

太赫兹时域光谱法测定高电子迁移率晶体管的截止工作频率

谢乐¹ 卞金鑫¹ 李洪¹ 杜少卿¹ 陈麟¹ 彭滢¹ 张海英² 徐静波² 郭天义²
付晓君² 杨浩² 朱亦鸣¹

(¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;²中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要 随着高速半导体器件的发展,高电子迁移率晶体管(HEMT)的工作频率已经达到亚太赫兹波段,所以无法简单地通过传统电学方法进行检测。鉴于此,必须采用超快光学方法测定 HEMT 器件的截止工作频率。利用持续时间更短的飞秒脉冲激光瞬时关断处于饱和工作状态下的 HEMT 器件,并且采用太赫兹时域光谱技术测量在器件被关断后电流的变化情况(时间是皮秒量级),最后,利用所测量到的太赫兹波形(即源漏电流随时间变化的曲线)和截止工作频率的关系,直接推算出可达到亚太赫兹波段的 HEMT 器件的截止工作频率。

关键词 光谱学;光生载流子;截止频率;太赫兹时域光谱;InAlAs/InGaAs 高电子迁移率晶体管

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.043003

Measurement of Cutoff Frequency of HEMT by Terahertz Time-Domain Spectroscopy

Xie Le¹ Bian Jinxin¹ Li Hong¹ Du Shaoqing¹ Chen Lin¹ Peng Yan¹
Zhang Haiying² Xu Jingbo² Guo Tianyi² Fu Xiaojun² Yang Hao² Zhu Yiming¹

¹ School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China
² Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract With the development of high-speed semiconductor devices, the cutoff frequency of high electron mobility transistor (HEMT) can achieve sub-terahertz level, which cannot be simply measured by traditional electrical method. Therefore, the ultrafast optical method is employed to measure the cutoff frequency of HEMT. The femtosecond laser pulse, which has extremely short duration, is used to suddenly turn off the HEMT that is under saturated condition. Furthermore, the terahertz time-domain spectroscopy technology is applied to measure the change of operation current, which can persist even less than 1 ps after the HEMT is switched off. Finally, the cutoff frequency of HEMT can be directly calculated by using the relationship between the terahertz traces (i. e., the curve of the source-drain current versus time) and the cutoff frequency of HEMT which can achieve sub-terahertz level.

Key words spectroscopy; photoexcited carrier; cutoff frequency; terahertz time-domain spectroscopy; InAlAs/InGaAs high electron mobility transistor

OCIS codes 300.6495; 120.6200

1 引言

InP 基 InAlAs/InGaAs 高电子迁移率晶体管(HEMT)器件具有低噪声系数、高功率增益、高效率以及

收稿日期: 2011-10-31; 收到修改稿日期: 2011-12-05; 网络出版日期: 2012-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(61007059, 11174207)、国家自然科学基金重点项目(61138001)和上海市研究生创新基金(JWCXSL1002)资助课题。

作者简介: 卞金鑫(1986—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹检测半导体材料和器件等方面的研究。

E-mail: footlove86@163.com

导师简介: 朱亦鸣(1979—),男,博士,教授,主要从事太赫兹波的应用和半导体内非平衡载流子的动态运动等方面的研究。E-mail: ymzhu@usst.edu.cn(通信联系人)

高达 W 频段的工作频率等特点,所以成为高频毫米波系统和微波系统器件中最具应用前景的器件之一^[1~5]。由于 HEMT 器件的工作频率已经超过 500 GHz^[2],所以现今工业界无法方便准确地测量其工作频率。现在主流探测工作频率的工具为矢量网络分析仪,一般来说,网络分析仪只能探测器件的低频特性,然后假定器件工作频率和测试特性之间存在单调线性关系,运用最小二乘法间接推导出高频特性。但是这种测试方法忽略了 HEMT 器件性能在高频段与低频段的差别,而且对于不同材料制备的 HEMT 器件得出的结果差异较大且不稳定。除此之外,这种测试方法需要额外的测试夹具以及传输导线^[6,7],使得测试变得复杂和不准确。因此,必须采用新的测量手段来直接测出 HEMT 器件的真实工作频率,以满足日益增加的工业测试需求。

在一些前期的研究中,Satou 等^[8]发现,如果激光从非栅区垂直入射到 HEMT 器件中,那么 HEMT 器件就会产生频率在太赫兹 (THz) 范围内的振荡响应。另外,我们也已经采用太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 系统,成功地探测到高电场下砷化镓中的载流子在皮秒量级内的非平衡运动过程^[9,10]。鉴于此,本文提出利用飞秒脉冲激光和太赫兹时域光谱技术相结合的直接测试法来测定 HEMT 器件的截止工作频率。

2 实验设计及其讨论

实验采用由中国科学院微电子研究所提供的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ InP 基 HEMT,该器件的二维电子气面密度为 $3.32 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,电子迁移率为 $9290 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,跨导为 600 mS/mm ,最大电流密度达 500 mA/mm ,并且具有很高的截止工作频率^[11]。

图 1 为测量 HEMT 器件直流特性变化(飞秒激光照射前后)的实验装置示意图(三个探针未画出)。波长为 800 nm 的飞秒激光经过衰减片 (ND filter) 将入射光的强度调整为 8 mW,再经过凸透镜、分束镜 (BS)、物镜会聚在 HEMT 器件上。物镜、CCD 摄像头以及光源用来观察激光光斑和三个探针的位置,三个探针分别加在 HEMT 器件的三个电极上,通过调整 HEMT 器件的位置使得激光光斑照在栅源极之间的衬底上(如图 2 所示)。图 2 为激光光斑和三个探针在 HEMT 器件上的位置示意图。三个探针分别加在 HEMT 的栅极 (g)、源极 (s) 和漏极 (d),提供栅源电压 V_{gs} 和源漏电压 V_{ds} 。

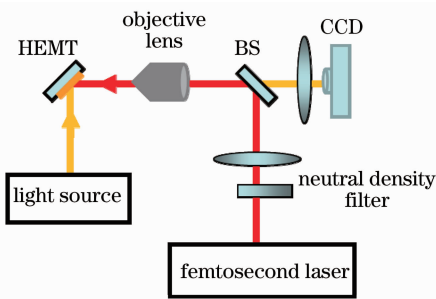


图 1 激光照射影响 HEMT 器件直流特性的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser irradiation influence on DC characteristic of HEMT

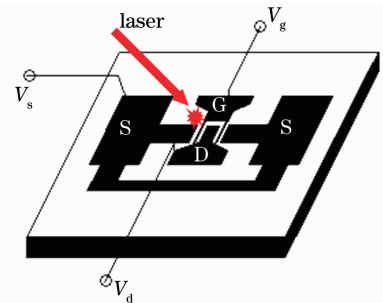


图 2 激光光斑和三个探针在 HEMT 器件上的位置示意图

Fig. 2 Position diagram of irradiated laser spot and three probes on HEMT

采用两台 5 位半数字源表对 HEMT 器件进行直流特性测试。在室温条件下,分别测出 HEMT 器件在激光照射前后的 $I-V$ 特性曲线,测试结果如图 3 所示。图中 I_{ds} 代表源漏电流,实线是无激光照射时的 $I-V$ 特性曲线,虚线是有激光照射时的 $I-V$ 特性曲线。在 $I-V$ 特性曲线中较陡的区域为线性区,较平坦的区域为饱和区。从激光照射前后 HEMT 器件 $I-V$ 特性曲线的对比图可以得出,在激光照射下,源漏电流 I_{ds} 只在饱和区发生变化,以此推断出激光照射只对处于饱和和工作状态的 HEMT 器件起到关断作用,引起源漏电流的瞬时关断。

当 HEMT 器件处于饱和和工作状态时,波长为 800 nm (光能量 $h\nu = hc/\lambda = 1.55 \text{ eV}$) 的激光照在器件的栅极和源极之间的衬底(材料为 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$,禁带宽度 $E_g = 0.75 \text{ eV}$ ^[12])上,材料价带中的电子受到能量大于禁带宽度的光子轰击,即光子能量满足 $h\nu > E_g$,就能瞬时激发出位于栅源极之间的电子-空穴对,在栅源

极之间瞬时产生光生载流子,光生载流子瞬时改变 HEMT 器件的栅源电场,导通栅极和源极。瞬时降低的栅源电场会导致 HEMT 器件瞬时关闭,即源漏电流被瞬时截断。所以,从图 3 可看出,在激光照射下,源漏电流在相同的偏压条件下减小(因为飞秒脉冲激光持续的时间非常短^[13],器件在大部分的时间内处于无光照状态,所以平均源漏电流 I_{ds} 的降低并不是那么明显)。

一方面,HEMT 器件的截止工作频率是由沟道内电子运动速度和栅极下有效沟道长度决定的^[14],本文中 HEMT 器件源极和漏极之间的沟道距离为 $2\ \mu\text{m}$,电子在沟道内的运动模式是弹道加速模式,而不是传统晶体管内的扩散运动模式。在这种情况下,电子会在小于 $1\ \text{ps}$ 的时间内完成从源极到漏极的输运过程。传统的示波器等设备是无法观测到在皮秒量级下的电子运动状态的。

但另一方面,根据麦克斯韦方程

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times E &= -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \end{aligned} \right\} \rightarrow -\nabla^2 E = \frac{\partial J}{\partial t} + \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \Rightarrow E(t) \propto \frac{\partial J_{e-h}}{\partial t}, \quad (1)$$

得出载流子的动态运动过程与其辐射出的电磁波能量成正比这一重要结论,即随时间加速或减速变化的电流会产生向外辐射的电磁波^[15]: $E(t) \propto \frac{\partial I_{ds}}{\partial t}$ 。图 4 就是这一

过程的示意图,给出了激光照射瞬间源漏电流 I_{ds} 和 $\frac{\partial I_{ds}}{\partial t}$ 随时间的变化情况。由于 HEMT 器件的表面材料为 InGaAs,其电子的有效质量远小于空穴的有效质量,所以在电子加速运动的过程中,空穴几乎是停在原处不动的。因此,载流子(电子+空穴)所辐射出的电磁波主要是由电子的运动引起的,那么,图 4 中的 τ 就可以认为是电子的渡越弛豫时间,该时间直接影响 HEMT 器件的截止工作频率。

根据这两个方面,可以得出结论:源漏电流被瞬时截断会辐射出电磁波,而且该电磁波处于太赫兹波段,所以采用太赫兹时域光谱法能探测到辐射出的太赫兹波,并且该太赫兹波与源漏电流随时间变化的曲线一致,即太赫兹波的半峰全宽和 HEMT 器件的电子渡越弛豫时间 τ 是相同的,由此得到源漏极之间的电子渡越弛豫时间。

图 5 是测量 HEMT 器件截止工作频率的太赫兹时域光谱系统示意图。采用中心波长为 $800\ \text{nm}$,脉宽为 $80\ \text{fs}$,重复频率为 $76\ \text{MHz}$ 的超短脉冲激光光源,激光通过分束镜(BS1)后被分成抽运光和探测光。被斩波器调制的抽运光,经过衰减片、凸透镜、分束镜(BS2)和物镜会聚在 HEMT 器件上,CCD 摄像头用来观察激光光斑和三个探针的位置,三个探针分别加在 HEMT 器件的三个电极上(图中未画出三个探针)。通过调整 HEMT 器件的位置使得激光光斑照在栅源极之间的衬底上,引起源漏电流瞬时改变,从而辐射出太赫兹波。辐射出的太赫兹波被离轴抛物面镜 PM1 和 PM2 收集后会聚在碲化锌晶体上;探测光经 $1/2$ 波片(HWP)、凸透镜、延迟装置、硅片和离轴抛物面镜(PM2)聚焦到碲化锌晶体上,并与太赫兹波聚焦的位置相同。探测光再经过 $1/4$ 波片(QWP)、凸透镜、反射镜和沃尔斯通棱镜分成偏振方向相互垂直的两束光,并且由两个光电探测器(PD)接收并转换为电信号,然后把电信号输入到锁相放大器中,将斩波器的输出信号作

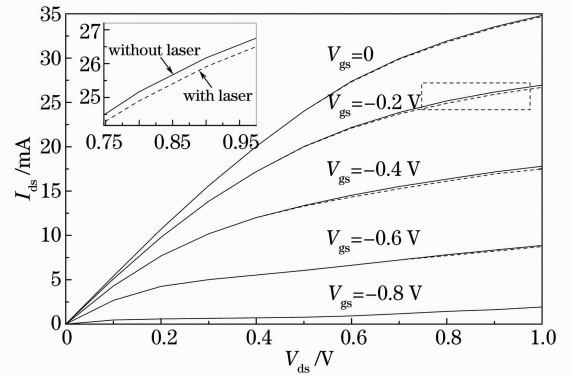


图 3 激光照射前后 HEMT 器件 I - V 特性曲线的对比图

Fig. 3 I - V characteristics of HEMT before and after laser irradiation

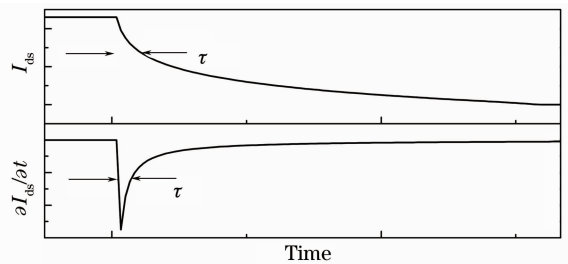


图 4 源漏电流 I_{ds} 和 $\frac{\partial I_{ds}}{\partial t}$ 随时间变化的示意图

Fig. 4 Time dependence of the source-drain current I_{ds} and $\frac{\partial I_{ds}}{\partial t}$

为锁相放大器的参考信号,有效地滤掉干扰信号,提高信噪比。最后,采用超快电光取样技术采集从 HEMT 器件上辐射出来的太赫兹波。因为目前的 HEMT 器件工作频率均在亚太赫兹波段,所以选用 $700\ \mu\text{m}$ 的碲化锌晶体,其频率响应宽度可以达到 $3\ \text{THz}$ 。

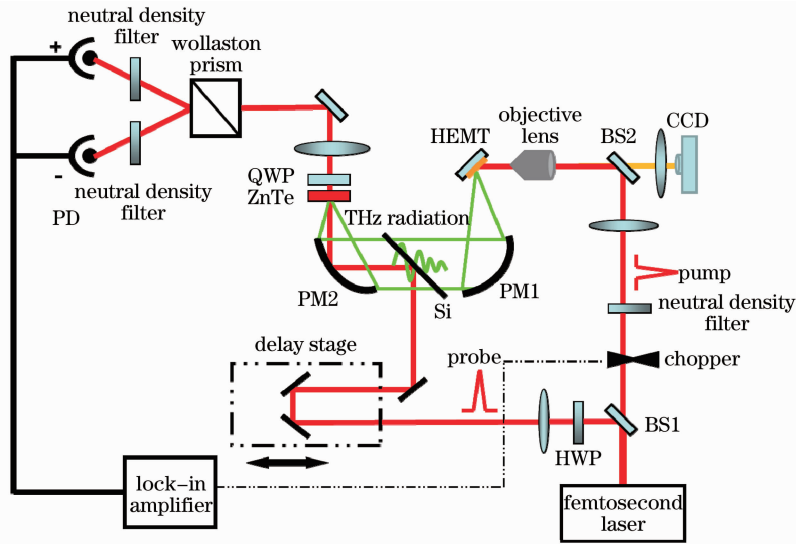


图 5 太赫兹时域光谱系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of THz-TDS system

采用太赫兹时域光谱法,通过超快电光取样技术记录由源漏电流加速变化所辐射出的太赫兹波,由于太赫兹波的半峰全宽和 HEMT 器件的电子渡越弛豫时间 τ 是相同的,得到电子渡越弛豫时间 τ 。再根据 HEMT 器件截止工作频率 f_T 和电子渡越弛豫时间 τ 之间的关系 $f_T = 1/(2\pi\tau)$ ^[16],即可计算出 HEMT 器件的截止工作频率。

3 结 论

目前,HEMT 器件的截止工作频率的测量只能采用网络分析仪,通过推导的方法得出结果,这种方法存在很大的误差、不确定性以及额外的测试夹具和传输导线所带来的计算复杂性。本文设计了这种新的测试方法和测试系统,可以简单而又准确地得到 HEMT 器件的真实截止工作频率,提高 HEMT 器件电学参数的检测能力,为设计、制造出超高速 HEMT 器件打下基础。

参 考 文 献

- 1 A. Tessmann, A. Leuther, V. Hurm *et al.*. Metamorphic HEMT MMICs and modules operating between 300 and 500 GHz[J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2011, **46**(10): 2193~2202
- 2 A. Endoh, K. Shinohara, I. Watanabe *et al.*. Low-voltage and high-speed operations of 30-nm-gate pseudomorphic $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ HEMTs under cryogenic conditions[J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2009, **30**(10): 1024~1026
- 3 R. Lai, X. B. Mei, S. Sarkozy *et al.*. Sub 50 nm InP HEMT with $f_T = 586\ \text{GHz}$ and amplifier circuit gain at 390 GHz for sub-millimeter wave applications[C]. Proc. IEEE 22nd Int. Conf. IPRM, 2010. 137~139
- 4 A. Leuther, S. Koch, A. Tessmann *et al.*. 20 nm metamorphic HEMT with 660 GHz f_T [C]. Proc. 23rd Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials, 2011. 295~298
- 5 Fan Chao, Chen Tangsheng, Yang Lijie *et al.*. Fabrication of optoelectronic integrated circuits optical receiver front-end and limiting amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 777~781
- 6 范超,陈堂胜,杨立杰等.光电集成光接收机前端及限幅放大器的研制[J].光学学报,2010,**30**(3):777~781
- 7 Zhang Shengli, Sun Jianwei, Liu Yu *et al.*. Measuring the high-frequency characteristics of chip photodiodes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 857~860
- 8 张胜利,孙建伟,刘宇等.光探测器芯片的高频特性测量[J].中国激光,2004,**31**(7):857~860
- 9 U. C. Hasar. Comments on "a novel vector network analyzer"[J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2010, **58**(9):

2517~2517

- 8 A. Satou, V. Ryzhii, I. Khmyrova *et al.*. Characteristics of a terahertz photomixer based on a high-electron mobility transistor structure with optical input through the ungated regions[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(4): 2084~2089
- 9 Zhu Yiming, Zhang Dawei, He Boyong *et al.*. Strong band mixing in bulk GaAs under high electric field investigated by time-domain terahertz spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 328~332
朱亦鸣, 张大伟, 何波涌 等. 利用时域太赫兹波谱法的超高电场下砷化镓内能带耦合现象研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 328~332
- 10 Ni Zhengji, Chen Lin, Wang Shuling *et al.*. Electrons intervalley transfer gain in bulk GaAs[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 658~662
倪争技, 陈麟, 王淑玲 等. 砷化镓内电子谷间散射引起的增益[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 658~662
- 11 Chen Liqiang, Zhang Haiying, Yin Junjian *et al.*. Lattice-matched InP-based HEMTs with f_T of 120 GHz[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2005, **26**(3): 472~475
- 12 T. W. Nee, A. K. Green. Optical properties of InGaAs lattice-matched to InP[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(10): 5314~5317
- 13 Hu Zhan, Jin Mingxing, Wu Di *et al.*. Ionization and energy transfer in polyatomic molecules under ultrafast intense laser field[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 093203
胡湛, 金明星, 吴迪 等. 超快强激光场中多原子分子电离及能量转移过程[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(9): 093203
- 14 T. Suemitsu, T. Enoki, H. Yokoyama *et al.*. Improved recessed-gate structure for sub-0.1- μm -gate InP-based high electron mobility transistors[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**: 1365~1372
- 15 Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz Science & Technology and Application[M]. Beijing: Publishing Peking University Press, 2007. 69~74
许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007. 69~74
- 16 B. X. Chen, G. Y. Liu, S. H. Xia *et al.*. Approximate calculating methods concerning the electron transit time for a vacuum microelectronics triode[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, **33**(4): 39~43