

基于噪声平衡抑制的近红外单光子高速探测方法

刘宏敏, 陈杰, 梁焰, 曾和平

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对现有基于尖峰噪声电容平衡方法的单光子探测技术工作频率较低的问题, 设计了利用高速二极管平衡的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管信号提取方案. 配合高速信号处理电路, 实现了工作频率最高达 700 MHz 的近红外单光子探测器. 雪崩二极管制冷至 218 K, 在脉宽小于 1 ns、重复频率 700 MHz 的门脉冲触发下, 当探测效率为 10% 时, 暗计数率为 7×10^{-6} /pulse, 后脉冲率为 7.4%. 该方案提供了一种重复频率连续可调宽带高速单光子探测方法, 结构简单且性能良好.

关键词: 单光子探测; 雪崩光电二极管; 尖峰噪声平衡

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Spike-noise balanced technique for high-speed detection of near-infrared single photons

LIU Hong-Min, CHEN Jie, LIANG Yan, ZENG He-Ping

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract: An efficient single-photon detector was realized using high-speed diode to eliminate the spike of InGaAs/InP avalanche photodiode (APD). The repetition rate of the single-photon detector reached up to 700 MHz. With the APD operating at the temperature of 218 K and the detection efficiency of 10%, we demonstrated that the typical dark-count and after-pulse probability was 7×10^{-6} /pulse and 7.4%, respectively. This scheme provides a simple and robust method to realize high-speed single-photon detection.

Key words: single-photon detection, avalanche photodiodes, spike-noise cancellation

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Ar, 85.60.Gz

引言

单光子探测技术是一种新型的微弱光信号探测技术, 可以实现光的最小能量单位即单光子检测, 是近年来微弱光探测领域的研究热点. 在量子力学基础研究^[1]、生物学研究^[2]、光时域反射^[3-4]、量子保密通信^[5-9]、激光测距^[10-11]等方面有着广泛应用.

在盖革模式下, 雪崩光电二极管 (APD) 由于其电容特性会在门脉冲触发下产生周期的尖峰噪声, 如何从噪声中提取出雪崩信号是提高单光子探测器性能的关键. 近年来, 多种技术方案被提出用以实现基于 APD 单光子探测. 一种方式是电容平衡技术,

利用一个可调电容产生与尖峰脉冲波形类似的微分信号, 然后通过魔 T 网络平衡抵消尖峰噪声提取出雪崩信号^[12], 但由于可调电容在高频下模拟的尖峰脉冲会发生波形失真, 因此其工作频率一般限制在 200 MHz 以下. 另一种是采用自差分平衡方案, 将信号等分成两路并将其中一路延时一个门周期, 然后两路差分抵消尖峰噪声^[13], 但该方案必须精确保证两路信号的幅度和延时, 在低重复频率或者要求宽带连续可调的情况下实现困难. 第三种代表性方案是采用正弦门低通滤波, 滤波器将高频的尖峰噪声滤除^[14], 该方案可以实现 GHz 以上重复频率的高速单光子探测, 但在百兆 Hz 及以下的探测受到限

收稿日期: 2015-11-12, 修回日期: 2016-01-31

Received date: 2015-11-12, revised date: 2016-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11404212); 中国博士后科学基金 (2014M560347)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11404212) and China Postdoctoral Science Foundation (2014M560347)

作者简介 (Biography): 刘宏敏 (1990-), 男, 江苏常州人, 硕士, 主要研究领域为单光子探测和量子保密通信. E-mail: lhm3@163.com

制. 总体来看, 自差分平衡方案和滤波方案容易实现高速单光子探测, 但有一定的实用难度. 电容平衡方案结构简单且工作频率调节灵活, 但是目前只能实现低速的探测.

设计了一种基于高速二极管平衡的单光子探测方案, 采用二极管模拟 APD 的尖峰噪声并通过平衡的方式实现了雪崩信号提取. 经实验测得该探测器的工作频率可达 700 MHz, 且在 100 ~ 700 MHz 的频率范围内保持较好的探测性能. 在 700MHz 重复频率下, 当探测效率为 10% 时, 暗计数率为 7×10^6 /pulse, 后脉冲率为 7.4%. 该方案为现阶段 InGaAs/InPAPD 工作在 GHz 以内的高速单光子探测提供了一种新的实现手段. 并且充分发挥了平衡方案结构简单、易于实现的优点.

1 方案设计

尖峰噪声的产生源于 APD 的结电容, 与电容平衡类似, 二极管平衡是用一个与 APD 结电容大小接近的二极管产生一个尖峰噪声类似的微分信号. 相比较电容, 二极管由于在半导体结构上与 APD 更为类似, 因此在模拟 APD 的电学特性上更具优势. 图 1 所示是基于高速二极管平衡的雪崩信号提取原理, APD 与一个高速二极管并联置于反向偏压 (HV) 下, HV 略低于 APD 雪崩电压, 将门脉冲输入 APD 和二极管的阴极, APD 在门脉冲的时间内短暂进入盖革模式响应入射光子, 在阳极用 50 欧姆电阻采集两者的输出信号输入魔 T 网络 (MTNT) 进行差分, 经放大器后最终输出的是雪崩信号, 尖峰噪声则被有效抑制.

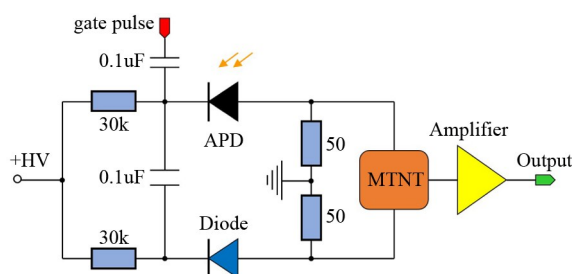


图 1 二极管平衡电路原理图
Fig. 1 Diode-differencing circuit

本实验所用 APD 型号是 JDSU 公司生产的 ETX 40, 常温雪崩电压为 59.94 V, 暗电流为 0.231 nA. 将 APD 及其平衡电路置于一个密闭盒中, 内部用半导体制冷片对 APD 制冷到 218K. 整体单光子探测和测试装置如图 2 所示. 射频信号发生器产生幅度

为 10 dBm 的周期信号输入比较器 1 整形为宽度小于 1ns 的窄脉冲, 再经放大器放大后得到脉宽、幅度均可调的门脉冲信号. 门脉冲信号输入平衡电路并提取出初始的雪崩信号, 经比较器 2 完成雪崩信号和噪声的分离, 并将最终的光子脉冲信号显示在示波器上. 实验中用到的光源是波长 1550 nm 的半导体激光器, 其外部触发信号由数字信号发生器提供, 该数字信号发生器的另一路输出用来同步射频信号发生器以保持光信号和门脉冲信号的相位稳定, 当调节两路信号间延时至光子计数最大时说明门脉冲信号和光信号重合.

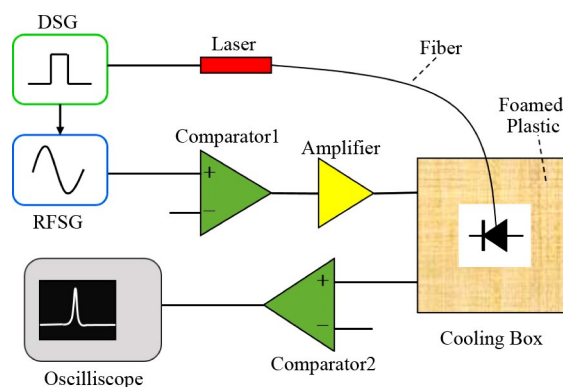


图 2 基于二极管平衡的 InGaAs/InP APD 单光子探测实验装置图.

DSG: 数字信号发生器; RFSG: 射频信号发生器

Fig. 2 Experimental setup of InGaAs/InP APD single-photon detection based on diode-differencing.

DSG: digital signal generator, RFSG: radio-frequency signal generator

在无光入射情况下, 图 1 电路输出的是平衡后的信号, 我们分别用 700 MHz、500 MHz、300 MHz、100 MHz 幅度一定的门脉冲输入, 记录平衡后的输出信号波形如图 3(a) 所示, 重复频率越高, 信号幅度越高, 说明随着频率升高二极管平衡效果降低. 图 3(b) 是有光子入射时, 100 MHz 触发频率下平衡电路输出的雪崩信号波形图.

2 性能测试

在同等探测效率下, 衡量单光子探测器性能的参数主要有两种: 暗计数和后脉冲. 暗计数是由 APD 的热激发和隧穿产生的暗载流子触发的伪计数, 后脉冲是雪崩过程中被结区杂质俘陷的载流子在光探测脉冲结束后被释放出并发生碰撞电离而产生的非光子探测脉冲^[15]. 为了验证二极管平衡的 APD 单光子探测性能, 本实验重点测量了在不同频

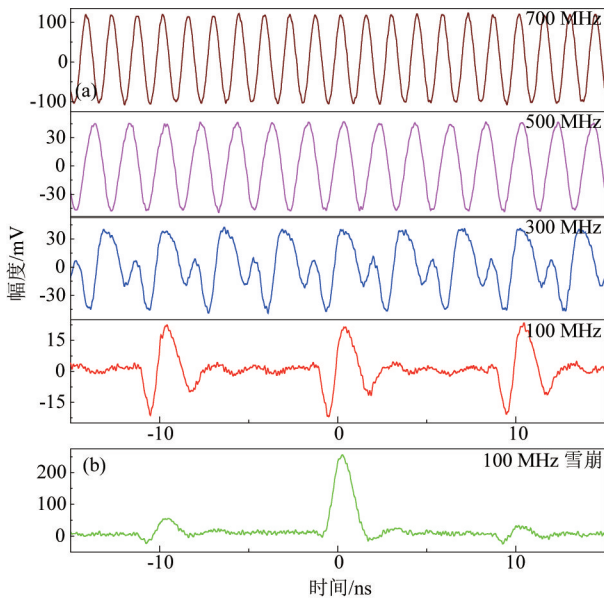


图3 (a)不同重复频率无光照时平衡后的输出信号波形;
(b)100 MHz 有光照时的雪崩信号波形

Fig.3 (a) Waveform of the output passing through diode-differencing circuit at different frequency without illumination; (b) avalanche waveform at 100 MHz

率下暗计数率 P_D 和后脉冲率 P_A 两项指标.

为了保证不同频率下的测量结果的有效性,我们在测试前将探测器的探测效率固定在 10%,探测效率可通过调节 APD 偏压来确定,在我们的实验系统中,偏压由 APD 专用高压芯片提供,电压调节精度可达 0.01 V. 探测效率的校准过程如下:我们使用一个 1 550 nm 的窄脉冲半导体激光器提供脉冲激光,激光器重复频率为 10 MHz,脉宽 140 ps,经过衰减器后得到平均光子数为 0.1 的光信号. 将该信号送入单光子探测器进行测量,其输出电脉冲由高速示波器(型号为 Agilent 公司的 MSO9404A)进行检测,调节 APD 偏压至示波器显示光子计数频率为 100 KHz 时,即表示探测器已工作在 10% 的探测效率下.

在完成探测效率的标定后,关闭激光光源,保持其他设置不变,此时在示波器上显示的脉冲信号即为暗计数,统计每秒的暗计数总和再除以门脉冲重复频率,就完成了对暗计数率的测量. 而后脉冲的测量则相对复杂,一般是接入一个重复频率比门脉冲频率低的光脉冲,例如光脉冲信号的频率为 10 MHz,门脉冲的频率为 100 MHz,即光信号频率为门脉冲的 1/10. 在这种情况下,每 10 个门脉冲只有一个能捕捉到光子信号,我们将这一类门脉冲记为“有光门”,其余的记为“无光门”. 然后对不同情况

下的光子计数进行计算和分析. 根据计算公式^[15]

$$P_A = \frac{(I_{NI} - I_D)R}{I_{Ph} - I_{NI}}, \quad (1)$$

其中 I_{Ph} 、 I_{NI} 分别是有信号光输入时“有光门”下和“无光门”下的计数率; I_D 是无信号光输入时测得的暗计数率; R 是门脉冲频率与光脉冲频率之比. 将公式(1)分子展开后得到

$$P_A = \frac{I_{NI}R - I_D R}{I_{Ph} I_{NI}}, \quad (2)$$

$I_{NI}R$ 即是每个光信号周期内的伪计数, $I_D R$ 即是每个光信号周期内的暗计数, $I_{Ph} - I_{NI}$ 即是每个光信号周期内的真计数,公式(2)表明后脉冲率等于后脉冲计数与真计数之比. 测试时,我们用示波器采集一定时长的波形数据,该数据包括激光器时钟同步信号和探测器光子计数信号两部分,由于这两个信号间存在固定的相位关系,因此可以通过程序鉴别和统计出这段时间内的真伪计数,再将暗计数的统计值一并带入公式(2),即可算出后脉冲率 P_A .

从 100 MHz 到 700 MHz 每隔 100 MHz 测量单光子探测器的暗计数率 P_D 和后脉冲率 P_A ,得到图 4 所示探测性能随频率变化的趋势. 如图 4 所示,在被测频率范围内,暗计数率在 $4 \times 10^{-6}/\text{pulse}$ 至 $7 \times 10^{-6}/\text{pulse}$ 之间波动,在 400 MHz 时达到最低点,然后又随频率增加而逐渐升高. 400 MHz 时暗计数最低的现象与门脉冲宽度和偏置电压有关. 由于实验中门脉冲是由正弦信号经比较、放大后产生,在比较电平不变的情况下,门脉冲宽度将随着频率升高而略微变窄,从而使有效雪崩时间缩短,暗计数也相应减少,继续增加频率后,受放大器增益特性影响,脉冲幅度会略微降低,为保证 10% 的探测效率,则需要提高偏置电压,从而导致暗计数上升. 后脉冲率变化整体趋势随频率增加而增大,这是由于频率越高门脉冲间隔时间越短,残留载流子会经历更多的门脉冲从而更大概率地引起后脉冲.

鉴于工作频率范围一定的相似性,我们将此方案与日本大学 N. Namekata 等学者提出的正弦门方案^[16]进行对比,对性能的比较结果如表 1. 我们实验测试的工作频率上限略低于正弦门的 800 MHz,在 100 MHz 时的暗计数率和后脉冲率比正弦门低近一个数量级,在最大工作频率时性能依旧好于正弦门方案. 在应用方面,由于正弦门方案采用的是带阻滤波,对滤波器带宽有严格的限制,而尖峰噪声的谐波又难以完全滤除^[17],同时一个滤波器只能对应一个工作频率,不适用于重复频率连续调节的情况.

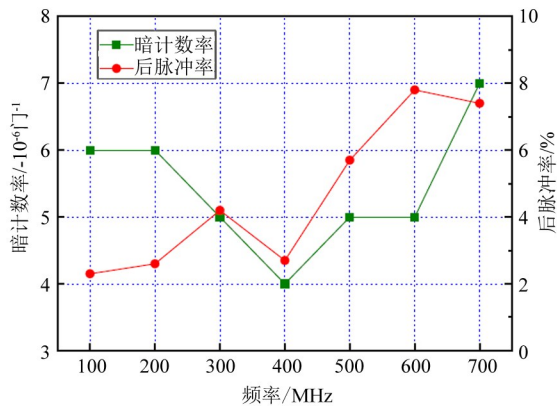


图4 各频率下单光子探测暗计数率和后脉冲率
Fig.4 Relation between the performance of single-photon detection and frequency

相比之下,采用的二极管平衡方式是带宽全覆盖的单光子探测。

表1 与正弦门方案的性能比较

Table 1 Comparison with the scheme of sine-gating

	探测效率/%	频率/MHz	暗计数率/门 ⁻¹	后脉冲率/%
正弦门方案	10	100	3.3×10^{-5}	20%
	10.5	800	1.5×10^{-5}	11%
二极管平衡	10	100	6×10^{-6}	2.3%
	10	700	7×10^{-6}	7.4%

3 讨论

3.1 带宽

实验中曾尝试把触发频率调节到 800 MHz,但暗计数增加明显,超出可承受范围,表明在目前的硬件条件下,该单光子探测器目前的有效工作带宽上限为 700 MHz. 观察 800 MHz 门脉冲触发下的平衡后信号,发现幅度比 700 MHz 时有较大幅下降,经分析后发现这可能与我们所选择的差分平衡器的带宽限制有关,信号频率过高会导致平衡器的插损增加,并引起信号失真,从而影响雪崩信号提取. 但这也表明,如果选用带宽范围更高的平衡器,该方案的工作频率上限有望进一步提升. 另外,虽然本实验重点关注了 100 MHz 以上的二极管平衡单光子探测技术的探测性能,但在 100 MHz 以下二极管平衡技术仍然有很好的适用性^[18].

3.2 门脉冲幅度对后脉冲率的影响

实验 APD 的工作温度和探测效率保持不变,所以门脉冲幅度的改变对暗计数率的影响不大,但改变门脉冲幅度意味着偏压的变化(为保持原始探测效率),偏压大小影响对雪崩的抑制程度,所以门脉

冲幅度和后脉冲率之间存在着一定联系,我们也针对这个特性进行了讨论.

将触发频率固定在 100 MHz,门脉冲脉宽是 1 ns,幅度可调,通过改变门脉冲幅度,测试其对后脉冲的影响,两者的关系如图 3 所示. 在一定的幅度范围内,门脉冲幅度增加使得后脉冲率下降,下降效果明显但并不是严格的单调关系. 分析易知,门脉冲幅度增加后,为保持相同的探测效率,偏置电压会相应降低,越低的偏压越利于抑制雪崩,也即抑制了后脉冲. 但是门脉冲幅度过高会影响平衡效果,必须提高偏置电压来保持探测效率,随之使得后脉冲率增大. 因此我们得出的结论是二极管平衡单光子探测技术中门脉冲幅度对后脉冲有较大影响,可以通过调节门脉冲幅度减小后脉冲率.

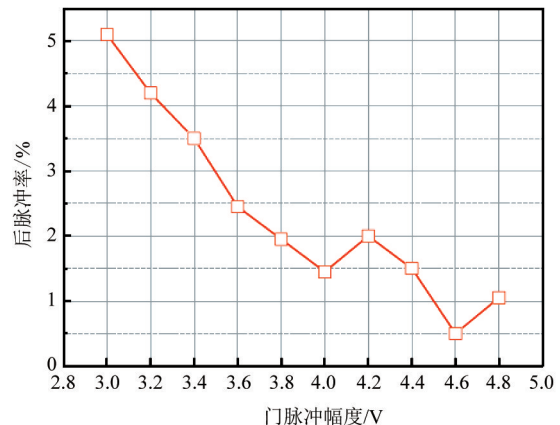


图3 后脉冲率与门脉冲幅度关系
Fig.3 After pulse probability as a function of the gate amplitude

4 结论

研究了基于高速二极管平衡的 InGaAs/InP APD 单光子探测技术方案,利用高速二极管模拟出与 APD 尖峰噪声类似的信号并通过平衡电路提取出雪崩信号. 经实验测的该方案的工作频率上限可达 700 MHz,并将中低重复频率的测量结果与正弦门方案做了对比. 该技术突破了电容平衡方法的工作频率上限,具有方案简单易行,重复频率宽带可调的优势,为 GHz 以下的宽带单光子探测器提供了一种有效的的实现手段.

References

- [1] RARITY J G, TAPSTER P R. Experimental violation of Bell's inequality based on phase and momentum[J]. *Physical Review Letters*, 1990, **64**(21): 2495-2498.
- [2] SUHLING K, SIEGEL J, PHILLIPS D, et al. Imaging the

- environment of green fluorescent protein [J]. *Biophysical Journal*, 2002, **83**(6):3589–3595.
- [3] LACAITA A L, FRANCESE P A, COVA S D, *et al.* Single-photon optical-time-domain reflectometer at 1.3 micron with 5-cm resolution and high sensitivity[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(13):1110–1112.
- [4] ERAERDS P, LEGRE M, ZHANG J, *et al.* Photon counting OTDR: advantages and limitations[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2010, **28**(6):952–964.
- [5] ZBINDEN H, BECHMANN-PASQUINUCCI H, GISIN N, *et al.* Quantum cryptography[J]. *Applied Physics B*, 1998, **67**(6):743–748.
- [6] ZHANG J, ERAERDS P, WANLENTA N, *et al.* 2.23 GHz gating InGaAs/InP single-photon avalanche diode for quantum key distribution [J]. *Proc. SPIE*, 2010, **7681**:76810Z.
- [7] PENG C, ZHANG J, YANG D, *et al.* Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **98**(1):010505.
- [8] CHEN J, WU G, XU L, *et al.* Stable quantum key distribution with active polarization control based on time-division multiplexing [J]. *New Journal of Physics*, 2009, **11**(6):065004.
- [9] NAMBU Y, TAKAHASHI S, YOSHINO K, *et al.* Efficient and low-noise single-photon avalanche photodiode for 1.244-GHz clocked quantum key distribution[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(21):20531–20541.
- [10] REN M, GU X, LIANG Y, *et al.* Laser ranging at 1550 nm with 1GHz sine-wave gated InGaAs/InP APD single-photon detector [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(14):13497.
- [11] YANG Fang, ZHANG Xin, HE Yan, *et al.* Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques[J]. *Chinese Journal of Lasers* (杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术. *中国激光*), 2013, **40**(2):184–188.
- [12] CHEN Xiu-Liang, 1550nm single-photon detection and its applications[D]. East China Normal University (陈修亮. 1550 nm 单光子探测及其应用研究. 华东师范大学) 2006.
- [13] YUAN Z L, KARDYNAL B E, SHARPE A W, *et al.* High speed single photon detection in the near infrared [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(4):041114.
- [14] LI Yong-Fu, LIU Jun-Liang, WANG Qing-Pu, *et al.* Avalanche characterization of high speed single-photon detector based on InGaAs/InP APD[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李永富, 刘俊良, 王青圃, 等. 基于 InGaAs/InP 雪崩二极管的高速单光子探测器雪崩特性研究. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(4):427–431.
- [15] ZHENG Li-Xia, WU Jin, ZHANG Xiu-Chuan, *et al.* Sensing detection and quenching method for InGaAs single-photon detector[J]. *Acta Phys. Sin.* (郑丽霞, 吴金, 张秀川等. InGaAs 单光子探测器传感检测与淬灭方式. *物理学报*), 2014, **63**(10):104216.
- [16] NAMEKATA N, SASAMORI S, INOUE S. 800 MHz single-photon detection at 1550-nm using an InGaAs/InP avalanche photodiode operated with a sine wave gating [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(21):10043–10049.
- [17] ZHANG J, THEW R, BARREIRO C, *et al.* Practical fast gate rate InGaAs/InP single-photon avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(9):091103.
- [18] WU G, ZHOU C, CHEN X, *et al.* High performance of gated-mode single-photon detector at 1.55 μm [J]. *Optics Communications*, 2006, **265**(2006):126–131.

(上接 537 页)

- [3] Kuzmík J. Power electronics on InAlN/(In)GaN; Prospect for a record performance[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2001, **22**:510–512.
- [4] Sun H, Alt A R, Benedickter H, *et al.* 205-GHz (Al,In)N/GaN HEMTs[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2010, **31**:293–295.
- [5] Brown A, Brown K, Chen J, *et al.* W-band GaN power amplifier MMICs[C]. *IEEE MTT-S International*, 2011, Baltimore, MD:1–4.
- [6] Palacios T, Dora Y, Chakraborty A, *et al.* Optimization of AlGaIn/GaN HEMTs for high frequency operation[J]. *phys. stat. sol. (a)*, 2006, **203**:1845–1850.
- [7] Higashiwaki M, Mimura T, Matsui T. AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors on 4H-SiC Substrates with Current-Gain Cut-off Frequency of 190 GHz[J]. *Applied Physics Express*, 2008, **1**:021103–(1–3).
- [8] Chung J W, Hoke W E, Chumbes E M, *et al.* Advanced gate technologies for state-of-the-art f_T in AlGaIn/GaN HEMTs [C]. *IEDM Tech. Dig.*, 2010, **30**:1–4.
- [9] Chung J W, Hoke W E, Chumbes E M, *et al.* AlGaInGaN HEMT with 300-GHz f_{max} [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2010, **31**:195–197.
- [10] Guo H Y, Lv Y J, Gu G D, *et al.* High-Frequency AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors with Regrown Ohmic Contacts by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition[J]. *Chin. Physics Letter*, 2015, **32**:118501–(1–3).
- [11] Chen G, Kumar V, Schwindt R S, *et al.* Low Gate Bias Model Extraction Technique for AlGaIn/GaN HEMTs[J]. *IEEE Trans Micro Theory Tech*, 2006, **54**:2949–2953.
- [12] Higashiwaki M, Matsui T. AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors with Current Gain Cut-off Frequency of 152 GHz on Sapphire Substrates [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, **44**:475–478.
- [13] Higashiwaki M, Mimura T, Matsui T. 30-nm-Gate AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors with a Current-Gain Cutoff Frequency of 181 GHz[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, **45**:1111–1113.
- [14] Palacios T, Chakraborty A, Heikman S, *et al.* AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with InGaIn back-barriers[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2006, **27**:13–15.
- [15] Brown D F, A Williams, Shinohara K, *et al.* W-band power performance of AlGaIn/GaN DHFETs with regrown n+ GaIn ohmic contacts by MBE[C]. *IEEE Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2011, Washington, DC:461–464.
- [16] Kim D, Kumar V, Lee J, *et al.* Recessed 70-nm Gate-Length AlGaIn/GaN HEMTs Fabricated Using an Dielectric Layer[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, **30**:913–915.
- [17] Bouzid-Driad S, Maher H, Defrance N, *et al.* AlGaIn/GaN HEMTs on Silicon Substrate With 206-GHz[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, **34**:36–38.