

·激光技术·

大模场单模单偏振平顶基模光纤激光器

柏馨^{1,2}, 王春灿^{1,2}

(1.北京交通大学全光网络与现代通信网重点实验室,北京 100044;2.北京交通大学光波技术所,北京 100044)

摘要:为了在大模场平顶基模光纤激光器中实现单模单偏振运转,提出一种获得单模单偏振平顶基模信号光的方法。在平顶基模光纤的包层中引入两个带有椭圆空气孔的无源纤芯,无源纤芯对称地置于直径为20 μm 的有源芯区的两侧,椭圆空气孔用来引入双折射。通过数值仿真发现,在上述有源光纤作为平顶基模光纤激光器的增益介质的情况下,可以使得光纤激光器在不采用其他模式选择方法的情况下只输出 x 方向偏振基模。

关键词: 光纤激光器;单模;单偏振;双折射

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-02-0027-05

Single-mode Single-polarization Fiber Laser with Flattened Fundamental Mode in Large-mode-area

BAI Xin^{1,2}, WANG Chun-can^{1,2}

(1. Key Lab of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: For performing single mode (SM) single polarization (SP) operation in fiber lasers with flattened fundamental (FM) mode in large-mode-area, a method for obtaining SMSP signals with FM mode is presented. Two passive fiber cores with elliptical air holes are inserted into layers of fibers with FM mode. The cores are placed on both sides of an active core region with 20 μm diameter symmetrically and elliptical air holes are used to import birefringence. According to numerical simulation, when the active fiber is used as the gain medium of fiber lasers with FM mode, only polarization fundamental mode in x direction will be output by fiber lasers without choosing other modes.

Key words: fiber laser; single mode (SM); single polarization (SP); birefringence

为了突破非线性效应对提升激光器光功率的限制,可以适当地提高光纤模场面积^[1]。研究发现,通过对折射率分布的精心设计,可以使光纤基模的强度分布平坦化,从而减小光纤芯区的光强度^[2]。这种方法已经成功地运用于高输出功率脉冲光纤激光器^[3]。除此之外,研究证实平顶基模光纤激光器能够在不使用其他任何模式选择方法的情况下实现单模输出^[4]。然而,关于平顶基模光纤激光器的单偏振特性的研究却不是很多。

目前,实现单偏振运转的方法主要是使用保偏光纤和偏振片,但是这种方法不能完全消除偏振模

分量,偏振模耦合不能够完全被消除^[5]。跟保偏光纤不同,单模单偏振光纤中只能传输一种偏振方向的基模,所以它不仅能够消除偏振模耦合,还能消除偏振模色散^[6]。为了实现单偏振,需要引入足够大的双折射用以分离基模中两个简并的偏振模式^[7],然后使不需要的偏振模式截止^[8-9]。单偏振性质能够提高光学器件和传输系统的稳定性^[10-11]。

文中提出了一种具有平顶基模的单模单偏振光纤。在光纤的包层中引入两个带有椭圆空气孔的无源纤芯,使其对称地置于有源纤芯的两侧,以此来获得足够大的双折射。文中第一部分,主要采用有限

收稿日期: 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金资助(61007028)

作者简介: 柏馨(1989-),女,贵州安顺人,硕士研究生,主要研究方向为光通信。

元法对单模单偏振平顶基模光纤的特性进行研究；第二部分,主要研究基于速率方程的激光器中的横模竞争。仿真结果显示,采用上述结构的有源光纤作为平顶基模光纤激光器的增益介质能够实现单模单偏振输出。

1 平顶基模单模单偏振光纤

平顶基模单模单偏振光纤的结构如图1所示,中间部分是掺杂稀土元素的硅芯,半径为 r_1 ,折射率为 n_{core} ,硅芯上灰色的部分是厚度为 $r_2 - r_1$ 硅层,折射率为 n_{opt} 。包层的折射率 n_{clad} ,这里 n_{core} 、 n_{clad} 、 r_2 、 r_1 和 n_{opt} 的关系由式(1)决定^[2]

$$r_2 = r_1 + \frac{1}{k_0 \sqrt{n_{opt}^2 - n_{core}^2}} \tan^{-1} \left[\frac{n_{core}^2 - n_{clad}^2}{n_{opt}^2 - n_{core}^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中, k_0 代表自由空间的波数。如图1,包层中引入两个带有椭圆空气孔的无源纤芯,该纤芯的半径为 b ,折射率为 n_{pc} ,空气孔的长轴和短轴分别为 d_L 和 d_s , d 代表无源纤芯中心与有源纤芯中心的距离。

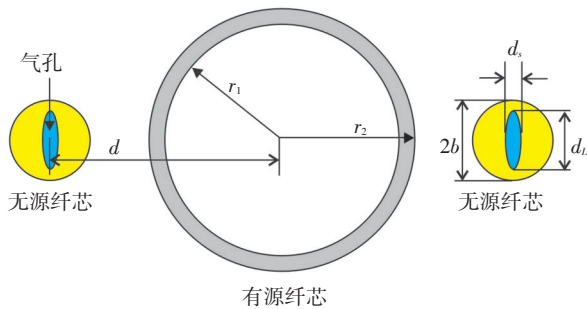


图1 平顶基模单模单偏振光纤的结构图。白色区域对应有源纤芯,灰色部分对应硅层,黄色区域对应无源纤芯,蓝色区域对应椭圆空气孔。

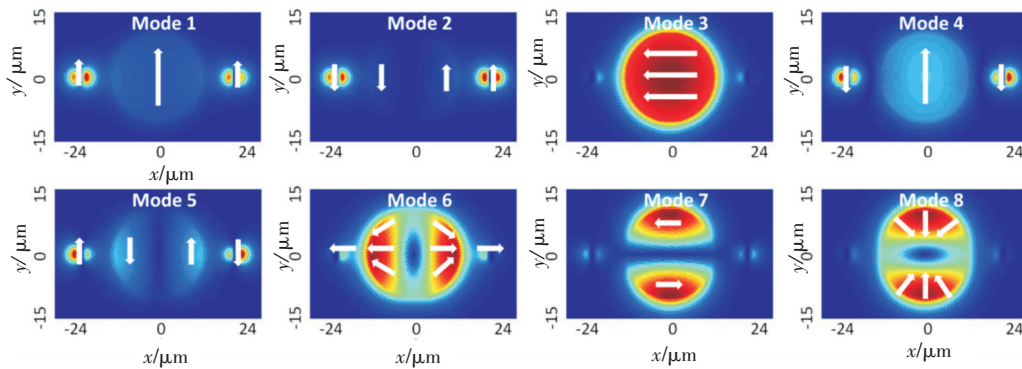


图2 光波长1080 nm时,平顶基模单模单偏振光纤模式的强度分布图,白色箭头代表偏振方向

平顶基模单模单偏振光纤相关参数见表1。

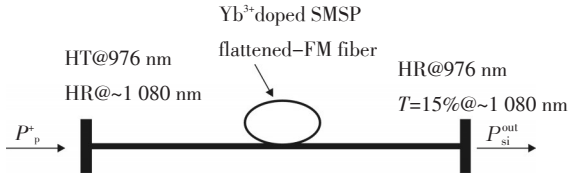
表1 平顶基模单模单偏振光纤相关参数

参数名	参数值/(μm)	参数名	参数值
r_1	10	n_{core}	1.452 0
r_2	10.5	n_{opt}	1.460 5
b	2	n_{pc}	1.473 0
d_L	3.6	n_{clad}	1.450 0
d_s	1		
d	18		

采用有限元法得到平顶基模单模单偏振光纤中的横模模式见图2。其中,模式1、2、4和5均为 y 方向偏振模,它们的能量主要分布在带空气孔的纤芯内;模式3、6、7和8能量主要集中在有源纤芯中,其中模式3和7均为 x 方向偏振模,模式6和8是相互正交的两个偏振模。由于无源纤芯中椭圆空气孔的存在而引入的双折射使得 x 偏振基模(模式3)与 y 偏振基模(模式1)不再简并。比较发现,模式3中将更多的能量分布在有源纤芯的部分,这说明在平顶基模单模单偏振光纤作为增益介质的光纤激光器中, x 方向偏振基模能够吸收最多的泵浦光能量。因此, x 方向偏振基模能够在模式竞争中占主导地位,并且作为光纤激光器的主要输出。

2 平顶基模单模单偏振光纤激光器

平顶基模单模单偏振光纤激光器的结构见图3。图3中,波长976 nm的泵浦光经过高透过率的腔镜的左侧进入激光器,到达激光器输出端反射率为85%的腔镜,输出光波长为1080 nm,反馈回输入端的激光到达反射率为100%的左腔镜的右侧被完全反射回来,不断地在激光器中振荡。

图3 掺Yb³⁺平顶基模单模单偏振光纤激光器的结构图

根据文献[12],假设激光器为单纵模、振荡,且泵浦光在光纤截面上分布均匀,多模光纤激光器中的速率方程可以写为

$$\frac{N_2(r, \varphi, z)}{N_1(r, \varphi, z)} = \frac{\frac{[p_p^+(z) + p_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p(r, \varphi)}{h\nu_p} + \sum_i \frac{[p_{si}^+(z) + p_{si}^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_{si}(r, \varphi)}{h\nu_s}}{\frac{[p_p^+(z) + p_p^-(z)]\sigma_{ep}\Gamma_p(r, \varphi)}{h\nu_p} + \frac{1}{\tau} + \sum_i \frac{[p_{si}^+(z) + p_{si}^-(z)]\sigma_{es}\Gamma_{si}(r, \varphi)}{h\nu_s}} \quad (2)$$

$$\frac{dp_p^+(z)}{dz} = \int_0^{2\pi} \int_0^a [\sigma_{ep}N_2(r, \varphi, z) - \sigma_{ap}N_1(r, \varphi, z)]\Gamma_p(r, \varphi) r dr d\varphi \{p_p^+(z) - \alpha_p p_p^+(z)\} \quad (3)$$

$$\frac{dp_{si}^+(z)}{dz} = \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_{si}(r, \varphi) r dr d\varphi \{p_{si}^+(z) - \alpha_{si} p_{si}^+(z) - \sum_j d_{ij}[p_{si}^+(z) - p_{sj}^+(z)]\} \quad (4)$$

式中, h 是普朗克常数; τ 是激光上能级的弛豫时间; ν_p 和 ν_s 分别是泵浦光和信号光的频率; a 是纤芯半径; $N_2(r, \varphi, z)$ 和 $N_1(r, \varphi, z)$ 分别为 (r, φ, z) 处激光下能级和激光上能级的反转粒子数密度 $N(r, \varphi, z) = N_1(r, \varphi, z) + N_2(r, \varphi, z)$ (代表掺杂浓度分布, 在光纤轴向上为常数和径向对称); $p_p^+(z)$ 和 $p_p^-(z)$ 分别为正向和反向泵浦功率; $p_{si}^+(z)$ 和 $p_{si}^-(z)$ 分别为第 i 阶横模的正向和反向功率; σ_{ap} (σ_{ep}) 和 σ_{as} (σ_{es}) 分别为泵浦激光吸收(发射)截面和信号激光吸收(发射)截面; α_p 和 α_{si} 分别代表泵浦光和信号光第 i 阶横模的损耗因子; d_{ij} 是第 i 阶横模和第 j 阶横模之间的功率耦合系数; $\Gamma_p(r, \varphi)$ 和 $\Gamma_{si}(r, \varphi)$ 分别是泵浦光和信号光第 i 阶横模的功率填充分布, 如下式

$$\Gamma_p(r, \varphi) = \frac{1}{A_{\text{clad}}} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_p(r, \varphi) r dr d\varphi = \Gamma_p = \frac{A_{\text{core}}}{A_{\text{clad}}} \quad (5)$$

$$\Gamma_{si}(r, \varphi) = \frac{\varphi_i(r, \varphi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} r \varphi_i(r, \varphi) dr d\varphi} \quad (6)$$

$$\int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_{si}(r, \varphi) r dr d\varphi = \Gamma_{si} = \frac{p_i^{\text{core}}}{p_i^{\text{core}} + p_i^{\text{clad}}}$$

其中, $\varphi_i(r, \varphi)$ 表示第 i 阶横模的强度分布函数; A_{core} 和 A_{clad} 分别是纤芯和内包层的面积。式(2)表示的是基态和激发态的反转粒子数密度 $N_1(r, \varphi, z)$ 和 $N_2(r, \varphi, z)$ 随着第 i 阶横模的正向和反向的信号光功率 $p_{si}^{\pm}(z)$ 和同一位置处的泵浦光功率 $p_p^{\pm}(z)$ 的变化。式(3)和式(4)分别描述的是泵浦光和信号光(每个单个横模)功率沿光纤长度的变化。

由于方程(3)和方程(4)中的耦合项使得这些复杂的方程式非常难解, 文献[12]中提出了一个近似替代方法, 即将纤芯截面划分成一个个足够薄的数量有限的层(如图4), 此时每层内的掺杂浓度和反转粒子数可视为一个常数。于是多模光纤激光器的速率方程改写为

$$\frac{N_{2k}(z)}{N_{1k}(z)} = \frac{\frac{[p_p^+(z) + p_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_{pk}}{h\nu_p A_k} + \sum_i \frac{[p_{si}^+(z) + p_{si}^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_{sik}}{h\nu_s A_k}}{\frac{[p_p^+(z) + p_p^-(z)]\sigma_{ep}\Gamma_{pk}}{h\nu_p A_k} + \frac{1}{\tau} + \sum_i \frac{[p_{si}^+(z) + p_{si}^-(z)]\sigma_{es}\Gamma_{sik}}{h\nu_s A_k}} \quad (7)$$

$$\frac{dp_p^+(z)}{dz} = \sum_k \Gamma_{pk} [\sigma_{ep}N_{2k}(z) - \sigma_{ap}N_{1k}(z)] p_p^+(z) - \alpha_p p_p^+(z) \quad (8)$$

$$\frac{dp_{si}^+(z)}{dz} = \sum_k \Gamma_{sik} [\sigma_{es}N_{2k}(z) - \sigma_{as}N_{1k}(z)] p_{si}^+(z) - \alpha_{si} p_{si}^+(z) - \sum_j d_{ij} [p_{si}^+(z) - p_{sj}^+(z)] \quad (9)$$

$$\Gamma_{pk} = \frac{A_k}{A_{\text{clad}}}, \Gamma_{sik} = \frac{\int_{r_{k-1}}^{r_k} \int_0^{2\pi} r \varphi_i(r, \varphi) dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} r \varphi_i(r, \varphi) dr d\varphi} \quad (10)$$

其中, $A_k = \pi(r_k^2 - r_{k-1}^2)$ ($k=1, 2, \dots, M; r_0=0$) 代表第 k 层的面积, Γ_{pk} 和 Γ_{sik} 分别代表第 k 层的泵浦光和信号光的填充因子。

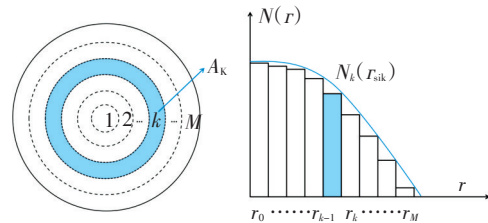


图4 光纤截面分层图

为了解耦合方程(7)~方程(10), 需要初始条件和边界条件。对于光纤激光器, 边界条件可以表示为

$$p_{si}^+(0) = R_1 p_{si}^-(0) \quad (11)$$

$$p_{si}^+(L) = R_2 p_{si}^-(L) \quad (12)$$

这里的 L 代表光纤的长度, R_1 和 R_2 分别代表 $z=0$ 和 $z=L$ 处的反射镜的反射率。方程(7)~方程(10)在输出功率

率 $p_{si}^{out} = (1 - R_2)p_{si}^+(L)$ 时收敛。将泵浦光和信号光功率的初始值设在 $z=0$ 处, 设 $R_1=100\%$, $R_2=15\%$, 信号光功率的计算采用四阶龙格库塔法。

上述的多模光纤激光器中横模竞争模型同样适用于研究平顶基模单模单偏振光纤激光器中的横模竞争。在数值模拟中采用的参数见表2。其中, λ_p 和 λ_s 分别为泵浦光和信号光的波长; α_p 是泵浦光损失因子; α_s 是信号光损失因子; N 是掺杂浓度分布; σ_{ap} (σ_{ep}) 和 σ_{as} (σ_{es}) 分别是泵浦吸收(发射)截面和信号吸收(发射)截面; L 是光纤的长度; r_{clad} 是包层的半径; τ 是激光上能级的弛豫时间。其他的参数跟表1参数一样。为了研究每个模式的输出功率与输出总功率的关系, 将 Q_i 定义为第 i 个模式的输出光功率与总输出功率的比例。

表2 相关参数

参数名	参数值	参数名	参数值
λ_p / nm	976	L / m	1
λ_s / nm	1 080	$r_{clad} / \mu\text{m}$	45
σ_{ap} / m^2	2.0×10^{-24}	α_p / m^{-1}	5×10^{-3}
σ_{ep} / m^2	2.0×10^{-24}	α_s / m^{-1}	5×10^{-3}
σ_{as} / m^2	3×10^{-27}	τ / s	0.8×10^{-3}
σ_{es} / m^2	4.0×10^{-25}	N / m^{-3}	1.8×10^{26}

如图5所示, 当泵浦功率为50~1 000 W时, 模式3在模式竞争中一直保持主导地位, Q_3 几乎等于100%, 说明该平顶基模单模单偏振光纤作为光纤激光器的增益介质的情况下能够实现单模单偏振运转。

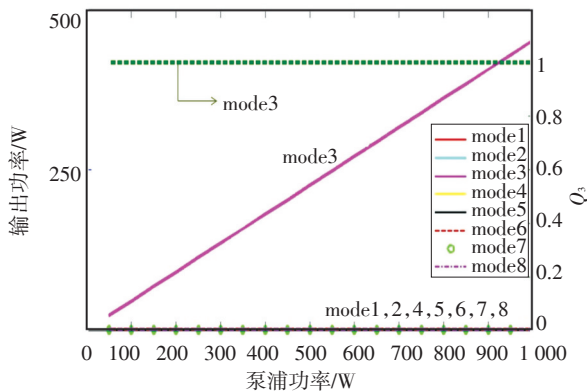


图5 平顶基模单模单偏振光纤激光器各模式的输出功率以及 Q_3 随着泵浦功率的变化

图6所示为当泵浦功率为500 W时, 平顶基模单模单偏振光纤激光器中模式1, 3, 4的 Q 因子随着无

源纤芯的折射率 n_{pc} 的变化。因为其他模式的 Q 值几乎为0, 所以可以忽略。从图6中可以看出, 对于平顶基模单模单偏振光纤激光器, 当 n_{pc} 从1.472 3变化到1.473 9时, Q_3 均在99%之上, 此时激光器只输出 x 方向偏振基模。

当 $n_{pc} < 1.472 3$ 时, Q_3 随着 Q_1 的增大而减小。如图6左插图, 当 $n_{pc} = 1.47$ 时, 模式1和模式3的强度分布基本一致。此时, Q_1 和 Q_3 约为50%。为了研究各个模式对泵浦光的吸收效率, 引入填充因子 Γ_i , 定义为第 i 个模式分布在有源芯区的功率与该模式总功率的比值。计算得出 $\Gamma_1 = 0.869 0$, $\Gamma_3 = 0.871 4$, 这说明模式1和模式3此时对泵浦光的吸收效率相当。表明此时的双折射不够大, 无法支持单模运转。

当 $n_{pc} > 1.473 9$ 时, Q_3 随着 Q_4 的快速增加而急剧减小。如图6右插图, 当 $n_{pc} = 1.475$ 时, 模式3中分布在无源芯区的能量比模式4分布在无源芯区的能量多, 此时 $\Gamma_3 = 0.840 2$, $\Gamma_4 = 0.874 2$ 。也就是说, 模式4相比较模式3而言分布在有源芯区的能量更多。所以, 模式4在输出中占优势。上述分析可以得出, 在合适的参数设计下, 平顶基模单模单偏振光纤激光器能够在不使用其他模式选择机制的情况下只输出 x 方向偏振基模。

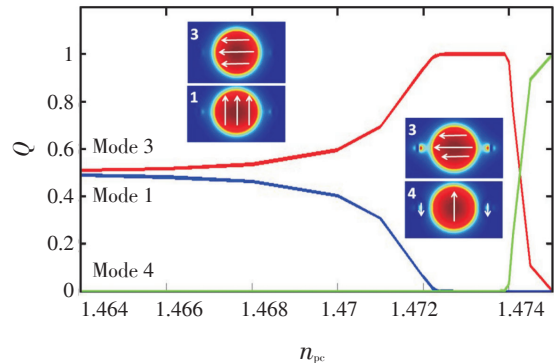


图6 泵浦功率500 W时, 平顶基模单模单偏振光纤激光器的模式1, 3, 4的 Q 值随着 n_{pc} 的变化。左边的插图为 $n_{pc} = 1.47$ 时模式3和模式1的强度分布图。右边的插图为 $n_{pc} = 1.475$ 时模式3和模式4的强度分布图。

3 结论

文中提出了一种平顶基模光纤激光器实现单模单偏振运转的方法。在光纤的包层中引入两个带有椭圆空气孔的无源纤芯, 以此来获得足够大的双折射。因为无源纤芯与有源纤芯之间的耦合, x 方向和

y 方向的偏振基模不再简并,两个正交偏振模式的强度分布不再相同。当 n_{pc} 在特定的范围内, x 偏振基模的模式功率比其他模式更多地集中在掺杂纤芯区域,即 x 偏振基模能够吸收更多的泵浦光能量。因此, x 偏振基模能够在横模竞争中占主导地位。研究表明,有源芯区直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的平顶基模光纤激光器可以在不采用其他模式选择机制下只输出 x 偏振基模光。这个特性对于平顶基模光纤激光器实现单模单偏振运转具有重要的意义。

参考文献

- [1] 易昌申,张培晴,戴世勋,等.大模场光子晶体光纤研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2012,49(10):100001.
- [2] Ghatak A K, Goyal IC, Jindal R. Design of waveguide refractive index profile to obtain flat modal field[J]. Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1999: 40–44.
- [3] Dawson J W, Beach R J, Jovanovic I, et al. Large flattened mode optical fiber for high output energy pulsed fiber lasers [J]. Optical Society of America, 2003.
- [4] Wang C, Zhang F, Lu Y, et al. Single-mode operations in the large flattened mode optical fiber lasers and amplifiers [J]. Pure and Applied Optics, 2009: 065402.
- [5] Noda J, Okamoto K, Sasaki Y. Polarization-maintaining fibers and their applications[J]. Lightwave Technology, 1986, 4(8): 1071–1089.
- [6] Kubota H, Kawanishi S, Koyanagi S, et al. Absolutely single polarization photonic crystal fiber[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2004, 16(1): 182–184.
- [7] Wang C C, Gong L, Li J L, et al. Single-polarization in-phase supermode operation in multicore fiber lasers[J]. Optics Communications, 2011, 284(18): 4215–4219.
- [8] Simpson J, Stolen R, Sears F, et al. Single-polarization fiber[J]. Lightwave Technology, 1983, 1(2): 370–374.
- [9] Nolan D A, Berkey G E, Li M J, et al. Single-polarization fiber with a high extinction ratio[J]. Optics Letters, 2004, 29(16): 1855–1857.
- [10] 周秦岭,卢兴强,张光,等.大模面积平顶模场光子晶体光纤模式分析[J]. 光学学报, 2010, (5): 1497–1500.
- [11] 刘小毅,张方迪,张民,等.基于谐振吸收效应的单模单偏振光子晶体光纤研究[J]. 物理学报, 2007, 56(1): 301–307.
- [12] Gong M, Yuan Y, Li C, et al. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers[J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3236–3246.

(上接第4页)

因为其设计和工作的特点,该防盗报警器系统十分适合作为单户型的家用防盗探测器,可以用它构成对窗、阳台等建筑物的出入口形成封闭式的防范。经改进后,还可以作人流量记录计数器,记录进出人次。另外,因为该防盗报警器能实现监控单方向通行的功能,所以它还适合用于商场、旅游景点等场所的出入口控制。另外,在出入口放置探测器时,两组探测器可放置在不同高度,以防宠物等动物经过发生误报。

参考文献

- [1] 严世华,祝世杰. 红外搜索跟踪系统作用距离分析与计算[J]. 光电技术应用,2011,26(2):39–41.
- [2] 管敏杰,赵冬娥. 一种简易红外温控系统的设计[J]. 光电技术应用,2011,26(6):4–7.
- [3] 宋燕星,高琴,姚振静,等. 主动红外探测式视觉生命探测系统[J]. 红外技术,2012,34(9):521–524.
- [4] 孙蕊. 红外探测在预警机上的作用分析[J]. 激光与红外, 2012,42(3):292–295.
- [5] 俞嘉捷,伍耐明,曾智,等.基于红外脉冲相位热成像技术的玻璃钢深度测量[J]. 红外与激光工程, 2012,41(7): 1893–1898.
- [6] 郭秀秀,吕建平. 一种红外单目标跟踪与防盗报警系统设计[J]. 现代电子技术,2010:157–160.
- [7] 樊进,杨宏,索晓楠.基于红外探测原理的多路无线安防系统设计[J]. 电子设计工程, 2012,20(4):139–142.
- [8] 王松德,赵艳,姚丽萍,等. 红外探测无线遥控数显防盗报警系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2009,29(3):858–861.
- [9] 韩鹏. 基于单片机 AT89S52 的红外防盗报警系统的设计[J]. 才智,2011(3):49.
- [10] 汪若飞. 防盗探测器的工作原理及安装要点[J]. 中国公共安全,2006(6):49–52.
- [11] 王松德,赵艳,姚丽萍,等. 红外探测无线遥控数显防盗报警系统[J]. 光谱学与光谱分析,2009(3):858–861.
- [12] 李朝青. 单片机原理及接口技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.