均功率为 50 mW 的脉冲序列。RF 信号作为待采样的模拟输入信号,光脉冲信号作为采样信号,两者在器件中进行混频,最终输出 RF 信号的幅度由输入 RF 信号的幅度、频率、激励脉冲光功率和开关转换效率共同决定。由带通采样定理可知,输出 RF 信号的幅度谱是以输入 RF 信号频率为中心频率,光脉冲采样频率为间隔,向频率轴左右

两侧延拓的结果,且具有固定的周期。根据文献 [16]、[17] 给出的欠采样定理,对于频率为 f_0 的 RF 信号,根据不同的采样频率 f_s ,可得到不同的 k 值,以及不同 k 值下在 $[0, f_0]$ 中所有奈奎斯特区间内的频谱延拓。采样信号是频率为 103.2 MHz 的光脉冲信号,输入信号频率为 445 MHz、幅度为 10 dBm、带宽为 0~445 MHz 的带通信号。采样后信号在 8 个不同奈奎斯特区间的映射频率的理论值与测量值如表 1 所示,图 9 为注氮晶片前后开关采样信号的频谱分

布,由图 9(a)可知,设计的高速光电导开关可以对窄带高频带通信号进行直接采样。对比表 1 中映射频

率的理论值与测量值,可以发现实验中测量的各奈奎斯特区间的映射频率与理论值相符合。

表 1 不同奈奎斯特区间的映射频率理论值与测量值

Table 1 Theoretical and measured values of the mapping frequency of different Nyquist intervals

Nyquist interval	1	2	3	4	5	6	7	8	Main spectrum
Simulation /MHz	32.2	83.8	135.4	187	238.6	290.2	341.8	393.4	445
Measurement /MHz	32.1	71.1	135.1	174.1	238.1	278.1	342.1	381.1	445

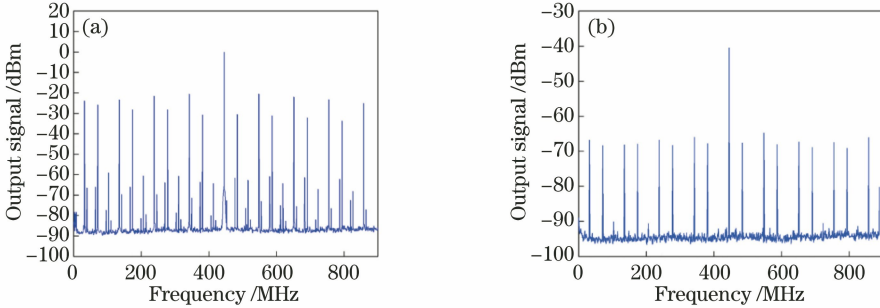


图 9 采样后的频谱。(a)原晶片;(b)注氮晶片

Fig. 9 Spectrum after sampling. (a) Raw chip; (b) chip with nitrogen ion implantation

为实现更高频率的 RF 信号采样,需有能快速响应的开关,光电导开关的响应速度主要受载流子自发复合寿命时间的限制。未经处理的 InGaAs 材料的载流子寿命在 ns 量级,利用离子注入的方法能将载流子寿命降低至 ps 量级。将制作好的开关原始晶片注入了氮离子,对比注氮后与未注氮的开关原片在不同奈奎斯特区间的频谱响应曲线,发现前者的幅度谱比后者减少了约 40.00 dB,在第一奈奎斯特区间下降了 42.94 dB,主谱下降了 40.42 dB。这是由于注入氮离子载流子寿命大

幅降低,经光电效应后,采样脉宽 τ 变小。由(2)式可知,保证采样周期 T_s 和待采样信号参数不变的前提下, τ 变小时,输出信号的幅度谱也会相应降低。

为验证入射光功率对开关采样性能的影响,通过调节激光器输出电流控制其输出功率,得到了 0~600 mA 范围内相应的主谱和第一奈奎斯特区间的频谱幅度,结果如表 2 所示。可以发现,在开关被触发后,采样频谱幅度随入射光功率的增加而变大,实验结果与理论分析相吻合。

表 2 输入光功率对应输出频谱幅度

Table 2 Input optical power corresponds to output spectral amplitude

Current /mA	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Main spectrum /dB	0	-4.84	-2.91	-1.94	-1.28	-0.62	-0.57	-0.41	-0.33	-0.30	-0.20	-0.08	-0.01
First Nyquist interval /dB	0	-41.8	-40.7	-40.3	-33.2	-25.9	-25.2	-24.8	-24.5	-24.3	-23.9	-23.7	-23.3

4 结 论

根据光电导效应,设计并研制了基于 InGaAs 材料体系的共面波导型光电导开关,通过 RF 信号传输实验,发现两叉指电极和三叉指电极结构开关的关断比分别为 7 dB 和 7.5 dB。测量了三叉指头电极结构在不同激光功率下的关断比,结果表明,关断比随光功率增加而变大。搭建了光电导采样实验系统,使用带通采样的方法对输入 RF 信号进行采样,得到了采样后 RF 信号在 $[0, f_0]$ 之间的频谱延拓,结果与理论值基本吻合。对比了注氮晶片和原

晶片的采样频谱,发现前者插入损耗增加了约 40 dB,有效缩短了载流子寿命,最后通过实验验证了采样频谱幅度随入射光功率的增加而增加的结论。

参 考 文 献

- [1] Dou Y J, Zhang H M, Fu X, et al. Optical analog-to-digital conversion by time-interweaved sampling based on mode-locked-pulse and high-speed optical switch[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1): 0105006.
- 窦玉杰, 张洪明, 傅鑫, 等. 基于锁模脉冲源和高速

- 光开关的时分抽样模数转换[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105006.
- [2] Wang J D, Chen Y, Chen X N. Multi-channel continuous-time PTS-ADC system based on complementary modulation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020603.
王俊达, 陈颖, 陈向宁. 基于互补调制的多通道连续型 PTS-ADC 系统[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020603.
- [3] Valley G C. Photonic analog-to-digital converters[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 1955-1982.
- [4] Zhang Z Y, Li H P, Zhang S J, et al. Analog-to-digital converters using photonic technology [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(22): 2666-2671.
- [5] Yuan Y, Zou W W, Yang G, et al. Design and implementation of 4-channel parallel demultiplexing photonic analog-to-digital conversion system [J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(6): 1-5.
袁野, 邹卫文, 杨光, 等. 四通道并行解复用光子模数转换系统设计和实现[J]. 光通信技术, 2018, 42(6): 1-5.
- [6] Wang J D, Chen Y, Chen X N. Photonic time-stretched analog-to-digital converter system based on complementary dual Mach-Zehnder modulator structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1206001.
王俊达, 陈颖, 陈向宁. 基于互补型双 MZM 结构的光子时间拉伸模数转换器系统[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1206001.
- [7] Xie Y, Wang Y N, Liu W, et al. Comparative study on GaAs photoconductive semiconductor switches [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(6): 063201.
谢媛, 王娅娜, 刘维, 等. 砷化镓光导开关的比较研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(6): 063201.
- [8] Wang X M, Wang H H, Zhang L N, et al. Design of 10 kV vertical double-diffused insulated-gate photoconductive semiconductor switch [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 192501.
王馨梅, 王慧慧, 张丽妮, 等. 10 kV 垂直双扩散绝缘栅型光电导开关结构设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 192501.
- [9] Auston D H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon[J]. Applied Physics Letters, 1975, 26(3): 101-103.
- [10] Roux J F, Delord J M, Coutaz J L. RF frequency response of photoconductive samplers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(2): 223-229.
- [11] He J, Yuan Y H, Cao G X, et al. Theoretical analyses and numerical simulation about photomixing process in InGaAs with antenna structure for CW terahertz generation [C] // 2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, September 15-19, 2008. Pasadena, CA, USA. New York: IEEE, 2008, 1-2: 503.
- [12] Horvath R, Roux J F, Coutaz J L, et al. Characterization of ultrafast InGaAs photoconductors and their application to signal processing in radio-over-fibre telecommunications [J]. Lithuanian Journal of Physics, 2018, 58(1): 90-98.
- [13] Yang S H, Xu X Q, Tian H L, et al. An ion implantation doping process study [J]. Smart Grid, 2017, 5(8): 748-751.
杨士慧, 徐向前, 田红林, 等. 离子注入掺杂工艺研究[J]. 智能电网, 2017, 5(8): 748-751.
- [14] Panagamuwa C J, Chauraya A, Vardaxoglou J C. Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(2): 449-454.
- [15] Tripon-Canseliet C, Faci S, Pagies A, et al. Microwave on/off ratio enhancement of GaAs photoconductive switches at nanometer scale [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(23): 3576-3579.
- [16] Liang S L. The relationship between two expressions of bandpass sampling theorem [C] // Chinese Society of Aeronautics and Astronautics Electronic Professional Committee Academic Exchange Meeting Essays, Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2003: 71-77.
梁士龙. 带通采样定理两种表达方式之间的关系 [C] // 中国航空学会电子专业委员会学术交流会论文集, 北京: 中国航空学会, 2003: 71-77.
- [17] Luo L C. A formula for the spectrum mapping of any A/D sampling, and two equivalent criterions for bandpass A/D sampling rate. [J]. Electronic Warfare, 2005(1): 24-27, 33.
罗利春. 任意 A/D 采样频谱映射公式与带通 A/D 采样等效准则 [J]. 电子对抗, 2005(1): 24-27, 33.