

太赫兹偶数分束器设计与公差分析

黄海漩 徐平 阮双琛 杨拓 袁霞 黄燕燕

Design of a terahertz even splitter and its tolerance analysis

Huang Hai-Xuan Xu Ping Ruan Shuang-Chen Yang Tuo Yuan Xia Huang Yan-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 154212 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.154212

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属粒子阵列共振的偏振特性研究

Polarization characteristics of the lattice resonance of metal nanoparticle array

物理学报.2015, 64(16): 164202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164202>

Bessel 光束经椭圆环形孔径后的衍射光场

Diffraction optical field of the Bessel beam through elliptical annular aperture

物理学报.2015, 64(12): 124201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124201>

大散射角散斑场中有关相位奇异新特性的研究

New features of the speckle phase singularity produced in large angle scattering

物理学报.2015, 64(8): 084210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084210>

利用近前向散射图样识别单粒子形状的理论研究

Shape classification of single aerosol particle using near-forward optical scattering patterns calculation

物理学报.2015, 64(5): 054202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054202>

基于光子晶体分光的气敏传感器研究

The research of the air-sensitive sensor based on the photonic crystal beam splitter

物理学报.2011, 60(5): 054215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.054215>

太赫兹偶数分束器设计与公差分析*

黄海漩 徐平[†] 阮双琛 杨拓 袁霞 黄燕燕

(深圳大学电子科学与技术学院, 深圳 518060)

(深圳大学微纳光电子技术研究所, 深圳 518060)

(2015年1月19日收到; 2015年3月3日收到修改稿)

本文运用二元光学矢量理论设计了一种硅基太赫兹偶数分束器, 实现高衍射效率、高均匀性、有效抑制零级的偶数分束, 突破传统标量方法设计局限性, 给出了分束器脊宽、槽宽、槽深、占空比、基底厚度等结构参数的最优设计值, 并进行了公差分析, 得到分束器各结构参数的加工允许偏差范围, 对器件的设计和制作具有指导意义.

关键词: 亚波长, 二元矩形周期结构, 太赫兹偶数分束器, 严格耦合波法

PACS: 42.79.Fm, 42.25.Fx, 42.79.Dj, 87.50.U-

DOI: 10.7498/aps.64.154212

1 引言

分束器在光纤通信、光计算、光存储、光电技术、图像处理及精密测量等领域得到广泛应用^[1]. 近年来学者们提出了多种偏振分束器^[2-5]及奇数型分束器, 包括双槽达曼结构的三分束器、五分束器、七分束器^[6-8]、双槽三角形结构的七分束器^[9], 基于亚波长简单矩形周期结构三分束器^[10]等. 与奇数型分束器相比, 消除零级衍射谱点的等光强偶数型分束器由于其在光纤光栅线性啁啾相位掩膜的制作、光刻机光学系统分束、数字全息光学系统去噪等高消零级衍射要求等场合的独特应用而引起广泛兴趣. 然而, 由于零级衍射的噪声特性, 偶数型分束器必须满足消除零级噪声条件下的高衍射效率和高光强均匀性, 其设计优化过程相对于奇数型分束器更为复杂和困难, 且对制作工艺的要求更高, 制作难度大. 目前研究主要集中于无须套刻的二元相位结构, 即基于标量理论设计的复周期 Dammann 结构^[11-13], 文献^[11]和文献^[12]中报道的衍射效率分别为80%左右和60%—83%

之间, 相对均匀性误差在 5.7×10^{-5} — 3.2×10^{-4} 之间. 文献^[13]对偶数和奇数达曼光栅数值解进行了探讨, 所报道的偶数分束器衍射效率为72%—86%之间, 相对均匀性误差在 1.0×10^{-5} — 4.27×10^{-3} 之间. 文献^[14]提出基于矢量设计理论的亚波长复周期 Dammann 结构使衍射效率提高到90%以上^[14]. 上述方法由于使用了复周期结构, 其相位突变点较多、线条精度跨度大, 制作精度要求较高, 实际制作时可能难以保证较好的零级抑制效果和高衍射效率. 而传统标量方法的局限性使得基于简单周期结构的偶数分束器设计未能实现. 因此, 如何实现二元简单周期结构下的高衍射效率、高均匀性的消零级衍射偶数分束, 是一个具有挑战性和实用性的问题. 基于二元简单周期矩形结构实现消零级、高衍射效率、高均匀性偶数分束, 目前国内外尚未见相关报道. 在太赫兹波段实现太赫兹波的偶数多分束研究更未见报道.

我们在二元光学衍射设计理论及应用技术方面进行了大量研究^[15-24], 本文运用二元光学矢量理论设计了TE偏振正入射、频率为2.52 THz太赫兹波段硅基四分束器, 实现高衍射效率、高均匀性、

* 国家自然科学基金(批准号: 61275167, 60878036, 60178023)和深圳市基础研究计划项目(批准号: JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637, JCYJ20120613112628842, JC201005280533A)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xuping@szu.edu.cn

有效抑制零级的偶数分束, 突破传统标量方法设计局限性, 给出了分束器脊宽、槽宽、槽深、占空比、基底厚度等结构参数的最优设计值, 并进行了公差分析, 得到分束器各结构参数的加工允许偏差范围, 对器件的设计和制作具有指导意义.

2 太赫兹偶数分束器设计理论与方法

亚波长二元矩形简单周期结构如图 1 所示, 折射率在 y 方向(垂直纸面向外)上均匀分布, 在 x 方向上周期分布, 且光栅脊宽为 a , 槽宽为 b , 周期为 d , 槽深为 h_1 , 占空比 f 定义为脊宽 a 与周期 d 之比, 即 $f = a/d$, 基底介质厚度为 h_2 . 在 z 方向上光栅区域划分为四个水平层: $z < 0$ 为入射介质层, 其折射率为 n_1 ; $0 < z < h_1$ 为光栅层, 由折射率为 n_1 和 n_2 的两种介质组成; $h_1 < z < h_1 + h_2$ 为基底介质层, 其折射率为 n_2 , $z > h_1 + h_2$ 为出射介质层, 其折射率为 n_1 . 入射介质层、出射介质层相对于光栅介质层可认为无穷厚.

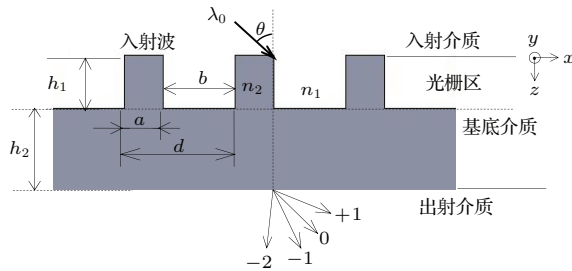


图 1 亚波长二元矩形周期结构模型

Fig. 1. Model of a subwavelength binary simple periodic rectangular structure.

本文所设计的偶数分束器分束数为 $N = 2L$ (L 为最大衍射级次, $L = 1, 2, \dots, n$, n 为自然数), 如图 1, 波长为 λ_0 的 TE 平面波以 θ 角入射到该光栅结构, 满足光栅电磁理论导出的光栅方程^[25,26].

$$n_1 \sin \theta_q - n_1 \sin \theta = \frac{q\lambda_0}{d}, \quad (1)$$

式中, q 为衍射级次, θ_q 为第 q 级衍射角. 由光栅方程(1)式可知, 对于分束数为 $N = 2L$ 的亚波长简单周期矩形光栅, 当平面波垂直入射 ($\theta = 0$) 到光栅上时, 需要至少产生 L 级衍射级次, 且保证第 L 级衍射的衍射角小于 90° , 因而光栅周期 d 应首先满足

$$d > d_{\min} = \frac{L}{n_1} \lambda_0. \quad (2)$$

为使入射波能量尽可能集中在所需的分束级次上, 光栅应避免产生第 $L+1$ 个级次的衍射波, 因此光栅周期应满足

$$d < d_{\max} = \frac{L+1}{n_1} \lambda_0. \quad (3)$$

由此可知, 当周期满足

$$(L\lambda_0/n_1) < d < (L+1)\lambda_0/n_1 \quad (4)$$

时, 光栅只产生最大级次为 L 级的衍射级次, 产生的各级衍射波中只有前有限个衍射级次的强度不为零, 所有能量几乎集中在所需的出射分束级次上, 当然也包括零级衍射级. 对于偶数级次分束器, 抑制这个零级输出就是技术难点. 此时调整光栅结构参数(如占空比 f 、光栅周期 d 、槽深 h_1 、基底厚度 h_2), 利用亚波长结构的特性, 对于偶数级次分束器设计, 一方面使零级衍射光在亚波长结构内发生共振效应并形成在分束器表面传播的倏逝波而无法透射, 另一方面, 在实现消除零级衍射级的同时将更多的能量分配到其他非零级次上, 即有可能大大提高分束总衍射效率, 得到高衍射效率与高均匀性的消零级偶数分束器. 此外, 由于亚波长结构与入射波之间强烈而复杂的电磁耦合作用, 众多结构参数与其各级衍射效率并不存在解析关系, 且任何细微的参数变化都可能引起零级抑制效果、衍射效率、均匀性等的严重劣化, 期望通过对结构参数逐步手工调整以达到设计目标几乎是不可能的. 因此, 本文提出运用矢量分析方法中适用于周期结构的严格耦合波法, 同时结合遗传算法, 建立偶数分束器评价函数, 优化得到实现偶数分束的亚波长二元矩形周期结构参数最佳值的设计新方法.

严格耦合波法由麦克斯韦方程组及 Rayleigh 展开式导出入射介质层和出射介质层电磁场解的表达式, 利用傅里叶级数展开光栅层、基底层介电常数及电磁场, 通过不同区域边界的电磁场边界条件得到一组无限维耦合波微分方程组, 采用特征值法对方程组求解得到各级透射波的衍射效率 P_q (q 为衍射级次, $q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm L$) 的数值解. 该数值解与光栅的占空比 f 、槽深 h_1 、基底厚度 h_2 等结构参数相关, 因此, 各级透射波衍射效率 P_q 可由严格耦合波法通过光栅结构参数 (f, d, h_1, h_2) 进行数值求解. 偶数分束器设计的目标就是要以光栅结构参数(占空比 f 、周期 d 、槽深 h_1 、基底厚度 h_2) 为自变量, 去控制各级透射波的衍射效率, 实现零

级衍射效率最小、各非零级次衍射效率之和最大且均匀分布,即考虑去零级衍射级次、各非零级次衍射效率均匀性、总衍射效率三个问题.根据上述设计目标,设定评价函数为

$$F(f, d, h_1, h_2) = \alpha \sum_{q=-L, q \neq 0}^L \left| P_q - \frac{P}{2L} \right| + \beta U + \mu |1 - P| + \nu P_0, \quad (5)$$

其中, $2L$ 为偶数分束数, P_q 为第 q 衍射级的衍射效率,可由严格耦合波法进行数值求解. P 与 U 分别为各非零衍射级衍射效率之和(总衍射效率)及其均匀性误差,分别表示为

$$P = \sum_{q=-L, q \neq 0}^L P_q, \quad (6)$$

$$U = (P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max} + P_{\min}), \quad (7)$$

P_{\max} 和 P_{\min} 分别表示 $2L$ 个非零衍射级次中的最大衍射效率和最小衍射效率. (5) 式第一、二项考虑了各分束衍射效率及其均匀性,第三项考虑了总衍射效率,第四项考虑了零级衍射效率的抑制, α, β, μ, ν 为权重因子,在 $[0, 1]$ 范围取值,且满足 $\alpha + \beta + \mu + \nu = 1$,可根据不同设计要求设置.因此,设计的实质即求一组矩形周期光栅结构参数 (f, d, h_1, h_2) ,使评价函数 F 为最小.由于评价函数中的各级衍射效率 P_q 是一个多变量函数,且只有数值解,不能表达为上述参数的显函数,而遗传算法具有跳出局部极值点的机理,特别适合解决多变量、离散变量优化的问题,因此本文将该法应用于(5)式中评价函数 F 的优化,从而求出分束器结构参数

的最优值,优化设计流程如图2所示.

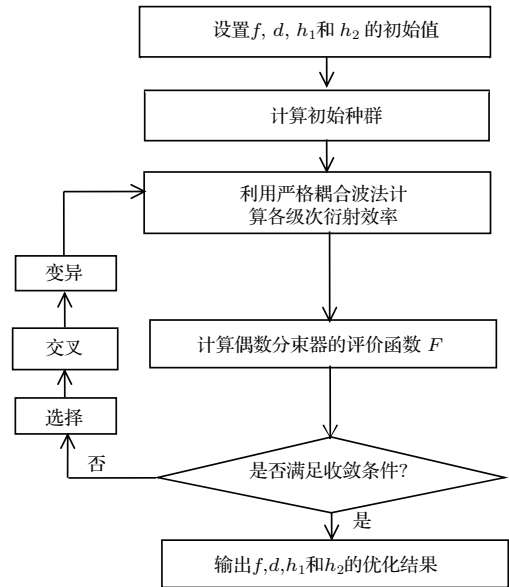


图2 遗传算法与严格耦合波法相结合优化亚波长矩形周期光栅结构参数流程图
Fig. 2. Flow chart of grating parameters optimization by combining GA with RCWA.

3 优化设计实例及结果

运用本文提出的优化设计方法编制程序设计分束数 $N = 4$ 的太赫兹波段亚波长二元矩形周期偶数分束器,此时期望最大衍射级次 $L = 2$. 设定优化初始条件为入射光频率为太赫兹波段(2.52 THz); TE 偏振垂直入射;入射介质为空气,折射率为 $n_1 = 1.0$,光栅介质材料为对太赫兹波段透明的高阻硅(折射率 $n_2 = 3.42$),根据大量运算,最优设计结果如表1、图3所示.

表1 太赫兹偶数分束器设计结果
Table 1. Results of a designed terahertz even beam splitter.

周期	槽深	基底厚度	占空比	脊宽	槽宽	最小特征尺寸	各级衍射效率分布/%					总衍射效率	均匀性误差
$d/\mu\text{m}$	$h_1/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$	f	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	μm	P_{-2}	P_{-1}	P_0	P_{+1}	P_{+2}	$P/\%$	$U/\%$
269.7	175.2	18.1	0.409	110.2	159.5	110.2	23.0586	23.0589	0.192	23.0589	23.0586	92.23	6.51×10^{-4}

由表1、图3可知,本文设计的二元简单周期结构分束器的周期为 $269.7 \mu\text{m}$,槽深为 $175.2 \mu\text{m}$,基底厚度为 $18.1 \mu\text{m}$,占空比为0.409时,当用波长为 $118.83 \mu\text{m}$ (工作频率为2.52 THz)的TE偏振垂直入射太赫兹波时,总体衍射效率达到92.23%,零级衍射效率抑制在0.192%以下,均匀性误差控制在 6.51×10^{-6} 以内,能量均匀地分配到 $\pm 1, \pm 2$

级,其衍射效率高于文献[11—14]中报道的80%,60%—83%,86%,90%,相对均匀性误差优于所报道的 5.7×10^{-5} — 3.2×10^{-4} , 1.0×10^{-5} — 4.27×10^{-3} 之间.太赫兹波偶数分束的衍射效率、均匀性误差和零级抑制等性能指标非常理想.由于使用了二元简单周期结构,大大降低了制作难度,易于实现.

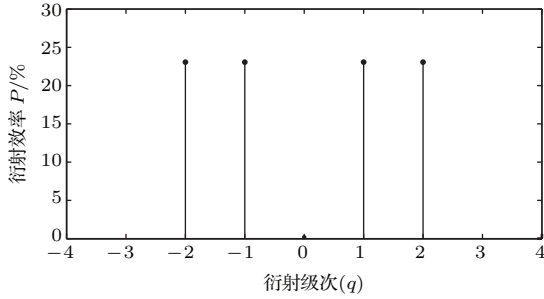


图3 基于高阻硅的太赫兹4分束器各级输出衍射效率分布图

Fig. 3. Distributions of the efficiency of each diffraction order of a silicon-based terahertz even splitter.

4 结构参数变化对分束性能影响规律

首先分析上述设计的太赫兹四分束器结构参数变化(脊宽 a 、槽宽 b 、槽深 h_1 、基底厚度 h_2 、占空比 f 等)对各分束衍射效率及其均匀性的影响. 由于设计的分束数为 $N = 4$, 期望输出的最大衍射级次 $L = 2$, 因此以下将 $P_q(|q| < L)$ 的衍射级次称为分束内级次, $P_q(|q| > L)$ 的衍射级次称为分束外级次. 根据我们的理论分析, 入射波正入射亚波长二元简单周期结构时, 各非零衍射级次的衍射效率关于零级衍射级对称分布, 因此仅需分析0级、+1级、+2级透射波衍射效率 P_0, P_{+1}, P_{+2} , 分别用曲线 T_0, T_1, T_2 表示, 结果如图4至图8所示.

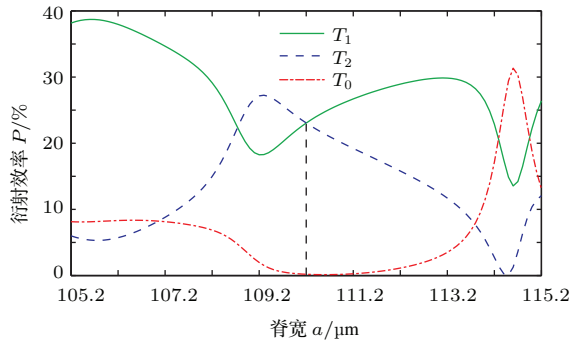


图4 脊宽 a 对各级衍射效率的影响($b = 159.5 \mu\text{m}$, $h_1 = 175.2 \mu\text{m}$, $h_2 = 18.1 \mu\text{m}$)

Fig. 4. Diffraction efficiency of each order versus the ridge width a ($b = 159.5 \mu\text{m}$, $h_1 = 175.2 \mu\text{m}$, $h_2 = 18.1 \mu\text{m}$).

脊宽 a 的偏移对各透射级衍射效率的影响如图所示. 当槽宽 b 、槽深 h_1 、基底厚度 h_2 固定为设计值, 若脊宽 a 在设计值 $110.2 \mu\text{m}$ 附近发生变化时, 由图4可知, 将导致分束均匀性和零级抑制效果变差, 不利于偶数均匀分束; 脊宽 a 偏移量小于

$\pm 1 \mu\text{m}$, P_0 被抑制在2%以下, 均匀性误差 U 优于19.60%, 总衍射效率高于90.82%, 且变化不大.

槽宽 b 的偏移对各透射级衍射效率的影响如图5表示. 当脊宽 a 、槽深 h_1 、基底厚度 h_2 固定为设计值, 若槽宽 b 在设计值 $159.5 \mu\text{m}$ 附近发生变化时, 由图5可知, P_0 始终被有效抑制在较小范围, 且对分束均匀性的影响不如脊宽 a 敏感; b 偏移量小于 $\pm 5 \mu\text{m}$ 时, P_0 被抑制在0.9%以下, 均匀性误差 U 优于16.77%, 总衍射效率高于90%且变化不大. 由此可知, 与 b 的偏离相比, a 的偏离对分束均匀性和零级衍射效率抑制的影响更明显, 因此在制作时应尽可能保证 a 的精度.

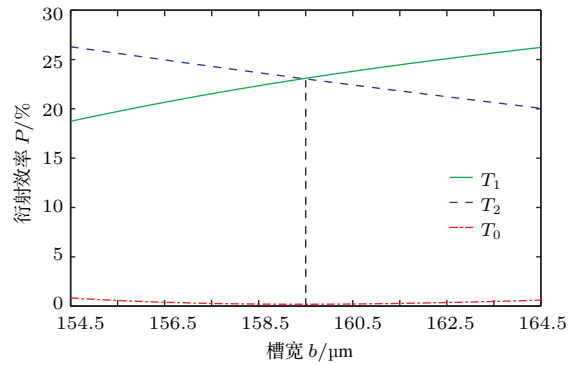


图5 槽宽 b 对各级衍射效率的影响($a = 110.2 \mu\text{m}$, $h_1 = 175.2 \mu\text{m}$, $h_2 = 18.1 \mu\text{m}$)

Fig. 5. Diffraction efficiency of each order versus the groove width b ($a = 110.2 \mu\text{m}$, $h_1 = 175.2 \mu\text{m}$, $h_2 = 18.1 \mu\text{m}$).

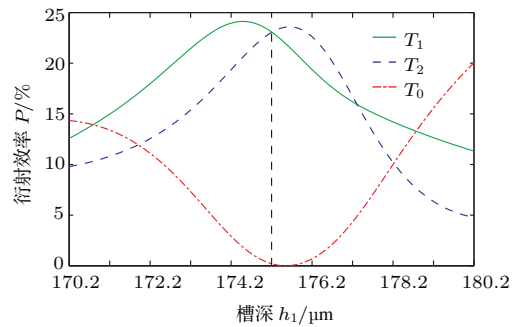


图6 槽深 h_1 对各级衍射效率的影响($a = 110.2 \mu\text{m}$, $b = 159.5 \mu\text{m}$, $h_2 = 18.1 \mu\text{m}$)

Fig. 6. Diffraction efficiency of each order versus the groove depth h_1 ($a = 110.2 \mu\text{m}$, $b = 159.5 \mu\text{m}$, $h_2 = 18.1 \mu\text{m}$).

槽深 h_1 的偏移对各透射级衍射效率的影响如图6表示. 当槽宽 a 、脊宽 b 、基底厚度 h_2 固定为设计值, 若 h_1 在设计值 $175.2 \mu\text{m}$ 附近发生变化时, 由图6可知, 槽深 h_1 在 $[173.7, 177.3] \mu\text{m}$ 范围内(相对于设计值的偏离范围 $[-1.5, 2.1] \mu\text{m}$), P_0 被抑

制在5%以下, 均匀性误差 U 上升到14.23%, 衍射效率下降到80.23%. 槽深 h_1 负偏离时均匀性误差剧烈上升; 槽深 h_1 减小2 μm , 均匀性误差 U 上升到16.50%; 槽深 h_1 增加2 μm , U 上升到1.65%; 偏移量进一步加大, P_0 将骤然上升, 产生其他分束. 因此, 实际制作中应避免分束器槽深 h_1 的负偏离, 以保持较好的均匀性. 槽深 h_1 偏移量小于 $\pm 1 \mu\text{m}$ 时, 均匀性误差 U 优于10.61%, 总衍射效率高于83.97%.

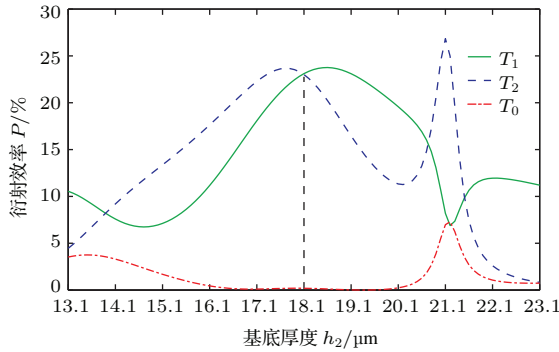


图7 基底厚度 h_2 对各级衍射效率的影响 ($a = 110.2 \mu\text{m}$, $b = 159.5 \mu\text{m}$, $h_1 = 175.2 \mu\text{m}$)

Fig. 7. Diffraction efficiency of each order versus the substrate thickness h_2 ($a = 110.2 \mu\text{m}$, $b = 159.5 \mu\text{m}$, $h_1 = 175.2 \mu\text{m}$).

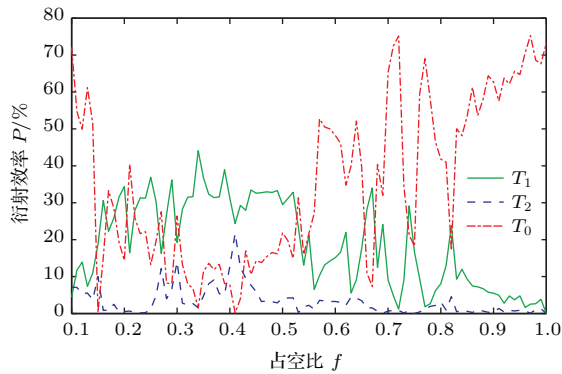


图8 占空比 f 对各级衍射效率的影响 ($d = 269.7 \mu\text{m}$, $h_1 = 175.2 \mu\text{m}$, $h_2 = 18.1 \mu\text{m}$)

Fig. 8. Diffraction efficiency of each order versus the duty ratio f ($d = 269.7 \mu\text{m}$, $h_1 = 175.2 \mu\text{m}$, $h_2 = 18.1 \mu\text{m}$).

基底厚度 h_2 的偏移对各透射级衍射效率的影响如图7表示. 当槽宽 a 、脊宽 b 、槽深 h_1 固定设计值, 若 h_2 在设计值18.1 μm 附近发生变化时, 由图7可知, 基底厚度 h_2 在 [17.1, 19.1] μm 范围内 (相对于设计值的偏离范围 $[-1.0, 1.0] \mu\text{m}$), P_0 被抑制在0.1%以下, 均匀性误差 U 优于16.78%, 总衍射效率高于79.10%. 可见, 基底厚度 h_2 对零级

衍射效率的影响不敏感, 对均匀性误差 U 和总体衍射效率影响很敏感.

分束器占空比 f 的偏移对各透射级衍射效率的影响如图8所示. 当周期 d 、槽深 h_1 、基底厚度 h_2 固定为设计值时, 由图8可知, f 的变化将引起 ± 1 级和 ± 2 级的能量分布发生剧烈变化, P_0 也急剧上升, 严重削弱零级抑制的效果, 均匀性变差.

综合上述分析可知, 若分束器的结构参数脊宽 a 、槽宽 b 、槽深 h_1 、基底厚度 h_2 偏移量分别小于 $\pm 1 \mu\text{m}$, 分束总衍射效率 P 在一定范围内并没有明显的降低, 此时 P_0 被抑制在2%以下, 分束效果好. 随着各结构参数偏移量的增加, 各衍射级次的衍射效率 $P_0, P_{\pm 1}, P_{\pm 2}$ 差异变大, P_0 也会增大而不能被有效抑制, 从而使得总衍射效率下降, 分束均匀性变差. 因此, 只有当各参数在较小的范围内变化时 (脊宽、槽宽、槽深、基底厚度偏移量小于 $\pm 1 \mu\text{m}$), 器件仍保持较好的分束性能, 此时 P_0 被抑制在2%以下, 均匀性误差 U 优于19.60%, 总衍射效率高于79.10%. 若分束器结构参数大幅偏离设计的优化值, 其分束性能将进一步下降, 需要重新进行设计.

5 结 论

综合运用严格耦合波法和遗传算法, 本文提出一种亚波长二元矩形周期结构偶数分束设计新方法, 有效实现消零级、高衍射效率均匀分束. 编程设计TE偏振正入射、频率为2.52 THz太赫兹波段硅基四分束器. 理论设计结果表明, 二元简单周期结构分束器的周期为269.7 μm , 槽深为175.2 μm , 基底厚度为18.1 μm 占空比为0.409时, 用波长为118.83 μm 的TE偏振太赫兹波垂直入射该分束器, 分束总效率达到92.23%, 零级衍射效率抑制在0.192%以下, 均匀性误差控制在 6.51×10^{-6} 以内, 能量均匀地分配到 $\pm 1, \pm 2$ 级, 偶数分束的衍射效率、零级抑制及均匀性指标非常理想. 二元简单周期结构的应用大大降低制作难度, 易于实现.

针对设计结果, 分析并提出分束器脊宽、槽宽、槽深、占空比、基底厚度等结构参数变化对分束效率及分束均匀性的影响规律. 结果表明, 亚波长二元矩形周期结构太赫兹偶数分束器的各个设计参数具有唯一性, 只有当各参数在较小的范围内变化时 (脊宽、槽宽、槽深、基底厚度偏移量小于 $\pm 1 \mu\text{m}$), 器件仍保持较好的分束性能, 此时零级衍射效率可

被抑制在2%以下, 均匀性误差 U 优于19.60%, 总衍射效率高于79.10%. 若分束器结构参数偏离设计的优化值, 其分束性能将进一步下降, 需要重新进行设计. 本文的公差分析得到了分束器各结构参数的加工允许偏差范围, 对器件的设计和制作具有指导意义.

本文所设计的太赫兹波段硅基偶数分束器由于其矩形光栅结构简单、功能可扩展、制作方便, 在未来太赫兹分束器的研制方面可能有较大的应用价值.

参考文献

- [1] Li J Z 2010 *Handbook of Optics* (Xi'an: Shanxi science and Technology Press of China) pp1070 (in Chinese) [李景镇 2010 光学手册 (西安: 陕西科学技术出版社) 第 1070 页]
- [2] Philippe L, Jerome H, Pierre C, Edmond C, Huguette L 1999 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **1** 215
- [3] Zheng J J, Zhou C H, Feng J J, Cao H C, Lu P 2009, *Opt. Commun.* **282** 3069
- [4] Wang B, Chen L, Lei L, Zhou J Y 2013 *Optoelectron. Adv. Mat.* **7** 813
- [5] Guan X W, Wu H, Shi Y C, Dai D X 2014 *Opt. Lett.* **39** 259
- [6] Wen F J, Chung P S 2011 *Appl. Opt.* **50** 3187
- [7] Wu J, Zhou C H, Cao H C, Hu A D, Yu J J, Sun W M, Jia W 2011 *J. Opt.* **13** 115703
- [8] Guo L W, Ma J Y 2014 *Optik* **125** 232
- [9] Hsu J H, Lee C H, Chen R S 2014 *Microelectron. Eng.* **113** 74
- [10] Feng J J, Zhou C H, Wang B, Zheng J J, Jia W, Cao H C, Lv P 2008 *Appl. Opt.* **47** 6638
- [11] Zhang J, Yan S H, Zhou C L, Shen S W, Li E, Tong H P 2008 *Laser Journal* **29** 12 (in Chinese) [张军, 颜树华, 周春雷, 沈少伟, 李锸, 童慧鹏 2008 激光杂志 **29** 12]
- [12] Huang H X, Ruan S C, Yang T, Xu P 2015 *Nano-Micro Lett.* **7** (in press)
- [13] Xu P, Huang Y Y, Su Z J, Zhang X L, Luo T Z, Peng W D 2015 *Opt. Express* **23** 4887
- [14] Xu P, Zhang X L, Huang J F, Li B B, Ye E, Duan S F, Su Z J 2013 *Opt. Express* **21** 20159
- [15] Xu P, Huang H X, Wang K, Ruan S C, Yang J, Wan L L, Chen X X, Liu J Y 2007 *Opt. Express* **15** 809
- [16] Xu P, Huang Y Y, Su Z J, Zhang X L 2014 *Appl. Opt.* **53** 1322
- [17] Xu P, Hong C Q, Sun Z L, Han F, Cheng G X 2014 *Opt. Commun.* **315** 97
- [18] Xu P, Li J Z 2002 *Science In China (Series E)* **45** 1
- [19] Xu P, Zhou X, Zhang X C, Guo Y K, Guo L R, Tang H, Wu S D, Yang L X, Chen Y 1995 *Opt. Rev.* **2** 362
- [20] Huang H X, Xu P, Yang J, Gong X D, Wan L L, Wang K, Zheng Y Y, Han X 2009 *Opt. Commun.* **282** 4198
- [21] Xu P, Tan J Y, Guo L R, Guo Y K, Yang J F, Jiang N Y, Li Z, Du C L 1996 *Acta Optica Sinica (Chinese)* **16** 1796
- [22] Yan S H 2011 *Design of diffraction microoptics* (Beijing: National Defense Industry Press of China) chap. 12. (in Chinese) [颜树华, 2011 衍射微光学设计, (北京: 国防工业出版社) 第 12 章]
- [23] Marcianite J R, Farmiga N O, Hirsh J I, Evans M S, Hieu T T 2003 *Appl. Opt.* **42** 3234
- [24] Moharam M G, Grann E B, Pommet D A, Gaylord T K 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 1068
- [25] Cormier G, Boudreau R, Thériault S 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 1771
- [26] Goldberg E 1987 *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning* (New York: Addison-Wesley Publishing Company).

Design of a terahertz even splitter and its tolerance analysis*

Huang Hai-Xuan Xu Ping[†] Ruan Shuang-Chen Yang Tuo Yuan Xia Huang Yan-Yan

(College of Electronic Science and Technology Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

(Institute of Micro-Nano Optoelectronic Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

(Received 19 January 2015; revised manuscript received 3 March 2015)

Abstract

A novel method is presented in this paper to realize terahertz even beam splitting by using a subwavelength binary simple periodic rectangular structure, for making comprehensive application of both the RCWA (Rigorous Couple-Wave Analysis) and the GA (Genetic Algorithm). By applying RCWA, the efficiency of each diffraction order can be numerically solved by using the structure parameters. To design an even beam splitter with a subwavelength structure is to find the optimal duty cycle f , period d , the grating depth h_1 and the substrate thickness h_2 to approach the minimum zero-order diffraction efficiency, the maximum sum of each non-zero-order diffraction efficiency, and the uniform distribution. Considering the three goals above, an evaluation function is established. GA is applied to optimize the evaluation function F , and then the optimal parameters of the splitter are obtained. When its period, groove depth, substrate thickness and duty ratio respectively equal to 269.7 μm , 175.2 μm , 18.1 μm and 0.409, the normal-incident TE-polarized terahertz plane wave with its frequency equal to 2.52 THz is divided evenly into the diffraction orders ± 1 and ± 2 . It has a total efficiency up to 92.23% with a preferable result of reducing zero-order diffraction efficiency to 0.192% and an error of uniformity down to 6.51×10^{-6} , indicating an excellent performance of diffraction efficiency, uniformity and zero-order suppression as a terahertz even splitter. These results break the limitation of realizing even beam splitting in which the traditional scalar theory applies. In addition, this paper exposes the law of influence of the structure parameters, including ridge width, groove width, groove depth, duty ratio and substrate thickness, on the diffraction efficiency and its uniformity. It is found that only a small deviation of the structure parameters, corresponding to a deviation of ridge width a , groove width b , groove depth h_1 , and substrate thickness h_2 , less than 1 μm from the optimum design values, the element maintains good beam splitting performance. P_0 is permitted to suppress to less than 2%, the error of uniformity U is better than 19.60%, and the diffraction efficiency maintains higher than 79.10%. With a substantial deviation from the design values of the structure parameters, the performance of the splitter will severely degrade and need to be redesigned.

Keywords: subwavelength, binary rectangular periodic structure, terahertz even splitter, rigorous couple-wave

PACS: 42.79.Fm, 42.25.Fx, 42.79.Dj, 87.50.U-

DOI: 10.7498/aps.64.154212

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275167, 60878036, 60178023), and the Basic Research Project of Shenzhen, China (Grant Nos. JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637, JCYJ20120613112628842, JC201005280533A).

[†] Corresponding author. E-mail: xuping@szu.edu.cn