DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.006　　文章编号：1000-128X(2023)05-0063-08

栅极偏置对SiC MOSFET总剂量效应的影响及加固

邱乐山[1]，吴治慷[1]，陈　燕[1]，李诚瞻[2]，白　云[1]
（1.中国科学院微电子研究所，北京　100029；
2.株洲中车时代半导体有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：文章针对总剂量效应造成的MOSFET阈值漂移问题，使用1 200 V SiC MOSFET进行辐照试验，对栅极偏压和辐照后高温栅极偏置退火对阈值漂移的影响和原理进行了研究。通过中带电压法分析发现，造成阈值电压负向漂移的主要原因是辐照产生的空穴被近界面陷阱俘获。通过对不同栅极氧化层退火条件制备的SiC MOSFET试验和分析，得出了当使用氮化气体退火进行总剂量效应加固时，需要折中考虑对沟道迁移率的影响；在5%氮化气体体积分数、1 300 ℃下退火60 min的条件下制备出来的SiC MOSFET沟道迁移率较高，并且抗总剂量效应能力较强。

关键词：4H-SiC MOSFET；总剂量效应；阈值漂移；栅极偏置；退火
中图分类号：TN305　　**文献标识码：**A

Influence and reinforcement of gate bias on total dose effect of SiC MOSFET

QIU Leshan[1], WU Zhikang[1], CHEN Yan[1], LI Chengzhan[2], BAI Yun[1]

(1. Institute of Microelectronics of the China Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Zhuzhou CRRC Times Semiconductor Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: To address the MOSFETs threshold drift caused by the total dose effect, 1 200 V SiC MOSFETs were used for irradiation experiments. The effect and mechanism of gate bias voltage and high-temperature gate bias annealing after irradiation on the threshold drift of MOSFETs were investigated. Through the analysis using the midband voltage method, it was found that the negative threshold drift was mainly caused by the capture of the irradiation-generated holes by near-interface traps. Experiments and analysis on SiC MOSFETs prepared with different gate oxide annealing conditions revealed that a compromise was needed to consider the effect on channel mobility when performing total dose effect reinforcement by nitride gas annealing. And it was found that the MOSFETs prepared under the annealing condition of 5% nitride gas fraction and 60 min at 1 300 °C had high channel mobility and strong resistance to total dose effect.

Keywords: 4H-SiC MOSFET; total dose effect; threshold drift; gate bias; annealing

0　引言

碳化硅（Silicon carbide，SiC）作为第三代半导体材料，具备宽禁带、高击穿场强和高热导率等优越特性，在高频、高压和大功率领域具有广泛的应用前景。新一代航天器对体积、重量和系统能源转换效率等指标提出了更高的要求，采用SiC功率器件相较于传统的

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFB3604002）；国家自然科学基金资助项目（62234013）
通信作者：白　云（1978—），女，博士，研究员，博士生导师，主要从事SiC功率器件方面的研究；E-mail: baiyun@ime.ac.cn
引用格式：邱乐山, 吴治慷, 陈燕, 等. 栅极偏置对SiC MOSFET总剂量效应的影响及加固[J]. 机车电传动, 2023(5): 63-70.
Citation: QIU Leshan, WU Zhikang, CHEN Yan, et al. Influence and reinforcement of gate bias on total dose effect of SiC MOSFET[J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 63-70.

Si 基功率器件能更好地满足这些需求。此外，SiC 材料的宽禁带特性使其具有较大的“电子–空穴对”能量，从理论上讲具有优良的抗辐照特性[1]。因此，在航天领域，SiC 功率器件被寄予厚望。然而，受到各种辐射效应的影响，SiC 功率器件在空间环境中的可靠性远不及预期，其中带有栅极氧化层的 SiC 金属氧化物半导体场效应晶体管（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor，MOSFET）会受到总剂量效应（Total Ionizing Dose，TID）的影响。研究发现，在总剂量效应影响下，SiC MOSFET 的栅极氧化层中会产生氧化物陷阱电荷与界面态，从而使器件阈值电压发生漂移[2]。阈值电压漂移方向和漂移量与辐照偏置、辐照剂量等诸多因素相关[3]。阈值电压的过度漂移会造成器件无法正常工作，因此有必要对器件的总剂量辐照特性进行全面准确的评估。

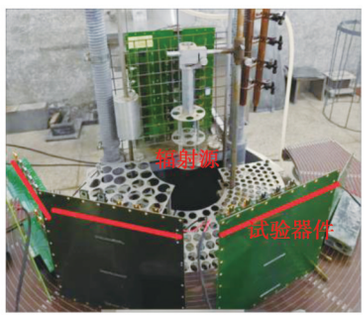
鉴于总剂量效应主要影响栅极氧化层和 SiO_2/SiC 界面，通过优化栅极氧化层质量，可以提升 SiC MOSFET 抗总剂量效应能力[4-8]。对于 SiC 材料，通过热氧化可以形成质量较好的栅极氧化层，然而由于碳元素的存在、SiO_2 和 SiC 的晶格不匹配等因素，制备生成的氧化层质量较差。目前，广泛采用氮化退火技术以降低界面陷阱密度，并提升栅极氧化层质量[9]，但是需要进一步优化工艺条件，以满足抗总剂量加固需求。

本文使用 γ 射线对 SiC MOSFET 进行总剂量辐照试验，研究阈值电压随辐照总剂量与栅极偏压的变化关系，以及高温偏置条件下的退火效应；同时，利用中带电压法区分了氧化物陷阱电荷和界面态对辐照引起的阈值电压漂移量的贡献，分析 SiC MOSFET 电学特性退化的原理。此外，通过对比不同栅极氧化层退火条件的总剂量辐照响应，得到满足加固设计需求的氧化层退火工艺条件。

1 总剂量辐照试验

总剂量辐照试验在北京大学的钴源实验室进行，试验设备如图 1 所示。图 1(a)为辐照室的主要装置，包括钴–60 辐照源，辐照平台和开发板。开发板环绕辐照源以垂直于底面的方向放置，使得 γ 射线垂直于器件方向入射。器件的辐照剂量率与距离辐照源的位置相关，为确保所有器件受到相同的辐照剂量率[50 rad(Si)/s（100 rad/s=1 Gy/s）]，需要精确控制开发板在辐照平台上的位置。图 1(b)为监控室的主要装置，包括电源系统和测试系统。为使器件的各端口在辐照期间保持在设定的偏置状态下，开发板通过导线与监控室的电源系统连接。

试验使用的器件为株洲中车时代半导体有限公司生产的 SiC MOSFET。器件的额定电压为 1 200 V，栅极氧化层厚度为 50 nm，阈值电压约为 3.2 V，器件采用 TO-254 金属封装。由于 γ 射线具有较强的穿透能力，因此无须对封装结构进行额外的处理。在试验过程中，待测器件的栅极偏置条件如表 1 所示，同时源极和漏极被短接并接地。



(a) 辐照室



(b) 监控室总剂量辐照试验装置

图 1 辐照试验系统

Fig. 1 Irradiation experiment system

表 1 总剂量辐照试验器件栅极偏置条件

Table 1 Gate bias condition of devices of total dose radiation experiment V

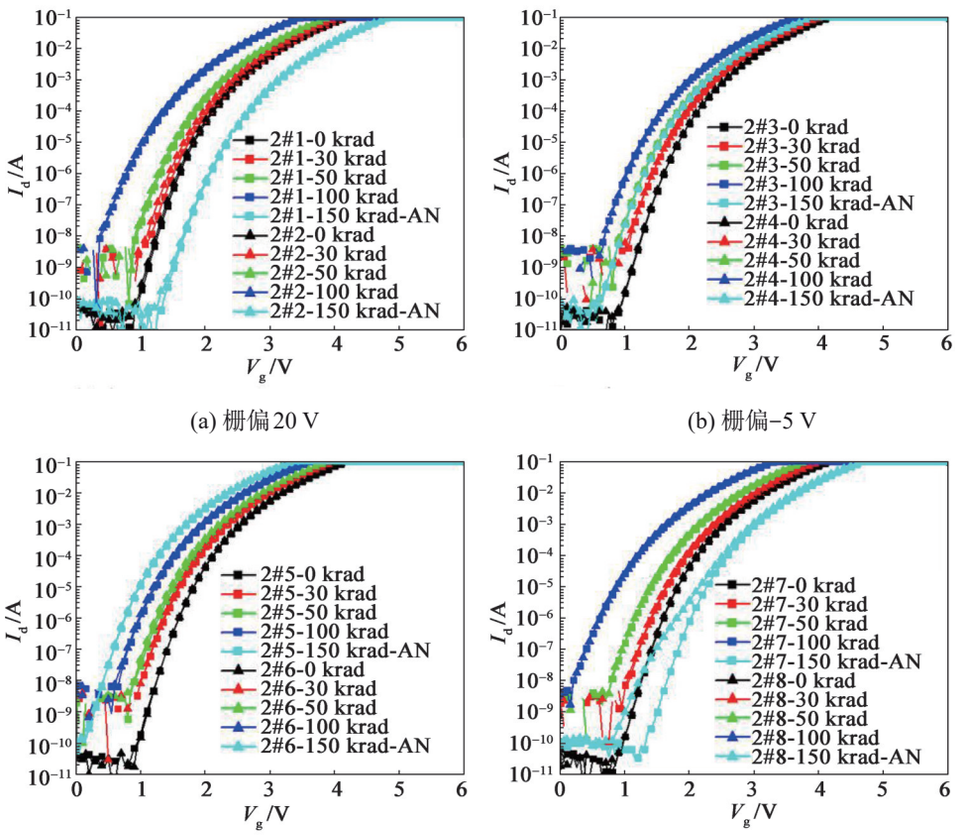
参数名称	器件编号			
	2#1 和 2#2	2#3 和 2#4	2#5 和 2#6	2#7 和 2#8
栅极电压	20	–5	0	12

在辐照过程中选取了 4 个剂量点，分别为 30 krad (Si), 50 krad(Si), 100 krad(Si), 150 krad(Si)；辐照结束后，对器件进行高温栅极偏置退火处理，退火温度为 100 ℃，退火时间为 168 h；在退火期间，器件的各端口偏置条件与辐照试验时保持一致。在试验过程中，使用 Agilent B1505A 半导体器件分析仪测试器件的各项静态特性，评估器件在不同剂量点和退火后的性能表现。

2 结果和分析

2.1 栅极偏置对总剂量效应的影响

图 2 给出了不同栅极偏置条件下 SiC MOSFET 器件在辐照试验过程中的转移特性曲线。从图 2 可知，在相同的偏置条件下，随着辐照剂量的增加，器件的转移特性曲线均出现了负向漂移，并且漂移量逐渐增大。在 4 种栅极偏置条件中，偏置电压 12 V 所对应的器件转移特性曲线负向漂移最为严重。



(a) 栅偏 20 V　　(b) 栅偏−5 V

(c) 栅偏 0 V　　(d) 栅偏 12 V

图 2　试验前后不同栅极偏压条件下器件的转移特性曲线

Fig. 2　Transfer characteristic curve of devices before and after the experiment under different gate bias voltages

转移特性曲线的负向漂移表明器件阈值电压的降低与辐照剂量、栅极偏置有关。图 3 为阈值电压漂移量与辐照剂量的关系。由图 3 可知，随着辐照剂量的增加，阈值电压的负向漂移量均逐渐增大。图 4 为阈值电压漂移量与栅极偏置的关系。由图 4 可知，在栅极偏置 −5 V 和 0 V 的条件下，阈值电压漂移量最小，在 100 krad(Si)时漂移量为 −0.5 V 左右；在栅极偏置 12 V 的条件下，阈值电压漂移最为严重，漂移量达到了 −0.86 V。

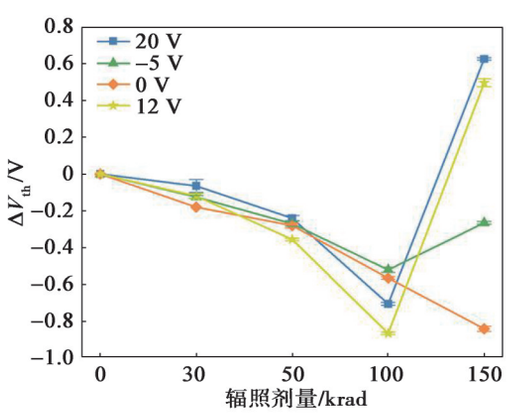


图 3　阈值电压漂移量与辐照剂量的关系

Fig. 3　Threshold voltage drift versus irradiation dose

在总剂量辐照过程中，影响 SiC MOSFET 阈值电压的主要因素是氧化层中的陷阱电荷[10]。在辐照过程

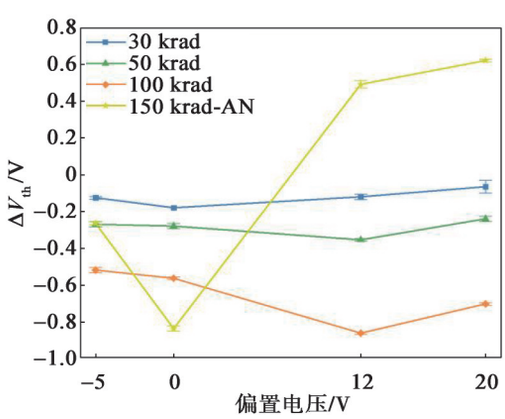


图 4　阈值电压漂移量与栅极偏置的关系

Fig. 4　Threshold voltage drift versus gate bias

中，高能射线会在栅极氧化层中沉积能量，导致氧化层被激发产生“电子–空穴对”。氧化层中的电子、空穴一部分会发生复合，另一部分未被复合的电子、空穴在外加电场的作用下，会向着不同的方向漂移。在 SiO_2 材料中，电子的迁移率约为 20 $cm^2/(V\cdot s)$，而空穴的迁移率远小于电子的迁移率[11]，仅为 10^{-5} $cm^2/(V\cdot s)$。因此，绝大部分电子在极短的时间内便能穿过氧化层被栅极吸收，只有极小部分的电子会被氧化层中的电子陷阱俘获，形成氧化层固定负电荷。大部分空穴则被俘获在氧化层中，通过浅能级隧穿向沟道方向移动。当未被复合的空穴漂移到栅极氧化层与 SiC 外延层的近

界面时，会导致Si-Si键断裂，其中失去电子的Si原子带正电，表现为正电性，形成氧化层陷阱电荷[12]。同时，在栅极氧化层的氮氧高温退火工艺中，界面处会形成SiO_xN_y过渡层，其中的N原子残留还会引发缺陷，主要表现为俘获空穴的空穴陷阱[13-14]。这些空穴陷阱在俘获空穴后也会形成氧化层陷阱电荷。

SiC/SiO_2界面处的氧化层陷阱电荷会产生方向朝向沟道的电场，其作用类似于栅极正偏压，会在沟道表面感应出负电荷，导致沟道表面形成反型层，从而引起转移特性曲线的负向漂移。随着辐照剂量的增加，产生氧化层陷阱电荷的数目也会增加，沟道表面感生出的负电荷也随之增加，因此阈值电压负向漂移程度也越来越大，整个过程如图5所示。

辐照不仅会在氧化层中积累正电荷，而且会在SiC/SiO_2界面处产生新的界面态，其中主要包括Si悬挂键，对于N型MOSFET而言，辐照生成的界面态呈负电性，会导致阈值电压正向漂移。

为了区分氧化层陷阱电荷和界面态对阈值电压漂移造成的影响，使用中带电压法[15]对器件的转移特性曲线进行分析，提取各因素对阈值电压造成的漂移量。当栅极偏置在中带电压时，半导体表面的费米能级处于禁带中线，此时界面态不呈任何电性，因此中带电压的变化完全受氧化层陷阱电荷影响，因此存在

$$\Delta V_{ot}=\Delta V_{mg} \tag{1}$$

式中：ΔV_{ot}为辐照前后氧化层陷阱电荷造成的阈值漂移量；ΔV_{mg}为中带电压漂移量。

由于阈值电压的漂移受氧化层陷阱电荷和界面态共同作用，因此有

$$\Delta V_{th}=\Delta V_{ot}+\Delta V_{it} \tag{2}$$

式中：ΔV_{th}为阈值电压漂移量；ΔV_{it}为辐照前后界面态造成的阈值电压漂移量。

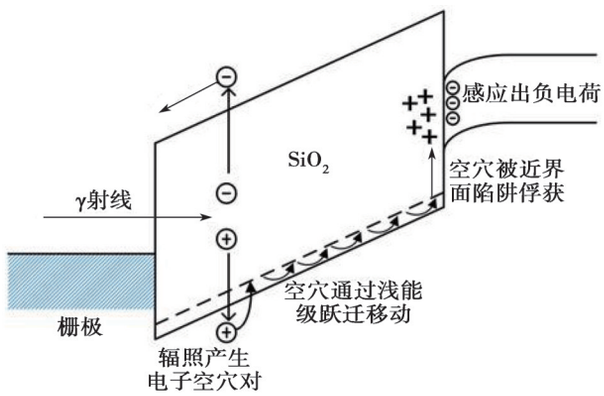
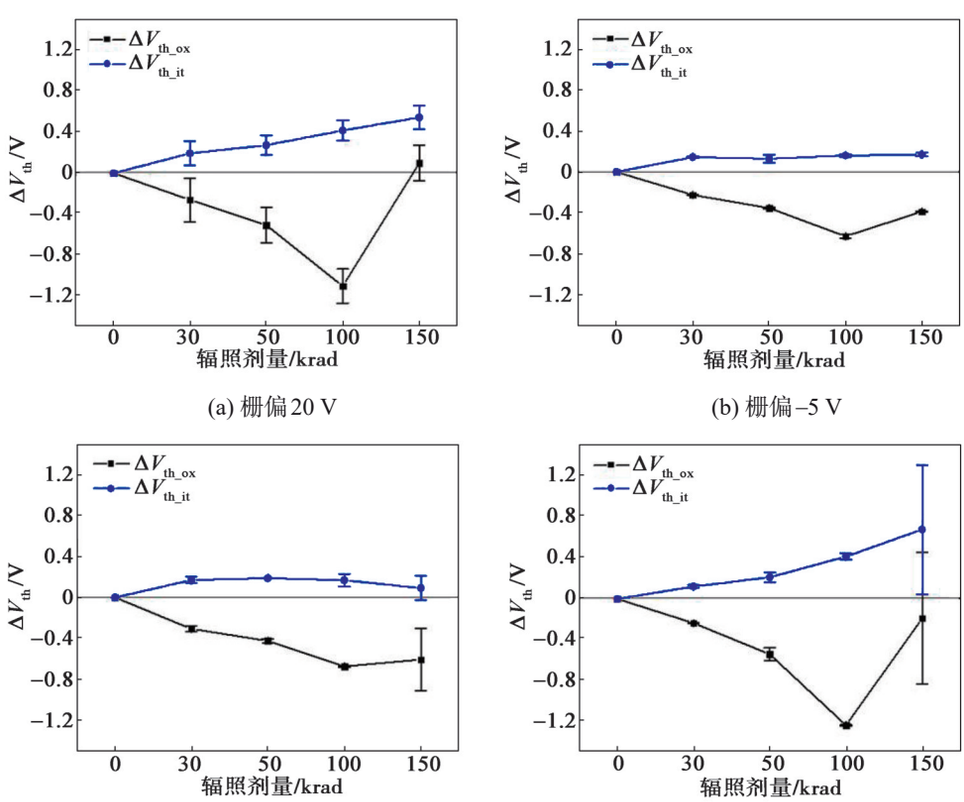


图5 辐照响应的物理过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the physical process under radiation response

图6为通过中带电压法分离出的各栅极偏置条件下氧化层陷阱电荷和界面态造成的阈值电压漂移。由图6可知，在各种偏置条件下，氧化层陷阱电荷均造成阈值电压负向漂移，而界面态均造成阈值电压正向漂移，并且随着辐照剂量的逐渐增加，2种因素造成的阈值电压漂移量均逐渐增大；但是界面态对阈值电压的影响



(a) 栅偏20 V　(b) 栅偏–5 V

(c) 栅偏0 V　(d) 栅偏12 V

图6 不同栅极偏置电压条件下氧化层陷阱电荷和界面态造成的阈值电压漂移汇总

Fig. 6 Summary of threshold voltage shift due to oxide trap charge and interface state under different gate bias voltage

相比于氧化层陷阱电荷始终较小，因此阈值电压的漂移主要由氧化层陷阱电荷主导。

当在辐照过程中对栅极施加负偏置或零偏置时，栅极氧化层内的电场方向由沟道指向多晶硅栅极，电子在电场的作用下向沟道方向漂移，并在界面态的协助下进入沟道，空穴以更慢的速度向多晶硅移动。因此，近界面处产生的氧化层陷阱电荷相对较少，阈值漂移量相对较小。

当在辐照中对栅极施加正偏置时，栅极氧化层内的电场方向从多晶硅栅极指向沟道，此时辐照产生的“电子–空穴对”复合概率减小，未被复合的电子会快速向多晶硅栅极漂移，最终被栅极吸收，空穴则缓慢向沟道方向移动，最终在近界面处产生氧化层陷阱正电荷，导致阈值电压负向漂移。因此，12 V 偏置条件下的阈值电压漂移量比 –5 V 和 0 V 更加严重。当栅极正向偏置继续增加，栅极氧化层内的电场进一步增大，此时近界面处的空穴陷阱俘获截面会减小[16-17]，导致空穴俘获数量减小，因此栅极偏置 20 V 下的阈值电压漂移程度相对于栅极偏置 12 V 较低。

当氧化层内电场较低时，“电子–空穴对”的复合对阈值漂移量起主要作用，此时电场越高，复合率越低，近界面空穴陷阱俘获的空穴数量越多，阈值电压漂移量越大；当氧化层内电场较高时，氧化层空穴陷阱的俘获截面逐渐开始起主导作用，此时电场越高，俘获截面越小，近界面空穴陷阱俘获的空穴数量越少，阈值电压漂移量越小。

2.2　高温栅极偏置对辐照后退火效应的影响

为了研究高温栅极偏置对总剂量辐照后 SiC MOSFET 退火效应的影响，对辐照后的被测器件进行了 1 周的高温加速退火试验。如图 2~图 4 所示，不同栅极电压偏置下高温退火对器件阈值电压的影响存在差异。–5 V 栅极偏置器件的阈值电压负向漂移程度与 50 krad(Si)剂量辐照时的阈值电压负向漂移程度相当，0 V 栅极偏置器件阈值电压相比于 100 krad(Si)时进一步负向漂移 0.27 V，而栅偏电压 12 V 与 20 V 器件的阈值电压相较于试验前分别正向漂移了约 0.5 V 和 0.6 V。

高温栅偏退火对器件阈值电压的影响主要分为 2 个方面：①辐照产生的氧化层陷阱电荷经过高温栅偏退火会部分恢复，导致阈值正向漂移；②高温栅偏本身会影响栅极氧化层内陷阱的状态，并产生界面态影响阈值电压[18-19]。同时，2 个因素对于阈值电压的影响是相互独立的[8]。

辐照产生的损伤在高温下会发生热激发退火和隧穿退火。在热激发退火过程中，价带中的电子经过热激发与陷阱中的空穴中和，或陷阱中的空穴经过热激发释放到价带逃离氧化层。隧穿退火为沟道或外延层中的电子在高温与电场的作用下隧穿进入氧化层中，与氧化物陷阱电荷中和。由于本次试验中退火温度相对较低，因此主要发生的是隧穿退火。

在直流高温栅偏条件下，正栅偏会导致阈值电压正向漂移，负栅偏会导致阈值电压负向漂移。当施加正栅偏时沟道区表面形成反型层，沟道表面的电子会被栅极氧化层中的电子陷阱俘获，氧化层中的净负电荷数量增加使得阈值电压正向漂移。此外，正向应力还会产生受主界面态，增加 SiO_2 与沟道界面的净负电荷，同样使得阈值电压正向漂移。施加负栅偏时沟道区表面形成积累层，因此氧化物陷阱电荷的中和效应减弱，但是高电场会促使空穴电荷向栅极氧化层内部移动，造成的阈值电压的轻微正向漂移，同时还会产生施主型界面态导致阈值电压负向漂移。

试验中栅极偏置电压 –5 V 的器件在隧穿退火的作用下阈值电压正向漂移，在直流高温栅偏的作用下阈值电压负向漂移。由于栅极偏置电压较低，隧穿退火的影响比直流高温栅偏的影响更大，因此阈值电压得到部分恢复。对于栅极电压为 0 V 的器件，不存在直流高温栅偏效应，仅在内建电场的作用下存在较弱的隧穿退火，因此阈值电压只有轻微正向漂移，但是由于高温退火前对器件进行了 50% 的过量辐照，过量辐照造成的阈值电压负向漂移量比退火造成的正向漂移量大，因此退火后器件的阈值电压比经受 100 krad(Si)辐照剂量后的器件阈值电压更低。对于栅极偏置电压 12 V 和 20 V 的器件，隧穿退火和直流高温栅偏效应均导致阈值电压正向漂移，并且由于 20 V 正栅偏相对于 12 V 较大，退火效应更显著，因此高温退火后的器件阈值电压正向漂移量相比于 12 V 也更大。

3　栅极氧化层退火条件对总剂量效应的加固

为了探究栅极氧化层退火工艺中氮化条件对器件总剂量效应的影响，选取了不同氮化气体浓度、不同退火时间的器件进行总剂量试验。不同试验器件的编号及其对应的退火条件如表 2 所示，其中 2#器件和 5#器件用于对比氮化气体体积分数对总剂量效应的影响，2#器件与 7#器件对比退火时间和温度对器件总剂量效应的影响。

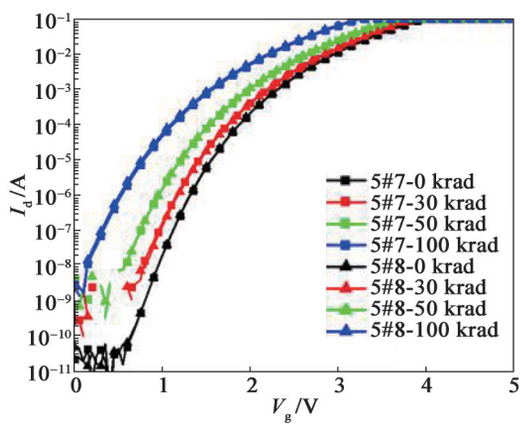
表 2　试验器件栅极氧化层退火条件

Table 2　Annealing conditions of gate oxide layer of experimental devices

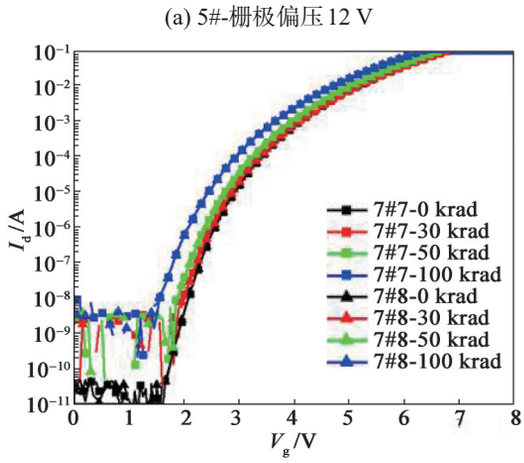
器件编号	氮化气体体积分数/%	退火时间/min
2#	10	60
5#	5	60
7#	10	15

在 12 V 最恶劣栅极偏置条件下，5#器件和 7#号器件在各辐照剂量下的转移特性曲线如图 7 所示，2#器件

的转移特性曲线可参考图 2(d)。由图 2(d)和图 7 可知，不同退火条件下的器件初始阈值电压有较大差别：当退火时间一致时，退火过程中氮化气体浓度更高的 2# 器件的阈值电压大于 5# 器件的阈值电压；当氮化气体浓度一致时，退火时间更短的 7# 器件的阈值电压大于 2# 器件的阈值电压；3 种退火条件下器件的转移特性曲线均随着辐照剂量的增加，逐渐负向漂移。



(a) 5#-栅极偏压 12 V



(b) 7#-栅极偏压 12 V

图 7　5#器件和 7#器件的转移特性曲线

Fig. 7　Transfer characteristic curves of device 5# and 7#

图 8 为阈值电压漂移量与辐照剂量的关系。由图 8 可知，2#器件的阈值电压负向漂移最严重，在 100 krad (Si)的总剂量下漂移量达到 0.87 V，相比之下，5#器件和 7#器件的负向漂移量分别为 0.74 V 和 0.44 V。

图 9 为利用中带电压法将辐照引起的阈值电压漂移量分离成氧化层陷阱电荷与界面态分别对阈值电压漂移量影响的量化结果。从图 9 可知，在不同退火条件下，辐照生成的氧化层陷阱电荷和界面态对阈值电压造成的影响趋势相同，对于 2#器件、5#器件和 7#器件，在 100 krad(Si)的总剂量下，界面态造成的阈值电压正向漂移量分别为 0.41 V、0.38 V 和 0.21 V，氧化层陷阱电荷造成的阈值电压负向漂移量分别为 1.23 V、1.03 V 和 0.42 V。

当使用氮化气体对栅极氧化层进行热退火时，O 元素可以与界面处的碳簇发生反应，以 CO 或 CO_2 气体

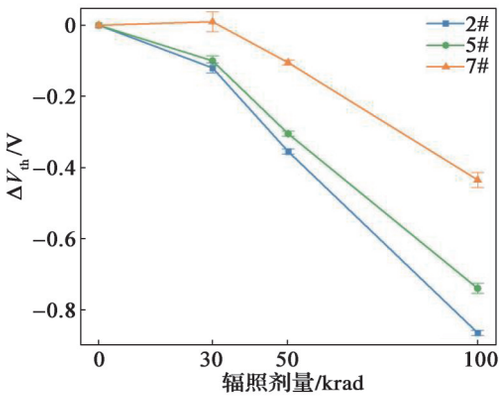
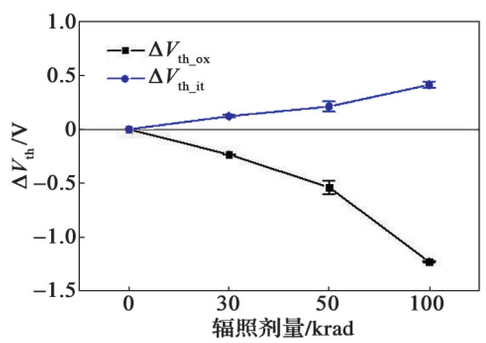
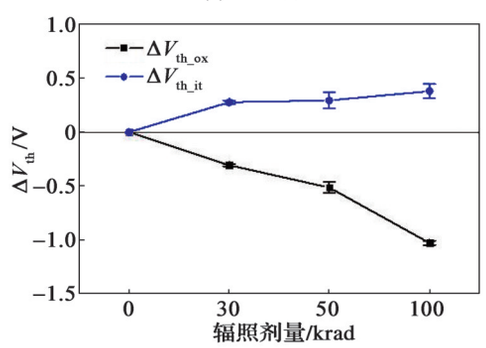


图 8　不同退火条件下器件阈值漂移量与辐照剂量的关系

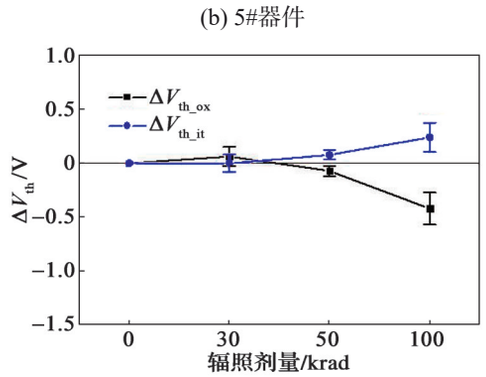
Fig. 8　Threshold drift versus irradiation dose under different annealing conditions



(a) 2#器件



(b) 5#器件



(c) 7#器件

图 9　2#器件、5#器件和 7#器件氧化层陷阱电荷和界面态造成的阈值电压漂移量(V_g = 12 V)

Fig. 9　Threshold voltage shift caused by oxide trap charge and interface state of devices 2#, 5# and 7#(V_g = 12 V)

的形式去除碳簇，N 元素可以填充 Si、O 悬挂键，降低界面处的界面态，从而达到降低阈值电压的效果。7#

器件由于退火时间较短导致退火程度不充分，使得器件初始沟道迁移率较低、阈值电压较高，具有1个未配对电子的N原子在氧化层中会充当负电荷，这会导致阈值电压正向漂移。2#器件退火的氮化气体体积分数较高，退火后栅极氧化层中的氮组分含量更高，因此2#器件的初始阈值电压相比于5#器件更高，而在辐照过程中，氧化物中的N原子也会产生空穴俘获缺陷[5]，因此氧化层中的氮组分含量越高，经过γ射线辐照后俘获的空穴越多，阈值漂移就会越严重。

对比表2中的退火条件可以发现，2#器件、5#器件和7#器件由于氮化气体体积分数与退火时间不同，退火后栅极氧化层内的氮组分含量也不同，因此阈值电压负向漂移程度不同。其中，2#器件的退火氮化气体体积分数较高，退火时间更长，因此退火后栅极氧化层内的氮元素含量最高，阈值退化最为严重，而7#器件相比5#器件虽然退火氮化气体体积分数较高，但是退火时间较短，因此退火后栅极氧化层内的氮元素含量较低，阈值退化相对较小，但是由于退火时间的不足，导致7#器件的沟道迁移率过低和阈值电压较大。

在实际器件制备过程中，对栅极氧化物退火中氮化气体体积分数、退火时间等参数进行设定时，需要综合考虑器件的抗辐照特性和阈值电压大小。对于本次试验的3种器件，5#器件的退火条件既实现了设定的合理阈值电压，又实现了较好的抗总剂量效应的能力，是3种条件中的最佳方案。

4　结论

本文使用钴−60辐照源释放的γ射线，对1 200 V SiC MOSFET进行总剂量辐照效应的研究。通过对比不同栅极偏置电压条件下的MOSFET特性，分析了总剂量效应对SiC MOSFET电学特性造成退化的原理，认为由于辐照在栅极氧化层内产生的氧化层陷阱电荷是造成阈值电压负向漂移的主要原因。对SiC MOSFET进行50%过量辐照，并进行高温栅极偏置退火试验，退火后阈值漂移是总剂量效应的恢复和高温栅偏同时作用的结果。由SiC MOSFET制备过程中不同氧化层退火条件对总剂量效应的影响发现，虽然含氮气体的退火可以降低界面态，提升沟道迁移率，但是同样也会导致SiC MOSFET的总剂量效应更加严重，在进行抗总剂量辐照器件的设计时，应折中考虑上述影响。其中，较优的栅极氧化层退火条件为在5%的氮化气体体积分数、1 300 ℃下退火60 min。研究试验结果表明，SiC MOSFET具有较强抗总剂量效应的能力，有望在航空系统中得到实际应用。

参考文献：

[1] HAZDRA P, POPELKA S, ZÁHLAVA V, et al. Radiation damage in 4H-SiC and its effect on power device characteristics[J]. Solid state phenomena, 2015, 242: 421-426.

[2] MURATA K, MITOMO S, MATSUDA T, et al. Impacts of gate bias and its variation on gamma-ray irradiation resistance of SiC MOSFETs[J]. Physica status solidi (A), 2017, 214(4): 1600446.

[3] YOSHIKAWA M, ITOH H, MORITA Y, et al. Effects of gamma-ray irradiation on cubic silicon carbide metal-oxide-semiconductor structure[J]. Journal of applied physics, 1991, 70(3): 1309-1312.

[4] ROZEN J. Tailoring oxide/silicon carbide interfaces: NO annealing and beyond[M]//HIJIKATA Y. Physics and Technology of Silicon Carbide Devices. Rijeka: IntechOpen, 2012.

[5] MITOMO S, MATSUDA T, MURATA K, et al. Optimum structures for gamma-ray radiation resistant SiC-MOSFETs [J]. Physica status solidi (A), 2017, 214(4): 1600425.

[6] HU Dongqing, ZHANG Jingwei, JIA Yunpeng, et al. Impact of different gate biases on irradiation and annealing responses of SiC MOSFETs[J]. IEEE transactions on electron devices, 2018, 65(9): 3719-3724.

[7] LIANG Xiaowen, CUI Jiangwei, ZHENG Qiwen, et al. Study of the influence of gamma irradiation on long-term reliability of SiC MOSFET[J]. Radiation effects and defects in solids, 2020, 175(5/6): 559-566.

[8] YU Qingkui, ALI W, CAO Shuang, et al. Application of total ionizing dose radiation test standards to SiC MOSFETs [J]. IEEE transactions on nuclear science, 2022, 69(5): 1127-1133.

[9] WANG Jun, JIANG Xi. Review and analysis of SiC MOSFETs' ruggedness and reliability[J]. IET power electronics, 2020, 13(3): 445-455.

[10] 顾朝桥, 郭红霞, 潘霄宇, 等. 不同应力下碳化硅场效应晶体管器件总剂量效应及退火特性[J]. 物理学报, 2021, 70(16): 166101.
GU Chaoqiao, GUO Hongxia, PAN Xiaoyu, et al. Total dose effect and annealing characteristics of silicon carbide field effect transistor devices under different stresses[J]. Acta physica sinica, 2021, 70(16): 166101.

[11] LAI S K. Interface trap generation in silicon dioxide when electrons are captured by trapped holes[J]. Journal of applied physics, 1983, 54(5): 2540-2546.

[12] OLDHAM T R, MCLEAN F B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices[J]. IEEE transactions on nuclear science, 2003, 50(3): 483-499.

[13] ROZEN J, DHAR S, DIXIT S K, et al. Increase in oxide hole trap density associated with nitrogen incorporation at the SiO_2/SiC interface[J]. Journal of applied physics, 2008, 103(12): 124513.

[14] ROZEN J, DHAR S, ZVANUT M E, et al. Density of interface states, electron traps, and hole traps as a function of the

nitrogen density in SiO_2 on SiC[J]. Journal of applied physics, 2009, 105(12): 124506.

[15] MCWHORTER P J, WINOKUR P S. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor transistors[J]. Applied physics letters, 1986, 48(2): 133-135.

[16] FLEETWOOD D M, WINOKUR P S, SCHWANK J R. Using laboratory X-ray and cobalt-60 irradiations to predict CMOS device response in strategic and space environments [J]. IEEE transactions on nuclear science, 1988, 35(6): 1497-1505.

[17] SHANEYFELT M R, SCHWANK J R, FLEETWOOD D M, et al. Field dependence of interface-trap buildup in polysilicon and metal gate MOS devices[J]. IEEE transactions on nuclear science, 1990, 37(6): 1632-1640.

[18] PUSCHKARSKY K, GRASSER T, AICHINGER T, et al. Review on SiC MOSFETs high-voltage device reliability focusing on threshold voltage instability[J]. IEEE transactions on electron devices, 2019, 66(11): 4604-4616.

[19] YANG Chao, WEI Shengsheng, WANG Dejun. Bias temperature instability in SiC metal oxide semiconductor devices[J]. Journal of physics D: applied physics, 2021, 54 (12): 123002.

收稿日期：2023-07-15