

# n 型金属氧化物半导体场效应晶体管 噪声非高斯性研究\*

李伟华<sup>1)†</sup> 庄奕琪<sup>1)</sup> 杜磊<sup>2)</sup> 包军林<sup>1)</sup>

1) 西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

2) 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2009 年 5 月 1 日收到, 2009 年 7 月 1 日收到修改稿)

基于 n 型金属氧化物半导体场效应晶体管 (nMOSFET) 噪声的数涨落模型, 采用高阶统计量双相干系数平方和研究了 nMOSFET 噪声的非高斯性. 通过对 nMOSFET 实际测试噪声的分析, 发现 nMOSFET 器件噪声存在非高斯性; 小尺寸器件噪声的非高斯性强于大尺寸器件; 在器件的强反型线性区, 其非高斯性随着漏压的增加而增加. 文中还通过蒙特卡罗模拟和中心极限定理理论对 nMOSFET 噪声的非高斯性作了深入的探讨.

关键词: 噪声, 非高斯性, n 型金属氧化物半导体场效应晶体管, 氧化层陷阱

PACC: 7270, 7340Q, 7220J

## 1. 引 言

电子器件低频噪声来源于载流子的随机起伏, 是器件载流子输运微观动力学机制的宏观反映, 因此研究器件噪声是探索器件微观性质的重要手段. 但是以往对器件噪声的研究是通过功率谱分析来实现的, 这样做的前提是假设器件噪声为高斯分布<sup>[1]</sup>. 但是, 器件噪声不全是高斯的, 近年有研究者陆续在异质结双极晶体管 (HBT)<sup>[2]</sup>、气体传感器<sup>[3]</sup>和金属薄膜<sup>[4]</sup>中发现了非高斯分布的噪声. 但对于基本的电子器件 n 型金属氧化物半导体场效应晶体管 (nMOSFET), 尚未见到有类似的报道.

对于大尺寸 nMOSFET 器件, 其噪声时间序列的概率密度函数通常服从高斯分布<sup>[1]</sup>. 但对于小尺寸器件, 比如本文所用的测试样品, 笔者发现其噪声的概率密度函数明显偏离高斯分布. 器件噪声的非高斯分布指器件噪声的概率密度函数偏离正态分布的情况. 其偏离的程度可以用本文所提出的双相干系数平方和  $S$  来刻画, 并进一步将器件噪声具有非高斯分布这一特点称为器件噪声的非高斯性.  $S$  参量越大, 器件噪声对非高斯分布的偏离程度越大, 器件噪声的非高斯性越强, 反之亦然.

根据数涨落理论, nMOSFET 噪声来源于栅氧化

层陷阱对沟道载流子的随机俘获/发射, 多个陷阱产生的随机电报噪声 (RTS) 的叠加构成了 nMOSFET 噪声<sup>[1,5,6]</sup>. 早期的研究认为 nMOSFET 噪声是高斯分布的<sup>[1]</sup>, 但是 RTS 噪声是非高斯分布的<sup>[2]</sup>. 那么单个 RTS 噪声的非高斯性和 nMOSFET 噪声的高斯性有着怎样的内在联系? 如果 nMOSFET 器件存在非高斯噪声, 那么大尺寸器件的噪声和小尺寸器件的噪声有何区别? 其非高斯性是否有强弱之分?

对器件噪声非高斯性的判别和定量刻画不能采用传统的功率谱分析方法, 因为功率谱分析采用的是二阶统计量, 高斯信号和非高斯信号不能通过功率谱分析进行有效区分; 对信号非高斯性的分析需要更高阶的统计量<sup>[7]</sup>. 本文采用高阶统计量双相干系数平方和  $S$  来分析 nMOSFET 噪声, 因为  $S$  参量可以定量刻画信号中非高斯成分的大小; 发现 nMOSFET 与 HBT 等其他器件一样噪声存在非高斯性. 通过对 nMOSFET 检测噪声和蒙特卡罗模拟噪声的对比分析, 深入研究了噪声类型与器件尺寸和偏置条件的关系.

## 2. 分析方法

对时间序列非高斯分布的刻画工程上常采用偏度和峭度. 但对于器件噪声, 偏度和峭度是两个参

\* 国家自然科学基金(批准号: 60676053)资助的课题.

† E-mail: fx2000\_lwh@yahoo.com.cn

量,不适于线性地刻画噪声非高斯性的强弱;其次,偏度和峭度分别是待分析信号的三阶和四阶原点距,忽略了噪声的很多高阶统计信息,故不利于刻画器件噪声的非高斯性,实际分析结果也证明了这一点。

对于高斯分布的随机信号,其高阶谱等于零是高阶统计量的一个突出性质<sup>[7]</sup>。为了定量比较不同信号的非高斯性,本文提出了一个表征参量双相干系数平方和  $S$ ,定义如下:

$$S = \sum_{\lambda_1=0}^{\frac{M}{2}} \sum_{\lambda_2=0}^{\frac{M}{2}} \frac{|\hat{B}(\lambda_1, \lambda_2)|^2}{\hat{P}(\lambda_1 + \lambda_2)\hat{P}(\lambda_1)\hat{P}(\lambda_2)}, \quad (1)$$

其中,  $M$  是信号长度;参量  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  满足  $0 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1$ ,  $\lambda_1 + \lambda_2 \leq M/2$  的关系;  $\hat{B}(\lambda_1, \lambda_2)$  是信号双谱的估计值;  $\hat{P}(\lambda)$  是信号功率谱的估计值。

为了验证  $S$  参量对信号中非高斯成分的检验效果,将指数分布的随机信号作为非高斯信号  $u_0$ , 高斯分布的随机信号作为高斯信号  $u_4$ 。将  $u_0$  作为信号,  $u_4$  作为噪声,二者按照不同信噪比进行叠加,计算混合后信号的  $S$  值,结果如图 1 所示。在图 1 中,高斯信号  $u_4$  的  $S$  值最小,等于 0.51;非高斯信号  $u_0$  的  $S$  值最大,等于 159.61;从左往右随着信噪比的增加,混合后信号从  $u_4$  逐渐过渡为  $u_0$ ,  $S$  值单调递增。说明  $S$  参量能够定量刻画信号中非高斯成分的强弱。

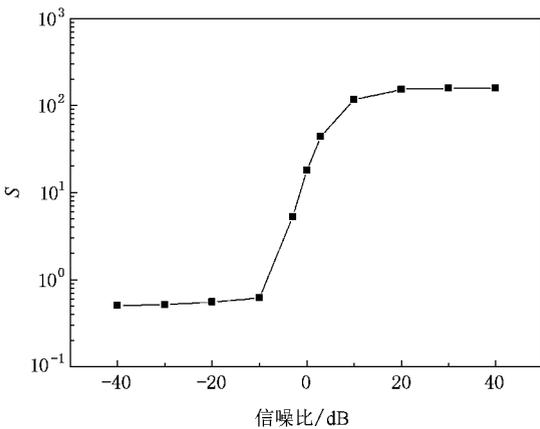


图 1 不同信噪比下信号叠加后的  $S$  值

### 3. 对 nMOSFET 噪声的分析

测试样品来自华晶 1.0  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺制备的增强型 nMOSFET,其栅氧化层厚度为  $(20 \pm 1.5)$  nm,样

品 1 的沟道宽长比为 4.0  $\mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$ ,样品 2 的沟道宽长比为 50.0  $\mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$ 。噪声测量采用西安电子科技大学噪声检测与无损诊断实验室自主研发的基于虚拟仪器的电子器件低频噪声测试系统。噪声测试电路如图 2 所示。噪声测试在器件的强反型线性区进行,所加的有效栅压为 3 V,漏压分别为 0.05, 0.1, 0.2 和 0.4 V。

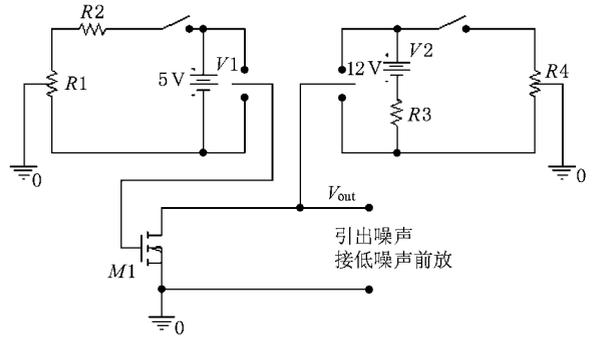


图 2 MOSFET 噪声测试偏置电路

对器件噪声电压是否为高斯分布最直接的判断是绘制其概率密度函数(PDF)图。图 3 以柱状图形式绘制了样品 1 在  $V_d = 0.4$  V 时噪声的 PDF,其中实线是进行正态分布拟合所得到的曲线,二者差别明显。图 4 是样品 2 在  $V_d = 0.05$  V 时噪声的 PDF,它和对应的正态分布拟合曲线符合较好。不同漏压下,样品 1 的 PDF 明显偏离正态分布,样品 2 的 PDF 与正态分布较为接近。这说明小尺寸 nMOSFET 噪声服从非高斯分布。

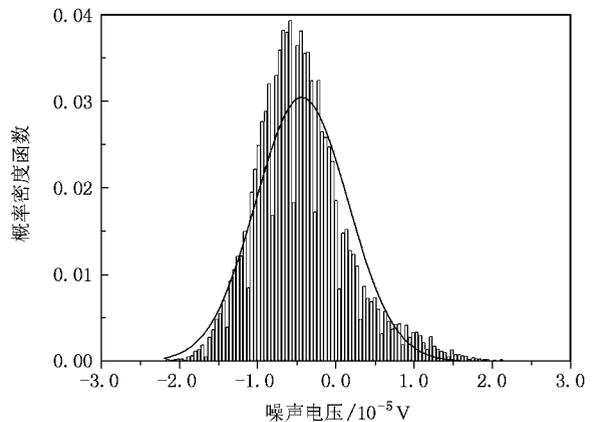
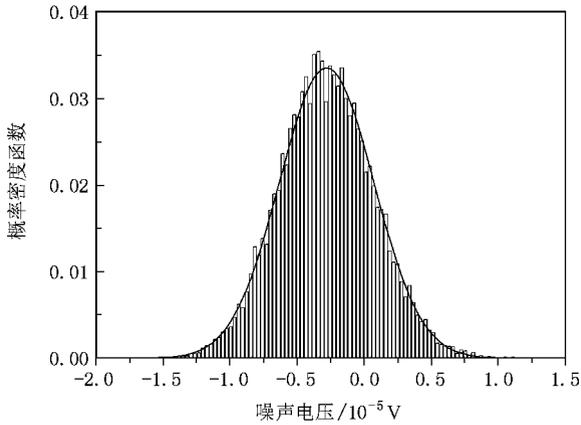
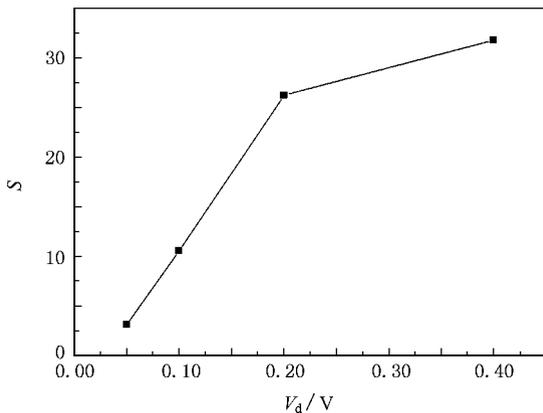
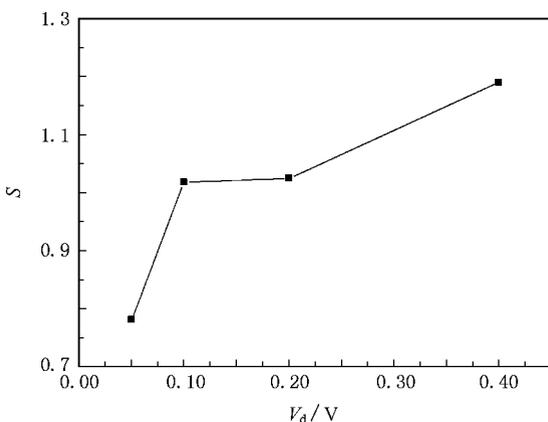


图 3 样品 1 在  $V_d = 0.4$  V 时噪声的 PDF 图

根据 PDF 只能够定性判断噪声的高斯性与否,无法进行定量的比较。在图 5 和图 6 中给出了两个样品在不同漏压下噪声的  $S$  值。样品 2 的  $S$  值均

图 4 样品 2 在  $V_d = 0.05$  V 时噪声的 PDF 图

小于 2, 可判定其满足高斯分布; 样品 1 的  $S$  值均大于 2, 可判定其含有较多的非高斯成分. 两个样品的  $S$  值均随着漏压的增加而增加.

图 5 样品 1 在不同漏压下噪声的  $S$  值图 6 样品 2 在不同漏压下噪声的  $S$  值

## 4. 结果讨论

根据图 1,  $S$  参数能够反映信号非高斯性强弱. 根据图 3—6 有三点结论: 其一, nMOSFET 器件的噪声存在非高斯性; 其二, 小尺寸器件噪声的非高斯性强于大尺寸器件; 其三, 栅压一定时, 非高斯性随着漏压的增加而增加.

大尺寸 nMOSFET 器件的噪声基本上服从高斯分布, 小尺寸 nMOSFET 器件的噪声存在非高斯分布. 对于小尺寸 nMOSFET, 仅具有高低两个电平的 RTS 噪声和具有多个电平值的 RTS 叠加噪声是其为主要表现形式<sup>[1,5]</sup>. 根据噪声形式的不同,  $S$  参量的直接应用有两点: 对于仅含有高低两个电平的 RTS 噪声, 可以判断产生该 RTS 噪声的陷阱能级的高低; 对于含有多个电平值的 nMOSFET 噪声信号, 可以判断陷阱的激活能排布. 下面从数学和物理两方面进行讨论.

对于 nMOSFET, 根据数涨落理论, 氧化层陷阱对沟道载流子的随机俘获/发射导致了沟道载流子数的涨落<sup>[1,5]</sup>. 从概率论的观点来看, 将陷阱 T1 对载流子的每一次俘获、发射或保持原状态这一作用过程定义为一个事件, 分别对应于 RTS 噪声的一个高电平和低电平. 将陷阱 T1 对载流子的一系列作用过程定义为一个样本, 对应于 RTS 噪声的一个时间序列. 一个 RTS 时间序列有  $n$  个高低电平, 表示一个样本中有  $n$  个事件. 若有  $m$  个陷阱, 则有  $m$  个样本, 每个样本有  $n$  个事件, 共有  $mn$  个事件. 将这  $m$  个样本相叠加, 得到长度为  $n$  的 RTS 叠加信号 ( $s$ RTS),  $s$ RTS 与 nMOSFET 噪声信号相对应. 每个样本由  $n$  个事件构成, 各事件之间是相关的, 相关事件的数目是  $C_n^2$ . 任意两个样本是独立的, 所以两个样本的事件之间是不相关的. 故而在 nMOSFET 数涨落模型中, 相关事件的数目  $N_d$  为

$$N_d = mC_n^2 = \frac{1}{2} mn(n-1), \quad (2)$$

总的事件数目  $N_t$  为

$$N_t = C_{mn}^2 = \frac{1}{2} mn(mn-1), \quad (3)$$

不相关的事件数目  $N_i$  为

$$N_i = N_t - N_d = \frac{1}{2} mn^2(m-1), \quad (4)$$

$N_i$  与  $N_t$  的比例  $\eta$  为

$$\eta = \frac{N_i}{N_t} = \frac{n(m-1)}{nm-1} = 1 - \frac{n-1}{nm-1}$$

$$\xrightarrow{n \text{ 较大时}} 1 - \frac{1}{m} \approx \begin{cases} 1 & (m \text{ 较大时}), \\ 1 - \frac{1}{m} & (m \text{ 较小时}). \end{cases} \quad (5)$$

可见,当  $m$  较大时,  $\eta \approx 1$ ,  $N_i \approx N_t$ , 总事件几乎两两不相关, 满足中心极限定理的条件, 此时器件噪声具有较好的高斯性, 这和大尺寸 nMOSFET 噪声的高斯性结果相一致; 当  $m$  较小时, 相关事件的数目不可忽略, 不满足中心极限定理的条件, 器件噪声服从非高斯分布, 这与小尺寸 nMOSFET 噪声的非高斯性结果相一致;  $m$  越小, 相关事件在总事件中所占的比重越大, 器件噪声对高斯性的偏离越强。

为了说明非高斯性随着漏压的增加而增加, 通过蒙特卡罗方法模拟产生了 RTS 叠加信号 (sRTS)<sup>[8]</sup>. 假设器件氧化层中存在  $m$  个边缘陷阱, 这  $m$  个陷阱根据激活能的不同处于相应的能级, 相同能级的陷阱具有同样的俘获/发射概率. 每个陷阱根据其各自的俘获/发射概率, 都可以独立地与沟道交换载流子, 并生成一个仅有高、低两个电平的长度为  $n$  的 RTS 时间序列. 将  $m$  个陷阱所对应的 RTS 时间序列相叠加, 就得到一个长度为  $n$  具有多个电平值的 RTS 叠加信号. 通过这种方法, 可以得到指定激活能的一个陷阱所产生的 RTS 信号, 如图 7 中“■”所示; 也可以得到指定激活能的多个陷阱所产生的 RTS 叠加信号, 如图 7 中“○”和“▲”所示; 并且根据陷阱排布参数  $\lambda$ , 得到指定分布的陷阱所产生的 RTS 叠加信号, 如图 8 所示。

根据(6)式, 激活能较大的陷阱所产生的 RTS 信号有较大的时常数<sup>[1]</sup>

$$\tau = \tau_0 \exp(E_a/kT), \quad (6)$$

时常数较大的 RTS 的相关性也越强<sup>[1]</sup>,

$$R_X(t) = X(t_0)X(t_0 + t) = X^2 e^{-t/\tau}. \quad (7)$$

RTS 的相关性越强, 对高斯性的偏离越严重, 所以非高斯性越强,  $S$  值越大, 如图 7 中“■”所示. 当多个相同激活能的陷阱所产生的 RTS 相叠加时, 不同 RTS 的高低电平可能相互抵消, 也有可能相互叠加而增强, sRTS 的相关性因为叠加而变弱. 故而 sRTS 的  $S$  值要小于构成 sRTS 的 RTS 信号的  $S$  值之和. 相同激活能的陷阱数目越多, 越满足中心极限定理的条件, sRTS 的非高斯性越小,  $S$  值越小. 图 7 给出了各能级分别填充 1 个陷阱(■)、5 个陷阱(○)、10 个陷阱(▲)时所得噪声信号 RTS1, sRTS5, sRTS10 的  $S$  值变化曲线. 它们均随着  $E_a$  的增大单调递增; RTS1 的  $S$

值远大于 sRTS5 和 sRTS10; 激活能较小时 sRTS5 和 sRTS10 比较接近, 说明叠加过程对于 sRTS 的稀释作用有一个下限; 当激活能较大时, sRTS5 和 sRTS10 区别明显. 对于小尺寸 nMOSFET, 仅具有高低两个电平的 RTS 噪声是它的一种主要表现形式, 根据图 7 的结果(■), 可以判断产生 RTS 噪声的陷阱的激活能的大小.

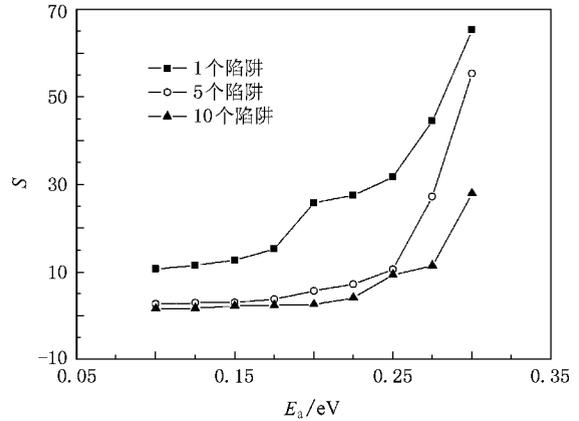


图 7 激活能  $E_a$  变化时 RTS 信号的  $S$  值

当陷阱激活能的分布满足(8)式的时候, 各陷阱所对应的 RTS 叠加后的信号具有  $1/f^\gamma$  谱的形式<sup>[8]</sup>,

$$g(E_a) \propto \exp\left[(\lambda - 1)\frac{E_a}{kT}\right]. \quad (8)$$

图 8 给出了陷阱数目分别为 70(■)、350(○)、700(▲),  $\lambda$  值逐渐变化的 RTS 叠加信号 sRTS70, sRTS350, sRTS700 的  $S$  值变化曲线. 当  $\lambda \leq 1$  时, 激活能较小的陷阱数目较多, 这部分陷阱所产生的 RTS 信号具有较小的  $S$  值, 所以使得 sRTS 信号的  $S$  值较小, 而且三条曲线非常接近. 当  $\lambda > 1$  时, 激活能大的陷阱

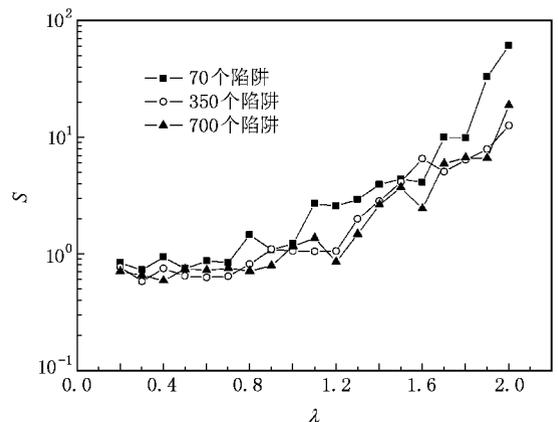


图 8 参数  $\lambda$  变化时  $1/f$  信号的  $S$  值

数目较多,大激活能的陷阱抬高了  $s$ RTS 信号的  $S$  值,所以随着  $\lambda$  值的变大  $S$  值增加;由于叠加过程对于  $s$ RTS 存在稀释作用,所以  $s$ RTS70 整体大于  $s$ RTS350 和  $s$ RTS700;但这种稀释存在一个下限,故而  $s$ RTS350 和  $s$ RTS700 区别不大。

对于  $n$ MOSFET,随着漏压的增加,沟道横向电场增强,电子的横向漂移速度增加.因为电子的相互碰撞及与晶格的散射,将导致电子热运动速度的增加.根据载流子俘获/发射的物理机制,载流子被更深能级陷阱俘获的概率增大,与载流子发生作用的激活能较大的陷阱数目增加.这些新参与载流子交换的激活能较大的陷阱将使得器件噪声的  $S$  值增加,如图 8 所示.最终使得样品 1 的  $S$  值随着漏压单调递增,如图 5 所示.类似地,图 6 中的样品 2 的  $S$  值也随着漏压单调递增.但样品 2 的  $S$  值的变化范围远小于样品 1.这是因为样品 2 的尺寸远大于样品 1,样品 2 的氧化层陷阱越多,构成  $1/f$  信号的 RTS 数目也越多,根据 (5) 式,样品 2 更符合中心极限定理的条件,其  $S$  值如图 8 中陷阱数目为 700 时 ( $\blacktriangle$ ) 所示.含有多个电平的 RTS 叠加噪声是小尺寸

$n$ MOSFET 器件噪声的主要表现形式,根据图 8 的结果,可以判断氧化层陷阱的排布.

## 5. 结 论

本文采用高阶统计量双相干系数平方和  $S$  定量刻画了  $n$ MOSFET 噪声的非高斯性,研究了氧化层陷阱的物理性质,及氧化层陷阱与沟道载流子的相互作用过程.发现  $n$ MOSFET 器件噪声存在非高斯性;小尺寸器件噪声的非高斯性强于大尺寸器件;在器件的强反型线性区,其非高斯性随着漏压的增加而增加.这一现象是由数学上的中心极限定理和器件噪声的微观机制所共同决定的.对于小尺寸  $n$ MOSFET 器件噪声非高斯性的研究有两个直接应用:对于仅含有高低两个电平的 RTS 噪声,可以判断产生该 RTS 噪声的陷阱能级的高低;对于含有多个电平值的  $n$ MOSFET 噪声信号,可以判断陷阱的激活能排布.上述研究结果为从实测噪声中分离出单个 RTS 信号提供了理论支持;并进一步成为评价器件的损伤程度,研究器件可靠性的重要手段.

- [ 1 ] Zhuang Y Q ,Sun Q 1993 *Noise and Its Minimizing Technology in Semiconductor Devices* ( Beijing : National Defence Industry Press ) pp63—122 ( in Chinese ) [ 庄奕琪、孙 青 1993 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术(北京:国防工业出版社)第 63—122 页 ]
- [ 2 ] Johansen J A ,Birkelund Y ,Jin Z R ,Cressler J D 2004 *IEEE Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems* ( Atlanta : IEEE ) p119
- [ 3 ] Smulko J M ,Kish L B 2004 *Sensor Mater.* **16** 291
- [ 4 ] Orlyanchik V ,Kozub V I ,Ovadyahu Z 2008 *Phys. Stat. Sol.* **5** 809
- [ 5 ] Liu Y A ,Du L ,Bao J L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2468 ( in

- Chinese ) [ 刘宇安、杜 磊、包军林 2008 物理学报 **57** 2468 ]
- [ 6 ] Bao J L ,Zhuang Y Q ,Du L ,Li W H ,Wan C X ,Zhang P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2118 ( in Chinese ) [ 包军林、庄奕琪、杜 磊、李伟华、万长兴、张 萍 2005 物理学报 **54** 2118 ]
- [ 7 ] Zhang X D 1996 *Time Serial Analysis : Higher Order Statistics* ( Beijing : Tsinghua University Press ) p42 ( in Chinese ) [ 张贤达 1996 时间序列分析——高阶统计量方法(北京:清华大学出版社)第 42 页 ]
- [ 8 ] Du L ,Zhuang Y Q 1999 *Proceedings of the 15th International Conference on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations* Hong Kong ,China ,August 23—26 ,1999 p104

# Non-Gaussianity of noise in n-type metal oxide semiconductor field effect transistor<sup>\*</sup>

Li Wei-Hua<sup>1)†</sup> Zhuang Yi-Qi<sup>1)</sup> Du Lei<sup>2)</sup> Bao Jun-Lin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Key Laboratory for Wide Band-gap Semiconductor Materials and Devices of Ministry of Education ,  
School of Microelectronics ,Xidian University ,Xi'an 710071 ,China )*

<sup>2)</sup> *School of Technical Physics ,Xidian University ,Xi'an 710071 ,China )*

( Received 1 May 2009 ; revised manuscript received 1 July 2009 )

## Abstract

On the basis of the number fluctuation model of n-type metal oxide semiconductor field effect transistor ( nMOSFET ) , non-Gaussianity of noise in nMOSFET was studied by the quadratic sum of the bicoherence , which belongs to higher order statistics . Comparing nMOSFET's test noise with Monte Carlo simulative noise , we proved that there is non-Gaussianity in nMOSFET's noise , that the noise's non-Gaussian degree in small size devices is stronger than that in large size devices , and that the non-Gaussian degree of nMOSFET's noise in strong inversion and linear regime increase with the drain-source voltage . The physical mechanism of nMOSFET noise is discussed from Monte Carlo simulation and the central limit theorem .

**Keywords :** noise , non-Gaussianity , n-type metal oxide semiconductor field effect transistor , oxide traps

**PACC :** 7270 , 7340Q , 7220J

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60676053 ).

<sup>†</sup> E-mail : fx2000\_lwh@yahoo.com.cn