

文章编号 1004-924X(2017)12-3128-09

太赫兹 CMOS 场效应管模型及实验分析

张镜水, 孔令琴, 董立泉, 赵跃进*

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:针对商业 CMOS(互补金属氧化物半导体)场效应管模型在高频下易失效的问题,运用 ADS 软件构建了基于经典动力学理论的非线性 RCL 传输线模型,并结合实测数据说明了本文模型的精准性及太赫兹波段场效应管的工作原理。构建了基于经典动力学理论的非线性 RCL 传输线模型仿真系统,并将其与商业模型仿真结果进行对比,分析了在太赫兹波段本文模型与商业模型的区别。测试了现有场效应管探测器的频率响应,并对实测数据与两种模型仿真数据进行对比,说明本文模型提高了预测精度。最后,结合 3σ 原则分析了场效应管沟道尺寸对载流子散射效应的影响,以及场效应管进入弹道工作模式的条件。实验结果表明:本文模型与商业模型的区别主要在于模型中是否存在电感部分,该部分可作为场效应管沟道中载流子动量是否守恒及散射效应是否可以忽略的表征参数。相较于商业模型,本文模型对探测器最佳频率工作点的预测精准度可提高 0.3%,对探测器带宽的预测精准度可提高约 10%。该项研究为 CMOS 场效应管模型的精确建立及仿真分析提供了良好基础。

关键词:太赫兹 CMOS 场效应管; 场效应管探测器; 场效应管模型; 散射效应

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.3128

Terahertz CMOS transistor model and experimental analysis

ZHANG Jing-shui, KONG Lingqin, DONG Li-quan, ZHAO Yue-jin*

(School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: yjzhao@bit.edu.cn

Abstract: As the commercial CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) transistor model will lose the accuracy in a high frequency range, a nonlinear RCL transmission line model based on classic kinetic theory was developed with ADS software. The accuracy of proposed model and the working principle of the CMOS in THz range were discussed based on measured data. A simulation system for the nonlinear RCL transmission line model was constructed, and simulation results were compared with that of commercial model and the difference between the proposed model and the commercial CMOS model in THz range was analyzed. Then, the frequency responses of current CMOS transistors were tested, tested data were compared with those of the simulation data from the two kinds of models. The results demonstrate that the proposed model has been improved the prediction accuracy. Finally, the effects of channel size of transistor on the scattering effect of carriers were analyzed and conditions of transistor to turn on ballistic mode were given with 3σ rules. The results show that the difference between the two models mainly focuses on the inductance part, which could repre-

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61377109)

sent the momentum conservation of carriers in transistor channel and if the scattering effect could be neglected or not. Compared with the commercial model, the prediction accuracy for the optimal resonant frequency of a detector has improved by 0.3%, and that for the optimal working bandwidth of the detector has increased about 10%. This study provides a good foundation for the accurate establishment and simulation analysis of CMOS transistor models.

Key words: Terahertz CMOS; transistor detector; transistor detector model; scattering effect

1 引言

作为太赫兹波技术发展的关键技术之一,研发高灵敏度、响应迅速且能够在常温下工作的太赫兹探测器对太赫兹波在各领域的顺利应用有着重大的意义和作用。现有太赫兹波探测器主要包括热探测器、电探测器和光探测器,相较于其它两种探测器而言,电探测器因其较快的响应度、不需要额外的制冷装置及不受低能量太赫兹光子影响等特点在太赫兹探测器领域被作为重点研究对象。上世纪 90 年代,均匀电荷控制模型的提出令场效应管可工作于远高于其截止频率的区域,这令场效应管太赫兹探测器成为太赫兹电探测器最具发展前景的新方向^[1]。现有太赫兹场效应管探测器的主要材料主要有 CMOS、GaN^[2]、GaAs^[3] 及石墨烯^[4]等,其中 CMOS 场效应管太赫兹探测器因其成熟的技术、相对较低的成本及常温下工作时展示出的良好性能(常温下其最高响应度可达 2.2 kV/W,等效噪声功率可达到 14 pW/Hz^{1/2}^[5])而受到广泛地关注^[5-8]。

在 CMOS 太赫兹场效应管探测器的研究制作过程中,精准的理论模型是制作性能优良探测器的前提。如果前期模型仿真结果误差较大,则会为探测器的实际制作及顺利应用带来很大的困难及阻碍。因此,为降低探测器的制作成本,需要对设计好的探测器进行性能模拟测试,而该项工作的可信度依赖于太赫兹场效应管模型的精准程度。对于太赫兹波段的 CMOS 场效应管模型,由于其技术的限制,目前主要依赖 CMOS 加工方提供的商业模型,而现有的商业 CMOS 模型大多为基于无源线性器件的 RC 模型^[9](BISM3 和 BISM 4),该模型可对微波波段器件的响应行为做出准确预测;而当频率足够高且器件尺寸足够小时,场效应管会进入弹道工作模式^[10],该模式与低频工作原理不同,此时场效应管沟道中的散

射效应可以忽略不计,载流子以等离子体波的形式直接在电场力的驱动下运动。因此商业 RC 模型不能精确描述高频下场效应管沟道中等离子体波在高频下的非线性行为,故精准的太赫兹场效应管探测器模型一直是国内外研究工作者的重要研究方向^[11-14]。

针对此问题,本文首先从理论上提出高频下 RCL 模型与商业 RC 模型的区别,并分析两种模型的差别与电感在模型中的作用;同时,运用 ADS 软件,建立基于非线性 RCL 理论的场效应管模型,并结合实测数据与商业模型作对比,验证本文模型的正确性;最后,利用本文模型分析高频下场效应管沟道中载流子散射部分的作用,明确场效应管进入高频下弹道模式的条件。

2 基本原理

2.1 RCL 模型与商业 RC 模型比对分析

根据经典动能理论,沟道中的载流子运动可以用德鲁德模型来描述。考虑电场力(载流子漂移运动)和摩擦力(载流子散射运动),对于电荷为 q 的电子来说,其动量 p 为:

$$\frac{dp}{dt} = -qE - \frac{p}{\tau}. \quad (1)$$

式(1)经过变换后,结合粒子连续性方程,可得到基于经典动力学理论的一维德鲁德模型及其边界条件^[1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{q}{m} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{v}{\tau} &= 0, \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial nv}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

若只考虑沟道内等离子体的基波与一次谐波,则 $v \frac{\partial v}{\partial x}$, 公式(2)可以写成:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial x} &= -\left(\frac{1}{Wqn\mu} + i\omega \frac{\tau}{Wqn\mu}\right)/I, \\ \frac{\partial I}{\partial x} &= -i\omega Wq \frac{\partial n}{\partial U} U, \end{aligned} \quad (3)$$

其中: W 为场效应管沟道宽度, μ 为粒子迁移率。 n 为沟道内平均载流子密度, I 是沟道内电流。公式(3)与电报方程的基本形式一致,故沟道中载流子的运动实际可表示为 RCL 传输线模型,其中 R 、 L 和 C 的阻抗表达分别为^[15]:

$$\begin{aligned} R(x) &= \frac{1}{Wqn\mu}, \\ L(x) &= \tau R(x), \\ C(x) &= Wq \frac{\partial n}{\partial U}. \end{aligned} \quad (4)$$

将式(3)中两式联立可得:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \gamma_{\text{RCL}}^2 U = 0, \quad (5)$$

其中 γ_{RCL} 为 RCL 模型的传输线系数,

$$\gamma_{\text{RCL}} = \sqrt{j\omega C(R + j\omega L)}. \quad (6)$$

通过 RCL 传输线模型表达式导出过程,对比动力学理论初始方程及 RCL 模型最终表达式(4)可知,粒子连续性方程式(2)描述了 RCL 模型中的电容 C ,而经典动力学理论方程主要描述了沟道中载流子的漂移和散射两种运动,式(2)中 v/τ 为 RCL 模型中的电阻 R ,描述了沟道中载流子因散射效应而运动受阻的情况;式(2)中 $\partial v/\partial t$ 项为 RCL 模型中的电感 L ,该项来源于动力学理论初始方程式(1)中的 dp/dt ,描述了沟道中载流子的动量随时间变化的情况。在低频区域,电感 L 尚未发挥作用时,沟道中载流子动量不随时间变化,即沟道中载流子遵循动量守恒定律,外力之和为零,此时 RCL 模型可简化为 RC 模型;随着工作频率增大,当沟道中电感 L 开始发挥作用后,沟道中载流子运动的动量守恒被打破,此时沟道中载流子的散射效应可忽略不计,场效应管进入弹道工作模式。此时沟道中的载流子不再以单个粒子运动,而是以等离子体波的形式进行整体传输。

然而,目前大多数商业 CMOS 模型均为 RC 模型,即原模型中的电感部分为零,沟道中载流子的动量不随时间变化。此时式(2)中 $\partial v/\partial t$ 项为零,因此该式可变为:

$$\begin{aligned} \frac{q}{m} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{v}{\tau} &= 0, \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial nv}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

由此得 RC 模型的传输线系数 γ_{RC} 为:

$$\gamma_{\text{RC}} = \sqrt{j\omega RC}. \quad (8)$$

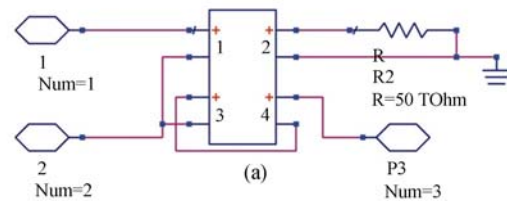
由上述分析可知,对于商业 RC 模型,其在高

频区域内会失去模型预测准确性。因此,构建适用于高频波段的 RCL 场效应管模型对太赫兹场效应管探测器的研发有着十分重大的意义。

2.2 非线性 RCL 传输线模型构建

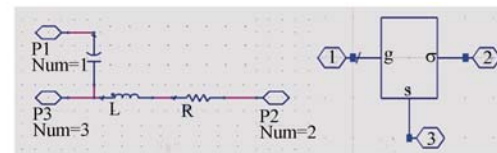
本文建模主要运用 Keysight 公司 Advanced Design System (ADS) 软件中的符号定义器件 (SDD)。根据非线性 RCL 理论模型,通过定义 SDD 的相关行为公式,构建非线性 RCL 传输线单元,进而通过连接多个传输线单元来构成场效应管沟道模型。在此基础上,考虑场效应管的寄生效应,通过加入寄生元件,建立完整的场效应管模型。

首先,根据 2.1 节描述的理论模型定义单个传输单元模型。单个传输单元包含 1 个电阻 R 、1 个电容 C 和 1 个电感 L ,借助 ADS 软件中 SDD 器件,构建非线性 RCL 传输线的单个传输单元模型如图 1 所示。其中图 1(a)为 SDD 模型内部结构,端口 1、端口 3 和端口 4 分别定义了电容 C 、电感 L 和电阻 R ,同时分别运用式(4)中 3 个公式计算 R 、 L 和 C 的响应。3 个元件的连接方式如图 1(b)所示,其中端口 2 连接 $50 \text{ T}\Omega$ 的电阻以保证电流的正常流动。RCL 单元的符号如图 1(c)所示。



(a) SDD 结构单元

(a) SDD unit



(b) RCL 传输线单元结构 (c) RCL 传输线单元结构
连接方式 外部符号

(b) Connection way of RCL unit (c) Symbol of RCL unit

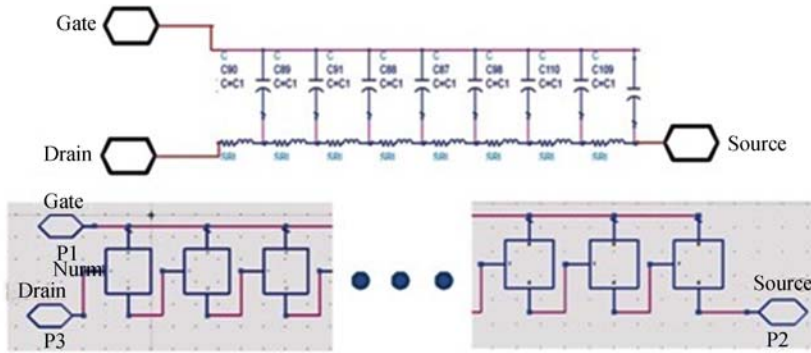
图 1 SDD 表示的 RCL 传输线单元结构

Fig. 1 RCL transmission line unit based on SDD device

将 N 个单元结构串联,构建场效应管沟道非线性 RCL 传输线模型,其连接方式如图 2(a) 所示,其符号如图 2(b) 中“FET_Line”所示。然而,对于完整的场效应管模型,除考虑沟道内部载流子运动模型外,还考虑沟道外部的寄生效应。寄生效应在低频时对探测器几乎无影响,而随着频率的增大(尤其至太赫兹波段),寄生效应的影响将随之增加。因此对于太赫兹波段的场效应管模型而言,需考虑寄生效应的影响不可忽略。本文在 CMOS 场效应管模型中,将寄生效应转化为寄生电阻和寄生电容,主要为源极和漏极的寄生接触电阻(R_d 和 R_s)、栅极重叠电容(C_{ov})、栅极边缘电容(C_{fr})和基底电容(C_b),据此得到完整模型结构如图 2(b) 所示。图中“FET_Line”表示场效应管 RCL 沟道模型, $R1$ 和 $R2$ 为接触电阻(R_d 和

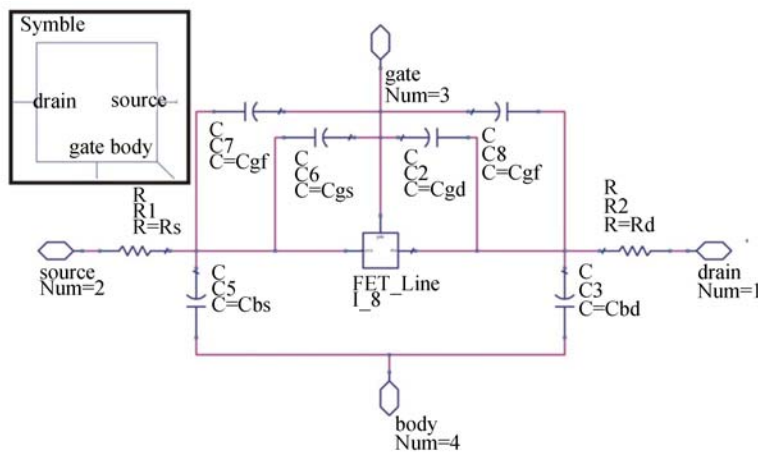
R_s), $C7$ 和 $C8$ 为边缘寄生电容(C_{fr}), $C6$ 和 $C2$ 为栅极重叠电容(C_{ov}), $C5$ 和 $C3$ 为沟道至基底的电容(C_b)。图 2(b) 左上角为模型在 ADS 中模拟时的代表符号。

因为 CMOS 场效应管探测器在制作时需依托商业公司,基于商业保密性考量,一些场效应管特性参数无法从相关公司得到,故本文中模型的模拟仿真方法为:从 CMOS 商业公司获得对应模型文件,因其直流表现可靠,故将商业模型的直流响应曲线带入到 Matlab 中进行曲线拟合,进而获取 CMOS 场效应管的相关特性参数(迁移率 μ 、阈值系数 η 及阈值电压 V_{th});将获取的参数带入本文所建模型中,对设计的探测器进行必要的仿真分析。



(a) 场效应管沟道 RCL 传输线连接方式

(a) Connection way of RCL transmission line for channel model



(b) 场效应管整体模型

(b) Whole transistor model

图 2 场效应管含寄生元件的整体模型

Fig. 2 Model of transistor including parasitic elements

3 仿真实验结果

建模后,为验证本文模型的正确性,将其与商业模型进行响应度仿真比较。本文主要考虑的仿真参数为场效应管探测器响应度,但因商业模型为基于 RC 传输线的模型,故为保证比对的有效性,在仿真分析时先将本文模型中的电感部分删除,得到本文 RC 模型响应度与商业模型响应度的仿真比对结果如图 3(彩图见期刊电子版)中蓝色实线和红色虚线所示。图中蓝色实线为商业模型,红色虚线为本文 RC 模型,黑色虚线为本文 RCL 模型。由图 3 可知,二者具有很高的一致性,这说明商业模型确实不含有电感部分,并同时反映出本文模型的准确性。

同时,为研究电感模型对场效应管响应度的影响,对本文建立的完整 RCL 非线性模型进行电流响应度仿真,仿真结果如图中黑色虚线所示。对比 RC 模型响应度曲线可知,当工作频率小于 1 THz 时,模型中的电感部分并未对场效应管响应产生影响,此时 RC 模型尚可准确预测场效应管的响应特性;而当工作频率大于 1 THz 时,模型中的电感部分影响逐渐增大,此时场效应管进入弹道工作模式,RC 模型不再适用。

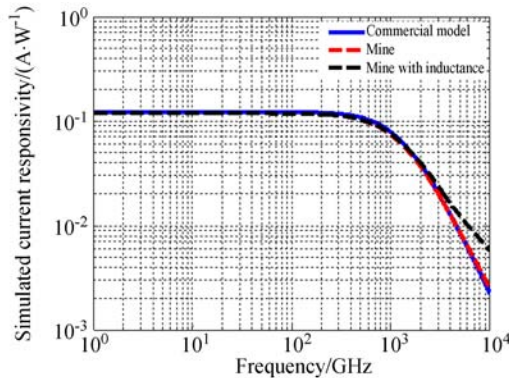


图 3 三种模型电流响应度仿真对比结果

Fig. 3 Simulated responsivity for three kinds of model

为更准确地从理论上说明本文模型的正确性,下文将分析场效应管尺寸大小对场效应管弹道模式开启频率点及沟道中散射效应的影响。

3.1 省略评判标准

本文采用 3σ 的原则来进行是否可以省略的评判。设定 A 和 B 为变量,若满足以下条件:

$$\left(1 - \frac{A}{B}\right) \left(1 + \frac{A}{B}\right) = 1 - \left(\frac{A}{B}\right)^2 > 0.9973, \quad (9)$$

则认为:

$$1 - \left(\frac{A}{B}\right)^2 \rightarrow 1, \frac{A}{B} \rightarrow 0, \quad (10)$$

此时认为 $B \gg A$, A 对 B 的影响则可以忽略不计。

故由此可得,设二者响应度之差为 ΔR , 给定评判系数 α , 认为若:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\Delta R}{R_{\text{withL}}}\right)^2 - 0.9973 > 0, \quad (11)$$

则此时模型中的电感部分可以忽略不计,散射效应不发挥作用。

根据式(11),对两种尺寸的 CMOS 场效应管进行模拟,如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。其中红色曲线为尺寸较小的 CMOS 场效应管,其沟道长度为 60 nm,沟道宽度为 600 nm;黑色曲线为尺寸较大的 CMOS 场效应管,其沟道长度为 100 nm,沟道宽度为 800 nm。图中频率低于过零点(Zero-Cross Points)时为 $\alpha > 0$ 的情况,此时根据式(11),模型中的电感部分可以忽略不计,即散射效应不发挥作用;当频率高于过零点时, $\alpha < 0$,此时不满足式(11)的省略条件,即在此区域内,散射效应开始发挥作用,此时模型中的电感部分不可以再省略。由此可见,散射效应主要在高频发挥作用,低频时 RC 模型与 RCL 模型并无差别,而高频区域中 RC 模型则不再适用。

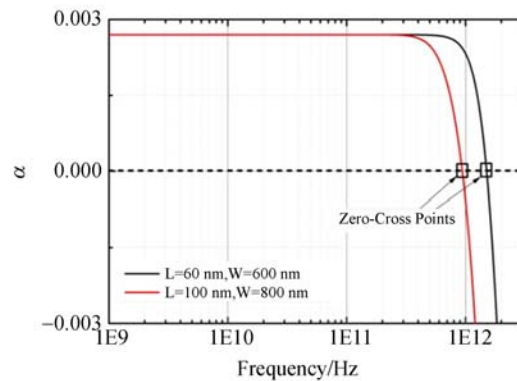


图 4 评判系数 α 随频率变化情况

Fig. 4 Judging parameter α changes with frequency

3.2 过零点随沟道宽度变化情况

由前文可知,电感部分作用与场效应管尺寸相关,因此此处分别从场效应管沟道宽度及场效应管沟道长度两方面进行仿真分析。当 CMOS 场效应管场长度为固定值时,过零点随场效应管

宽度的变化如图 5 所示。仿真时电子迁移率选取为 $\mu=0.025$, 图中的 3 条曲线分别代表不同的沟道长度。由图可知, 当长度及寄生参数固定时, 过零点所处频率随之固定, 并未受宽度变化而变化, 说明电感部分对场效应管响应度影响的大小并不随宽度的变化而改变。

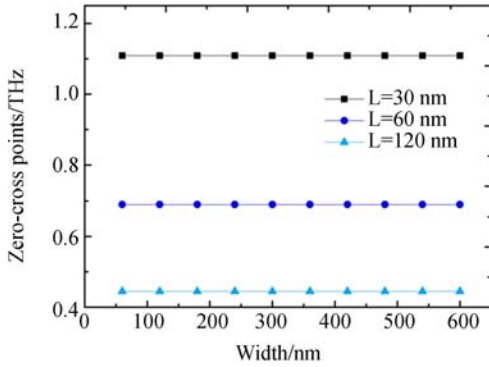


图 5 当场效应管沟道长度不变时, 过零点随沟道宽度的变化情况

Fig. 5 Zero-cross points changes with the channel width when the channel length is fixed

3.3 过零点随沟道长度变化情况

当 CMOS 场效应管宽度为固定值时 ($W=600$ nm), 过零点随长宽比的变化如图 6 所示。图中的 3 条曲线分别代表不同的电子迁移率。由图可知, 若宽度一定, 则过零点随长度变化明显。过零点所在频率呈先减后增的趋势, 即在一定的长度时出现过最小频率过零点。且当长度达一定值时, 过零点维持在同一频率, 不再发生变化。这说明电感作用的开启频率点随沟道长度的增大呈先减小后增大的趋势, 并当长度增长至一定值后, 停止随长度的变化。且由图 6 可知, 电子迁移率越大时, 过零点所处频率越低, 沟道长度对过零点位置的影响范围越广。

图 5 及图 6 所示变化与电感部分所代表的物理原理有关。由第 3 章可知, 模型中电感部分表示沟道中载流子的惯性运动, 即载流子动量随时间的变化 dp/dt 。当模型中电感 L 并未对场效应管电流响应度产生影响时, 意味着载流子动量并不随时间改变, 即沟道中载流子运动遵循动量守恒, 所受外力矢量和为零; 而当电感部分开始发挥作用时, 沟道中的动量守恒被破坏, 此时载流子受力平衡被打破。而根据前文对高频下场效应管工作原理可知, 受力平衡被打破的原因为场效应管

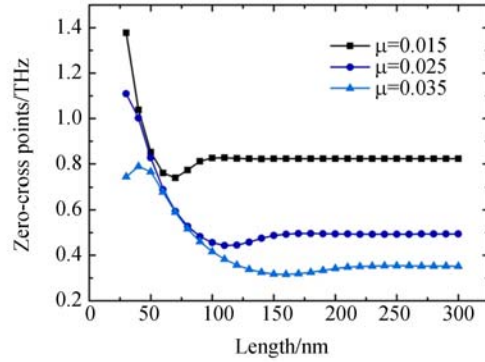


图 6 当场效应管沟道宽度不变时, 过零点随沟道长度的变化情况

Fig. 6 Zero-cross points changes with channel length when channel width is fixed

进入了弹道模式, 此时沟道内载流子的摩擦力(即散射效应)可忽略不计, 载流子的运动主要为在电场力驱动下的漂移运动。因此, 模型中电感作用是否开启可认为是载流子是否进入弹道模式的表征参数。且由图 5 及图 6 可知, 场效应管迁移率越高时, 场效应管弹道模式开启频率越低。这是因为迁移率越高时, 粒子的散射概率越低, 场效应管越容易进入弹道模式。

4 测量实验与结果

为进一步验证本文模型的正确性, 本小节将结合实测数据, 通过对比本文模型、商业模型与实测数据的误差, 来说明本文模型对探测器仿真精度的提高程度。本小节在仿真时主要考虑最佳震荡频率与带宽两个参数。同时, 为便于对探测器带宽进行比较, 结果曲线均在最大值处进行了归一化处理。本小节测试探测器为太赫兹微带天线探测器, 实测结果与两种模型仿真结果对比如图 7 和图 8 所示。图中虚线为仿真结果。图中显示了不同栅极电压 U_G 下归一化后的响应度随频率的变化曲线。由图可知, 实测结果中, 探测器的最佳震荡频率为 628 GHz, $U_G=0.5$ V 时带宽为 7.2%, $U_G=0.9$ 时带宽为 7.8%; 本文模型仿真结果中, 探测器的最佳震荡频率为 626 GHz, $U_G=0.5$ V 时带宽为 5.1%, $U_G=0.9$ 时带宽为 5.9%; 商业模型仿真结果中, 当 $U_G=0.5$ V 时, 探测器的最佳震荡频率为 624 GHz, 带宽为 4.6%, $U_G=0.9$ 时, 探测器的最佳震荡频率为

620 GHz, 带宽为 4.7%。此外, 由图 7 和图 8 的结果可得, 本文模型仿真值和实测值在 630~680 GHz 波段仍存在一定差距, 这是由于仿真模型基于商业公司提供的统一理论参数, 然而实际工程制造中, 每个场效应管探测器会因制造工艺而产生差异性, 导致每一个场效应管电阻会发生变化, 进而令天线和场效应管之间的匹配参数改变, 表现出不同的频率响应特性。但是对比图中本文模型与商业模型的仿真结果可知, 在此频率范围内, 本文所建模型仿真结果更接近实测数据, 这说明在该频段内本文所建模型仿真精度确实优于商业模型, 也说明本文模型建立的必要性。

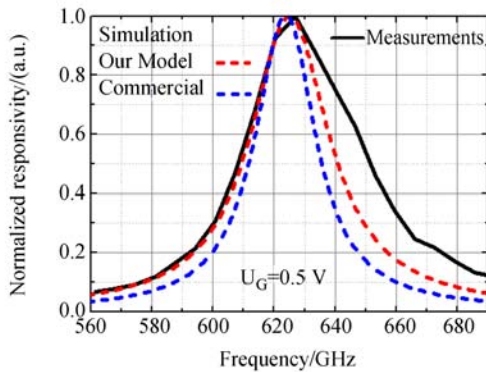


图 7 微带天线频率响应仿真结果与实测结果对比图
Fig. 7 Comparison of simulated results of commercial model and measured results for patch antenna detector

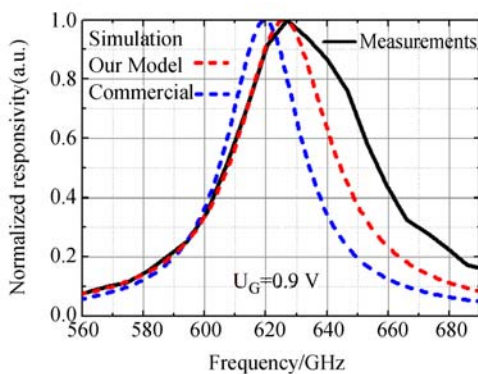


图 8 微带天线频率响应仿真结果与实测结果对比图
Fig. 8 Comparison of simulated results and measured results for patch antenna detector

总结实测结果与两种模型的仿真结果如下表所示。

表 1 实测数据与仿真数据对比结果

Tab. 1 Comparison of measured data and simulated data

结果种类	栅极电压 /V	最佳震荡频率/GHz /仿真与实测误差/%	带宽/仿真与实测误差/%
实测结果	0.5	628 / —	7.2 / —
	0.9	628 / —	7.8 / —
仿真结果 (商业模型)	0.5	624 / 0.6	4.6 / 36
	0.9	620 / 1.2	4.7 / 40
仿真结果 (本文模型)	0.5	626 / 0.3	5.1 / 29
	0.9	626 / 0.3	5.9 / 24

由图 7、图 8 及表 1 可知, 与商业模型相比, 本文模型更接近实测数据。通过与实测数据的对比得知, 相较于商业模型, 本文模型对探测器最佳频率工作点的预测精准度可提高 0.3%, 对探测器带宽的预测精准度可提高约 10%。

5 结 论

综上所述, 本文针对商业 CMOS 场效应管模型高频失效的问题, 运用 ADS 软件, 构建了基于经典动力学理论的非线性 RCL 传输线模型, 同时借助该模型分析了商业模型与本模型的区别, 高频下散射效应对场效应管沟道中载流子运动的影响, 以及场效应管进入弹道工作模式的条件。文中首先从理论上明确了商业场效应管 RC 模型与基于经典动力学理论的非线性 RCL 传输线模型的区别, 由结果可知, 二者的主要区别在于模型中是否存在电感部分, 而由理论分析得知, 电感 L 可看成场效应管沟道中载流子动量是否守恒的表征参数: 在低频时, L 并不发挥作用, 此时的 RC 模型为对低频下满足动量守恒载流子运动特性的描述。此时载流子所受外力矢量和为零, 载流子在电场力和摩擦力的共同作用下运动, 沟道中同时存在漂移效应和散射效应; 而对于高频区域, 沟道中的散射效应可忽略不计, 因而载流子动量守恒被打破, 沟道中载流子主要在电场力的作用下进行漂移运动, 此时模型中的电感部分开始发挥作用, 场效应管进入弹道工作模式。因此, 在高频波段商业 RC 模型会失效。其次, 为验证本文所建模型的正确性, 文中将删除电感部分后的模型与商业模型进行响应度仿真比较, 仿真结果显示了二者具有很高的一致性。同时, 本文对完整的 RCL 模型进行响应度仿真, 并将其与 RC 模型进

行比对,比对结果显示二者在低频时响应度一致,随着频率的增大,两种模型的响应度开始产生区别,模型中的电感部分开始发生作用;且频率越大,二者的区别越明显,该结果与理论相符。再次,借助本文所建模型,文中运用 3σ 原则分析了场效应管沟道尺寸对场效应管沟道内散射效应的影响。由理论分析可知,当场效应管频率足够大、尺寸足够小时,场效应管沟道内散射效应可以忽略不计,此时场效应管开启弹道模式。给定场效应管进入弹道模式时的频率为弹道模式开启频率,仿真分析结果显示,当场效应管长度不变时,弹道模式开启频率并不随宽度的变化而改变,因此散射效应的强弱并不受场效应管宽度大小的影响;而当场效应管宽度固定时,弹道模式开启频率随沟道长度的增大呈先减小后增大的趋势,并当

长度增长至一定值后,停止随长度的变化。由此可知,小尺寸场效应管对弹道模式开启频率的影响较大,当沟道尺寸达到一定大小后,弹道模式开启频率不再受沟道尺寸影响。此外,场效应管迁移率越高时,场效应管弹道模式开启频率越低。这是因为迁移率越高时,粒子的散射概率越低,场效应管越容易进入弹道模式。最后,通过本文模型仿真数据、商业模型仿真数据与实验实测数据的对比分析可知,相较于商业模型,本文模型对探测器最佳频率工作点的预测精准度可提高 0.3%,对探测器带宽的预测精准度可提高约 10%。

本文的研究工作为 CMOS 场效应管模型的精确建立及仿真分析提供良好基础,为更好地进行场效应管的设计工作和加工成本节约提供了更有效的保障。

参考文献:

- [1] DYAKONOV M, SHUR M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(3): 380-387.
- [2] SUN J D. Realization of terahertz self-mixing detectors based on AlGaIn/GaN HEMT [M]. In: Field-effect Self-mixing Terahertz Detectors. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016.
- [3] POPOV V V, ERMOLAEV D M, MAREMYANIN K V, et al.. High-responsivity terahertz detection by on-chip InGaAs/GaAs field-effect-transistor array [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(15): 153504.
- [4] QIN H, SUN J D, LIANG S X, et al.. Room-temperature, low-impedance and high-sensitivity terahertz direct detector based on bilayer graphene field-effect transistor [J]. *Carbon*, 2017, 116: 760-765.
- [5] SHERRY A C H, THEVENET D, DEDIEU S. Low-Cost Highly-Integrated Room-Temperature Terahertz Detection Using Silicon Technologies, in 8th THz Days[Z]. 2015.
- [6] RYU M W, LEE J S, KIM K S, et al.. High-performance plasmonic THz detector based on asymmetric FET with vertically integrated antenna in CMOS technology [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(4): 1742-1748.
- [7] LU J Q, SHUR M S, HESLER J L, et al.. Terahertz detector utilizing two-dimensional electronic fluid [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1998, 19(10): 373-375.
- [8] HADI R A, SHERRY H, GRZYB J, et al.. A 1 k-pixel video camera for 0.7-1.1 terahertz imaging applications in 65-nm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, 47(12): 2999-3012.
- [9] CHAN M S, HUI K Y, HU C M, et al.. A robust and physical BSIM3 non-quasi-static transient and AC small-signal model for circuit simulation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, 45(4): 834-841.
- [10] 秦华, 黄永丹, 孙建东, 等. 二维电子气等离子激元太赫兹波器件 [J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 51-67, 150.
- [11] QIN H, HUANG Y D, SUN J D, et al.. Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(1): 51-67, 150. (in Chinese)
- [12] GRASSER T, TANG T W, KOSINA H, et al.. A review of hydrodynamic and energy-transport models for semiconductor device simulation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(2): 251-274.
- [13] PREU S, KIM S, VERMA R, et al.. An improved model for non-resonant terahertz detection in field-effect transistors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(2): 024502.

- [13] GUTIN A, NAHAR S, HELLA M, *et al.*. Modeling terahertz plasmonic Si FETs with SPICE[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(5): 545-549.
- [14] IBRAHIM N Y, RAFAT N H, ELNAHWY S E A. Modeling of field effect transistor channel as a nonlinear transmission line for terahertz detection [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, 34(10): 606-616.
- [15] KHMYROVA I, SEIJYOU Y. Analysis of plasma oscillations in high-electron mobility transistorlike structures: Distributed circuit approach[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(14): 143515.

作者简介:

张镜水(1989—),女,吉林长春人,博士研究生,2011年于北京理工大学获得学士学位,主要从事太赫兹探测及成像方面的研究。E-mail: jingshui_zhang@163.com

导师简介:

赵跃进(1958—),男,河北人,教授,博士生导师,1990年于北京理工大学获得博士学位,现主要从事主要研究光电仪器、图像处理、MEMS技术、THz成像技术研究。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn