

SOI——纳米技术时代的高端硅基材料

SOI : Advanced Silicon-Based Materials
for the Nanotechnology Era



林成鲁 编著

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学

校友文库

SOI —— 纳米技术时代的
高端硅基材料

SOI : Advanced Silicon-Based Materials
for the Nanotechnology Era

林成鲁 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 提 要

绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI)技术在高速、低压低功耗电路、高压电路、抗辐射、耐高温电路、微机械传感器、光电集成等方面具有重要应用,是微电子和光电子领域发展的前沿,被国际上公认为“二十一世纪的硅集成电路技术”。本书收集的纳米技术时代的高端硅基 SOI 材料方面的研究论文 40 篇,主要内容包括:SOI——纳米技术时代的高端硅基材料进展,SOI 新材料的制备科学,SOI 材料与器件特有的物理效应,绝缘体上锗硅(silicon germanium on insulator, SGOI)新结构和应变硅的制备科学,SOI 技术的若干应用研究等。书中包含了高端硅基材料前沿领域的多方面创新研究成果。

本书可作为微电子、光电子、微机械、半导体材料、纳米材料等专业的大专院校师生和专业技术人员重要的参考书,也可以作为信息领域其他专业的师生、科研人员和工程技术人员参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

SOI——纳米技术时代的高端硅基材料/林成鲁编著.—合肥:中国科学技术大学出版社,2009.6

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书;中国科学技术大学校友文库)
“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02233-3

I. S… II. 林… III. 硅—纳米材料—文集 IV. TB383-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 079632 号

出版发行 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026
<http://press.ustc.edu.cn>

印 刷 合肥晓星印刷有限责任公司
经 销 全国新华书店
开 本 710mm×1000mm 1/16
印 张 30.25
印 数 500 千
版 次 2009 年 6 月第 1 版
印 次 2009 年 6 月第 1 次印刷
印 数 1—2000 册
定 价 88.00 元

编 委 会

顾 问 吴文俊 王志珍 谷超豪 朱清时
主 编 侯建国
编 委 (按姓氏笔画为序)

王 水	史济怀	叶向东	伍小平
刘 兢	刘有成	何多慧	吴 奇
张家铝	张裕恒	李曙光	杜善义
杨培东	辛厚文	陈 颀	陈 霖
陈初升	陈国良	周又元	林 间
范维澄	侯建国	俞书勤	俞昌旋
姚 新	施蕴渝	胡友秋	骆利群
徐克尊	徐冠水	徐善驾	翁征宇
郭光灿	钱逸泰	龚 昇	龚惠兴
童秉纲	舒其望	韩肇元	窦贤康

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的 50 年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008 年 9 月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的 5 万人中,已有 42 人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自 1963 年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每 1 000 人就产生 1 名院士和 700 多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出 20 多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文

库》，于2008年9月起陆续出书，校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证，入选书稿学术水平高，已列为国家“十一五”重点图书出版规划。

入选作者中，有北京初创时期的毕业生，也有意气风发的少年班毕业生；有“两院”院士，也有IEEE Fellow；有海内外科研院所、大专院校的教授，也有金融、IT行业的英才；有默默奉献、矢志报国的科技将军，也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才；有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授，也有首批获得新中国博士学位的中年学者；……在母校五十周年华诞之际，他们通过著书立说的独特方式，向母校献礼，其深情厚意，令人感佩！

近年来，学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论，使我们更清醒地认识到，中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想，中国科大的创办与发展，首要的目标就是围绕国家战略需求，培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来，我们一直遵循这一目标定位，有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路，取得了令人瞩目的成就，也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去，辉煌须待开创。在未来的发展中，我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨，在坚守优良传统的基础上，不断改革创新，提高教育教学质量，早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待：瞄准世界科技前沿，服务国家发展战略，创造性地做好教学和科研工作，努力办成世界一流的研究型大学，培养造就更多更好的创新人才，为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

前 言

集成电路发展到目前极大规模的纳米技术时代,要进一步提高芯片的集成度和运行速度,现有的体硅材料和工艺正接近它们的物理极限,遇到了严峻的挑战,必须在材料和工艺上有新的重大突破。绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI),是纳米技术时代的高端硅基材料,是“新一代硅”。SOI技术在低压、低功耗电路、耐高温电路、微机械传感器、光电集成等方面具有重要应用,是微电子和光电子领域发展的前沿,被国际上公认为“21世纪的硅集成电路技术”。同时,SOI技术具有抗辐射的独特优越性,是微电子敏感核心技术,西方国家对我国严密封锁和禁运。

20世纪60年代,由于在军事和空间应用对高可靠抗辐射集成电路的需求,SOI技术受到注意。从20世纪70年代到90年代,研发了许多新的SOI技术。90年代末,SOI技术开始从军用走向商业应用,成功地用于研制高速、低功耗、高可靠的微电子主流产品——微处理器等高性能芯片。进入21世纪以来,SOI材料的全球市场保持持续稳定向上增长的态势,年复合增长率超过40%,远远高于硅材料的增长率。SOI技术从早期在军事和航空航天的应用,拓展到功率和灵巧器件以及微机械应用,特别是在汽车电子、显示、无线通讯等方面的应用。如今,SOI技术主要集中在高速、低功耗集成电路的高端应用,特别是微处理器,SOI技术的主要用户为高端微电子技术的引导者。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所(前身为上海冶金研究所)SOI研究集体,从国家的需求出发,在国家攻关、“863”、“973”等重大研究计划的支持下,从20世纪80年代初开展高端硅基材料SOI的基础研究。90年代在中科院创新工程中,研究突破SOI材料工程化的关键技术。2001年开始,成功实现SOI研究成果转化,从上海微系统所孵化出高科技公司——上海新傲科技有限公司,建成国内唯一、国际先进水平的SOI材料工业化生产线。研发生产的SOI材料系列产品性能指标达到或优于国际半导体(SEMI)标准,打破了国外的技术封锁,从根本上解决了我国SOI材料“有无”问题,并在

短时间内跻身国际高端硅基材料市场,实现了我国微电子材料的跨跃式发展,取得了重大的经济和社会效益。由于对我国微电子和相关产业的持续发展做出重大贡献,上海微系统所和上海新傲科技有限公司的“高端硅基 SOI 材料研发和产业化”项目获得 2006 年度国家科技进步一等奖,SOI 研究集体获 2007 年度中国科学院杰出科技成就奖。

数十年来,上海微系统所和上海新傲公司的数十名科技工作者为 SOI 技术的研发和产业化做出了贡献。本人有幸参加了上海微系统所和上海新傲公司 SOI 技术从研发—工程化—产业化数十年工作的全过程,20 世纪 80 年代作为 SOI 项目负责人,90 年代作为 SOI 创新项目总设计师,2001 年开始作为新傲公司总工程师和创业团队主要人员。数十年间,有十多位中国科学技术大学校友参加了 SOI 技术研发工作,如方子韦、周伟、吴雁军、宋世庚、陈超等。因为本书篇幅所限以及所收集的是近几年的论文,所以只有部分校友的论文收进书中。本书所收集的学术论文,还包括了不在上海微系统所工作的中国科学技术大学校友的论文,特别是物理系 1965 年毕业的校友、中国科学院半导体研究所研究员、博士生导师余金中先生在百忙中为本书写了“硅基光电子材料和器件的进展和发展趋势”的综述论文。我和我的校友很高兴将此书献给母校五十华诞。

本书所收集的纳米技术时代的高端硅基 SOI 材料方面的研究论文共 40 篇,部分是在国外刊物上发表的论文,其出处都已标明版权所有的学术期刊。本书主要包括以下几部分:

- (1) SOI——纳米技术时代的高端硅基材料进展;
- (2) SOI 新材料的制备科学;
- (3) SOI 材料与器件特有的物理效应;
- (4) SGOI 新结构和应变硅的制备科学;
- (5) SOI 技术的若干应用研究。

本书的编写和学术论文的收集得到了已出站的博士后及已毕业的研究生们的支持和帮助,特别是宋志棠研究员、王连卫教授、张苗研究员、刘卫丽研究员、多新中博士、安正华博士、朱鸣博士、林青博士、章宁琳博士、门传玲博士、谢欣云博士、狄增峰博士、骆书华博士等,得到了多位中国科学技术大学校友的支持和帮助。本书的出版还得到了上海微系统所、上海新傲公司领导 and 同仁的支持和帮助。对于他们的支持和帮助,在此深表感谢!由于编著者水平有限,书中不妥之处,请读者指正。

林成鲁

2009 年 5 月

作者简介

林成鲁,1965年毕业于中国科技大学近代化学系,现为中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员、博士生导师,上海新傲科技有限公司总工程师。长期从事高端硅基半导体新材料 SOI(silicon on insulator)的研究。20世纪80年代,在国内率先开展 SOI 技术基础研究;90年代,作为 SOI 创新项目总设计师,组织领导突破 SOI 材料工程化的关键技术;2001年开始,作为新傲公司总工程师,为成功实现 SOI 研究成果转化,打破国外的技术封锁,为建成国内唯一的 SOI 材料工业化生产线做出了重要贡献,实现了我国微电子材料的跨越式发展,取得了重大的经济和社会效益。先后承担国家攻关、“973”、“863”等多项国家重大项目。在国内外刊物上发表论文 300 余篇,被 SCI 收录的论文 240 余篇。申请的国家发明专利 19 项,其中已授权 12 项。前后已为国家培养数十名研究生,所培养的研究生中获全国百篇优秀博士论文 2 名。曾获得国家科技进步一等奖、中科院杰出科技成就奖等十一项奖励。

目 次

SOI——纳米技术时代的高端硅基材料进展	1
纳米技术时代的高端硅基材料——SOI、sSOI 和 GOI	
林成鲁, 刘卫丽, 陈猛	3
SOI 技术的发展动态	
林成鲁	17
硅基光电子材料和器件的进展和发展趋势	
余金中	33
Fabrication of SiGe-on-insulator and applications for strained Si	
Chenglu Lin, Weili Liu, Zhenghua An, Zengfeng Di, Miao Zhang	
.....	42
Overview of SOI materials technology in China	
M. Chen, X. Wang, C. L. Lin	51
SOI 新材料的制备科学	59
以注氧隔离(SIMOX)技术制备高阻 SOI 材料	
骆书华, 张苗, 陈猛, 林成鲁	61
硅中注 H ⁺ 引起的缺陷和应力以及剥离的机制	
多新中, 吴雁军, 张苗, 林成鲁	76
以 AlN 为绝缘埋层的新结构 SOAN 材料	
朱鸣, 门传玲, 丁艳芳, P. K. Chu, 林成鲁	86
多孔硅外延层转移技术制备 SOI 材料	
刘卫丽, 林成鲁	99
ELTRAN 技术制备双埋层 SOIM 新结构	
谢欣云, 刘卫丽, 林成鲁	106
SOI 新结构——SOI 研究的新动向	

谢欣云, 林青, 门传玲, 安正华, 张苗, 林成鲁	117
Fabrication of silicon-on-AlN novel structure and its residual strain characterization	
Zhenghua An, Chuanling Men, Xinyun Xie, Miao Zhang, Paul K. Chu, Chenglu Lin	126
Buried tungsten silicide layer in silicon on insulator substrate by Smart-cut	
S. H. Luo, W. L. Liu, M. Zhang, Z. F. Di, S. Y. Wang, Z. T. Song, C. L. Lin, S. C. Zou	135
Void-free low-temperature silicon direct-bonding technique using plasma activation	
Xiaobo Ma, Weili Liu, Zhitang Song, Wei Li, Chenglu Lin	143
Microstructure and crystallinity of porous silicon and epitaxial silicon layers fabricated on p ⁺ porous silicon	
Weili Liu, Xinying Xie, Miao Zhang, Qinwo Shen, Chenglu Lin, Lumin Wang, Paul K. Chu	157
Formation of silicon-on-diamond by direct bonding of plasma-synthesized diamond-like carbon to silicon	
Ming Zhu, Paul K. Chu, Xuejie Shi, Man Wong, Weili Liu, Chenglu Lin	169
Thermal stability of diamondlike carbon buried layer fabricated by plasma immersion ion implantation and deposition in silicon on insulator	
Zengfeng Di, Anping Huang, Ricky K. Y. Fu, Paul K. Chu, Lin Shao, T. Höchbauer, M. Nastasi, Miao Zhang, Weili Liu, Qinwo Shen, Suhua Luo, Zhitang Song, Chenglu Lin	177
Study of SOI substrates incorporated with buried MoSi ₂ layer	
Chao Chen, Weili Liu, Xiaobo Ma, Zhitang Song, Chenglu Lin	189
SOI 材料与器件特有的物理效应	199
SOI MOSFET 浮体效应研究	
朱鸣, 林成鲁	201
SOI MOSFET 的自加热效应研究	
朱鸣, 林青, 丁艳芳, 林成鲁	218
SOI 器件的辐射效应及其在抗辐射电子学方面的应用进展	
张正选, 林成鲁	237
Evolution of hydrogen and helium co-implanted single-crystal	

silicon during annealing	
Xinzhong Duo, Weili Liu, Miao Zhang, Lianwei Wang, Chenglu Lin, M. Okuyama, M. Noda, Wing-Yiu Cheung, S. P. Wong, Paul K. Chu, Peigang Hu, S. X. Wang, L. M. Wang	247
Comparison between the different implantation orders in H ⁺ and He ⁺ co-implantation	
Xinzhong Duo, Weili Liu, Miao Zhang, Lianwei Wang, Chenglu Lin, M. Okuyama, M. Noda, Wing-Yiu Cheung, Paul K. Chu, Peigang Hu, S. X. Wang, L. M. Wang	264
Comparison of Cu gettering to H ⁺ and He ⁺ implantation-induced cavities in separation-by-implantation-of-oxygen wafers	
Miao Zhang, Chenglu Lin, Xinzhong Duo, Zixin Lin, Zuyao Zhou	277
Gettering of Cu by microcavities in bonded/ion-cut silicon-on-insulator and separation by implantation of oxygen	
Miao Zhang, Xuchu Zeng, Paul K. Chu, R. Scholz, Chenglu Lin	287
SGOI 新结构和应变硅的制备科学	301
SIMOX 技术制备 SGOI 新结构的研究	
安正华, 林成鲁, 张苗, Paul K. Chu	303
改良型 Ge 浓缩技术制备 SGOI 及应变 Si 的研究	
狄增峰, 张苗, 林成鲁, Paul K. Chu	328
绝缘层上锗材料的研究	
刘卫丽, 詹达, 马小波, 宋志棠, 林成鲁	345
Relaxed silicon-germanium-on-insulator substrates by oxygen implantation into pseudomorphic silicon germanium/silicon heterostructure	
Zhenghua An, Yanjun Wu, Miao Zhang, Zengfeng Di, Chenglu Lin, Ricky K. Y. Fu, Peng Chen, Paul K. Chu, W. Y. Cheung, S. P. Wong	351
Germanium movement mechanism in SiGe-on-insulator fabricated by modified Ge condensation	
Zengfeng Di, Paul K. Chu, Miao Zhang, Weili Liu, Zhitang Song, Chenglu Lin	359
Investigation of relaxed SiGe on insulator and strained Si	
Weili Liu, Chenglu Lin, Zengfeng Di, Zhitang Song, Paul K. Chu	

.....	368
SOI 技术的若干应用研究	375
纳米 MOSFET/SOI 器件新结构	
张正选, 林成鲁	377
SOI 衬底上的无源器件研究	
骆苏华, 张苗, 刘卫丽, 孙晓炜, 林成鲁	384
SGOI 衬底上高 k 栅介质的研究	
狄增峰, 张苗, P. K. Chu, 刘卫丽, 林成鲁	405
High frequency capacitance-voltage characterization of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ in fully depleted silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor capacitors	
N. L. Zhang, Z. T. Song, Q. W. Shen, Y. J. Wu, Q. B. Liu, C. L. Lin, X. Z. Duo, L. R. Zheng, Y. F. Ding, Z. Q. Zhu	420
Numerical study of self-heating effects of MOSFETs fabricated on SOAN substrate	
Ming Zhu, Peng Chen, Ricky K.-Y. Fu, Zhenghua An, Chenglu Lin, Paul K. Chu	426
$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ resonant-cavity-enhanced photodetectors with a silicon-on-oxide reflector operating near $1.3 \mu\text{m}$	
Cheng Li, Qinqing Yang, Hongjie Wang, Jialian Zhu, Liping Luo, Jinzhong Yu, Qiming Wang, Yongkang Li, Junming Zhou, Chenglu Lin	437
Total dose rad-hard improvement for silicon-on-insulator materials by modifying the buried oxide with ion implantation	
Zhang En-Xia, Qian Cong, Zhang Zheng-Xuan, Lin Cheng-Lu, Wang Xi, Wang Ying-Min, Wang Xiao-He, Zhao Gui-Ru, En Yun-Fei, Luo Hong-Wei, Shi Qian	443
Investigation of H^+ and B^+/H^+ implantation in LiTaO_3 single-crystals	
Qing Wan, Lianwei Wang, Weili Liu, Miao Zhang, Chenglu Lin	454
Investigation of SOI substrates incorporated with buried MoSi_2 for high frequency SiGe HBTs	
Chen Chao, Liu Weili, Ma Xiaobo, Shen Qinwo, Song Zhitang, Lin Chenglu	462

SOI——纳米技术时代的 高端硅基材料进展

本篇的五篇论文是纳米技术时代的高端硅基材料的综述。主要内容包括：高端硅基材料 SOI 的技术的发展历程,SOI 材料的主流制备技术,SOI 技术发展的新动向,SOI 技术的应用进展;应变硅技术的发展和研发动向;高端硅基材料在光电子方面的研究进展和发展趋势等。

纳米技术时代的高端硅基材料 ——SOI、sSOI 和 GOI*

林成鲁^{1, 2)}, 刘卫丽¹⁾, 陈猛²⁾

1) 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海, 200050

2) 上海新傲科技有限公司, 上海, 201821

摘 要

本文综述了纳米技术时代的高端硅基材料——SOI、sSOI 和 GOI, 并结合介绍了上海微系统所和上海新傲科技有限公司相关的研究工作。

关键词: 高端硅基材料, 绝缘体上硅(SOI), 绝缘体上应变硅(sSOI), 绝缘体上锗(GOI)

1 纳米技术时代的高端衬底材料

集成电路的特征尺寸在 1999 年开始缩小到亚 100 纳米, 英特尔(Intel)在 2006 年 6 月实现了 90 纳米与 65 纳米的“制造接替”, 65 纳米技术代的微处理器(CPU)由物理栅长仅为 35 纳米的近三亿只金属-氧化膜-半导体场效应晶体管(MOSFET)组成, 实现了在芯片生产方面的里程碑式的跨越。Intel 于 2007 年 1 月底发布了其 45 纳米技术时代 MOSFET 的几项关键技术的解决方案, 包括采用全新的高介电常数栅介质和金属栅极材料; 2007 年 10 月 Intel 启动支持 45 nm 工艺的首个 300 mm 晶圆量产工厂。根据“国际半导体技术发展路线图(ITRS)”的预测, 摩尔定律(moore's law)(即单只晶体管所占面积每 18 个月缩小一倍)所预测的高速发展至少将持续到 2020 年, 那时的晶体管物理栅长将是 6 纳米! 在 6 年后的 2013 年, 集成电路将进入 32 纳米技术时代, 并于 2016 年进入 22 纳米技术时代。随着芯片集成度的进一步提高, 即器件特征尺寸的进一步缩小将会面临大量来自传统工作模式、传统材料乃至传统器件物理基础等方面的问题, 因此必须在器件物理、材料、器件结构、关键工艺、集成技术

* 第七届全国 SOI 技术研讨会, 特邀报告, 2007 年 5 月 18 日至 20 日, 无锡。

等基础研究领域寻求突破。

集成电路发展到目前极大规模的纳米技术时代,要进一步提高芯片的集成度和运行速度,现有的体硅材料和工艺正接近它们的物理极限,在进一步减小集成电路的特征尺寸方面遇到了严峻的挑战,必须在材料和工艺上有新的重大突破。目前在材料方面,重点开发绝缘体上硅(SOI)、应变硅、GeSi、金属栅、低 k 及高 k 介质材料等。业界公认,SOI技术与应变硅技术,成为纳米技术时代取代现有单晶硅材料的两大解决方案,是维持 Moore 定律走势的两大利器。图 1 为国际上 SOI 材料头号供应商——法国 Soitec 公司给出的先进材料的发展路图,绝缘体上硅(SOI)、绝缘体上应变硅(sSOI)和绝缘体上锗(GOI)将成为纳米尺度大规模集成电路的高端衬底材料^[1]。

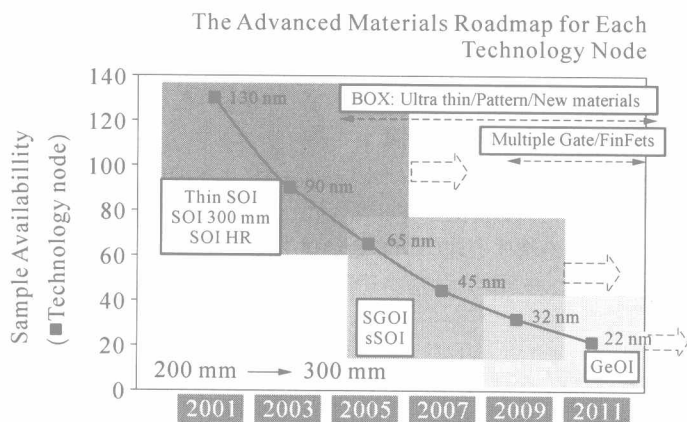


图 1 纳米技术时代的高端衬底材料发展路图

2 绝缘体上硅(SOI)

2.1 SOI 的高端应用——大尺寸薄膜 SOI

国际 SOI 市场 95% 的应用集中在 8 英寸和 12 英寸大尺寸薄膜 SOI,其中绝大多数用户为尖端微电子技术的引导者,如 IBM、AMD 等。目前供应商为法国 Soitec、日本信越(SEH)、日本 SUMCO,其中前两家供应了约 90% 的产品。其主要驱动力来自高速、低功耗 SOI 电路,特别是微处理器(CPU)应用,技术含量高,附加值大^[2~4]。例如,2005~2006 财务年度 Soitec 公司销售的 SOI 圆片,12 英寸占 60%,8 英寸占 28%。SOI 的高端应用,主要是需要 12 英寸的圆片。图 2(a)是薄