

光照对阈值电压均匀性的影响*

朱朝嵩¹ 夏冠群¹ 李传海^{1,2} 詹 琰¹

(1 中国科学院上海冶金研究所, 上海 200050)

(2 合肥工业大学, 合肥 230009)

摘要: 研究了光照对砷化镓阈值电压均匀性的影响。结果表明光照使耗尽型 MESFET 器件的沟道电流增大, 使阈值电压向负方向增加, 并提高了阈值电压的均匀性。研究认为砷化镓单晶材料的深能级缺陷是影响 MESFET 阈值电压均匀性的重要因素之一, 而光照在一定程度上减弱了这一影响。

关键词: 砷化镓; MESFET; 光敏效应; 阈值电压

EEACC: 2560S

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)02-0165-04

1 引言

砷化镓器件与电路具有速度快、功耗低、噪声小、耐高温、抗辐射等优点, 在卫星、光纤通信、移动通信等领域有着重要的应用^[1]。近几年, 国内外对光照对 MESFET 的影响进行了大量的研究, 报道了许多光照对 MESFET 结构影响的理论分析和实验结果^[2~5]。光照对 GaAs MESFET 的影响最早是由 Baack 等^[6]报道的。深入研究表明当以类似于改变栅压的方式改变光照强度, MESFET 器件可作为光电转换器件。最早的光照条件下离子注入 SI-MESFET 器件的分析模型是由 Singh 等^[7]提出的。Mishra 等^[4]发展了 Singh 的模型, 考虑了表面复合效应。Chakrabarti 等^[5]在此基础上考虑了在肖特基势垒上产生的光电压的影响。

现有研究主要集中于光照对单个 MESFET 器件性能的影响, 光照对整个 GaAs 电路的影响未见报道。FET 阈值电压作为 GaAs 集成电路的重要参数受光照影响很大, 研究光照对 MESFET 阈值电压均匀性的影响也有助于研究砷化镓单晶片中深能级缺陷分布。本文研究了光照对 GaAs MESFET 阈值电压均匀性的影响。

2 实验方法

本文样品所用的材料为信息产业部电子第 46 所提供的非掺杂 SI-GaAs 双面抛光单晶片。器件制备工艺采用 B^+ 注入隔离、挖槽工艺。硅注入剂量为 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 能量为 80keV 形成 n 型层; 硅注入剂量 $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 能量为 50keV 形成 n^+ 层。采用 940°C 白光快速退火。隔离注入硼, 剂量为 $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 能量为 80keV。在 n^+ 区上蒸发 AuGeNi/Au, 合金化形成 S(源)、D(漏)的欧姆接触。在 n 区上蒸发 Ti/Pt/Au 形成肖特基栅。

MESFET 器件结构见图 1, 具体参数为: 栅长为 $1\mu\text{m}$, 栅宽为 $10\mu\text{m}$, 源漏间距为 $6\mu\text{m}$ 。在单晶片上做 MESFET 器件的阵列, 器件间的间距为 $1.08\text{mm} \times 2.16\text{mm}$ 。

采用本实验室自行研制的砷化镓阈值电压自动测量系统进行测量^[8]。图 1 为阈值电压测试结构的示意图。测量原理为: 源(S)接地, 在漏(D)上加一恒定电压使沟道电流饱和, 在栅(G)上加电压从 0 开始向负方向扫描, 测量饱和漏电流 I_{DS} ; 当 $I_{DS} < 5\mu\text{A}$ 时, 认为沟道已经夹断, 所对应的栅压 V_G 即为阈值电压。在实际测量中采用 HP4145B 半导体参数测试仪提供恒压源和扫描电压, 并记录 I_{DS} , 探针台为信

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69676003)

2001-05-26 收到, 2001-07-16 定稿

© 2002 中国电子学会

息产业部电子第 45 所的 TZ-109 型自动探针台。使用计算机控制整个系统对单晶片上的 MESFET 器件逐个自动测试，并记录阈值电压，作出 mapping 图，统计结果。实验中使用的光源为白炽灯，分别在有光照和无光照的条件下对单晶片上的 13×20 个 MESFET 器件的阈值电压进行测量。

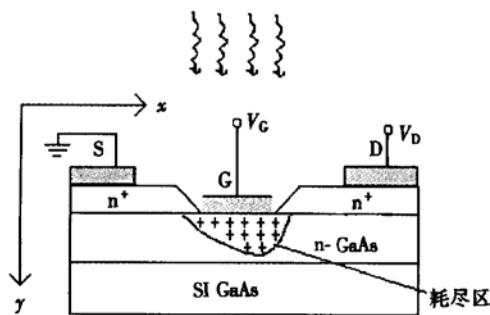


图 1 阈值电压测试结构

Fig. 1 Testing cell structure of V_{th}

3 实验结果及分析

图 2 为根据测量结果作出的 mapping 图，资料统计结果见表 1。

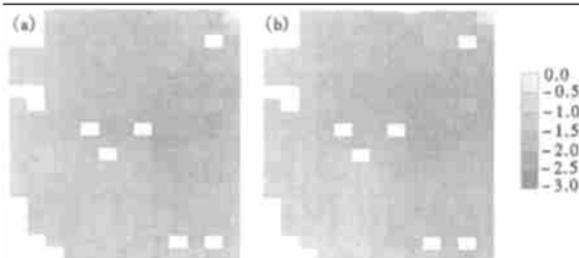


图 2 $1\mu\text{m}$ 栅长 D-MESFET 阵列的阈值电压 V_{th} 分布图 (a) 无光照; (b) 在光照条件下

Fig. 2 Distributions of $1\mu\text{m}$ gate-length MESFET V_{th} in an array (a) under dark condition; (b) under illumination condition

表 1 统计结果

Table 1 Statistical results for V_{th}

条件	阈值电压平均值/V	阈值电压标准偏差/mV
无光照	-2.19	259
有光照	-2.28	243

图中用图像的灰度代表阈值电压的大小，其中的空白点为无效的器件。由于材料参数和工艺(如挖槽等)不均匀的影响，阈值电压偏差较大。实验表明有光照条件下的阈值电压比没光照条件下的阈值电

压向负方向增大，阈值电压增加量最小为 0.01V，最大为 0.1V。由表 1 可见光照条件下的阈值电压的偏差比没光照条件下的小，即光照提高了阈值电压的均匀性。

图 3 为在有光照和无光照条件下 MESFET 的输出特性曲线。由图 3 可知光照使源漏电流增加，这与以往的报道相符^[4]。

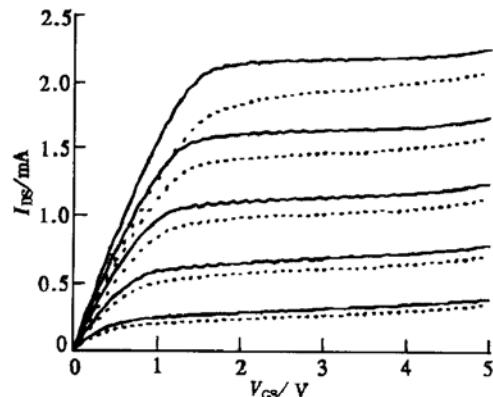


图 3 在有光照(实线)和无光照(虚线)条件下 MESFET 的输出特性曲线

Fig. 3 Output character of MESFET under illumination(solid line) and dark condition(dot line)

如图 1 所示，光在 y 方向一部分从栅、源和栅漏间的间隙透射入半导体；另一部分光穿透半透明的栅进入有源层。在稳态条件下单位体积的光生载流子为^[7]：

$$n = G\tau_n = \alpha\Phi\tau_n e^{-\alpha y} \quad (1)$$

式中 G 为栅下耗尽区的单位体积光产生率； Φ 为光子流密度； α 为单位元长度吸收系数； τ_n 为电子寿命。光照产生电子-空穴对，电子向沟道流动，空穴向半导体表面流动并和表面深陷阱复合，表面复合率为^[4]：

$$R = \frac{N_T k_n k_p (n_s p_s - n_i p_i)}{k_n (n_s + n_i) + k_p (p_s + p_i)} \quad (2)$$

其中 $n_s = \alpha\Phi\tau_n$; $p_s = \alpha\Phi\tau_p$; k_n 和 k_p 是俘获因子； N_T 为陷阱能级的面密度； τ_p 为空穴寿命； n_s 和 n_p 为表面载流子浓度，当费米能级在陷阱能级之间时， $n_s = n_i$, $p_s = p_i$ 。

离子注入分布为高斯分布：

$$N_d(y) = \frac{Q}{\sqrt{(2\pi)\sigma}} \exp \left[- \left| \frac{y - R_p}{\sqrt{2}\sigma} \right|^2 \right] - N_A \quad (3)$$

其中 Q 、 R_p 和 σ 为离子注入参数； N_A 为衬底浓度。

一维泊松方程可写为^[4]:

$$\frac{d^2V}{dy^2} = -\frac{q}{\epsilon}(N_d + G\tau_n - \frac{R\tau_p}{a}) \quad (4)$$

其中 a 为 MESFET 器件的有源层厚度, 边界条件:

$$\frac{dV}{dy}(y = y_{dg}) = 0 \text{ 和}$$

$$V(y_{dg}) = -\Delta + V(x)$$

其中 Δ 为沟道中费米能级与导带能级的差值; y_{dg} 为从表面到耗尽区边缘的距离; $V(x)$ 为 x 处的沟道电压. 解方程(4), 并将边界条件 $V(y=0) = V_{gs} - \phi_b$ 代入结果得:

$$\begin{aligned} V(x) - (V_{gs} - \phi_b) = & \\ & \frac{qQR_p}{2\epsilon} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{R_p}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{y_{dg} - R_p}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right] \\ & + \frac{qQ\sigma}{\sqrt{(2\pi)\epsilon}} (e^{-R_p^2/2\sigma^2} - e^{-(y_{dg} - R_p)^2/2\sigma^2}) \\ & - \frac{qN_A y_{dg}^2}{2\epsilon} + \Delta + \frac{q\phi_{\tau_n}}{\epsilon\alpha} (1 - e^{-\alpha y_{dg}}) \\ & - \frac{q\phi_{\tau_n}}{\epsilon} y_{dg} e^{-\alpha y_{dg}} - \frac{q}{2\epsilon} \times \frac{R\tau_p}{a} y_{dg}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 V_{gs} 为栅源电压; $e\phi_b$ 为金属-半导体功函数差. 当栅压 V_{gs} 等于阈值电压 V_{th} 时, 沟道完全耗尽, $V(x) = 0$, $y_{dg} = y_p$. y_p 为耗尽区宽度的最大值. 由(5)式可得:

$$\begin{aligned} V_{th} = \phi_b - \Delta - \frac{qQR_p}{2\epsilon} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{R_p}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{y_p - R_p}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right] \\ - \frac{qQ\sigma}{\sqrt{(2\pi)\epsilon}} (e^{-R_p^2/2\sigma^2} - e^{-(y_p - R_p)^2/2\sigma^2}) + \frac{qN_A y_p^2}{2\epsilon} - \Delta \\ - \frac{q\phi_{\tau_n}}{\epsilon\alpha} (1 - e^{-\alpha y_p}) + \frac{q\phi_{\tau_n}}{\epsilon} y_p e^{-\alpha y_p} + \frac{q}{2\epsilon} \times \frac{R\tau_p}{a} y_p^2 \end{aligned} \quad (6)$$

利用近似关系: $e^{-x} \approx 1 - x + \frac{1}{2}x^2$ 由(6)式得:

$$\begin{aligned} V_{th} = \phi_b - \Delta - \frac{qQR_p}{2\epsilon} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{R_p}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{y_p - R_p}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right] \\ - \frac{qQ\sigma}{\sqrt{(2\pi)\epsilon}} (e^{-R_p^2/2\sigma^2} - e^{-(y_p - R_p)^2/2\sigma^2}) + \frac{qN_A y_p^2}{2\epsilon} \\ - \Delta + \frac{q\phi_{\tau_n}}{\epsilon} - \frac{q\phi_{\tau_n}}{\epsilon} y_p (1 + \alpha) + \frac{q}{2\epsilon} \times \frac{R\tau_p}{a} y_p^2 \end{aligned} \quad (7)$$

由(7)式可得: 光照条件下, 耗尽型 MESFET 阈值电压的绝对值随表面陷阱能级密度的增加而减少, 随吸收系数的增加而增加.

由于 GaAs 单晶材料中存在深能级缺陷, 它使

得载流子的寿命减小, 使耗尽型 MESFET 的阈值电压绝对值减小^[8]. 深能级缺陷的分布不均匀影响了 GaAs MESFET 阈值电压的均匀性. 在白光照射下, 各种能级上的电子可能被激发, 光吸收系数 α 随深能级密度的增大而增大. 由以上分析可知在光照条件下, 深能级缺陷密度越高, 阈值电压绝对值增加越多, 在一定程度上消除了深能级的影响, 从而使阈值电压的分布越均匀.

从以上实验现象与理论分析可以看出, GaAs MESFET 的光敏特性与深能级缺陷有关, 这表明造成 V_{th} 不均匀性的主要原因之一是深能级缺陷的不均匀性, 因此尽可能减少 SI-GaAs 材料中的深能级缺陷密度是提高 SI-GaAs V_{th} 均匀性的重要措施之一. 另外, 如果利用器件的光敏特性, 通过控制 SI-GaAs 中深能级缺陷密度, 有可能设计出特殊用途的光敏器件.

4 结论

本文通过实验观察到在光照条件下, 耗尽型 MESFET 的沟道电流增加, 阈值电压向负方向增加, 光照提高了阈值电压的均匀性. 我们认为由于 SI-GaAs 衬底存在深能级缺陷, 耗尽型 MESFET V_{th} 绝对值随深能级缺陷密度的增加而减小. 在光照条件下, V_{th} 绝对值的增加量随深能级缺陷密度的增大而增大, 在一定程度上补偿了深能级缺陷分布不均匀对阈值的影响, 使 V_{th} 分布更均匀. 造成 V_{th} 不均匀的重要原因之一是深能级的存在, 因此减小深能级缺陷的不均匀性是提高 V_{th} 均匀性的重要措施之一. 另外, 利用这一光敏现象, 有可能设计出新的光敏器件.

参考文献

- [1] Hiroyuki S, Akitoshi T, Yoshikazu M, et al. Int Symp GaAs and Related Compounds, 1992, 905
- [2] Mizuno H. Microwave characteristics of an optically-controlled GaAs-MESFET. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1983, MTT-31: 596
- [3] Simons R N, Bhasin K B. Analysis of optically controlled microwave/millimeter-wave device structure. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1986, MTT-34: 1349
- [4] Mishra S, Singh V K, Pal B B. Effect of radiation and surface recombination on the characteristics of an ion-implanted

- GaAs MESFET. IEEE Trans Electron Devices, 1990, ED-37: 2
- [5] Chakrabarti P, Shrestha S K, Srivastava A, et al. Switching characteristics of an optically controlled GaAs-MESFET. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1994, MTT-42: 365
- [6] Baack C, Elze G, Walf G. Electron Lett, 1977, 13: 193
- [7] Singh V K, Chattopadhyay S N, Pal B B. Solid-State Electron, 1986, 20: 707
- [8] Zhu Chaosong, Xia Guanqun, Li Chuanhai, et al. Designing of GaAs threshold voltage uniformity measurement system. Journal of Functional Materials and Devices, to be published [朱朝嵩, 夏冠群, 李传海, 等. 硅化镓阈值电压自动测试系统的研制. 功能材料与器件学报, 待发表]
- [9] Gu Chengyu. Master's dissertation. Hefei University of Technology, 1999[顾成余. 硕士学位论文. 合肥工业大学, 1999]

Optical Effect on the Uniformity of MESFET Threshold Voltage^{*}

Zhu Chaosong¹, Xia Guanqun¹, Li Chuanhai^{1,2} and Zhan Yan¹

(1 Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2 Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The uniformity of GaAs MESFET threshold voltage is an important parameter for GaAs wafer, especially for digital IC application. The optical effect on the uniformity of MESFET threshold voltage is studied. Results show that optical radiation enhances the drain-source current of the GaAs MESFET, and makes the threshold voltage to move toward negative direction. The optical radiation also enhances the uniformity of MESFET threshold voltage. Deep level defects is one of the factors that response for the distribution of MESFET threshold voltage. Optical radiation eliminates the effect of deep level defects on MESFET threshold voltage uniformity.

Key words: GaAs; MESFET; photosensitive effect; threshold voltage

EEACC: 2560S

Article ID: 0253-4177(2002)02-0165-04

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 69676003)

Received 26 May 2001, revised manuscript received 16 July 2001

©2002 The Chinese Institute of Electronics