

光通信用宽带行波电极光波导调制器研究

张阜文 崔海娟 陈福深

(电子科技大学光纤通信国家重点实验室 610054)

摘要: 本文就光通信用宽带行波电极光波导调制器的基本原理、国内外的的发展动态和制作工艺作了阐述, 指出了脊形结构电极的几种新的设计思想, 对今后的设计及研究工作将起一定的指导作用。

前言

随着人们对网络的依赖日益加深, 对带宽的要求越来越高。特别是近几年来, 光纤通信的迅猛发展使得单模光纤本身巨大传输容量与终端信号处理能力的矛盾更加突出, 而集成宽带光波导电光调制器能在大容量传输中担任重要角色。电光调制器是最重要的集成光学器件之一, 它可以对激光束的幅度或相位进行调制, 使输入信号施加到光载波上进行传输。高性能的光纤通信系统要求对直流激光源发出的激光施行外调制, 因为激光器的外调制具有带宽宽、大消光比、可与大功率激光器相匹配而输出较大光功率、稳定性好和消除半导体激光器内调制产生的光频率跳变的“啁啾”现象等优点。并且, 由于电设备的限制, 用高电压驱动调制器越来越困难。因此, 要实现高速光传输系统, 减小调制器的驱动电压, 是非常重要的^[1]。而使用Mach-Zehnder型光波导和行波电极的LiNbO₃调制器, 在高速、长距离光纤通信系统中是必不可少的^{[1]-[5]}。如图1的(a)和(b)所示。并且, 在激光外调制器中, 使用Ti扩散行波调制器, 可将直流漂移完全限制在一个可以控制的水平。国外近年来针对常用的Mach-Zehnder干涉式强度调制器, 采用LiNbO₃基片刻槽使两个分支光波导位置相对上升, 且大幅度增加调制电极厚度形成脊形结构, 使微波折射率大幅度降低并与光波折射率相等, 使得光波与微波的速度匹配, 实现了超宽带集成光调制技术的重大突破。

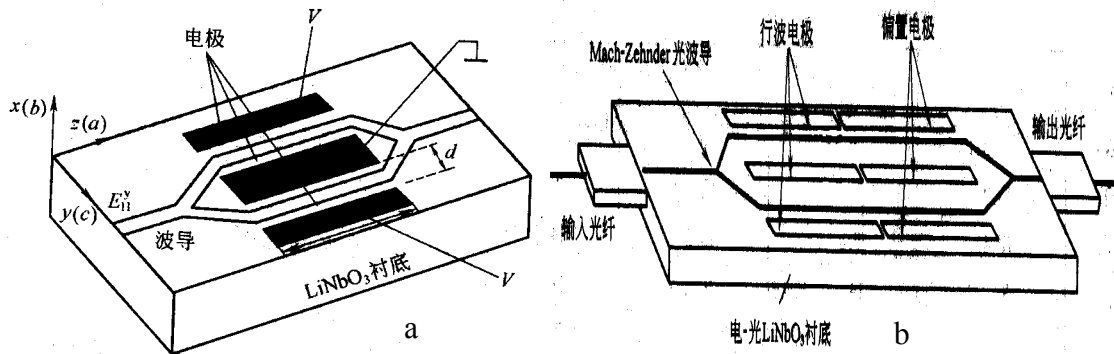


图1 (a) Mach-Zehnder干涉型调制器 (b) 行波电极光波导调制器

一 基本原理

1. 电光调制器的原理

利用某些光学介质的电光效应, 当其受到外电场作用时, 它的折射率将随着外电场变化, 介电系数和折射率都与方向有关, 要用张量来描述, 在光学性质上变为各向异性; 而不受外电场作用时, 介电系数和折射率都是标量, 与方向无关, 在光学性质上是各向同性的。

电光效应主要有两种: 一种是折射率的变化量与外电场强度的一次方成比例, 称为泡克尔斯(Pockels)效应; 另一种是折射率的变化量与外电场强度的二次方成比例, 称为克尔(Kerr)效应。利用克尔效应制成的调制器, 称为克尔盒, 其中的光学介质为具有电光效应的液体有机化合物。利用泡克尔斯效应制成的调制器, 称为泡克尔斯盒, 其中的光学介质为非中心对称的压电晶体。泡克尔斯盒又有纵向调制器和横向调制器两种, 如图2所示。

光在晶体中传播的性质可用折射率椭球来描述，电场对光学介质的影响，是电场使介质的折射率椭球主轴方向和大小发生变化。当不给克尔盒加电压时，盒中的介质是透明的，各向同性的非偏振光经过 P 后变为振动方向平行 P 光轴的平面偏振光。通过克尔盒时不改变振动方向。到达 Q 时，因光的振动方向垂直于 Q 光轴而被阻挡（P、Q 分别为起偏器和检偏器，它们的光轴彼此垂直。），所以 Q 没有光输出；给克尔盒加以电压时，盒中的介质则因有外电场的作用而具有单轴晶体的光学性质，光轴的方向平行于电场。这时，通过它的平面偏振光则改变其振动方向。所以，经过起偏器 P 产生的平面偏振光，通过克尔盒后，振动方向就不再与 Q 光轴垂直，而是在 Q 光轴方向上有光振动的分量，所以，此时 Q 就有光输出了。Q 的光输出强弱，与盒中的介质性质、几何尺寸、外加电压大小等因素有关。对于结构已确定的克尔盒来说，如果外加电压是周期性变化的，则 Q 的光输出必然也是周期性变化的，由此实现了对光的调制。

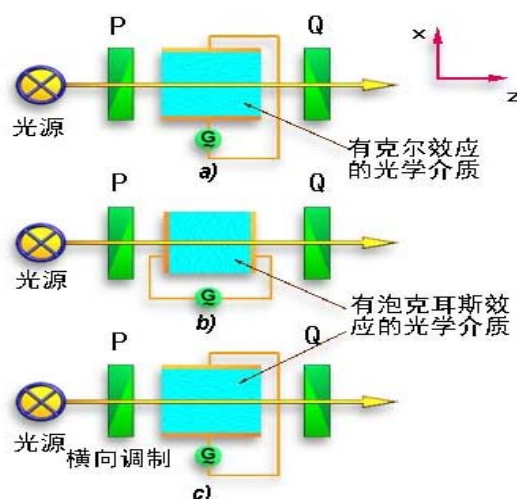


图2 a) 克尔盒 b) 纵调的泡克尔斯盒
c) 横调的泡克尔斯盒

2. 晶轴选取

由于电光效应是集成电光波导调制器的工作基础，当电极上施加调制电压时，波导折射率因电光效应发生改变，因而导波通过电极区后其相位随调制电压而变化。为了最有效的利用介质的电光效应，获得最大的折射率变化，必须合理的选择晶轴的取向。

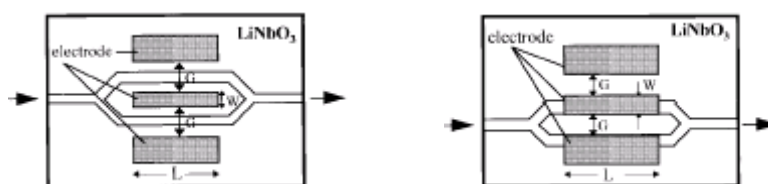


图3 (a) X切CPW电极 (b) Z切CPW电极

以共面波导电极（CPW）为例，在图3（a）中，电极置于光波导的两侧，水平方向的电场对调制器起作用；要获得最大的电光系数 γ_{33} ，应选择x切y方向传播的LiNbO₃基片，同时光波导传输模为TE模，其导光电场偏振方向与电极电场方向一致。选择y切x方向，光波仍为TE模。图3（b）中，电极的一片直接盖在波导的上面，因而电场的垂直分量对调制产生作用。这种情况下，必须使用位于电极与波导之间的SiO₂作为隔离层，以减少光波的损耗，并且选择z切LiNbO₃基片和TM偏振状态的光传输模^[6]。

3. 电极的设计

(1) 传输损耗

电极属于共面传输线，其传输损耗主要有导体损耗、介质损耗和辐射损耗。

导体损耗：由于电极金属物质的电导率是个有限的数值，即不为无穷大，所以存在导体损耗，导体损耗随频率增加而增加。

介质损耗：由介质自身材料特性引起的损耗，常用的晶体介质都是低损耗的介质。而调制器中的介质损耗主要来源于LiNbO₃衬底和SiO₂缓冲层等。

辐射损耗：在调制器中，由于渐变区和弯曲部分不连续性带来的辐射损耗，在高频范围是比较明显的。

(2) 电极结构

调制器的频率超过 75GHZ，主要是受电极特性的影响，而不是介质损耗、辐射损耗和 LiNbO₃的Pockels效应，因此要降低损耗，速度、阻抗要匹配，同时驱动电压要小，这就要使用优化的电极结构。

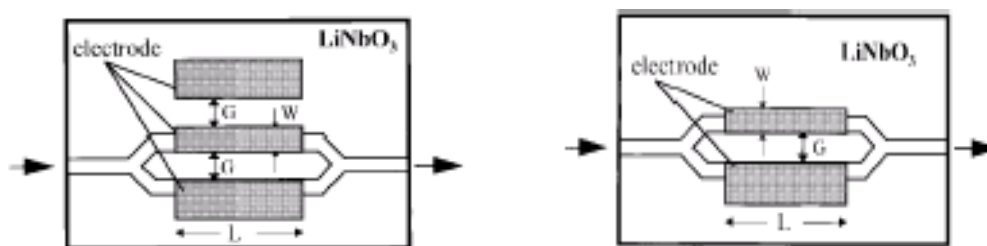


图4 (a) Z切 CPW

(b) Z切 A-CPS

1. 传统电极结构

电光调制器有两种排列电极的方法，CPW和不对称共面带（A-CPS），如图4所示。在缓冲层厚度和电极厚度一定的情况下，CPW电极的实际系数 N_m 、特征阻抗 Z_c 和 $V_\pi L$ 的值明显要比A-CPS的值要小的多，但是CPW电极的损耗系数 α_0 要比A-CPS的要大。A-CPS的特征阻抗接近 50Ω ，但在实际应用中，要求驱动电压尽可能的小，所以一般选用CPW电极结构，且特征阻抗和半波电压可以适当的折衷。当缓冲层厚度和电极厚度相对比较薄的时候，CPW电极结构的带宽要比A-CPS结构的带宽要宽。由于CPW电极对电极附近电场的限制要比A-CPS限制的紧密，所以，CPW电极结构可以明显的减小辐射损耗，适用于超高速调制器，并且脊形结构CPW电极的制作要比A-CPS 简单。

2. 梯形 CPW 电极

优化LiNbO₃电光调制器的电极尺寸，要求调制带宽要宽 (>40GHZ)，损耗小，而损耗主要是由电极的横截面决定的。采用非方形电极几何结构，厚的梯形结构，来改进电光调制器的性能。



图5 CPW 梯形电极

图5(a)中，中间电极厚度和地电极厚度一致，中间电极的过度切割和地电极的下部切割，这种形状的电极损耗最小。在图(b)中，由于损耗和中间电极的厚度有关，加厚中间电极厚度(中间电极厚度要比低电极厚)，同时稍微做过分切割。金属下部切割的梯形 CPW 电极，CPW 厚电极的微波传输特性和边壁倾斜角有关。全波分析也表明微波实际系数不仅和特征阻抗的实部有关，还与电极的边壁倾斜角有关；并且金属下部切割，微波驱动电压会增加。

4、半波电压 V_π

$V_\pi L$ 是使调制器光输出达到最大时所需的电压，称为半波电压。由于LiNbO₃衬底电光系数比较大，可用于低驱动电压操作。并且，电光调制器的半波电压不只与衬底材料的电光系数有关，还与电场和光场的相互作用程度有关。所以要合理设计波导和电极的尺寸，才能得到大的重积分因子 Γ ^[5]。半波电压可以表示为

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{n^3 \gamma_{33} L \Gamma}$$

当然，这个电压自然是越小越好。这样，既便于操作，又可减少电功率损耗和发热。

5、调制带宽 Δf

对于强度调制，调制带宽定义为调制深度降到其最大值的一半所对应的两个调制频率之差，记为 Δf 。调制带宽是标志载波能够携带信息量的重要参数，它同调制方式、调制器结构及工作条件有关。这就要求光波在晶体中的渡越时间 t_t 要远小于调制信号的周期 T ，即

$$t_t = l/(c/n) \ll T = 1/f$$

式中， l 为晶体长度， n 为晶体的折射率， c 为真空中的光速， f 为调制频率。

二 国内外研究动态

就调制带宽来说，用传输线制作的行波电极调制器，要比集总电极制作的调制器有更宽的带宽。集总电极 LiNbO_3 调制器的调制带宽与电极长度乘积约小于 $2.2\text{GHz}\cdot\text{cm}$ ，而实验已验证行波电极 LiNbO_3 调制器有大于 $200\text{GHz}\cdot\text{cm}$ 的调制带宽与电极长度乘积。对于数据率大于 2.5Gb/s 的 LiNbO_3 调制器来说，其半波电压 V_π 较高，故都需要用驱动器来推动调制器。驱动器不仅要有很宽的工作频带，并且要能提供足够大的微波输出功率。例如：对于 10Gb/s 、 $V_\pi=5.5\text{V}$ 的调制器，需要驱动器具有 75KHz 到 8GHz 的工作频带及 20dBm 的 1dB 输出功率。由于制作高速率的驱动器是非常困难的，因此制作具有低 V_π 的调制器是很受欢迎的。当然，也要求调制器有良好的其他性能，如低的光插入损耗、大的消光比、小的光反射损耗、弱的电反射损耗和合适的啁啾参量。特别是近几年来，之所以行波电极调制器研究这么火爆，这是因为与其它外调制器相比，它有很多优点：1.使用行波电极，速度快；2.光波导直接高效的耦合进光纤；3.调制信号的频率啁啾很小，适用于高速、长距离的光传输系统；4.调制器的性能和波长的相关很小，可用于TDM和WDM光传输系统。但是由于 LiNbO_3 自身的高介质常数，调制时，导光波和调制微波信号速度不匹配，是限制调制带宽的主要原因。传统的行波调制器，在得到速度匹配时，阻抗却不能同时得到匹配，而且驱动电压比较高。因此，设计高性能的行波调制器，应考虑：1.微波和光波速度匹配；2.电极特征阻抗接近 50Ω ，和信号源阻抗匹配；3.半波驱动电压 V_π 要小；4.微波电极损耗小。但是在实际设计过程中，这几项参数一般不能同时满足，要根据设计系统的需求，进行折中考虑。下面就当前比较热门的脊形结构行波电极电光调制器的国内外研究情况作以介绍。

1.实例分析：脊形结构的优越性

美国华盛顿海军研究所的W.K.Burns等人，在美国海军研究署的支持下，于1997年研制了宽带反射行波 LiNbO_3 电光调制器，并与同样电极长度的单程（不反射）调制器的性能进行了比较。反射行波 LiNbO_3 电光调制器在工作带宽为 20GHz 时，驱动电压为 4.5V ，工作带宽 $<0.5\text{GHz}$ 时，驱动电压为 $0.5\sim 1\text{V}$ 。单程行波 LiNbO_3 电光调制器在工作带宽为 20GHz 时，驱动电压 4.5V ，而驱动电压为 2.1V 时，仍处于直流状态。1999年，W.K.Burns等人又研制了低驱动电压、宽带脊形行波 LiNbO_3 电光调制器，并与非脊形厚膜结构的调制器性能进行了比较。用脊形结构的调制器性能：工作带宽 $5\sim 20\text{GHz}$ ，驱动电压 $4.5\sim 5.5\text{V}$ ；工作带宽 40GHz ，驱动电压 $<7\text{V}$ 。不用脊形结构的调制器性能：工作带宽 $2\sim 20\text{GHz}$ ，驱动电压 $5\sim 6\text{V}$ ；工作带宽 40GHz ，驱动电压 $>7\text{V}$ 。比较结果表明，反射结构的性能优于单程结构的性能；脊形结构的性能优于不用脊形结构的性能。

2.脊形行波电极Z切 LiNbO_3 电光调制器

行波电极调制器，由于 LiNbO_3 材料自身的高介质常数，微波和光波速度不匹配，是限制带宽的主要因素。同时阻抗不匹配，电极的传输损耗，也会限制调制带宽。传统的行波调制器在获得速度匹配的同时，低驱动电压情况下，由于微波的有效折射率增加，电极电容明显增大，特征阻抗远小于 50Ω ，阻抗不能同时得到匹配。

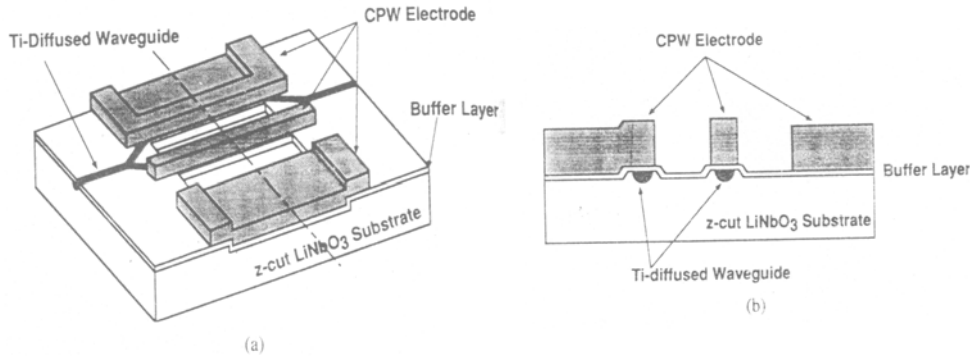


图6 (a) 脊形LiNbO₃ Mach-Zehnder光调制器 (b) 横截面结构

(1) CPW 电极结构

引入脊形结构，一般采用CPW电极，中间电极加电压，两边接地，中间电极和地电极间的LiNbO₃衬底被腐蚀掉，覆盖上一层SiO₂缓冲层，如图6所示。在脊形结构中，高介质常数的LiNbO₃被移去，被中间电极周围的低介质常数的空气和SiO₂取代，这样衬底的有效折射率 n_m 变小，微波速度和光波速度近似相等时，得到速度匹配。同时由于脊形结构的作用，电极厚度 t_m 和缓冲层厚度 t_b 一定时，随着脊深 t_r 的增加，电极电容减小，特征阻抗 Z_m 增加，和信号源的50Ω阻抗匹配，即阻抗匹配能同时满足。脊形结构中，缓冲层中的电位减小要比LiNbO₃的小，波导内的微波场强要比传统结构中波导的微波场强大，波导区域内的电位分布是平行的，而不是同心圆，则微波场的垂直分量（z轴）比传统结构的要大^[2]，最大的电光系数 γ_{33} 可以充分利用， $V_{\pi}L$ 就会减小。当脊深 t_r 增加时，由于微波流经过的金属横截面增加，损耗系数 α 减小。合理的设计调制器参数，计算出来的3-dB带宽甚至超过100GHz，而驱动电压却不到5V^[2]。而光波导仅在相互作用区域被腐蚀，对光学特性的影响很小。输入、输出单模光纤耦合衰减没有变化，Y分支的分支和汇合衰减也没有变化，脊宽稍稍大于光波导宽度，使得光传输损耗小的足以忽略^[2]。

香港大学电子工程系的Kwok Wah Hui等人，研制了1.55μm波长M-Z行波LiNbO₃电光调制器，采用Z切CPW结构和5段反相电极最佳设计，既使带宽增大，又使驱动半波电压减小，为特性阻抗、半波电压以及驱动功率之间提供最好折衷。5段反相电极与单段电极调制器比较，3dB带宽分别为15GHz和3.6GHz，对应的半波电压分别为14V和4V。

(2) 两层电极结构

中间电极的宽度在制作时不能准确的控制，结果会比设计时的窄，调制器的驱动电压就会比设计时的稍大。电极由薄的下部电极和厚的上部电极两部分组成，上部电极足够厚，能够达到速度和阻抗匹配，下部电极很薄，只有几微米厚，可以减小损耗 α_0 。下部电极的纵横比小，电极的宽度，电极间间隔，电极和波导的排列容易控制。下部电极厚度 T_1 对 $V_{\pi}L$ 、 Z_c 、 n_m 的影响很小， $V_{\pi}L$ 由下部电极宽度 W_B 决定，下部电极宽度减小， $V_{\pi}L$ 增加，所以要准确的控制下部电极的宽度，以获得小的 $V_{\pi}L$ 。由于脊形结构的作用， $V_{\pi}L$ 的值要减小20%。上部电极有时候会偏离几微米，由于下部电极和脊行波导是对齐的，对调制器的性能没有多大的影响^[4]。

3. 脊形行波电极X切LiNbO₃电光调制器

X切LiNbO₃电光调制采用水平方向电场分量，和Z切的相比，电场和光场的重积分因子，理论上可以有所提高，如图7所示。

传统的X切调制器设计中，波导通常放在电极间距的中间，波导区域内的电场和衬底表面平行，即TE导模。但是，外加电场场强在电极边缘附近最大，且最大光场场强位于波导中间。如果波导从电极间距中间移向一个电极附近，电场和光场的相互作用就会有所提高。

电场和光场的重积分因子提高，驱动电压就会减小^[5]。

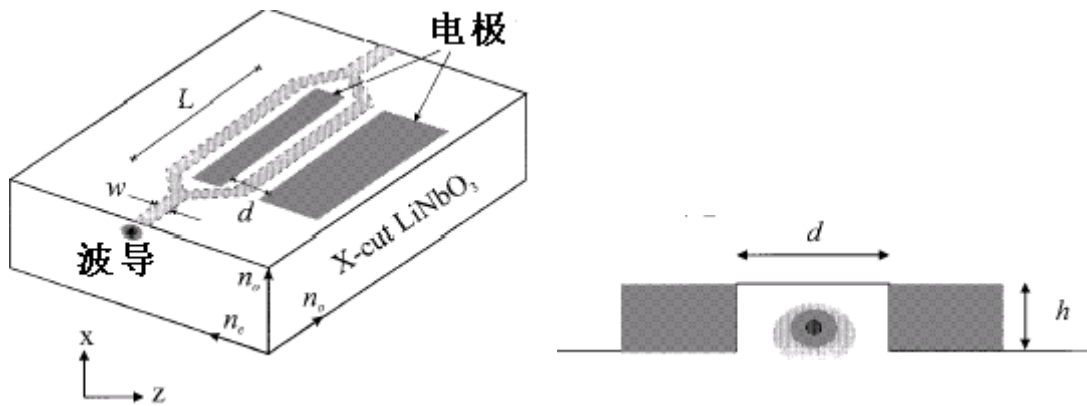


图7 脊形X切LiNbO₃ Mach-Zehnder 制器结构图

引入脊形结构，在调制作用区域，调制器的电场强度增加，光场和一较大的电场相互作用，驱动电压减小。脊形结构使得电极附近电场的峰值变大，如果把波导朝一个电极附近移动，驱动电压可以进一步减小。但是脊形结构，随着脊深的增加，微波有效折射率增会变大，带宽相应变窄。脊形结构虽然可以明显的改善驱动电压，但是以稍稍减小带宽作为代价。

以色列通用微波公司的Samuel Hopfer等人，研制了一种宽带低驱动功率的1.55μm波长的高速LiNbO₃电光调制器。该器件结构为M-Z干涉仪型，结构设计以50Ω特性阻抗为特色，在共平面RF传输线和光波导LiNbO₃衬底之间，填充浮置电极以及较厚的低介电常数缓冲层，使光波和RF波的传输速度接近匹配。得到调制器的3dB带宽为40GHz，需要的RF驱动功率低至44mW~60mW。

4. 结构的改进

(1) 行波电极X切LiNbO₃电光调制器，部分移去SiO₂缓冲层，可降低驱动电压 $V\pi$ ，抑制调制器的直流漂移。对于传统的X切LiNbO₃调制器，为减小驱动电压，信号电极（热电极）宽，热电极和地电极间距窄。这种电极尺寸，速度很难匹配，带宽受限；光波和微波的相互作用减少，所需要的驱动电压比较高；且电极的特征阻抗接近25Ω，调制时驱动器的阻抗为50Ω，阻抗不匹配，会产生无法接受的高的微波反射。

设计思想：共面电极的性能和热电极周围的介电常数有关，而和地电极周围的介电常数关系很小。部分移去SiO₂缓冲层，相当于用空气层代替SiO₂缓冲层，空气的介电常数比SiO₂的要小，部分移去SiO₂会使微波电场更多地集中在LiNbO₃衬底表面区域，增强微波和光波的相互作用。这样在一个调制器中，低驱动电压和高速调制能同时得到满足^[7]。

一般认为介质材料，LiNbO₃衬底和SiO₂缓冲层里产生的电载体，是产生直流漂移的主要原因。部分移去SiO₂缓冲层，电极间缓冲层分离，可以抑制光器件的短时间直流漂移。



图8 部分移去SiO₂缓冲层A型

B型

如果电极间间距暴露的缓冲层完全被空气取代，微波电场过多的集中在热电极周围的紧密区域，会使微波和光波的相互作用效率降低，驱动电压变大。在三种腐蚀缓冲层的模式中，

A是电极间暴露的缓冲层被移去，热电极周围的还保留。B是除了热电极下面和周围的缓冲层，别的都被腐蚀掉了。C是A和B的中和，去掉中间的和地电极下面的部分。图8中B型的缓冲层宽度是13 μm 时，驱动电压会减小9—15%，微波的有效折射率 n_m 变大会使调制带宽有些许的减小，这对于10G的调制来说没有多大影响。缓冲层对特征阻抗的影响很小。对带宽微波有效折射率的影响，可以通过用厚电极来补偿。但是厚电极同时可能会带来别的影响，需要重新分析。既然特征阻抗和缓冲层厚度有关系，去掉部分缓冲层，特征阻抗基本上没有影响。

(2) 行波电极X切LiNbO₃电光调制器，薄的LiNbO₃层（几 μm ）调制器，去掉SiO₂缓冲层，速度和阻抗匹配可以明显的改进，同时 $V_{\pi}L$ 也减小了，如图9所示。

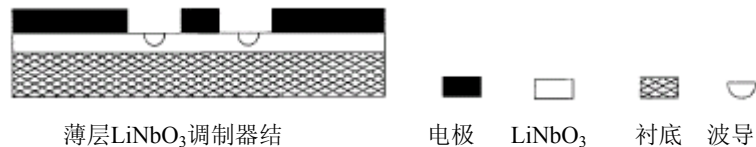


图9 薄层LiNbO₃调制器结构 电极 LiNbO₃ 衬底 波导

由于LiNbO₃材料自身的低折射率系数和强电光效应，成为许多有源集成光电路的首选材料。薄的LiNbO₃层可使LiNbO₃器件集成在不同的衬底上，可以改进调制器的有效折射率和特征阻抗^[8]。薄膜设计的主要结果是微波场的大部分在低介电常数材料中传输，而不在LiNbO₃材料中，则整个结构的有效折射率变小，容易达到速度匹配。特征阻抗随着LiNbO₃层厚度的减小而增加，选择合适的电极尺寸，很容易得到阻抗匹配。同时随着LiNbO₃层厚度的减小，LiNbO₃中的微波场在空间上更集中，改进了重积分因子 Γ ， $V_{\pi}L$ 减小。由于没有电极缓冲层， $V_{\pi}L$ 值也会变小^[8]。

传统的厚的LiNbO₃衬底调制器，要使速度和阻抗相匹配，在电极和LiNbO₃之间加入一厚的SiO₂缓冲层，同时会加大 $V_{\pi}L$ 值。对于薄层LiNbO₃调制器，没有加SiO₂缓冲层，速度匹配，阻抗匹配也能够得到。因为部分微波损耗（尤其是高频时）是由于LiNbO₃和SiO₂的介质损耗造成的，厚型LiNbO₃调制器中，SiO₂缓冲层的损耗是LiNbO₃衬底损耗的两倍。使用薄的LiNbO₃层，同时去掉SiO₂，LiNbO₃损耗减小，去掉SiO₂损耗，微波损耗中的介质损耗大大减小了。另外一个问题就是衬底材料的选择，在电极尺寸一致的情况下，衬底系数比较小的调制器的性能会好的多。

薄层LiNbO₃调制器和电极间距相同的厚调制器相比较，微波损耗因子 α_0 和调制带宽值都差不多，只是驱动电压要低些。另一方面，增加薄层调制器的电极间距，得到的 $V_{\pi}L$ 值和厚调制器相同，但是其损耗会变小，带宽加宽。

对于行波电极X切LiNbO₃电光调制器，可以把几种结构混和起来考虑：把电极移向其中一个电极，接近中心电极的光波导需要的 $V_{\pi}L$ 比较小；可改电极结构为推挽电极结构增加带宽；可以引入脊形结构，使用薄的LiNbO₃层，缓冲层部分去掉，或者全部去掉。日本NTT实验室的最新成果是使用这种结构的LiNbO₃电光调制达到驱动电压仅为2V的100GHz的超宽带宽。

4. 高速低驱动电压LiNbO₃光调制器

日本富士通研究所最近推出了在0.9V低电压下运行的40G LiNbO₃光调制器。过去的LiNbO₃调制器的驱动电压需要3V到5V，如果采用此次开发的技术，将可以省去专用的驱动电路，大幅减小面向40G光发射机的体积并且降低成本。低电压技术的关键就在于开发出了使信号电极最优化的仿真技术，并采用了使两个信号电极互补的驱动方式。另外，由于此次实现低电压化，因此将可以通过采用了实现低成本化的SiGe技术等的Si工艺的逻辑电路，直接驱动LiNbO₃光调制器。可以使光发送器IC集成在单个芯片中。

国内光电调制器器件的研究起步相对比较晚，现在很多单位，都只是在理论上进行数值分析和设计，也有实验室的产品，只是用于商用的较少，带宽已达10GHz。

三 制作工艺

用LiNbO₃为衬底制作光波导的方法很多，目前应用最广的是钛扩散和质子交换技术。由于调制器对波导的稳定性要求较高，宜采用钛扩散光波导。下面就集成光波导器件电极光刻制作作一简单介绍。对于光刻技术，可供选择的有腐蚀法和剥离法。腐蚀法的优点在于光刻操作容易，但会造成电极侧面形状腐蚀，形成图形规则性差；剥离法的特点正好与腐蚀法相反。根据这种差异，对于电极形状要求严格的调制器，可采用剥离法。腐蚀法和剥离法制作电极的光刻过程分别如图 10 和图 11 所示。

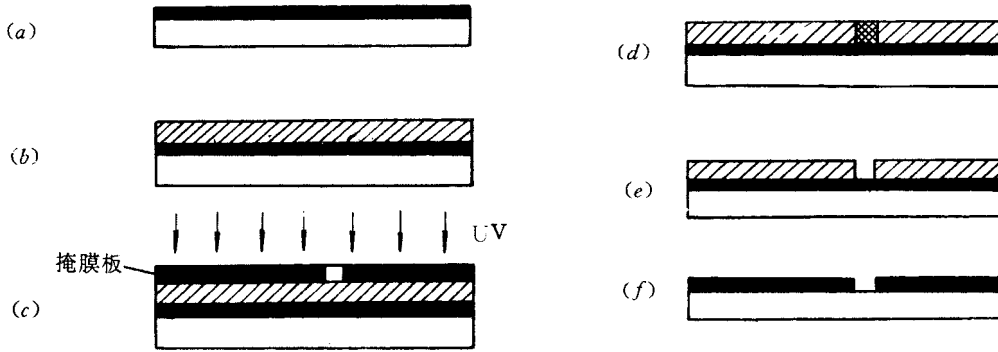


图 10 腐蚀法制作电极金属层

(a) 涂覆金属；(b) 涂光刻胶；(c) 曝光；(d) 烘烤；(e) 显影；(f) 腐蚀

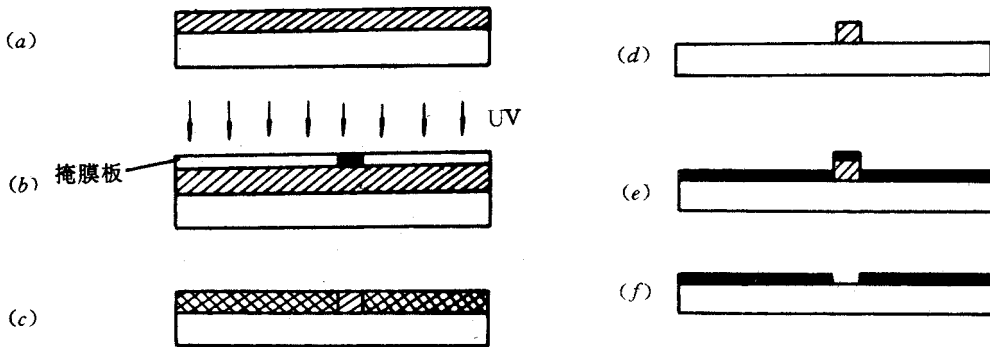


图 11 剥离法制作电极金属层

(a) 涂光刻胶；(b) 曝光；(c) 烘烤；(d) 显影；(e) 涂覆金属；(f) 去除光刻胶

四 结束语

LiNbO₃电光调制是目前最有发展潜力的外调制器，在国外，比特率为 10Gb/s的光传输系统已经用于商业网络，现在实验的目标是增加光纤传输系统的容量，比特率增加到 40Gb/s^[5]。最近，已有 43Gb/s的LiNbO₃调制器开始商用。120Gb/s的光传输系统理论上也有所研究。随着比特率的增加，由于电设备的限制，高频时，用高电压驱动调制越来越困难，所以要实现将来高速光纤传输系统，减小宽带LiNbO₃调制器的驱动电压，是极其重要的问题。LiNbO₃调制器已经广泛研究了几十年了，技术已经相当成熟，只有采用本质上不同的方法，才能有明显的改进。根据系统要求不同，设计的重点不同。所以优化调制器性能可以从各个方面着手考虑。从国内外的的发展我们可以看出，在国外LiNbO₃电光调制发展非常迅速，而在国内LiNbO₃电光调制的发展还停留在工艺探讨与研究阶段，所以对LiNbO₃电光调制进行研究设计以及器件的实现，对我国紧跟世界先进技术具有十分重大的意义。

主要参考文献

1. O. Mitomi, K. Noguchi, and H. Miyazawa, "Broadband and low driving-voltage LiNbO₃ optical modulators," IEE Proc.-Optoelectron., vol. 145, pp. 360-364, 1998
2. Kazuto Noguchi, Osamu Mitomi, Hiroshi Miyazawa, and Shunji Seki, "A Broadband Ti: LiNbO₃ optical modulator with a Ridge Structure," Journal of Lightwave technology, vol. 12, pp. 1164-1168, 1995
3. Kazuto Noguchi, Osamu Mitomi, and Hiroshi Miyazawa, "Millimeter-Wave Ti: LiNbO₃ Optical Modulators," Journal of Lightwave technology, vol. 16, pp. 615-619, 1998
4. Kazuto Noguchi, Hiroshi Miyazawa, and Osamu Mitomi, "40-Gb/s Ti: LiNbO₃ Optical Modulator with a Two-stage Electrode," IEICE Trans. electron., vol. E81-C, pp. 1316-1320, 1998
5. Shih-Jung Chang, Ching-Long Tsai, Yih-Bin Lin, Ju-Feng Liu, and Way-Seen Wang, "Improved Electrooptic Modulator with Ridge Structure in X-cut LiNbO₃," Journal of Lightwave technology, vol. 17, pp. 843-846, 1999
6. 陈福深, 集成电光调制理论与技术, 国防工业出版社, 1995
7. Yasuyuki Miyama, Tohru Sugamata, Yoshihiro Hashimoto, Toshihiro Sakamoto, and Hirotsoshi Nagata, "Novel x-cut lithium niobate intensity modulator with 10G bandwidth," SPIE vol. 3847, 1999
8. I.-L. Gheorma, P. Savi, and R.M. Osgood, Jr., "Thin Layer Design of X-cut LiNbO₃ Modulators," IEEE Photonics technology letters, vol. 12, pp. 1618-1620, 2000