

基于表面等离子体共振效应的显示技术

曹振新, 吴乐南

东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096

E-mail: caozx@seu.edu.cn

2007-12-27 收稿, 2008-03-23 接受

国家自然科学基金创新研究群体科学基金(批准号: 60621002)资助项目

摘要 表面等离子体共振构件中, 调制层材料的实部与共振波长存在单调函数关系, 调制层材料的虚部与共振强度存在单调函数关系. 基于该两种现象可以设计出新型的显示器件. 首先从理论上分别提出了波长和强度可控的显示单元, 而后提出了波长和强度可联合调控的显示单元, 进一步研究了具有 8×8 个显示单元的器件, 并给出仿真结果. 研究表明, 基于表面等离子体共振效应的显示器件可以直接控制每个显示单元的颜色和亮度, 而无需通过三基色合成, 具有分辨率高、对比度高、平面显示、高亮度、响应快等突出优点. 然而, 如果需要设计成实用的显示器件, 尚需深入研究调制层材料和工艺等.

关键词

表面等离子体共振效应
显示
自然色彩

1897 年, 德国人布劳恩发明了示波管, 这支采用气体放电产生电子射束并激发荧光质发光的第一支电子显示器件, 实现了电信号向光输出的转换, 成为电子显示的起点. 1933 年, 由被称为“电视之父”的佐利金发明的光电摄像管和显像管打开了电视系统进入电子时代的大门, 从此进入黑白电视的时代. 1950 年, 美国无线电公司(RCA)研制出第一支彩色显像管, 标志着图像显示进入彩色阶段. 1960 年以后相继出现了新型平板显示器, 如 1968 年 RCA 研究人员海麦尔发明的液晶显示板, 1969 年日本学者伊次顺章研究的电致发光板, 1966 年美国伊利诺思大学贝塞特与斯诺研制的等离子显示板等, 在体积、功耗、全固态、低压驱动以及与集成电路匹配等方面明显优于阴极射线管(CRT)器件.

计算机与显示结合是显示技术发展进程中又一鲜明标志. 作为人机界面的图形显示器, 比电视应用有更高的要求, 微型计算机的普及也使图形、文字显示器等性能提高, 品种、数量增加, 平板显示技术也成为计算机显示更迫切的需要.

回顾显示技术发展史, 显示器的发展有以下几个特点: () 往往一种重要的新原理显示器件的出现标

志着显示技术发展进入到一个新的阶段; () 显示器的发展与其他学科的进步密不可分, 如材料科学、电子线路、半导体集成电路等; () 显示器发展前景光明. 如果把在 20 世纪初阴极射线管 CRT 的出现叫做第一次显示器革命, 那么在工业文明中促进信息化社会发展的液晶平板显示器的出现应叫做第二次显示器革命, 而为开创从现在开始的多媒体时代所必须的下一代显示器的开发, 就是第三次显示器革命.

到目前为止, 信息显示的主要方式有 CRT 和平板显示器 FPD 两大类. CRT 显示技术的发展已接近显示要求的上限, 而 FPD 显示技术则发展迅速. 每类显示器又都有几十种技术和上百种可能的技术变种. 按显示原理显示器可分为主动发光显示器与被动发光显示器: 前者指显示媒质本身发光而提供可见辐射的显示器件, 包括 CRT、等离子显示器(PDP)、真空荧光显示器(VFD)、场发射显示器(FED)、电致发光显示器(LED)和有机发光二极管显示器(OLED)等; 后者指本身不发光, 而是利用显示媒质被电信号调制后, 其光学特性发生变化, 对环境光 and 外加电源(背光源、投影光源)发出的光进行调制, 在显示屏或银幕上进行显示的器件, 包括液晶显示器(LCD)、微

机电系统显示器(DMD)和电子油墨(EL)显示器等。

主动型显示靠发光刺激人眼而实现显示,被动型显示器则本身不发光,而是靠调制外界光进行显示。人类视觉所感受的外部信息中,90%以上是由外部物体对光的反射,而不是来自物体发光。所以,被动显示更适合人的视觉习惯,不会引起疲劳。这在大信息量、高密度显示、长时间观看时,尤为重要。

当今被动型显示器中的 LCD 已占有很大市场,它具有不会引起人的视觉疲劳、无电磁发射、低压低功耗、平板型结构、显示信息量大、易于彩色化、寿命长等优点,缺点是反应速度较慢。

总之,迄今几乎所有的彩色显示器件都是基于 RGB 三基色合成的系统,而且颜色带宽范围有限,那么能否开发出高清晰、高对比度、高色彩分辨率、颜色和亮度相分离、响应速度快的新型显示器件呢?表面等离子体共振(SPR)效应提供了这种可能^[1~11]。

利用 SPR 效应设计传感器,主要是通过检测共振波长确定被测对象的折射率;反之,如果被测对象的折射率已知并可控,则可以选择系统的共振波长^[2,3]。这一现象使得 SPR 效应在显示领域具有非常诱人的应用生命力。20 世纪 90 年代,美国加州理工学院喷气推进实验室的王瑜等人已经在 SPR 显示技术方面进行了深入的实验研究,主要贡献包括利用 SPR 效应设计了可调谐滤色片^[4~8]和三基色 SPR 显示技术^[9],同时在电光材料研究方面也做出了贡献^[7,10]。本文对 SPR 显示技术的研究正是基于他们的工作而展开的。但是,王瑜等人的工作只是分别讨论了 SPR 显示技术中的颜色控制和亮度控制问题,而实用的显示器需要同时具备对两者的控制。本文主要讨论联合控制问题,进行理论分析和仿真,揭示其中存在的关键技术问题和进一步研究的方向。

1 原理

1.1 概述

SPR 显示技术中,基本显示单元采用棱镜结构,基本原理是:调制层折射率实部的变化会导致共振波长的变化;虚部的变化会导致共振峰值的变化。换言之,在显示技术中,利用调制层折射率实部的变化可以改变显示颜色,利用调制层折射率虚部的变化可以改变显示亮度,该关系可由文献[11]中(2.75)式导出。由于在显示系统中是采用电信号来控制显示亮度和显示颜色的,因此仅仅依靠调制层折射率的

改变还不够,进一步要求选用合适的电光材料,在一定条件下加载电压而改变该材料的折射率,即调制层材料折射率的实部和虚部与加载电压存在一定的函数关系。理论上讲,显示中要求同时控制调制层材料折射率的实部和虚部,因此仅采用一层调制层实现困难。本文讨论用两层调制层:一层主要是其折射率的实部可变,用于控制显示颜色;而另一层主要是其折射率的虚部可变,用于控制显示亮度。

首先分别讨论调制层折射率的实部和虚部对共振波长和共振峰值的作用。因此,在基本显示结构中,只需要包括一层调制层就可以完成 SPR 显示技术基本原理的讨论,相应的基本结构如图 1 所示,主要由棱镜 1、金属层 1、调制层、金属层 2 和棱镜 2 等 6 部分组成。基本工作过程如下:入射光以一定角度从棱镜 1 的一个斜面入射,在金属层 1 和调制层界面会激发表面等离子体共振波(SPW),其带宽很窄,由于调制层厚度足够薄,以至于该表面等离子体共振波会使得在调制层和金属层 2 的界面上生成具有同样频率特性的耦合表面等离子体波,并通过棱镜 2 的另一斜面辐射出来,同时在棱镜 1 的另一斜面会反射出没有参与激发表面等离子体共振波的光信号,各入射光、反射光、透射光的光谱如图 1 所示,其中金属层既是等离子体层又是电极层。

根据不同的成像方式,SPR 显示器可以分为透射式和反射式两种形式。如果利用透射光成像,则定义为透射式 SPR 显示技术;如果利用反射光成像,则定义为反射式 SPR 显示技术。反射式技术设计的共振波长有效带宽较宽,利用与共振波长带宽对应的补色实现颜色控制,而其亮度则通过控制光源的强度实现;透射式技术则是直接通过透射光成像,采用适当的设计方法,可以使透射光带宽做得非常窄,因此不仅可以具有很高的颜色分辨率,而且可以获得很好的对比度。由于两种方式原理一致,本文主要讨论透射式 SPR 显示技术。

1.2 调制层折射率实部对共振波长的作用

因为只讨论调制层折射率实部对共振波长的作用,因此依然采用图 1 的基本结构。假定中间的调制层材料折射率的虚部为 0,实部电可调。显然,根据文献[11]中(2.75)式进行适当简化并选择适当的参数,可以建立调制层折射率实部与共振波长之间的函数关系:

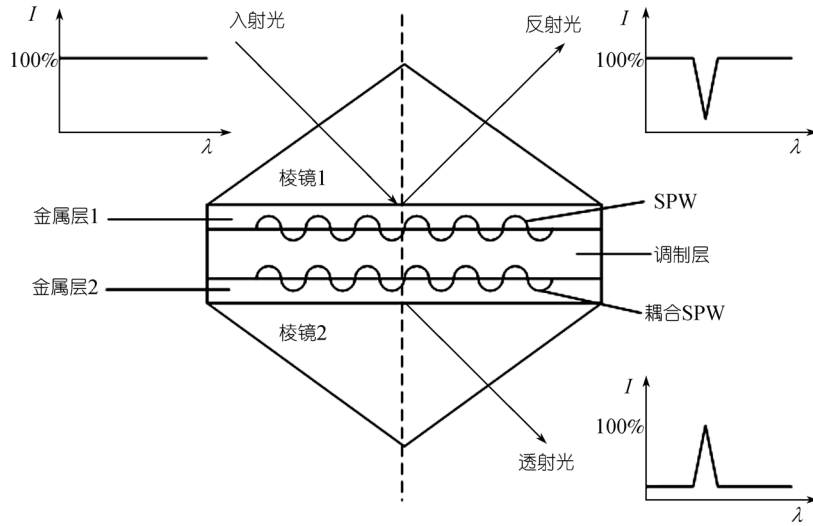


图1 基本 SPR 显示单元示意图

$$\lambda = \lambda(n_{tr}).$$

相应地在特定参数下的计算结果如图2所示。

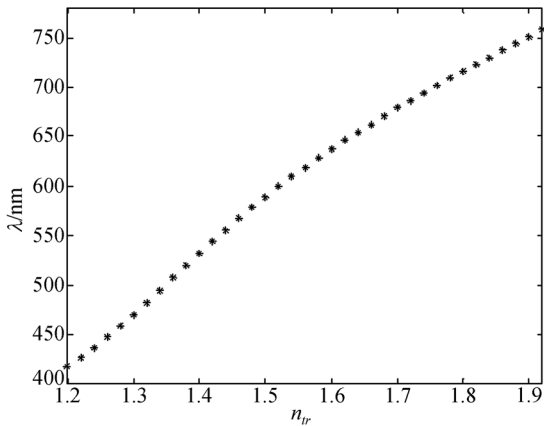


图2 调制层折射率实部与共振波长的关系

正如 1.1 节所言，图2表明在一定条件下，共振波长是调制层折射率实部的函数，并且具有单调性，为真正实现 SPR 显示器的颜色控制提供了有利条件。同时其基本覆盖了可见光波段，满足显示色彩的要求。当然如果需要，只要改变调制层材料的折射率，可以获得更广的显示带宽。事实上，实际显示系统中，显示画面是通过电信号控制的，同样为了实现对 SPR 显示图像的颜色实现电控制，必须经过两个环节：首先是用图像电信号控制调制层折射率的实部，然后由变化的调制层折射率的实部来控制显示的颜色，由此实现对颜色显示的控制。根据该过程，所用

(1) 调制层属于电光材料，其折射率的实部和控制电信号存在函数关系：

$$n_{tr} = n_{tr}(v_c). \quad (2)$$

这对于实际设计 SPR 显示器非常重要。寻找性能良好的实部可控的电光材料作为调制层，是一项非常重要但又艰难的工作，目前的实验研究主要采用液晶材料 [7,10]。

通过(2)式可以建立图像颜色电信号和显示颜色的函数关系：

$$\lambda = \lambda(n_{tr}(v_c)). \quad (3)$$

建立最佳的图像颜色电信号与显示颜色的关系，是设计 SPR 显示器的核心技术。此外，参数的选择和优化与材料的确定同样属于核心技术。

1.3 调制层折射率虚部对共振峰值的作用

同样，因为只讨论调制层折射率虚部对共振峰值的作用，因此依然采用图1的基本结构。假定中间调制层材料折射率的虚部为电可调，实部为一常数。根据文献[11]中(2.75)式进行适当简化并选择适当的参数，可以建立调制层折射率虚部与共振峰值之间的函数关系：

$$R_{\min} = R_{\min}(n_{tr}). \quad (4)$$

相应地在特定参数下的归一化计算结果如图3所示。

图3表明，在一定条件下，共振峰值是调制层折射率虚部的函数，具有单调性，为真正实现 SPR 显示器的亮度控制提供了有利条件。而且可以看到，显示

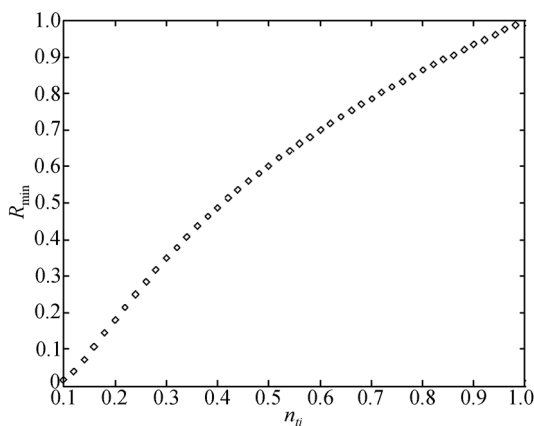


图3 调制层折射率虚部与共振峰值的关系

对比度可以做得很高, 根据理论计算已经达到 90%, 文献[7,10]的实验结果已经达到 50%. 同样, 为了实现对 SPR 显示画面的亮度实现电控制, 必须经过两个环节: 首先是用图像电信号控制调制层折射率的虚部, 然后由变化的调制层折射率的虚部来控制显示亮度, 由此实现对亮度显示的控制. 根据该过程, 此调制层属于另一种电光材料, 其折射率的实部为常数, 虚部和控制电信号存在函数关系:

$$n_{ti} = n_{tic} + n_{tiv}(v_l). \quad (5)$$

此关系在实际设计 SPR 显示器时非常重要. 寻找性能良好的虚部可控电光材料作为调制层同样是一项非常重要但又艰难的工作, 目前主要技术是金属层采用 Ni, Rh 或者 Pt, 调制层材料采用液晶或者 KDP, EO 聚合物, 有机晶体和有机盐等 [7].

通过(5)式可以建立图像亮度电信号和显示亮度的函数关系:

$$R_{\min} = R_{\min}(n_{tic} + n_{tiv}(v_l)). \quad (6)$$

建立最佳的图像亮度电信号和显示亮度的关系同样是设计 SPR 显示器的核心技术.

1.4 调制层折射率实部和虚部联合对共振波长和共振峰值的作用

实际的显示系统需要同时控制显示画面的颜色和亮度, 因此, 虽然前面分别讨论了调制层折射率的实部、虚部与共振波长和共振峰值具有良好的函数关系, 但是并不表示在对两者同时进行控制时也能保持良好的关系. 因此, 在讨论联合控制时, 必须修改图 1 的基本 SPR 显示单元结构, 使得该模型同时包含两个调制层, 分别为实部可调和虚部可调电光材料, 如图 4 所示. 图中其他的部件功能与图 1 中相同, 唯

一不同的是增加了绝缘层 5, 目的主要是为了使其上下金属层之间绝缘, 同时该绝缘层必须在可见光区域具有良好的透明特性. 同时为了提高系统的可靠性, 在棱镜和金属层之间增加了黏结层 2, 要求其具有良好的黏结性和透光性.

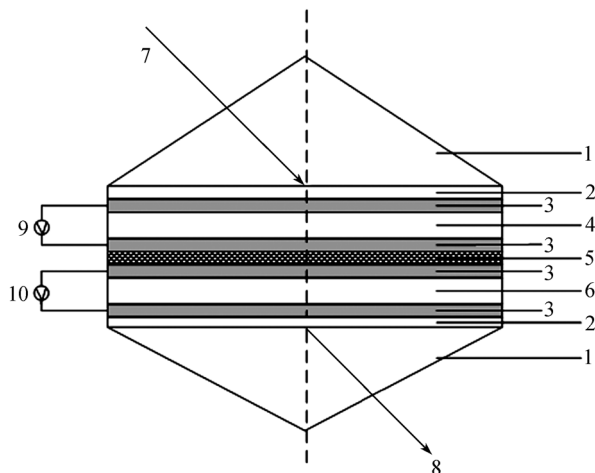


图4 SPR 基本显示单元结构图

1, 棱镜; 2, 黏结层; 3, 金属膜层(同时也是电极); 4, 实部受控电光材料; 5, 绝缘层(但对可见光透明); 6, 虚部受控电光材料; 7, 入射光(白光); 8, 透射光(彩色光); 9, 控制实部受控电光材料的电压信号; 10, 控制虚部受控电光材料的电压信号

同样根据文献[11]的(2.75)式, 可以建立图像颜色电信号与显示颜色的函数关系:

$$\lambda = \lambda(n_r(v_c)) + \delta_i \lambda(n_{tic} + n_{tiv}(v_l)). \quad (7)$$

同理, 可以建立图像亮度电信号与显示亮度的函数关系:

$$R_{\min} = R_{\min}(n_{tic} + n_{tiv}(v_l)) + \delta_r R_{\min}(n_r(v_c)). \quad (8)$$

相比于(3)和(6)式, 在(7)和(8)式中分别引入了一个附加项, 主要是因为实部可控制调制层和虚部可控制调制层对共振波长和共振峰值的作用不是独立的, 而是具有相关性, 在用虚部折射率可控制调制层控制显示亮度时, 显示颜色也会有所漂移; 同理在实部折射率可控制调制层控制波长时, 显示亮度也会有所变化. 文献[11]的(2.75)式也表明两者对共振波长和共振峰值的作用不独立.

选择合适的参数, 可以计算出实部可控制调制层和虚部可控制调制层对共振波长和共振峰值的作用, 如图 5 所示. 图中横坐标表示共振波长, 纵坐标表示共振峰值. 计算中, 实部和虚部的可控制调制层折射率均分 8 级递增, 对应于图 5 中的总共 64 根共振曲线:

从左至右分别有 8 簇曲线族, 每簇曲线族对应相同的实部可控调制层折射率; 在同一簇曲线族中, 从下到上共有 8 根曲线, 分别对应不同的虚部可控调制层折射率. 可以看到, 由于折射率实部、虚部的可调调制层的参数之间会相互影响, 因此, 虚部的变化会导致共振波长微小偏移, 实部的变化也会导致共振峰值微小变化. 虽然这种相互作用关系对 SPR 显示器极为不利, 但是精心选择材料和参数能够很好地降低这种相互作用. 降低调制层实部和虚部的关联程度, 属于 SPR 显示的核心技术之一. 此外, 根据文献[11]中 (2.63) 式计算, 每个像素尺寸为数微米 [11].

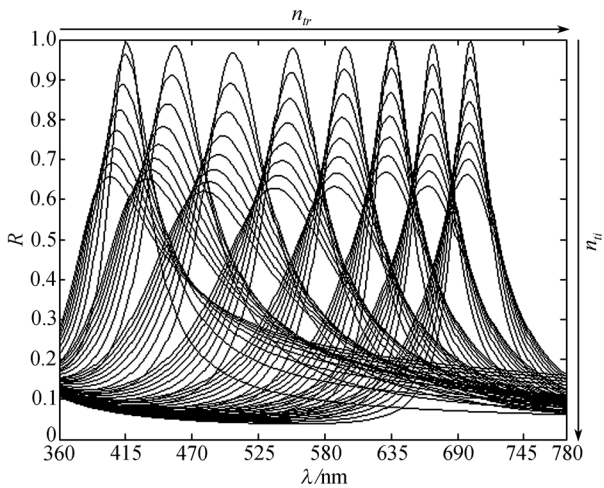


图 5 透射式 SPR 基本显示单元中共振波长、共振峰值与调制层折射率实部、虚部的关系

2 透射式 SPR 显示器的设计

作为显示器, 只具有一个显示单元肯定没有意义. 下面讨论利用图 4 的基本 SPR 显示单元, 构成具有多个显示单元的显示器, 意在讨论 SPR 显示技术的理论可行性. 因此, 为了方便起见, 主要讨论具有 $N \times N$ 个像素 ($N=8$) 的 SPR 显示器.

2.1 显示器结构

具有 $N \times N$ 个基本显示单元的透射式 SPR 显示器的侧面结构示意图如图 6, 主要由偏振片 9、具有特殊结构的棱镜 1、黏结层 2、金属层 3、折射率实部可控调制层 4、绝缘层 5、折射率虚部可控调制层 6、入射光 7、出射光 9 和成像板 10 构成. 本节设计的目的是为了实现平板显示, 因此采用了特殊结构的棱镜; 而为了不让 s 光产生干扰, 在入射光和入射棱镜之间

加入了偏振片. 图 6 中 A~G 为别代表各膜层的剖面, 且 G-G 剖面、F-F 剖面、B-B 剖面与 A-A 剖面结构相同, 如图 7 所示; E-E 剖面、D-D 剖面与 C-C 剖面结构相同, 如图 8 所示.

图 7 中, A-A 剖面由 $N \times N$ 个单元构成, 各基本单元的尺寸可以根据文献[11]中 (2.63) 式确定, 单元的间距可以根据设计的显示器特性而定. 图 6 中共有 4 层金属层, 对应 A-A 剖面 and G-G 剖面的金属层还需要作为加电极, 直接和外来控制电路相连, 结构如图 7 所示; 而金属层 C-C 剖面 and E-E 剖面只是接地电极, 所有显示单元可以共用, 结构如图 8 所示.

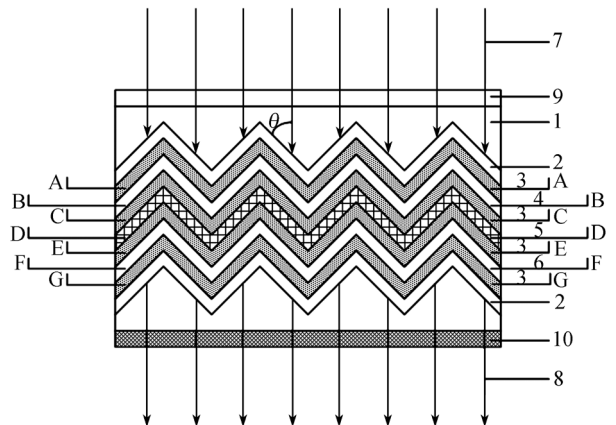


图 6 $N \times N$ 透射式 SPR 显示器的侧面结构图

1, 棱镜; 2, 黏结层; 3, 金属膜层(同时也是电极); 4, 实部受控电光材料; 5, 绝缘层(但是对可见光是透明); 6, 虚部受控电光材料; 7, 入射光(白光); 8, 透射光(彩色光); 9, 偏振片; 10, 成像板. θ 为入射角; A~G 分别代表各膜层的剖面, 且 G-G 剖面、F-F 剖面、B-B 剖面与 A-A 剖面结构相同, E-E 剖面、D-D 剖面与 C-C 剖面结构相同

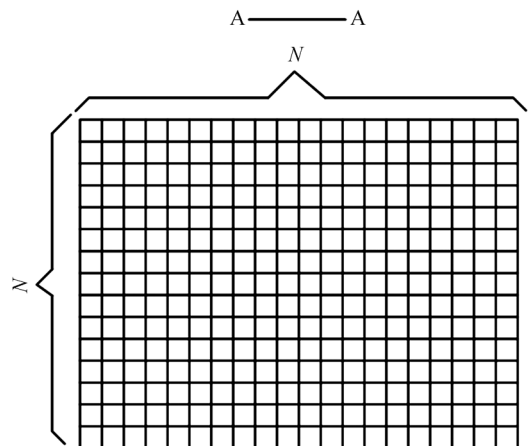


图 7 A-A 剖面结构图

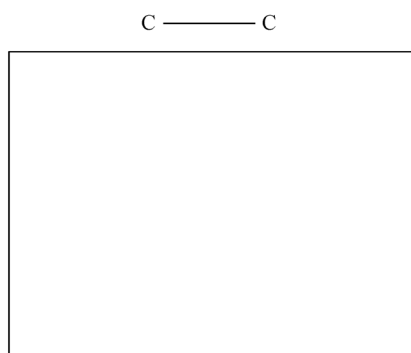


图 8 C-C 剖面

2.2 控制电路

基本显示单元中, 控制信号比较简单, 只要在金属电极上直接加上电压信号即可. 而作为具有多个显示单元的 SPR 显示器, 需要对应每个基本显示单元分别控制, 其电路与液晶显示器类似 [12]. 采用阵列式选通控制电路可以满足要求, 如图 9. 每个基本单元控制电路如图 10(a)和(b)所示.

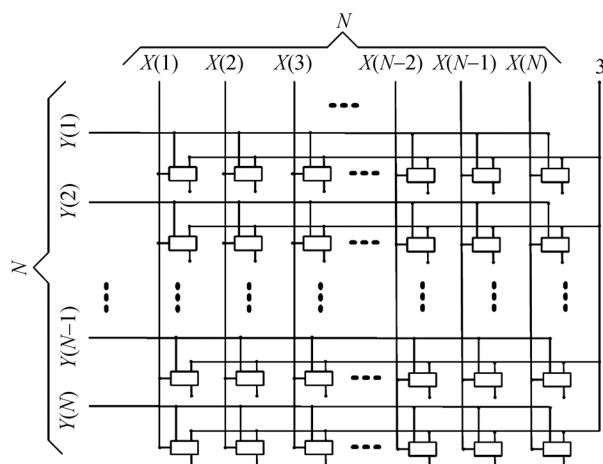


图 9 SPR 显示器阵列式选通控制电路

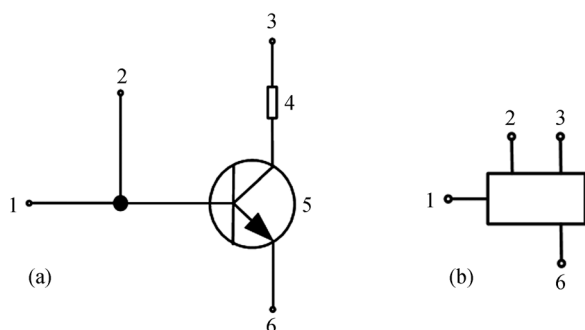


图 10 单个显示单元控制电路单元

(a) 单个显示单元控制电路; (b) 单个显示单元控制电路简化表示. 1, 行扫描信号; 2, 列扫描信号; 3, 颜色加载信号或者亮度加载信号; 4, 负载电阻; 5, 控制门; 6, 显示单元信号加载电极

基本单元控制电路工作过程: 输入端同时连接行扫描信号 1 和列扫描信号 2, 当行扫描信号为高或者列扫描信号为高时, 门电路 5 选通, 此时可以把颜色控制信号或者亮度控制信号通过门电路控制显示的颜色或者亮度, 加载信号采用数字信号, 如图 10(a)所示; 为了方便, 采用图 10(b)的方式表示. 显示系统中共包括两套控制电路, 分别为 A-A 剖面 and G-G 剖面, A-A 剖面控制颜色, G-G 剖面控制亮度. 对于图 9 的电路, 可以采用逐行和逐列扫描选通方式工作.

2.3 显示器的仿真显示

目前 SPR 显示器正处于基础研究阶段, 尚未设计出实际样品. 为了更好地描述其性能, 可以通过仿真来观察显示效果. 如前文所述, SPR 显示系统在摄像时记录的是被测图像点的波长和亮度, 而显示时则是根据波长和亮度值来控制显示像素. 为了在基于现有显示原理制造的显示器上观察其效果, 我们又不必将 SPR 独特的波长亮度信号 (λ, Y) 转换为传统的 (R, G, B) 图像格式, 即

$$(R, G, B) = H \times (\lambda, Y), \quad (9)$$

其中矩阵 H 为 RGB 信号到波长亮度信号的转换矩阵, 可以在 <http://cvision.ucsd.edu/index.htm> 查到.

为方便起见, 仿真显示中设计了具有 8×8 单元的透射式 SPR 显示器, 需要显示的数据由图 5 给出. 首先把这些数据通过(9)式转换为 RGB 数据, 然后就可以使用传统的显示技术显示. 根据提供的 RGB 值与波长的关系, 得到显示结果如图 11 所示. 图中从上至下, 显示单元显示的波长逐渐由 400 nm 变化到

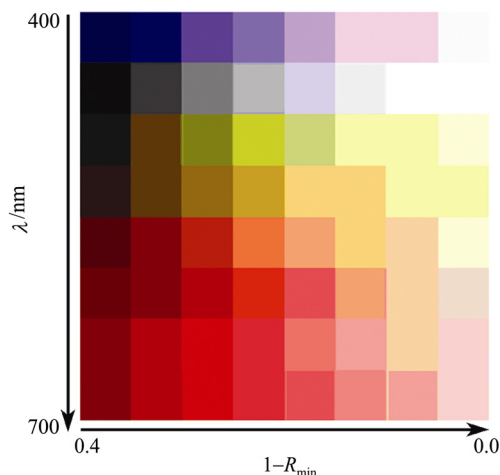


图 11 具有 8×8 单元透射式 SPR 显示器的仿真显示效果图

700 nm, 从左到右显示亮度从 0.4 变化到 0.0. 不难看出, 图 11 基本覆盖了可见光波段的色彩, 同时每种颜色的亮度也有由深至浅的变化. 如果讨论图像效果, 则不是很理想, 主要原因在于从波长亮度信号到 RGB 信号间的转换矩阵不太理想. 如果实现了 SPR 显示器, 则理论上可以获得更理想的显示效果.

3 潜在应用和优势

根据作者的理解, SPR 显示技术至少有三大应用:

- () 制作 SPR 电控滤色片;
- () 可以设计为基于 RGB 的显示器;
- () 设计真彩色 SPR 显示器.

通过前面的讨论, 不难看出就 SPR 显示技术本身, 其主要优点包括: 波长覆盖范围大、颜色分辨率高、对比度高、颜色和亮度相分离等, 如果采用合适的固体调制层材料可以做到很高的响应速度^[7]. 相比于传统的平板显示器件, 具有明显的优势.

另外, 考虑到 SPR 效应颜色与亮度相分离的特点, 还应该具有以下的应用优势.

- () 传输与显示系统的简化

我们知道, 由于 RGB 空间中各彩色分量间的相关性太强, 在电视技术中需要进行去相关或亮色分离, 这一方面是为了向下兼容黑白图像的显示, 另一方面也是为了去除冗余度, 以压缩视频传输带宽. 这通常需要在传输时把图像信号从 RGB 空间变换到其他亮度与色度分离的空间, 如 YUV 空间、YCrCb 空间等, 而在显示彩色图像时再变换回 RGB 空间. 由此不仅带来硬件复杂度的增加, 还有可能引入“亮色串扰”或导致色彩失真. 而 SPR 显示则无此烦恼, 特别是对于黑白图像, 只需直接处理、传送和显示亮度信号即可.

- () 对颜色辨别的简化

出于类似的考虑, 在对彩色图像的模式识别中, 为了更好地通过颜色来识别或分割景物目标, 也经常要把图像变换到其他空间, 如 HIS 空间、YIQ 空间等. 而 SPR 的颜色分量就是与波长直接对应的真彩色, 没有色度学意义上的失真, 因而基于 SPR 颜色分量来进行颜色的辨别或彩色目标的识别, 应该更方便有效.

当然, 这后两方面的优势还只能是潜在的, 因为其前提应该是能够实现基于 SPR 效应的成像/摄像器件和系统.

4 存在的问题

严格地讲, SPR 显示技术仅仅是利用了 SPR 效应. 到目前为止, 国外学者只是在理论上和通过部分实验验证了其原理是可能的, 但与真正实现还存在一定的距离. 本文之所以讨论 SPR 技术, 主要是抛砖引玉, 希望相关领域的人员能够对其有更为深入的研究. 为了便于针对 SPR 显示技术进一步研究, 本节给出实现 SPR 显示技术的几个核心问题和难题:

- () 尽量降低折射率的实部和虚部在可调调制层参数之间的相关性, 通过理论优化有望达到更好的效果;

- () 寻找具有合适参数的折射率实部可调的调制层材料, 目前液晶材料比较合适;

- () 寻找具有合适参数的折射率虚部可调的调制层材料, 目前虽未找到, 但值得庆幸的是可以采用其他替代方式来实现, 对于虚部调制层的金属电极不再采用银和金, 而是采用 Ni, Pt, Rh 或者采用 Rh-Ni 合金作为电极, 其原理和实验在文献[2~10]中已经详细探讨过, 并被证明是可行的;

- () 确定和优化 SPR 显示技术中的各项参数, 使得显示效果最佳;

- () 物理实现中将会存在很多工艺上的困难;

- () 为了物理验证, 可以首先设计具有 2 像素或者 4 像素的原型, 理论上困难小些;

- () SPR 摄像系统的研究, 这是一项更具有挑战性的工作.

当然, 还存在其他很多实际困难, 需要在进一步研究探索中逐渐克服和解决.

5 结论

本文在前人工作的基础上讨论了 SPR 显示技术的基本原理, 提出了颜色和亮度可以同时控制的 SPR 显示理论, 并且进行了参数优化和理论仿真, 同时给出了 SPR 显示器基本控制电路的方案思路. 讨论了 SPR 显示器的优点、潜在应用和目前的困难.

提出了颜色和亮度可以同时调制、控制的 SPR 显示理论, 并且通过理论和仿真证实了其实现的可能性; 尽管虚部的控制存在困难, 但是有可以替代的设计方法. 因此可以说, 尽管尚处于初期探索, 但由于 SPR 显示技术内在的一系列优点, 今后必将有更好的发展和更诱人的应用.

参考文献

- 1 王艳霞. 基于 SPR 技术的显示器的研究. 硕士学位论文. 南京: 东南大学无线电工程系, 2005. 1—20
- 2 Wang Y. Wavelength selection with coupled surface plasmon waves. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 4385—4387[DOI]
- 3 Wang Y. Voltage-induced color-selective absorption with surface plasmons. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(19): 2759—2761[DOI]
- 4 Wang Y. Surface plasmon high efficiency projection display. *Proc SPIE*, 1997, 3019: 35—40[DOI]
- 5 Wang Y. Electronically tunable color filter with surface plasmon waves. *Proc SPIE*, 1997, 3013: 224—228[DOI]
- 6 Wang Y, Russell S D, Shimabukuro R L. Surface plasmon tunable filter and spectrometer-on-a-chip. *Proc SPIE*, 1997, 3118: 288—294[DOI]
- 7 Wang Y, Russell S D, Shimabukuro R L. Electronically tunable mirror with surface plasmons. *Proc SPIE*, 1998, 3292: 103—106[DOI]
- 8 Wang Y. Scrolling color projection display using surface plasmon tunable filters. *Proc SPIE*, 1998, 3296: 149—153[DOI]
- 9 Wang Y. Surface plasmon tunable filter and flat panel display device. *Proc SPIE*, 1999, 3636: 69—72[DOI]
- 10 Wang Y, Russell S D, Shimabukuro R L. Voltage-induced broad-spectrum reflectivity change with surface-plasmon waves. *J Appl Phys*, 2005, 97: 023708[DOI]
- 11 曹振新. 基于表面等离子体共振效应的信息获取和显示. 博士学位论文. 南京: 东南大学, 2005. 8—21, 85—97
- 12 谷千束, 著, 金轸裕, 译. 先进显示器技术. 北京: 科学出版社, 2002. 54—60