



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101752779 A

(43) 申请公布日 2010.06.23

(21) 申请号 200910200342.7

(22) 申请日 2009.12.11

(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 孙平平 张艳丽 李小燕 张涛  
张燕 刘芳 刘德安 朱健强

(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.

H01S 3/17(2006.01)

H01S 3/06(2006.01)

H01S 3/0941(2006.01)

H01S 3/042(2006.01)

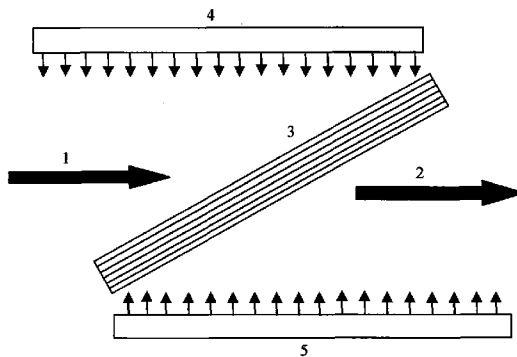
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 2 页

## (54) 发明名称

渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器

## (57) 摘要

一种渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器,由泵浦源、放大增益介质两部分组成,其特点在于所述的放大增益介质是薄片组合式激光增益介质,该薄片组合式激光增益介质与激光通光的正交方向成布儒斯特角放置,所述的泵浦源由第一面阵激光二极管泵浦源和第二面阵激光二极管泵浦源分别置于所述的薄片组合式激光增益介质的上下两面进行泵浦。本发明可有效降低自发辐射放大,提高储能效率和热管理效果,实现高功率、较高重复频率激光脉冲放大的应用目标。



1. 一种渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器,由泵浦源、放大增益介质两部分组成,其特征在于所述的放大增益介质是薄片组合式激光增益介质(3),该薄片组合式激光增益介质(3)与激光通光的正交方向成布儒斯特角放置,所述的泵浦源由第一面阵激光二极管泵浦源(4)和第二面阵激光二极管泵浦源(5)分别置于所述的薄片组合式激光增益介质(3)的上下两面进行泵浦。

2. 根据权利要求1所述的渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器,其特征在于所述的薄片组合式激光增益介质(3)是由多块钕离子掺杂浓度不同的而单块钕离子掺杂浓度分布均匀的大口径钕玻璃薄片(6、7、8、9、10)按钕离子掺杂浓度递增、间隔分立地、与竖直面成布儒斯特角排列后利用第一支撑板(13)和第二支撑板(14)固定而构成,在所述的薄片组合式激光增益介质(3)的两端面 and 所述的第一支撑板(13)和第二支撑板(14)之间分别是通光的第一密封窗口(11)和第二密封窗口(12),所述的各块大口径钕玻璃薄片之间,大口径钕玻璃薄片与所述的第一密封窗口(11)和第二密封窗口(12)之间的间隔作为冷却气体通道(27、28、29、20、31、32),在所述的第一支撑板(13)和第二支撑板(14)上,相对于所述的冷却气体通道(27、28、29、20、31、32)分别设有冷却气体的进气口(15、16、17、18、19、20)和冷却气体的出气口(21、22、23、34、25、26)。

3. 根据权利要求2或3所述的渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器,其特征在于所述的钕玻璃是掺钕的磷酸盐激光玻璃。

4. 根据权利要求2所述的渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器,其特征在于,所述的大口径钕玻璃薄片数量为5时,则所述的各大口径钕玻璃薄片(6、7、8、9、10)中 $\text{Nd}_2\text{O}_3$ 含量的重量百分比依次为2.64,2.72,2.83,3.0,3.22。

## 渐变掺杂组分组合式的大口径钷玻璃片状激光放大器

### 技术领域

[0001] 本发明涉及高重复率和高功率激光放大器,特别是一种渐变掺杂组分组合式大口径片状钷玻璃片状激光放大器,本发明可突破传统大口径钷玻璃放大器 1 小时以上发射一次激光脉冲的技术瓶颈,实现 10Hz 量级的高重复频率高功率激光驱动器装置,在激光惯性约束聚变、高密度等离子体和强场物理等领域有重要应用。

### 背景技术

[0002] 随着激光惯性约束聚变技术的新发展,国际上对真正实现商业应用价值的新型能源目标的惯性聚变能源 (Inertial Fusion Energy, 简称为 IFE) 技术研究提上了日程。从上世纪 70 年代中期的 Janus 激光系统,到现在的国家点火装置 (National Ignition Facility, 简称为 NIF), 氙灯泵浦的大口径钷玻璃激光系统已取得了巨大的发展 [ 参见文献 1、John Horvath, NIF/LMJ prototype amplifier mechanical design, SPIE, Vol. 3047, 148-157, 1997. ]。但它们的整体效率偏低,而且是固有的单发装置,每次打靶都需要数小时来消除热畸变,不能满足惯性聚变电站在技术和经济方面必需的要求。基于美国点火装置的物理和技术研发经验,目前的氙灯泵浦和块状大口径钷玻璃增益介质的放大器结构只能实现小时以上的发次周期,对 IFE 的高重复频率需求而言,放大器的高效热管理将成为最难以突破的物理极限。因此,研究新型高功率激光放大器材料组分和结构,以及高效泵浦源,实现激光链路中的有效热管理,是发展高重复率高功率激光技术的核心。

[0003] 为真正满足商业化激光惯性约束聚变技术,美国在 NIF 的基础上又进一步提出了具备高重复率 (10Hz) 的激光惯性聚变-裂变能源 (Laser Inertial Fusion-Fission Energy, 简称为 LIFE) 概念 [ 参见文献 2、John Caid, Nd:glass laser design for laser ICF fission energy (LIFE), Fusion Science and Technology, Vol. 56, 607-617, 2009. ]。相对 NIF, LIFE 总体方案中最大的改进是热管理,主要技术方案是采取高功率激光二极管 (Laser Diode, 简称为 LD) 阵列泵浦和将放大介质切片并通 He 气实现主动冷却,但大口径的增益介质的自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, 简称为 ASE) 放大较大,会降低热管理效率。该方案中只是提出了均匀掺杂组分材料下的薄片组合概念,没有涉及不同掺杂组分的组合。同时在 2009 年初,法国 HIPER (High Power Laser Energy Research) 装置方案研究中提出了在晶体中通过渐变式掺杂组分实现增益系数的最优化,在同等提取能量密度的条件下可大幅度降低增益介质的厚度,为控制放大自发辐射 (简称为 ASE) 吸收和热管理带来了很大优势 [ 参见文献 3、J. -C. Chanteloup, D. Albach, G. Bourdet, P. Hollander, and B. Vincent, Impact of variable doped gain medium on HIPER multiple kJ/ ~ 10Hz diode pumped beam lines design, WB6, ASSP 2009, OSA 2009. ]。该技术方案只是针对单块晶体材料提出的一种单程放大中实现 ASE 优化控制的思想方案,没有具体的材料实施途径。由于渐变式掺杂成分是在单块晶体中实现的,因此不可能根据放大链路的特点灵活组合掺杂组分。这种渐变式的掺杂组分在单块大口径钷玻璃材料中难以实现,因此还没有关于组合式掺杂组分的钷玻璃放大器结构报道。

## 发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题在于克服上述现有大口径钕玻璃高功率激光放大器中热管理技术的不足,提供一种渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器,以实现大口径钕玻璃放大器较高重复频率的高功率激光输出。

[0005] 本发明的基本思想是:

[0006] 以块状增益介质中小信号增益系数和储能密度对掺杂组分的依赖关系为物理基础,通过优化增益介质中渐变掺杂组分,在保证放大器高增益的前提下,减小大口径增益介质的自发辐射放大效应,提高热管理效率。所述的渐变掺杂组分的增益介质是通过不同掺杂组分的薄片的组合来实现的。本发明中提出的渐变掺杂组分薄片组合式增益介质结构在减小大口径钕玻璃放大器的自发辐射放大和提高热管理效果方面有很高的实用价值。

[0007] 本发明的技术解决方案如下:

[0008] 一种渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器,由泵浦源、放大增益介质两部分组成,其特点在于所述的放大增益介质是薄片组合式激光增益介质,该薄片组合式激光增益介质与激光通光的正交方向成布儒斯特角放置,所述的泵浦源由第一面阵激光二极管泵浦源和第二面阵激光二极管泵浦源分别置于所述的薄片组合式激光增益介质的上下两面进行泵浦。

[0009] 所述的薄片组合式激光增益介质是由多块钕离子掺杂浓度不同的而单块钕离子掺杂浓度分布均匀的大口径钕玻璃薄片按钕离子掺杂浓度递增、间隔分立地、与竖直面成布儒斯特角排列后利用第一支撑板和第二支撑板固定而构成,在所述的薄片组合式激光增益介质的两端面和所述的第一支撑板和第二支撑板之间分别是通光的第一密封窗口和第二密封窗口,所述的各块大口径钕玻璃薄片之间的间隔和大口径钕玻璃薄片与所述的第一密封窗口和第二密封窗口之间的间隔作为冷却气体通道,在所述的第一支撑板和第二支撑板上,相对于所述的冷却气体通道分别设有冷却气体的进气口和冷却气体的出气口。

[0010] 所述的钕玻璃是掺钕的磷酸盐激光玻璃。

[0011] 所述的大口径钕玻璃薄片的数量可以选择,若选定大口径钕玻璃薄片的数量为 5,该 5 块大口径钕玻璃薄片中的  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  含量的 wt% 依次为 2.64, 2.72, 2.83, 3.0, 3.22。

[0012] 惯性约束聚变高功率激光驱动器需要很高的输出能量,由于增益介质的物理极限决定了必须采用大的光束口径。当钕玻璃等增益介质的光束口径增大时,ASE 吸收效应成为增益介质中不可忽略的重要因素,特别是因 ASE 吸收产生的热效应将成为实现高重复率的技术瓶颈。增益长度积  $\beta L_0$  ( $\beta$  为介质小信号增益系数,  $L_0$  为片内单程的最长路径) 是高功率激光放大器设计中衡量 ASE 吸收效应的重要指标。当  $\beta L_0$  达到一定值时,将显著影响增益空间均匀性,最终降低放大器储能的提取效率。通常把  $\beta L_0 \leq 3.5$  作为放大器设计的经验极限值,但惯性约束聚变高功率激光装置中放大器的  $\beta L_0$  均已超过了这一极限值,例如 NIF 装置主放大器的  $\beta L_0$  约为 4.7。此时 ASE 效应对放大器性能的影响已非常严重,若提高该类放大器的重复率,必须考虑有效降低  $\beta L_0$  值。

[0013] 高功率放大器要求高增益能力和高储能效率,这就意味着会出现更加严重的 ASE 问题。由于激发截面属于玻璃材料的荧光光谱特性,对于特定型号的材料来说基本上是固定的。因此若基于特定的激光增益介质材料,为了实现高增益、高储能效率,低 ASE 效应,设

计中优化的重点是激光玻璃的掺杂浓度（泵浦吸收效率）。

[0014] 对于增益介质均匀掺杂情况，由于光信号在增益介质中传输的过程中不断被放大，进而反转粒子数不断被消耗，同时放大自发辐射也会消耗上能级粒子数，小信号增益系数将随传输距离的增加而减小。增益介质掺杂浓度越高，泵浦吸收效率越高，单片小信号增益越大。这也意味着要达到设计的增益水平，均匀掺杂时要选择较高的掺杂浓度。此时，初始小信号增益系数很高，较短的增益距离时，ASE 就达到较高值，这将大大降低激光介质的储能效率，影响增益均匀性。

[0015] 根据增益介质掺杂浓度与泵浦吸收效率的关系，即增益介质的掺杂浓度越高其泵浦吸收效率越高，若将掺杂浓度在介质中随传输距离逐渐增高，就可以补充增益介质中因不断放大的激光光束而不断消耗的反转粒子数。当沿光传输方向的激光不断被放大时，其消耗的反转粒子数越来越多，但因掺杂浓度的递增，其反转粒子数密度也在相应递增，从而使放大器小信号增益系数随增益距离变化缓慢，甚至保持恒定。因此，相比均匀掺杂放大介质，当提取能量密度相同时，渐变掺杂组分片状放大器所需的增益长度相对较小，增益长度积  $\beta L_0$  就会降低，这将有效降低 ASE 效应，提高增益介质的热管理效果。

[0016] 增益介质掺杂组分的优化需根据放大器类型变化。对于单程放大链路，因光信号只经过工作物质一次，小信号增益系数随传输距离增加而逐渐减小，所以增益介质的掺杂浓度应随传输距离递增。对于多程放大链路，光信号在工作物质中多次往返通过，因此增益介质的掺杂浓度应选择中间高边缘低对称式的掺杂浓度，目的是有效降低自发辐射放大，提高储能效率和热管理效果。

[0017] 在实际设计中，因钕玻璃制造工艺的限制，很难在同一块状材料中实现掺杂组分的渐变。故本方案选用薄片组合式的方案实现增益介质掺杂浓度的渐变，即根据所需能量提取效率，决定钕玻璃增益介质薄片的片数，将不同掺杂组分的薄片按照设计的组分掺杂浓度分立排列组合，从而实现渐变掺杂组分组合式增益介质结构。

[0018] 实验表明，本发明中提出的渐变掺杂组分薄片组合式增益介质结构在减小大口径钕玻璃放大器的自发辐射放大和提高热管理效果方面有很高的实用价值。

## 附图说明

[0019] 图 1 是增益介质渐变掺杂组分优化曲线示意图。

[0020] 图 2 是渐变掺杂组分组合式大口径钕玻璃片状激光放大器实施例的结构示意图。

[0021] 图 3 薄片组合式增益介质结构示意图。

## 具体实施方式

[0022] 下面结合实施例和附图对本发明的渐变掺杂组分的组合式大口径片状钕玻璃激光放大器作原理设计和具体实施说明，但不应以此限制本发明的保护范围。

[0023] 钕玻璃片内储能沿厚度方向的分布与片的厚度和掺杂浓度有关。由脉冲放大传输方程，厚度为  $d'$  的薄片的增益为

$$[0024] \quad E_o = E_s \ln \{ 1 + \exp [ g(z) d'' ] [ \exp ( E_i / E_s ) - 1 ] \} \exp ( - \alpha d'' )$$

[0025] 式中： $E_i$  和  $E_o$  分别为激光脉冲的输入和输出通量， $E_s$  是钕玻璃的饱和通量； $z$  是沿厚度方向的坐标； $g(z) = E_{st}(z) \sigma / h \nu$  是随空间位置变化的小信号增益系数， $E_{st}$  是储能密

度; $d'' = d' (1+n^{-2})^{1/2}$  是光线在呈布儒斯特角放置的钕玻璃片中传输的距离; $n$  为钕玻璃的折射率; $\sigma$  为钕玻璃片受激发射截面; $\alpha$  是钕玻璃的损耗系数。

[0026] 本实施例以单程放大链路为例,通过上述脉冲传输放大方程对增益介质中钕离子掺杂浓度进行优化。获得增益介质渐变掺杂组分优化曲线示意图如图 1。对于高功率激光器片状放大器,每台片状放大器的钕玻璃介质的厚度为  $D_1 = 4\text{cm}$ 。本实施例取钕玻璃薄片的片数  $N = 5$  进行组合计算,每片薄片的厚度  $d = 8\text{mm}$ 。选取单片掺杂浓度平均值作为薄片的掺杂浓度,薄片 6 至薄片 10 选取  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  含量依次为 2.64%, 2.72%, 2.83%, 3.0%, 3.22% (wt%)。

[0027] 图 2 是本发明渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器实施例的结构示意图,由图可见,本发明渐变掺杂组分组合式的大口径钕玻璃片状激光放大器,由泵浦源、放大增益介质两部分组成,所述的放大增益介质是薄片组合式激光增益介质 3,该薄片组合式激光增益介质 3 与激光通光的正交方向成布儒斯特角放置,所述的泵浦源由第一面阵激光二极管泵浦源 4 和第二面阵激光二极管泵浦源 5 分别置于所述的薄片组合式激光增益介质 3 的上下两面进行泵浦。

[0028] 图 3 是薄片组合式大口径片状钕玻璃激光增益介质 3 结构示意图。由图可见,本实施例中,所述的薄片组合式激光增益介质 3 是由五块钕离子掺杂浓度不同的而单块钕离子掺杂浓度分布均匀的大口径钕玻璃薄片 6、7、8、9、10 按钕离子掺杂浓度递增、间隔分立地、与竖直面成布儒斯特角排列后利用第一支撑板 13 和第二支撑板 14 固定而构成,在所述的薄片组合式激光增益介质 3 的两端面 and 所述的第一支撑板 13 和第二支撑板 14 之间分别是通光的第一密封窗口 11 和第二密封窗口 12,所述的各块大口径钕玻璃薄片之间,大口径钕玻璃薄片与所述的第一密封窗口 11 和第二密封窗口 12 之间的间隔作为冷却气体通道 27、28、29、20、31、32,在所述的第一支撑板 13 和第二支撑板 14 上,相对于所述的冷却气体通道 27、28、29、20、31、32 分别设有冷却气体的进气口 15、16、17、18、19、20 和冷却气体的出气口 21、22、23、34、25、26。

[0029] 所述的五块大口径钕玻璃薄片 6、7、8、9、10 中  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  含量的 wt% 依次为 2.64, 2.72, 2.83, 3.0, 3.22, 是根据图 1 优化结果选取的。

[0030] 本发明中所述的钕玻璃,可以有多种选择,本实施例选取的是掺钕的磷酸盐激光玻璃。

[0031] 入射光 1 和出射光 2 如图中所示。薄片组合式增益介质 3 沿通光口径正交方向按布儒斯特角放置。采用 872nm 波长的激光二极管阵列直接泵浦  $\text{Nd}^{3+}$  的  ${}^4\text{F}_{3/2}$  激光能级。放大器的上下两面的第一面阵激光二极管泵浦源 4 和第二面阵激光二极管泵浦源 5 的总功率均为 6MW。

[0032] 根据薄片 6-薄片 10 的掺杂组分,采用矩形的 N31 磷酸盐钕玻璃作为放大器的增益介质,分别制备所需均匀掺杂组分的 5 块块状放大介质,其中每块块状钕玻璃介质的尺寸为  $32\text{cm} \times 59\text{cm} \times 4\text{cm}$  ( $H \times L \times D_1$ ,  $H = 32\text{cm}$ ;  $L = 59\text{cm}$ ;  $D_1 = 4\text{cm}$ )。在片状放大介质上沿厚度方向切割下尺寸为  $H \times L \times d$  的薄片放大介质。五种掺杂组分(薄片 6、薄片 7、薄片 8、薄片 9、薄片 10)均按上述方法切割。片状放大器组件两端面安装第一密封窗口 11、第二密封窗口 12 密封,保护造价昂贵的钕玻璃片,同时也保证了片腔的洁净度。在高功率激光系统的运行过程中,放大器工作一发后由于泵浦源辐照而引起的放大器热效应问题会引起整个

系统的光束波前畸变,从而严重影响装置的运行周期。因此需要在放大器中充入高速流动的氮气进行冷却,加速热波前的恢复速度,提高放大器的重复频率。每两片放大介质间隔为  $\Delta d = 5\text{mm}$ ,光泵过程中,氮气通过进气口 15- 进气口 20 进入片腔,在冷却气体通道 27- 冷却气体通道 32 内高速流动,进行主动冷却,最后经由出气口 21- 出气口 26 排出。

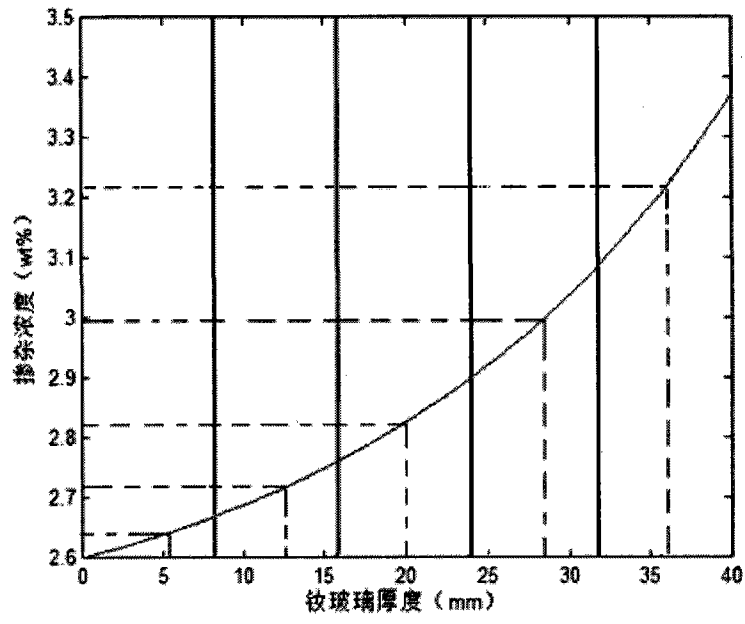


图 1

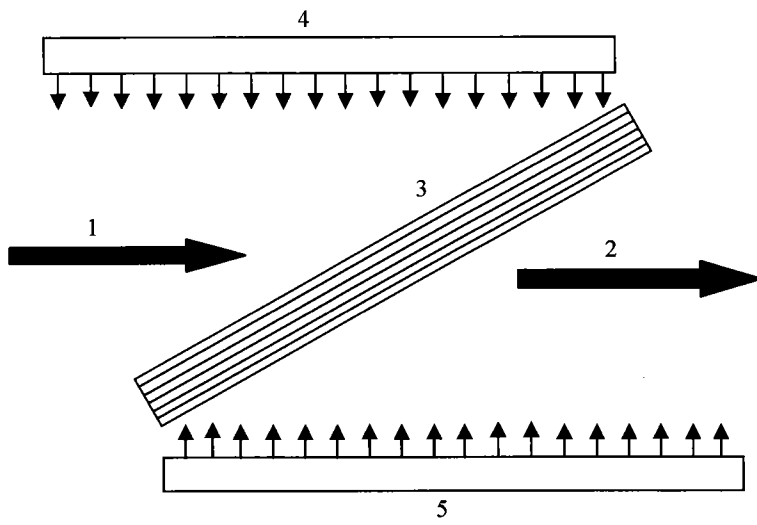


图 2



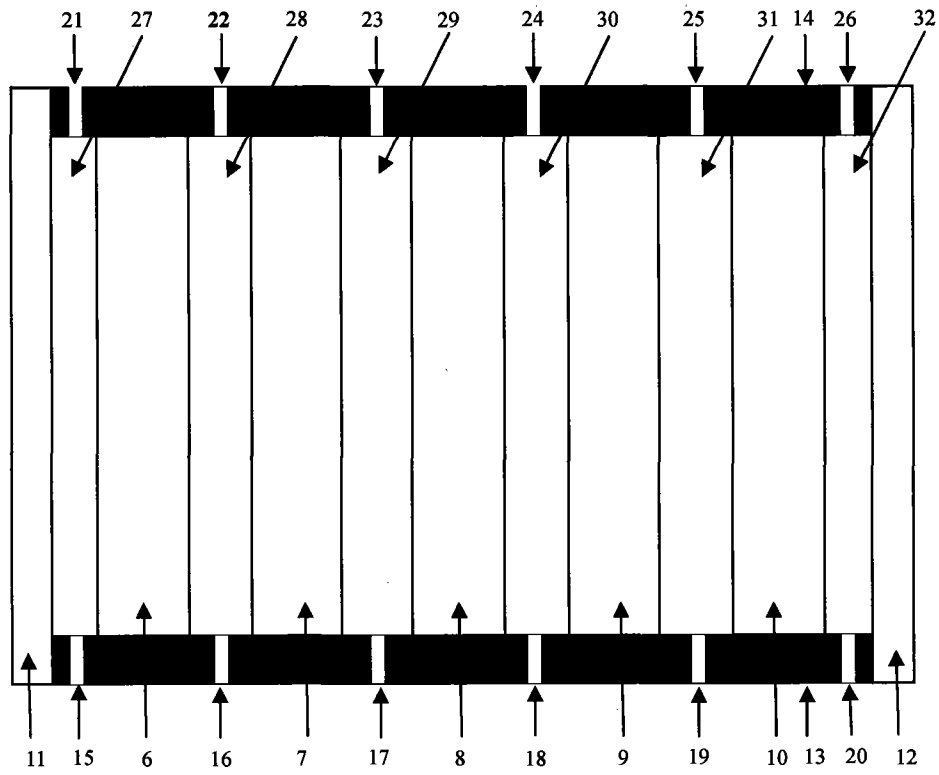


图 3