

NMOS 低温热载流子晶体管的解析研究¹

刘卫东 魏同立*

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

*(东南大学微电子中心 南京 210096)

摘要 利用低温(77-295K)短沟 NMOSFET 准二维解析模型,研究了 77-295K 温区 NMOSFET 衬底电流相关的物理机制。发现沟道电子平均自由程不随温度而改变,其值约为 7.6nm;低温下虽然沟道电子在漏端获得较高的能量,但由于碰撞电离减弱,使 NMOSFET 的衬底电流不随温度降低而显著增长。实验结果证明,提出的衬底电流机制和模型适用于 77-295K 宽温区范围。

关键词 低温, NMOSFET, 衬底电流, 平均自由程, 碰撞电离

中图分类号 TN32

1 引言

低温下热载流子效应引起 NMOSFET 特性增强蜕变,给低温下工作的 MOS 器件和电路带来潜在的危害。迄今已对其蜕变规律和机制进行了广泛的实验研究^[1,2]。衬底电流(I_{SUB})作为热载流子效应强弱的标志,其低温下的行为和特征也已有大量报道^[3,4]。文献[3]提出了广为应用的 I_{SUB} 模型:由于电子-声子散射决定的载流子平均自由程(λ)随温度降低而增大,因而沟道载流子能量($q\lambda E$)增加,使 I_{SUB} 随温度降低而呈数量级增长(因而器件蜕变)。然而实验结果指出, I_{SUB} 的温度系数要比文献[3]的预计值小得多^[4,5]。

衬底电流通常表示为^[6]

$$I_{SUB} = I_{DS} \frac{A_i \lambda}{\phi_i} E_m^2 \left[1 \left/ \left| \frac{dE(y)}{dy} \right|_{E_m} \right] \exp(-\phi_i / \lambda E_m), \quad (1)$$

式中 I_{DS} 为漏源电流, $q\phi_i$ 为碰撞电离临界能量,它与禁带宽度具有同样的温度特性^[7], A_i 为碰撞电离常数, $E(y)$ 和 E_m 分别为沟道中 y 处及漏端的水平电场。电子-声子散射决定的平均自由程 λ 与温度的关系为

$$\lambda(T) = \lambda_0 \tanh(63meV/2kT), \quad (2)$$

其中 λ_0 为 $\lambda(T)$ 的低温极限值。

利用 NMOSFET 准二维解析模型,考虑迁移率及温度相关参数的温度特性^[3,8-10],本文研究了 I_{SUB} 相关的平均自由程、沟道电子输运过程中的受热以及碰撞电离过程等的温度特性。与文献[3]和[11]相比,提出的 I_{SUB} 机制和模型适用于 77-295K 宽温区范围。

¹ 1994-12-19 收到, 1995-10-24 定稿
国家自然科学基金资助项目

2 结果与分析

表 1 典型温度的 θ 值

$T(K)$	77	100	150	200	250	295
$\theta(V^{-1})$	0.07	0.065	0.059	0.053	0.046	0.042

本文的结果和结论主要是通过通过对文献 [11] 的 NMOSFET 进行模拟并与其报道结果相比较而得到的。器件沟长为 $2\mu m$, 沟道宽度为 $25\mu m$, 栅氧化层厚度为 $43nm$, 源漏结深为 $0.35\mu m$, 衬底掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{16} cm^{-3}$ 。图 1 给出了栅源电压 $V_{GS}=2.0V$ 时饱和压降 V_{DSAT} 随温度变化的模拟和文献实验结果, 模拟中适配参数 θ (迁移率垂直电场蜕变因子) 取表 1 中的值, 可见 V_{DSAT} 的模拟和实验值能够很好地吻合。这些 θ 值在下述模拟中将被引用。

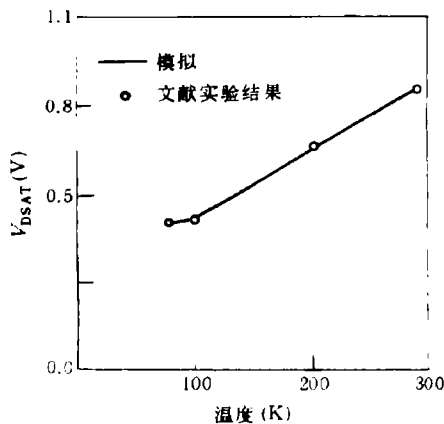


图 1 不同温度时 V_{DSAT} 的模拟和测试值 ($V_{GS}=2.0V$)

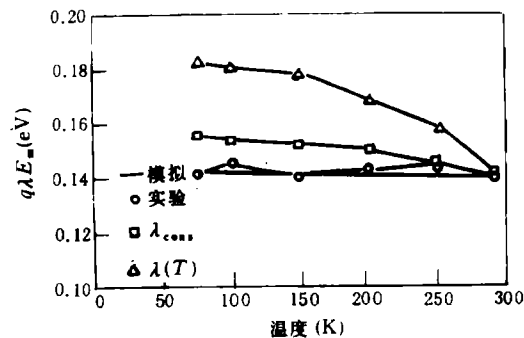


图 2 $q\lambda E_m$ 随温度变化的模拟和报道值 (标记曲线) ($V_{DS}=3.8V$, $V_{GS}=2.0V$)

2.1 平均自由程的低温特性 文献 [11] 报道了不同温度时沟道电子在漏端的能量 $q\lambda E_m$, 如图 2 所示。其中对应于 λ_{cons} 的曲线为平均自由程取 $\lambda(T=295K)$ 时计算得到。图 3 为本文利用准二维解析模型模拟的最大水平电场随温度变化的结果, 由此得到的 $q\lambda E_m$ 也示于图 2 中, 此时平均自由程取 $\lambda_{eff}=7.6nm$, 与温度无关。由图 2 可以看出, 在三种情形的平均自由程中, 本文的结果能够最佳拟合文献实验值。

Ridley^[12] 认为, 衬底电流模型中的平均自由程应与电子散射时能量净损失相关, 因而具有能量弛豫属性; Huang 等^[5] 理论证明了能量净损失平均自由程等于 λ_0 ; Crowell 和 Sze^[13] 曾报道 $\lambda_0=7.6nm$, 因此由本文的结果得到与文献 [3] 不同的结论: 衬底电流模型 (1) 式中的 λ 与温度无关, 不随温度降低而增大, 且其值约为 $7.6nm$ 。

2.2 高场输运中的电子能量 沟道电子在漏段区域 (沟道中电子达到高场极限速度点到漏结的区域) 中输运时, 其能量 $|q\lambda E(y)|$ 将发生显著变化, 图 4 给出了 $77K$ 和 $295K$ 时的模拟结果。可以看出, $77K$ 下电子的最大能量 (在漏结处) 要高于 $295K$ 的对应值, 从沟道电子最高能量观点出发, $77K$ 下单位沟道电子在漏结附近通过碰撞电离将有可能产生高于室温下的电子-空穴对数目, 并导致较大的衬底电流。

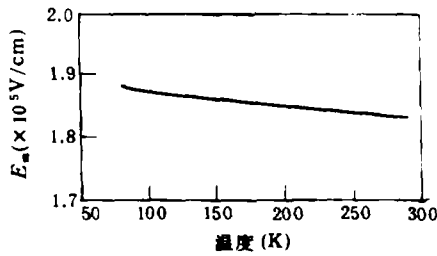


图3 E_m 与温度的模拟关系
($V_{DS}=3.8V, V_{GS}=2.0V$)

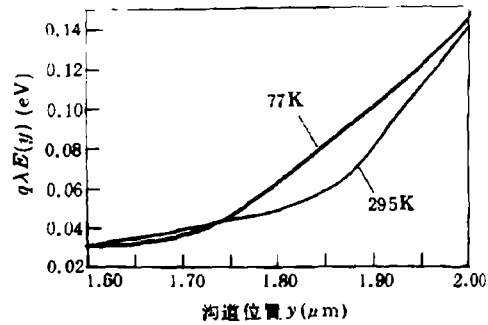


图4 电子在漏电场区域中的能量变化
($V_{GS}=2.0V, V_{DS}=3.8V$)

2.3 碰撞电离对温度的相关性 沟道电子能量的高低不是决定 I_{SUB} 大小的唯一因素，碰撞电离也将影响 I_{SUB} 的量值。据 (1) 式得到碰撞电离系数 $C_i(T) = A_i \exp(-\phi_i/\lambda E_m)$ 。由上述结果，图 5 给出了对应于图 2 的 I_{SUB}/I_{DS} 与温度的关系，不同温度下 A_i 的取值已列于表 2 中。与文献结果相比，这时 I_{SUB} 的模拟和实验值能较好地吻合。利用 A_i 之值得到了随温度降低而递减的 $C_i(T)$ 曲线，如图 6 所示。

表 2 典型温度点的 A_i 值

$T(K)$	77	100	200	295
$A_i(1 \times 10^7 cm^{-1})$	1.24	1.25	1.43	1.45

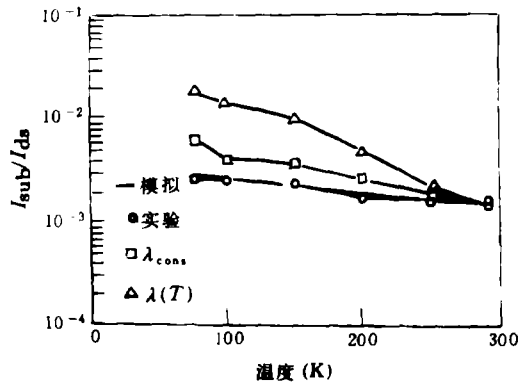


图 5 不同温度下 I_{SUB}/I_{DS} 的模拟和报道结果
($V_{GS}=2.0V, V_{DS}=3.8V$)

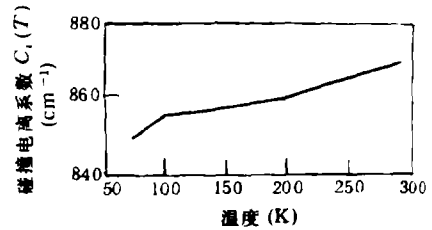


图 6 碰撞电离系数随温度变化的模拟结果
($V_{GS}=2.0V, V_{DS}=3.8V$)

图 7 给出了 77K 和 295K 下 $V_{GS}=2.0V$ 时 I_{SUB}/I_{DS} 随 V_{DS} 变化的模拟曲线，其中各项参数值同前。综合第 2.1、2.2 和 2.3 节知，尽管电子-声子散射在低温下减弱了，但是电子能量的净损失增加，声子净产生率增大，因此 λ 保持为定值 $\lambda_{eff}=7.6nm$ ；另一方面，虽然低温下电子在漏端附近获得较高的能量，但由于碰撞电离过程的衰减，使衬底电流并非呈数量级增长，图 7 所示支持这一结论。

3 讨论

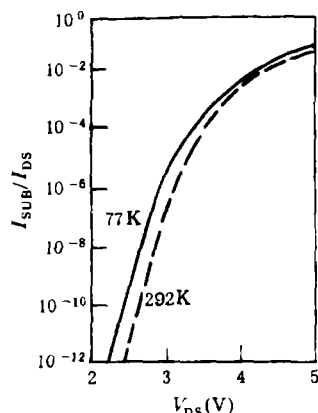


图7 77K和295K下 I_{SUB}/I_{DS} 关系的模拟结果 ($V_{GS}=2.0V$)

文献 [11] 在计算 $q\lambda E_m$ 和 I_{SUB}/I_{DS} 时引用了 [14] 和 [15] 中常温 NMOSFET 沟道电势分布模型:

$$V(y) = V_{DSAT} + U \exp(A_m y), \quad (3)$$

且

$$E_m \simeq A_m (V_{DS} - V_{DSAT}), \quad (4)$$

其中 $A_m = (\epsilon_{Si} t_{ox} x_j / \epsilon_{ox})^{-1/2}$, ϵ_{Si} 和 ϵ_{ox} 分别为硅和 SiO_2 介电常数, x_j 为结深, U 为远小于 V_{DSAT} 的定值, 单位为 V。由图 2 可见, 即使 $\lambda(T)$ 取值 λ_{cons} , 文献对 $q\lambda E_m$ 的计算值也将随温度降低而开始逐渐偏离实

验结果, 且温度愈低此误差愈大。事实上, 电子-声子散射的平均自由程不可能随温度降低而变小, 因此由 (4) 式得到的 $q\lambda E_m$ 将不会与实验曲线相重合。对于图 5 中的 I_{SUB}/I_{DS} , 类似情形同样存在。这说明 (3) 式和 (4) 式难以有效地描述沟道电子在高场区中的能量变化, 由此得到的衬底电流也是不准确的。

4 结论

利用准二维解析模型, 并与文献报道结果比较, 得到了衬底电流模型中不随温度变化的平均自由程 (约 7.6nm)。虽然 77K 下电子在沟道漏端的能量高于其 295K 下的对应值, 但是由于低温下碰撞电离过程减弱, 因而 77K 下衬底电流并非数量级增长。与文献 [3] 和 [11] 相比, 提出的衬底电流机制和模型适用于 77-295K 宽温区范围。

致谢 清华大学微电子学研究所李志坚教授对文中的概念描述提出了有益的建议, 作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Heremans P, Groseneken G, Maes H E. IEEE Trans. on ED, 1991, ED-38(4): 851-857.
- [2] Von Bruns S L, Anderson R L. IEEE Trans. on ED, 1987, ED-34(1): 75-82.
- [3] Henning A K, Chen N N, Watt J T, et al. IEEE Trans. on ED, 1987, ED-34(1): 64-74.
- [4] Arora N D, Sharma M S. IEEE Trans. on ED, 1991, ED-38(6): 1392.
- [5] Huang J H, Zhang G B, Liu Z H, et al. IEEE Electron. Device Lett., 1993, EDL-14(5): 268-271.
- [6] Tam S, Ko P K, Hu C, et al. IEEE Trans. on ED, 1982, ED-29(11): 1740-1744.
- [7] Drummond W E, Moll J L. J. Appl. Phys., 1971, 42(13): 5556-5562.
- [8] Ali-omar M, Reggiani L. Solid-State Electronics, 1987, 30(7): 693-697.
- [9] Caughey D M, Thomas R E. Proc. IEEE, 1967, (12): 2192-2198.
- [10] Tewksbury S K. IEEE Trans. on ED, 1981, ED-28(12): 1519-1529.
- [11] Lau D, Gildenblat G, Sodini C G, et al. Low-Temperature Substrate Current Characterization of n-Channel MOSFET's, Tech. Dig. of IEDM, 1985, 565-568.

- [12] Ridley B K. J. Phys.C: Solid State Phys., 1983, 16: 3373.
[13] Crowell C R, Sze S M. Appl. Phys. Lett., 1966, 9(6): 242.
[14] Ko P K. Hot-electron effects in MOSFET's, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1982.
[15] El-Mansy Y A, Boothroyd A R. IEEE Trans. on ED. 1977, ED-24(3): 254-262.

ANALYTICAL INVESTIGATION OF LOW-TEMPERATURE HOT-CARRIER NMOSFET'S

Liu Weidong

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Wei Tongli

(*Microelectronics Center, Southeast University, Nanjing 210096*)

Abstract Based on the quasi-2D analytic model for short-channel NMOSFET's in the temperature range of 77-295K, the substrate current (I_{SUB}) related physical mechanism for 77-295K NMOSFET was investigated. It was discovered that the channel electron mean-free path was temperature independent with a value of about 7.6 nm. Although electrons could acquire larger energy at the drain end of the channel at lower temperatures, the I_{SUB} did not increase as significantly as reported by Henning, et al.(1987), owing to the reduced impact ionization process. Agreement between calculations and experiments demonstrated the feasibility of the proposed mechanism in 77-295K.

Key words Low temperature, NMOSFET, Substrate current, Mean-free path, Impact ionization

刘卫东：男，1965年生，博士后，现主要从事深亚微米 MOS 器件结构、工艺和物理研究。

魏同立：男，1934年生，教授，博士生导师，主要从事超大规模集成物理和低温微电子学方面的研究。