



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101797666 A

(43) 申请公布日 2010.08.11

(21) 申请号 201010133087.1

(22) 申请日 2010.03.26

(71) 申请人 中国科学院上海光学精密机械研究
所

地址 201800 上海市 800-211 邮政信箱

(72) 发明人 周常河 余俊杰

(74) 专利代理机构 上海新天专利代理有限公司
31213

代理人 张泽纯

(51) Int. Cl.

B23K 26/42 (2006.01)

G02B 5/30 (2006.01)

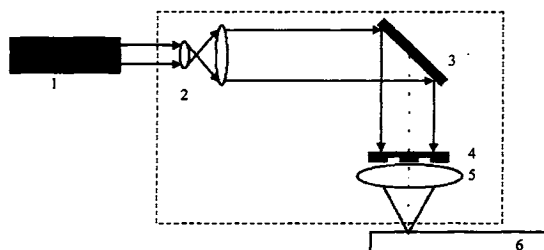
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 5 页

(54) 发明名称

延长焦深的激光切割头

(57) 摘要

一种用于激光切割机的延长焦深的激光切割头,其构成包括沿激光入射方向依次为准直扩束透镜组、反射镜和消像差聚焦透镜,其特点在于:在所述的消像差聚焦透镜前加入一个二元相位元件,该二元相位元件与所述的消像差透镜共轴,该二元相位元件的通光孔径与所述的激光切割头的入射光瞳一致,该二元相位元件是中心对称的同心圆环的多区结构,该二元相位元件的相位自内向外依次按区 0 、 π 相间分布。本发明有利于提高这种激光切割机的切割速度和极限切割厚度,同时改善切割断面质量。对于提高激光切割机的切割速度和能量利用率,改善切割断面质量有重要的实用价值和应用前景。



1. 一种延长焦深的激光切割头,其构成包括沿激光入射方向依次为准直扩束透镜组(2)、反射镜(3)和消像差聚焦透镜(5),其特征在于:在所述的消像差聚焦透镜(5)前加入一个二元相位元件(4),该二元相位元件(4)与消像差透镜(5)共轴,该二元相位元件(4)的通光孔径与所述的激光切割头的入射光瞳一致,该二元相位元件(4)是中心对称的同心圆环的多区结构,该二元相位元件(4)的相位自内向外依次按区 0 、 π 相间分布。

2. 根据权利要求1所述的延长焦深的激光切割头,其特征在于所述的二元相位元件(4)为3区二元相位元件,对均匀强度分布的平面波该3区二元相位元件的归一化半径依次为: 0 、 0.3029 、 0.9167 和 1 。

3. 根据权利要求1所述的延长焦深的激光切割头,其特征在于所述的二元相位元件(4)为5区二元相位元件,对均匀强度分布的平面波该5区二元相位元件的归一化半径依次为: 0 、 0.0196 、 0.3421 、 0.5523 、 0.9251 和 1 。

延长焦深的激光切割头

技术领域

[0001] 本发明涉及激光切割机,特别是一种用于激光切割机的延长焦深的激光切割头。

背景技术

[0002] 自 1960 年激光器问世以来,激光技术得到了飞速的发展。由于激光独特的高亮度、高方向性、高单色性和高相干性,自其发明之初,就有人提出把激光用于材料加工。目前,激光加工技术已经发展成为一种重要激光应用技术。与传统机械加工相比,激光加工的主要特点有:激光束能量高度集中,加工区域小,因而热变形小;加工质量高、精度高、速度快;加工件不受尺寸、形状限制;不需冷却介质,而且无污染,噪声小。经过近五十年的发展,激光加工已与多个学科相结合形成多个应用技术领域,主要加工技术包括:激光切割、激光焊接、激光打标、激光打孔、激光热处理、激光快速成型、激光涂敷等。其中,激光切割已成为当前工业加工领域应用最多的激光加工方法,可占整个激光加工工业的 70% 以上。

[0003] 激光切割主要的原理是依靠激光的高度集中的光场能量,直接将工件需切割部位气化或熔化,达到切割目的,也就是说,激光的高能量密度是至关重要的因素。正是因为聚焦的激光束极高的能量密度,才可以瞬间将工件气化或熔化,而热效应还来不及向周围传递,从而不会产生热变形。也正是这种极高的能量密度,才使得快速切割成为可能。而决定聚焦激光束的能量密度的是其在焦点附近的光强分布,这种在焦点附近的聚焦光场分布才是影响激光切割质量和速度的最本质因素。在激光加工领域,人们通常用焦点附近的焦斑半径 R 和焦深 DOF 来衡量一台激光切割机的性能。当前,纵向的焦深是影响激光切割速度和切割厚度的一个瓶颈因素。对于比较薄的工件,在工件相对激光切割头快速移动过程中,往往会出现离焦现象,尤其对于一些表面不平(如曲面)的工件。这时,就必须提高激光的工作能量,这样就会使激光能量的利用率降低,同时也会影响工件的切割断面质量。一种可行的方案就是加入一个自动聚焦的聚焦伺服系统,这样又会增加成本。同时,如果聚焦伺服的速度跟不上工件的移动速度,同样也会出现离焦,这时,聚焦伺服速度就变成了提高切割速度的一个严重瓶颈。另一方面,当切割比较厚的工件的时候,如果工件的厚度超过了焦深,那么这将是一个极大的挑战。此时,仅仅通过提高激光输出能量是不能解决问题的。因为,一方面,激光器的输出能量是有限的,当激光器长期处于高功率、超负荷运作状态,其寿命会明显缩短。同时,仅仅提高激光输出能量,在超出焦深范围,光强分布是很不均匀的,这样带来的后果是工件的切割断面的平行度很差。这就是说,任何一台激光切割机都有一个最大的可切割的工件厚度,我们把这个厚度称为它的极限切割厚度。显而易见,聚焦焦深越大,其极限切割厚度也越大。

[0004] 我们知道,焦深和聚焦透镜的数值孔径是紧密相关的。在低数值孔径范围($NA < 0.5$)内,焦深 DOF 与数值孔径 NA 之间的关系可以写成 $DOF \propto \lambda / NA^2$,也就是说,焦深与聚焦透镜的数值孔径的平方成反比。要延长焦深,就必须减小数值孔径,而数值孔径减小,聚焦光斑就会增大,能量密度下降,不利于激光切割。也是说,单纯的降低数值孔径是一种以降低聚焦光斑分辨率和聚焦激光束能量密度为代价来延长焦深的方法。

[0005] 基于上述原因,延长焦深并且不降低聚焦光斑横向分辨率的光场分布,即在保证聚焦激光束焦区能量密度足够大的前提下延长焦深,将十分有利于提高激光切割的速度和改善切割断面质量。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提出一种用于激光切割机的延长焦深的激光切割头,该延长焦深的激光切割头,可显著提高激光束聚焦焦深,同时还能保持横向焦斑基本不变,对提高激光切割机的切割速度和极限切割厚度,改善切割断面质量十分有利。

[0007] 本发明的技术解决方案如下:

[0008] 一种延长焦深的激光切割头,其构成包括沿激光入射方向依次为准直扩束透镜组、反射镜和消像差聚焦透镜,其特点在于:在所述的消像差聚焦透镜前加入一个二元相位元件,该二元相位元件与所述的消像差透镜共轴,该二元相位元件的通光孔径与所述的激光切割头的入射光瞳一致,该二元相位元件是中心对称的同心圆环的多区结构,该多区的相位自内向外依次按区 0 、 π 相间分布。

[0009] 所述的二元相位元件为 3 区二元相位元件,对均匀强度分布的平面波该 3 区二元相位元件的归一化半径依次为: 0 、 0.3029 、 0.9167 和 1 。

[0010] 所述的二元相位元件为 5 区二元相位元件,对均匀强度分布的平面波该 5 区二元相位元件的归一化半径依次为: 0 、 0.0196 、 0.3421 、 0.5523 、 0.9251 和 1 。

[0011] 本发明的技术效果

[0012] 本发明在激光切割机聚焦光路中加入一个纯相位调制的二元衍射光学元件,达到了延长聚焦光束的焦深,同时不增加横向聚焦光斑大小,改善聚焦光场纵向能量密度分布均匀性的技术效果。这种在纵向上更加均匀的能量密度分布的聚焦光场,对于提高激光能量利用率、提高激光切割机的加工效率和加工质量,有着重要的实用价值和应用前景。

附图说明

[0013] 图 1 是本发明延长焦深的激光切割机光路示意图。其光路根据编号依次是:1-激光器;2 准直扩束透镜组;3 反射镜;4 二元相位元件;5 消像差聚焦透镜;6 加工工件二维移动平台。

[0014] 图 2 是激光切割头中聚焦激光束物理模型示意图。

[0015] 图 3(a) 典型的 3 区二元相位元件;(b) 典型的 5 区二元相位元件。

[0016] 图 4 加入二元相位元件前后的聚焦焦深随高斯强度分布截断比 β 的变化。

[0017] 图 5 两种情况下 ($\beta \rightarrow 0$ 和 $\beta = 1$) 加入 3 区相位元件前后纵向 (a) 和横向 (b) 的光强分布。

具体实施方式

[0018] 一、理论设计

[0019] 1、激光切割机聚焦光路的物理模型的建立

[0020] 典型的激光切割机光路如图 1 所示,依据编号依次是:激光器 1;准直扩束透镜组 2;反射镜 3;消像差聚焦透镜 5;加工工件二维移动平台 6。经准直扩束之后的激光的聚焦

光路可以简化为图 2 的物理模型。如图 2 所示,以聚焦透镜的焦点为圆心,建立直角坐标系,其中,光轴沿 z 轴方向。经准直扩束之后的激光束可以看作强度成高斯分布的平面波。激光切割中所采用的聚焦透镜数值孔径一般比较低 ($NA < 0.1$),因而其激光光束经过这种聚焦透镜的后场可以采用经典的标量衍射来计算。其在焦点附近的归一化电场分布可以表示为:

$$[0021] \quad E(u, v) = 2 \int_0^1 L(r) T(r) J_0(vr) \exp(-iur^2/2) r dr \quad (1)$$

[0022] 其中: $r = \rho/R$ 为归一化的横向坐标, ρ 为聚焦透镜所在平面的实际坐标, R 为系统的通光孔径。 u 和 v 分别为

$$[0023] \quad u = \frac{2\pi R^2}{\lambda} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{f+z} \right) \quad (2a)$$

$$[0024] \quad v = 2\pi Rr / \lambda f = 2\pi \sqrt{x^2 + y^2} / \lambda f \quad (2b)$$

[0025] 而 $L(r)$ 表征光束的横向振幅分布,对于在聚焦透镜上光斑半径(光斑半径定义为强度衰减为轴上强度的 $1/e$ 时离光轴的横向距离)为 ω 的高斯光束,它可以表示为

$$[0026] \quad L(r) = \exp(-\beta^2 r^2) \quad (3)$$

[0027] 其中, $\beta = R/\omega$ 。

[0028] 为了表征加入相位元件之后光场的变化,我们定义了以下几个参数:斯涅尔比(S)、旁瓣强度比(M)、纵向焦深和横向焦斑半径。其中,斯涅尔比 S 定义为加入相位元件之后中心主瓣强度与爱里斑中心主瓣强度的比值;旁瓣强度比 M 定义为横向光强分布中最大的旁瓣强度与中心主瓣强度的比值。而横向光斑半径定义为当光强降为轴上光强的 $1/e$ 时的横向距离。在激光加工领域,纵向焦深定义为当光斑大小相对最小光斑(焦面上)增加了 5% 的时候纵向(光轴上)的两个点之间的距离。在本发明中,我们加入另外两个限制条件,即在焦深范围内,斯涅尔比 S 不得低于 0.1,同时,旁瓣强度比 M 不得高于 $1/e$ 。于是,焦深就可定义为

$$[0029] \quad DOF = 2|z_t| \quad (4)$$

[0030] 其中, $z_t = \min(z_m, z_s, z_p)$, 而 z_m, z_s, z_p 分别满足 $M(z_m) = 1/e, S(z_s) = 0.1$ 和 $R(z_p) = 1.05R(z=0)$ 。

[0031] 2、延长焦深的二元相位元件的优化设计

[0032] 通常光学系统是圆对称的,因而一般的二元相位元件也都采用圆对称结构。同时,二元结构易于加工,也是广为采用的。本发明正是采用了这种结构简单、易于加工、二元纯相位元件。图 3a 和 b 分别是典型的 3 区和 5 区的二元相位元件的示意图。把这种经特殊设计的二元相位元件加在聚焦透镜之前,即构成了本发明的延长焦深切割头光路,如图 1 所示。在切割头光路中加入二元相位元件 4 之后聚焦透镜后场,在焦斑附近光场分布的物理模型中,我们可以通过公式 (1) 初步计算其后场强度分布。然后依据这种近似的物理模型,通过改变二元相位元件的各区的归一化几何半径值,优化聚焦透镜后场的焦深(根据公式 (4) 所定义),即可得到延长焦深的二元相位元件。由聚焦光路(加入二元相位元件之后的光头聚焦光路)后场的归一化场强分布公式 (1) 可以看出,具有不同截断比的高斯光束,其归一化后场也是有区别的。这就是说,如果针对小 β 值的高斯光束优化的二元相位元件的归一化半径,对大 β 值的高斯光束情况下可能就不是最优的,甚至可能没有延长焦深的效

果。所以,对于不同的激光切割机(即不同 β 值的高斯光束),二元相位元件的归一化半径需要重新优化。

[0033] 表1中所示是假设入射激光场为均匀强度分布(可以看作 $\beta \rightarrow 0$ 的高斯光束)情况下,经过模拟退火优化的得到的3区和5区的归一化半径的最优解。同时,表中还列出了对应的斯涅尔比、旁瓣强度比、横向光斑半径比和对应焦深比(加入相位元件前后的焦深之比)等性能参数。从中可以看出,我们所设计的二元相位元件能够显著延长聚焦焦深(2~4倍)。同时,横向的光斑的大小基本不变(8%以内)。同时,表中还给出了两种优化结构在入射激光场为 $\beta = 1$ 的高斯强度分布情况下的斯涅尔比、旁瓣强度比、横向光斑半径比和对应焦深比等性能参数。

[0034] 图4给出了入射激光场的高斯强度截断比 β 取不同值时,原始聚焦光斑(未加二元相位元件)的焦深和加入表1中所给出的3区和5区二元相位元件之后的聚焦焦深的变化情况。100表示加入二元相位元件之前的聚焦焦深随 β 的变化情况;300表示加入所优化的3区二元相位元件之后的聚焦焦深随 β 的变化情况;500表示加入所优化的5区二元相位元件之后的聚焦焦深随 β 的变化情况。从中我们可以清楚的看出,随 β 值的增大,焦深均是在逐步减小。其中,加入二元相位元件之后的聚焦焦深下降得更快,而5区的又比3区的下降得更快,也就说对 β 值更为敏感。从该图中我们还可以看出,在 $\beta < 1$ 情况下,3区和5区的二元相位元件的延长焦深还是比较明显;在 $\beta > 1$ 时,基本上就没有延长焦深的效果,当 $\beta = 2$ 时,焦深反而被压缩。可见,对于大 β 值的入射激光场,二元相位元件的归一化半径需要重新优化。

[0035] 图5a和b分别为均匀强度分布和高斯强度分布($\beta = 1$ 时)两种情况下,加入二元相位元件前后的纵向焦深和横向焦斑大小的对比,301表示高斯强度分布($\beta = 1$ 时)加入相位元件之前的光强,302表示高斯强度分布($\beta = 1$ 时)加入相位元件之后的光强;303表示均匀强度分布($\beta \rightarrow 0$ 时)加入相位元件之前的光强,304表示均匀强度分布($\beta \rightarrow 0$ 时)加入相位元件之后的光强。

[0036] 这进一步说明了表1中的结果。同时,从图中我们可以看出,相比于均匀强度分布,高斯强度分布的横向焦斑更大,并且纵向焦深更小。因而,在实际光路中,我们应尽可能将光束通过准直扩束为均匀强度分布的平面波,即小 β 值高斯强度分布。在这种小 β 值高斯强度分布前提下,相比于3区相位元件,5区具有更好的延长焦深能力。从理论上讲,我们可以通过增加更多的区数,来更进一步的延长焦深,但这样就会带来主斑能量下降较多,也就意味着我们需要进一步提高激光输出功率,而实际的激光工作功率是有限的,也就是说延长焦深也是有一个限度的。本发明中提出的3区和5区二元相位元件,是综合考虑延长焦深和激光功率限度的结果。当然,如果激光器功率足够高,可以采用更多分区的二元相位元件。

[0037] 表1不同区数下优化的二元相位元件参数

[0038]

相位 元件	归一化半径	高斯光束 截断比 (β)	斯涅尔 比 (S)	旁瓣强度 比 $M(\%)$	横向光斑半 径比 (焦面)	纵向焦 深比
3 区	(0, 0.3029, 0.9167, 1)	$\beta \rightarrow 0$	0.247	22.16	1.08	2.89
		$\beta = 1$	0.272	24.35	0.96	3.05
5 区	(0, 0.0196, 0.3421, 0.5523, 0.9251, 1)	$\beta \rightarrow 0$	0.112	30.49	1.02	3.76
		$\beta = 1$	0.113	34.80	0.95	3.05

[0039] 注：横向焦斑半径比和纵向焦深比都是相对加入相位元件之前的聚焦光场的相应参数的比值。

[0040] 二、实施例

[0041] 本发明延长焦深的激光切割头，其包括：准直扩束透镜组 2、反射镜 3 和消像差聚焦透镜 5，其特点在于：在所述的消像差聚焦透镜 5 前加入一个二元相位元件 4，该二元相位元件 4 与消像差透镜 5 共轴，该二元相位元件 4 的通光孔径与所述的激光切割头的入射光瞳一致，该二元相位元件 4 是中心对称的同心圆环的多区结构，该二元相位元件 4 的相位自内向外依次按区 $0, \pi$ 相间分布。

[0042] 以下以固体 Nd:YAG 激光切割机为例，针对其工作波长 (1064nm)，提出一种具体实施方案。如上所述的二元相位元件 4 采用的是低折射率的熔融石英玻璃（在 1064nm 波段， $n = 1.4496$ ），当激光正入射时，这种二元光学元件的反射率为 7.2%（假设元件表面为理想平面），可见激光损耗是比较低的。同时，纯熔融石英玻璃的抗损伤阈值很高，对于 1064nm 的脉冲激光其破坏阈值高达 $20 \sim 40 \text{ J/cm}^2$ 。熔融石英在 1064nm 波长处的折射率为 1.4496，于是其

[0043] 相位深度为 $d_0 = 1.064 / (2 \times (1.4496 - 1)) = 1.183 \mu\text{m}$ 。设固体 Nd:YAG 激光切割机所发射的 1064nm 的激光经准直扩束之后的光束束腰半径为 5mm，透镜的通光孔径（直径）为 10mm，焦距为 100mm ($NA = 0.05$)。则我们所优化的三区相位元件的各环半径依次为：1.783mm, 4.655mm, 5mm。综合考虑相位元件的机械性能、光学性能和成本，其厚度设为 1mm。对于熔融石英基底材料，我们可以采用成熟的光刻技术和等离子体刻蚀技术来加工这种二元的相位元件。

[0044] 综上所述，本发明提出了一种简单地利用二元相位元件有效延长焦深的激光切割头，并且以固体 Nd:YAG 激光切割机为例提出了一种可行的技术路线。这种延长焦深的二元相位元件在激光加工技术中有着广泛的实用价值和良好应用前景。

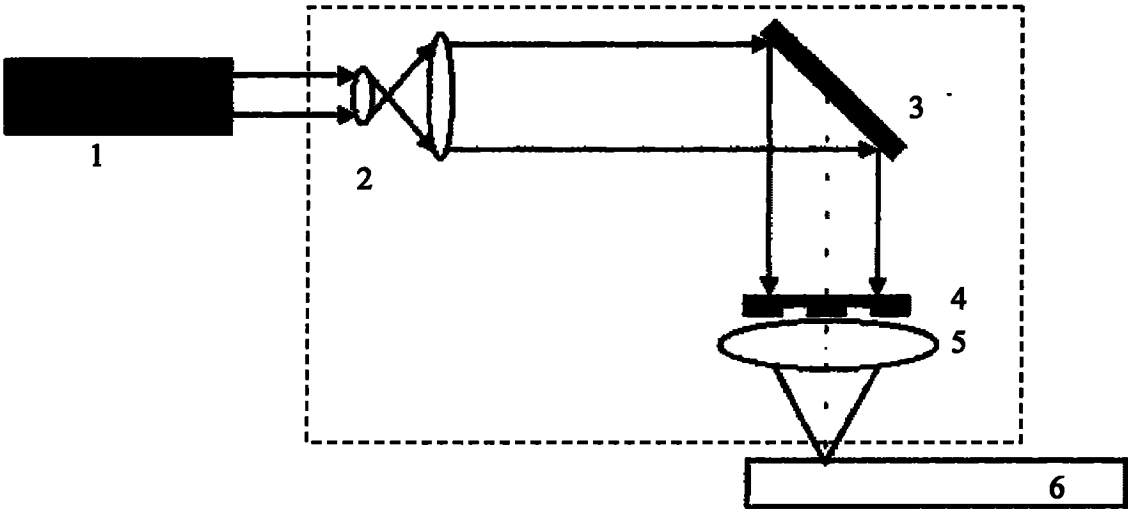


图 1

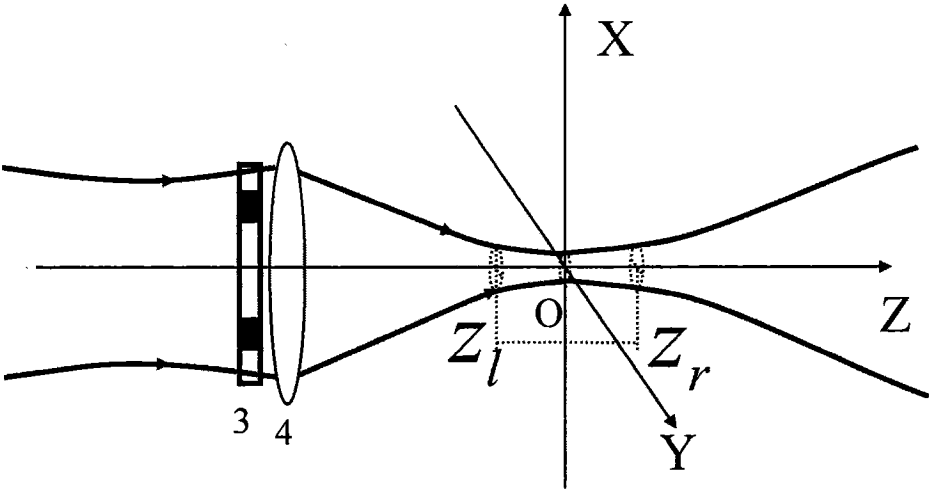
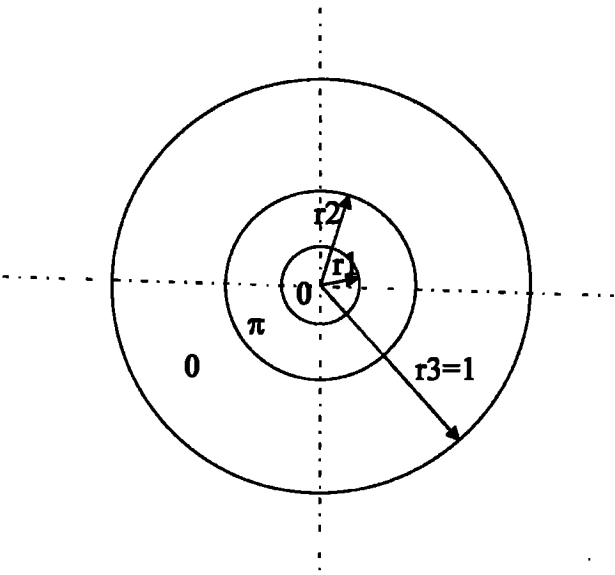
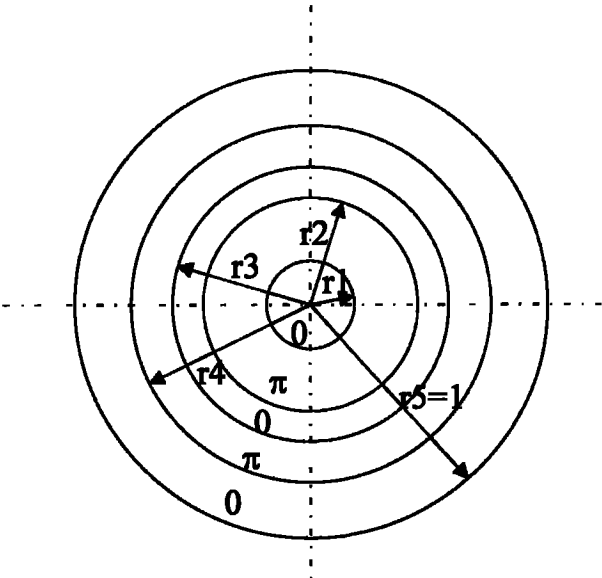


图 2



(a)



(b)

图 3

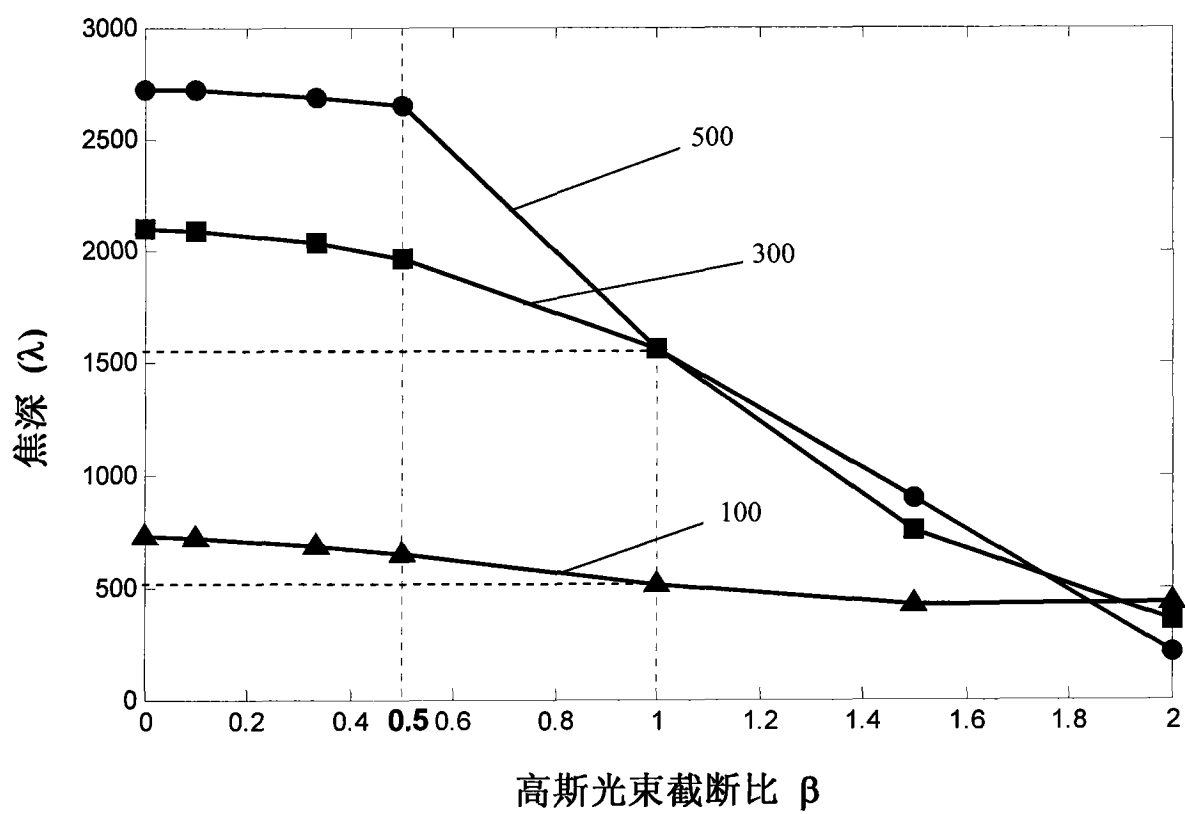
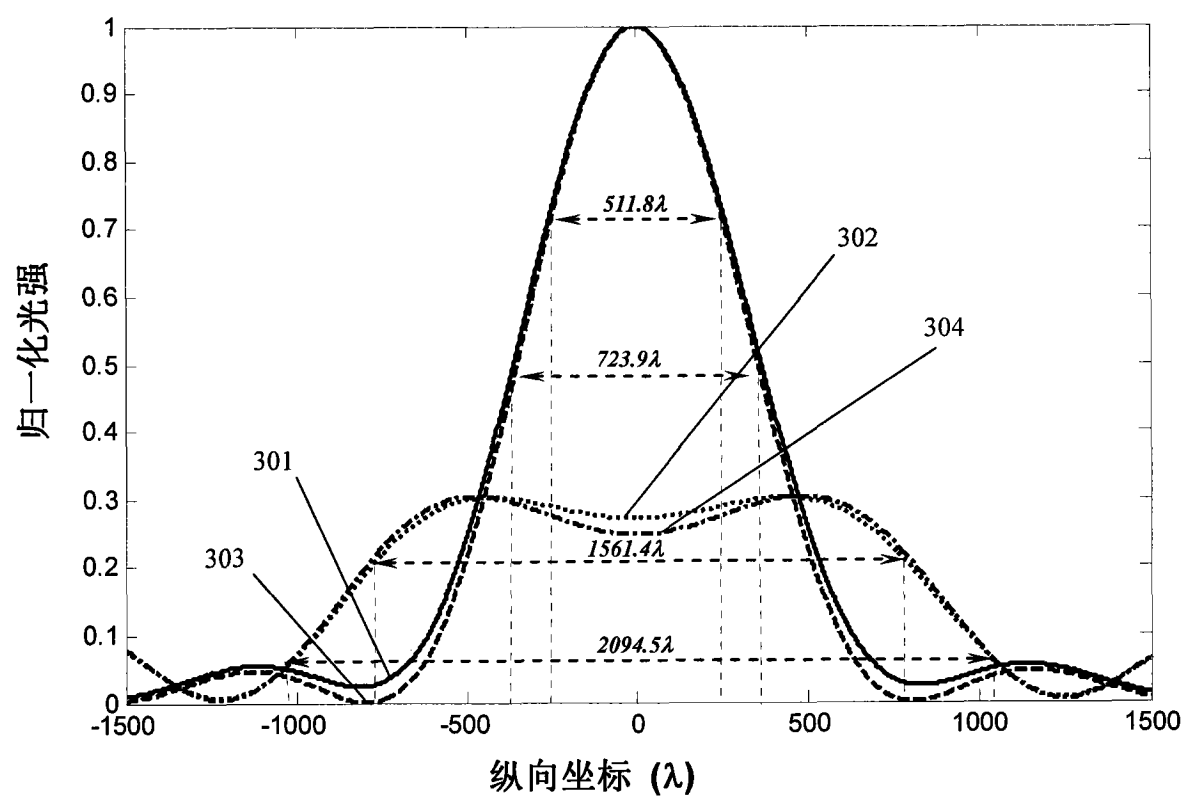


图 4



(a)

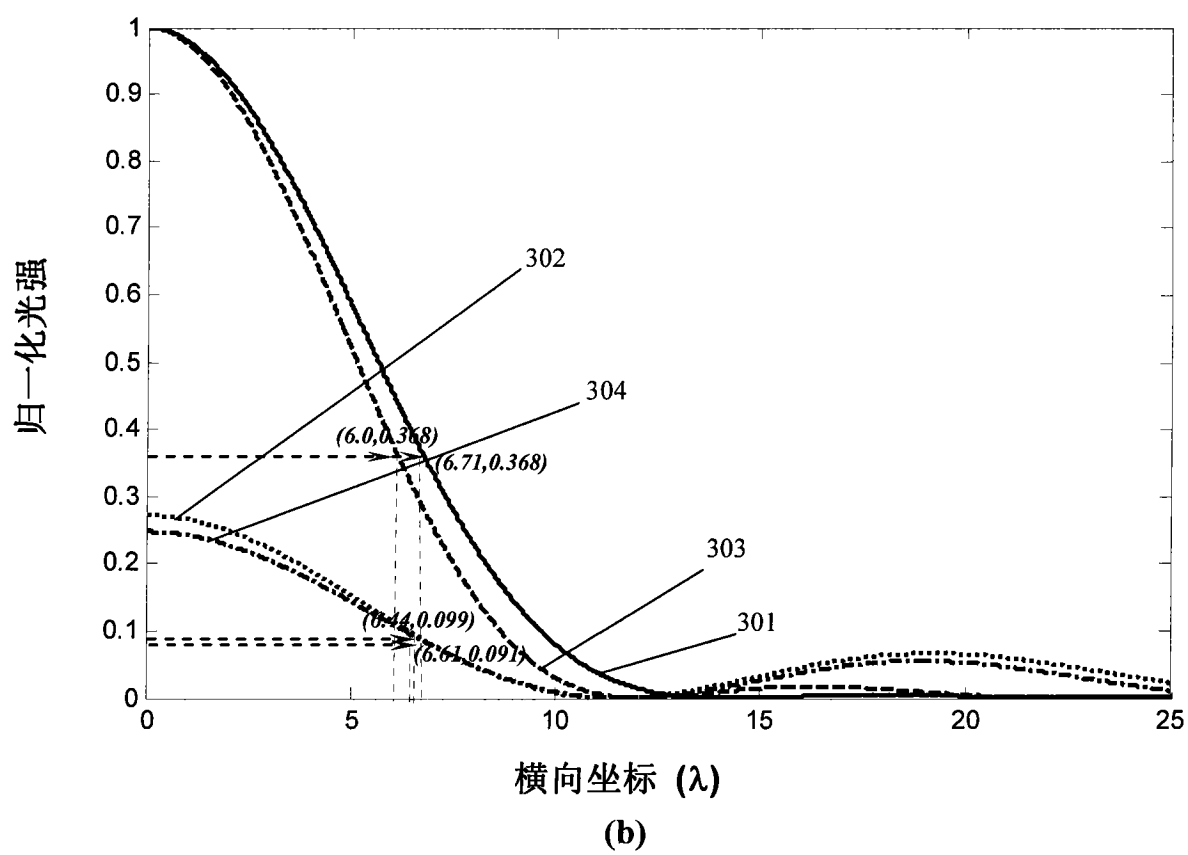


图 5