

绿色微纳电子学

王阳元 主编



科学出版社
www.sciencep.com

绿色微纳电子学

王阳元 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书首先提出了“绿色微纳电子学”的概念,并分别从能源经济、社会文化、低功耗集成电路设计、绿色集成电路芯片制造、绿色电子封装、微纳电子新器件结构、绿色存储器的发展和集成微纳系统(M/NEMS)等各个角度对绿色微纳电子学进行了阐述,介绍了在这些方面国内外学术界和工业界的最新进展;此外,还从新能源的应用角度,对半导体绿色照明光源、薄膜太阳能电池等有关领域的发展进行了学术探讨。

本书可作为高等院校信息技术及微纳电子专业师生的参考书,也可供相关领域的技术人员、科研人员、科研管理人员和政府公务员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

绿色微纳电子学/王阳元主编. —北京:科学出版社,2010.7

ISBN 978-7-03-027950-7

I. 绿… II. 王… III. 无污染技术-应用-微电子技术-电子学
IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 111105 号

责任编辑:杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:戴海燕

北京东方科龙图文有限公司制作

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

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 7 月第一次印刷 印张: 41 1/4 插页: 1

印数: 1—3 000 字数: 847 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

主编的话

我想为《绿色微纳电子学》的出版写一段话,主要说明三个问题:

- 一、为什么要编写这本书?
- 二、这本书是以什么方式编写的?
- 三、后续于此书的出版还想做什么?

为什么要编写这样一本书?

我们知道,材料、能源和信息是人类社会存在与发展的三个要素。自然界和人类社会的一切活动都在产生信息。信息是客观事物状态和运动特征的一种普遍形式。它是维持人类社会活动和经济活动所必需的重要资源。

自 18 世纪中叶开始工业革命的 200 多年以来,人类社会,特别是发达国家在谋求经济高速发展和物质与精神生活满足(甚至是贪婪)的进程中,几乎耗尽了几百万年乃至上亿年才形成的大部分化石能源。人类过度地、破坏性地开发自然资源,已使今天的地球面临岌岌可危的境地:大量 SO_2 、 CO_2 等废气和废物的排放使地球气候恶化,环境污染严重,人与自然已谈不上和谐共生。这促使人们反思:如何节能减排?如何循环利用自然资源?如何开发新的和可再生的能源以求得人类社会持续发展和地球环境的日益改善?

20 世纪,特别是 20 世纪中叶以来,信息技术的发展使人们看到了信息资源与技术的开发利用在提高节能减排效率、发展低碳经济、改善人与环境的友好相处中所发挥的重大作用。如果说能源科学技术革命曾经大大地促进了人类文明的发展,那么信息科学技术和能源科学技术的紧密结合,以及材料科学技术,特别是新材料的研发和广泛使用,将是我们今后几个世纪的历史性课题,将促进人类物质和精神文明发展进入一个新的历史阶段。这也就是我国在发达国家进入后工业化社会和信息社会的历史背景下,走“工业化促进信息化、信息化带动工业化”的道路,使得具有中国特色的社会主义经济能持续高速发展的重要原因之一。

关于集成电路产业的战略性,它对综合经济实力的提高,对国民经济和国家安全的重要作用,我在《我国集成电路产业发展之路》一书中已有系统的论述^[1],并特别在该书的2.2.5节论述了它对节约能源的作用。最近,美国节能经济委员会发表了题为《半导体技术:美国能源生产力革新的希望》的报告^[2](中国半导体行业协会编译),报告中特别指出:“半导体技术已经改变了我们的经济和生活。同时,半导体技术也以某种令人惊奇和意想不到的方式,革命性地改变了经济生产和能源消耗之间的关系。”根据该报告提出的节能情景模型,报告作者认为:“这一模型指出了政策对半导体技术研发投入的推动作用,而这些研发投入将能节省27%的能源消耗。”报告还描述了这样的前景:“基于半导体技术应用的节能情景,到2030年,与2008年相比,美国经济增长量将超过70%,但耗电量却减少了11%。”

任何事物都具有两面性,信息化科学技术对改善能源结构、产业结构以至革命性地改变生产和生活方式的一面已然逐步成为我们的共识;但是事情还有另一面,那就是信息技术特别是各种信息产品包括互联网、感知网和无线通信等产品的广泛使用,在这些产品进入社会、家庭和个人生活领域的过程中,它本身也在消耗能源,它们的生产过程及后续处理也在污染环境。对这一点似乎尚未引起人们的严重警觉。

“绿色微纳电子学”这一名词在由胡正明教授和我共同担任大会主席的ICSICT(International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology)2008北京会议上首次在我国出现。时任该大会程序委员会主席的北京大学黄如教授拟定了两个会议讨论专题,一个是“我国集成电路发展面临的挑战和历史机遇”,另一个就是“Green Micro/Nano Electronics”。两个讨论会我都参加了一下,在时间上后一个还多一些,但是那时的讨论还是比较初步的。

2008年11月,中国半导体行业协会集成电路设计分会在北京举办年会,大会主席魏少军教授邀请我做主旨演讲,我思之再三,应邀作了一个“绿色微纳电子学的设计”的报告。从准备这个报告开始,我就与王永文酝酿要编写一本《绿色微纳电子学》。

自集成电路发明以来,在52年的发展过程中,其集成度的变化基本上符合摩尔所预测的规律。摩尔规律是一个技术与经济规律的总结与一定时期的预测,而不是科学技术发展的定律。摩尔规律的中心内容是论述在芯片元件最低成本的情况下,处理器的集成度每一年翻一番(1975年摩尔修订为每两年翻一番,此外,

根据实践的统计数据,存储器的集成度约 18 个月翻一番)。在集成度提高、芯片性能增加、单元成本急剧下降的过程中,摩尔规律至今依然适用。但随着集成电路器件特征尺寸日益接近物理限制,加工 16nm 级特征尺寸的光学方法也逐渐接近其极限的情况下,芯片集成度虽然仍在按摩尔规律增加,但芯片功耗密度已逐渐变得不可接受,Intel 公司也发表了著名的“CPU 芯片能耗密度如不采取革新措施将可以超过火箭喷射器能耗密度”的图表^[3]。也就是说,功耗已成为集成电路与系统芯片发展的主要障碍。虽然 22nm 特征尺寸的电路与系统已在实验性生产中可以实现,32-22nm 特征尺寸的芯片即将投入大生产,但按比例缩小到 16nm 的时候,光学光刻方法是否仍可继续沿用,还有待于实践证明。如果用 EUV 光刻方法,其本身的功耗按目前状况很难被接受(90%以上光能被反射掉而不能利用)。尽管如此,16nm 的集成电路与系统还是有可能在近几年内被转移到大生产线进行试验。但是下一个节点 10nm,甚至以后的 7nm 将是如何? R&D 开发可以完成,但生产厂商能接受这样的运行成本吗? 到了这个阶段,大生产考虑的已不仅仅是特征尺寸缩小的技术问题,而是加工的成本和可靠性,特别是芯片功耗。

因此我认为,尽管追求芯片性能的提高是我们一贯的目标,但是降低功耗、提高性能/功耗比将会替代提高集成度(相应地减小特征尺寸)成为未来集成电路与集成微纳系统发展的驱动力。换言之,摩尔规律将完成它的历史使命(即使是科学定律也总是在一定条件下才能用的)。取而代之的,应当是以降低功耗、提高性能/功耗比为主要指标的新的规律总结,以及根据这一新的规律来预测集成电路产业和科学技术的进一步发展。以降低功耗、提高性能/功耗比来驱动集成电路的发展不仅对按比例缩小是正确的,对自上而下的研究和任何新诞生的信息器件也是正确的。对于主要在硅基技术的基础上、我们需要用整个世纪的精力来致力发展的另一个方向即 SoC(System on Chip)和 SiP(System in Package)以及多功能的集成微纳系统也必须是低功耗或超低功耗的,即必须考虑性能/功耗比,否则它将没有生命力。

如何降低功耗、提高性能/功耗比是绿色微纳电子学研究的一个重大命题,也是本书从各方面来论述的主要内容。

如果“降低功耗、提高性能/功耗比”将替代“提高集成度”成为未来集成电路产业和科学技术发展的驱动力(driver)是正确的话,那它必将有规律可循,一定会形成一个“在一定性能条件下,功耗降低的驱动规律”。这将引导我们深入地去研究探索。

这本书主要论述两方面的问题：

(1) 在综述能源与经济社会发展之后,重点从设计、制造、封装、新器件结构和新一代超低功耗与海量存储器以及集成微/纳系统六个方面来论述如何降低集成电路和集成微纳系统的功耗问题。

(2) 用半导体技术来革新现有能源结构,改善人与自然的关系。本书用两章描述了两个最具代表性的领域:新一代薄膜太阳能电池和绿色半导体照明光源。

而我们认为绿色革命最终必须归根到文化。

这本书是以什么方式编写的?

编写这样一本书,涉及领域如此广泛,自然不是我个人力所能及的。因此,一开始就设计了一个方案,邀请我比较熟悉的各相关领域的中青年科学家来编著相关章节,每章均邀请 2~4 名学者来编著,或分别、或互相编与审,并各自成章,每章都附上编、审者的照片和简历。主编将审阅各相关章节,并提出要求修改的意见,但最终如何修改,还是由各相关章节的编著者考虑和采纳。各章编审者与主编共同享有相关章节的知识产权,实现文责自负。这样既有系统的格局和主题,又有各章的相对独立性和自由度。

这种编写方案得以实现,还得益于各位中青年专家的鼎力支持和不懈努力。从他们的致谢中还可以看到更年轻一代,包括博士研究生作出的贡献。特别是一开始提出这一方案,就先后接到清华大学魏少军教授和浙江大学严晓浪教授的电话,他们共同提出把有关设计部分(列为第 2 章)的任务交给他们。交给他们当然是最好的,因为他们二位已经是我国集成电路设计领域的领军人物,而设计正是绿色微纳电子学的关键之所在。当然我们还邀请了一位清华大学年轻的尹首一副研究员一起参与编写这一章。随着国际产业结构的重组和海峡两岸经济合作的进一步发展,我国集成电路产业结构会呈现更为多元化的格局。今后 10~15 年我国集成电路产业发展得如何,关键还是要看具有自主知识产权的设计业是否有长足的进步。

关于制造(列为第 3 章)部分,我邀请了国家中长期科技规划(02)重大专项 65/45/32nm 的项目负责人吴汉明博士和中芯国际集成电路制造有限公司的高级副总裁季明华博士来担纲,同时邀请了中科院上海微系统与信息技术研究所微电子学部肖德元副研究员一起参加该章编写。这无疑是一个十分恰当的选择。他

们具有丰富的实践经验和理论知识,从节能减排和改善环境的角度来系统地书写绿色集成电路制造工艺,这在国内还是第一次。从他们所撰写的第3章中,我们可以看到,集成电路制造业有着巨大的节能减排、减少影响地球温室效应的有害气体和物质排放的空间,也可以看到提出绿色微纳电子学的必要性。这也告诉我们一个道理:集成电路大生产线不是可以随便地、不加区域选择地进行建设的。对于集成电路生产线的建设,不能仅仅简单地看到这是一个大的投资项目,如果是引进外资,那就是一个大的吸引外资项目;当然,由于其GDP产出量很大,这对某些地方行政官员无疑可以成为一个“政绩”项目。殊不知,这也是一个需要大量能源、水源支撑的项目,是一个特别要加强各种科学管理措施、减少污染排放和加强水循环利用等的工程。尤其要注意的是,我们决不能引进落后生产力的项目。

第4章是先进封装技术,我邀请了北京大学程玉华教授并通过他诚意邀请了IEEE Fellow、香港科技大学先进微系统封装中心主任 Ricky Lee(李世玮)教授和他的同事,香港科技大学先进微系统封装中心总工程师宋复斌博士和实验室经理卢智铨博士一起来编著与审校这一章。在封装领域,香港科技大学先进微系统封装中心和李教授以及他的同事都是在国际上有影响的研究单位和专家,又与程玉华教授有很好的合作关系,程玉华博士也是IEEE Fellow。关于集成微纳系统SoC和SiP封装技术的研究,是他们新近正在开发的一个新的研究领域。他们为我们带来了许多封装领域的新观念和新方法。我们清楚地看到,封装已不是原来概念上的为集成电路穿上一套可供使用的外衣,而是一个与多功能集成系统即SoC与SiP制备过程相紧密融合的设计与制造工艺过程的一个重要的环节。

第5章则是低功耗或超低功耗集成电路的基础——绿色微纳电子新器件技术。“风起于青萍之末”(宋玉《风赋》),一个创新的器件结构向大生产转化,不仅会带来集成电路产业的崭新面貌,同时也是我国集成电路科学技术和产业后来居上的希望之所在。这一章我邀请了北京大学的二位青年科学家黄如教授和张兴教授担纲,并邀请更为年轻的刘军华博士一起参与,他们在973、863等项目的支持下,已经有了十年以上的理论与实践研究功底,在中长期规划重大专项的支持下,他们正在持续地进行更为深入的研究,而且目前正在及时地将科研成果向产业逐步转化。

第6章是我们根据最近在新一代存储器发展上的动向,专门增加来论述超低功耗、海量阻变存储器(RRAM)的研究情况。尽管它的物理机制尚处于探索的阶段,但它的优越性却吸引我们不能不予以重点关注,它的突破有可能使存储器的

面貌完全改观。为此我们专门邀请了北京大学的二位专家康晋锋教授和王漪教授来编写与审核这一章。康晋锋教授是一位青年学者,他近年在 RRAM 方面的研究已引起学术界的瞩目。王漪教授有着长期研究半导体薄膜材料及应用的经验和成果;他们二位带给我们的是一个希望,是一个有可能引发存储器产生突破性进展的一抹亮色,为此,我也呼吁我国有关部门能远见卓识地对 RRAM 的研究及早部署并进行早期投入。这一研究虽有一定风险,但成功往往是要经历必要风险与可能的失败,不愿承担风险,实现跨越性发展将永远是停留在口头或纸面上的美好愿望。

第 7 章是集成微纳系统即 MEMS 和 NEMS 及其发展。我邀请了北京大学的李志宏教授和吴文刚教授二位青年学者编写,他们在这个领域都有十年以上的教学与研究经历,而且取得了丰硕的成果。他们在这一章中将把新鲜的研究成果奉献给我们。这一章内容与前几章内容相结合,可望在以“感知中国”为特色的“物联网”和“4C”融合中得以发挥作用。

第 8 章和第 9 章分别是半导体技术直接对太阳能的利用和新的半导体照明光源技术。我邀请了北京大学微电子学系的刘晓彦教授和化学系的邹德春教授共同编写与审校第 8 章。这一章请他们主要介绍新一代的(薄膜)太阳能电池。刘晓彦教授是从博士生开始就从事薄膜器件研究工作的青年学者,而邹德春教授则是一位有着多年研究有机薄膜太阳能电池和 LED 方面的专家。这一课题不仅是当前我国学术界关心的焦点,也是工业界十分关注的内容。有他们两位卓有研究成果的学者来编写这一章,我相信一定会有助于我们对这个问题的深入了解,并有可能直接指导工业生产。第 9 章是绿色半导体照明光源,我邀请了西安电子科技大学的中青年科学家郝跃教授和周小伟博士共同编审。郝跃教授不仅在第三代半导体 GaN 研制上取得了丰硕成果,而且是我国绿色照明试点城市——西安市半导体照明工程的首席科学家。这一章内容不仅仅是学术界的关注热点,而且是企业家的关注重点,他们编写的内容也必将有助于我国 LED 产业的发展。新一代太阳能光伏产业和半导体照明光源产业将是今后 10~15 年我国 IT 产业又一个重大亮点。

第 1 章为能源与经济社会发展综述,第 10 章为文化。因为发展科学技术和高新产业,正如第 1 章所论述的,归根到底还是要破除不利于科学技术发展的旧观念和旧文化。说到文化,是王永文的强项。理所当然地我请他主持编写第 1 章和第 10 章,一个是开头,一个是不能结尾的结尾。他的文化涵养和文笔水平大家

都是已经熟悉了的,我想不需要多加介绍了。

后续于此书的出版还想做些什么?

近来,温家宝总理在向首都科技界发表的讲话中指出^[4]:“在应对这场国际金融危机中,各国正在进行抢占经济科技制高点的竞赛,全球将进入空前的创新密集和产业振兴时代。我们必须在这场竞争中努力实现跨越式发展。”“科学选择新兴战略性产业非常重要,选对了就能跨越发展,选错了将会贻误时机”。在温总理报告中特别指出的五大产业和科技领域中第一个就是有关新能源,第二、三个就是信息产业和科学技术,而且特别提出了要加快微电子、光电子材料和器件等领域科技攻关,尽快形成具有世界先进水平的新材料与智能绿色制造体系。我们所编写的内容虽然只是这些领域中的“沧海一粟”,但是方向是对的,是符合国家战略需求和国际科技经济竞争需要的。因此我们有三件事要做:

(1)《绿色微纳电子学》的出版仅仅是一个开端,而且是一个不够系统、不太全面的开端。这是一个浩大的系统工程,我在第一次发给各位专家邀请参加编写此书的 E-mail 中,就希望各位专家在此基础上能进一步拓展。实际上,本书的每一章都可以延展为一本独立的著述,甚至是一套丛书。只要有创新研究,一本本书就如同涓涓细流可汇成清澈明渠,长流不息,用以转载我们的理念和研究成果。这或许能对我们的同事们或学子们有所启迪,用这样的办法构成一个讨论和学习平台,就像“群贤毕至,少长咸集”的“兰亭”一样,在曲水流觞般的传承中,为我们的今天和明天不断奉献新的篇章。

(2) 能源的应用驱动着人类社会的发展,同时也带来了一系列必须解决的问题。目前,节能减排工作已提到世界各国的议事日程上来。集成电路的发明至今已 52 年,以集成电路为基础的信息产业已成为世界第一大产业,集成电路和信息产业的科学技术是一支提高能源生产力、开拓新能源的革命性力量。本书第 8 章和第 9 章只是其中的两个例子而已,能源信息工程的领域远大于此,世界各国和我国各地区也都在加强对它的研究与发展。北大软件与微电子学院将在无锡创建一个能源信息工程系。无锡是人杰地灵、风景秀丽、人才辈出的江南名镇。无锡的东林书院有一副名联:“风声、雨声、读书声,声声入耳;家事、国事、天下事,事事关心。”我相信,在具有深厚文化底蕴的无锡从事创新研究和创新型人才的培养必将开辟出一片新天地。

(3) 集成电路和集成微纳系统把人类从工业社会推向了信息社会的历史阶段,与此同时,以集成电路为核心的电子产品也在消耗着巨大的能源,有人估计全球集成电路消耗的能量已与照明能耗可相比较地进行讨论。因此如何在进一步提高集成电路性能的同时,降低其本身的能耗(包括器件本身,也包括设计、制造工艺、封装等生产环节)迫在眉睫。我认为不仅撰写名为《绿色微纳电子学》的书籍,而且提出“降低功耗、提高性能/功耗比将是未来集成电路与系统发展的主要驱动力”这一命题也恰逢其时。命题既已提出,我们就要力求探索其规律。“物穷其理,宏微交替”(黄昆:给北大微电子研究所的题词)。或许在我们共同努力下,能够提出一个在一定性能条件下降低功耗的 Roadmap。

其实,写这本书,是一个非指令性的自觉行动。“何哉?不以物喜,不以己悲,居庙堂之高,则忧其民;处江湖之远,则忧其君。是进亦忧,退亦忧,然则何时而乐耶?其必曰:先天下之忧而忧,后天下之乐而乐欤!”(范仲淹《岳阳楼记》)

因此,我希望有更多的学者、专家、企业界人士参与到绿色微纳电子发展的领域当中来,这是一个尤其需要中青年学术带头人、工程师、企业家和管理者来共同完成的浩瀚工程。我自然以“黄河落天走东海,万里写入襟怀间”(李白《赠裴十四》)的心境寄希望于年轻的一代,希望他们能使我国微纳集成电路科学技术与产业得到更快的发展,更长足的进步,能够在 21 世纪的中华崛起中一抖雄风。

致谢:全书由王永文研究员负责统编和校对,并与出版社合作完成了最后的出版工作,谨向他致以诚挚的感谢。何芸也协助做了资料的整理工作,在此一并致谢。

王阳元

2010 年元旦书于北大深圳研究生院

2010 年 4 月 23 日世界读书日修订于北大燕园

参考文献

- [1] 王阳元、王永文. 我国集成电路产业发展之路. 北京:科学出版社,2008:39-84;190-191.
- [2] 美国节能经济委员会. 半导体技术:美国能源生产力革新的希望(2009.5). 报告号 E094. 中国半导体行业协会编译. 2009-10.
- [3] Intel. ITRS 2005.
- [4] 温家宝总理向首都科技界发表的讲话. 科学时报,2009-11-04.

目 录

第 1 章 能源与经济社会的发展

1.1	能源的生成与储量	3
1.1.1	能源的分类	3
1.1.2	常规能源储量	4
1.1.3	新能源储量	17
1.2	能源的利用与消耗	23
1.2.1	能源的利用与生产	24
1.2.2	生活与生产的能耗	43
1.3	能源与经济发展	53
1.3.1	能源是推动经济增长的重要因素	53
1.3.2	能源危机对经济增长的负面影响	60
1.3.3	人口增长对能源发展的制约	66
1.3.4	环境污染对能源发展的制约	68
1.4	节能的政策导向与举措	74
1.4.1	环保法规	74
1.4.2	税收政策	75
1.4.3	重大规划	78
1.4.4	重要举措	80
1.5	未来集成电路与集成系统发展的驱动力是降低功耗	86
1.5.1	集成电路对节能的革命性作用	86
1.5.2	未来集成电路与集成系统发展的驱动力是降低功耗	88
	参考文献	91

第 2 章 低功耗集成电路设计

2.1	集成电路的功耗来源与分析	97
2.1.1	静态功耗	97
2.1.2	动态功耗	99
2.1.3	功耗分析	101
2.1.4	总 结	104
2.2	电路级低功耗设计	105
2.2.1	引 言	105
2.2.2	寄存器传输级低功耗设计	105
2.2.3	门级低功耗设计	109
2.2.4	版图级的低功耗设计与优化	112
2.2.5	异步电路设计	113
2.2.6	亚阈值与多电压设计	121
2.2.7	总 结	125
2.3	系统级低功耗设计	126
2.3.1	引 言	126
2.3.2	动态电源管理	127
2.3.3	动态电压调节	130
2.3.4	低功耗编译	132
2.3.5	软硬件协同低功耗设计	136
2.4	电池感知低功耗设计	138
2.4.1	引 言	138
2.4.2	电池的放电特性与电池模型	138
2.4.3	电池感知任务调度	140
2.4.4	电池驱动的功率管理	144
2.4.5	总 结	146
2.5	低功耗集成电路设计和绿色 IT	147
2.5.1	绿色 IT 的兴起	147
2.5.2	低功耗集成电路设计促进绿色 IT	148

2.5.3 总 结	155
参考文献	156

第 3 章 绿色集成电路芯片生产制造

3.1 集成电路产业与环境问题	163
3.2 集成电路制造工艺	165
3.3 芯片制造工艺流程简介	167
3.4 干法刻蚀/清洗工艺与温室效应	173
3.4.1 干法刻蚀工艺介绍	173
3.4.2 干法清洗工艺介绍	175
3.4.3 干法工艺参数优化技术	177
3.4.4 干法刻蚀和清洗工艺的排气处理	180
3.5 湿法刻蚀和清洗中的排污控制	182
3.5.1 湿法刻蚀	182
3.5.2 湿法清洗	183
3.6 光刻工艺中光刻胶的污染问题	187
3.6.1 光刻工艺介绍	187
3.6.2 PFOS 背景	189
3.6.3 PFOS 对环境和人体健康的影响	191
3.6.4 PFOS 对光刻工艺的重要性	193
3.6.5 环保的光刻胶化学原料	194
3.6.6 光刻胶研发在环保方面的趋势	197
3.7 化学机械抛光中的研磨剂的环保考量	197
3.7.1 CMP 技术简介	197
3.7.2 CMP 抛光液与环境总体评价	198
3.7.3 CMP 抛光液的分类及主要性质	198
3.7.4 抛光液排放	200
3.7.5 抛光液储存和运输	200
3.8 生产过程中污染和有害物质的排放和控制	201

3.8.1	集成电路生产制造中常用的化学品	201
3.8.2	生产制造中常用的化学液体使用和废水处理	202
3.8.3	生产中的化学气体应用和废气处理	206
3.8.4	生产中危险化学品等有害物质管理	211
3.8.5	封装对环境的影响	213
3.9	低功耗的 CMOS 生产技术	213
3.9.1	SOI 上的 CMOS	214
3.9.2	SOI CMOS 器件制造工艺	214
3.9.3	高 K 金属栅工艺	215
3.9.4	SoC 和 SiP	218
3.10	总 结	220
	参考文献	221

第 4 章 绿色电子封装技术与材料

4.1	引 言	226
4.1.1	电子产品废料污染严重性及管理办法的沿革与现况	226
4.1.2	无铅焊为绿色电子制造的关键议题	229
4.2	常用集成电路芯片封装	230
4.2.1	封装的工艺流程	231
4.2.2	封装的分类	232
4.2.3	新型封装技术	235
4.3	芯片-封装-PCB 协同设计	241
4.3.1	先进封装的挑战	241
4.3.2	芯片-封装-PCB 协同设计流程	242
4.3.3	芯片-封装-PCB 协同设计关键技术	243
4.4	系统级封装及应用	246
4.4.1	概 述	246
4.4.2	SiP 关键技术	248
4.4.3	SiP 的应用	253

4.5	绿色纳米复合材料在先进封装中的应用	255
4.6	无铅再流焊接焊料合金的选择与特性	259
4.6.1	无铅焊膏原料	259
4.6.2	所选焊膏的工程考虑和成分	261
4.6.3	助焊剂	264
4.6.4	所选焊膏原料特性	266
4.7	板级可靠性测试	274
4.7.1	样品概述	275
4.7.2	再流后焊料与金属间化合物分析	277
4.7.3	加速温度循环测试	280
4.7.4	封装元器件的剪切/拉拔测试	285
4.7.5	四点弯曲测试	291
4.7.6	跌落测试	295
4.8	总 结	301
	参考文献	303

第 5 章 绿色微纳电子新器件技术

5.1	引 言	309
5.2	动态阈值器件和衬底调制技术	310
5.2.1	栅体相连的动态阈值器件	310
5.2.2	适于低压电路的衬底电压调制技术	319
5.3	低泄漏电流的纳米尺度 MOS 器件	327
5.3.1	超薄体 SOI 器件和准 SOI 器件	328
5.3.2	低泄漏新型双栅器件	331
5.3.3	硅纳米线围栅器件	338
5.4	超陡亚阈斜率的新机制低功耗器件	342
5.4.1	隧穿场效应晶体管	343
5.4.2	碰撞电离 MOS 器件	345
5.4.3	悬栅 MOSFET	349
	参考文献	350

第 6 章 绿色存储器技术

6.1 半导体存储技术概述	362
6.1.1 传统半导体存储技术的局限	362
6.1.2 新型半导体存储技术概述	364
6.1.3 阻变存储器的特点	369
6.1.4 阻变存储器技术的挑战	370
6.2 阻变存储器原理和机制	371
6.2.1 阻变特性和阻变存储器件	371
6.2.2 RRAM 器件结构及其工作模式	372
6.2.3 RRAM 的物理机制	373
6.3 阻变存储器特性	379
6.3.1 器件结构效应	379
6.3.2 电极效应	380
6.3.3 掺杂效应	384
6.3.4 开关模式效应	386
6.3.5 限压和限流效应	388
6.3.6 按比例缩小特性	389
6.4 阻变存储器关键技术	390
6.4.1 器件材料和结构的优化选择	390
6.4.2 存储单元	392
6.4.3 集成技术	393
6.5 总结与展望	397
参考文献	398

第 7 章 微/纳机电系统与应用

7.1 微机电系统背景概述	405
7.1.1 MEMS 定义	406