

采用 TracePro 进行中红外气体检测系统的光路结构设计

安宇鹏, 王一丁, 李黎, 曹峰, 宋振宇, 张宇

(吉林大学集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:大多数气体分子在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中红外区都有基本振动吸收谱带, 采用中红外半导体光电子器件进行气体浓度的检测, 具有灵敏度高、准确性好、稳定、可靠等优点。TracePro 软件是一套普遍用于杂散光分析、照明系统分析以及光学系统分析的光线设计和仿真软件。采用 TracePro 软件设计了一个用于中红外气体检测系统的反射式双光程结构, 并采用 TracePro 软件对光学设计进行了仿真与分析。通过 TracePro 的分析检查出设计中存在的缺陷与不足, 对设计进行调整与修改, 得到最优化的光学结构。

关键词:中红外; 气体检测; TracePro; 光学设计

中图分类号:TN219 **文献标识码:**B

Design of the optical structure of the mid-infrared gas sensing system by using the TracePro

AN Yu-peng, WANG Yi-ding, LI Li, CAO Feng, SONG Zhen-yu, ZHANG Yu

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics Jilin University Region, College of Electronic Science & Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Most gas molecules have the fundamental vibration absorb spectrum in the mid-infrared region during $3 \sim 5 \mu\text{m}$. Detecting the gas concentration using the mid-infrared semiconductor opto-electronic devices have more advantages, such as high sensitivity, high accuracy and stability etc. The optical software TracePro is a simulation and analysis tool that performs stray light analysis, illumination analysis, and optical systems analysis. This paper designs a dual path structure using TracePro for mid-infrared gas sensing system. Using TracePro to simulate and analyze this optical design and modify the design according the analysis report.

Key words: mid-infrared; gas sensing; TracePro; optical design

1 引言

大多数双原子分子以及所有的多原子分子, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中红外波长范围里, 都有基本振动吸收光谱带。例如甲烷 (CH_4) 气体在 $3.31 \mu\text{m}$, 二氧化碳 (CO_2) 气体在 $4.2 \mu\text{m}$, 一氧化碳 (CO) 气体在 $4.65 \mu\text{m}$ 等。采用中红外半导体光电子器件结合吸收光谱技术对于检测气体的浓度, 是非常有效的方法。对气体浓度进行灵敏、耐用、选择性好的在线监测, 对于工、农业生产、大气污染监测以及家居生活等都有非常重要的意义。

TracePro 是一套普遍用于照明系统、光学分析、

辐射分析及光度分析的光线仿真软件, 具有很多优秀的功能。其应用领域包括: 照明、导波光学、薄膜光学、光机设计、激光泵浦设计等。采用“普适光线追迹”技术来追迹光线, 可以引入光线到一个设定好的模型上, 在模型内部和界面处没有额外的损耗。在每个界面上, 光线遵从吸收、反射、折射、衍射和散射定律。当光线在模型中沿不同的路径传播时, 可

基金项目:国家自然科学基金(No. 60477012)资助。

作者简介:安宇鹏(1979 -), 男, 博士, 主要从事中红外气体的检测, 检测系统中电路和光路的设计以及信号的处理等工作。

收稿日期:2009-05-30; **修订日期:**2009-06-16

追踪每一条光线的光通量。还能计算光的吸收、镜面反射以及折射、衍射和散射的能量情况^[1]。

2 设计原理

中红外气体检测系统基本原理为:光源发出一定波长的红外光,通过待测气体,气体对红外光产生吸收,在对应波长的红外探测器上可以探测出光信号的变化,如图 1 所示^[2]。



图 1 气体和红外光相互作用^[2]

Fig.1 the interaction between gas molecules and infrared lights

气体的吸收情况,可以根据 Lambert-Beer 定律得到^[2]:

$$I = I_0 \exp[-\sigma(\nu)NL]$$

这里, I_0 是初始光强度; I 是在气体中传输之后的光强度; L 是气体的作用长度; N 是对气体分子浓度的描述; $\sigma(\nu)$ 是吸收横截面。

红外检测的方法同其他的气体测量技术,例如电化学法、催化燃烧法、接触反应法以及气相色谱法等比较起来,在准确性、测量精度,以及稳定性和连续工作特性等方面都具有非常明显的优势。

随着半导体光电器件制造技术的发展,3 ~ 5 μm 波长的中红外发光二极管和二极管光电探测器已经有了越来越多的商业产品,器件的性能也有了明显的提高,可以用来检测 ppm (parts per million, 10^{-6}) 量级的气体浓度。

3 光学结构设计

TracePro 软件的分析与仿真都基于光学元件实体模型的建立。对所建立的模型,定义其各种属性,包括材料属性和光学特性等,根据定义的属性和光学参数进行仿真分析。

3.1 建立光源的模型

首先设计光源的外部结构,建立一个发光二极管(light emitting diode, LED)芯片的模型。芯片模型为一个尺寸是 1.5 mm \times 1.5 mm \times 0.5 mm 的立方体模块。然后在这个模块上选择一个发光表面,在本设计中,将 surface0 设定为发光面。选择发光模式为朗伯(Lambertian)散射,定义发光功率为 1 mW(0.001 W)。模块的其他表面参数保持不变。发光二极管芯片模型的树型结构参数和模拟实体结构分别如图 2,图 3 所示,图 3 中的 X, Y, Z 分别表示三维坐标的方向。

TracePro 软件是对光束进行追迹的工具软件,

因此可以设定 LED 光源的光线数量,可以从一根光线到上万根。图 4 是对上面的 LED 光源在设定表面发光 100 根光线的发光示意图。

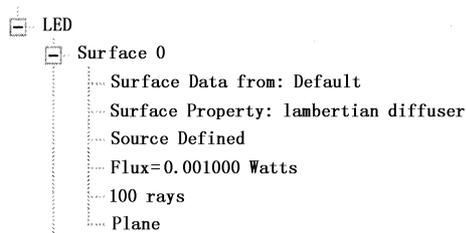


图 2 LED 模型树型结构参数中对发光表面的属性定义

Fig.2 attribution for light surface of LED

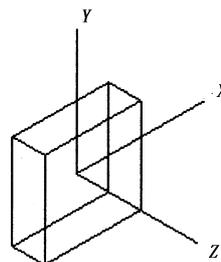


图 3 LED 模型的模拟结构示意图

Fig.3 the model of LED

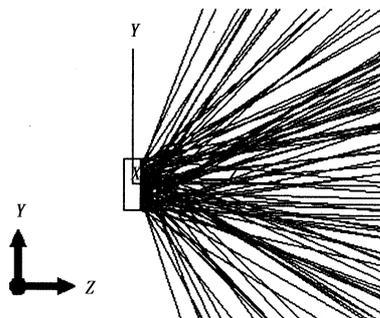


图 4 LED 发光示意图

Fig.4 light rays from LED

从图 4 中可以看出,这个 LED 光源发出来的光是非常分散的。对于实际的应用来说,可以利用到的光通量太小,因此有必要对光源发出的光进行适当的会聚处理。

3.2 加入反射镜的 LED 光源设计

球面反射镜是一个在制作工艺上很容易实现的反射镜,但是对分散光的会聚效果并不是非常好。而抛物面反射镜虽然制作上较为复杂,但是对分散光有非常好的准直作用,而且随着加工工艺的进步,抛物面反射镜已经有了非常广泛的应用。因此选择抛物面反射镜来实现对光源发出的分散光的会聚。

加入一个焦距为 0.5 mm,长度为 10 mm,直径为 56.25 mm,厚度为 0.5 mm,顶部开孔直径为 2 mm 的抛物面反射镜,定义抛物面反射镜的内表面

为理想的反射面。如图 5(a)、(b)所示。

对上述光源进行光线模拟,得到图 6。

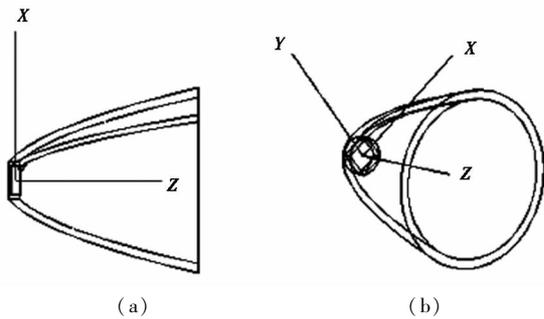


图 5 加入抛物面反射镜的 LED 光源
Fig. 5 LED with the parabolic reflector

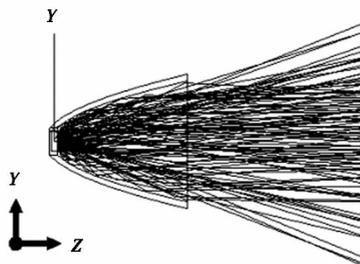


图 6 加入抛物面反射镜的 LED 光源发光模拟图
Fig. 6 light rays from LED with parabolic reflector

LED 发光的光线数量选择为 100 根。从图 6 中可以看出,LED 发出的光线在抛物面反射镜的内反射面上发生多次反射,可以得到非常好的平行光射出。实现了对光源发出的分散光的良好准直。

3.3 光路结构建模

根据光程长度的不同可以将气体检测系统的光路结构分为单光程结构、双光程结构和多反射长光程结构。根据 Lambert-Beer 定律,气体对光的吸收和气体同光发生作用的路径长度成正比,因此,光程越长,气体对红外光的吸收越多,得到的探测灵敏度和准确性越好。但是多反射长光程结构因为结构复杂,成本昂贵,不适用于便携式设计等因素,受到很多限制。在对测量精度、成本以及可实现性等方面进行折中考虑后,选择双光程结构作为红外气体检测系统的光路结构。

双光程结构的示意图如图 7 所示。

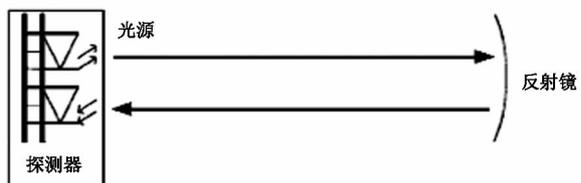


图 7 双光程结构示意图^[3]

Fig. 7 dual path optical structure^[3]

光源和探测器放置在同一侧,另一侧放置一个

反射镜,反射镜将光源发出的光,反射到探测器上,通过反射可以获得双倍的光程长度。根据球面反射镜的反射成像原理,位于反射镜球心平面处的物体,会在球心平面上与光轴成轴对称的位置处成像,像的大小与物体相同。因此在设计中,将光源的发光面和探测器的探测表面都放置在球面反射镜的球心平面上。光源的发光面的中心位置和探测器探测表面的中心以球面反射镜的光轴成轴对称^[4]。基于这个原理,采用 TracePro 软件对光路结构进行建模,得到图 8 所示的光路结构。图 8 是用 TracePro 软件进行的双光路结构的实体模型示意图。

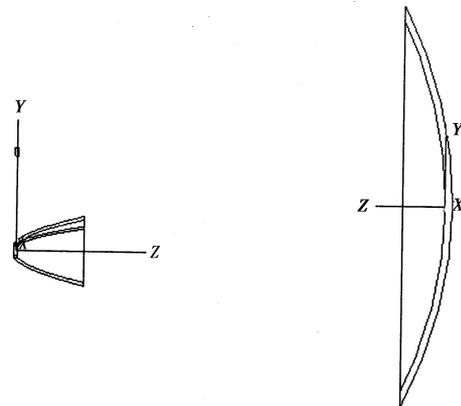


图 8 双光路模拟图

Fig. 8 dual path structure by TracePro

如图 8 所示,采用一个半径为 60 mm,焦距为 30 mm,长度为 6 mm,厚度为 1mm 的球面反射镜,定义球面反射镜的内表面 Surface1 为理想的反射镜面。光源采用带有前面所述的抛物面反射镜的 LED 光源。探测器的尺寸是 1.5 mm × 1.5 mm × 0.5 mm,探测表面 Surface0 的属性设置为理想吸收表面。LED 和探测器分别放置在球面反射镜光轴的轴对称位置上。

图 9、图 10 为对图 8 中的球面反射镜的反射面和探测器的探测面的参数设置。

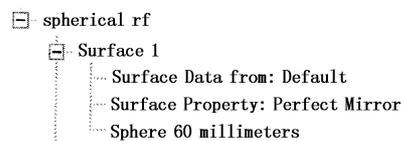


图 9 球面反射镜反射面的模型参数

Fig. 9 model parameters of spherical reflector

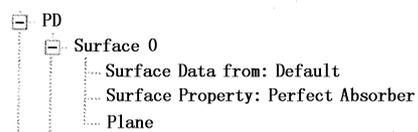


图 10 探测器探测面的模型参数

Fig. 10 model parameters of detector

对上面的光路设计做发光 100 根光线的模拟, 得到图 11。

从图 11 中不能很清楚地看到探测器的吸收光线情况, 对探测器做一个近距离的观察, 如图 12 所示。

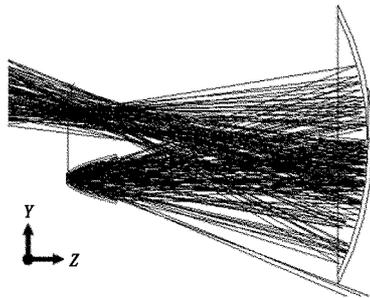


图 11 对于双光路结构的发光模拟
Fig. 11 light rays of dual pass structure



图 12 探测器探测表面的吸收光线模拟
Fig. 12 light rays for detector

从图 13 中可以看到, 探测器的探测表面可以吸收到的光线只有很少的一部分。通过 TracePro 的分析得到下面的探测器 PD Surface0 的吸收光通量图。

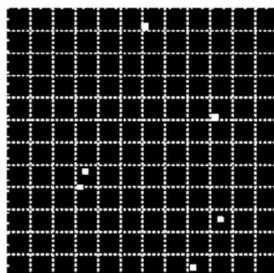


图 13 探测器探测表面吸收光通量图
Fig. 13 light flux figure of detector

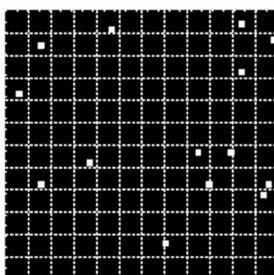


图 14 改进的吸收通量图
Fig. 14 modified absorption flux

图中白色的部分为照射到探测器表面, 并被探

测器表面吸收的光线。根据图 13 得到的统计结果是只有 6 根光线被探测器吸收, 探测器表面的光通量为 0.06 mW。这样可以得到这个双光路设计的探测效率仅仅为 6%。这个值是非常低的, 将直接影响到测量的灵敏度和精确性。

探测效率低的原因主要是 LED 光源经抛物面反射镜准直后的光束虽然准直特性很好, 但是出射的平行光束的直径较大, 经球面反射镜反射后的光束虽然在探测器附近形成很好的会聚, 但是光束面积和探测器探测面的面积相比, 依然过大, 使得在有限的探测器探测表面可以吸收到的光线数量非常少。

考虑到球面反射镜存在像差, 结合 TracePro 对光线的追迹模拟, 适当的调整了探测器的位置。将探测器向 Z 轴正向方向移动了 1 mm, 得到的新的吸收通量图。如图 14 所示。

从图中可以得到, 改进后结构, 探测器吸收的光线为 14 根, 探测器探测表面光通量为 0.14 mW, 整个光路结构的探测效率为 14%, 同改进前相比, 增加了一倍多。但是这个值依然很低, 为了进一步增加探测效率, 在光路结构中加入一个浸没透镜。将探测器探测面和透镜的后表面(像平面)用浸没介质浸没起来, 浸没透镜可以在探测器探测表面上成像, 这样可以达到缩小探测器尺寸, 提高接收灵敏度的作用。

设计中采用的浸没透镜为半球浸没透镜, 直径为 3 mm, 采用 Ge 材料, 折射率为 4。半球浸没透镜能够使像或者探测器尺寸缩小到 $1/n$, 面积缩小到 $1/n^2$, n 是透镜的折射率。加入了浸没透镜的光学系统, 在探测器上的光通量会得到增加, 信噪比也会得到提高。加入浸没透镜的光路结构和探测器示意图及模型参数如图 15, 16, 17 所示。

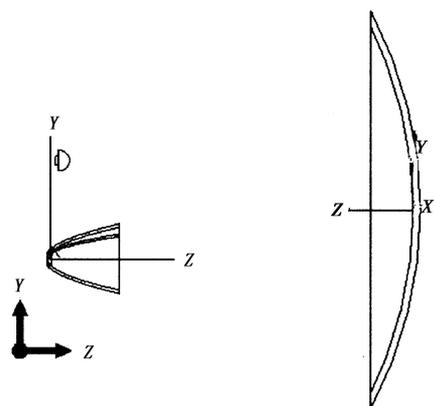


图 15 加入半球浸没透镜的光路结构图
Fig. 15 dual pass structure with immerse lens

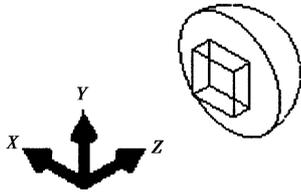


图16 半球浸没透镜和探测器的示意图

Fig. 16 detector and immerse lens

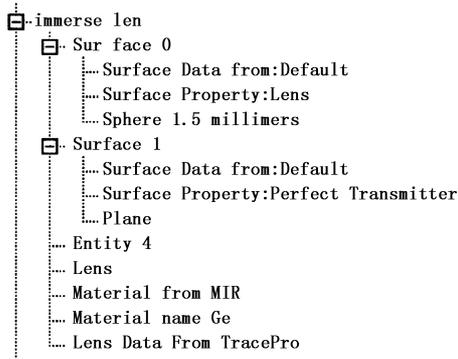


图17 半球浸没透镜的模型参数

Fig. 17 model parameters of immerse lens

对加入浸没透镜的光路进行仿真。得到图18所示的光线模拟图。

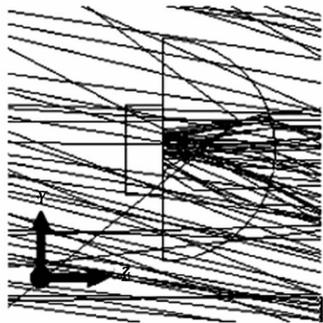


图18 带浸没透镜的探测器吸收光线情况模拟

Fig. 18 light rays of detector with immerse lens

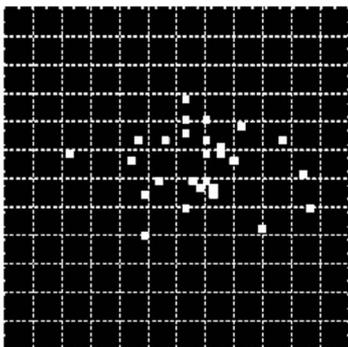


图19 带浸没透镜的探测器吸收光通量图

Fig. 19 absorption flux of detector with immense lens

从图19中可以得到加入浸没透镜的探测器探测表面可以吸收的光线为27根,根据TracePro模拟计算得到的吸收光通量近似为0.261 mW,探测效率为26.1%。同未加入浸没透镜的情况相比较,增加了12.1%。而且从吸收光通量示意图中可以看到,在探测器探测表面上的光线分布更为集中。

4 结论

对于中红外气体检测系统来说,在搭建系统的光路结构时,因为中红外光是不可见的,通常情况下都需要采用一个可见光光源来建立一个辅助光路,在辅助光路的基础上建立系统所需要的光路结构。这个过程不仅增加了实现光路结构所需要的时间,也增加了系统成本,同时可见光与中红外光之间的差异也会给设计带来一定的误差。而采用TracePro光学设计软件可以很方便地模拟出中红外气体检测系统的光路结构。

通过采用TracePro软件对中红外气体检测系统的光路设计进行模拟和分析,并且根据模拟的结果做了适当的修改之后,可以发现,系统的性能有了非常明显的改善。通过TracePro软件进行光线模拟和追迹,可以方便地观察到光学设计中存在的各种缺陷和不足,从而使设计人员在短时间里作出正确的修改。减少了在反复的实验中调整光路的时间,同时增加了实验结果的准确性和可靠性。

本文中的设计虽然根据TracePro软件做了很多改进,但是整个系统的探测效果依然不很理想,光源发出光的利用率太低,所以还需要对设计进行深入的修改,进一步提高中红外气体检测系统的性能。

参考文献:

- [1] TracePro Online Help.
- [2] Frank K Tittel, Dirk Richter, Alan Fried. Mid-infrared laser applications in spectroscopy [J]. Appl. Phys., 2003, 89:445 - 516.
- [3] Oliver Hennig, Rainer Strzoda, Erhard Mágori, et al. Hand-held unit for simultaneous detection of methane and ethane based on NIR-absorption spectroscopy [J]. Sensors and Actuators B, 2003, 95:151 - 156
- [4] Richard Dittion. 现代几何光学 [M]. 詹涵菁,译.长沙:湖南大学出版社,2004:31 - 36.