

文章编号: 1001-3806(2021)04-0485-07

利用高对比度光栅实现光束大角度偏转

王超素¹, 江孝伟^{1,2*}

(1. 衢州职业技术学院 信息工程学院, 衢州 324000; 2. 北京工业大学 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了分析高折射率对比度光栅(HCG)参量和入射波长对光束偏转角的影响,采用严格耦合波法设计了透射光束可偏转非周期三角HCG,并通过时域有限差分法证明了所设计的非周期三角HCG可实现 30.3° 的透射光束偏转。结果表明,当低折射率介质材料折射率从1增加到1.4时,透射光束偏转角可实现 11° 的调谐;当入射波长从波长 $1.5\mu\text{m}$ 增加到 $1.6\mu\text{m}$ 时,该非周期三角HCG可实现 3.527° 的透射光束偏转角调谐。这一研究结果可对将来制备高性能光束偏转光栅提供理论指导。

关键词: 光栅; 光束偏转; 透射光; 非周期

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.04.012

Large angle deflection of beam using high contrast grating

WANG Chaosu¹, JIANG Xiaowei^{1,2}

(1. College of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China; 2. Optoelectronics Technology Laboratory of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to analyze the influence of high contrast grating(HCG) parameters and incident wavelength on beam deflection angle, the rigorous coupled wave method was used to design a deflectable non-periodic triangular HCG, and it is proved that 30.3° beam deflection can be achieved in the designed non-periodic triangular HCG by the finite-difference time-domain (FDTD). At the same time, it is found that when the refractive index of the low refractive index material increases from 1 to 1.4, the deflection angle of the transmission beam can achieve 11° tuning, and when the incident wavelength increases from $1.5\mu\text{m}$ to $1.6\mu\text{m}$, the aperiodic triangular HCG can achieve 3.527° transmission beam deflection angle tuning. The results can provide theoretical guidance for the fabrication of high-performance beam deflection gratings in the future.

Key words: gratings; beam deflection; transmission beam; non-periodic

引言

高折射率对比度光栅(high contrast grating, HCG)是一种单层亚波长光栅,其中光栅中高折射率材料完全被低折射率材料包围,包括顶部和底部的界面^[1]。由于HCG存在较高的折射率差,所以其存在较宽的反射带宽,并因此逐渐被应用在垂直腔面发射激光器(vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)中。TSUNEMI将具有高反射的HCG替代VCSEL上分布

式布喇格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)实现了VCSEL单偏振激射^[2]。除了可以利用HCG实现VCSEL单偏振激射外,还可以利用HCG实现VCSEL单横模激射和空间光束整形^[3-5]。

随着对HCG的进一步研究可以发现,通过改变HCG的参量(周期、条宽、厚度等)可以实现对透射光束波前相位的控制,并通过适当的设计可以利用HCG实现透射/反射光束的聚焦和偏转^[6-7]。如CARLETTI等人在绝缘体硅(silicon on insulator, SOI)晶片上制备了光束可偏转HCG,他们通过调节每个光栅条周期使整个HCG对 $1.55\mu\text{m}$ 波长实现 5.98° 的透射光束偏转^[8];MA等人通过对HCG每一个光栅条参量的精细选择,在理论上不仅使HCG能够实现 27.42° 的偏转,同时还能够保持较高的透射率^[9];FANG等人基于SOI晶片设计并制备了圆环形反射光束聚焦HCG,经过测试可得该HCG可在 10.87mm 处产生焦点,并且

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61575008; 61650404);江西省自然科学基金资助项目(20171BAB202037);江西省教育厅科技项目(GJJ170819);衢州市科技计划资助项目(2019K20)

作者简介:王超素(1983-),女,讲师,现主要从事半导体光电子器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: JosephJiangquzhi@126.com

收稿日期:2020-07-24;收到修改稿日期:2020-09-12

聚焦效率可达80%^[10]。因为HCG可对光束进行操作,这对于其将来在激光打印、雷达等当中具有广泛的应用前景^[11-12]。

从上述研究中可以发现,虽然目前有较多文献中利用HCG实现了对光束的偏转或者聚焦^[6-10],但是鲜有分析HCG参量和入射波长等对其偏转角或者焦距的影响,其实根据参考文献[8]中的理论公式可知,HCG的参量(低折射率材料折射率、HCG宽度等)和入射波长对光束偏转角度有显著的影响。为此,作者设计了透射光束可偏转非周期三角HCG,分析了低折射率材料折射率、入射波长对光束偏转角的影响,并进行了进一步解释。

通过严格耦合波法和时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)设计了透射光束可偏转非周期三角HCG,经计算发现,设计的非周期三角HCG可实现透射光30.3°的偏转,随后分析了低折射率介质材料折射率和入射光波长对透射光束偏转角的影响,经计算分析可知,当低折射率介质材料的折射率从1增加到1.4时,光束偏转角可实现11°的调谐;当入射光波长在1.55μm上下调谐,也可实现光束偏转角3.527°的调谐。

1 模型建立

本文中提出的非周期三角HCG如图1所示。它由硅(Si)材料和空气构成,Si的折射率为3.48,空气折射率为1。在图中, Λ_n 和 S_n ($n=0,1,2,\dots$)分别为非周期三角HCG光栅条的周期和底边长,非周期三角HCG光栅条占空比 $\eta_n = S_n/\Lambda_n$ ($n=0,1,2,\dots$), $d = 1\mu\text{m}$ 为非周期三角光栅条的高度, x_n 和 ψ_n ($n=0,1,2,\dots$)分别为某一个非周期三角HCG光栅条的中心位置和对应的相位, w 是非周期三角HCG整体宽度。在实际器件制备中,可以先在Si层上生长一层牺牲层,然后利用电子束光刻和干法刻蚀等工艺程序将Si层刻蚀成

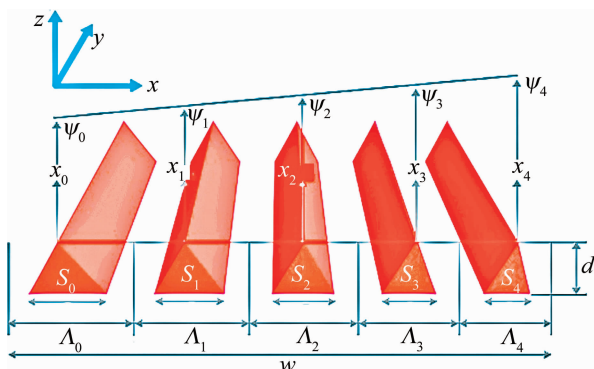


Fig. 1 Non-periodic isosceles triangle HCG structure

非周期三角HCG,最后通过腐蚀液将牺牲层腐蚀掉,这就可以形成悬空、由空气层包围的高对比度非周期三角HCG^[13]。

对于矩形HCG,通常是基于等效介质理论直接将其等效为一层介质薄膜,该介质薄膜的等效折射率由矩形光栅的参量和入射光偏振所决定^[14]。但是对于三角HCG,无法利用等效介质原理直接将其等效为一层薄膜,因为其宽度由下而上逐渐变窄,可以将三角HCG等效成由多个不同占空比矩形HCG叠加而成,这就可以将整个三角HCG等效为多层等效折射率不同的薄膜,具体如图2所示。通过计算多个矩形HCG的折射率,即可得到三角HCG的等效折射率。

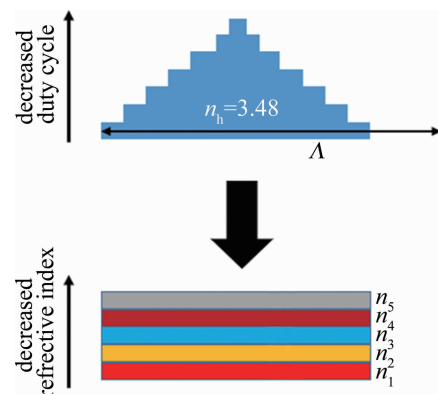


Fig. 2 Triangle HCG equivalence

矩形HCG参量和不同偏振态对其等效折射率的影响,可由下式表示^[15-16]:

$$n_{\text{TE},1} = [(1 - \eta)n_1^2 + \eta n_h^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$n_{\text{TM},1} = \left[\frac{1 - \eta}{n_1^2} + \frac{\eta}{n_h^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$n_{\text{TE},2} = \left[n_{\text{TE},1}^2 + \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2 \eta^2 (1 - \eta)^2 (n_h^2 - n_1^2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$n_{\text{TM},2} = \left[n_{\text{TM},1}^2 + \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2 \eta^2 (1 - \eta)^2 \left(\frac{1}{n_h^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)^2 n_{\text{TE},1}^6 n_{\text{TM},1}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中, n_1 和 n_h 分别是光栅的低折射率材料和高折射率材料, η 是光栅占空比(光栅条宽/光栅周期), Λ 是光栅周期, $n_{\text{TE},1}$ 和 $n_{\text{TM},1}$ 分别是不同偏振下光栅等效成薄膜的1阶等效折射率。从(1)式和(2)式可知,在1阶等效中,光栅等效薄膜折射率只与光栅占空比和光栅材料有关, $n_{\text{TE},2}$ 和 $n_{\text{TM},2}$ 分别是不同偏振下光栅等效成薄膜的2阶等效折射率,从(3)式和(4)式中可以发

现,在 2 阶等效中,薄膜折射率还与入射光波长 λ 和 Λ 有关。

η 和 Λ/λ 对光栅等效薄膜折射率的影响如图 3 所示。此时 $n_h = 3.48, n_1 = 1$ 。图 3a 是当 $\Lambda/\lambda = 0.5$ 时,占空比对光栅等效折射率的影响。从图中可以看到,随着占空比的增加,TE 偏振下的折射率要大于 TM 偏振的折射率,并且当 η 等于 0 或 1 时,两个偏振下的折射率相等。因为三角 HCG 可看为由几个不同占空比的矩形 HCG 构成,如图 2 所示,所以三角 HCG 从上到下的折射率分布与图 3a 中的曲线相似。图 3b 是当 $\eta = 0.5$ 时,周期与入射波长比值 Λ/λ 对光栅等效折射率的影响。从图中可看到,随着 Λ/λ 的增加,TM 偏振下的光栅等效折射率变化要比 TE 偏振下的显著。

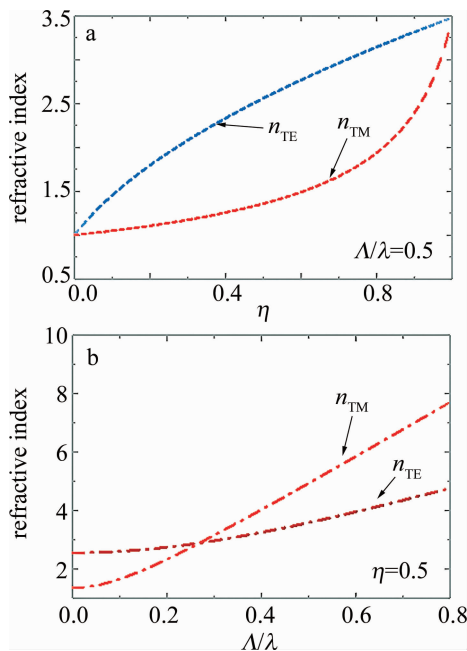


Fig. 3 The influence of grating parameters and incident wavelength on the equivalent refractive index of grating
a—the influence of η b—the influence of Λ/λ

为了让非周期三角 HCG 实现透射光束偏转,需让非周期三角 HCG 相位呈线性分布^[11],本文中设计的非周期三角 HCG 其整体相位分布是从左往右按照线性关系依次升高,具体见图 1。为设计出相位线性分布且具有较高透射率的三角 HCG,首先需计算周期性三角 HCG 参量对其透射率和透射相位的影响,然后选择合适的光栅参量设计出透射光束可偏转非周期三角 HCG。周期性三角 HCG 参量对其透射率和透射相位的影响可用严格耦合波法计算^[7],为了保证计算结果的准确性,本文将三角 HCG 细分为 50 个高度相同的小矩形来计算^[17],具体如图 4 所示。此时 $\Lambda = 0.5\mu\text{m}$,

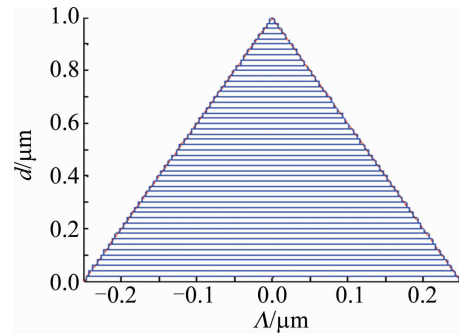


Fig. 4 Triangle HCG approximation

$\eta = 1$ 。

2 结果与讨论

2.1 非周期三角 HCG 设计与模拟

Λ 和 η 对周期性三角 HCG 相位和透射率的影响如图 5 所示(入射光波长(TM) $\lambda = 1.55\mu\text{m}$,光栅高度 $d = 1\mu\text{m}$)。之所以随着 Λ 和 η 变化,周期性三角 HCG 透射率会发生变化,是因为根据等效介质原理可知, Λ 和 η 变化,则三角 HCG 的等效折射率会发生变化,等效折射率变化,则会影响光栅的透射率,因为薄膜透射和反射与介质薄膜的折射率有关^[18]。而三角 HCG 相位随着 Λ 和 η 变化,也是因为 Λ 和 η 变化会影响三角 HCG 的等效薄膜折射率,根据(5)式可知,薄膜的相位变化是与入射波长、薄膜折射率、薄膜厚度有关的,所

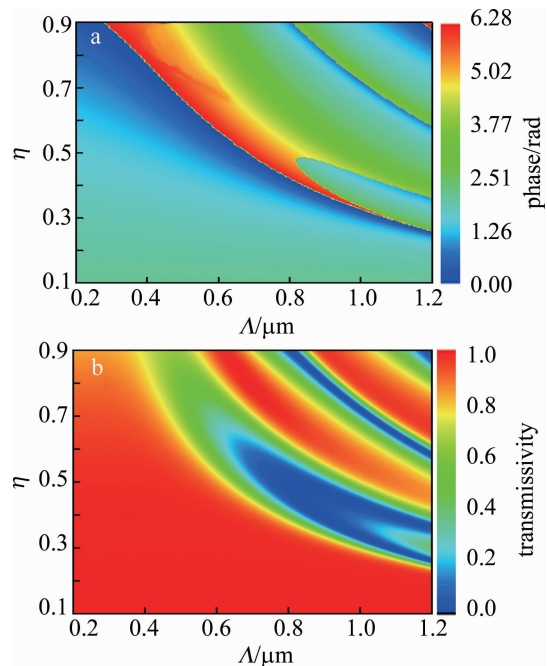


Fig. 5 Effect of grating parameters on phase and transmittance of periodic triangle HCG
a—on the phase of periodic triangle HCG b—on the transmittance of triangle HCG

以三角 HCG 的周期和占空比发生变化,则相位也会发生变化。

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}nh \quad (5)$$

式中, $\Delta\Phi$ 是薄膜的相位变化, h 是薄膜厚度, n 是薄膜折射率。

根据 Λ 和 η 对周期性三角 HCG 相位和透射率的影响,选择出一组透射率大于 85% 的光栅周期和占空比,根据(6)式对它们进行位置排列,相邻光栅条相位关系应与(7)式相符^[9]:

$$x_{n+1} = x_n + (\Lambda_n + \Lambda_{n+1})/2, (n=0,1,2,3\cdots) \quad (6)$$

$$\psi(x_{n+1}) = \psi(x_n + (\Lambda_n + \Lambda_{n+1})/2) = k_0 x_{n+1} \sin\theta \quad (7)$$

式中, k_0 是波数, $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ (TM 偏振), θ 是光栅透射光束偏转角,其大小由光栅整体相位差 $\Delta\psi$, k_0 和 w 决定,如下式所示^[8]:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\psi}{wk_0}\right) \quad (8)$$

结构参量和排列顺序如图 6 所示,具体参量数值可见表 1。从表 1 可以发现,非周期三角 HCG 能实现大角度光束偏转是因为相位累积的结果^[19],另外,本文中选择的三角 HCG 结构参量在电子束光刻的精度范围内。图 6a 是不同位置选择的 Λ_n 和 η_n ($n=0,1,2,\dots$),图 6b 是所设计的非周期三角 HCG 整体相位分布和理论相位分布。从图 6b 可知,本文中设计的非周期三角 HCG 总相位差 $\Delta\psi = 20.25\text{rad}$,本文中 $w = 10\mu\text{m}$,

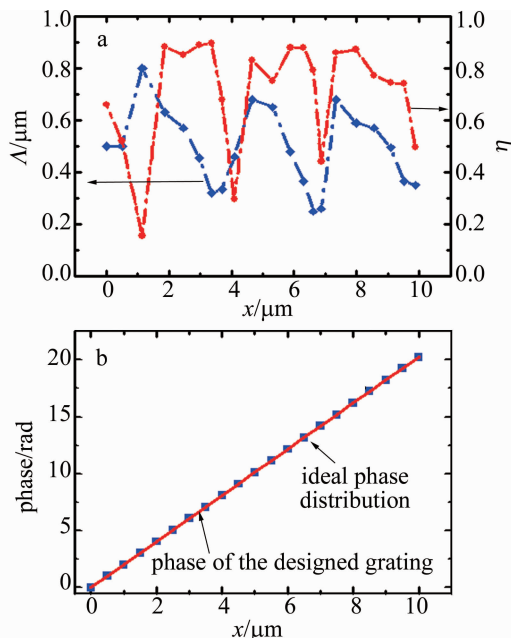


Fig. 6 Grating parameters and grating phase at different positions
a—grating period and duty cycle b—phase

Table 1 Parameters and phases of different elements of non-periodic triangular HCG

period $\Lambda/\mu\text{m}$	duty cycle η	phase/rad
0.5	0.66	0.029
0.5	0.52	1.025
0.8	0.156	2.027
0.63	0.884	3.038
0.57	0.852	4.045
0.455	0.888	5.060
0.32	0.896	6.076
0.335	0.68	0.810
0.46	0.296	1.820
0.68	0.832	2.833
0.65	0.752	3.855
0.48	0.88	4.864
0.365	0.88	5.879
0.25	0.792	0.608
0.26	0.44	1.623
0.68	0.86	2.635
0.59	0.872	3.643
0.495	0.744	5.673
0.365	0.74	0.046
0.35	0.496	1.418

根据(8)式计算可得本文中设计的光束偏转角为 30° 。

依据上述选择的光栅参量利用 FDTD 方法建立非周期三角 HCG 2 维模型并对其进行模拟计算,模型总共包含有 20 个不同周期和占空比的三角 HCG,四周边界条件设置的是完美匹配层(perfectly matched layer, PML),其主要作用是解决在仿真区域边界上的反射问题,光源为高斯光束(TM 偏振)。通过模拟计算可知,非周期等腰三角 HCG 光束偏转角可达 30.3° ,如图 7 所示。图 7a 是由 FDTD 方法建立的非周期三角 HCG 模型,图 7b 是非周期等腰三角 HCG 整体的光强分布图,图 7c 是在距离光栅透射面 $20\mu\text{m}$ 和 $30\mu\text{m}$ 处的光强分布。从图 7c 可以看到,随着离透射面的距离从 $20\mu\text{m}$ 增加到 $30\mu\text{m}$,光强的波峰也从 $x = -7.0086\mu\text{m}$ 左移到 $x = -12.8664\mu\text{m}$,据此得出透射光束偏转角为 $\theta = \arctan(5.8578/10) = 30.3^\circ$,非常接近由(8)式计算得到的光束偏转角度。最终模拟得到的偏转角稍微偏差目标的 30° ,主要因为理想的相位分布是连续的,而实际设计的相位分布是离散的,因而导致实际设计的非周期三角 HCG 偏转角度与理论有略有偏差^[9-10]。

另外根据计算发现,非周期三角 HCG 对 $1.55\mu\text{m}$ 波长透射率为 82.6%,略低于 85%。这是因为在非周

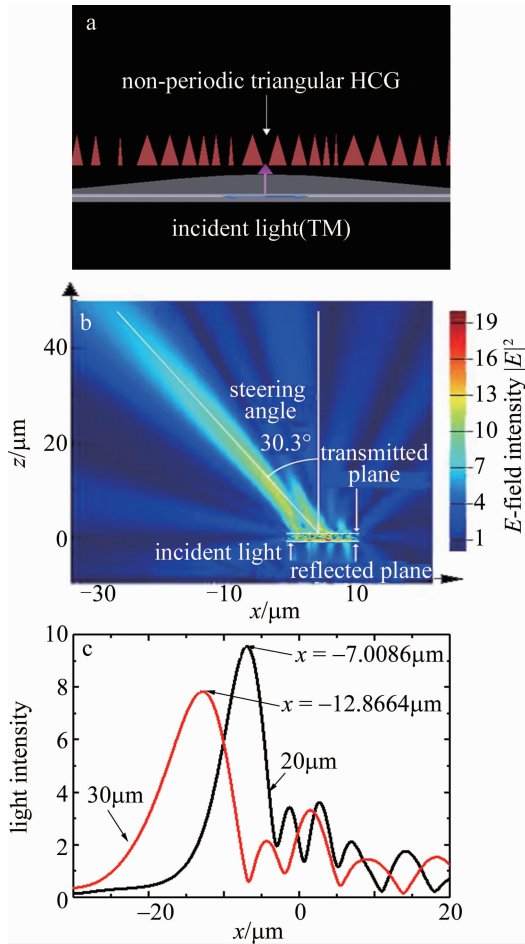


Fig. 7 a—HCG model of non-periodic triangle established by FDTD b—global light intensity distribution of non-periodic triangulated HCG c—light intensity at different height from transmission surface

期性的三角形 HCG 中,是由多个不同周期和占空比的三角 HCG 组合,不是无限大,而周期三角 HCG 在模拟计算时是无限大(即无限个周期),所以它们总的透射率会略低于周期性 HCG^[9],具体如图 8 所示。

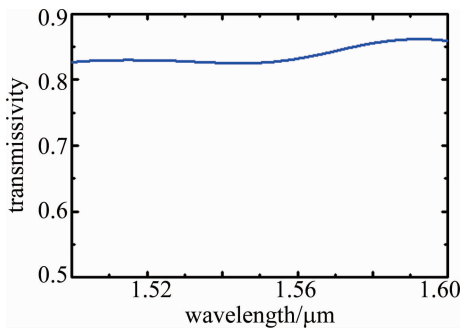


Fig. 8 The calculated transmittivity of non-periodic triangular HCG

2.2 结构参量对光束偏转角的影响

2.2.1 入射波长对偏转角的影响 图 9 是不同波长入射光照射到第 2.1 节中设计的非周期三角 HCG 后的光束偏转角。从图中可以看出,当入射光波长在 1.5 μm

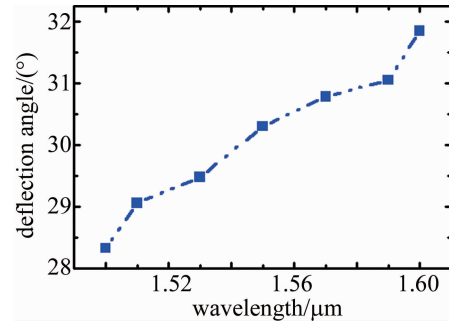


Fig. 9 Deflection angle of transmitted beam at different incident wavelengths ~1.6 μm 之间变化时,非周期等腰三角 HCG 依然能够实现大角度偏转。当入射光波长从 1.5 μm 增加到 1.6 μm ,透射光束偏转角从 28.323 $^\circ$ 增加到 31.85 $^\circ$,可实现透射光束 3.527 $^\circ$ 的调谐。这种能够实现透射光束偏转角可调谐特性对在雷达系统中的应用具有重要意义^[20-22]。

入射光波长在 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 附近变化时,非周期等腰三角 HCG 能够保持大角度透射光束偏转,主要是因为非周期等腰三角 HCG 每一个光栅条相位变化较小,而且整体的光栅相位依然能够呈大致的线性关系,如图 10 所示。从图 10 可知,虽然波长变化使光栅整体相位偏离了原先的线性关系,因为根据(5)式可知波长会影响光栅等效薄膜相位,但随着位置的增加,相位依然随之增加,保持着准线性分布。另外随着波长的增加光栅透射光束偏转角增加可由(8)式解释,因为总相位差 $\Delta\psi$ 随着波长增加变化不大, w 一直保持 10 μm ,而 k_0 却随着波长增大而减小,这就导致透射光束偏转角随着波长增加而增加,实现了透射光束偏转角的调谐。

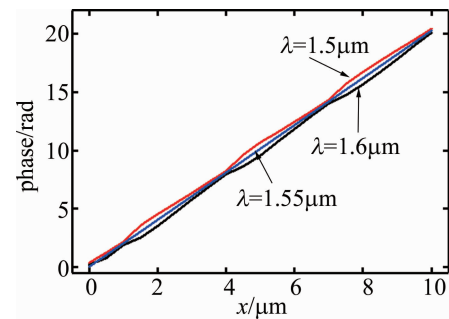


Fig. 10 The influence of wavelength on phase distribution

2.2.2 低折射率材料变化对偏转角的影响 不仅通过改变入射波长可以实现光束偏转角的调谐,还可以通过改变光栅低折射率材料 n_1 实现光束偏转角的调谐,如图 11 和图 12 所示。图 11 是不同 n_1 下的电场分布,图 12 是不同 n_1 下的非周期三角 HCG 光束偏转角。从图 11、图 12 可以发现,随着 n_1 的增加,在入射

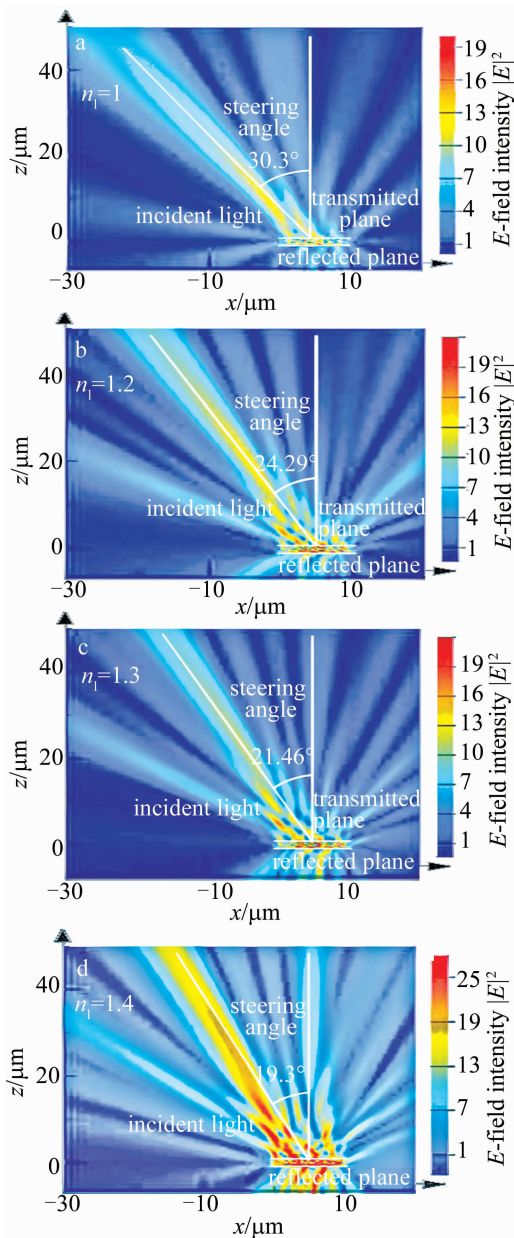


Fig. 11 2-D angular deflection patterns of non-periodic triangular HCG with different n_1

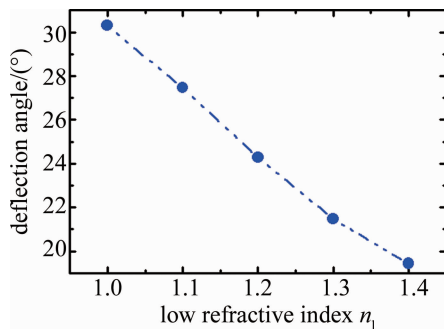


Fig. 12 The influence of low refractive index materials on the deflection angle of transmitted light

波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的条件下,非周期等腰三角 HCG 的光

束偏转角逐渐从 30.3° 下降到 19.3° , 实现了 11° 的光束偏转角调谐, 这为将来利用液晶作为低折射率材料实现电控光束偏转提供了理论基础。

折射率 n_1 对光束偏转角的影响可以解释如下。由(2)式可知, 随着折射率 n_1 的增大, 三角 HCG 的等效折射率增大, 这会引起非周期三角 HCG 的相位差减小, 从而导致偏角减小, 具体如图 13 所示。图 13 为不同 n_1 条件下用严格耦合波法计算得到的非周期三角形 HCG 的相位分布。可以发现, 随着 n_1 的增大, 非周期三角 HCG 相位差 $\Delta\psi$ 在下降。 $n_1 = 1$ 时, $\Delta\psi = 20.25\text{rad}$; $n_1 = 1.4$ 时, $\Delta\psi$ 降到 16.87rad 。根据(8)式可知, 相位差的减小会使偏转角度减小。此外, 从图 13 可以发现, n_1 分别是 1.1 和 1.2 时, 非周期三角 HCG 相位在 $x = 0.5\mu\text{m}$ 和 $x = 10\mu\text{m}$ 之间线性分布; n_1 是 1.3 和 1.4 时, 非周期三角 HCG 相位在 $x = 1\mu\text{m}$ 和 $x = 10\mu\text{m}$ 之间线性分布; $n_1 = 1.4$ 时, 非周期三角 HCG 有效宽度是 $9\mu\text{m}$, 代入(8)式计算可得光束偏转角为 19.27° , 这一结果与图 12 中的模拟值高度一致, 可以表明该模型是准确的。

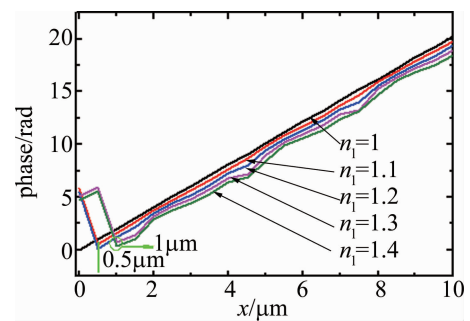


Fig. 13 Phase distribution of the non-periodic triangular HCG with different n_1 conditions

3 结论

实现透射光束偏转是现今光栅研究的重要方向之一, 基于非周期三角 HCG 实现了透射光束可偏转。所设计的非周期等腰三角 HCG 在入射光波长为 $1.55\mu\text{m}$ 时, 可实现透射光束偏转 30.3° , 这可为制备折射率渐变透射光束可偏转光栅提供理论指导, 也为将来作为替代光学透镜提供了技术准备。同时发现, 本文中设计的非周期三角 HCG 在不同低折射率材料和入射波长下可实现光束偏转角的调谐, 低折射率在 1 和 1.4 之间变化时, 可实现 11° 的光束偏转角调谐, 而入射波长在 $1.5\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$ 之间变化时, 可以实现 3.527° 的透射光束偏转角的调谐, 这对于集成光学和将来电控实现光束偏转角调谐也具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] MATEUS C F R, HUANG M C Y, DENG Y, *et al.* Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(2):518-520.
- [2] TSUNEMI Y, YOKOTA N, MAJIMA S, *et al.* 1.55 μm VCSEL with polarization-independent HCG mirror on SOI[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23):28685-28692.
- [3] HUANG M C Y, ZHOU Y, CHANG C J. Single mode high-contrast subwavelength grating vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(17):171108.
- [4] ZHOU Y, HUANG M C, CHANG H C J. Tunable VCSEL with ultrathin high contrast grating for high-speed tuning[J]. *Optics Express*, 2008, 16(18):14221-14226.
- [5] LI K, RAO Y, CHASE C, *et al.* Monolithic high-contrast metastructure for beam-shaping VCSELs[J]. *Optica*, 2018, 5(1):10-13.
- [6] GAO S, PARK C S, LEE S S, *et al.* A highly efficient bifunctional dielectric metasurface enabling polarization-tuned focusing and deflection for visible light[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(9):1801337.
- [7] FANG W J, HUANG Y Q, DUAN X F *et al.* Non-periodic high-index contrast gratings reflector with large-angle beam forming ability[J]. *Optics Communications*, 2016, 367:6-11.
- [8] CARLETTI L, MALUREANU R, JESPER M, *et al.* High-index-contrast grating reflector with beam steering ability for the transmitted beam[J]. *Optics Express*, 2011, 19(23):23567.
- [9] MA Ch L, HUANG Y Q, DUAN X F, *et al.* High-transmissivity non-periodic sub-wavelength high-contrast grating with large-angle beam-steering ability[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(12):120501.
- [10] FANG W J, HUANG Y Q, FEI J, *et al.* Concentric circular focusing reflector realized using high index contrast gratings[J]. *Optics Communications*, 2017, 402:572-576.
- [11] GORO T, YOSUKE T, MOE T, *et al.* Thermally controlled Si photonic crystal slow light waveguide beam steering device[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9):11529.
- [12] HUANG Y W, ZHANG X, ZANG J W, *et al.* Non-periodic wide-angle beam steering HCG array for application in VCSEL[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(1):20-29(in Chinese).
- [13] CHUNG I S, IAKOVLEV V, SIRBU A, *et al.* Broadband MEMS-tunable high-index-contrast subwavelength grating long-wavelength VCSEL[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(9):1245-1253(in Chinese).
- [14] XU P, TANG Sh T, YUAN X, *et al.* Design of an embedded tricolor-shifting device[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(2):60-71(in Chinese).
- [15] JOSEPH N M, DENNIS W P, MARK S M. Design of binary sub-wavelength diffractive lenses by use of zeroth-order effective-medium theory[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1999, A16(5):1157-1167.
- [16] JIANG X W, WU H. Research of 1-D sub-wavelength grating anti-reflection[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(2):177-181(in Chinese).
- [17] JING X F, ZHANG J Ch, JIN Sh Zh, *et al.* Design of highly efficient transmission gratings with deep etched triangular grooves[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(33):7920-7933.
- [18] GRUNHUT V, DEPING R A. Influence of the sign of the refractive index in the reflectivity of a metamaterial surface with localized roughness[J]. *European Physical Journal*, 2011, D62(2):227-236.
- [19] SHI W Y, DENG W M, LIU W N, *et al.* Rectangular dielectric metagrating for high-efficiency diffraction with large-angle deflection[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(7):073601.
- [20] WANG Ch M, PENG Z H, LIU Y G, *et al.* Radial sub-aperture coherence method to achieve beam steering with high precision and stability [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5):6331-6347.
- [21] LI Zh S. Design of liquid crystal polarization grating and study of its beam deflection characteristics[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019:89-90(in Chinese).
- [22] PAN W J, WU Zh Y, ZHANG X L. Identification of aircraft wake vortex based on k-nearest neighbor [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(4):471-477(in Chinese).