

赵达尊 张怀玉 编著

空间光调制器

kong jian

guang tiao

zhi

qi

● 北京理工大学出版社

(京)新登字149号

内 容 简 介

空间光调制器是实时光学信息处理、自适应光学和光计算等现代光学领域中的关键器件。在很大程度上,空间光调制器的性能决定了这些领域的实用价值和前景。

本书介绍液晶、电光、形变、声光、磁光、陶瓷、光折变、电吸收和量子阱等空间光调制器,对它们的工作原理、典型结构以及主要性能等进行了较详细的阐述。同时给出一些空间光调制器在光电信息处理、自适应光学和光计算等领域的应用实例。本书可作为高等院校光学和光电子专业的研究生和高年级本科生的教材,也可作为有关科技人员和管理人员的参考书。

空 间 光 调 制 器

赵达尊 张怀玉 编著

•

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

地质出版社印刷厂印刷

•

787×1092毫米 32开本 9.125印张 205千字

1992年2月第一版 1992年2月第一次印刷

ISBN 7-81013-449-3/TN·30

印数: 1—1500册

定价: 6.00 元

前 言

近20年来,国内外对空间光调制器进行了大量研究。到目前为止,已发展了六七十种不同类型的器件,举行过十多次专题性国际学术会议。空间光调制器的品种繁多,涉及到的学科范围、理论基础以及工艺技术都十分广泛,它们的结构和性能也各具特色。虽然现有的资料非常丰富,但是除了少数著作的个别章节给予简单的介绍之外,大多数资料都分散在数以千计的论文之中,使得不少读者在了解和使用这类器件时遇到了不同程度的困难。本书即是为了试图解决这一困难而编写的。

本书把各种空间光调制器归纳成几种类型。对每一种类型都先从基本原理出发进行讨论,然后列举一些典型器件的结构、工作方式和主要性能参数,最后通过实例介绍它们的应用概况。这样做的目的是,希望使具有一定物理光学、现代光学、电学和半导体知识的读者,能够借助于本书初步掌握有关空间光调制器的基本知识,为进一步了解、应用或研制这种器件奠定基础。

本书还注意介绍空间光调制器发展的新动态,在应用举例中也尽可能注意反映光信息处理和光计算中的一些新技术。

本书内容分为五章。第一章主要介绍空间光调制器的基本功能和性能参数等一般概念;第二、三、四章分别介绍研究较多、开发比较成熟的液晶光阀器件,普克尔斯效应器件

和表面形变器件；第五章介绍前面未能包括的声光、磁光、光折变效应、陶瓷、电吸收效应和量子阱等器件。在每一章的最后，都选列了一些与该章内容直接有关的参考文献，以供读者参阅。

北京理工大学魏光辉教授详细审阅了本书原稿，并提出了许多宝贵的建议，在此表示衷心感谢。本书的编写得到了国家教委博士点基金的部分支持。

由于作者的水平有限，书中难免出现错误或不妥之处，恳请读者见谅并提出宝贵意见。

作者 1990. 1

目 录

第一章 空间光调制器及其性能	1
一、空间光调制器概述	3
二、空间光调制器的功能	6
三、空间光调制器的技术指标和参数	11
四、国外已商品化的空间光调制器	20
参考文献	20
第二章 液晶光阀	23
一、液晶及其电光效应	23
二、几种液晶光阀器件	36
三、液晶光阀应用举例	63
四、铁电液晶光阀	75
参考文献	83
第三章 普克尔斯效应器件	87
一、晶体的普克尔斯效应	88
二、几种普克尔斯效应器件及其应用举例	115
参考文献	144
第四章 表面形变器件	147
一、表面形变器件的一般工作原理	148
二、连续-连续型表面形变器件	159
三、连续-分立型表面形变器件	179
四、分立-分立型表面形变器件	193
参考文献	205
第五章 其它类型空间光调制器	210
一、声光调制器	210

第一章 空间光调制器及其性能

随着国民经济、科学技术和国防建设的发展，对信息处理在容量上和速度上都提出了越来越高的要求。光学信息处理和光计算有处理速度快、信息流量大等许多特点，所以，它已成为现代光学中一个重要的研究领域。

光学信息处理系统的这些特点起因于它利用了光（光波）作为信息载体。首先，光波和其它电磁波一样有多个物理参量，例如振幅、位相、频率、偏振状态等，可以调制来携带信息。其次，光有极高频率，在可见光范围内可达 $3.9 \sim 7.5 \times 10^{14} \text{Hz}$ ，这就允许被传递的信号有极大的频带宽度。再有，光具有极短的波长和极快的传播速度，在可见光范围内波长为 $400 \sim 760 \text{nm}$ ，加上光波的独立传播原理，使得人们可以借助于光学系统，把分布在一个面上的二维信息以很高的分辨本领，并且几乎瞬时地传递到另一个面上去，为二维“并行”处理提供了条件。

关于并行处理的能力，可以通过一个例子来说明。假定需要将 10^6 个数据与另外 10^6 个数据一对一地相乘，为此可以采用图1—1所示的光学系统。其中， T_1 和 T_2 是两个透明片，它们上面各有 10^6 个像素^①，按 $10^3 \times 10^3$ 的矩阵形式排列。 T_1 上各个像素的透射率分别正比于 10^6 个被乘数， T_2 上各个像素的透射率分别正比于 10^6 个乘数。透镜L使 T_1 成像在 T_2 上，

① 这里，“像素”的含义是透明片上可以独立控制透射率的最小面积单元。

即， T_1 中的每个像素都成像在 T_2 中的对应像素上。于是，只要用光强均匀的光波 S 照明 T_1 ，在 T_2 各个像素处的输出光强就将正比于所要计算的乘积。如果不计 T_1 和 T_2 的制作时间，上述乘法运算几乎是在瞬间同时完成的。

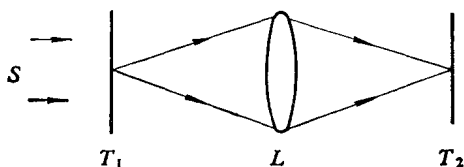


图 1—1 一个光学计算系统

从这个例子可以看出，光波的极短波长在这里起了重要作用。如果 L 是一个相对孔径为 $D/f=1/3$ 的理想成像透镜， D 和 f 分别是 L 的直径和焦距，所用光波波长 λ 为600nm， T_1 、 T_2 分别与 L 有 $2f$ 的距离，则 T_2 上的衍射像斑大小为 $1.22 \times 2f \times \lambda/D \approx 4.4\mu\text{m}$ ，一维分辨本领达到每毫米230个像素。为了实现 10^6 个数的相乘， T_1 和 T_2 的平面尺寸只需要有 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的大小。同时我们还看到，如此大量信息的传递只借助于一个透镜便能完成，这与电子处理系统利用导线来传递信息是大不相同的。此外，通过适当的光路安排，在传递信息的同时，还可以实现某些运算，例如傅里叶变换等。

然而，要充分发挥光学信息处理和光计算的潜力，还存在不少有待解决的技术问题。其中最突出的是，处理系统需要有实时的或快速的二维输入、输出传感器，以及具有运算功能的二维器件。显然，像透明片、乳胶底板这样的“传统”光学传感器是不适用的。在图1—1所示例子中，如果考虑到制作透明片 T_1 和 T_2 所花费的时间，则该乘法运算系统的高速度将变得几乎没有什么意义。同样，如果利用乳胶底板记

录 T_2 各像素处的输出光强，然后通过逐点测量底板的光密度来得到运算结果，也将使得整个处理因周期太长而不可接受。再有，虽然利用乳胶底板也可以做一些特殊的运算，例如，对比反转、对数或指数变换及阈值运算（与半色调屏配合）等，但是，即使不考虑这些处理的精度，也不考虑处理种类的有限和灵活性的局限，单就处理时间而言，就足以使它们难以在信息处理中得到实用。空间光调制器就是为了克服这些困难而研究、发展起来的器件。

一、空间光调制器概述

空间光调制器的英文名称是Spatial Light Modulator，在文献上常缩写成SLM^①。顾名思义，它是一种对光波的空间分布进行调制的器件。一般地说，空间光调制器含有许多独立单元，它们在空间上排列成一维或二维阵列，每个单元都可以独立地接受光学信号或电学信号的控制，并按此信号改变自身的光学性质，从而对照明在其上的光波进行调制。在本书中，上述独立单元称为空间光调制器的“像素”；控制像素光学性质的信号称为“写入信号”。当该信号是光学信号时，也称为“写入光”。照明整个器件并被调制的光波，称为“读出光”；经过空间光调制器后的出射光波称为“输出光”。

形象地说，空间光调制器可以看作是一块透射率或其它光学参数分布能够按照需要而快速调节的透明片^②，其示意

① 空间光调制器还有一些其它名称，如光学调制器，光阀，可控透明片和动态滤波器等等。近年来，除了液晶光阀等少数器件之外，国际上已逐渐统一称为空间光调制器。

② 虽然，有不少空间光调制器实际上是以反射形式工作的，但若不考虑光路转折等细节问题，其工作过程与透射形式的空间光调制器没有本质上的差别。

图见图1—2。图中SLM表示空间光调制器，其上各像素的光学性质由写入信号 W 控制。 I_R 是读出光，当它通过SLM时，其光学参量如振幅、位相、频率或偏振态，受到SLM像素的调制，结果变成一束具有新的光学参量空间分布的输出光 I_O 。

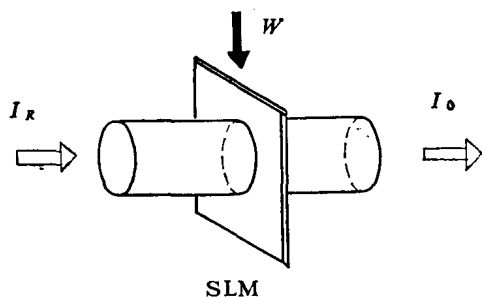


图 1—2 空间光调制器示意图

显然，写入信号应该含有控制调制器各个像素的信息。把这些信息分别传送到相应像素位置上去的过程，称为“编址”。如前所述，写入信号可以是光学信号，也可以是电学信号。当它是光学信号时，通常表现为一个二维的光强分布，例如一幅图像的光强分布。这时，只要利用适当的光学系统，把这个光强分布成像在空间光调制器的像素平面上，便可以使写入信号的像素与调制器的像素在空间上一一对应，实现编址。这种编址方式称为“光学编址”。因为在时间上所有像素的编址是同时完成的，所以光学编址是一种并行编址方式。其特点是编址速度最快，而且像素的大小原则上只受编址光学成像系统分辨率的限制。

但是，采用光学编址时，一方面要防止写入光直接进入输出光束；另一方面要防止读出光对像素光学性质的影响，

以免发生相互干扰。通常的措施是把空间光调制器设计成反射式的，即输出光由读出光在调制器上反射而形成。这时，输出光与读出光位于调制器的同一侧，而写入光从调制器的另一侧输入。当调制器内部含有一个光隔离层时，两侧的光波便不会互相干扰。另一种措施是，令写入光和读出光的波长不同，空间光调制器像素的光学性质只对写入光波长敏感，对混杂在输出光中的写入光成分则可用滤色片去除。

当写入信号是电信号时，需采用“电学编址”方式。因为电信号是一个时间序列，原则上只能依次地输送到调制器的各个像素上去，所以电学编址是一种“串行编址”的方式。电学编址有三类：第一类是利用布置在空间光调制器表面的两组正交栅条状电极，用逐行扫描的方法，使写入信号作用到相应的像素上去。这类编址也称作“电极编址”或“矩阵编址”。第二类是利用射线束，例如电子束或激光束的聚焦和偏转，对各像素进行逐点扫描，达到编址的目的。第三类适用于声光调制器，利用电-声传感器把电信号转化成超声信号，使读出光受到超声波的作用而被调制。电学编址或串行编址在速度上受到扫描时间周期的限制，像素大小受到电极制作工艺、射线束聚焦斑大小以及超声波波长的限制。它的优点是能够直接用电信号来控制输出光的振幅或位相，便于和计算机连接，也便于和电子模拟信号，例如电视摄像机信号或雷达回波信号相连接。

由以上介绍的各类编址方式可以看出，除了矩阵编址外，空间光调制器的各个像素并不一定要在物理上一个一个地分割开来，只是由于调制器材料的分辨率和写入图像（或写入信号）的空间分辨率都是有限的，调制器才被分成一个的像素。

在写入信号的作用下，空间光调制器各像素的光学性质将发生相应的变化。这里所指的光学性质可以是透射率、反射率、折射率、双折射性质、旋光性质和表面变形等等中的一个或几个。引起光学性质变化的机制主要有，晶体、液晶、有机聚合物或其它材料的各种电光效应、磁光效应、声光效应，以及静电吸引、电致伸缩和光弹性效应等等。

图1-2中的读出光可以是相干光波，也可以是非相干光波。应用于光信息处理，特别是相干光处理时，常常采用相干光波。另一方面，根据具体的应用要求，读出光本身可以携带信息，即，其波面上的振幅或位相分布是不均匀的；也可以不携带信息，即，它是一个均匀平面波。当然，输出光将携带写入信号和读出光的综合信息，其相干性与读出光的相干性相同。

空间光调制器的种类很多，估计已有六七十种。这些空间光调制器既可以按前述的编址方式或结构来分类，也可以按它们的材料或工作原理来分类。以下各章将按工作原理的分类进行具体讨论。本章仅介绍空间光调制器的功能和各项性能指标的表达方式。

二、空间光调制器的功能

空间光调制器的基本功能，就是提供实时或准实时的一维或二维光学传感器件和运算器件。在介绍它们可能实现的各种具体功能之前，首先需要说明，光学信息处理和光计算系统对传感、运算器件功能的要求是多种多样的。空间光调制器只对其中的一部分要求（往往是关键要求）是必不可少的。换言之，有一些要求是空间光调制器不能实现的，也有一些要求是空间光调制器和其它器件都可以实现的。例如，

空间光调制器不能作为系统的最终输出传感器，这只能由高分辨电视摄像机，电荷耦合器件阵列，各类光电二极管阵列等器件来承担。又如，虽然发光二极管阵列或激光二极管阵列的分辨率不高，而且也不能直接被前一级处理的输出光调制，但由于它们使用方便，所以还是经常被用作非相干处理系统的输入传感器。再如，我们没有把具有很强的逻辑运算能力和存储能力的光双稳阵列器件列入空间光调制器，也没有把一般的像增强器（包括二次发射微通道板）当作空间光调制器。

下面具体介绍空间光调制器可能实现的功能，同时举例说明其实现方法。

1. 输入传感器

通常，待处理的原始信息并不具有光学处理系统所要求的输入形式，因此，需要利用输入传感器，把它转换成能为处理系统接受的形式。空间光调制器作为输入传感器时，能够实现以下几类转换。

（1）电-光转换和串行-并行转换

如果待处理的信息来自摄像机或计算机的模拟输出，它往往是一个随时间变化的电信号。为了将该信号输入到光学处理系统中去，需要用到空间光调制器。其作用是，一方面把按时间先后串行供给的电信号，转换成一个在空间以一维或二维阵列形式排列的控制信号；另一方面又把阵列中每个像素上的控制信号，转换成能调制读出光波的光学性质的变化。

根据本章第一节介绍，电极编址或射线束编址的空间光调制器恰好具有这样的转换功能，如图 1—3 所示。令读出光 I_R 是一束光强均匀的光波，写入信号 W 是串行的电信号，

它通过电极编址或控制扫描射线束的强度，使空间光调制器 SLM 相应像素的透射率发生变化。这样，SLM 的输出光 I_o 就以光强的空间分布形式携带了输入信息，进入处理系统 PS。在图 1—1 所示的例子中，如果分别用两个这样的 SLM 代替透明片 T_1 和 T_2 ，则透明片的制作便可以实时化。

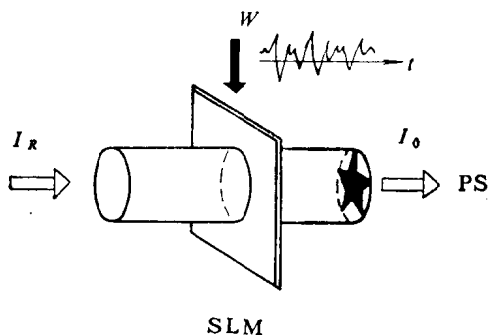


图 1—3 串行编址空间光调制器

(2) 非相干-相干转换

能实现非相干-相干转换的空间光调制器在实时处理系统中十分重要。因为实时处理系统的处理对象往往来自一个实际的物体，一般的光学系统只能使它形成一个非相干的图像。但是，处理系统却常常要求输入一个相干图像，以便进行频域处理，或者进行基于干涉、衍射效应的处理。

令图 1—2 中的读出光是一束振幅均匀的相干平面波，写入信号 W 是一个由非相干光组成的二维图像，则当 SLM 采用光学编址方式，并且能把写入光的照度分布转换成各像素的振幅透射系数时，其输出 I_o 便是一束携带有写入图像信息的相干光，如图 1—4 所示。

(3) 波长转换

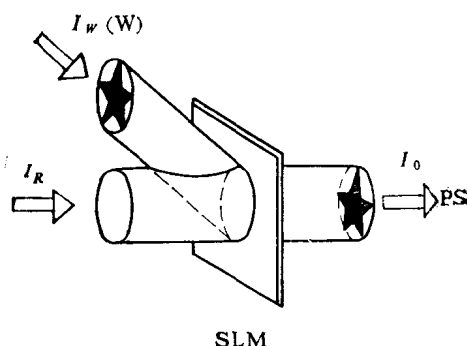


图 1—4 光学编址空间光调制器

在一些情况中，处理对象是某一波长的光学图像，而处理系统却要求另一种波长的光波作为信息载体。这时便需要用能实现波长转换的输入传感器。例如，如果处理对象是一幅红外图像，但处理系统内各元件的光谱特性不适合于透射或接收红外光，于是就需要用红外-可见转换器件。又如，为了将某些运算器件的输出与输入隔离，要求输入光与输出光有不同的波长。如果需要连续使用这类器件，就要在它们之间加入波长转换器件。

令图1—4中的 I_R 为均匀单色光，其波长等于所要求的输出光波长，当用待转换的图像作为光学写入信号时，便可以获得所需波长的输出 I_0 。

2. 图像增强

当输入图像比较微弱，或者在信息处理过程中图像信号变弱时，可以利用空间光调制器予以增强。它与普通像增强器在功能上的主要区别是，前者可以获得增强的相干光图像，而后者的增强像则是非相干的。

令图1—4中的 I_R 为一束均匀强光，只要较弱的光学写入

信号 W 仍足以使空间光调制器的像素起到相应的变化，便可以获得较强的输出图像 I_0 。

如有必要，可以用一个空间光调制器同时实现非相干-相干转换，波长转换和图像增强等几种功能。

3. 运算

(1) 乘法运算

令图1—2中的读出光 I_R 本身携带有一幅二维图像信息，用光学的或电学的写入信号 W 去控制空间光调制器各像素的透射率，则输出信号 I_0 在空间光调制器表面上的光强分布便等于 I_R 和信号 W 的乘积。在图1—1所示例子中， T_2 就可以用这种空间光调制器来替代。该例中的 W 是电学信号，它通过矩阵编址来控制像素的透射率。

(2) 对比反转

在减法运算或逻辑“非”运算中，需要使二维图像的对比反转。亦即，需要使输入光空间分布中亮的地方变暗，暗的地方变亮。

虽然空间光调制器像素的透射率是受写入信号控制的，但这并不意味着写入信号强，透射率就必然大。通过适当的设计，可以把这种关系颠倒过来。例如，当写入信号控制的光学参数是像素材料的双折射性质时，往往需要利用一对位于像素材料两侧的偏振器，把双折射性质转换成透射率分布。如果两偏振器的透光轴方向平行，则透射率随写入信号增大而增加。容易理解，只要使两个偏振器的透光轴方向正交，便能得到透射率随写入信号增大而减小的结果，即实现了对比反转。

(3) 量化操作和阈值操作

量化操作是一种非线性运算。它把连续变化的写入信号

变换为若干分立的“挡值”输出。也就是说，它把写入信号分成若干个取值区域，只要写入值属于其中某一个区域，便会给出一个确定的输出值。最简单的量化操作是使写入信号量化为（0，1）两种输出，亦即，给定一个阈值，当写入值超过此阈值时，输出为“1”（例如为一个恒定的光强）；当写入值小于此阈值时，输出为“0”（例如无输出光）。这种操作称为阈值操作。量化操作和阈值操作在数字计算中十分重要，它既可以用来实现模拟-数字转换，例如，把一个有多灰度等级的图像按各个灰度级别分解成多个子图像；也可以用来恢复由于多次处理而逐渐失真的数字信息。

用于实现阈值操作的空间光调制器，其像素透射率对写入信号应具有很陡峭的响应特性。例如，当写入信号小于某一值时，透射率基本为零；当写入信号略为超过这个值时，透射率很快就达到极大（饱和）值。

（4）其它逻辑运算

实现数字计算的基本单元是各种逻辑运算单元。它们包括与（AND），或（OR），非（NOT），异或（XOR）等等运算。这些运算将在介绍具体器件时讨论。

4. 波面形状控制

在自适应光学中，需要把已畸变的波面恢复成无畸变的波面。为此，可用探测到的波面畸变信号去控制空间光调制器的折射率或表面形状，用待校正波面作为读出光。读出光经过空间光调制器之后，波面上各点的位相受到了调制，使输出光的波面恢复为预期的波面形状。

三、空间光调制器的技术指标和参数

空间光调制器的性能需由多个指标和参数来描述，用以

分别说明器件的工作方式、技术性能以及重量、体积等特性。

对于某一种空间光调制器而言,由于受到工作原理、所基于的物理效应以及材料、结构等方面的限制,不可能同时使所有指标都达到最佳。所以,应该根据具体应用场合的要求来选择最适用的空间光调制器。

1. 工作方式指标

(1) 透射型或反射型

透射型空间光调制器的读出光和输出光分别位在器件的两侧,如图1—2所示。一般可以用它代替普通透明片使用,光路不需要有很大的变动。反射型空间光调制器的读出光和输出光位在器件同一侧,器件本身含有一个反射面。为了使输出光和读出光在空间分离,通常需要和析光镜配合使用。

(2) 振幅型或位相型

振幅型空间光调制器只对读出光的振幅(强度)分布进行调制。位相型空间光调制器只对读出光的位相分布进行调制。应该说明,这种区分是对整个空间光调制器器件而言的,不是对被写入信号所控制的像素性质而言的。例如,如果某一器件像素的受控性质是双折率,但只要其前后带有偏振元件,则实际的效果仍是振幅型的。

(3) 编址方式

如前所述,有光学编址、电极(矩阵)编址和射线束(电子束或激光束)编址等多种方式。

(4) 工作波长或波长范围

对于非光学编址器件,工作波长(或其范围)只有一个,即是所允许使用的读出光波长(或其范围)。对于光学编址器件,工作波长(或其范围)有两个。一个是写入光波