

基于太赫兹时域光谱系统共光路光纤耦合系统的设计及误差分析

李堂玥^{1,2,3}, 牟达^{1,2*}, 夏鹏宇^{1,2}, 张悦^{1,2}, 谢蕙阳^{1,2}

¹长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 光电测控技术研究所, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

³长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528400

摘要 太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)是检测物质组成和变化的先进科学装置,可以准确定位和分析物质的微小变化,对物理学、化学、生物学等多个学科的发展产生了深远影响。光纤式 THz-TDS 在光路传播时具有能量传输损失少、结构紧凑等优点。在光纤式 THz-TDS 的基础上,将双透镜和旋转延迟线结合,通过研究分析耦合效率理论和双透镜传输特性,利用光学软件 ZEMAX 设计了一款双透镜准直耦合收发一体共光路系统。为了得到更高的单模光纤耦合效率,研究分析了激光与光纤的耦合原理及耦合误差,并且绘制了耦合失配时的效率曲线。研究结果表明:高斯传播单模光纤的耦合效率达到了 76.27%,可以满足稳定辐射太赫兹信号的要求,同时,光纤耦合效率的提高对于增大 THz-TDS 的太赫兹脉冲信号带宽具有一定帮助。

关键词 光纤光学; 光纤耦合; 收发一体; 太赫兹时域光谱系统; 单模光纤

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230988

1 引言

自从太赫兹波的特性被发现以来,太赫兹先进技术便引起了国内外研究人员的极大兴趣,尤其是太赫兹时域光谱仪器,更是吸引了国内外厂商的普遍关注,而且其已成为我国的高科技产业之一^[1]。国外高科技公司很早就已开始太赫兹时域光谱技术^[2]领域投入大量研究。更细、更轻、尺寸小、抗干扰能力强的光纤式太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)与在自由空间传输的系统相比,具有使用寿命更长、体积更小、成本更低等特性。目前人们更多研究的是如何提高飞秒激光光纤的耦合效率^[3]。光纤耦合一开始被应用于空间探测,之后被应用于激光雷达技术^[4],后来才逐渐被应用于不同领域。实现光纤耦合的技术众多,主要有直接耦合法和间接耦合法^[5],两种方法各有优缺点。

2018年,华中科技大学的黎小妹^[6]将红外飞秒激光器作为光源,结合光纤耦合技术设计了一款应用于 THz-TDS 的光纤传输系统,通过模拟实验获得了最高可达 73.8% 的耦合效率;2019年,况耀武等^[7]结合单模光纤温度适应性成功设计了耦合光学系统;2023年,朱尚典等^[8]基于光束准直、空间光束合成、偏振光合成、光纤耦合等技术设计了输出功率为 272.4 W、光光

转换效率为 85.1% 的光纤耦合系统。目前,关于太赫兹时域光谱系统内光纤耦合技术的研究较少,多数是空间激光通信中空间激光-单模光纤的相关研究。高耦合效率的光纤耦合系统能够产生高质量的泵浦光,提高光电导天线的载流子浓度和载流子运动速度的变化率,进而影响最后所产生的太赫兹信号的脉冲宽度和脉冲功率。

笔者采用双透镜和旋转延迟线设计收发一体共光路光学系统,通过模拟实验优化出耦合效率较高、光束质量较好、稳定性较高的系统,要求该光学系统能够收发自如、减少传输损耗,同时将返回的飞秒激光顺利耦合进单模光纤。延迟线经过了设计论证^[9]。光纤发出的光在自由空间内以一定角度进行发散传输,经过耦合系统透镜后变为准直光,确定系统与旋转延迟线的摆放位置,使准直光打在该延迟线工作区域角度范围的平面反射镜上并经反射镜反射回入射光路。两相邻反射楔形结构具有一定范围的空闲角度,该空闲角度应当为工作区域角度的整数倍,以保证延迟时间的连续性。基于激光与光纤的耦合原理,笔者使用光学仿真软件 ZEMAX 对耦合系统的关键透镜参数进行优化设计,得到更高的单模光纤耦合效率,随后对整个系统进行倾斜、偏心等仿真模拟,分析各种误差对光纤耦合

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-08-03; 录用日期: 2023-10-11; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 中山市第九批创新科研团队项目(GXTD2022010)、吉林省自然科学基金项目(YDZJ202301ZYTS242)

通信作者: *muda@cust.edu.cn

的影响。

2 耦合效率理论分析

图 1 为使用旋转延迟线的光纤式 THz-TDS 系统

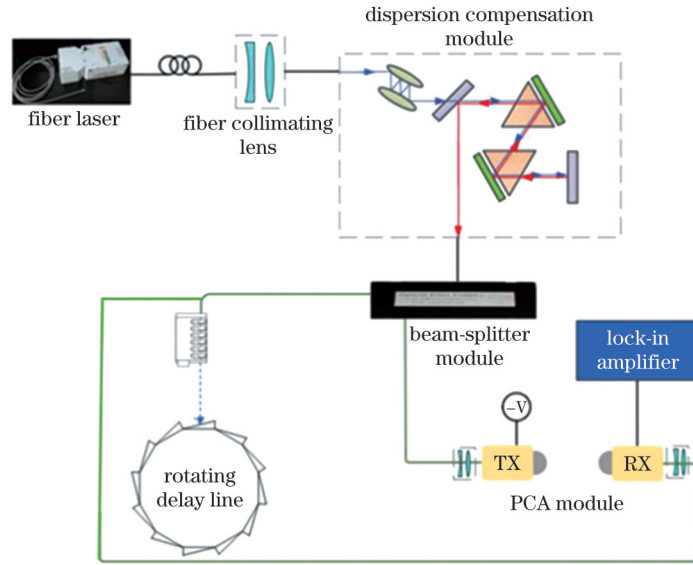


图 1 光纤式太赫兹时域光谱系统

Fig. 1 Optical fiber terahertz time-domain spectral system

通常,光纤激光器发射的自由空间激光近似符合式(1)所示的高斯强度分布,光纤耦合则是将这种强度呈高斯分布的激光脉冲传输到光纤模场内部。为提高单模耦合效率,能量在传递过程中需要通过一个光学系统。对于单模光纤来说,有且只有一个模式可以传输,其模场分布满足高斯型分布^[10-11],即

$$F_{01}(r, \omega) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega^2}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right), \quad (1)$$

式中: ω 为高斯脉冲的束腰半径; r 为径向距离。依据 Parseval-Plancherel 理论^[12-13],将单模光纤耦合效率定义为光纤入射端面光束能量分布与透镜入射端面光束能量分布的比值,即

$$\eta = \frac{\left| \iint E(r)F^*(r)d^2s \right|^2}{\iint |E(r)|^2 d^2s \iint |F(r)|^2 d^2s}, \quad (2)$$

式中: $E(r)$ 为自由平面波入射光学系统透镜前表面的强度分布; $F(r)$ 为光纤传输本征模场分布; s 为光纤传输本征模场面积。当理想自由平面波入射到入瞳半径 $R=D/2$ 、焦距为 f 的光学系统透镜前表面时,聚集光束的强度分布满足艾里(Airy)分布,即

$$E(r) = \frac{R}{ir} \exp\left[ik\left(f + \frac{r^2}{2f}\right)\right] J_1\left(\frac{krR}{f}\right), \quad (3)$$

式中: $J_1\left(\frac{krR}{f}\right)$ 为一阶贝塞尔函数; k 为波数。式(3)满足 $\iint |E(r)|^2 ds = \pi R^2$,则理想单模耦合效率为

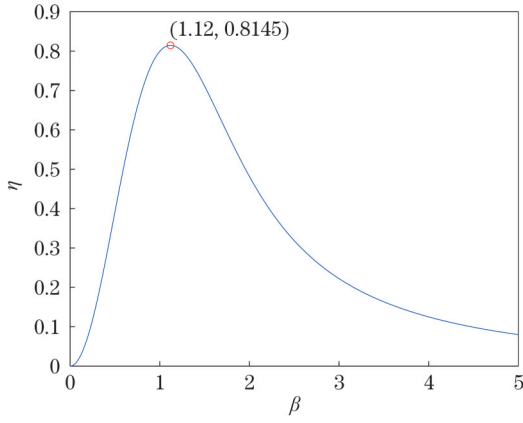
示意图,这种系统具有典型 THz-TDS 系统不具备的集成化、小型化的优点。采用双透镜和旋转延迟线结合设计共光路收发一体式光学系统,以进一步压缩系统体积并简化系统结构。

$$\eta = \frac{\left| \iint E(r)F^*(r)d^2s \right|^2}{\pi R^2} = \frac{8}{\omega^2} \left| \int_0^\infty \exp\left[\left(\frac{ik}{2f} - \frac{1}{\omega^2}\right)r^2\right] J_1\left(\frac{krR}{f}\right) dz \right|^2. \quad (4)$$

令 $\beta = \frac{R\pi\omega}{\lambda f} = \frac{D\pi\omega}{2\lambda f}$,并且不计光纤入射端面的菲涅耳反射损耗,可得

$$\eta = \frac{2}{\beta^2} \left| \int_0^\infty \exp\left[-\left(\frac{z^2}{4\beta^2}\right)r^2\right] J_1(z) dz \right|^2 = 2 \left[\frac{1 - \exp(-\beta^2)}{\beta} \right]^2. \quad (5)$$

光束波长 λ 、入瞳直径 D 、透镜焦距 f 和单模光纤模场半径等因素对单模光纤耦合效率的影响如图 2 所示。一般而言,光束波长 λ 和单模光纤模场半径都是实验前就已经确定的,只有入瞳直径 D 、透镜焦距 f 在设计过程中不确定。为了保证单模光纤的耦合效率以及实验的顺利进行,需要考虑光源发散角和透镜加工等因素,因此,设计的透镜口径与透镜焦距需要互相配合。从图 2 可以看出,耦合效率曲线在 $\beta=1.12$ 左右两侧的变化率不同:当 β 小于 1.12 时,光纤耦合效率的变化更迅速;当 β 大于 1.12 时,光纤耦合效率的改变比较缓慢。所以,设计的透镜参数应该尽可能使 β 在 1.12 稍大处接近 1.12。这样结合实验室光纤参数(如光纤芯径、光纤数值孔径等参数)设计的收发一体式光纤耦合系统就能够解决 THz-TDS 体积大、结构复杂的问题,从而简化系统,从而实现紧凑型、小型化光纤式 THz-TDS。

图2 理想单模光纤耦合效率随 β 变化的曲线Fig. 2 Coupling efficiency of ideal single-mode fiber varies with β

3 准直透镜的耦合机理分析

3.1 双透镜特性分析

现实中,光线通过光学系统后,会因为视场、系统口径等产生各种像差,导致成像出现弯曲、会聚不集中、畸变等问题。光纤式光学耦合系统是小像差系统,所以球差在单模光纤耦合系统中的影响最大,可以通过主动使透镜离焦来校正部分球差,也可以通过双透镜光学系统将正负透镜组合,从而使色差和彗差相互校正^[14]。基于双透镜设计的准直耦合光学系统具有调节方便、能量损失少、会聚光斑小的优点,能够实现高效耦合。

光线通过单透镜系统的几何成像公式^[15]为

$$M = T_1 T_2 T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_1 r_2} & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 r_1} & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{(n_1 - n_2)l}{n_2 r_1} & \frac{n_1 l}{n_2} \\ -\frac{(n_2 - n_1)}{n_1} \left[\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} + \frac{(n_2 - n_1)l}{n_2 r_1 r_2} \right] & 1 + \frac{(n_2 - n_1)l}{n_2 r_2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: M 为单透镜的传输矩阵; r_1 、 r_2 为系统透镜的曲率半径; l 为透镜厚度; n_1 、 n_2 为透镜折射率。

当单透镜的主距分别为 h_1 、 h_2 且焦距为 f 时,传输矩阵 M 的表达式为

$$M = T_1 T_2 T_3 = \begin{bmatrix} 1 & h_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{h_2}{f} & h_1 + h_2 - \frac{h_1 h_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{h_1}{f} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

将式(6)和式(7)联立可得
$$\begin{cases} h_1 = -\frac{n_1 r_1 l}{n_2(r_2 - r_1) - (n_2 - n_1)l} \\ h_2 = -\frac{n_1 r_2 l}{n_2(r_2 - r_1) - (n_2 - n_1)l} \end{cases}$$
, 则 M 可以简化为

$$M = \begin{bmatrix} 1 + \frac{h_2}{f} & \frac{n_1 l}{n_2} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{h_1}{f} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

综合 M 的表达式与高斯光学 $ABCD$ 定理,可以推导得到双透镜的传输矩阵 M_T 为

$$M_T = M_2 T M_1 = \begin{bmatrix} 1 + \frac{h_4}{f_2} & \frac{n_1 l_2}{n_2} \\ -\frac{1}{f_2} & 1 - \frac{h_3}{f_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + \frac{h_2}{f_1} & \frac{n_1 l_1}{n_2} \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{h_1}{f_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} a = \frac{h_4(h_2 + f_1 - L) + f_2(h_2 + f_1 - L)}{f_1 f_2} - \frac{l_1 n_1}{f_1 n_2} \\ b = \frac{f_1[(h_4 + f_2)(l_1 n_1 + n_2 L) + l_2 n_1 f_2] - h_1 n_2 L(h_4 + f_2) - h_1 l_2 n_1 f_2}{f_1 f_2 n_2} \\ c = \frac{L + h_3 - h_2 - f_2 - f_1}{f_1 f_2} \\ d = \frac{L h_1 + h_1 h_3 + f_1 f_2 - h_1 f_2 - L f_1 - h_3 f_1}{f_1 f_2} - \frac{l_1 n_1}{f_2 n_2} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: M_1 、 M_2 分别为透镜 1、2 的传输矩阵; T 为两透镜间自由空间的传输矩阵; f_1 、 f_2 为透镜 1、2 的焦距; l_1 、 l_2 为透镜 1、2 的厚度; h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 分别为透镜 1、2、3、4 的主距; L 为两透镜间自由空间的距离。

3.2 高斯光束在光学系统中的传播特性

确定准直耦合光学系统后,为提高准直光学系统与单模光纤的耦合效率,需要保证高斯光束经过光学系统后,其光束束腰半径与接收光纤的模式匹配。因此,需要先从理论与原理上对高斯光束进行分析计算^[16]。在柱面坐标系中,假设 z 为一个固定值,此时束腰半径处高斯光束的光强分布沿着 z 轴以高斯函数的表现形式由中央向外不断降低,光强强度最高的位置位于轴线上,故可将其看作非均匀高斯光束球面波。

假设传输的高斯光束参数为 q_1 ,经过准直耦合光学系统后,高斯光束参数变为 q_2 ^[15],则有

$$\frac{1}{q_i} = \frac{1}{R_i} - i \frac{\lambda_i}{\pi \omega_i^2} = X_i - iY_i, \quad (11)$$

式中: q_i 为参数 ($i=1,2$); R_i 为光学系统透镜的曲率半径; λ_i 为光束波长; ω_i 为高斯光束的束腰半径; $X_i = \frac{1}{R_i}$, $Y_i = \frac{\lambda_i}{\pi \omega_i^2}$ 。

在传输过程中,高斯光束遵守高斯光学的 ABCD 定理,结合 M_T 公式,有

$$\frac{1}{q_2} = \frac{C + D/q_1}{A + B/q_1}. \quad (12)$$

高斯光束在物方空间束腰到像方空间束腰处的传输矩阵为

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & s_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: s_1 为高斯光束物方空间束腰的具体位置; s_2 为像方束腰的位置; $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ 为前述的 M_T 公式。

联立式(11)~(13),可以获得高斯光束通过准直光学系统的传输公式,即

$$\begin{cases} X_2 = \frac{(X_1^2 + Y_1^2)BD + X_1(AD + BC) + AC}{A^2 + 2X_1AB + (X_1^2 + Y_1^2)B^2} \\ Y_2 = \frac{(n_1/n_2)Y}{A^2 + 2X_1AB + (X_1^2 + Y_1^2)B^2} \end{cases}. \quad (14)$$

前文通过式(5)和实验条件设计所需要的耦合透镜,可知焦距、两透镜间自由空间的距离、透镜厚度等透镜参数已确定。通过式(7)与式(9)能够得到该双透镜光学系统的传输矩阵,即光线传输路径与光强分布;再通过式(10)与式(11)结合双透镜传输矩阵,便可得到像面上高斯光束束腰的大概位置。耦合光纤与高斯光束的匹配过程包括两部分:1) 确定高斯光束束腰直径与耦合光纤模场直径基本相等;2) 确定高斯光束束腰位置与光纤端口位置相同。因为要达到最高的耦合

效率,所以需要保证束腰位于光纤端面,同时束腰中心需要对准纤芯中心,这样光束束腰才能正入射光纤,提高耦合效率。通过式(7)~(14)可以得到高斯束腰半径的位置,同时可以确保束腰半径与耦合光纤的模场半径相等,从而方便后续更加顺利地顺利完成高耦合实验。

4 准直透镜的设计与优化分析

4.1 准直透镜设计

ZEMAX 软件能够对耦合透镜组中的关键光学元件进行参数优化^[17],并可在软件中进行仿真模拟,得到透镜与单模光纤的耦合效率。基于双透镜设计的单模光纤耦合透镜系统具有光线准直、聚集光束、方便调节等特点,而且该光学系统的结构简单紧凑,不容易出现装调错误。

根据式(5)能得出反映 β 与耦合效率关系的数学表达式,当 $\beta=1.12$ 时,理想单模光纤的耦合效率最大,为 81.45%。将 β 与式(9)所示的双透镜传输矩阵结合,可在满足高耦合效率的前提下,设计口径较小、结构简单的双透镜光学系统。

实验所用光纤为保偏光纤,为保证后续实验顺利进行,在仿真计算时已进行了保偏处理。初始准直耦合光学系统中单模光纤的耦合效率如图 3 所示。因为该系统放置于旋转延迟线前,光线经过延迟线反射回原光路,耦合进入原光纤,所以该系统透镜完全对称。为了避免有光线被遮挡,设置该光学系统的数值孔径大于实验光纤的数值孔径。可以通过 ZEMAX 分析菜单中的点列图评价系统的成像质量。分析点列图能得到像面上的光斑均方根半径、艾里斑半径和几何半径值,通过这些值可以判断光学系统的成像质量。在该系统中,所有半径的值越小,表示光学系统的工作质量越高。光斑均方根半径为 $10.112 \mu\text{m}$,艾里斑半径为 $7.264 \mu\text{m}$,前者大于后者,说明该光学系统的光线聚焦

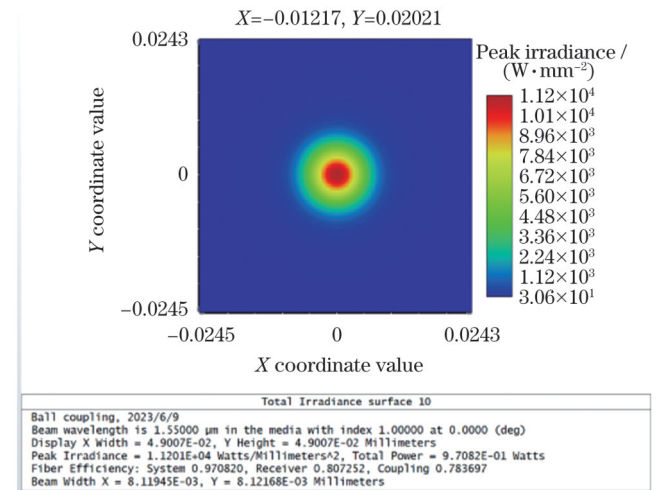


图 3 初始单模光纤的耦合效率

Fig. 3 Coupling efficiency of initial single-mode fiber

效果较差,如图 4 所示。初始耦合系统物理光学传播的单模耦合效率在主光线波长为 1550 nm 时达到了 78.36%,而高斯光学单模光纤耦合效率的计算值为 54.03%,距离理想单模光纤耦合效率还有一定的距离。所以,后续将依据原理通过软件优化来提高耦合效率。

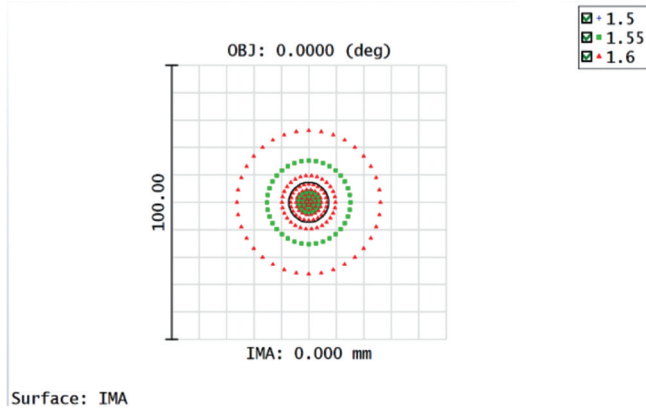


图 4 光学系统的像质点列图
Fig. 4 Spot diagram of optical system

4.2 透镜的优化分析

基于 ZEMAX 软件对光学系统透镜进行设计和优化,在序列模式下对耦合透镜进行优化,用均方根和波前函数对光学系统的透镜参数进行完善,得到了最佳的耦合系统。该系统的单模光纤耦合效率较高,优化后的准直耦合光学系统的单模光纤耦合效率如图 5 所示。

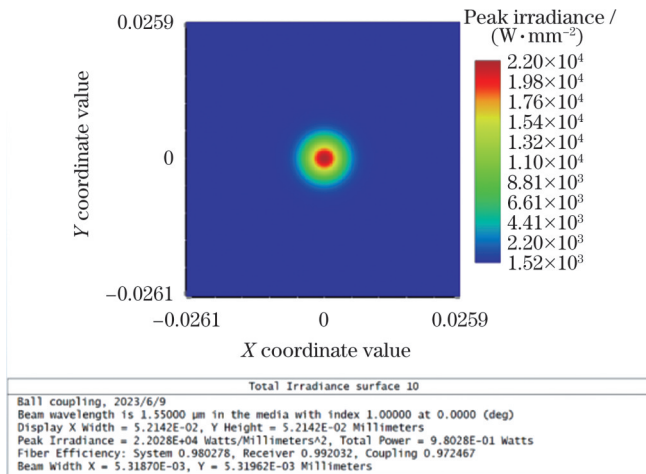


图 5 优化后的单模光纤的耦合效率图
Fig. 5 Optimized coupling efficiency of single mode fiber

优化后,系统的口径减小,可以配合实验室光源等器件。同时,优化后的点列图光斑均方根半径与艾里斑半径相比初始光学系统更小,如图 6 所示,均方根半径值为 6.492 μm ,艾里斑半径为 7.172 μm ,二者都比初始光学系统的更小,而且均方根半径小于艾里斑半径。通过软件计算得到该系统中单模光纤的耦合效率为 76.27%,与理想的耦合效率 81.45% 相近。

如果考虑到光纤入射端面的菲涅耳反射损耗,则理想的耦合效率将降至 78%。同时,在物理光学传播上,该系统中单模光纤的耦合效率达到了 97.25%。所以,该系统经优化后,耦合效率较高,能够达到耦合要求。

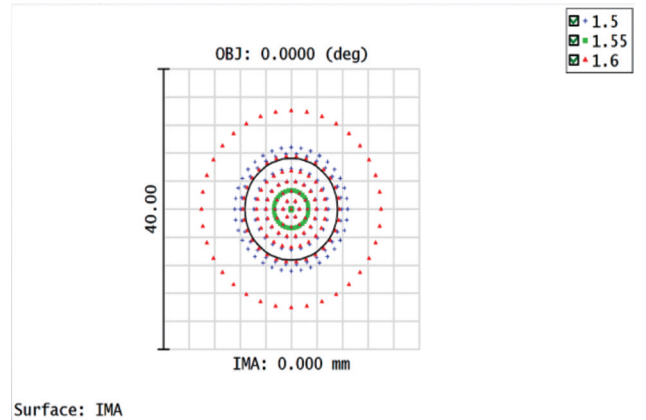


图 6 优化后的像质点列图
Fig. 6 Spot diagram after optimization

4.3 单模光纤耦合原理及误差分析

接下来分析飞秒激光在单模保偏光纤中的传输原理,同时分析导致单模光纤耦合效率降低的系统参数和外部因素以及将聚集光束完全耦合传输进光纤的条件。首先,若在保证激光能够完全耦合进光纤,则光束与单模光纤耦合需要满足一定的匹配条件,即

$$\theta_{in} < \arcsin(NA), \quad (15)$$

$$d_{spot} < d_{core}. \quad (16)$$

激光束到达光纤端面的聚焦光斑直径 d_{spot} 应小于纤芯芯径 d_{core} ,而且激光到达光纤端面的会聚光束的最大入射角度 θ_{in} 小于光纤的数值孔径(NA),如此才能保证光线与单模光纤的匹配条件^[18]。

对于利用一个或多个薄透镜将激光束间接耦合的光纤传输系统来说,有三种失配误差会降低单模光纤的耦合效率。第一种误差如图 7(a)所示,光线相对光轴倾斜,最大入射角度大于光纤的数值孔径,不满足式(15),导致光束不能完全进入光纤芯径;同时,光纤端面的聚焦光斑直径大于纤芯芯径,不满足式(16),芯径中的光线能量较少,导致光纤耦合效率迅速下降。第二种误差如图 7(b)所示,光线在光学系统透镜上的位置与镜片中心没有校准, θ_{in} 大于光纤的数值孔径,不满足式(15),导致耦合效率不能达到理想情况。第三种误差如图 7(c)所示,入射的高斯光线的束腰半径与光纤端面的光纤模场半径不匹配,导致耦合光斑半径大于光纤芯径,不满足式(16)。

高斯光束分析与物理光学传播分析都可以用于耦合效率的分析,二者的主要区别在于高斯光束分析一般用于完美基模 TEM_{00} 光束,不考虑系统内光学像差及孔径的影响,而物理光学传播分析则考虑了系统内光学像差及孔径的影响。图 8 与图 9 是基于高斯光束

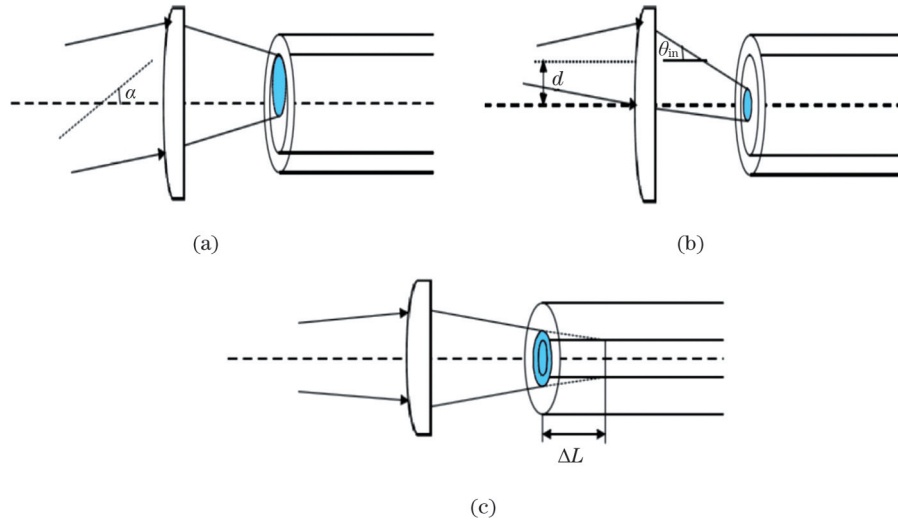


图 7 耦合对准误差分析原理图。(a)光束相对光轴倾斜;(b)光束相对光轴偏移;(c)光束束腰半径与光纤模场半径不匹配
 Fig. 7 Schematic diagrams of coupling alignment error analysis. (a) Beam tilt relative to optical axis; (b) beam offset relative to optical axis; (c) beam waist radius mismatch with fiber mode field radius

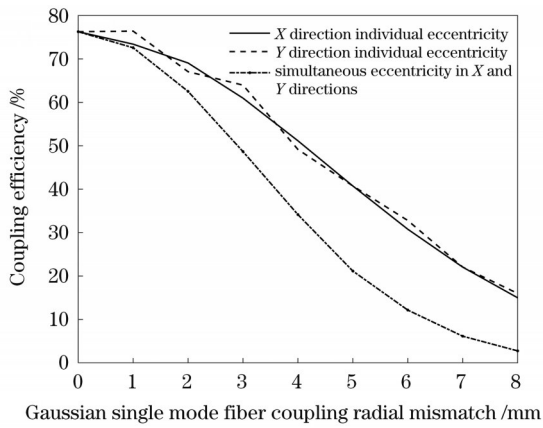


图 8 高斯传播单模光纤耦合效率与径向失配的关系
 Fig. 8 Relationship between coupling efficiency of Gaussian propagation single mode fiber and radial mismatch

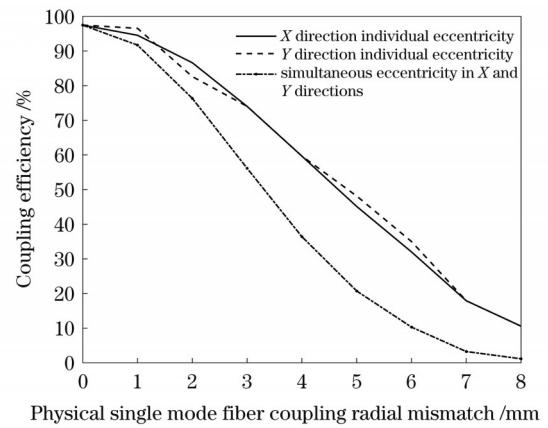


图 10 物理传播单模光纤耦合效率与径向失配的关系
 Fig. 10 Relationship between coupling efficiency of physical propagation single mode fiber and radial mismatch

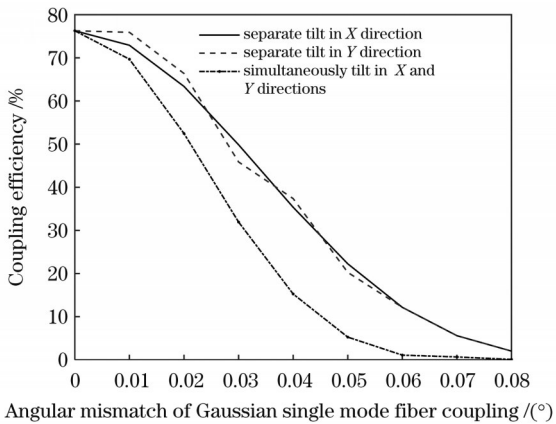


图 9 高斯传播单模光纤耦合效率与角向失配的关系
 Fig. 9 Relationship between coupling efficiency of Gaussian propagation single mode fiber and angular mismatch

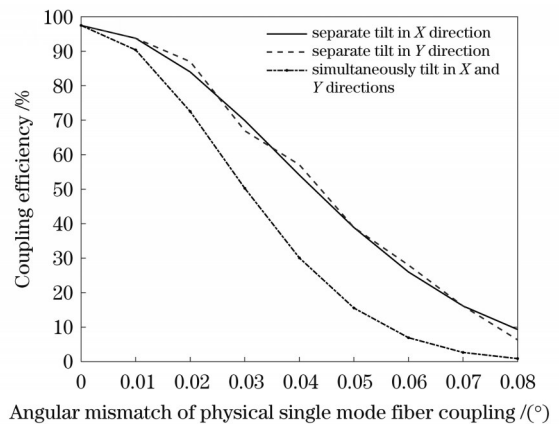


图 11 物理传播单模光纤耦合效率与角向失配的关系
 Fig. 11 Relationship between coupling efficiency of physical propagation single mode fiber and angular mismatch

分析得到的耦合效率曲线,图 10 与图 11 是基于物理光学传播分析得到的耦合效率曲线。物理光学传播分析较高斯光束分析得出的结果更准确,且与现实结合得

更深,对实际实验更具指导意义。
 通过 ZEMAX 可以模拟光纤偏心或者光源倾斜等误差。首先分析径向失配,即光学系统的光学元件沿

X 或 Y 方向偏心。当光学系统单独从初始位置沿 X 方向偏心 1 mm 时,单模耦合效率从 76% 降到 74% 左右;当光学系统单独从初始位置沿 Y 方向偏心 1 mm 时,单模耦合效率基本保持 76% 不变。之后,随着偏心增大,二者的降低趋势基本相同。当光学系统同时沿 X 、 Y 方向偏心 1 mm 时,耦合效率变为 72%,光线损耗相比沿 X 、 Y 方向单独偏心时更大,之后,耦合效率与偏心角度的关系如图 8 所示。

当物理光学传播从初始位置沿 X 方向偏心 1 mm 时,光纤耦合效率从 97% 降为 95%;当物理光学传播从初始位置沿 Y 方向偏心 1 mm 时,光纤耦合效率降为 96.6%。之后,随着偏心增大,二者的降低趋势基本相同。当物理光学传播从初始位置同时沿 X 、 Y 方向偏心 1 mm 时,耦合效率变为 94%,如图 10 所示。这是因为聚集光斑没有集中在光纤端面,光纤端面上的光斑半径增大,有少许光线信号进入包层,没有耦合进光纤,导致系统的耦合效率降低。单独一个方向的偏心在 0~2 mm 以内时,耦合效率的降低趋势较缓慢;当偏心超过 2 mm 以后,耦合效率降低的趋势加快,最后在偏心达到 4.9 mm 左右处耦合效率的下降趋势逐渐变缓。

接下来分析光学系统的光学元件沿 X 或 Y 方向倾斜,也就是所谓的角向失配。当光束沿 X 方向倾斜 0.01° 时,高斯单模光纤的耦合效率从 76% 降为 74%;当光束沿 Y 方向倾斜 0.01° 时,高斯单模光纤的耦合效率基本保持为 76%,光纤损耗从 -1.1765 dB 变为 -1.3723 dB。当光束同时沿 X 、 Y 方向倾斜时,单模光纤耦合效率的下降趋势更快,光纤损耗较单独方向倾斜时更高,如图 9 所示。

由图 11 可以看出:当物理光学传播沿 X 方向倾斜 0.01° 时,单模光纤的耦合效率从 97% 降为 95%;当物理光学传播沿 Y 方向倾斜 0.01° 时,单模光纤的耦合效率从 97% 降为 95%;当物理光学传播沿 X 、 Y 方向同时倾斜 0.01° 时,耦合效率降为 90%。两种情况下耦合效率的变化趋势都是先缓慢下降接着迅速下降最后缓慢下降。当沿 X 或 Y 方向的倾斜角度从 0.01° 变为 0.1° 时,无论是哪种单模光纤耦合效率,都基本接近零。角向失配对该系统的单模光纤耦合效率有巨大影响,在实验过程中要尽可能地使高斯光束正入射进入单模光纤,以避免出现该误差。

4.4 实验评估

实验室使用的光源为光纤激光器,其输出波段覆盖 1500~1600 nm,主波长为 1550 nm,且功率可调。发射和接收光纤均采用单模保偏光纤(PM1550),通过仿真实验判断该光学准直耦合系统达到了单模光纤耦合使用条件。

探测光与泵浦光之间的时间延迟是通过光学延迟线旋转来实现的,因此可以实现太赫兹脉冲的采样扫描。当延迟距离为 ΔL 时,对应的时间延迟为 $\Delta t = \Delta L / c$,

其中 c 为光速。如果 ΔL 变大,扫描的数据点数就会变少,系统的扫描速度就会变快。在时间延迟逐步增加过程中,脉冲扫描点的位置是不断改变的。

光源从光纤中出射,通过透镜组后被准直,准直光线在传输过程中被旋转延迟线反射回透镜组,进入透镜后被耦合进发射光纤。

在开始进行单模光纤耦合实验时,应该先校准光学系统透镜与单模光纤的相对位置。为了保证实验在较为稳定的环境下进行,需要减小外界振动对实验平台的影响,因此将实验器材固定在光学平台上,并将光学系统中的准直耦合透镜安装在多维调整结构台上,同时使用单模光纤将双透镜与实验光纤激光器、光功率计连接。为了保证准直耦合透镜中心在一条光轴上,利用可见光对光学系统的双透镜进行调节。最后进行不同维度的微调,使输出功率达到最大,即达到最高耦合效率。光学实验实物图如图 12 所示。采用控制变量法进行多次耦合实验,得到耦合误差存在时输出功率与设备机械误差的关系。最终,该实验所得的光纤耦合效率最高为 69%,距离理想单模光纤的耦合效率 78% 还有一定差距。实验器材摆放的位置精度、耦合系统镜片的加工误差、实验过程中的振动等因素都会影响光纤的耦合效率。最终得到的耦合失配存在时的功率曲线如图 13 所示。

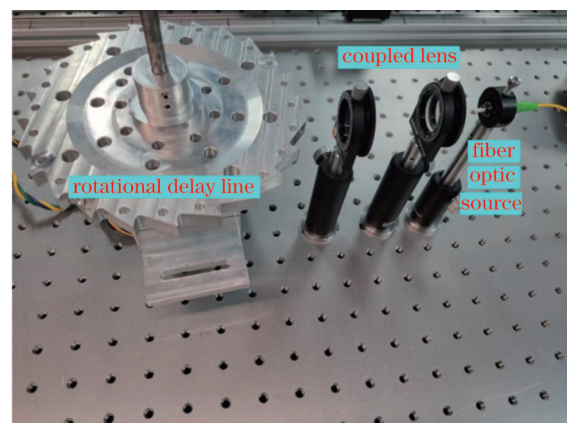


图 12 准直透镜耦合实验图

Fig. 12 Experimental image of collimating lens coupling

图 13(a) 为光纤输出功率与径向失配的关系曲线,可以看到:随着径向失配增大,输出功率逐渐衰减;当镜片偏心 1.0 mm 时,输出功率下降了 4.87 mW,后续下降趋势较为一致。可见,径向失配对信号耦合效率的影响比较明显,需要严格控制。

图 13(b) 是光纤输出功率与角向失配的关系曲线,可以看到:当角向失配为 0.01° 时,输出功率下降了 3.93 mW,功率损耗较大。耦合效率先迅速下降,然后在一定范围内减缓下降趋势,接着又迅速下降。角向失配对耦合效率的影响最为明显,在使用高精多轴调整结构进行校准时,必须严格控制 X 和 Y 两个方向上的角向失配。在校准过程中,一些偶然因素会使准

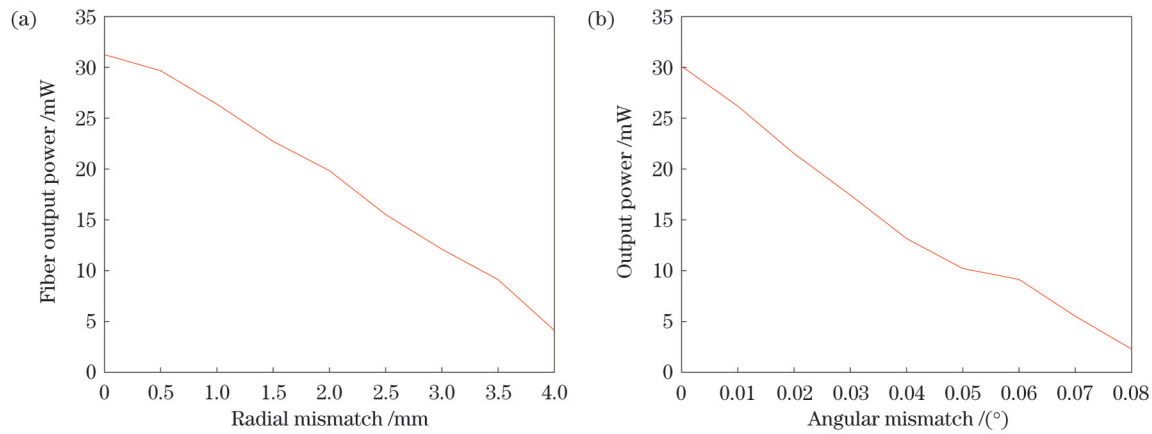


图 13 光纤输出功率与耦合误差的关系。(a)输出功率与径向失配的关系;(b)输出功率与角向失配的关系

Fig. 13 Relationship between fiber output power and coupling error. (a) Output power versus radial mismatch; (b) output power versus angular mismatch

直透镜产生轻微的抖动,导致输出功率存在一定误差,这也从侧面说明了角度变化对耦合的影响。

5 结 论

基于光纤式 THz-TDS 设计了收发一体式光纤耦合系统。与传统的光纤式 THz-TDS 不同的是,所设计的光纤耦合系统将延迟线与光纤结合,简化了光纤耦合系统的结构。基于高斯光束传播原理与双透镜特性,初步设计了高耦合效率的光学系统。分析了光学准直透镜与光纤耦合时的 3 种耦合误差所导致的耦合效率降低的现象,借助 ZEMAX 软件设计了单模光纤耦合透镜模型,并对该系统进行了优化,提高了单模光纤的耦合效率。结果显示,物理传播单模光纤的耦合效率达到了 97.25%,高斯传播单模光纤的耦合效率达到了 76.27%。为实现单模光纤的高效耦合,光束需要从光纤端面正入射,并且高斯光束的束腰位置应位于光纤端面上,同时束腰直径应等于光纤模场直径。即,光束与光纤模式越匹配,单模光纤耦合效率就会越高。得到的结论与太赫兹时域光谱系统的单模光纤高效耦合要求相符,为耦合透镜的设计提供了一种途径,同时为实现小型化太赫兹时域光谱仪提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 赵自然,王迎新.便携式太赫兹时域光谱仪的研制[J].太赫兹科学与电子信息学报,2013,11(1):57-61.
Zhao Z R, Wang Y X. Development of a portable terahertz time-domain spectrometer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(1): 57-61.
- [2] Vieweg N, Rettich F, Deninger A, et al. Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014, 35(10): 823-832.
- [3] 张阔海.大功率 Nd:YAG 激光束光纤耦合技术研究[D].北京:北京工业大学,2003.
Zhang K H. Study on fiber coupling technology of high power Nd:YAG laser beam[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003.
- [4] Li H Y, Li Q, Xia Z W, et al. Influence of Gaussian beam on terahertz radar cross section of a conducting sphere[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013, 34(1): 88-96.
- [5] Zhao P F, Wang Z N, Yu H J, et al. 12-W continuous-wave green output from a 200-pm fiber-coupled diode laser based on TO-Can packaged emitters[J]. Applied Optics, 2018, 57(9): 2263-2267.
- [6] 黎小妹.基于光纤激光器的太赫兹时域光谱系统研究[D].武汉:华中科技大学,2018.
Li X S. Study on terahertz time domain spectroscopy system based on fiber laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [7] 况耀武,何志平,徐卫明,等.收发共光路单模光纤耦合光学系统研究[J].半导体光电,2019,40(2):206-210.
Kuang Y W, He Z P, Xu W M, et al. Study of the receiver/transmitter common-path optical system based on single-mode fiber coupling[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(2): 206-210.
- [8] 朱尚典,张贺,马晓辉,等.高亮度半导体激光泵浦源光纤耦合系统设计[J].激光与光电子学进展,2023,60(15):1522002.
Zhu S D, Zhang H, Ma X H, et al. Design of high brightness semiconductor laser pumped source fiber coupling system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1522002.
- [9] 辛胤杰,李全勇,程爽,等.太赫兹时域光谱系统快速旋转光学延迟线设计[J].中国激光,2022,49(6):0614001.
Xin Y J, Li Q Y, Cheng S, et al. Design of fast rotating optical delay line for terahertz time-domain spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0614001.
- [10] Marcuse D. Loss analysis of single-mode fiber splices[J]. Bell System Technical Journal, 1977, 56(5): 703-718.
- [11] Ruilier C. A study of degraded light coupling into single-mode fibers[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 3350: 319-329.
- [12] Wallner O, Winzer P J, Leeb W R. Alignment tolerances for plane-wave to single-mode fiber coupling and their mitigation by use of pigtailed collimators[J]. Applied Optics, 2002, 41(4): 637-643.
- [13] Thibault S, Lacoursière J. Advanced fiber coupling technologies for space and astronomical applications[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5578: 40-51.
- [14] 王宇,许阳阳,刘爱云,等.长波红外显微成像光学系统的设计与仿真[J].光学学报,2020,40(6):0622001.
Wang Y, Xu Y Y, Liu A Y, et al. Design and simulation of long-wavelength infrared microscopic imaging optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0622001.
- [15] 胡卫生,曾庆济.自聚焦棒透镜准直系统的装配误差引起的附加耦合损耗分析[J].中国激光,1999,26(3):221-224.
Hu W S, Zeng Q J. Misalignment induced excess loss in gradient index rod lens collimating systems[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(3): 221-224.

- [16] 朱昌, 郭芮, 朱保文. 基于提高准直器插入损耗的研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S1): 111-112.
- Zhu C, Guo R, Zhu B W. Study on improving insert loss of collimator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25 (S1): 111-112.
- [17] 刘翠翠, 王翠鸾, 王鑫, 等. 半导体激光器双波长光纤耦合模块的 ZEMAX 设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0105002.
- Liu C C, Wang C L, Wang X, et al. Design of double wavelengths fiber coupled module of semiconductor diode laser by ZEMAX[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 0105002.
- [18] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[J]. Proceedings of the Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 1995, 542(1): 195-211.

Design and Error Analysis of a Fiber Coupling System Based on THz-TDS Common Optical Path

Li Tangyue^{1,2,3}, Mu Da^{1,2*}, Xia Pengyu^{1,2}, Zhang Yue^{1,2}, Xie Huiyang^{1,2}

¹Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Institute of Optoelectronic Measurement and Control Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

³Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528400, Guangdong, China

Abstract

Objective The term “terahertz radiation” typically refers to the frequency range of 0.1 THz to 10 THz in electromagnetic waves, positioning terahertz waves between microwaves and infrared. Due to the unique frequency band of THz waves, they exhibit several distinctive characteristics. (1) Transience: The signal amplitude of THz pulses is very low, yet they possess a noticeable peak value, making them valuable in time resolution research applications. (2) Spectral resolution function: Experimental THz radiation sources typically consist of only a few pulses, each covering a spectral range containing the vibrational and rotational energy levels of numerous macromolecules, facilitating substance identification. (3) Safety: The photon energy at 1 THz frequency is approximately 4 meV, and terahertz radiation does not easily disrupt the molecular structure of the detected substance when applied in medical imaging. (4) Penetration: With a wavelength falling between microwaves and millimeter waves, terahertz waves can pass through small particles in the air. Given these unique properties of THz rays, THz technology holds significant application prospects in safety inspection, communication technology, terahertz radar, astronomy, biomedical imaging, chemical identification, materials science, and other fields. Consequently, the generation, detection, and application studies of terahertz waves constitute a prominent research area.

Methods Utilizing a double-lens transmission matrix, an initial double-lens structure was designed, encompassing both aperture and thickness considerations. Subsequently, leveraging Gaussian beam transmission characteristics, the size and position of the beam waist were meticulously determined, optimizing the entire optical system. This process enables the creation of a fiber coupling system with a small aperture and high efficiency. The optical simulation software ZEMAX was employed to scrutinize the initial fiber coupling system’s design, aligning with terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) and fiber coupling technology features. The optical simulation software was further utilized to trace the system’s light, facilitating the preliminary establishment of the placement angle and position between optical components, such as the delay line and light source, ensuring successful light recovery. Concurrently, the delay line and the coupled optical system were configured to avoid mutual interference, allowing for the optimization of the fiber coupling system’s structure. This optimization aimed to achieve higher coupling efficiency and improved beam quality. Considering the practicalities of the experimental installation process, the mechanical structure of the entire module was designed based on the optical specifications. This approach ensures that all system components can be installed and adjusted cohesively. The coupling lens’s mechanical structure was devised as a five-dimensional adjustment structure, characterized by its simplicity, convenient machining and assembly, compactness, high stability without a transmission gap, and five degrees of freedom for three-dimensional translation and two-dimensional angle rotation.

Results and Discussions The collimated coupled optical system’s single-mode fiber coupling efficiency is illustrated in Fig. 2. When the system was positioned in front of the rotating delay line, the light followed a path reflected back through the delay line, coupling to the original fiber and rendering the system lens entirely symmetrical, resulting in a high coupling efficiency with a single-mode fiber. Figures. 4 and 5 depict the optimized collimated coupling optical system with its single-mode fiber coupling efficiency and the actual optical path diagram. The observed coupling efficiency with a single-mode fiber was 76.27%, approaching the ideal coupling efficiency of 81.45%. Accounting for Fresnel reflection loss at the incident end face of the fiber, the maximum coupling efficiency was reduced to 78%, closely aligning with the system’s actual coupling efficiency. Simultaneously, the single-mode

fiber coupling efficiency reached 97.25% for physical optical propagation. Consequently, following system optimization, the coupling efficiency was markedly high, meeting the specified coupling requirements.

Conclusions The fiber THz-TDS transceiver-integrated coupling system differs from traditional fiber THz-TDS by incorporating a delay line with the fiber in the coupling aspect, simplifying the structure of the fiber coupling system. An optical system with high coupling efficiency was designed based on the principles of a Gaussian beam relay and the characteristics of a double lens. The single-mode fiber coupling lens model was developed using ZEMAX software, and the system underwent optimization to enhance the coupling efficiency of the single-mode fiber. The results demonstrate that the coupling efficiency reached 97.25%, meeting the high-efficiency coupling requirements for single-mode fibers in terahertz time-domain spectroscopy systems. This not only provides a guiding direction for the design of coupling lenses but also contributes to the advancement of miniaturized terahertz time-domain spectroscopy instruments.

Key words fiber optics; fiber-optic coupling; integrated transmission and reception; terahertz time-domain spectroscopy system; single-mode fiber