

# 极端温度下功率 SiGe HBTs 辐照特性研究

胡开龙 魏印龙 秦国轩

(天津大学微电子学院, 天津市成像与感知微电子技术重点实验室, 天津 300072)

**文 摘** 为研究不同发射极面积的 SiGe HBTs 在极端温度下的辐照特性, 本文系统地表征了质子辐照前后功率硅锗异质结双极晶体管 (SiGe HBTs) 在不同温下的辐照特性; 揭示发射极面积与功率 SiGe HBTs 的辐照损伤相关性; 对功率 SiGe HBTs 器件进行建模研究, 提取辐照影响器件内部的主要参数; 表征了不同条件下辐照前后电子密度变化量 ( $\Delta$  edensity)、载流子复合率变化量 ( $\Delta$  SRH recombination) 以及载流子迁移率变化量 ( $\Delta$  emobility), 对辐照影响功率 SiGe HBTs 的内部物理机制进行系统的分析。研究结果表明, 功率 SiGe HBTs 的发射极面积与质子辐照损伤成正比, 性能退化严重; 在极端温度下, 具有更好的抗质子辐照能力; 在抗辐照领域和空间应用等领域有巨大的潜力。

**关键词** 高功率硅锗异质结双极晶体管, 质子辐照, 极端温度, 器件建模, 机制分析

中图分类号: TP431

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.06.012

## Characteristics of SiGe Heterojunction Bipolar Transistors at Extreme Temperatures

HU Kailong WEI Yinlong QIN Guoxuan

(School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronic Technology, Tianjin 300072)

**Abstract** In order to study the irradiation characteristics of SiGe heterojunction bipolar transistors with different emitter areas at extreme temperatures, characteristics of irradiated power SiGe heterojunction bipolar transistors (SiGe HBTs) were systematically analyzed at different temperatures in this paper; Correlation between emitter area and power SiGe HBTs' irradiation damage of SiGe HBTs was revealed. Modeling of power SiGe HBTs device was conducted to extract the main internal parameters of the device affected by irradiation. The variation of electron density ( $\Delta$  edensity), carrier recombination ( $\Delta$  SRH recombination) and carrier mobility ( $\Delta$  emobility) before and after irradiation were characterized, whose affecting mechanism on power SiGe HBTs irradiation was systematically analyzed. The results show proportional proton irradiation damage of emitter area on power SiGe HBTs. SiGe HBTs have better proton irradiation resistance at extreme temperatures, which presents great potential in the field of radiation resistance and space application.

**Key words** Power SiGe HBTs, Proton irradiation, Extreme temperature, Device modeling, Mechanism analysis

### 0 引言

硅锗异质结双极晶体管 (SiGe HBTs) 具有体积小, 兼容性好, 更高的特征频率和最大振荡频率等特性, 因而通常被集成在射频器件中, 如: 通信系统。

此外, 它有较宽工作温度范围及辐照耐受性等优势, 因而在抗辐照领域具有广阔大的应用前景<sup>[1-7]</sup>。

研究表明, 辐照对器件造成的损伤机制主要包括位移损伤和电离损伤, 同时揭示了辐照对 SiGe

收稿日期: 2021-12-09

基金项目: 国家自然科学基金 (61871285)

第一作者简介: 胡开龙, 1995 年出生, 硕士, 主要从事半导体器件性能表征与分析方面研究工作。E-mail: 781802887@qq.com

通信作者: 秦国轩, 1984 年出生, 博士, 主要研究领域: 柔性微波电子器件与电路的设计、建模与制造; 单晶纳米薄膜技术; 射频/微波电子器件及电路的研究; 高速功率 SiGe HBT 器件与电路。E-mail: gqin@tju.edu.cn

HBTs的EB结附近以及浅沟道隔离层(STI, shallow trench isolation)影响最大<sup>[5, 8-13]</sup>。除了在射频通信等领域,功率SiGe HBTs更多应用于功率放大器中<sup>[14-18]</sup>。因其具有较大发射极面积,所受辐照损伤也更加严重<sup>[19-20]</sup>,因而系统性地对不同发射极面积的功率SiGe HBTs进行研究。此外,SiGe HBTs能在较宽的环境温度下正常工作,对其在不同温度环境中的辐照特性研究也是极为必要<sup>[5, 21-22]</sup>。迄今为止,对SiGe HBTs在不同温度下质子辐照特性和不同发射极面积的SiGe HBTs质子辐照特性已有初步的研究<sup>[23-26]</sup>。本文系统性地对不同发射极面积的功率SiGe HBTs器件在极端温度和室温下进行辐照实验及表征,同时建模研究质子辐照对器件内部物理机制具体的影响。

本工作中对极端温度下功率SiGe HBTs的辐照特性进行了相关研究:(1)在3种不同温度环境下进行不同发射极面积的功率SiGe HBTs质子辐照实验,同时表征出器件在辐照损伤下的直/交流特性;(2)采用Sentaurus TCAD软件上按照实际SiGe HBTs器件的参数建立工艺模型和器件结构模型,基于建立的模型在不同温度和辐照通量下仿真得到的直流特性和交流特性与实际器件相符;(3)基于模型表征了不同条件下辐照前后电子密度变化量( $\Delta$  edensity)、载流子复合率变化量( $\Delta$  SRH recombination)以及载流子迁移率变化量( $\Delta$  emobility)具体分析功率SiGe HBTs内部物理机制,为空间实验研究提供了可靠的理论指导。

### 1 实验方法与建模

本工作质子辐照实验中,使用Tower Jazz公司采用0.35  $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS工艺技术制造到的功率SiGe HBTs器件<sup>[27]</sup>,图1显示了功率SiGe HBTs的光学显微镜图像。

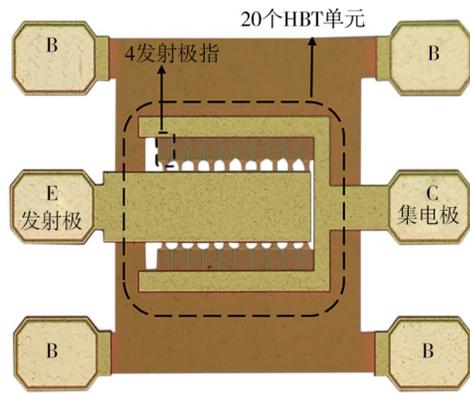


图1 功率SiGe HBTs的光学显微镜图像  
Fig. 1 Optical microscopic image of the SiGe HBTs with multi-fingers

采用Sentaurus TCAD软件对功率SiGe HBTs器件进行建模如图2所示。建立的模型结构和工艺参数与辐照实验的功率SiGe HBTs保持一致。在建好的模型中引入缺陷和调整载流子运输模型仿真位移损伤,用等效剂量 $\gamma$ 射线仿真电离损伤。实验和仿真中器件的具体参数见表1。基于建立的模型,仿真功率SiGe HBTs的直/交流辐照损伤特性。表征出不同条件下辐照前后 $\Delta$  edensity、 $\Delta$  SRH recombination以及 $\Delta$  emobility,对辐照影响功率SiGe HBTs的内部物理机制进行分析。

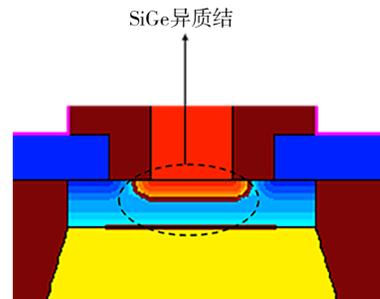


图2 TCAD模型结构  
Fig. 2 Model structure of TCAD

表1 实验和模型器件参数

Tab. 1 Experimental and model device parameters

器件编号	器件结构参数		实验及仿真环境参数			
	总发射极面积 $/\mu\text{m}^2$	基极厚度 $/\text{nm}$	质子辐照		实验和仿真温度 $/\text{K}$	仿真中 $\gamma$ 辐照剂量 $/\text{krad}$
			通量/ $10^{12} \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}$	能量/ $\text{MeV}$		
HBT1	146		1		77	136
HBT2	438	50	10	62.5	300	2720
HBT3	730		50		393	6800
HBT4	1461					

## 2 结果与讨论

### 2.1 SiGe HBTs实验测试和模型仿真性能表征

基于器件模型进行仿真,将仿真的转移特性与

实验测试结果进行了比较(图3)。在不同温度下,辐照前后的SiGe HBTs的仿真结果和实验测试结果拟合较好。图3(a)可见基极电流( $I_B$ )对质子辐照较为

敏感,而质子辐照对集电极电流( $I_C$ )影响不明显。此外,比较图3(a)(b)可得出,不同温度对辐照后的

SiGe HBTs的特性有不同的影响。

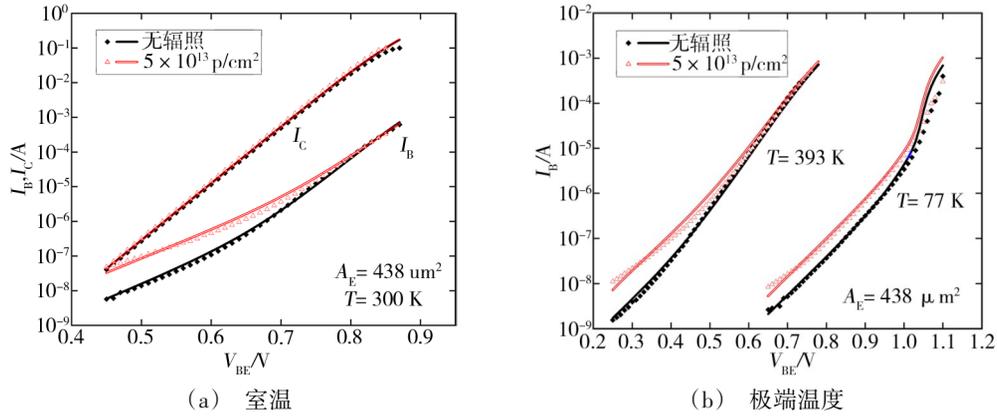


图3 不同温度下辐照前后SiGe HBTs的转移特性

Fig. 3 Gummel characteristics of pre- and post-radiated SiGe HBTs at different temperatures

### 2.1.1 直流性能表征

#### 2.1.1.1 发射极面积对功率SiGe HBTs辐照特性的影响

图4显示了不同辐照通量下 $\Delta I_B$ 和 $1/\beta$ 随发射极面积的变化, $\Delta I_B = I_{B\text{-post}} - I_{B\text{-pre}}$  ( $I_{B\text{-post}}$ :辐照后 $I_B$ , $I_{B\text{-pre}}$ :辐照前 $I_B$ ),  $1/\beta = I_B/I_C$ 。可以看出在同一发射极面积

( $A_E$ )下, $\Delta I_B$ 和 $1/\beta$ 随着辐照通量的增大而增大,主要原因是质子辐照使得SiGe HBTs在EB结附近形成产生/重组(G/R)陷阱中心,从而产生基极漏电流,而基极漏电流与辐照通量成正比。同时,随着发射极面积的增大,质子辐照引起更多的 $I_B$ 和 $\beta$ 退化(即更高的漏电流),对SiGe HBTs的损伤越大。

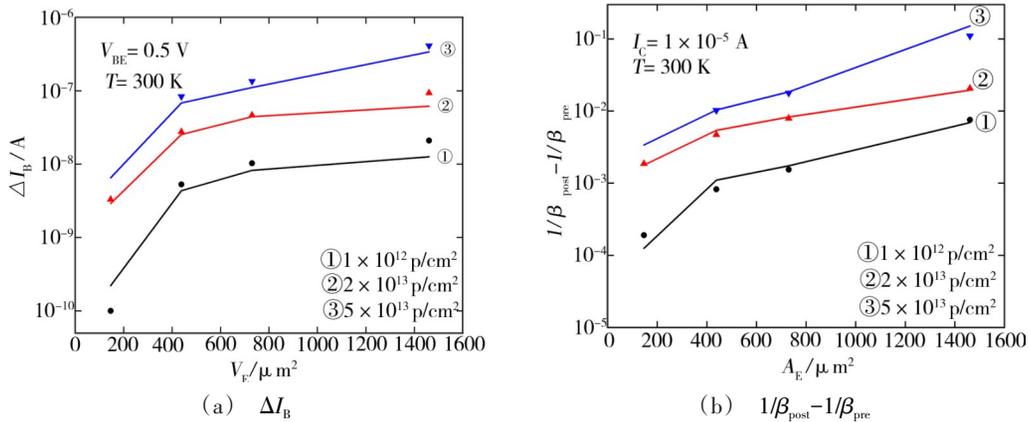
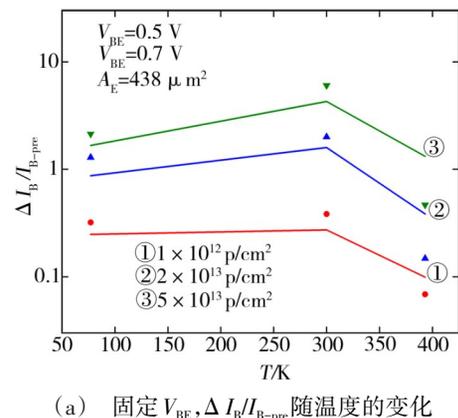


图4 不同辐照通量下 $\Delta I_B$ 和 $1/\beta_{\text{post}} - 1/\beta_{\text{pre}}$ 随发射极面积的变化

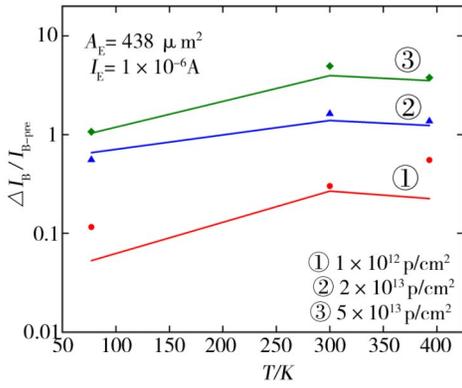
Fig. 4  $\Delta I_B$  and  $1/\beta_{\text{post}} - 1/\beta_{\text{pre}}$  vs. emitter area ( $A_E$ ) with different radiation fluences

#### 2.1.1.2 极端温度对功率SiGe HBTs辐照特性的影响

为了研究极端温度对功率SiGe HBTs辐照特性的影响,分别固定 $V_{BE}$ (在低温时,开启电压较高 $V_{BE} = 0.7\text{ V}$ ;在室温和高温时, $V_{BE} = 0.5\text{ V}$ )和固定 $I_C$ 条件,将 $I_B$ 进行归一化处理进行分析,如图5所示。两种条件的结果均表明,与室温相比在77或393K时,SiGe HBTs的 $I_B$ 退化更少。结果表明,极端温度能抑制质子辐照损伤。



(a) 固定 $V_{BE}$ ,  $\Delta I_B/I_{B\text{-pre}}$ 随温度的变化



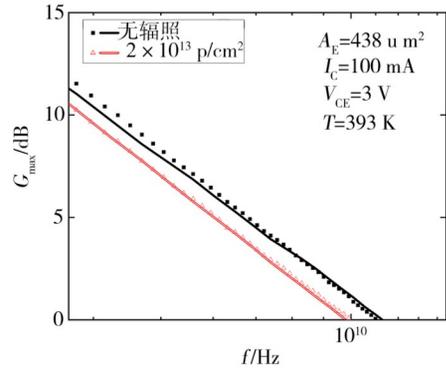
(b) 固定  $I_C$ ,  $\Delta I_B/I_{B-pre}$  随温度的变化

图5 固定  $V_{BE}$  和  $I_C$ , 不同辐照通量下  $\Delta I_B/I_{B-pre}$  随温度的变化

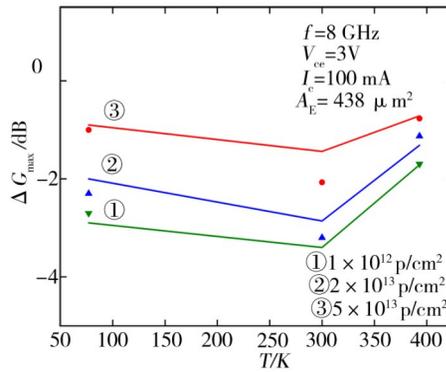
Fig. 5  $\Delta I_B/I_{B-pre}$  vs. temperature with different radiation fluences with fixed  $V_{BE}$  (a) and  $I_C$  (b)

### 2.1.2 交流性能表征

通过  $G_{max}$  来表征功率 SiGe HBT 的交流性能。实验测量了不同温度下发射极面积为  $438 \mu\text{m}^2$  SiGe HBTs 辐照前后的  $G_{max}$ 。由图 6(a)(c) 看出, 辐照后  $G_{max}$  降低, 同时与横坐标频率的交点(即最大振荡频率  $f_{max}$ )减小, 表明器件在辐照后交流特性退化。此外, 图 6(d) 显示  $\Delta G_{max}$  随温度的变化, 结果显示功率 SiGe HBTs 在极端温度下的  $|\Delta G_{max}|$  较小, 进一步证明极端温度能抑制辐照损伤。



(c) 393 K



(d)  $\Delta G_{max}$  随温度的变化

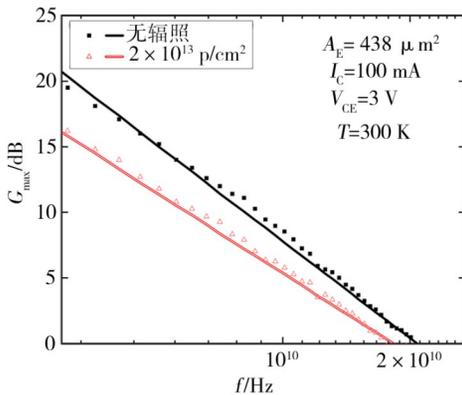
图6 不同温度辐照前后  $G_{max}$  随频率的变化和不同辐照通量下  $\Delta G_{max}$  随温度的变化

Fig. 6  $G_{max}$  vs. frequency of the pre- and post-radiated SiGe HBTs at different temperatures,  $\Delta G_{max}$  vs. temperature at different radiation fluence

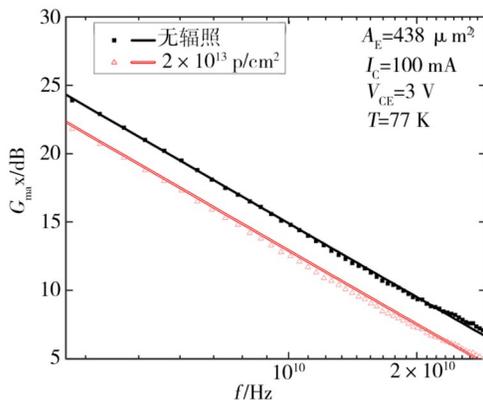
## 2.2 辐照下 SiGe HBTs 内部物理机制分析

### 2.2.1 发射极面积对辐照下 SiGe HBTs 内部物理机制影响

为更直观的分析 SiGe HBTs 在质子辐照后器件内部物理机制的变化, 表征不同发射极面积在辐照前后器件的  $\Delta \text{density}$ , 如图 7 所示。质子辐照主要对 SiGe HBTs 在 EB 结附近造成损伤, 辐照前后大面积的功率 SiGe HBTs 内部  $\Delta \text{density}$  更大。验证了辐



(a) 300 K



(b) 77 K

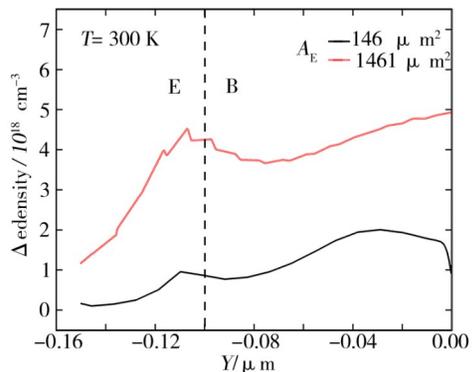


图7 不同发射极面积下 SiGe HBTs EB 结附近电子密度变化量

Fig. 7  $\Delta \text{density}$  near the EB junction of the SiGe HBTs with different emitter areas

照主要对 SiGe HBTs 的电子密度产生影响,同时表明功率 SiGe HBTs 的发射极面积与辐照损伤成正比。

### 2.2.2 温度对辐照下 SiGe HBTs 内部物理机制影响

基于建立的模型,分别在固定  $V_{BE}$  和  $I_C$ ,提取在不同温度下器件在辐照前后 EB 结附近的电子密度,如图 8 所示。一方面,各温度条件下电子密度变化  $\Delta$  density 为正,表明质子辐照使得 SiGe HBTs 的电子密度增加,从而导致使得  $I_B$  增加。另一方面,对比不同温度下的  $\Delta$  density,室温下的明显比在极端温度下的大,表明室温下 SiGe HBTs 受质子辐照损伤更大。在固定  $V_{BE}$  和  $I_C$  条件下均表现出一致的结论,揭示出质子辐照影响器件内部电子密度以及极端温度对辐照损伤具有抑制作用。

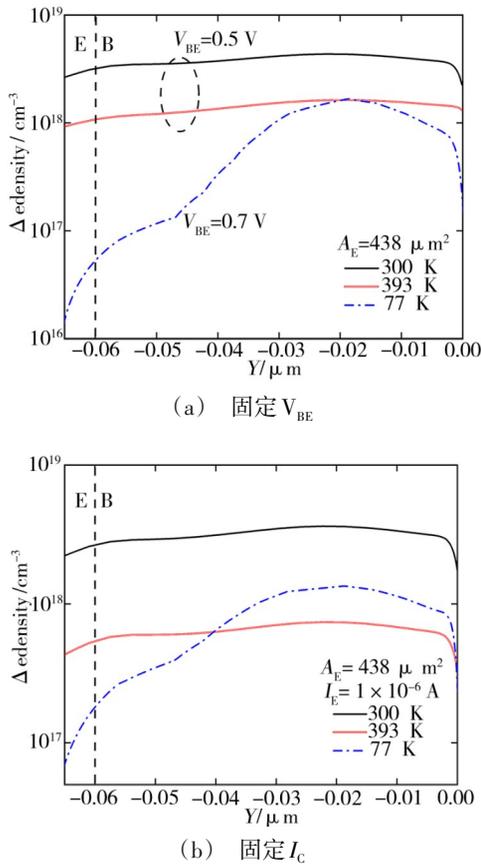


图 8 固定  $V_{BE}$  和  $I_C$ ,不同温度下 SiGe HBTs EB 结附近辐照前后电子密度变化量

Fig. 8  $\Delta$  density near EB junction of the pre- and post-radiated SiGe HBTs at different temperature with fixed  $V_{BE}$  and  $I_C$

此外,表征了不同温度下辐照前后模型中的载流子复合率变化量  $\Delta$ SRH。一般来说,发射极-基极的消耗区与基极的 SRH 载流子复合率可用公式 1 近似表示,式中  $R(y)$  为 EB 结附近的 SRH 载流子复合率, $n(y)$  和  $p(y)$  分别为电子和空穴浓度。

$$R(y) = \frac{n(y)p(y)}{\tau[n(y) + p(y)]} \quad (1)$$

辐照后在 EB 结附近产生更多的 G/R 陷阱中心,使得在 EB 结附近的载流子浓度增加。同时质子辐照对器件造成的位移损伤和电离损伤使得载流子寿命 ( $\tau$ ) 减小<sup>[28]</sup>。从而导致在质子辐照后 EB 结附近 SRH 载流子复合率增加。图 9 显示 SiGe HBTs 在辐照前后 SRH 载流子复合率变化量为正,验证了辐照使得 SRH 载流子复合率增加。此外,极端温度下 SRH 载流子变化量相对于在室温较小。解释了极端温度对质子辐照有抑制效果。

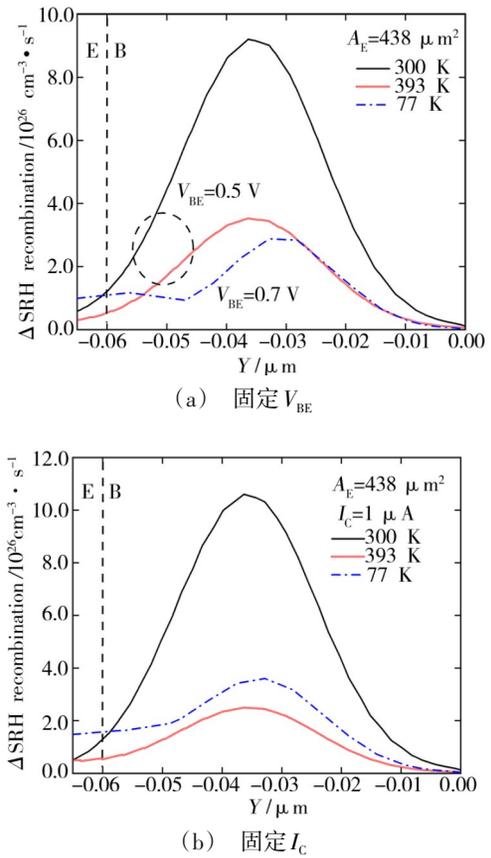


图 9 固定  $V_{BE}$  和  $I_C$ ,不同温度下 SiGe HBTs EB 结附近辐照前后 SRH 载流子复合率变化量

Fig. 9  $\Delta$  SRH recombination near the EB junction of the pre- and post-radiated SiGe HBTs at different temperature with fixed  $V_{BE}$  and  $I_C$

对于极端温度抑制辐照对 SiGe HBTs 的损伤原因:一方面在 77 K 下,晶格具有较小的热能,G/R 陷阱中心被冻结,因此在辐照后产生较少的陷阱<sup>[29]</sup>,从而辐照诱导产生的基极泄露电流更小。另一方面在 393K 下,较高的热能会产生更多的陷阱态,因此即使没有质子辐照也会产生更高的本征基极漏电流。结果表明,在极端温度下,质子辐照对 SiGe HBTs 的损伤

伤较小。

为了研究交流条件下,温度对质子辐照下的功率SiGe HBTs的内部物理机制的影响,基于该模型同样表征出不同温度下器件内部的电子迁移率变化量( $\Delta e\text{Mobility}$ )。温度升高导致电子密度升高,电子迁移率降低,因此, $G_{\text{max}}$ 变小。由图10得出结论:辐照前后SiGe HBTs内部电子迁移率变化量( $\Delta e\text{Mobility}$ )为负,表明辐照使得功率器件电子迁移率降低,器件交流特性退化。此外,与室温相比, $|\Delta e\text{Mobility}|$ 在极端温度下更小,揭示 $G_{\text{max}}$ 的退化更少。

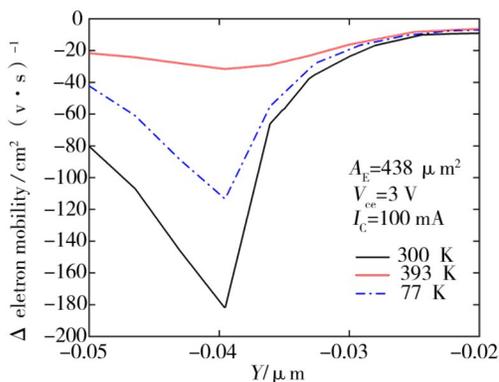


图10 不同温度下辐照前后SiGe HBTs载流子迁移率变化量  
Fig. 10  $\Delta e\text{Mobility}$  of the pre- and post-irradiated SiGe HBTs at different temperatures

综上所述,载流子迁移率是影响质子辐照SiGe HBTs交流性能的主要因素;与室温相比,极端温度可以相对抑制功率SiGe HBTs质子辐照损伤。

### 3 结论

研究了质子辐照下不同发射极面积的功率硅锗异质结双极晶体管(SiGe HBTs)在极端温度和室温下的直/交流特性,同时揭示了辐照影响功率SiGe HBTs的内部物理机制。研究结果表明:

(1)发射极面积越大,产生更高的泄露电流,质子辐照引起更多的 $I_b$ 和 $\beta$ 退化,性能退化越严重,说明SiGe HBTs功率器件比高速SiGe HBTs器件更容易受到辐照的影响;

(2)功率SiGe HBTs在极端温度下对质子辐照的耐受性优于室温;

(3)通过模型提取影响功率SiGe HBTs辐照特性的主要因素为载流子密度、Shockley-read-Hall(SRH)载流子复合率和载流子迁移率,研究了在辐照下器件的内部物理机制。

综上,SiGe HBTs具有良好的抗辐照特性,在极端环境下有很大的应用潜力。

### 参考文献

[1] 马羽,王志,宽崔伟. SiGe集成电路工艺技术现状及

发展趋势[J]. 微电子学,2018,48(04):508-514.

MA Y, WANG Z, KUAN C W. Current status and future trend of SiGe IC process technology[J]. Microelectronics, 2018, 48(04):508-514.

[2] 黄云波,李博,杨玲等. 极端低温下SiGe HBT器件研究进展[J]. 微电子学,2017,47(05):695-700.

HUANG Y B, LI B, YANG L, et al. Research progress of SiGe HBTs under extreme low temperatures [J]. Microelectronics, 2017, 47(05):695-700.

[3] CRESSLER J D. On the Potential of SiGe HBTs for extreme environment electronics [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(9):1559-1582.

[4] CRESSLER J D. SiGe HBT technology: a new contender for Si-based RF and microwave circuit applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(5): 572-589.

[5] NIU G, MA R, LUO L, et al. Wide temperature range SiGe HBT noise parameter modeling and LNA design for extreme environment electronics [J]. International Journal of Numerical Modelling, 2015, 28(6): 675-683.

[6] BABCOCK I A, CRESSLER J D, VEMPATI L S, et al. Ionizing radiation tolerance and low-frequency noise degradation in UHV/CVD SiGe HBT's [J]. IEEE Electron Device Letters, 1995, 16(8): 351-353.

[7] VOINIGESCU S P, SHOPOV S, BATEMAN J, et al. Silicon millimeter-wave terahertz and high-speed fiber-optic device and benchmark circuit scaling through the 2030 ITRS horizon [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(6): 1087-1104.

[8] ARUTT C N, WARREN K M, SCHRIMPF R D, et al. Proton irradiation as a screen for displacement-damage sensitivity in bipolar junction transistors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015, 62(6): 2498-2504.

[9] SOTSKOV D I, ELESIN V V, KUZNETSOV A G, et al. Displacement damage effects mitigation approach for heterojunction bipolar transistor frequency synthesizers [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, 67(11): 2396-2404.

[10] FLEETWOOD Z E, ILDEFONSO A, TZINTZAROV G N, et al. SiGe HBT profiles with enhanced inverse-mode operation and their impact on single-event transients [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(1): 399-406.

[11] ZHANG J X, GUO Q, GUO H X, et al. Impact of bias conditions on total ionizing dose effects of Co-60 gamma in SiGe HBT [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(2): 1251-1258.

[12] PETROSYANTS K O, KOZHUKHOV M V. Physical TCAD model for proton radiation effects in SiGe HBTs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(4): 2016-2021.

- [13] PRAVEEN K C, PUSHPA N, PRABAKARA Rao Y P, et al. Application of advanced 200 GHz Si-Ge HBTs for high dose radiation environments [J]. *Solid State Electronic*, 2010, 54(12): 1554-1560.
- [14] NAGATSUMA T, DUCOURNAU G, RENAUD C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 371-379.
- [15] ILDEFONSO A, COEN C T, FLEETWOOD Z E, et al. Utilizing SiGe HBT power detectors for sensing single-event transients in RF circuits [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2018, 65(1): 239-248.
- [16] LI Z, QI B K, ZHANG X H, et al. A 0.32-THz SiGe imaging array with polarization diversity [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(2): 215-223.
- [17] HOU L, DU Z W, FU J. The influence of microwave pulse width on the thermal burnout effect of an LNA constructed by the SiGe HBT [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 59(1): 163-171.
- [18] YE H P C, CHIOU H K, LEE C Y, et al. High power density, high efficiency 1W SiGe power HBT for 2.4 GHz power amplifier applications [J]. *Solid State Electronic* 2008, 52(5): 745-748.
- [19] LI X, XIAO J, LIU C, et al. Ionization damage in NPN transistors caused by lower energy electrons [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2010, 621(3): 701-712.
- [20] METCALFE J, DORFAN D E, GRILLO A A, et al. Evaluation of the radiation tolerance of several generations of SiGe heterojunction bipolar transistors under radiation exposure [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 2007, 579(2): 833-838.
- [21] QIN G X, MA J G, JIANG N Y, et al. Experimental characterization of proton radiated SiGe power HBTs at extreme temperatures [J]. *Journal of Circuits Systems and Computers*, 2013, 22(10): 1340026.
- [22] QIN G X, YAN Y, JIANG N Y, et al. RF characteristics of proton radiated large-area SiGe HBTs at extreme temperatures [J]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52(11): 2568-2571.
- [23] 李兴冀, 兰慕杰, 刘超铭等. 偏置条件对NPN及PNP双极晶体管电离辐射损伤的影响 [J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 098503.
- [24] LI X J, LAN M J, LIU C M, et al. Effects of bias conditions on ionizing radiation damage of NPN and PNP bipolar transistors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 579(2): 833-838.
- [25] CRESSLER J D. Radiation effects in SiGe technology [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 2013, 60(3): 1992 - 2014.
- [26] 郑玉展, 陆妩, 任迪远等. 不同发射极面积npn晶体管高低剂量率辐射损伤特性 [J]. *物理学报*, 2007, 58(8): 5572-5578.
- [27] ZHENG Y Z, LU W, REN D Y, et al. Radiation damage characteristics at high and low dose rates of NPN transistors with different emitter areas [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 58(8): 5572-5578.
- [28] CRESSLER J D. Silicon-Germanium as an enabling technology for extreme environment electronics [J]. *IEEE Trans. Device and Materials Reliability*, 2010, 10(4): 437-448.
- [29] <http://www.towerjazz.com>
- [30] BARNABY H J, SMITH S K, Schrimpf R D, et al. Analytical model for proton radiation effects in bipolar devices [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 49(6): 2643-2649.
- [31] SAKS N S, KLEIN R B, YOON S, et al. Formation of interface traps in metal-oxide-semiconductor devices during isochronal annealing after irradiation at 78 K [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 70(12): 7434-7442.