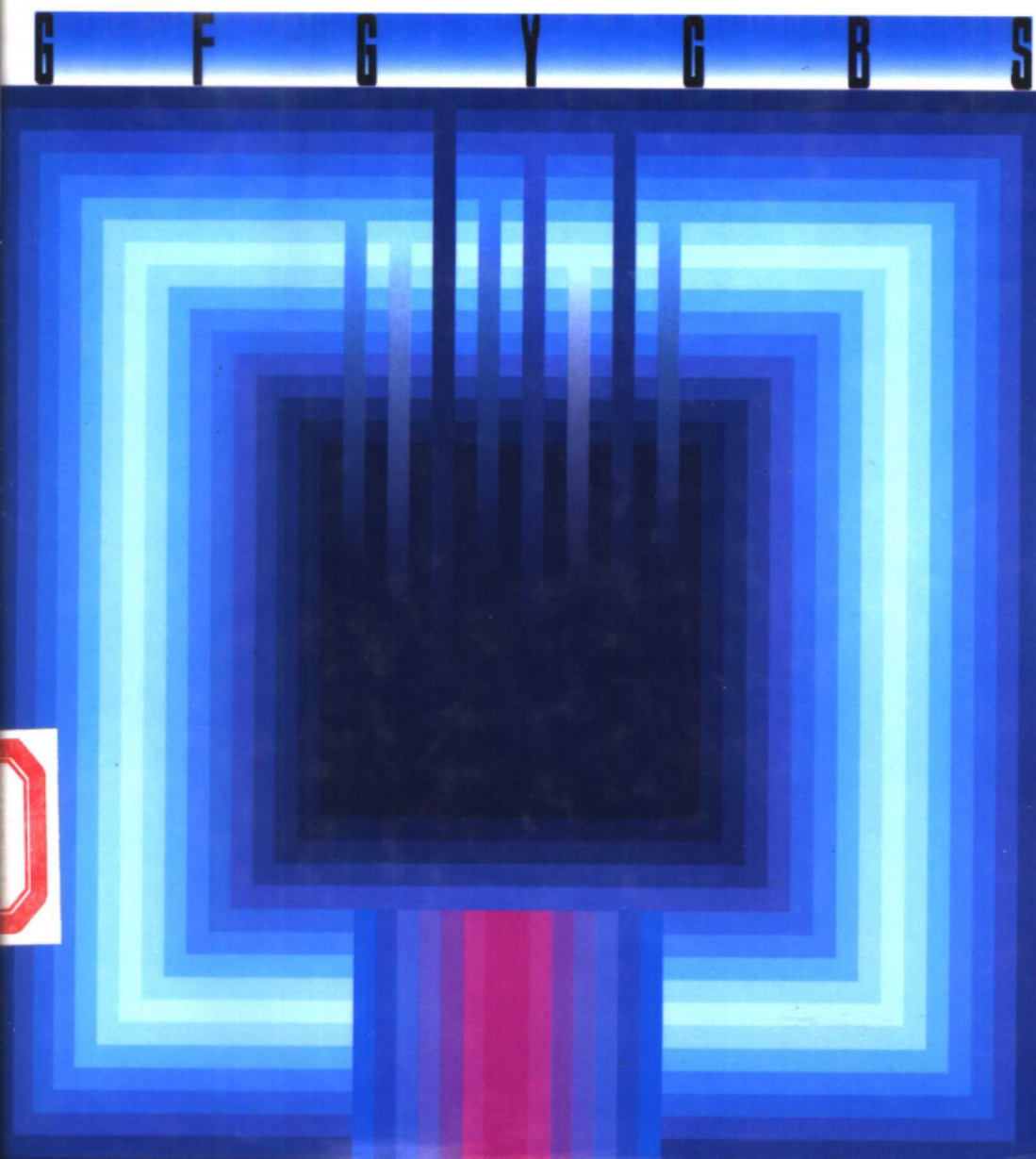


空间光调制器及其应用

李育林 傅晓理 著



空间光调制器及其应用

李育林 著
傅晓理

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

空间光调制器及其应用/李育林, 傅晓理著. —北京:
国防工业出版社, 1996. 5

ISBN 7-118-01596-2

I. 空… I. ①李… ②傅… II. 光调制器 N. TN761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 03540 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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12¼ 317 千字

1996 年 5 月第 1 版 1996 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 22.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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

HAC 48/04

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,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工业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 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允

曾 铎

秘 书 长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序) 刘 仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯 迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

序

近年来,光学、光电子学领域出现的一系列崭新的成就为世人所瞩目,其中空间光调制器、半导体激光器和微光学元件及其应用都在突飞猛进地发展;尤其是各类空间光调制器,因其具有可实时地在空间上调制光束的重要功能而成为构成实时光学信息处理、光计算和光学神经网络等系统的关键器件。

“空间光调制器及其应用”这一新兴的高技术领域已经引起了各先进科学技术国家的高度重视。在过去十年间,国际光学工程学会(SPIE)和美国光学学会(OSA)先后组织了十余次有关这一专题的学术讨论会,充分显示了这一学科的进展速度和活跃的生命力。在这期间,许多相关技术的成长和器件应用的扩展,也有力地推动了空间光调制器技术的研究。例如,在液晶器件被普遍推广应用(主要在图象显示方面)的同时,人们又开发了铁电液晶、多量子阱、磁光器件及光折变和有机非线性材料的器件等空间光调制器。随着这类器件的发展,实时图象相关、光互连和关联存储以及光学神经网络的小型化、实用化等的实现已成为可能。

本书比较系统和全面地阐述了各类空间光调制器的工作原理、结构、材料特性、器件设计方法、工艺和实验技术。既包含了作者及其研究小组在这一领域多年来的工作经验和科研成果,也有选择地吸收了国内外具有代表性的最新成就;而且注重介绍制作工艺、性能测试和一些典型的系统应用。这本专著涉及到光学、光电子学中许多前沿性的科技问题,内容丰富,不仅可供同行学者借鉴,进一步探讨使用低功耗、响应快的材料,深入研究新型器件结构,开拓应用范围;而且对从事相关领域教学、科研和开发的读者

也会大有裨益。

中国科学院院士

A handwritten signature in black ink, appearing to read '胡光' (Hu Guang), written in a cursive style.

1996年4月18日

前 言

空间光调制器是应用于光学、光电混合系统进行光互连、光学相关、光计算、模式识别、图象处理和显示技术等诸方面的关键器件。实际上它是构成所有实时光学数据处理的基本积木式构件或主动功能元件。

近几年来随着微电子和光电子集成技术的发展以及两者的紧密结合,大大地促进了新型空间光调制器的发展,例如多量子阱、铁电液晶和磁光器件以及聚合物材料的器件都朝着实用化方向迈进了一步。特别是占有主导地位并已经实用化的各种液晶空间光调制器的快速发展,是对实时光学信息处理成功的应用,而且表现出很大的市场前景。

当前以材料研究、器件设计和制造以及系统的应用形成了整个空间光调制器研究和发展的主体。

为了适应我国光学、光电子学科迅速发展的需要,给广大从事这一方面研究和应用的工作者介绍这一新技术,我们撰写了这本专著。全书共分十二章,第一章概括地介绍了空间光调制器的基本概念、采用的主要材料的性能和效应,第二、三章介绍了有关液晶的各类空间光调制器和应用;继后各章分别介绍了变形薄膜空间光调制器、微通道板空间光调制器、磁光器件、光折变材料和器件,铁电陶瓷器件、多量子阱器件等,最后两章介绍了空间光调制器的性能、测试及其在不同光学系统中的实际应用。

本书编写过程中着重从工程实用的角度出发,考虑到内容的系统性、全面性,特别注意介绍各类器件的制作工艺,操作原理和一些典型应用。书中不仅介绍了该研究领域国际上的最新成就,而且叙述了我们多年来的工作经验和科研成果。

本书出版之际,对国家自然科学基金委员会信息科学部、国家高技术计划光电子领域和自动化领域在“七五”和“八五”期间对我们在该学科的研究所给予的资助,以及参加研究的工作人员和许多好友在各方面所给予的支持,在书的编写过程中得到了中国科学院院士、中国光学学会主席、国际光学学会副主席、南开大学母国光教授的热情关心和支持,并提出了许多宝贵意见,我们一并表示衷心的感谢!在书稿的文字整理和插图工作方面,胡菊英同志做了大量工作,付出了艰苦的劳动,亦表谢意!

本书能够撰著成书并给予出版,是由于获得国防科工委国防科技图书出版基金的资助,在此深表谢意。

本书包括的范围较广,涉及的专业内容较多,由于作者水平有限,书中的问题在所难免,我们热忱希望读者批评指正。

作 者

1995 年 3 月

目 录

第一章 空间光调制器的基本功能和分类	(1)
1.1 主要材料和效应	(1)
1.2 空间光调制器工作特性的比较	(7)
1.3 空间光调制器的分类	(8)
1.4 空间光调制器的主要功能	(13)
参考文献	(14)
第二章 光寻址液晶光阀	(16)
2.1 液晶的基本性质	(17)
2.2 CdS-LCLV 的结构和制备工艺	(26)
2.3 器件的操作原理	(35)
2.4 LCLV 的性能测试	(39)
2.5 硅-液晶光阀(Si-LCLV)	(45)
2.6 液晶空间光调制器的非晶硅光导体	(50)
参考文献	(53)
第三章 电寻址的液晶光阀	(55)
3.1 电荷耦合器件寻址的液晶光阀(CCD-LCLV)	(55)
3.2 液晶电视显示器件	(58)
3.3 阴极射线管耦合液晶光阀(CRT-LCLV)	(65)
参考文献	(68)
第四章 变形薄膜空间光调制器	(70)
4.1 变形反射镜器件(DMD)	(72)
4.2 薄膜光调制器	(92)
4.3 光塑性空间光调制器	(99)
参考文献	(108)
第五章 微通道板空间光调制器	(111)
5.1 MSLM 的工作原理及特点	(111)

5.2 MSLM 中的电光调制	(114)
5.3 MSLM 中二次电子发射	(119)
5.4 MSLM 的材料及典型的性能参数	(127)
参考文献	(132)
第六章 磁光空间光调制器	(135)
6.1 磁光空间光调制器的基本结构和工作原理	(136)
6.2 MOSLM 的透过率和对比度	(141)
6.3 磁光薄膜、寻址电极及多灰级 MOSLM 的设计	(150)
6.4 MOSLM 的材料及特性	(157)
参考文献	(164)
第七章 光折变空间光调制器	(165)
7.1 一般光折变器件的原理	(165)
7.2 被动光折变器件	(168)
7.3 主动器件	(170)
7.4 泡克耳斯读出光调制器(PROM)	(174)
7.5 PRIZ 空间光调制器	(181)
7.6 光折变器件的基本应用举例	(187)
参考文献	(198)
第八章 硅驱动电路与铁电陶瓷联合的灵巧型空间光 调制器	(201)
8.1 铁电陶瓷(PLZT)的特性	(201)
8.2 PLZT 空间光调制器	(203)
8.3 Si/PLZT 空间光调制器	(204)
参考文献	(215)
第九章 多量子阱空间光调制器	(217)
9.1 多量子阱空间光调制器的原理及设计	(218)
9.2 电寻址多量子阱空间光调制器	(230)
9.3 光控的多量子阱空间光调制器	(237)
9.4 自电光效应器件及其空间光调制器	(246)
9.5 双折射多量子阱空间光调制器	(255)
9.6 声光多量子阱空间光调制器	(261)
参考文献	(266)

第十章 其他几种重要的空间光调制器	(268)
10.1 TITUS 和 PHOTOTITUS 器件	(268)
10.2 全内反射空间光调制器	(273)
10.3 声光空间光调制器	(280)
10.4 显示器件和集成光学器件	(284)
10.5 空间光转播器	(287)
参考文献	(289)
第十一章 空间光调制器的性能、测试及使用	(291)
11.1 空间光调制器的性能	(291)
11.2 空间光调制器的测试	(298)
11.3 具有相位畸变的 SLMs 的使用	(305)
参考文献	(309)
第十二章 空间光调制器的应用	(310)
12.1 空间光调制器在实时光学相关器中的应用	(310)
12.2 空间光调制器在自适应光学及图象变换中的应用	(323)
12.3 空间光调制器在动态光互连中的应用	(330)
12.4 空间光调制器在并行逻辑及算术运算中的应用	(342)
12.5 空间光调制器在线性代数运算中的应用	(351)
12.6 空间光调制器在光学存储器及神经网络中的应用	(359)
参考文献	(373)

第一章 空间光调制器的基本功能和分类

空间光调制器(Spatial Light Modulators, SLMs)是指能将信息量加载于一维或二维的光学数据场上,以便有效地利用光的固有速度、并行性和互连能力,并在构成实时光学信息处理、光计算和光学神经网络等系统中作为基本的构造单元或关键的主动器件。这类器件可在随时间变化的电驱动信号控制下,或者在另外一种空间光强分布的作用下改变空间上光分布的相位、偏振、振幅(或强度)乃至波长,或是非相干光到相干光的转换等,因而被广泛地应用于光学/数字混合相关、自动模式识别和机器人视觉系统等方面的光电实时接口、光逻辑运算、阈值开关、高速互连、数据格式化、输入存储、输出显示等。

近年来,该器件的材料研究、器件设计和制造以及系统应用的三者联合,形成了整个空间光调制器研究和开发的主体,并愈来愈引起科技界的高度重视和浓厚兴趣。本章概括地阐述了空间光调制器常用的几种材料类型和效应,以及它的主要分类,以便对空间光调制器从整体上有个轮廓的了解。

1.1 主要材料和效应

对于某种空间光调制器选用什么材料,主要取决于该器件所采用的工作原理和方法,或者说是按其利用什么效应方法而选取具有该效应的材料,在此仅就目前常用的几类材料加以说明。

1.1.1 电光效应材料

一、液晶材料

液晶是使用最为广泛的一种电光效应材料。它是介于液体和晶体之间的一种新的物质状态,通常包括向列结构(N)、近晶结构(亦称蝶状结构)(S)和胆甾醇结构(Ch)三种类型,以及近几年发展起来的快速响应的各种铁电液晶,主要是近晶 C^* 相液晶(用作二元或三元态的调制),近晶 A^* 相液晶(具有连续灰级能力),胆甾醇型是负向单晶结构,更适合高反差的图象显示。其中最常用的向列相液晶的操作一般在电场作用下通过分子重新取向后的扭曲和光学双折射现象而形成光的调制,即所谓混合场效应。一般折射率变化 ΔN 与施加电压成正比,而与液晶层厚度成反比,即

$$\Delta N \approx \frac{V}{d} \quad (1-1)$$

式中 ΔN ——折射率变化量;

V ——电压;

d ——液晶层厚度。

同时分子重新取向后的扭矩与电压亦成正比,即

$$q \approx p \cdot E \quad (1-2)$$

式中 q ——分子扭矩;

p ——分子螺距矢量;

E ——场强。

二、克尔(Kerr)效应材料

克尔效应或者说电致双折射效应(二次电光效应),即外加电场产生的双折射与电场 E^2 成正比:

$$\Delta N = \lambda_0 K E^2 \quad (1-3)$$

$$\Delta \phi = 2KI \frac{V^2}{d^2} \quad (1-4)$$

式中 ΔN ——折射率变化量;

K ——克尔常数;

d —— 液晶层厚度；

$\Delta\phi$ —— 两光束位相差；

λ_0 —— 使用的光波波长。

常用的材料有：

硝基苯, KTN, PLZT [$\text{P}_{0.99}\text{La}_{0.02}(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})_{0.98}\text{O}_3$] 等。

三、泡克尔斯(Pockels) 效应

这种电光效应材料是电场产生的双折射与场强 E 成正比, 光束位相差为：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0^3 r_{ij} V \quad (1-5)$$

式中 r_{ij} —— 电光系数；

n_0 —— 晶体主折射率；

V —— 施加电压。

常用的材料有：

KDP, KD^*P , LiNbO_3 , KNbO_3 等。

1.1.2 磁光效应材料

一、法拉弟(Faraday) 效应

这是最常用的磁光材料(Magneto-Optic Materials), 即在外加磁场作用下, 光学性质通过极化发生变化的材料。一般为线偏振光沿外加磁场方向通过磁光单晶体时, 它的偏振方向发生旋转实现光强调制, 偏转角有下列关系：

$$Q_F = VBd \quad (1-6)$$

式中 Q_F —— 法拉弟旋转角；

V —— Verdet 常数；

B —— 磁场强度；

d —— 材料厚度。

二、科顿(Cotton-Mouton) 效应

此即二次磁光效应, 通常有下列关系：

$$\Delta N = K_m E^2 \quad (1-7)$$

式中 K_m ——磁光常数;

E ——电场强度。

磁光材料常用的有:

钇石榴石铁氧体 YIG, 镓钒石榴石 GGG(Grenat; Gadolinium-Gallium), LLC 等。

1.1.3 声光效应

声光晶体在声波作用下,产生折射光栅,使光束按布喇格条件偏转 2θ 角,光束的偏振角与声波波长成反比,即

$$2\sin\theta_B = \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1-8)$$

式中 θ_B ——布喇格(Bragg)衍射角;

λ ——光波波长;

Λ ——声波波长。

同时偏转角正比于声波频率 f , 由于 $\Lambda = V/f$, 这里 V 是声速, 当 θ 角很小时, $2\theta \approx \lambda f/V$ 。

常用的材料有:

LiNbO_3 , TeO_2 , PbMoO_4 , LiTaO_3 等。

1.1.4 光折变(Photorefractive)效应

光折效应亦即激光照射某种非线性材料(一般为掺杂晶体)而诱导折射率变化的过程,可由下式描述:

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{eff} m E_x \quad (1-9)$$

式中 Δn ——空间电荷调制的折射率变化量;

n_0 ——晶体主折射率;

γ_{eff} ——有效电光系数,由光折材料的电光张量决定;

E_x ——由光折材料性质和外加控制电压决定的空间电荷场;

m ——光栅条纹的调制度。