

文章编号: 1001-3806(2002)01-0066-02

QBG 光束的传输特性*

王喜庆

(西南交通大学应用物理系, 成都, 610031)

吕百达**

(四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 对变量为径项平方的贝塞耳函数调制的高斯光束(QBG 光束)通过一阶 ABCD 光学系统的传输变换进行了研究, 由广义菲涅耳衍射积分出发推导出了普适的传输变换公式, 以 QBG 光束通过薄透镜系统的情况进行了分析与讨论, 对详细的数值计算结果进行了分析与讨论。

关键词: QBG 光束; ABCD 光学系统; 传输特性

中图分类号: O435 文献标识码: A

Propagation properties of QBG beams

Wang Xiqing

(Department of Applied Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

L Baida

(Institute of Laser Physics and Laser Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: The propagation of the Bessel-modulated Gaussian beams with quadratic radial dependence (QBG beams) has been studied, where the passage of QBG beams through a first-order paraxial ABCD optical system has been expressed in a closed-form. As an example, the propagation through a thin lens has been discussed. Numerical calculation examples have been presented to illustrate the propagation properties of QBG beams.

Key words: QBG beams; ABCD optical system; propagation property

引言

最近, 由 Caron 和 Potvliege 提出了一类新的贝塞耳高斯光束, 即径项变量为 r^2 的贝塞耳函数调制的高斯光束(以下简称为 QBG 光束), 它是近轴近似下波动方程的解^[1]。QBG 光束的许多特性还有待于进一步的研究, 如当其参数取某些值时, 具有的非高斯特性、轴上分布的平顶特性等。笔者对 QBG 光束通过一阶 ABCD 光学系统的传输特性进行了研究, 给出了普适的传输公式; 对 QBG 光束通过薄透镜且入射面不在薄透镜所在平面的情况给出了一般的传输公式, 对数值计算结果进行了分析与讨论。

1 理论推导

1.1 QBG 光束通过一阶 ABCD 系统的传输特性

QBG 光束在 z 平面上的场分布为^[1]:

* 西南交通大学科学研究基金资助项目。

** 西南交通大学客座教授。

作者简介: 王喜庆, 男, 1959 年 7 月出生。副教授。从事光束传输与变换等研究。

收稿日期: 2000-08-07; 收到修改稿日期: 2000-11-03

$$E(r, \varphi, z) = A_0 \frac{w_0}{w(z)} e^{ikz} J_{|m|/2} \left[\frac{\mu r^2}{w^2(z)} \right] \times \exp \left[-\frac{1 + i(\mu^2 + 1)z/z_R}{w^2(z)} r^2 \right] e^{im\varphi} \quad (1)$$

式中,

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 - (\mu^2 + 1)(z/z_R)^2 + i2z/z_R} \quad (2)$$

$J_{|m|/2}$ 表示 $|m|/2$ 的贝塞耳函数, k 代表波数, μ 是与 QBG 光束相关的参数, z_R 表示基模高斯光束的瑞利长度, w_0 表示在 $z = 0$ 时 $w(z)$ 的值, 即基模高斯光束的束腰半径。

当 QBG 光束通过无光阑的一阶 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 光学系统时其场分布由柱坐标下的广义菲涅耳衍射积分给出^[2]:

$$E(r, \varphi, z) = -\frac{i}{\lambda B} \exp(ikL) \iint E_0(r_0, \varphi_0, z_0) \times \exp \left\{ \frac{ik}{2B} [Ar_0^2 + Dr^2 - 2rr_0 \cos(\varphi_0 - \varphi)] \right\} \times r_0 dr_0 d\varphi_0 \quad (3)$$

式中, λ 为光束波长, A, B, C, D 是一阶光学系统的矩阵元素, 且 $AD - BC = 1$, 假设光束的 $z = 0$ 平面位

于入射面, 则(1) 式可得:

$$E(r_0, \varphi_0, z_0 |_{z_0=0}) = A_0 J_{|m|/2}(\mu r_0^2/w_0^2) \times \exp(-r_0^2/w_0^2) \exp(im\varphi_0) \quad (4)$$

将(4) 式代入(3) 式并利用贝塞耳的积分表达式^[3]:

$$J_n(x) = \frac{i^n}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-ix \cos\theta + in\theta) d\theta \quad (5)$$

及积分^[4]:

$$\int_0^\infty \exp(-pt) J_\nu(t) J_{2\nu}(2\sqrt{at}) dt = \frac{1/2}{(p^2+1)^{1/2}} \exp\left[-\frac{ap}{p^2+1}\right] J_\nu\left[\frac{a}{p^2+1}\right] \quad (6)$$

得到:

$$E(r', \varphi, z) = (-i)^{m+1} \frac{\pi w_0^2 / \mathcal{M} B}{\sqrt{\mu^2 + [1 - (ikAw_0^2/2B)/2B]^2}} \times J_{|m|/2} \left[\frac{(k^2 w_0^4 \mu'^2 / 4B^2)}{\mu^2 + (1 - ikAw_0^2/2B)^2} \right] \times \exp \left\{ - \left[\frac{k^2 w_0^4}{4B^2} \left(1 - \frac{ikA}{2B w_0^2} \right)^2 - \frac{ikD}{2B w_0^2} \right] r'^2 \right\} \times \exp(im\varphi) \exp(ikz) \quad (7)$$

式中, 为书写方便略去了常数 A_0 , $r' = r/w_0$ 为归一化坐标。

当 $B = 0$ (对应于成像情况) 时, 由 Collins 公式^[5] 及 δ 函数得:

$$E(r, \varphi, z) = \frac{1}{A} e^{ikz} \exp\left[\frac{ikC}{2A} r^2\right] \times J_{|m|/2} \left[\frac{\mu^2}{A^2 w_0^2} \right] \exp\left[-\frac{r^2}{A^2 w_0^2}\right] e^{im\varphi} \quad (8)$$

$$E(r', \varphi, \Delta z) = \frac{(-i)^{m+1} \pi N_f \exp(im\varphi)}{\sqrt{\mu^2 [1 + \Delta z(1 - s/f)]^2 + [1 + \Delta z(1 - s/f) + i\pi N_f \Delta z]^2}} \times J_{|m|/2} \left[\frac{\pi^2 N_f^2 \mu'^2}{\mu^2 [1 + \Delta z(1 - s/f)]^2 + [1 + \Delta z(1 - s/f) + i\pi N_f \Delta z]^2} \right] \exp[i\mu f(1 + \Delta z) + s] \times \exp \left\{ - \left[\frac{\pi^2 N_f^2 \left(1 + i\pi N_f \frac{\Delta z}{1 + \Delta z(1 - s/f)} \right)}{\mu^2 [1 + \Delta z(1 - s/f)]^2 + [1 + \Delta z(1 - s/f) + i\pi N_f \Delta z]^2} - i\pi N_f \frac{1 - s/f}{1 + \Delta z(1 - s/f)} \right] r'^2 \right\} \quad (13)$$

式中, $\Delta z = (z - f)/f$, $N_f = w_0^2/\lambda$ 为菲涅耳数。(13) 式即为入射面在薄透镜前经薄透镜传输后的场分布函数。

为说明(12) 式及(13) 式的应用, 以(13) 式为例, 我们计算了 QBG 光束当 $s = 0$, $N_f = 0.08$, $m = 0$ 及 $m = 1$ 时经无光阑薄透镜聚焦情况, QBG 光束横向光强的分布, 如图 2 所示。

(8) 式即是 $B = 0$ 情况下, QBG 光束经过一阶 ABCD 光学系统后的场分布。

(7) 式和(8) 式是在无光阑限制下光束通过一阶 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 光学系统通用的传输公式。

1.2 光束通过无光阑聚焦薄透镜的传输

当焦距为 f 的薄透镜位于 $z = 0$ 平面时, 如图 1

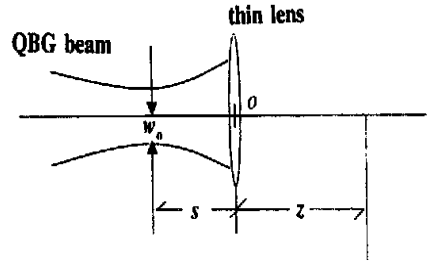


Fig. 1 Illustration of the QBG beams through a thin lens system

所示, 表征光学系统的变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - z/f & s(1 - z/f) + z \\ -1/f & -s/f \end{pmatrix} \quad (9)$$

令 $B = 0$, 得 $z = \frac{s}{s/f - 1}$ (10)

则 $A = 1 + \frac{s/f}{1 - s/f}$, $C = -1/f$ (11)

将(11) 式代入(8) 式, 得:

$$E(r, \varphi, z) = \frac{1}{1 + \frac{s/f}{1 - s/f}} e^{ikz} \exp \left[2 \left(\frac{-ik/f}{1 + \frac{s/f}{1 - s/f}} \right) \right] \times J_{|m|/2} \left[\frac{\mu^2}{\left(1 + \frac{s/f}{1 - s/f} \right)^2 w_0^2} \right] \exp \left[\left(\frac{-r^2}{1 + \frac{s/f}{1 - s/f}} \right)^2 w_0^2 \right] \quad (12)$$

将(11) 式代入(7) 式, 得:

图 2a~ 图 2d 为 $s = 0$ 时不同参数的 QBG 光束经无光阑薄透镜聚焦后横向光强分布。由图 a、图 c 可以看出, 当 μ 取实数、纯虚数及复数时, 其横向光强分布是不相同的。当 μ 取复数且实部与虚部大小相当时, μ 对光强的影响是由实部与虚部共同起作用; 由图 b、图 d 可以看出, 当 μ 的实部远大于虚

2.2 性能测试

对激光淬火后的试样进行拉伸试验(60t 万能试验机)和冲击韧性(PSW3000/1500 试验机)试验,用传统淬火为 A 组、激光淬火为 B 组,每组 3 件,取平均值。对试件进行对比,其数据见表 2。

Table 2 Test components service time and attrition value

text components	σ_b /MPa	α_k /J·cm ⁻²	hardness /HRC	method
A	1700	70	56~ 60	furnace quenching
B	1900	80	60~ 62	laser beam hardening

2.3 试验结果分析与应用

采用激光淬火的零件可使用 288~ 300h,总的成品合格率为 98%,变截面处的硬度一致,零件 1 处和 2 处几乎没有变形,内应力小,合格品高。传统的淬火工艺处理后,冲头尖角 1 和 2 处(见图 1)易产生应力集中、变形和裂纹,其合格品率为 92%。同时要考虑对机械加工工艺参数优化,这样才可以有效地防止微裂纹的产生。从表 1 实验可知,经过激光淬火的试件在线使用寿命高于传统工艺处理的零

件。激光淬火后试件金相组织其组织细密均匀。有效表面主要为细小针状马氏体。由表 2 可看出,激光淬火试件的强度和抗冲击性能优于传统处理的试件。

3 结 论

实验说明,经激光淬火的圆片冲头零件在线使用时间为 264~ 288h(每天按 8h,两班工作制,为 18~ 19d),成品合格率高于传统淬火工艺。激光淬火变截面处的硬度一致,内应力小,金相组织细密均匀,主要为细小针状马氏体,在工作时冲头刃口不易产生微裂纹和不正常的剥落。对淬火后零件加工工艺参数进行优化,有效地防止了变截面的零件在精加工时产生微裂纹。采用激光淬火与淬火后精加工工艺参数优化的综合研究,使药物圆片冲头具有好的耐磨擦磨损、抗冲击性能,使用寿命明显提高。

参 考 文 献

[1] 胡昭如. 机械工程材料. 长沙:中南工业大学出版社, 1991.
 [2] 林秀珍. 机械工程材料, 2000(4): 40~ 41.

(上接第 67 页)

部时, μ 对光强分布的影响主要决定于实部,虚部仅对旁瓣有微小的影响。当 μ 的实部较大时,如图 2b、图 2d, 横向光强分布有旁瓣出现,这是由贝塞耳函数本身决定的。

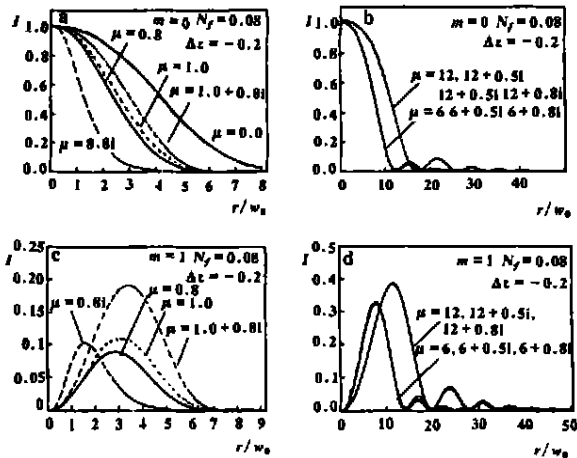


Fig.2 The intensity distribution of QBG beams focused by an unapertured thin lens

2 总 结

本文由广义菲涅耳衍射积分出发推导出了 QBG 光束通过一阶 ABCD 系统的一般传输公式及成

像系统的变换公式。以 QBG 光束通过薄透镜系统为例,对于入射面位于薄透镜前 s 处,出射面位于薄透镜后 z 处的一般情况给出了传输变换公式,并以 $N_f = 0.08, m = 0, m = 1, \Delta z = -0.2, \mu$ 取不同值时,做了数值计算,计算结果表明当 μ 的实部与虚部(均指绝对值,下同)大小相当时($|\text{Re}(\mu)| < 1$),横向光强由实部与虚部共同决定,而当实部远大于其虚部时,实部对横向光强分布起主要作用;当实部大于 1 时,横向光强分布有旁瓣出现。由(8)式分析得到,当 QBG 光束经过成像系统时,其横向光强分布与入射光强分布的形状相似,其光强减小为入射光强的 A^2 倍,其横向光强分布在径向拓展为入射时的 A^2 倍。本文的结果将对 QBG 光束的特性研究及应用有一定的参考意义。

参 考 文 献

[1] Caron C F R, Potvliege R M. Opt Commun, 1999, 164: 83.
 [2] Collins S A. J O S A, 1970, 60: 1168.
 [3] 梁昆森. 数学物理方法. 3 版, 北京: 高等教育出版社, 1998.
 [4] Erdelyi A. Tables of Integral Transforms. New York: McGraw-Hill, 1954.
 [5] 吕百达. 强激光的传输与控制, 北京: 国防工业出版社, 1999.