



光计算技术基础

Fundamental of Optical
Computing Technology

李修建 贾辉 杨俊波 刘菊 杨建坤 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

光计算技术基础

Fundamental of Optical Computing Technology

李修建 贾辉 杨俊波 刘菊 杨建坤 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

光计算技术基础/李修建等编著. —北京:国防工业出版社,2013. 8

ISBN 978-7-118-08960-8

I. ①光... II. ①李... III. ①光学计算 IV. ①TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 185214 号

※

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 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 348 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 60.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜
副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新
秘书长 杨崇新
副秘书长 邢海鹰 谢晓阳
委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利
刘泽金 孙秀冬 陆军 芮筱亭
李言荣 李德仁 李德毅 杨伟
肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威
陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起
郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南
傅惠民 魏炳波

前 言

计算和计算技术,推动着人类文明程度的进化。人类文明的标志之一,就是能够进行复杂的计算。而计算工具的使用和发展是推动计算技术进步的一个重要因素。

电子计算机的出现,是人类计算技术发展的里程碑,使人们摆脱了计算过程中繁琐的体力和脑力劳动,计算变得更加规范化和程序化。依赖于电子技术的电子计算机随着电子技术的发展突飞猛进,已经取得了辉煌的成就。

但由于电子计算瓶颈的限制,其发展过程受到越来越多的限制。如何以有效而创新的手段推进计算机性能的持续提高,是当前超级计算机发展面临的瓶颈问题。尤其是如何以多技术融合解决超级计算机发展面临的瓶颈问题,是摆在全球所有信息处理、高性能计算等研究领域的一项重要挑战。

随着光学技术以及其他领域技术相互融合,新型光学及光电器件日益成熟。这些技术的融合,在计算领域出现了光明的应用前景。随着新型器件的快速发展,在光开关、光互连、光存储等相关技术的突破,极大地推动了信息技术及其应用领域的拓展。超快光学开关技术,使得超短时间内光学信息的传输和控制成为可能,控制时间大大缩小。光互连技术在超级巨型计算机等高性能计算领域的成功应用,将单计算系统的计算速度推上了每秒亿亿次的高峰,并将在不久的将来登上每秒百亿亿次的性能高峰。光学存储的大容量发展,使得海量数据的处理和存储变为可能。相关技术的突飞猛进,引起我们无限的遐想,光学技术的融入,能够如此迅捷地提高超级计算机的性能。真正的光计算机,在解决超高速、超大容量信息处理等方面,其计算性能应足以使我们瞠目结舌。因此,光学技术在计算机中的大量应用将是不可避免的趋势,并有朝一日将取代电子技术的地位。发展并行光计算技术被认为是能够解决目前超级计算机性能继续提高所面临瓶颈问题的最佳途径。

既然光学处理有其高速度、大容量的先天优势,将光学及相关技术引入到计算技术是自然而然的事情。光计算技术及光计算机的概念,就是来源于上述光学技术和器件的快速发展。借鉴电子计算中的成功经验,光计算机从体系结构上,仍然需要由处理器、存储器和控制器等部分构成。只要这些部件能够协调工作,配合相应的信息编码、软件算法、I/O 接口、以及其他辅助部件,光计算机的发展就可以成为可能。

但是从事物发展的客观规律看,光计算机的出现并非能够一蹴而就。就如电子计算机的真正出现,是在经历了电子技术和电子器件中的晶体管、集成电路等快

速发展以后,才出现飞跃性的进展。因此,光计算机的实现,不仅需要典型功能器件的出现,更需要光计算机组成的其他部分,如光学处理器、光学存储器、光学路由交换器等成功对接。而且,这些子系统的实现还需要激光器、探测器、转换器、存储器,以及各种光栅和透镜在原理、方法、技术、材料、器件集成上的发展,还需要在数据编码理论和方法、光信息的新型表达方式、光计算机体系结构等多方面有所突破。

当前,有关光器件正处在一个发展的快速阶段,借助于光学集成工艺和制造技术,多种功能的光计算器件不断涌现,其性能也正逐步提高,光电结合的混合系统,也正在多种类型的信息处理系统中得以应用,正在发挥越来越重要的作用。这些进展,正在为今后纯光计算机技术发展提供基础和支撑。

光计算多年以来都有广泛的研究,其研究领域包括结构理论、器件原理与制备、功能器件的结构与实现等方面。就目前进展而言,体系结构理论上尚未取得突破。器件原理与制备方面虽然是一个相对研究热点,但从原理和制备方法上还不具备系统性。功能器件的结构与实现等方面,虽然在某些具体应用上有较为成功的方案,但距离通用光计算还有较大的差距。

本书针对上述问题,根据光计算发展的硬件构成,主要总结前人在硬件结构上的研究工作经验,结合光学信息技术、光电子器件技术、新型光学材料及器件技术的发展,从原理、结构、应用等方面,从光计算系统可能硬件构成的角度出发,对各种硬件的基础知识进行分析、介绍和引入,为相应领域的研究打下基础,并培养读者兴趣,为不久的将来光计算系统的构建做好准备。

光计算机的研究范畴是如此之广泛而新颖,且光计算机的真正可行的形式和运行方式也至今仍在广泛研究中,想要在一本书内全部加以描述是不太现实的。本书试图从物理学、光学工程和计算机科学多学科融合的角度,对一些迄今为止与光计算机的实现可能有较大相关性的,并在未来有可能在光计算机中会获得应用的硬件和功能材料的原理和技术基础进行描述,体系上涵盖了光学运算单元、光交换及光互连、光学存储、光学缓存及同步的硬件构成等较完整的光计算研究领域,并对一些新兴的理论和技术的论述,展望未来光计算技术的发展。

本书从光计算的物理实现角度进行体系和结构设计,体系上涵盖了光学运算单元、光交换及光互连、光学存储、光学缓存及同步的硬件构成等较完整的光计算研究领域。本书内容不仅包含了传统的光学元件和系统分析,还包含了半导体光电子器件理论及技术,以及已经被证明将是光计算机核心构成的光互连系统和三维光学存储与调制元件,并加入了更具有前沿性的光学缓存及同步器件等新型光信息传输与处理技术及器件。

本书既具有一定的理论深度,同时又紧贴光计算发展前沿;既站在光计算的全局高度,又具有具体技术的可操作性;不仅对现有的光计算技术进行分析叙述,还对光计算研究发展对各种硬件技术的需求,以及各种光计算硬件技术的发展趋势进行分析叙述。因此,本书在体系及结构上更紧贴光计算研究范畴及研究进展,内

容的覆盖面更加完整和合理。

本书内容主要包括:

第1章,光计算技术概述:主要对计算发展史进行回顾,描述光计算的定义和内涵,并简单描述模拟光计算和数字光计算的基础,以及光计算机体系结构的可能模型。

第2章,半导体多量子阱光电子逻辑器件:主要对半导体多量子阱的基本结构、原理和特性,半导体自电光效应及垂直表面调制器原理,自电光效应器件SEEDs的工作原理,SEEDs的特性及应用方法,SEEDs与电路的集成方法等进行描述,并对量子点等新型理论和技术进行了展望。

第3章,光计算中的微型光源:主要对垂直表面发射光电子器件的概念及内涵,LD模式垂直表面发射光器件的结构及原理,VCSELs激光器的原理、设计及性能分析,垂直表面发生光电子器件的应用等进行描述,并进行了展望。

第4章,微光学与衍射光学元件:主要对微透镜阵列及衍射光学元件的概念及内涵、结构及特性、分类及原理、设计及制备技术进行介绍,并对光学元件的性能及其分析方法进行描述,对微透镜阵列和二元光学元件的设计及应用进行了描述。

第5章,光学存储器件:主要对光学存储材料及器件的进展,双光子相互作用的原理,采用双光子相互作用实现3D光学信息存储的方法,光折变效应及其光学存储应用,光学存储器件的发展趋势分析等进行分析。

第6章,并行光互连:主要内容包括并行光互连与光交换的概念,并行光互连与光交换的发展及应用,典型光互连模型的原理及光学实现,光学交叉原理,衍射光学元件在并行光互连中的应用,自由空间光互连的设计与实现,并行光互连发展趋势分析等。

第7章,光缓存与全光同步技术前沿:主要内容包括光缓存概念及内涵,基于慢光原理的光缓存与同步原理和技术介绍,并展望该领域未来发展趋势。

本书的编撰是基于作者多年讲授“光计算硬件基础”、“信息光学”和“光子学基础”课程所掌握的资料,以及作者这些年进行光计算理论和技术研究所积累的材料和研究成果。其中结合本单位近年来部分科学研究经验与研究成果,采用了国内外近年来的书籍文献资料和部分内容,书中一些内容甚至直接引用了国内外相关文献资料中的部分章节。本书的成稿融合了多位教师和研究生多年的辛勤劳动,在此表示真诚的感谢,同时对于书中所引用内容的国内外研究单位同行致以崇高的敬意和深深的感谢。

本书作为抛砖之作,且由于编者知识水平和能力所限,其中的不足和错误在所难免,期待读者和同行不吝批评指正,以促进相关研究的交流和发展。

编者

2013年5月

目 录

第 1 章 光计算技术概述	1
1.1 计算发展史及发展趋势	1
1.1.1 原始计算时代	1
1.1.2 手工计算时代	1
1.1.3 机械和机电计算时代	2
1.1.4 电子计算时代	4
1.1.5 超级并行计算机现状及其发展	6
1.1.6 未来计算机技术发展展望	7
1.2 光计算概念及涵义.....	10
1.2.1 光学基本数字运算操作.....	11
1.2.2 光计算机系统结构基本模型.....	11
1.3 光学计算处理基础.....	12
1.3.1 全息光栅.....	12
1.3.2 光学傅里叶变换.....	14
1.3.3 阿贝成像原理与空间滤波.....	16
1.3.4 光学相关器.....	18
1.3.5 光学数字处理.....	19
参考文献	24
第 2 章 半导体多量子阱光电子逻辑器件	25
2.1 半导体多量子阱基本原理.....	25
2.1.1 微纳材料与量子局限效应.....	25
2.1.2 半导体多量子阱与自电光效应.....	27
2.2 自电光效应器件基本原理与特性.....	30
2.2.1 如何实现自电光效应.....	30
2.2.2 二极管偏置自电光效应器件实现双稳态.....	32
2.2.3 对称自电光效应器件.....	33
2.2.4 对称自电光效应器件实现逻辑运算.....	34
2.3 多量子阱调制器的优化及特性.....	36

2.3.1	反射型调制器	36
2.3.2	非对称 F-P 反射型调制器	37
2.3.3	多量子阱调制器性能	39
2.4	面阵集成自电光效应阵列器件	43
2.4.1	多量子阱调制器和电子电路的集成—灵巧像素	43
2.4.2	多量子阱空间光调制器	44
2.5	总结及展望	46
	参考文献	48
第 3 章	光计算中的微型光源	51
3.1	概述	51
3.2	侧面发射光电子器件	52
3.2.1	LED 与 LD	52
3.2.2	功能光互连与半导体光源的发展	59
3.3	LED 及 LD 模式垂直表面发射光源的结构及原理	62
3.3.1	LED 模式垂直表面发射光源结构和功能特点	62
3.3.2	LD 模式垂直表面发射光源初步	64
3.3.3	垂直表面发射光源的集成	64
3.4	VCSELs 激光器	66
3.4.1	VCSELs 的结构	66
3.4.2	VCSELs 特性	72
3.4.3	VCSELs 的优化设计	76
3.4.4	VCSELs 的进展及趋势	78
3.5	微型激光器的应用	80
3.5.1	光学逻辑器件	80
3.5.2	串行—并行数据转换	83
3.5.3	并行光数据连接	84
3.6	总结及展望	85
	参考文献	86
第 4 章	微光学与衍射光学元件	88
4.1	引言	88
4.2	微光学元件设计	90
4.2.1	几何光学设计	90
4.2.2	设计的标量分析	94
4.2.3	设计的矢量分析	95

4.3	微光学元件的加工技术	96
4.3.1	离子交换制备技术	97
4.3.2	利用相位掩膜的模拟光刻蚀技术	98
4.3.3	电子束纳米光刻制造技术	100
4.4	平面微透镜阵列及其应用	101
4.4.1	膨胀结构的平面微透镜	101
4.4.2	微透镜阵列应用	102
4.5	衍射光学元件的理论基础	103
4.5.1	线性闪耀光栅	104
4.5.2	衍射透镜	106
4.5.3	衍射效率	108
4.6	二元光学元件	109
4.6.1	二元光学元件的设计	109
4.6.2	二元光学元件的制作	109
4.6.3	二元光学元件的应用	110
4.7	总结及展望	113
	参考文献	114
第5章	光学存储器件	116
5.1	概述	116
5.2	双光子吸收原理及其应用	117
5.2.1	双光子过程	117
5.2.2	利用双光子过程进行3D读写	119
5.3	光折变效应及空间光调制器	125
5.3.1	光折变效应及光折变晶体	125
5.3.2	光折变光寻址空间光调制器	129
5.3.3	光折变空间光调制器的图像操作	135
5.4	光学全息存储	139
5.4.1	光学全息存储概述	139
5.4.2	光学体全息存储	140
5.5	近场光学存储	145
5.5.1	超分辨近场结构光存储概述	145
5.5.2	超分辨存储实现的基本原理	147
5.5.3	超分辨掩膜的近场光学特性	150
5.6	光学存储器件展望	152

参考文献	153
第 6 章 并行光互连	155
6.1 概述	155
6.2 光交换与光互连网络初步	155
6.2.1 光交换技术简介	155
6.2.2 光互连网络技术简介	160
6.3 全混洗变换的基本理论与分析	161
6.3.1 PS 变换的基本理论	161
6.3.2 二维全混洗变换的理论	170
6.3.3 PS 及 FPS 变换的实现方法	173
6.4 微光学元件实现全混洗变换	179
6.4.1 微闪耀光栅阵列实现左混洗变换	180
6.4.2 微闪耀光栅实现 RPS 和 IPS 混洗变换	185
6.4.3 微闪耀光栅面阵实现二维全混洗变换	188
6.5 采用微光学元件的光互连模块	194
6.5.1 微光学元件在 Omega 光互连网络中的应用设计	194
6.5.2 利用微光学元件设计全交叉光网络模块	199
6.5.3 利用微光学元件构建二维榕树网络	206
6.5.4 微闪耀光栅解复用器与分束器设计	214
6.6 总结及展望	218
参考文献	221
第 7 章 光缓存与全光同步技术前沿	223
7.1 概述	223
7.2 基于慢光原理的光学缓存与同步	226
7.2.1 慢光基本原理	226
7.2.2 慢光技术介绍	227
7.3 光缓存与同步技术展望	232
参考文献	232

Contents

Chapter 1 Summary of Optical Computing Technology	1
1.1 Phylogeny and trend of computing	1
1.1.1 Primal computing age	1
1.1.2 Handwrought computing age	1
1.1.3 Mechanical and electromechanical computing age	2
1.1.4 Electronic computing age	4
1.1.5 Status and trend of super parallel computer	6
1.1.6 Prospect of future computer	7
1.2 Concept of optical computing	10
1.2.1 Basical operation of optics for computing	11
1.2.2 Basic models for optical computer framework	11
1.3 Background in optical operation	12
1.3.1 Holographic Grating	12
1.3.2 Optical Fourier transform	14
1.3.3 Abbe imaging principle and spatial filtering	16
1.3.4 Optical correlator	18
1.3.5 Optical numerical processing	19
References	24
Chapter 2 Semiconductor MQWs Photoelectronic Logic Devices	25
2.1 Basical principle of semiconductor MQWs	25
2.1.1 Micro-and Nano-materials and quantum limited effect	25
2.1.2 Semiconductor MQWs and self-electro-optic effect	27
2.2 Principle and properties of SEEDs	30
2.2.1 How to achieve self-electro-optic effect	30
2.2.2 Diode-biased SEEDs to achieve bistability	32
2.2.3 Symmetry SEEDs	33
2.2.4 Symmetry SEEDs to achieve Boolean operation	34
2.3 Optimization and characteristics of MQWs modulator	36

2.3.1	Reflective SEEDs modulator	36
2.3.2	Asymmetry reflective F-P SEEDs modulator	37
2.3.3	Performance of MQWs SEEDs modulator	39
2.4	Flat-integration of SEEDs	43
2.4.1	Smart pixels	43
2.4.2	MQWs spatial light modulator	44
2.5	Summary and prospect	46
	References	48
Chapter 3	Minitype Light Source for Optical Computing	51
3.1	Introduction	51
3.2	Wedge emitting photoelectric elements	52
3.2.1	LED and LD	52
3.2.2	Functional optical interconnect and semiconductor light source	59
3.3	Structure and principle of LED and LD mode vertical-to-surface transmission light source	62
3.3.1	LED mode vertical-to-surface transmission light source	62
3.3.2	LD mode vertical-to-surface transmission light source	64
3.3.3	Integration of vertical-to-surface transmission light source	64
3.4	VCSELs	66
3.4.1	Structure of VCSELs	66
3.4.2	Characteristics of VCSELs	72
3.4.3	Optimum design of VCSELs	76
3.4.4	Current and trend of VCSELs	78
3.5	Applications of Minitype-laser	80
3.5.1	Optical logic elements	80
3.5.2	Serial-parallel data transform	83
3.5.3	parallel optical data link	84
3.6	Summary and prospect	85
	References	86
Chapter 4	Micro-and Diffractive Optical Elements	88
4.1	Introduction	88
4.2	Design of micro-optical elements	90
4.2.1	Geometric optical design	90

4.2.2	Scalar analysis for design	94
4.2.3	Vectoranalysis for design	95
4.3	Fabrication technology for micro optical elements	96
4.3.1	Ion exchange	97
4.3.2	Analog light etching with phase mark	98
4.3.3	Electron beam nano-fabrication	100
4.4	Planar microlens array	101
4.4.1	Swelled planar microlens	101
4.4.2	Application of planar microlens array	102
4.5	Theory foundation of diffractive optical elements	103
4.5.1	Linear blazed grating	104
4.5.2	Diffractive lens	106
4.5.3	Diffractive efficiency	108
4.6	Binary optical elements	109
4.6.1	Design of binary optical elements	109
4.6.2	Fabrication of binary optical elements	109
4.6.3	Application of binary optical elements	110
4.7	Summary and prospect	113
	References	114
Chapter 5	Optical Storage	116
5.1	Introduction	116
5.2	Principle and application of two-photon interaction	117
5.2.1	Two-photon interaction	117
5.2.2	Two-photon interaction to achieve 3D storage	119
5.3	Photorefractive effect and spatial light modulator	125
5.3.1	Photorefractive effect and crystals	125
5.3.2	Optically addressed photorefractive SLM	129
5.3.3	Photorefractive SLM to perform optical storage	135
5.4	Opticalholographic storage	139
5.4.1	Introduction	139
5.4.2	Optical volume holographic storage	140
5.5	Near-field optical storage	145
5.5.1	Introduction to super-resolution near-field structure optical storage	145

5.5.2	Principle of super-resolution near-field structure optical storage	147
5.5.3	Near-field optical characteristics of super-resolution thin film	150
5.6	Summary and prospect	152
	References	153
Chapter 6	Parallel Optical Interconnections	155
6.1	Introduction	155
6.2	Optical switch and interconnection	155
6.2.1	Brief of optical switch technology	155
6.2.2	Brief of optical interconnection	160
6.3	Fundamental of perfect shuffle switch network	161
6.3.1	Basic theory for perfect shuffle switch	161
6.3.2	Two-dimension perfect shuffleswitch theory	170
6.3.3	Implement method for PS and FPS switch	173
6.4	Implement perfect shuffle switch	179
6.4.1	Micro-blazed grating array to achieve left shuffle switch	180
6.4.2	Micro-blazed grating array to achieve RPS and IPSswitch	185
6.4.3	Micro-blazed grating array to achieve 2D perfect shuffle switch	188
6.5	Optical interconnections based on micro optical elements	194
6.5.1	Omega optical interconnection with micro optical elements	194
6.5.2	Crossoveroptical interconnection with micro optical elements	199
6.5.3	Banyan optical interconnection with micro optical elements	206
6.5.4	Demultiplexer based on micro-blazed grating	214
6.6	Summary and prospect	218
	References	221
Chapter 7	Optical buffer and full-opticalsynchronization	223
7.1	Introduction	223
7.2	Optical buffer and full-optically synchronizationbased on slow light	226
7.2.1	Principle of slow light	226
7.2.2	Introduction to slow light	227
7.3	Summary and prospect	232
	References	232

第 1 章 光计算技术概述

1.1 计算发展史及发展趋势

要了解和把握光计算技术及其相关硬件的发展现状、发展趋势和未来,有必要对历史长河中的计算发展史有所了解。

迄今为止,按照时间顺序划分,计算发展经历了原始计算时代、手工计算时代、机械计算时代、机电计算时代和电子计算时代。

1.1.1 原始计算时代

大约 300 万年前,原始社会的人类以在绳子上打结的方式来记数,逐渐建立起数的概念。随着数的概念逐步抽象,实现了“象”和“数”之间的互相转换,开始出现了数的计算。计算需要借助一定的工具来进行,除了结绳,还有人的双手十指计算,石块、木块计算等,如图 1.1 所示。其中,人类最初的计算工具就是人类的双手十指,用掰指头的方法算数,并沿用至今,该计数方法也被认为是目前人们最熟悉的十进制的主要来源之一。但是,这些实现计算的方法只局限于对数量的运算和统计,没有真正意义上的专门计算工具。

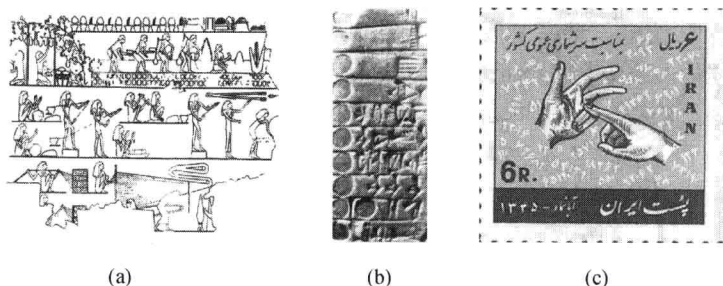


图 1.1 原始计算形式

(a) 公元前 3000 年古埃及结绳计数记载; (b) 公元前 2000 年美索不达米亚人泥板计数记载;
(c) 伊朗邮票中的手指计数记载。

1.1.2 手工计算时代

真正意义上的专门计算工具出现在手工计算时代,可实现更复杂计算的计算,满足文明进步对计算日益提高的要求。