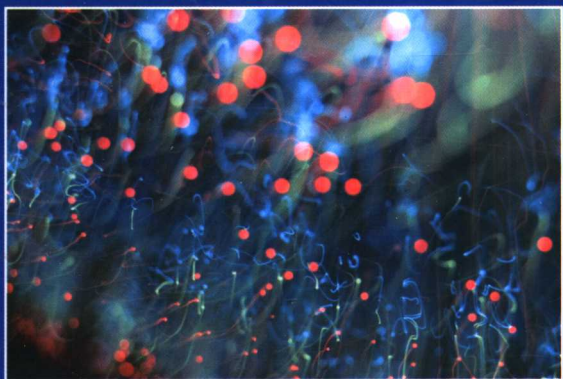


先进半导体材料及 器件的辐射效应

Radiation Effects in Advanced Semiconductor
Materials and Devices

(比) C. Claeys E. Simoen 著
刘忠立 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

TN30/5

2008

本书由总装备部装备科技丛书出版基金资助出版

先进半导体材料及 器件的辐射效应

Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices

(比) C. Claeys E. Simoen 著

刘忠立 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2007-035 号

图书在版编目(CIP)数据

先进半导体材料及器件的辐射效应/(比)克拉艾(Claeys, C.), (比)西蒙恩(Simoen, E.) 著; 刘忠立译. —北京:国防工业出版社, 2008. 3
书名原文: Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices
ISBN 978-7-118-05408-8

I. 先... II. ①克... ②西... ③刘... III. ①半导体材料-辐射效应
②半导体器件-辐射效应 IV. TN30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 165114 号

Translation from the English language edition:

Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices

by C. Claeys, and E. Simoen

Copyright © 2002 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Springer is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书中文版权由 Springer-Verlag Berlin Heidelberg 独家授予国防工业出版社出版发行。未经许可,不得以任何形式和手段复制或抄袭本书内容。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 13 1/8 字数 360 千字

2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 55.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

序

在空间应用中,采用先进商业微电子器件的趋势在不断增加。这种趋势,一方面是受所谓货架(COTS)即商用的器件和电路取代价格高昂的专用辐射加固器件和电路的推动,另一方面是由于硅工艺按比例缩小的原则栅介质越来越薄,它本身增加了永久损伤的辐射加固特性。另外,灵巧的或集成的传感器及微电子机械系统(MEMS),进一步促进了硅微电子学在空间以及像 CERN 这样的大型 π 介子对撞机等其他辐射环境中的应用。事实上,根据按比例缩小的原则,最终将形成各种工艺及新材料集成在同一个衬底上的系统芯片(SOC)。根据国际半导体技术发展蓝图(ITRS)的分析,按比例缩小的主要工艺(CMOS)需要采用优良的材料及加工步骤。例如,对于高速通信应用会越来越多地采用 SiGe 外延材料代替 III-V 族材料,也会采用优良的栅介质(高 K 材料)及互连材料(低 K 材料),对于存储器的应用,铁电材料引起人们更大的兴趣。器件隔离技术不再是 LOCOS(局部氧化)工艺,需要采用先进的浅槽隔离工艺。对于高速卫星通信及片上通信,光电子学的应用会增加。目前大部分光电子学的器件及系统主要采用直接带隙的 III-V 族材料,然而,硅基以及同硅兼容的光互连技术也正在积极探索中。卫星的能源采用质量轻、效率高的太阳电池。目前,Ge 衬底上的 GaAs 系统在卫星中的应用进展很快。未来的所谓纳卫星将推动先进微电子器件及系统的发展。

综上所述,尽管半导体工业的这些发展,主要并不是由空间应用或辐射加固推动的,但是对于潜在的辐射损伤问题应该有一个清晰的认识,即便是在早期技术时代的发展阶段也是这样。这不仅对于空间领域本身,而且对于加工工艺以及技术的发展都是有

益的。其理由是在器件和电路制造过程中,有较多的加工步骤是在可能产生辐射的环境中进行的。这样,对于辐射机理及造成损伤的基本认识,不仅对核及空间领域的工程师是有用的,而且对工艺工程师也是有帮助的。本书主要面向涉足该领域并希望在半导体材料及先进器件的辐射损伤方面有一个深入认识的研究人员。书中会扼要介绍一些基本概念,理解这些基本概念读者需要具备半导体器件物理以及它们同辐射相互作用的基本知识。本书对于未来的发展前景,以及必要的实验或模型方面的结果和存在的问题也作了介绍,这些内容即使是对本领域的专家,也是极有价值的。

本书包括9章,全书重点分析各种半导体材料及器件的辐射效应。第1章描述本书的来由以及简要讨论各种辐射环境,也给出了空间应用器件选择策略的知识。第2章的内容是半导体材料及器件的辐射损伤机理。对材料科学及器件物理有良好的基本知识,对于更好认识后面几章是重要的。第3章论述IV族半导体材料,如硅、锗及锗硅合金中位移损伤相关的知识,主要集中在对难懂的基本机理的理解上。此外还概括介绍了几种表征技术的潜力及问题。在后面的几章中,讨论这些材料的应用。由于GaAs在微电子学及光电子学中的重要性,第4章涉及的是GaAs。第5章评论双极技术的辐射相关问题,它包括纵向双极晶体管(BJT)、横向双极晶体管以及SiGe异质结双极晶体管(HBT)。正如第6章引言中所述,推动最小特征尺寸按比例缩小的主要技术基础是CMOS,第6章研究相关的辐射问题。包括的重要问题有超薄栅氧化物、基于氮化的氧化物及氮化物再氧化的氧化物等替代性的栅介质以及器件隔离。特别有一节涉及绝缘体上硅(SOI)CMOS技术,这种技术已不再局限于存储器市场,对于商业应用它也引起人们越来越多的兴趣。第7章描述基于GaAs的场效应晶体管,如MESFET、HEMT以及它们的辐射响应。第8章描述空间应用的光电子器件,重点是不同类型的器件,如发光二极管(LED)、激光二极管、光电探测器及光耦合器。由于本书的限制,不可能在一本书中将所有具有潜力的先进半导体器件都包括进来。因此,最后的

一章只简单地描述一些热门课题,如非易失存储器,用于 100nm 及更小尺寸 CMOS 的高 K 介质及 SiC,并且给出未来空间应用器件的前景展望。

因为该领域的进展非常之快,本书只能及时地给出当前的发展状态。由此,本书的目标不在于追求完整性,而是着重介绍应具备的物理基础,并且给出目前用于辐射环境中微电子半导体材料及器件类型的一个概括,重点放在未来空间应用极具潜力的一些有希望的技术上。多年来,世界上众多科学家及研究人员,在辐射领域中做了大量的讨论及评论,它极大地增加了作者们在这一方面的认识。首先我们要感谢所有过去及现在的 IMEC 的同事们,多年来同他们在辐射领域中进行了很多有启发性的讨论,也特别要感谢 ESTEC,它在过去的 15 年给予了辐射研究财政上的支持。本书大部分内容是同 L. Adams, B. Johlander, R. Harboe—Sørensen 及 A. Mohammadzadeh 讨论的一些结果。作者还要感谢 Kathleen Mertens 女士,本书的所有扫描图是由她完成的。

Cor Claeys

Eddy Simoen

Leuven, 2002 年 4 月

译者序

随着科学技术的发展,特别是随着核技术和空间技术的发展,越来越多的电子设备需要在各种辐射环境中应用。辐射同电子设备中的元器件相互作用,导致它们的电参数变化,严重时元器件完全失效,使电子设备不能正常工作。半导体材料及器件对辐射尤其敏感,为了保证电子设备在特定的辐射环境下能正常工作,必须对它们的辐射效应及辐射加固进行研究,由此,半导体材料及器件的辐射效应及辐射加固,一门结合半导体材料、器件及辐射物理的新学科应运而生。

半导体材料及器件辐射加固的要求,不只限于军事部门,在面临核战争随时可能发生的情况下,任何平常认为是非军事的重要电子设备,为了防范核辐射的损伤及破坏,也必须考虑所采用的半导体材料及器件的辐射加固。除此以外,在核反应堆及很多辐射相关的应用领域,本身已处在辐射环境中,半导体材料及器件的辐射加固,是自然的要求。随着科学技术的不断发展,对半导体材料及器件的辐射效应和辐射加固进行研究越来越显得重要。

我国在 20 世纪 60 年代末,已开始半导体材料及器件的辐射效应和辐射加固研究,80 年代中以来形成了一定的研究规模,近 20 年,在这一领域中取得了丰硕的研究成果。目前,我国在这一领域中已进入更为深入、更为广泛的研究阶段,迫切需要介绍世界范围内这一领域最先进的研究成果,本书的翻译出版将能满足这一要求。

本书的作者是国际著名微电子研究机构 IMEC 的 Cor Claeys 教授和 Eddy Simoen 博士,他们总结了国际先进半导体材料及器件辐射效应和辐射加固的最新研究成果。书中首先介绍辐射环

境、器件选择策略以及半导体材料和器件的基本辐射效应机理,在此基础上,介绍IV族半导体材料、GaAs材料、硅双极器件以及MOS器件的辐射损伤,接着介绍基于GaAs材料的辐射加固场效应晶体管及空间应用的光电子器件,最后对先进半导体材料及器件的应用前景进行展望。本书内容深入、广泛,很多研究成果是作者及其同事们亲自参加实践取得的,因此极具权威性。

本书特别强调辐射效应的基本物理,同时给出大量的实验结果,此外,本书对先进半导体材料及器件的辐射加固策略给出了具体的指导,因此具有很好的实用性。本书对我国从事半导体材料及器件辐射效应和辐射加固领域的研究和生产的广大科技人员、大学生和研究生,是一本极有价值的参考书。

本书的翻译出版得到郑厚植、夏建白两位院士的推荐,同时还获得国防工业出版社的资助;该社的江洪潮先生在本书的审批及定稿过程中,给予了很多的帮助;中国科学院半导体研究所的于芳研究员、宁瑾副研究员、王宁娟博士、高见头先生以及亢亚萍女士,在整理和打印译稿的过程中做了大量的工作,对此我一并表示感谢。

由于时间比较仓促,本书虽经反复审校,一定还会有不妥之处,恳请读者批评指正。

刘忠立

中国科学院半导体研究所

目 录

符号表	1
希腊符号表	9
第 1 章 辐射环境及器件选择策略	12
1.1 引言	12
1.2 辐射环境	12
1.2.1 空间环境	13
1.2.2 高能物理实验	15
1.2.3 核环境	15
1.2.4 天然环境	16
1.2.5 加工工艺引入的辐射	17
1.3 器件选择策略	17
1.4 小结	19
第 2 章 半导体材料及器件的基本辐射损伤机理	20
2.1 引言	20
2.2 基本损伤机理	20
2.2.1 计量单位	21
2.2.2 电离损伤	21
2.2.3 位移损伤	23
2.3 辐射损伤对器件特性的影响	30
2.3.1 电离损伤	31
2.3.2 位移损伤	39
2.4 微观辐射损伤的谱学研究	47
2.4.1 电子顺磁共振 (EPR)	48

2.4.2	深能级瞬态谱(DLTS)	53
2.4.3	光致发光谱(PL)	60
2.5	小结	62
第3章	IV族半导体材料中的位移损伤	64
3.1	引言	64
3.2	硅的位移损伤	65
3.2.1	硅的辐射缺陷	65
3.2.2	辐射缺陷对硅器件的影响	73
3.2.3	衬底及器件的加固	77
3.2.4	硅辐射缺陷的小结	81
3.3	锗的位移损伤	82
3.3.1	Ge的潜在应用	83
3.3.2	Ge的低温辐照	84
3.3.3	Ge的室温辐照	85
3.3.4	辐射损伤对Ge材料及器件的影响	88
3.3.5	Ge辐射缺陷的小结	89
3.4	SiGe合金的位移损伤	89
3.4.1	SiGe材料的性质及应用	90
3.4.2	SiGe的辐射损伤	96
3.4.3	SiGe加工工艺引入的辐射损伤	108
3.4.4	SiGe器件的辐射损伤	118
3.4.5	SiGe合金辐射损伤小结	120
3.5	IV族半导体总的小结	121
第4章	GaAs的辐射损伤	123
4.1	引言	123
4.2	基本符号及定义	124
4.3	GaAs中原生的及辐射引入的点缺陷	126
4.3.1	GaAs中的原生点缺陷	126
4.3.2	GaAs中的基本辐射缺陷	129
4.3.3	GaAs中中子及离子引入的辐射缺陷	135

4.3.4	GaAs 中加工工艺引入的辐射缺陷	137
4.3.5	GaAs 辐射缺陷小结	142
4.4	损伤因子及 NIEL	143
4.4.1	GaAs 中载流子去除及迁移率退化	143
4.4.2	电阻损伤因子同 NIEL 之间的关系	147
4.4.3	寿命损伤因子及 NIEL	149
4.4.4	同微观损伤的相关性	151
4.4.5	GaAs 中损伤因子及 NIEL 的小结	153
4.5	对 GaAs 器件的影响	154
4.5.1	肖特基势垒及辐射探测器	154
4.5.2	GaAs 太阳电池	155
4.6	总的小结	159
第 5 章	硅双极工艺的空间辐射效应	160
5.1	引言	160
5.2	器件结构及基本辐射效应	160
5.2.1	器件结构及定义	161
5.2.2	辐射损伤机理	162
5.3	纵向 (n-p-n) BJT 的退化	164
5.3.1	总剂量损伤的表象	164
5.3.2	基本的低剂量率退化机理	169
5.3.3	BJT 中的电荷分离	172
5.3.4	纵向 BJT 的加固指南	177
5.3.5	加固保证及实验	178
5.3.6	纵向晶体管中的体损伤	178
5.4	横向晶体管的退化	181
5.4.1	表象	182
5.4.2	物理机理及模型	184
5.5	SiGe HBT 的退化	186
5.5.1	静态及低频噪声特性的退化	187
5.5.2	RF 特性的退化	192

5.6	小结	194
第6章	硅 MOS 器件的辐射损伤	195
6.1	引言	195
6.2	按比例缩小对辐射响应的影响	196
6.2.1	栅长关系	197
6.2.2	横向非均匀损伤	201
6.2.3	栅感应漏电电流 (GIDL)	204
6.3	加工工艺引入的辐射损伤效应	206
6.3.1	等离子损伤	207
6.3.2	快速热退火 (RTA)	207
6.3.3	栅材料及接触	212
6.4	替代性的栅介质	214
6.4.1	掺杂的氧化物	214
6.4.2	氮化的氧化物 (NO) 及氮化物再氧化的 氧化物 (RNO)	215
6.4.3	N_2O (笑气) 氧化物	228
6.5	超薄氧化物	230
6.5.1	辐射诱导漏电电流 (RILC)	230
6.5.2	辐射引入的软击穿 (RSB)	236
6.5.3	单次事件栅的捕获	238
6.5.4	辐照的薄氧化物可靠性	238
6.5.5	小结	239
6.6	器件隔离	240
6.6.1	LOCOS 隔离	240
6.6.2	浅槽隔离	243
6.7	绝缘体上硅 CMOS 工艺	245
6.7.1	蓝宝石上硅 (SOS)	246
6.7.2	绝缘体上硅 (SOI) 工艺	249
6.7.3	SOI 工艺的辐射加固	252
6.8	小结	256

第 7 章 基于 GaAs 的辐射加固场效应晶体管	258
7.1 引言	258
7.2 材料相关问题、器件结构及工作	258
7.2.1 AlGaAs 层中的缺陷	259
7.2.2 MESFET 结构及工作	259
7.2.3 HEMT 结构及工作	262
7.3 GaAs MESFET 中的辐射损伤及加固	264
7.3.1 基本的 FET 参数退化	265
7.3.2 低频噪声及同缺陷有关的效应	271
7.3.3 同电路有关的退化	275
7.4 HEMT 中的辐射损伤及加固	278
7.4.1 基本参数的退化	278
7.4.2 低能电子对 2-DEG 性质的影响	288
7.4.3 电路退化问题	290
7.5 小结	291
第 8 章 用于空间的光电子器件	292
8.1 引言	292
8.2 光电子器件	292
8.2.1 发光二极管(LED)及激光二极管(LD)	292
8.2.2 光探测器	298
8.2.3 光耦合器	299
8.3 基本的辐射效应及材料问题	300
8.3.1 辐射对光电材料性质的影响	300
8.3.2 三元化合物中的辐射缺陷及材料问题	312
8.3.3 损伤因子及 NIEL	318
8.4 光电子器件的辐射效应	321
8.4.1 发光二极管及激光二极管	322
8.4.2 光探测器	330
8.4.3 光耦合器	336
8.5 小结	339

第9章 先进半导体材料及器件的前景展望	340
9.1 引言	340
9.2 非易失存储器	341
9.2.1 闪烁存储器	341
9.2.2 铁电存储器(FeRAM)	344
9.2.3 小结	345
9.3 高K栅介质	346
9.4 SiC的辐射效应	349
9.4.1 SiC材料的性质及分析	349
9.4.2 SiC中的本征缺陷及辐射缺陷	352
9.4.3 SiC器件中的宏观损伤	357
9.4.4 SiC MOSFET及MESFET的电离损伤	358
9.4.5 小结	360
9.5 结论及前景展望	360
参考文献	362

符 号 表

A	器件面积(cm^2)
A_E	双极晶体管发射极面积(μm^2)
A_{EX}	双极晶体管非本征基极面积(μm^2)
a_n	载流子去除率常数(cm^2)
a_o	晶格常数($\text{\AA}$)
b_c	跳跃电导率参数($\text{K}^{1/4}$)
b_h	空陷俘获产额(cm^{-3})
b_μ	迁移率退化损伤常数(cm^2)
c	光速($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
C	电容(F)
C_{CB}	基极 - 集电极电容(pF)
c_n	电子捕获率(cm^3/s)
c_p	空穴捕获率(cm^3/s)
C_{ox}	单位面积氧化物电容(F/cm^2)
D	剂量(rad or Gray)
D^*	光探测器响应(A/W)
D_h	空穴扩散率(cm^2/s)
D_H	2 维电子气态密度($\text{cm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$)
D_I	自间隙 I 的扩散率(cm^2/s)
D_{it}	界面态密度($\text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)
D_n	电子扩散率(cm^2/s)
d_n	MESFET 的沟道深度(nm)
D_{ot}	氧化物陷阱密度($\text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

D_p	空穴扩散率(cm^2/s)
d_s	HEMT 的隔离层厚度(nm)
D_{th}	注入隔离的阈值注入剂量(cm^{-2})
dE/dx	阻止能力($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$)
E	粒子能量(keV, MeV)
E_c	导带最小值(eV)
E_d	原子位移阈值能量(eV)
E_e	量子阱的束缚能量(meV)
E_{eh}	电子 - 空穴对的电离阈值(eV)
E_F	费密能量(eV)
E_{fc}	群的形成能量(eV)
E_G	带隙(eV)
E_h	量子阱的重空穴束缚能量(meV)
E_i	本征能级(eV)
E_{ion}	电离能(keV)
E_m	发射至靶核的最大能量(keV)
e_{max}	发射率窗口(DLTS) (s^{-1})
E_{ph}	声子能量(keV, MeV)
E_r	平均反冲能量(eV)
E_T	陷阱能级(eV)
E_v	价带最大值(eV)
E_x	自由激子束缚能量(eV)
F	电场(V/cm)
FF	太阳电池的填充系数
F_{crit}	单次事件栅氧化物捕获的临界电场(V/cm)
F_i	异质结 FET 界面处电场(V/cm)
F_k	辐射诱导漏电电流的临界栅氧化物电场(V/cm)
$f_m(x)$	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的失配参数
f_{max}	最高振稳频率(GHz)
F_{ox}	氧化物电场(V/cm)

f_y	空穴产额
f_T	截止频率(GHz)
g	兼并因子
g_0	自由电子的 g 因子(2.002319)
G_{chan}	MOSFET 的沟道电导(S)
g_d	FET 的沟道电导(S)
G_{HO}	MESFET 漏电流的适配参数(V^{-1})
g_{ij}	自旋 2 阶张量
g_m	FET 的跨导 $\partial I_D / \partial V_{\text{GS}}$ (S)
GN_{EX}	双极晶体管的 Gummel 数(s/cm^4)
CN_{IN}	双极晶体管的本质 Gummel 数(s/cm^4)
$\hbar$	普朗克常数($-6.62617 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
h	约化的普朗克常数 $\hbar/2\pi$ ($= 1.05458 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
H	磁场
H	磁场的大小(G)
h_c	外延层的临界厚度(nm)
i_o	卫星轨道相对于地球轴的倾斜角度(度)
I_B	双极晶体管的基极电流(A)
I_{bias}	LD 及 LED 的工作电流(mA)
I_C	双极晶体管的集电极电流(A)
I_D	漏电流或沟道电流(A)
I_{Do}	光电二极管的暗电流(A)
I_{DSAT}	FET 的饱和漏电流(A)
I_e	由于辐射诱导漏电电流产生的过剩栅电流(A)
I_F	正向电流(A)
I_G	栅电流(A)
I_{Lo}	光电二极管的光电流(A)
I_{mg}	中带电流(A)
I_N	核的磁矩(矢量)
I_{op}	激光器或发光二极管的工作电流(mA)