

研究生教育书系
电子科学与技术学科

化合物半导体器件

Compound Semiconductor Devices

吕红亮
张玉明
张义门

编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

研究生教育书系
电子科学与技术学科

化合物半导体器件

吕红亮 张玉明 张义门 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了化合物半导体物理的基础知识和原理。全书共 8 章,主要内容为:半导体器件物理的基础内容、化合物半导体材料及其基本电学特性;化合物半导体器件的种类及其特性,包括双极型器件、异质结器件、场效应器件、量子效应、热电子器件和光电子器件;宽禁带半导体材料与器件。

本书可作为高等学校微电子学,集成电路设计及相关专业研究生和本科高年级学生化合物半导体材料和器件课程的教材;也可作为从事化合物半导体材料或器件分析的科研和工程技术人员的参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

化合物半导体器件/吕红亮,张玉明,张义门编著.北京:电子工业出版社,2009.5
研究生教育书系·电子科学与技术学科

ISBN 978-7-121-08640-3

I. 化… II. ①吕…②张…③张… III. 化合物半导体—半导体器件—高等学校—教材 IV. TN304.2
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 057041 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京机工印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:11 字数:216 千字

印 次:2009 年 5 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:20.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

编写本书的目的是为高等学校学生提供一本学习和掌握化合物半导体材料与器件原理的教材。本书是在为西安电子科技大学微电子学院讲授“化合物半导体器件”课程而编写的讲义的基础上,参照全国各高等院校电子科学与技术、微电子学专业相关教学大纲,由多年从事教学和科研的一线教师编写而成。

本书在内容取材及安排上具有以下特点:

(1) 在物理基础内容部分,与学生先期所掌握的相关半导体物理基础知识紧密联系,一脉相承,介绍了化合物半导体材料与器件特性的基本概念、基本理论和分析方法,培养学生具有举一反三的能力;

(2) 在介绍主体内容时,重点突出、深入浅出、简明扼要、易于掌握;

(3) 采用国际通用的图形符号、名词与术语,图文并茂、直观明了。

全书共 8 章,主要内容为:半导体器件物理的基础内容、化合物半导体材料及其基本电学特性;化合物半导体器件的原理及其特性,包括双极型器件、异质结器件、场效应器件、量子效应、热电子器件和光电子器件;宽禁带半导体材料与器件。每章配有深浅度适中的思考题,供读者练习。

本书可作为高等学校微电子学,集成电路设计及相关专业研究生和本科高年级学生化合物半导体材料和器件课程的教材;也可作为从事化合物半导体材料或器件分析的科研和工程技术人员的参考。

本书经西安电子科技大学微电子学院教学管理工作委员会审定,已被列为本科生教材和研究生的教学参考书。

本书承蒙西安理工大学陈治明教授审稿,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。西安电子科技大学张韬在整理稿件中给予我们很多帮助,电子工业出版社陈晓莉编审对本书的出版给予大力协助,在此一并表示深切的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点和错漏,殷切希望广大读者批评指正。

编 者
2009 年 2 月

主要参数符号表

A^*	有效理查逊常数
a	晶格常数
B	磁感应强度
B	晶体管基极
C	电容
C	晶体管集电极
C_{gd}	MESFET 漏栅之间的肖特基结势垒电容
C_{gs}	MESFET 源栅之间的肖特基结势垒电容
D	(1)电位移;(2)双极扩散系数
D	场效应晶体管漏极
E	(1)电子能量;(2)电场强度
E	晶体管发射极
E_A	受主能级
E_c	导带底能量
ΔE_c	异质界面导带突变量
E_D	施主能级
E_F	费米能级
E_{Fm}	金属一侧费米能级
E_{Fs}	半导体一侧费米能级
E_g	禁带宽度
E_i	(1)本征费米能级;(2)禁带中部位置
E_v	价带顶能量
ΔE_v	异质界面导带突变量
E_0	真空电子静止能量
F_{min}	最小噪声系数
f_T	特征频率
f_{max}	最大振荡频率
G	(1)载流子净产生率;(2)光电导增益因子
G	场效应晶体管栅极
g	(1)基态简并度;(2)激光增益系数

$g(E)$	状态密度
g_m	跨导
H	磁场强度
h	普朗克常数
$\hbar$	$h/2\pi$
I	(1)电流;(2)发光强度
I_B	晶体管基极电流
I_C	晶体管集电极电流
I_D	漏极电流
I_{Dsat}	漏极饱和电流
I_E	晶体管发射极电流
I_F	正向电流
I_L	光生电流
I_p	峰值电流
I_R	反向电流
I_r	复合电流
I_s	反向饱和电流
I_v	谷值电流
J	电流密度
J_F	正向电流密度
J_n	电子电流密度
J_p	空穴电流密度
J_R	反向电流密度
J_r	复合电流密度
J_s	反向饱和电流密度
k	(1)波矢量;(2)玻耳兹曼常数
L_D	德拜长度
L_n	电子扩散长度
L_p	空穴扩散长度
l	平均自由程
m_0	电子惯性质量
m^*	有效质量
m_n^*	电子有效质量
m_p^*	空穴有效质量
N_A	受主浓度

N_c	导带有效态密度
N_D	施主浓度
N_v	价带有效态密度
N_{SS}	异质界面悬挂键数目
n	(1)电子浓度;(2)折射率;(3)理想因子
n_0	平均电子浓度
Δn	非平衡电子浓度
n_D	中性施主浓度
n_i	本征载流子浓度
n_p	p 型电子浓度
n_{p0}	p 型平衡电子浓度
n_s	表面载流子浓度
P_o	光学波散射概率
P_s	晶格散射概率
p	(1)空穴浓度;(2)动量
p_0	平衡空穴浓度
Δp	非平衡空穴浓度
p_A	中性受主浓度
p_{n0}	n 型平衡空穴浓度
p_p	p 型空穴浓度
p_{p0}	p 型平衡空穴浓度
Q	(1)光生载流子产生率;(2)电荷面密度
Q_s	表面电荷面密度
q	电子电量
qV_D	势垒高度
$q\phi_B$	金半接触中金属一侧的势垒高度
R	(1)电阻;(2)反射系数;(3)符合率
R_{ds}	MESFET 跨接在漏和源之间的微分电阻
R_i	MESFET 等效沟道电阻
s	(1)截面积;(2)表面复合速度
S	场效应晶体管栅极
T	(1)温度;(2)透射概率
t	时间
U	(1)非平衡载流子复合率;(2)单向化增益
V	(1)电压;(2)电势

V_{BR}	击穿电压
V_D	内建电势差
V_{Dsat}	场效应晶体管饱和漏电压
V_s	表面势
V_p	夹断电压
V_T	阈值电压
v_{sat}	饱和漂移速度
v_{th}	电子热运动速度
W	功函数
W_B	基区宽度
W_E	发射区宽度
W_m	金属功函数
W_s	半导体功函数
x_j	pn 结结深
x_d	耗尽区宽度
α	(1)吸收系数;(2)晶体管基区输运系数
β	(1)压缩系数;(2)晶体管放大系数
γ	(1)注入比;(2)晶体管发射结注入效率
δ	$E_c - E_F$, 或 $E_F - E_v$
ϵ	介电常数
ϵ_s	半导体相对介电常数
ϵ_0	真空介电常数
μ	迁移率
μ_0	低场迁移率
μ_I	杂质散射所造成的迁移率
μ_L	晶格散射所造成的迁移率
μ_n	电子迁移率
μ_p	空穴迁移率
ρ	(1)电阻率;(2)电荷体密度
ρ_i	本征电阻率
ρ_n	n 型电阻率
ρ_p	p 型电阻率
σ	(1)电导率;(2)俘获截面
σ_i	本征电导率
σ_n	n 型电导率

σ_p	p 型电导率
τ	(1)平均自由时间;(2)寿命
τ_b	晶体管基区少子渡越时间
τ_c	晶体管集电结电容充电时间
τ_d	晶体管集电结耗尽层渡越时间
τ_e	晶体管发射结电容充电时间
τ_{ec}	晶体管延迟时间
τ_n	电子寿命
τ_p	空穴寿命
η	效率
λ	(1)波长;(2)沟道调制系数
χ	电子亲和能
ω	角频率
$\psi(x)$	波函数
$\phi(x)$	功函数

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 历史和动态	1
1.2 内容安排和说明	4
参考文献	4
第 2 章 化合物半导体材料与器件基础	6
2.1 半导体材料的分类	6
2.1.1 元素半导体	8
2.1.2 化合物半导体	8
2.1.3 半导体固溶体	10
2.2 化合物半导体材料特性	10
2.2.1 晶格结构	10
2.2.2 晶体的化学键和极化	13
2.2.3 能带结构	14
2.2.4 施主和受主能级	19
2.2.5 迁移率	21
2.3 化合物半导体器件的发展方向	24
思考题	25
参考文献	25
第 3 章 半导体异质结	26
3.1 异质结及其能带图	26
3.1.1 异质结的形成	26
3.1.2 异质结的能带图	28
3.2 异型异质结的电学特性	32
3.2.1 突变异质结的伏安特性和注入特性	33
3.2.2 界面态的影响	35
3.2.3 异质结的超注入现象	37
3.3 量子阱与二维电子气	38
3.3.1 二维电子气的形成及能态	38
3.3.2 二维电子气的态密度	40
3.4 多量子阱与超晶格	42

思考题	45
参考文献	46
第4章 异质结双极晶体管	47
4.1 HBT 的基本结构	47
4.1.1 基本的 HBT 结构	48
4.1.2 突变结和组分渐变异质结	48
4.2 HBT 的增益	50
4.2.1 理想 HBT 的增益	50
4.2.2 考虑界面复合后 HBT 的增益	51
4.2.3 HBT 增益与温度的关系	53
4.3 HBT 的频率特性	55
4.3.1 最大振荡频率	55
4.3.2 开关时间	55
4.3.3 宽带隙集电区	57
4.4 先进的 HBT	57
4.4.1 Si-SiGeHBT	57
4.4.2 III-V 族化合物基 HBT	60
思考题	63
参考文献	63
第5章 化合物半导体场效应晶体管	65
5.1 金属半导体肖特基接触	65
5.1.1 能带结构	65
5.1.2 基本模型	68
5.2 金属半导体场效应晶体管(MESFET)	73
5.2.1 MESFET 器件结构	73
5.2.2 工作原理	74
5.2.3 电流—电压特性	76
5.2.4 负阻效应与高场畴	78
5.2.5 高频特性	80
5.2.6 噪声理论	82
5.2.7 功率特性	83
5.3 调制掺杂场效应晶体管	86
5.3.1 调制掺杂结构	87
5.3.2 基本原理	87
5.3.3 电流—电压特性	89

思考题	90
参考文献	91
第 6 章 量子器件与热电子器件	92
6.1 隧道二极管	92
6.1.1 穿透系数	92
6.1.2 电流—电压特性	93
6.2 共振隧道二极管(Resonant Tunneling Diode, RTD)	96
6.2.1 谐振隧穿结构	96
6.2.2 谐振隧道二极管电流—电压特性	97
6.3 热电子器件	99
6.3.1 热电子异质结双极晶体管	100
6.3.2 实空间转移晶体管(realspacetransfertransistor)	100
6.3.3 隧穿热电子晶体管	104
思考题	105
参考文献	105
第 7 章 半导体光电子器件	107
7.1 半导体的光学性质	107
7.1.1 光的本质	107
7.1.2 辐射跃迁	108
7.1.3 光的吸收	109
7.1.4 光伏效应	110
7.2 太阳能电池	111
7.2.1 pn 结光电池的电流—电压特性	111
7.2.2 pn 结光电池的等效电路	114
7.2.3 转换效率	114
7.2.4 砷化镓太阳能电池	117
7.2.5 II-VI 族化合物太阳能电池	118
7.2.6 铜铟硒太阳能电池	119
7.3 光电探测器件	120
7.3.1 光敏电阻	121
7.3.2 光电二极管	124
7.4 发光二极管和半导体激光器	129
7.4.1 可见光发光二极管	130
7.4.2 红外发光二极管	135
7.4.3 半导体激光器	136

思考题	145
参考文献	145
第 8 章 宽带隙化合物半导体器件	146
8.1 宽带隙半导体材料基本特性	146
8.2 碳化硅器件及其应用	147
8.2.1 碳化硅微波功率器件	147
8.2.2 碳化硅功率器件	150
8.2.3 碳化硅探测器件	151
8.3 GaN 器件及其应用 ^{[7][8][9]}	153
8.3.1 GaN 微波功率器件	153
8.3.2 GaN 基光电器件	154
8.3.3 其他 GaN 基电子器件	157
8.4 其他宽禁带半导体器件	158
8.4.1 单光子器件	158
8.4.2 宽禁带半导体纳米结构器件	159
8.4.3 基于 GaN 的子带间跃迁光开关	159
8.4.4 氮化物光催化剂	160
思考题	160
参考文献	160

第 1 章 绪 论

1.1 历史和动态

自 1998 年以来,电子工业已经超过汽车工业,成为世界上规模最大的工业。而半导体工业正是支撑电子工业的基础。从 1874 年 Braun 发现金属—半导体接触的电流传导非对称性,到晶体管作为 20 世纪最重要的发明之一而取代真空电子管,半导体器件电子学这一学科(Semiconductor Devices Electronics)逐渐形成,并日益发挥其重要作用。

今天的信息技术主要依赖于低成本、高速度、高压缩和高可靠的信息电子化。随着半导体技术的不断发展,以微电子工业为主体的各种高新技术产品的功能日臻完善,应用领域越来越广。半导体分立器件及集成电路已经覆盖了诸如微波、功率、光电等应用领域,并逐步成为主流。随着这些应用领域的不断拓展,以硅材料为主的元素半导体不再一枝独秀,化合物半导体技术逐渐成为人们关注的焦点。这与化合物半导体材料的性质密切相关。

在微波应用领域,随着信号频段的不断增高,要求半导体具有更高的载流子漂移速度,而硅的电子饱和漂移速度远远不能满足这一要求,具有更高载流子饱和漂移速度的化合物半导体材料,如 GaN、SiC、GaAs 等(图 1.1)随之应运而生。在过去的几十年中,固态微波领域出现的最令人鼓舞的器件是采用 III-V 族化合物制成的微波场效应晶体管^[2]。这种器件的工作频率远远超过 40GHz。目前,低噪声放大器、混频器、振荡器、功率放大器、开关和乘法器均已完全采用化合物半导体器

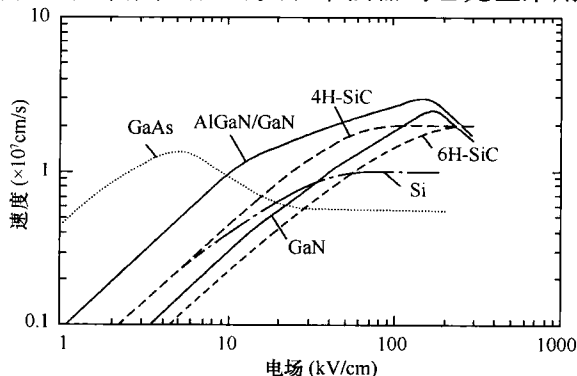


图 1.1 化合物半导体中电子的速场关系^[1]

件。也正是由于化合物器件的灵活、可靠,才促使许多微波系统的性能达到目前的水平。在此基础上研制的高电子迁移率晶体管(HEMT),利用二维电子气的高速性能使微波器件的频段得到进一步的提高^[3]。图 1.2 显示了化合物半导体器件在微波应用领域的优势^[4]。继 GaAs 等第二代半导体之后,以 SiC 和 GaN 为代表的第三代宽禁带半导体更是在微波功率领域表现出极大的潜力。图中同时给出了这类器件目前的状况。

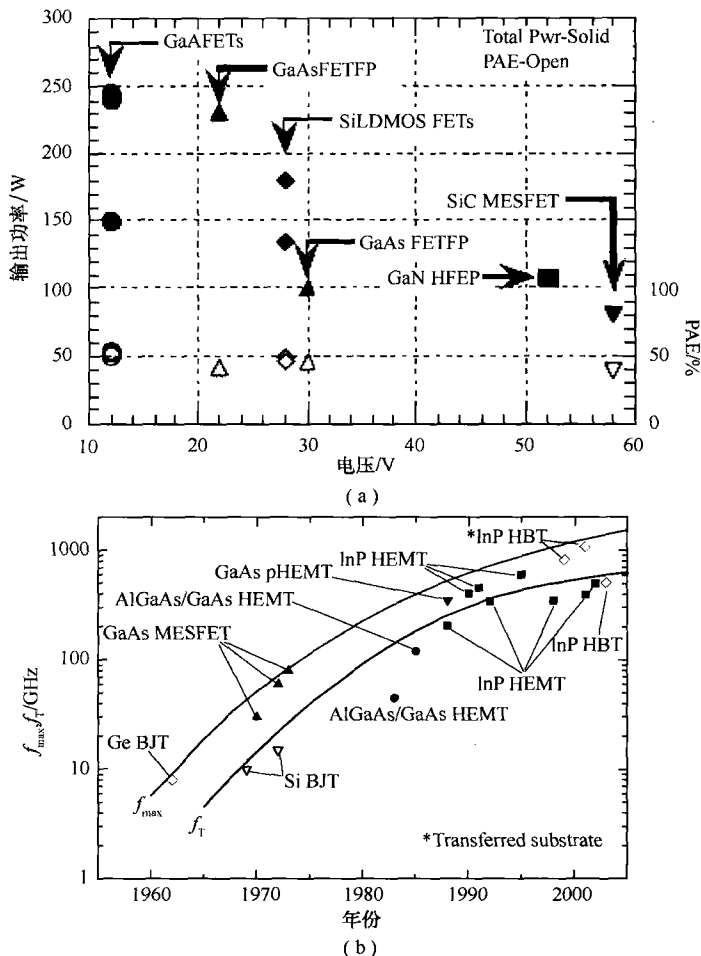
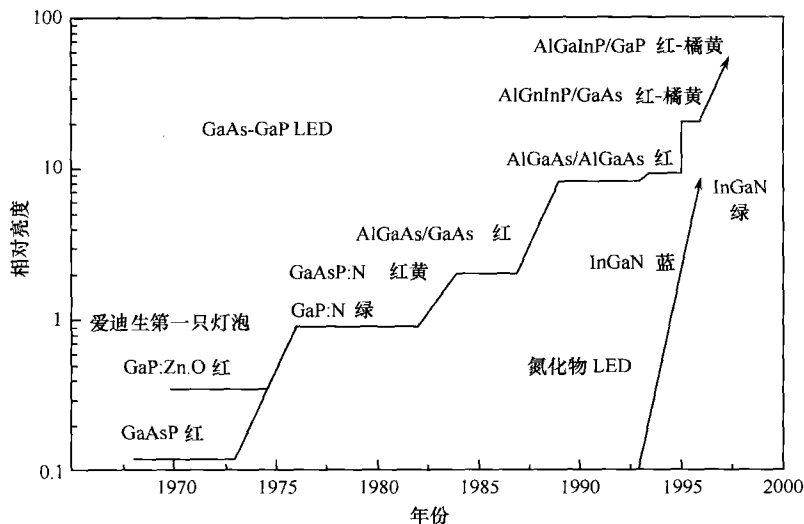


图 1.2 化合物半导体器件在微波应用领域的优势

半导体光电子技术主要包含发光技术、光敏感技术和太阳能电池技术三个方面。由于材料本身的限制,硅在发光器件、紫外和红外探测器件、光调制器等方面的应用都很有限。而化合物半导体则为这些器件的研制提供了更大的选择余地。20 世纪 60 年代, GaAs 技术在半导体激光器和发光二极管方面得到应用,器件性

能迅速提高。70 年代初期制成了第一块效率接近 20% 的太阳能电池^[5]。GaAs 太阳能电池的最高效率始终比硅太阳能电池的最高效率高 3%~10%。以 GaAs 和 InP 材料为主制成的光电子单片集成电路(OEIC),包括光电子逻辑、光开关和光电信号存储等多种全新功能,具有强大的信号处理能力,应用于光通信和光计算机领域可以达到很高的响应速度。图 1.3 显示了半导体发光二极管在 20 世纪发展历程的一个大致记录。



20 世纪 60 年代末,半导体异质结,特别是量子阱和超晶格在半导体器件结构中的应用取得很大进展^[6,7]。随后,几乎所有半导体器件的新进展都与异质结相关,如负阻场效应晶体管^[8],共振隧穿场效应晶体管^[9]等。异质结器件的性能主要取决于界面的晶格匹配程度和能带断续的控制。在这方面,化合物半导体有着天然的优势。由于其种类繁多,而且很多固溶体(或称混晶)的禁带宽度可以在很大范围内调节,因此化合物半导体能满足不同器件对各种禁带宽度的要求。

化合物半导体器件的工艺进展也经历了几次重大的发展。早在半导体器件研究初期,化合物半导体器件就进入人们的视野。但是当时的材料生长与工艺技术很不完善,无法满足器件制造的需要。在化合物半导体材料的制备中,不同元素组分比的控制就存在很大问题,这给材料的提纯和单晶制备带来很多困难。此外,采用不同化合物半导体材料的器件之间的工艺兼容性较差,且化合物半导体表面处理比较复杂。这些都是在半导体器件和电路发展过程中需要解决的问题。

化合物半导体材料制备技术直至 20 世纪 70 年代才取得突破性的进展。随着液相外延(LPE)、气相外延(VPE)、金属有机物化学气相沉积(MOCVD)和分子束外延(MBE)等先进的材料生长方法相继涌现,化合物半导体器件的材料生长日趋

完善,器件性能也突飞猛进地提高。分子束外延是其中的佼佼者,利用该技术生长的材料不仅界面完整,而且材料的组分、掺杂、各层厚度都能在原子量级的范围内精确控制。

1.2 内容安排和说明

目前,有两类关于化合物半导体器件的著作:一类是由理论研究人员撰写的器件物理方面的经典著作,注重器件理论模型,但往往弱化了化合物半导体材料制备和器件工艺的问题;另一类著作从新型器件的实验和器件工艺出发,所涉及的理论模型一般较为简单。从理论分析和工程实际的完整性考量,两者都不适合作为教材。

本书的作者通过总结自己的工作,结合电子工业发展的最新现状,系统、全面地介绍了化合物半导体器件最前沿的研究和发展,从理论模型和工艺实验两个方面阐述了多种器件的工作机理和发展现状。除了器件的工作原理,作者还对半导体材料的基础研究及其对器件的影响等方面做了较详细的阐述。

第1章为绪论,简要介绍了化合物半导体的历史和发展。

第2章介绍了半导体器件物理的基础内容、化合物半导体材料及其基本电学特性。系统的介绍了半导体材料与器件物理相关的一些基本概念,包括晶格结构、能带理论、有效质量近似,以及电子能态密度等。

第3章至第7章系统地讲述了几种重要的化合物半导体器件及其特性。从基本的异质结和肖特基二极管出发,讨论了双极型器件和场效应器件,最后讨论量子效应、热电子器件和光电子器件。

第8章结合我们研究团队的成果,以 SiC 和 GaN 微波功率器件和光电器件为主,特别介绍了近年来的研究热点——宽禁带半导体材料与器件。

本书可作为高等学校微电子学、集成电路设计及相关专业的研究生和本科高年级学生“化合物半导体材料和器件”课程的教材;也可作为从事化合物半导体材料或器件分析的科研和工程技术人员的参考。各章后配有思考题,可供读者选做。

参 考 文 献

- [1] R. J. Trew, Proceedings of the IEEE, 2002, 90(6):1032-1048.
- [2] C. A. Mead, Proceedings of the IEEE, 1966, 54:307.
- [3] N. C. Cirillo, et al., Proc. 43rd Ann. Device Research Conf. Boulder, 1985, IIA-7.
- [4] C. E. Weitzel, Microwave Magazine, 2000, 1(1):64.