

金属氧化物半导体场效应管热载流子退化的 $1/f^\gamma$ 噪声相关性研究

刘宇安¹⁾ 杜 磊²⁾ 包军林³⁾

1) 井冈山学院数理学院, 吉安 343009)

2) 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

3) 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)

(2007 年 7 月 17 日收到, 2007 年 9 月 6 日收到修改稿)

研究了金属氧化物半导体(MOS)器件在高、中、低三种栅压应力下的热载流子退化效应及其 $1/f^\gamma$ 噪声特性. 基于 Si/SiO₂ 界面缺陷氧化层陷阱和界面陷阱的形成理论, 结合 MOS 器件 $1/f$ 噪声产生机制, 并用双声子发射模型模拟了栅氧化层缺陷波函数与器件沟道自由载流子波函数及其相互作用产生能级跃迁、交换载流子的具体过程. 建立了热载流子效应、材料缺陷与电参量、噪声之间的统一物理模型. 还提出了用噪声参数 Sf^γ 表征高、中、低三种栅应力下金属氧化物半导体场效应管抗热载流子损伤能力的方法. 根据热载流子对噪声影响的物理机制设计了实验并验证这个模型. 实验结果与模型符合良好.

关键词: 金属氧化物半导体场效应管, 热载流子, $1/f^\gamma$ 噪声

PACC: 7340Q, 5225G, 7220J

1. 引 言

随着小型化系统集成度的提高, 金属氧化物半导体(MOS)器件尺寸急剧减小. 最近发展起来的先进 MOS 器件的设计和实现要求新的表征技术, 这种技术必须给出包含各种物理效应的可靠的器件参数^[1]. 对于 MOS 器件热载流子效应的表征, 较为经典的是用电荷泵方法测得的阈值电压漂移 ΔV_T 和跨导退化 ΔG_m . 但是, 随着器件尺寸的减小, 与栅面积 A_G 成正比的电荷泵电流非常小, 这些参数的测量非常困难.

基于以上原因, 寻找新的能精确表征 MOS 器件热载流子效应的方法并将其用于器件可靠性表征, 已经成为一个非常重要的课题. Brederlow 等^[2]研究了模拟和射频情况下器件热载流子退化的 $1/f$ 噪声变化规律, 并用噪声幅值作为器件热载流子退化的表征参量. Simoen 等^[3]研究了器件热载流子退化时 $1/f$ 噪声功率谱密度与跨导的关系, 并将噪声功率谱密度作为表征器件热载流子退化的参量. 虽然人们做了一些用 $1/f$ 噪声表征 MOS 器件热载流子效应的尝试性工作, 由于没有建立起热载流子效应、材料缺

陷与电参量、噪声之间统一的物理模型, 噪声表征也就不能成为实用的工程方法.

本文研究了 MOS 器件在高、中、低三种栅压应力下热载流子退化效应及其 $1/f^\gamma$ 噪声特性. 基于 Si/SiO₂ 界面缺陷氧化层陷阱和界面陷阱的形成理论, 结合 MOS 器件中栅氧化层缺陷与沟道交换载流子的 $1/f$ 噪声产生机制, 并用双声子发射模型模拟了栅氧化层缺陷波函数与器件沟道自由载流子波函数及其相互作用产生能级跃迁交换载流子的具体过程. 建立了热载流子效应、材料缺陷与电参量、噪声之间统一的物理模型. 还提出了用噪声参数 Sf^γ 表征高、中、低三种栅应力下金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)抗热载流子损伤能力的方法. 本文的研究结果为 MOSFET 器件热载流子效应提供了一种无损检测的手段.

2. 理论模型

在 MOS 器件中, 由于电场加热, 载流子能量增加, 一些“幸运电子”变成热载流子. 栅氧化层附近的高能热载流子打断 Si—Si 键, 低能热载流子打断 Si—H, Si—OH 键, 激发产生多种缺陷, 氧化层陷阱

以及深能级、浅能级的界面态等缺陷.其中,应变的 Si—OH 键在 SiO_2 禁带中靠近价带顶的地方形成浅能级,起空穴陷阱的作用. Si—Si 键起电子陷阱的作用.而氧空位陷阱在 SiO_2 禁带中央接近费米能级处形成深能级陷阱,既可以作为电子陷阱,也可以作为空穴陷阱.这些缺陷的能级在费米能级附近,由于受到应力或其他外因影响,将会产生能级跃迁,俘获或发射载流子,产生新的缺陷,引起不同程度的阈值电压漂移、跨导退化及 $1/f$ 噪声参数变化,严重的还会引起器件的失效.

2.1. 缺陷-噪声模型

$1/f$ 噪声产生的原因在于栅介质的氧化层靠近沟道附近若干纳米范围内的缺陷与沟道交换载流子^[4]. MOSFET 的热载流子注入会在栅氧化层中引入缺陷,这些缺陷对 MOS 器件 $1/f^\gamma$ 噪声的影响主要取决于陷阱能级在半导体禁带中的位置、陷阱的空间位置、热载流子注入时的偏置条件^[5]. 对俘获截面和密度泛函理论的研究表明:氧空位对载流子的热激俘获和发射是 MOS 器件中主要的 $1/f$ 噪声源,前提是这些氧空位必须在 Si/SiO₂ 界面附近. SiO₂ 材料中,热载流子的注入可以使氧空位缺陷俘获空穴而形成带正电荷的陷阱(E' 心),这些陷阱将使器件的性能退化并增加 $1/f$ 噪声. 一个陷阱持有空穴的事件本身并不产生噪声.但是,陷阱能和周围或 Si 材料交换电子,中和自身所带电荷;之后又再次俘获一个空穴形成陷阱.这个电子的交换过程才会产生 $1/f$ 噪声.另外,如果电荷交换速度过快(例如 1 ms),其产生的噪声将无法从热噪声中分离出来.因此,只有陷阱位于可以与 Si 材料交换电子的合适能级或位置时,其产生的噪声才可以归结到 $1/f$ 噪声之中^[6]. 在靠近准费米能级的区间内,氧化层陷阱对 $1/f^\gamma$ 噪声有影响,如图 1 所示.

氧化层陷阱和界面态会调制库仑散射引起沟道迁移率的涨落,还会与沟道交换载流子引起沟道载流子数的涨落,从而使沟道电流涨落,形成 $1/f$ 噪声.将缺陷调制库仑散射引起沟道迁移率的涨落用振荡能近似,只考虑与沟道交换载流子引起的载流子数涨落.

可用以下模型模拟缺陷(氧化层陷阱或界面态)与沟道交换载流子的过程^[7]. 缺陷对反型层电子的俘获发射是由于初态和末态的能量差别引起的双声子发射和吸收过程.这里的静电库仑势垒效应是由

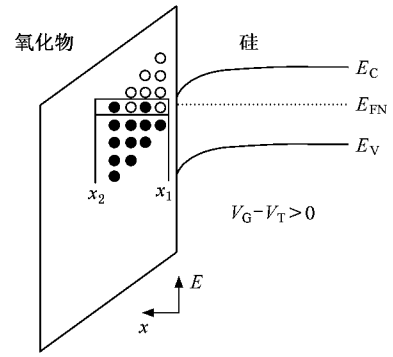


图 1 在 (x, E) 空间可测量 $1/f^\gamma$ 噪声的一个氧化层-陷阱窗口
 E 是氧化层陷阱的能级

非弹性隧道贯穿导致的.那么,总的俘获概率 W_c 可以由多声子发射率 W_{mp} 和库仑势垒的影响共同表示为

$$W_c = W_{mp} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (1)$$

式中 ΔE 是库仑能.为了计算 W_{mp} ,首先将陷阱和沟道态之间的电子跃迁用双声子模型模拟,而不是带间散射的单声子过程.图 2 所示为缺陷在半导体禁带的能级示意图.

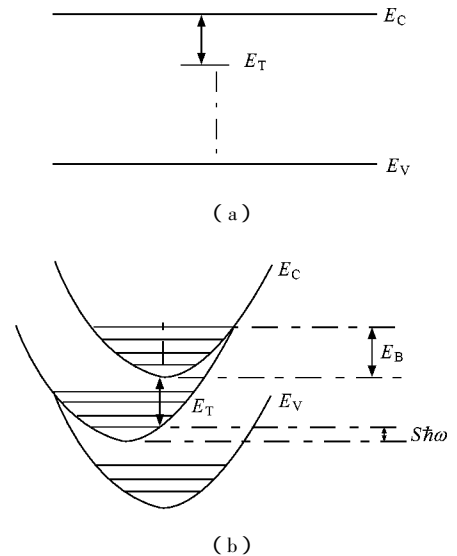


图 2 半导体禁带中缺陷的能级结构 (a) 一般情况下的缺陷能级 (b) 包含电子与晶格相互作用的振荡能量的缺陷能级

图 2(a) 为一般情况下的缺陷能级, E_T 为单能级陷阱, $E_C - E_T$ 表示陷阱深度.图 2(b) 表示包含电子与晶格相互作用(电子能量加晶格振荡能量)的缺陷能级,它是外部晶格结构的函数, E_B 和 $Sh\omega$ 分别是俘获激活能和 Franck-Condon 转移能(弛豫能).由单能级声子近似,在第 i 个能级的一个子能带和一

个陷阱态之间的非辐射双声子跃迁概率 W_{mp}^i 可由下式计算:

$$W_{mp}^i \approx \frac{\pi}{\hbar} S |V|^2 \left(1 - \frac{p^i}{S}\right) \alpha(E_T^i), \quad (2)$$

式中 $\alpha(E_T^i)$ 函数表征缺陷的俘获、发射时间的温度依赖.

$$\begin{aligned} \alpha(E_T^i) &\approx \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \hbar \omega} x^{-1/4} \left(\frac{\xi}{p^i + x^{1/2}}\right)^{p^i} \\ &\times \exp\left(x^{1/2} - (2n+1)S + \frac{p^i \hbar \omega}{2kT}\right), \\ n &= \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{kT}\right) - 1}, \\ p^i &= \frac{E_T^i + E_{//}}{\hbar \omega}, \\ \xi &= 2S [n(n+1)]^{1/2}, \\ x &= (p^i)^2 + \xi^2, \end{aligned}$$

其中 p^i 为第 i 个子带发射能量为 $\hbar \omega$ 的声子数, n 为声子占有因子, $E_T^i = E^i - E_T$ 是电子从第 i 个子能级到陷阱能级跃迁的能级深度. 这里只考虑了二维电子气 $|V|^2$ 热能的平行分量 $E_{//} = kT$, 以及跃迁矩阵元和表征相互作用的 Huang-Rhys 因子 S .

$$S \approx \frac{1}{\chi \hbar \omega} |b|U|b|^2, \quad (3)$$

$$|V|^2 = |f|U|f|^2, \quad (4)$$

式中 b 和 f 分别表示(缺陷)跃迁态和(沟道)自由态, U 是电子-声子耦合势. 陷阱波函数建立过程如下. 设陷阱的发射半径为陷阱到氧化层和硅体的算术平均, 即

$$a_T = \frac{\hbar \Lambda [2m_{ox}^*(E_C^{ox} - E_T)]^2 + \hbar \Lambda [2m_{si}^* E_T^0]^2}{2}. \quad (5)$$

这里的 m_{ox}^* 和 m_{si}^* 分别为载流子在氧化层和硅中的有效质量, E_C^{ox} 为二氧化硅层导带最小值, E_T 为基态能级与陷阱能级之差. 因此, 陷阱波函数的模型为

$$\begin{aligned} |b(x, y, z)| &= \left[\frac{1}{z_T^3}\right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{1}{4\pi(a_T)^3}\right]^{1/2} \\ &= V_T^{-1/2}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} -\frac{z_T}{2} &\approx -4^{1/3} \frac{a_T}{2} \leq x, \\ y &\leq 4^{1/3} \frac{a_T}{2}, \end{aligned}$$

$$d + 4^{1/3} \frac{a_T}{2} \leq z \leq d - 4^{1/3} \frac{a_T}{2}.$$

下面建立沟道波函数的模型. 第 i 个子带自由态的波函数为

$$|f^i(r)\rangle = \frac{1}{A^{1/2}} \zeta^i(z), \quad (7)$$

式中 A 为沟道面积, $\zeta^i(z)$ 为第 i 个子带在界面法向的正交函数. 定义单位面积的俘获系数或第 i 个次级能级的表面俘获率

$$C_i' = W_{iA}^c. \quad (8)$$

对于三维计算, 俘获时间可依据载流子浓度与俘获系数时间成反比计算. 第 i 个能级的单位面积载流子浓度 N_i 可表示为

$$N_i = \frac{kT n_{vi} m^*}{\pi \hbar^2} \ln \left[1 + \exp\left(\frac{E_{FS} - E_i}{kT}\right)\right], \quad (9)$$

式中 n_{vi} 是第 i 个能级退化量. 因此, 第 i 个能级的平均俘获时间可表示为

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau^i} &= C_i' N_i \\ &\approx 5\pi^2 \hbar (S\omega)^2 \frac{a_T^2}{A} \left[\int_{d-z_T/2}^{d+z_T/2} dz |\zeta^i(z)|^2\right] \\ &\times \left(1 - \frac{p^i}{S}\right)^2 \alpha(E_T^i) \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) N_i. \end{aligned} \quad (10)$$

为了计算发射时间 τ_e , 计入库仑能, 应用平衡原理, 当退化率 $g=1$ 时得到

$$\frac{1}{\tau_e^i} = \frac{1}{\tau_c^i} \exp\left[\frac{E_{TF} + \Delta E}{kT}\right], \quad (11)$$

式中 E_{TF} 是界面陷阱能级与费米能级之差. 在不同的温度和栅压下, 第 i 个能级的单位面积载流子浓度 N_i 、库仑能 ΔE 、陷阱与费米能级能带差 E_{TF} 和第 i 个陷阱能级 E_T^i 有不同的值. E_{TF} 和 E_T^i 的改变可以分别表示为

$$\begin{aligned} \Delta E_{TF}(T, V_G) &= \Delta E_T - \Delta E_{FS} \\ &= -q[\Delta V_G - \Delta \phi_s(T, V_G)] \\ &\quad - \Delta E_{FS}(T, V_G), \end{aligned} \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_T^i(T, V_G) &= \Delta E_i(T, V_G) \\ &\quad + q \frac{d}{T_{ox}} [\Delta V_G - \Delta \phi_s(T, V_G)], \end{aligned} \quad (12b)$$

式中 T_{ox} 是氧化层厚度, V_G 是栅与衬底之间的电压, E_{FS} 是界面的费米能级, ϕ_s 是表面势. 随着栅压增高, 陷阱能级与费米能级之间的差距越大, 发射时间就越长. 温度不变时, 特征时间 τ 只是栅压 V_G 的一个复杂函数, 即

$$\tau = f(V_G). \quad (13)$$

噪声产生模型为

$$S_N(f) = \overline{4\Delta N^2} \int_0^\infty \frac{\tau g(\tau) d\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (14)$$

将(13)式代入(14)式,可得

$$S_N(f) = \overline{4\Delta N^2} \int_0^\infty \frac{f(V_G)g(\tau) d\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (15)$$

由(15)式可知,噪声功率谱密度与栅压密切相关.以上推导了栅压偏置对器件热载流子注入后噪声的影响.下面讨论热载流子注入对噪声参数功率谱 Sf^γ 的影响.根据以上缺陷与沟道交换载流子的模型可知, $1/f$ 噪声源于器件缺陷.Palma等^[7]进一步研究获得的氧化层陷阱与沟道交换载流子的特征时间 $\tau = 10^{-3} \sim 10$ s,其对应的频率为 $10^{-1} \sim 10^3$ Hz,恰好是 $1/f^\gamma$ 噪声的低频段.Militaru等^[8]用类似理论,并通过实验获得了界面态与沟道交换载流子的特征时间 $\tau = 10^{-4} \sim 10^{-6}$ s,其对应的频率为 $10^4 \sim 10^6$ Hz,恰好是 $1/f^\gamma$ 噪声的高频段.根据栅氧化层与沟道交换载流子的隧穿模型^[9]

$$S_N(f) = \frac{4kTN_0(E_F)}{(2\pi\sigma_1)^{\gamma-1}} \cos \frac{\gamma\pi}{2} \frac{1}{f^\gamma}, \quad (16)$$

变形得到

$$S_N(f)f^\gamma = \frac{4kTN_0(E_F)}{(2\pi\sigma_1)^{\gamma-1}} \cos \frac{\gamma\pi}{2}. \quad (17)$$

(17)式等号左边为功率谱,等号右边为缺陷总数 $N_0(E_F)$ 与常数的乘积.由此可知,缺陷总数与 Sf^γ 成正比.因此,从热载流子注入前后功率谱的变化可以得到热载流子注入前后器件的缺陷数变化.这样,就可以用热载流子注入前的功率谱来表征器件的抗热载流子能力,热载流子注入前的功率谱越大,其抗热载流子损伤能力越小,反之亦然.由于氧化层陷阱和对阈值电压的影响是使其正向漂移,而界面态对阈值电压的影响是使其反向漂移,它们的共同作用使阈值电压的变化相互抵消,但很难从数值上直观地反映出来.然而,功率谱可以直观地将氧化层陷阱和界面态对噪声频段的影响明显地区分开来.

2.2. 缺陷-电参数模型

热载流子注入栅氧化层的过程中,有以下三种产生缺陷的机制:(1)氧化层中的电荷注入与俘获;(2)电子和俘获空穴结合引起的界面态;(3)高能电子打断Si—H键引起的界面态.这些缺陷对MOS器件的性能影响表现为阈值电压漂移、跨导退化和沟道载流子迁移率减小.

文献[10]研究了缺陷对MOS器件阈值电压的影响,获得了 Q_{it} 和 Q_{ot} 对阈值电压漂移 ΔV_T 影响的表达式

$$V_T = -V_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \pm \frac{qN_A x_{dmax}}{C_{ox}} \pm \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (18)$$

式中的符号“ \pm ”对于n-MOSFET取为正,对于p-MOSFET取为负; V_{ms} 为金属-半导体接触电势差; Q_{ox} 为栅绝缘层中的面电荷密度; C_{ox} 为栅氧化层单位面积电容; N_A 为受主浓度; x_{dmax} 为表面耗尽层宽度最大值; n_i 为本征载流子浓度.

在线性区MOS器件的电流表达式为

$$I_D = \frac{W\mu_{eff}C_{ox}}{L} [V_{GS} - V_{TH} - aV(x)]V_{DS}. \quad (19)$$

根据跨导的定义可知,跨导为漏源电压 V_{DS} 一定时漏电流的微分增量与漏源电压微分增量之比.对(19)式求导可得

$$g_m = \frac{WC_{ox}}{L} \mu_{eff}. \quad (20)$$

因为

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0}{1 + aN_i\mu_0},$$

所以

$$g_m = \frac{WC_{ox}V_{DS}}{L} \frac{\mu_0}{1 + aN_i\mu_0}. \quad (21)$$

这里 N_i 为热载流子所引起的陷阱数的变化, μ_0 为应力前的迁移率, a 为经验常数.由(21)式可得

$$\begin{aligned} \Delta g_m &= \frac{\partial g_m}{\partial N_i} N_i \\ &= \frac{WC_{ox}V_{DS}}{L} \left[-\frac{a\mu_0^2}{(1 + aN_i\mu_0)^2} \right] N_i. \end{aligned} \quad (22)$$

将(21)与(22)式进行对比可以得到

$$\frac{\Delta g_m}{g_m} = -\frac{a\mu_0}{(1 + aN_i\mu_0)} N_i. \quad (23)$$

从(23)式可以明显地看出,跨导的变化量 $\frac{\Delta g_m}{g_m}$ 与陷阱数 N_i 有关.当 N_i 增加时,跨导的变化呈逐渐减小的趋势.

3. 实验验证

3.1. 实验方案

在验证器件损伤缺陷与 $1/f$ 噪声关系的实验中,以应力前后传统电参数 $V_T, G_{n(max)}$ 的变化作为标

准.根据上述的缺陷-噪声理论模型,对 MOS 器件而言,缺陷对其 $1/f^\gamma$ 噪声的影响与热载流子注入时的偏置条件(栅压应力)密切相关,故实验分别在低、中、高三种栅压应力下进行.对所用的华晶 1.0 CMOS 工艺制备的短沟 n-MOS 器件(其栅氧化层厚度为 20 ± 1.5 nm,沟道宽长比 W/L 为 50/1.0)而言,热载流子注入的低栅压、中栅压、高栅压分别为 $V_D = 4.5$ V, $V_G - V_T = 0.2$ V; $V_D = 2.25$ V, $V_G = 4.5$ V; $V_D = V_G = 4.5$ V.

电参数测试采用的是 HP4156B 型半导体参数分析仪,分别测试了 DC 热载流子应力前后器件阈值电压和最大跨导在漏压 $V_{DS} = 0.1$ V,栅压 $V_{GS} = 0-5$ V 的变化情况,提取了阈值电压.将经典电参数退化作为验证实验准确性的标准,并用它与噪声参数的退化作比较,以获得表征器件热载流子效应的敏感参量.

因为器件退火后有部分氧化层陷阱恢复,界面态恢复不明显,可以很好地将这两种缺陷对噪声频段的作用加以区分,所以当热载流子注入后对器件进行退火.实验过程中,器件源端和衬底始终接地,即 $V_S = V_B = 0$ V,所有的测试均在屏蔽室中室温下进行.

3.2. 实验结果及讨论

3.2.1. 低栅压应力下的电参数及噪声参数的变化

首先将被测样品在低栅压($V_D = 4.5$ V, $V_G - V_T = 0.2$ V)下进行 1800 s 的热载流子注入,然后再进行退火(退火条件为室温,时间为 2000 s,应力为 $V_G = 1.2$ V).退火后有部分氧化层陷阱恢复,界面态恢复不明显,可以很好地将这两种缺陷对噪声频段的作用加以区分.热载流子注入后的噪声及电参数与退火后的噪声及电参数的对比结果如图 3 所示.低栅压热载流子应力后(即退火前)与器件退火后各参数的变化如表 1 所列.退火前 MOS 器件阈值电压从 0.500894 V 增加到 0.608266 V,线性区最大跨导由 3.020×10^{-4} S 减小到 2.595×10^{-4} S.由于退火,噪声的高频部分有恢复,低频部分减少, γ 值从 1.0305 减小到 0.9509,噪声幅值 B 由 8.2591×10^{-10} V²/Hz 增大 1.9986×10^{-8} V²/Hz; Sf^γ 由 4.474×10^{-7} V² 增大到 6.02826×10^{-7} V².噪声幅值 B 的变化率最大,为 232%; Sf^γ 次之,为 36%;电参数 V_T 和 $G_{n(\max)}$ 的变化较小,分别为 20.8% 和 -14.1%.

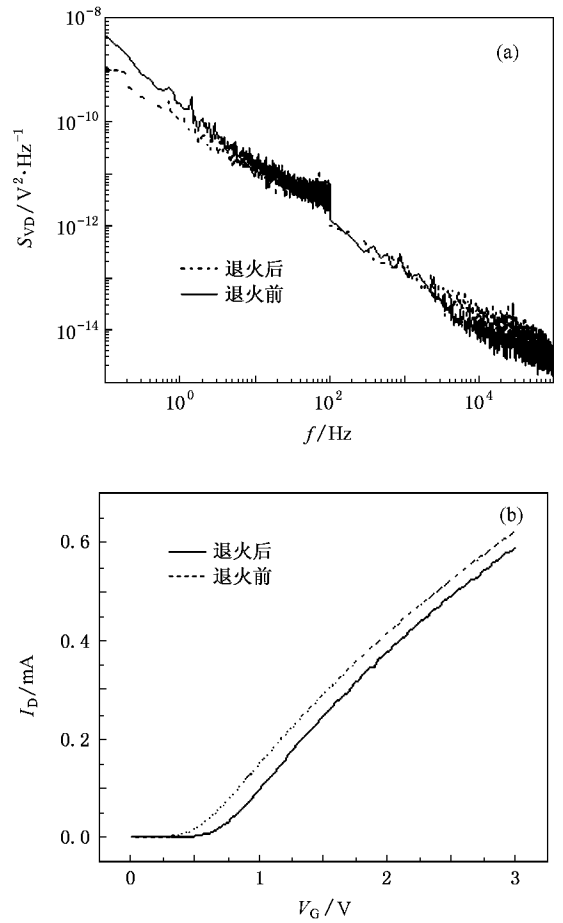


图 3 低栅压热载流子应力后与器件退火后的噪声和 I_D-V_G 关系 (a) 噪声 (b) I_D-V_G 关系

表 1 低栅压热载流子应力后(即退火前)与器件退火后参数的变化

	$Sf^\gamma/10^{-7}V^2$	V_T/V	$G_{n(\max)}/10^{-4}S$	$B/V^2 \cdot Hz^{-1}$	γ
退火前	4.47	0.500	3.020	8.259×10^{-10}	1.031
退火后	6.028	0.605	2.595	1.999×10^{-8}	0.951
变化率/%	36	20.8	-14.1	232	-7.73

3.2.2. 中栅压应力下的电参数及噪声参数的变化

样品在中栅压($V_D = 4.5$ V, $V_G = 2.25$ V)下,应力时间为 1800 s 的热载流子注入前后的噪声及电参数的对比结果如图 4 所示.中栅压热载流子应力前后器件各参数的变化如表 2 所列.应力前后 MOS 器件的阈值电压从 0.547123 V 增加到 0.573615 V,线性区最大跨导由 3.5233×10^{-4} S 减小到 3.292×10^{-4} S.噪声的高频部分和低频部分都有增加, γ 值变化极小,应力前后分别为 1.0578 和 1.0604;噪声幅值 B 由 7.5959×10^{-11} V²/Hz 增大到 $9.87233 \times$

$10^{-10} \text{ V}^2/\text{Hz}$; Sf^γ 由 $1.1096 \times 10^{-7} \text{ V}^2$ 增大到 $1.3893 \times 10^{-6} \text{ V}^2$. 噪声幅值 B 的变化率最大, 为 120%; Sf^γ 次之, 为 115%; 电参数 V_T 和 $G_{n(\max)}$ 的变化很小, 分别为 4.84% 和 -6.57%.

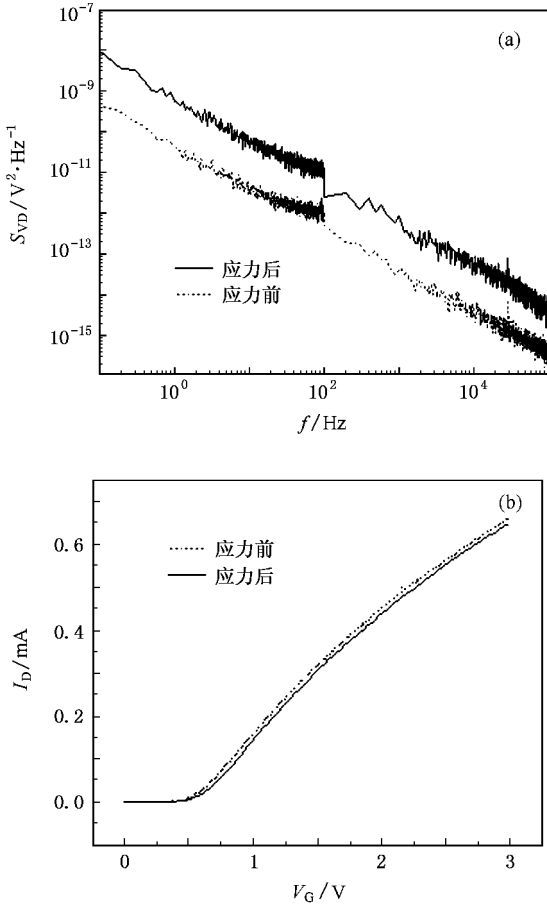


图4 中栅压热载流子应力前后的噪声和 I_D - V_G 关系 (a) 噪声 (b) I_D - V_G 关系

表2 中栅压热载流子应力前后器件参数的变化

	$Sf^\gamma/10^{-6}\text{V}^2$	V_T/V	$G_{n(\max)}/10^{-4}\text{S}$	$B/\text{V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$	γ
应力前	0.111	0.547	3.523	7.596×10^{-11}	1.058
应力后	1.389	0.574	3.292	9.872×10^{-10}	1.060
变化率/%	115	4.84	-6.57	120	0.246

3.2.3. 高栅压应力下的电参数及噪声参数的变化

样品在高栅压 ($V_D = 4.5 \text{ V}$, $V_G = 4.5 \text{ V}$) 下, 应力时间为 1800 s 的热载流子注入前后的噪声及电参数的对比结果如图 5 所示. 高栅压热载流子应力前后器件各参数的变化如表 3 所列. 应力前后 MOS 器件阈值电压从 1.11230 V 增加到 1.13944 V, 线性区最大跨导由 $2.501 \times 10^{-4} \text{ S}$ 减小到 $2.486 \times 10^{-4} \text{ S}$. 噪声的高频部分比低频部分增加更多, γ 值由 1.1580 减

小到 1.0385. 噪声幅值 B 由 $1.5278 \times 10^{-11} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 增大到 $3.0882 \times 10^{-10} \text{ V}^2/\text{Hz}$; Sf^γ 由 $1.38919 \times 10^{-8} \text{ V}^2$ 增大到 $4.98596 \times 10^{-7} \text{ V}^2$. Sf^γ 的变化率最大, 为 349%; 噪声幅值 B 次之, 为 192%; 电参数 V_T 和 $G_{n(\max)}$ 的变化很小, 分别为 2.44% 和 -0.6%.

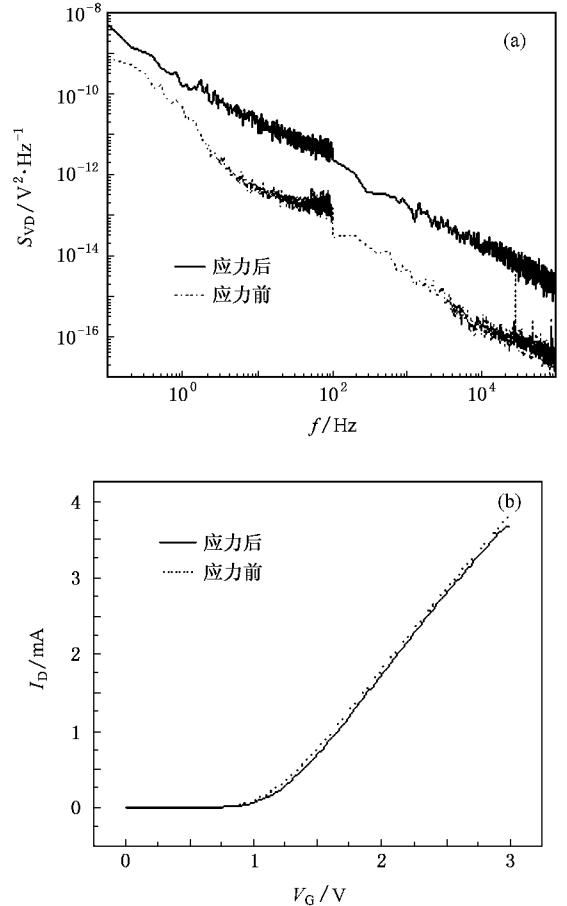


图5 高栅压热载流子应力前后的噪声和 I_D - V_G 关系 (a) 噪声 (b) I_D - V_G 关系

表3 高栅压热载流子应力前后器件参数的变化

	$Sf^\gamma/10^{-8}\text{V}^2$	V_T/V	$G_{n(\max)}/10^{-4}\text{S}$	$B/\text{V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$	γ
应力前	1.389	1.112	2.501	1.528×10^{-11}	1.158
应力后	49.86	1.139	2.486	3.088×10^{-10}	1.039
变化率/%	349	2.44	-0.6	192	-10.3

3.2.4. 讨 论

低栅压 ($V_G = V_D/5$) 应力热载流子注入后, 栅氧化层中的空穴陷阱引起的短沟道效应产生了热空穴, 还产生了中性电子陷阱, 由于被注入的空穴不能更深地进入氧化层, 大部分中性电子陷阱位于界面附近^[11]. 之后的正栅压应力退火过程, 其实质是中性氧化层陷阱与硅衬底中隧穿过来的电子结合成为

负电中心并与邻近的正电中心中和的过程. 这个过程导致氧化层陷阱减少, 但界面态变化很小^[12]. 这一点对应图 3 中噪声功率谱密度中氧化层陷阱对应的低频段下降, 对应界面态的高频段稍有变化的结果以及表 1 中 γ 值的减小. 界面态的增加使阈值电压正向漂移, 氧化层陷阱的减少使阈值电压负向漂移, 它们的共同作用使阈值电压有较大幅度的增大, 而界面态的增加则使线性区最大跨导稍有减小(表 1). 由以上分析和表 1 的参数对比可知, 对这种应力下的缺陷变化最敏感的是噪声幅值 B 和功率谱 Sf^γ .

中栅压($V_G = V_D/2$)应力时, 电子和空穴都注入接近界面的栅氧化层. 并且当空穴和电子再结合时, 产生氧化层陷阱或界面态^[11]. 氧化层陷阱对 $1/f$ 噪声的作用部分是在如图 1 所示的靠近准费米能级的区间内. 由于在 $x < x_1$ 位置的陷阱涨落太快, 而位于 $x > x_2$ 位置的陷阱涨落太慢, 因而都不在典型的噪声测量频率范围内. 然而, 它们会对接近沟道的载流子产生类似库仑散射的效果影响 $1/f$ 噪声, 因为在这种注入情况下的电子准费米能级降低, 空穴注入与释放的俘获电子是导通的. 因此, 先前存在的和新产生的氧化层陷阱和界面态在中栅压应力下都会增加, 导致图 4 中噪声的高频部分和低频部分都有增加, 而 γ 值几乎不变(表 2). 界面态的增加稍多于氧化层陷阱的增加, 导致阈值电压稍有增大(表 2), 线性区最大跨导减小. 由以上分析和表 2 的参数对比可知, 对这种应力下的缺陷变化最敏感的是噪声幅值 B 和功率谱 Sf^γ .

高栅压($V_G = V_D$)应力时, 主要是电子注入, 栅氧化层中的电子俘获导致氧化层电荷陷阱和界面态^[11]. 这种情况下产生的大部分陷阱位于离界面更远的位置, 载流子数涨落产生于离界面较远的位于栅氧化层的电子陷阱, 表面迁移率涨落由此前已存

在和新生成的界面氧化层陷阱和已存在快速的界面态产生. 这一点对应图 5 中噪声谱的高频和低频部分都有增加, 且高频部分增加更多. 从界面态比氧化层陷阱增加稍多也可以推出跨导和 γ 减小. 由以上分析和表 3 的参数对比可知, 对这种应力下的缺陷变化最敏感的是功率谱 Sf^γ 和噪声幅值 B .

4. 结 论

本文研究了 MOS 器件在高、中、低三种栅压应力的下热载流子退化效应及其 $1/f^\gamma$ 噪声特性. 在不同栅压下的热载流子注入情况不同, 低栅压($V_G = V_D/5$)应力下热载流子注入后, 栅氧化层中产生了热空穴, 还产生了中性电子陷阱; 中栅压($V_G = V_D/2$)应力时, 电子和空穴都注入接近界面的栅氧化层, 并且当空穴和电子再结合时产生氧化层陷阱或界面态; 高栅压($V_G = V_D$)应力时, 主要是电子注入, 栅氧化层中的电子俘获导致氧化层电荷陷阱和界面态. 基于 Si/SiO₂ 界面缺陷形成理论分析了各种栅压应力下产生的不同缺陷及其与界面沟道交换载流子的不同特征时间常数. 结合 MOS 器件中 $1/f$ 噪声产生机制(即 Si/SiO₂ 界面附近, 氧空位对载流子的热激俘获和发射是 MOS 器件中主要的 $1/f$ 噪声源)并用双声子发射模型模拟了栅氧化层缺陷波函数与器件沟道自由载流子波函数及其相互作用产生能级跃迁交换载流子的具体过程, 建立了热载流子效应、材料缺陷与电参量、噪声之间统一的物理模型. 基于这个模型还提出了用噪声参数 Sf^γ 表征高、中、低三种栅压应力下 MOSFET 抗热载流子损伤能力的方法. 通过 MOS 器件在高、中、低三种栅压应力下的热载流子注入实验验证了这个方法的正确性与敏感性. 本文研究结果为 MOS 器件热载流子效应提供了一种无损检测的手段.

- [1] Benfdila A 2005 Critical Dimensional MOSFETs and Scope for Reliable Characterization Techniques First International Workshop on Semiconductor Nano-crystals (Budapest: Hungary Academy of Sciences Research Institute for Techniques Physics and Materials Science) p119
- [2] Brederlow R, Weber W, Schmitt-Landsiedel D 2002 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **49** 9
- [3] Simoen E, Vasina P, Sikula J, Claeys C 1997 *IEEE Electron. Dev. Lett.* **18** 10

- [4] Ciofi C, Neri B 2000 *J. Appl. Phys.* **33** 199
- [5] 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]
- [6] Li R M, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3400 (in Chinese) [李瑞珉、杜 磊、庄奕琪、包军林 2007 物理学报 **56** 3400]

- [7] Palma A , Godoy A , Jimenez-Tejada J A , Carceller J E 1997 *Phys. Rev. B* **56** 55
- [8] Militaru L , Souifi A 2003 *ULIS* (Villeurbanne : LPM-INSA) p6
- [9] Zhung Y Q , Sun Q 1993 *Noise and Its Minimizing Technology in Semiconductor Devices* (Beijing : National Defence Industry Press) p181 (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 181 页]
- [10] Liu Y , Zhang F H 2002 *Transistor Theory* (Beijing : National Defence Industry Press) p313 (in Chinese) [刘永、张福海 2002 晶体管原理(北京:国防工业出版社)第 313 页]
- [11] Xu J P , Lai P T , Cheng Y C 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 91
- [12] Lai Z W 1998 *Anti-radiation Electronics* (Beijing : National Defence Industry Press) p54 (in Chinese) [赖祖武 1998 抗辐射电子学(北京:国防工业出版社)第 54 页]

Research on correlation of $1/f^\gamma$ noise and hot carrier degradation in metal oxide semiconductor field effect transistor

Liu Yu-An¹⁾ Du Lei²⁾ Bao Jun-Lin³⁾

1) *School of Mathematics and Physics , Jinggangshan University , Ji'an 343009 , China)*

2) *School of Technical Physics , Xidian University , Xi'an 710071 , China)*

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

(Received 17 July 2007 ; revised manuscript received 6 September 2007)

Abstract

Metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) in high- , mid- and low-gate stresses of hot carrier degradation effect and its $1/f^\gamma$ noise feature are studied. Based on the formation theories of interface traps and oxide traps in Si-SiO₂ and the MOSFET $1/f^\gamma$ noise mechanism , the process of exchange carrier between the defect in gate oxide and the free-carrier in the channel is simulated by the duo-phonon emission model. A unified physical model for hot carrier effect , material defect , electrical parameter and noise was built. Also , a method characterizing the MOSFET anti-hot carrier abilities with noise parameter Sf^γ is presented. The model is testified by the experiment , which is designed based on the relation between hot carrier and noise. Experimental results well confirm the developed model.

Keywords : metal oxide semiconductor field effect transistor , hot carrier , $1/f^\gamma$ noise

PACC : 7340Q , 5225G , 7220J