

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 11 月 15 日 (15.11.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/205441 A1

(51) 国际专利分类号:
H01S 3/00 (2006.01) **G02F 1/39** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2017/097583

(22) 国际申请日: 2017 年 8 月 16 日 (16.08.2017)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201710316366.3 2017年5月8日 (08.05.2017) CN

(71) 申请人: 深圳大学(SHENZHEN UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国广东省深圳市南山区南海大道
3688号, Guangdong 518060 (CN)。

(72) 发明人: 钟亥哲(ZHONG, Haizhe); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号, Guangdong 518060 (CN)。 李瑛(LI, Ying); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号, Guangdong 518060 (CN)。 梁宇海(LIANG, Yuhai); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号, Guangdong 518060 (CN)。 杨建龙(YANG, Jianlong); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号, Guangdong 518060 (CN)。 王世伟(WANG, Shiwei); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号, Guangdong 518060 (CN)。 范滇元(FAN, Dianyuan); 中国广东省深圳市南山区南海大道3688号, Guangdong 518060 (CN)。

(74) 代理人: 深圳市恒申知识产权事务所(普通合伙)(HENSEN INTELLECTUAL PROPERTY

(54) Title: BROADBAND OPTICAL PARAMETRIC CHIRPED-PULSE AMPLIFIER

(54) 发明名称: 一种宽带光参量啁啾脉冲放大器

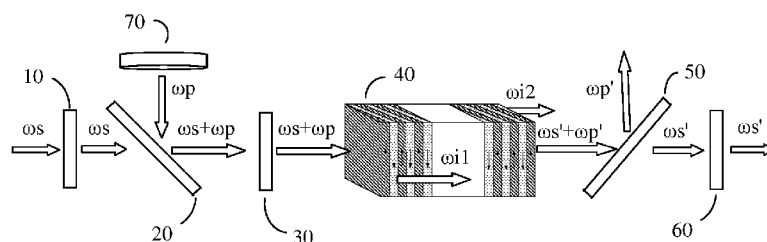


图 1

(57) Abstract: A broadband optical parametric chirped-pulse amplifier applicable to the technical field of lasers. The amplifier comprises a narrow-band picosecond laser (70), a pulse laser stretcher (10), an optical coupling mirror (20), a beam expansion/contraction system (30), a periodically poled crystal (40), a spectroscopically separated output (50), and a pulse laser compressor (60), wherein the periodically poled crystal (40), which has a periodical domain inversion structure, is used for separating generated idler light from a chirped-pulse laser/pump light so as to suppress energy backflow after the broadband optical parametric chirped-pulse amplifier enters the stage of saturated amplification; and thus, the broad optical parametric chirped-pulse amplification of a broadband is realized. The broadband optical parametric chirped-pulse amplifier not only suppresses the backflow of signal light energy, but also has a very broad gain bandwidth as a result of the simultaneous optimization between pulse energy (conversion efficiency) and pulse width (gain bandwidth), such that the outputtable peak power of the broadband optical parametric chirped-pulse amplifier is greatly increased, and the performance of the optical parametric chirped-pulse amplifier is improved.

(57) 摘要: 一种适用于激光技术领域的宽带光参量啁啾脉冲放大器, 其包括窄带皮秒激光器(70)、脉冲激光展宽器(10)、光学耦合镜(20)、扩/缩束系统(30)、周期性极化晶体(40)、分光镜(50)以及脉冲激光压缩机(60)。其中, 具有周期性畴反转结构的周期性极化晶体(40)用于将生成的闲频光、与啁啾脉冲激光/泵浦光进行分离, 从而抑制宽带光参量啁啾脉冲放大器进入饱和放大后的能量回流; 及实现宽带宽的光参量啁啾脉冲放大。宽带光参量啁啾脉冲放大器不但能抑制信号光能量的回流, 还有极宽的增益带宽, 得益于脉冲能量(转换效率)与脉冲宽度(增益带宽)的同步优化, 大大提升了宽带光参量啁啾脉冲放大器的可输出最高峰值功率, 提高了光参量啁啾脉冲放大器的性能。

FIRM); 中国广东省深圳市福田区南园路68号
上步大厦10H, Guangdong 518000 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

一种宽带光参量啁啾脉冲放大器

技术领域

- [1] 本发明属于激光技术领域，尤其涉及一种宽带光参量啁啾脉冲放大器。

背景技术

- [2] 光参量啁啾脉冲放大（Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification, OPCPA）是提升超短脉冲激光能量的常用技术。OPCPA的基本原理是将低能量的飞秒超短脉冲激光展宽成皮秒或纳秒的啁啾脉冲（展宽后脉宽与泵浦光相当），再以窄带的高能量脉冲激光为泵浦光，对超短脉冲激光进行光参量放大，最后在输出端以光栅压缩器将放大后的啁啾脉冲信号重新压缩至飞秒量级。然而所有参量过程都会受制于能量的回流，回流是指当泵浦光强烈衰减，参量过程进入饱和放大的时候，能量会由啁啾脉冲激光和闲频光重新流向泵浦光。为了避免回流的发生，目前通常是借助各种优化设计，在倒流发生之前尽量实现较高的能量转换，使用复杂的空时脉冲整形技术，使啁啾脉冲激光、泵浦光的能量分布更为均匀，可以实现最高~65%的能量转换效率。此外，利用非线性材料自身对特定激光波长的吸收，使闲频光恰好能够被晶体持续吸收，可以有效抑制啁啾脉冲激光能量的回流。
- [3] 但是，利用时空整形技术使不同时空区域的啁啾脉冲激光同步光参量放大，虽然可以在回流出现前得到足够的转换效率，但这种方法的实施难度较大，更重要的是对泵浦光，甚至啁啾脉冲激光的时空波形都有很大限制；而利用非线性材料自身对特定激光波长的吸收，抑制啁啾脉冲激光能量回流的技术方案并不适用于易吸收的激光波长（例如3-5 μm 的中红外激光），而且，吸收带来的热效应还会对光参量啁啾脉冲放大器造成影响。
- [4] 此外，相位匹配带宽是光参量啁啾脉冲放大器增益带宽的决定因素之一。相位匹配带宽是指：对宽光谱的飞秒激光而言，通常只有其中心波长能够满足相位匹配（ $\Delta k = 0$ ），其余偏离中心波长的光谱成分均存在不同程度的相位失配（ $\Delta k \neq 0$ ），随着 $|\Delta k|$ 的增加，光参量放大的转换效率迅速降低，一般将特定 $|\Delta k|$ 范围

内的超短脉冲激光的光谱带宽称为相位匹配带宽。超短脉冲激光的脉宽越短，所包含的光谱就越宽，对光参量啁啾脉冲放大器相位匹配带宽的要求也越高。可输出最高峰值功率是评价光参量啁啾脉冲放大器性能的最为重要的参数之一，脉冲激光的峰值功率由脉冲能量与脉冲宽度共同决定。在一定的泵浦光能量以及超短脉冲激光注入条件下，泵浦光能量的转换效率决定了超短脉冲激光的输出能量，而光参量放大的增益匹配带宽则是衡量其可输出最短脉冲激光的关键指标。

- [5] 因此，由于受到能量回流以及增益带宽窄化的限制，现有的光参量啁啾脉冲放大器的可输出最高峰值功率受到极大影响，进而降低了光参量啁啾脉冲放大器的性能。

对发明的公开

技术问题

- [6] 本发明提供了一种宽带光参量啁啾脉冲放大器，旨在同时解决现有光参量啁啾脉冲放大器中的能量回流问题以及增益带宽窄化问题，实现转换效率与增益带宽的同步优化，提高光参量啁啾脉冲放大器的性能。

问题的解决方案

技术解决方案

- [7] 为解决上述技术问题，本发明提供了一种宽带光参量啁啾脉冲放大器，该宽带光参量啁啾脉冲放大器包括：
- [8] 脉冲激光展宽器，用于对入射的超短脉冲激光进行啁啾展宽，以使得到的啁啾脉冲激光的脉宽与入射的泵浦光的脉宽相同，所述啁啾脉冲激光进入光学耦合镜；
- [9] 所述光学耦合镜，用于使所述啁啾脉冲激光与所述入射的泵浦光空间耦合，并一同进入周期性极化晶体；
- [10] 所述周期性极化晶体，用于基于入射的泵浦光对啁啾脉冲激光进行放大，同时生成闲频光；及，将所述闲频光、与所述啁啾脉冲激光和所述泵浦光进行分离，以抑制所述宽带光参量啁啾脉冲放大器进入饱和放大后的能量回流；及，在抑制能量回流的同时，实现对所述啁啾脉冲激光的宽带宽的光参量放大；放大

的啁啾脉冲激光与残余的泵浦光一同进入分光镜；

[11] 所述分光镜，用于对放大的啁啾脉冲激光与残余的泵浦光进行分离，以确保仅有放大的啁啾脉冲激光进入脉冲激光压缩器；

[12] 所述脉冲激光压缩器，用于压缩所述放大的啁啾脉冲激光的脉冲宽度，得到高峰值功率的超短脉冲激光。

[13] 进一步地，所述宽带光参量啁啾脉冲放大器还包括扩/缩束系统；

[14] 所述扩/缩束系统，置于所述光学耦合镜与所述周期性极化晶体之间，用于改变所述光学耦合镜出射的所述啁啾脉冲激光与所述泵浦光的光斑口径；经光斑口径调整的所述啁啾脉冲激光与所述泵浦光一同进入所述周期性极化晶体。

[15] 进一步地，通过调整所述扩/缩束系统的扩/缩束倍数，改变所述啁啾脉冲激光与所述泵浦光的光斑口径，以实现所述宽带光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽的动态调控。

[16] 进一步地，所述周期性极化晶体包括依次相连的第一非线性区域、线性区域及第二非线性区域；其中，所述第一非线性区域与所述第二非线性区域均具有周期性畴反转结构；

[17] 所述第一非线性区域的周期性畴反转方向与所述啁啾脉冲激光传输方向的夹角为 β ，所述第二非线性区域的周期性畴反转方向与所述啁啾脉冲激光传输方向的夹角为 $-\beta$ ，以使所述第一非线性区域的畴结构与所述第二非线性区域的畴结构沿所述啁啾脉冲激光传输方向呈轴对称；

[18] 所述第一非线性区域用于使生成的第一闲频光从所述啁啾脉冲激光和泵浦光的一侧走离，第二非线性区域用于使生成的第二闲频光从所述啁啾脉冲激光和泵浦光的另一侧走离。

[19] 进一步地，夹角 α 表示所述闲频光与所述啁啾脉冲激光和泵浦光传输方向之间的夹角；

[20] 所述夹角 α 等于满足宽带相位匹配所需的群速度匹配角 Ω ，以实现所述啁啾脉冲激光的宽带宽的光参量放大；其中， $\Omega = \arccos(v_{\text{signal}}/v_{\text{idler}})$ ， v_{signal} 表示所述啁啾脉冲激光在所述周期性极化晶体中的群速度， v_{idler} 表示所述闲频光在所述周期性极化晶体中的群速度， $v_{\text{signal}} = v_{\text{idler}} * \cos(\alpha)$ 。

- [21] 进一步地，所述周期性极化晶体的周期性畴反转结构具有使 k_p 、 k_s 、 k_i 和 k_g 四路波矢构成波矢四边形的能力，其中，所述 k_s 表示所述啁啾脉冲激光的波矢、所述 k_p 表示所述泵浦光的波矢、所述 k_i 表示所述闲频光的波矢，所述 k_g 表示所述周期性极化晶体的倒格矢，所述 k_s 与所述 k_p 共线。
- [22] 进一步地，所述周期性极化晶体的极化周期 Λ 与所述夹角 β ，基于夹角 α 、夹角 β 、和 k_g 之间的映射关系以及所述夹角 α 进行设定，以使所述周期性极化晶体满足相位匹配；其中， $\Lambda=2\pi/k_g$ ，所述夹角 α 表示所述闲频光，与所述啁啾脉冲激光和泵浦光传输方向之间的夹角。
- [23] 进一步地，所述宽带光参量啁啾脉冲放大器还包括窄带皮秒激光器；
- [24] 所述窄带皮秒激光器，用于输出泵浦光；
- [25] 所述窄带皮秒激光器输出的泵浦光与所述展宽后得到的啁啾脉冲激光时间同步。
- [26] 进一步地，所述泵浦光与所述啁啾脉冲激光以共线正入射的方式，进入所述周期性极化晶体。

发明的有益效果

有益效果

- [27] 本发明与现有技术相比，有益效果在于：
- [28] 本发明提供了一种宽带光参量啁啾脉冲放大器，该宽带光参量啁啾脉冲放大器包括窄带皮秒激光器、脉冲激光展宽器、光学耦合镜、扩/缩束系统、周期性极化晶体、分光镜以及脉冲激光压缩器。其中，具有周期性畴反转结构的周期性极化晶体用于基于入射的泵浦光对啁啾脉冲激光进行宽带宽的光参量放大，同时生成闲频光；并将所述闲频光、与所述啁啾脉冲激光和所述泵浦光进行分离，从而抑制所述宽带光参量啁啾脉冲放大器进入饱和放大后的能量回流；在抑制能量回流的基础上，该周期性极化晶体还支持宽带宽的相位匹配。由于该宽带光参量啁啾脉冲放大器不但抑制了信号光能量的回流，还具有极宽的增益带宽，得益于脉冲能量（转换效率）与脉冲宽度（增益带宽）的同步优化，大大提升了该宽带光参量啁啾脉冲放大器的可输出最高峰值功率，提高了光参量啁啾脉冲放大器的性能。同时，通过调整扩/缩束系统的扩/缩束倍数，从而调整啁

啁啾脉冲激光与泵浦光于周期性极化晶体内的光斑口径，还可以简便地调控光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽，啁啾脉冲激光与泵浦光的光斑口径越小，其增益带宽越宽。通过周期性极化晶体以及扩/缩束系统对增益带宽的双重优化，使得该宽带光参量啁啾脉冲放大器具有更高的可输出最高峰值功率。

对附图的简要说明

附图说明

- [29] 图1是本发明实施例提供的宽带光参量啁啾脉冲放大器示意图；
- [30] 图2是本发明实施例提供的周期性极化晶体示意图；
- [31] 图3是本发明实施例提供的周期性极化晶体俯视图；
- [32] 图4是本发明实施例提供的光参量啁啾脉冲放大器不同信号光/泵浦光光斑直径条件下的增益带宽示意图；
- [33] 图5是本发明实施例提供的经光参量啁啾脉冲放大器放大后的800nm信号光的“空间-光谱”示意图。

实施该发明的最佳实施例

本发明的最佳实施方式

[34]

发明实施例

本发明的实施方式

- [35] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。
- [36] 作为本发明的第一个实施例，如图1所示，本发明提供了一种宽带光参量啁啾脉冲放大器，该宽带光参量啁啾脉冲放大器包括脉冲激光展宽器10、光学耦合镜20、具有周期性畴反转结构的周期性极化晶体40、分光镜50以及脉冲激光压缩器60。
- [37] 脉冲激光展宽器10，用于对入射的超短脉冲激光进行啁啾展宽（一般将展宽后的超短脉冲激光称为啁啾脉冲激光），以使啁啾脉冲激光的脉宽与入射的泵

浦光的脉宽相同，该啁啾脉冲激光 进入 光学耦合镜 20。

[38] 光学耦合镜 20，用于使上述 啁啾脉冲激光 与入射的泵浦光空间耦合，并一同进入 周期性极化晶体 40。

[39] 周期性极化晶体 40，用于基于入射的泵浦光对入射的 啁啾脉冲激光 进行放大，同时生成闲频光；及，将闲频光、与 啁啾脉冲激光 和泵浦光进行分离，以抑制该宽带光参量啁啾脉冲放大器进入饱和放大后的能量回流；及，在抑制能量回流的同时，实现对该 啁啾脉冲激光 的宽带宽的光参量放大；放大的 啁啾脉冲激光 与残余的泵浦光一同进入分光镜 50。

[40] 分光镜 50，用于对经周期性极化晶体 40 出射的放大的 啁啾脉冲激光 与残余的泵浦光进行分离，以确保仅有 放大的 啁啾脉冲激光 进入 脉冲激光压缩器 60。

[41] 脉冲激光压缩器 60，用于压缩放大的 啁啾脉冲激光 的脉冲宽度，将其重新压缩至原来的经过脉冲激光展宽器 10 展宽之前的脉冲宽度，得到高峰值功率的超短脉冲激光。

[42] 综上所述，本发明第一个实施例所提供的宽带光参量啁啾脉冲放大器，其包含的周期性极化晶体 40 具有周期性畴反转结构，该周期性畴反转结构使得周期性极化晶体 40 能够抑制能量的回流，还有极宽的相位匹配带宽。因此，该光参量啁啾脉冲放大器不但抑制了能量的回流；在抑制能量回流的基础上，还有极宽的增益带宽，得益于脉冲能量（转换效率）与脉冲宽度（增益带宽）的同步优化，大大提升了该宽带光参量啁啾脉冲放大器的可输出最高峰值功率，提高了光参量啁啾脉冲放大器的性能。

[43] 作为本发明的第二个实施例，如图 1 所示，本发明提供了一种宽带光参量啁啾脉冲放大器，该宽带光参量啁啾脉冲放大器包括窄带皮秒激光器 70、脉冲激光展宽器 10、光学耦合镜 20、扩/缩束系统 30、具有周期性畴反转结构的周期性极化晶体 40、分光镜 50 以及脉冲激光压缩器 60。

[44] 窄带皮秒激光器 70，用于输出泵浦光 ω_p 至光学耦合镜 20。

[45] 脉冲激光展宽器 10，用于对入射的超短脉冲激光 ω_s 进行啁啾展宽，以使展宽后的超短脉冲激光（一般将展宽后的超短脉冲激光称为啁啾脉冲激光） ω_s 的

脉宽与入射的泵浦光 ω_p 的脉宽相同，该 啁啾脉冲激光 ω_s 进入光学耦合镜 20。需要说明的是，窄带皮秒激光器 70 输出的泵浦光 ω_p 与经脉冲激光展宽器 10 展宽后得到的 啁啾脉冲激光 ω_s 时间同步。

[46] 光学耦合镜 20，用于使 啁啾脉冲激光 ω_s 与入射的泵浦光 ω_p 空间耦合，并一同进入周期性极化晶体 40。需要说明的是，光学耦合镜 20 出射的泵浦光 ω_p 和 啁啾脉冲激光 ω_s 以共线正入射的方式，进入扩 / 缩束系统 30。

[47] 扩 / 缩束系统 30，其置于光学耦合镜 20 和周期性极化晶体 40 之间，用于改变从光学耦合镜 20 出射的 啁啾脉冲激光 ω_s 与泵浦光 ω_p 的光斑口径，经光斑口径调整的 啁啾脉冲激光 ω_s 与泵浦光 ω_p 一同进入周期性极化晶体 40。通过调整扩 / 缩束系统 30 的扩 / 缩束倍数，可以改变 啁啾脉冲激光 ω_s 与泵浦光 ω_p 的光斑口径，从而调整 啁啾脉冲激光 ω_s 与泵浦光 ω_p 于周期性极化晶体 40 内的光斑口径，以实现对所述宽带光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽的动态调控。在其余条件不变的前提下，啁啾脉冲激光 ω_s 与泵浦光 ω_p 的光斑口径越小，所述光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽越宽。因为啁啾脉冲激光 ω_s 与泵浦光 ω_p 的光斑口径越小，相应的，周期性极化晶体 40 内闲频光 ω_i ，与 啁啾脉冲激光 ω_s 和泵浦光 ω_p 的空间走离的速度越快，闲频光 ω_i 对 啁啾脉冲激光 ω_s 和泵浦光 ω_p 的影响越小，该宽带光参量啁啾脉冲放大器对相位失配越不敏感，其增益带宽也就越宽。通过调整 啁啾脉冲激光 ω_s 与泵浦光 ω_p 于所述周期性极化晶体内的光斑口径，可实现对所述宽带光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽的动态调控。在本实施例中，仅设置了一套扩 / 缩束系统 30，用于等比例的改变啁啾脉冲激光 ω_s 与泵浦光 ω_p 的光斑口径大小。

[48] 周期性极化晶体 40，用于基于入射的泵浦光 ω_p 对入射的啁啾脉冲激光 ω_s 进行放大，同时生成闲频光 ω_i ；及，将闲频光 ω_i 、与啁啾脉冲激光 ω_s 和泵浦光 ω_p 进行分离，以抑制该宽带光参量啁啾脉冲放大器进入饱和放大后的能量回流；及，在抑制能量回流的同时，实现对该啁啾脉冲激光 ω_s 的宽带宽的光参量放大。放大的 啁啾脉冲激光 ω_s' 与残余的泵浦光 ω_p' 一同进入分光镜。

[49] 如图 2 所示，该周期性极化晶体 40 包括依次相连的第一非线性区域、线性区域及第二非线性区域；其中，第一非线性区域与第二非线性区域均具有周期性

畴反转结构。第一非线性区域的周期性畴反转方向与啁啾脉冲激光传输方向的夹角为 β ，第二非线性区域的周期性畴反转方向与啁啾脉冲激光传输方向的夹角为 $-\beta$ ，以使第一非线性区域的畴结构与第二非线性区域的畴结构沿该啁啾脉冲激光传输方向呈轴对称。如图 3 所示，第一非线性区域用于使生成的第一闲频光 ω_{i1} 从啁啾脉冲激光和泵浦光的一侧走离，第二非线性区域用于使生成的第二闲频光 ω_{i2} 从啁啾脉冲激光和泵浦光的另一侧走离。线性区域没有周期性畴反转结构，仅用于分离闲频光；线性区域的长度需大于非共线传输的闲频光，与啁啾脉冲激光和泵浦光完全分离所需传输长度，确保仅有啁啾脉冲激光和泵浦光进入第二非线性区域。夹角 α 表示闲频光，与啁啾脉冲激光和泵浦光传输方向之间的夹角，即 k_i 与 k_s/k_p 之间的夹角。由于第一非线性区域的周期性畴反转结构，第一闲频光 ω_{i1} 会以偏离啁啾脉冲激光 / 泵浦光 α 角的方向传输；由于第二非线性区域的周期性畴反转结构，第二闲频光 ω_{i2} 会以偏离啁啾脉冲激光 / 泵浦光 $-\alpha$ 角的方向传输。

[50] 周期性极化晶体 40 的周期性畴反转结构具有使 k_p 、 k_s 、 k_i 和 k_g 四路波矢构成波矢四边形的能力，其目的是为了满足不同相位匹配的要求。其中， k_s 表示所述啁啾脉冲激光的波矢、 k_p 表示所述泵浦光的波矢、 k_i 表示所述闲频光的波矢， k_g 表示所述周期性极化晶体的倒格矢， k_s 与 k_p 共线。且夹角 α 、夹角 β 、和 k_g 之间一一对应，存在一定的映射关系，周期性极化晶体 40 的极化周期 Λ 或所述夹角 β ，基于夹角 α 、夹角 β 、和 k_g 之间的映射关系以及夹角 α 进行设定，以使周期性极化晶体 40 实现相位匹配，其中， $\Lambda=2\pi/k_g$ 。

[51] 本实施例所提供的夹角 α 等于满足宽带相位匹配所需的群速度匹配角 Ω ，即 $\alpha=\Omega=\arccos(v_{\text{signal}}/v_{\text{idler}})$ ，此时该周期性极化晶体 40 能够实现对啁啾脉冲激光的宽带宽的光参量放大。其中， $\Omega=\arccos(v_{\text{signal}}/v_{\text{idler}})$ ， v_{signal} 表示啁啾脉冲激光在周期性极化晶体 40 中的群速度， v_{idler} 表示闲频光在周期性极化晶体 40 中的群速度， $v_{\text{signal}}=v_{\text{idler}}*\cos(\alpha)$ 。

[52] 需要说明的是，周期性极化晶体 40 的畴反转结构既满足相位匹配的要求，还能够使产生的闲频光从啁啾脉冲激光和泵浦光持续走离，从而达到抑制能量回流的目的，提高了能量的转换效率；在抑制能量回流的基础上，将夹角 α 设置

成群速度匹配角 Ω ，从而实现了宽带宽的相位匹配，提高了该宽带光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽，同时解决了现有技术中的能量回流问题以及增益带宽窄化问题，实现转换效率与增益带宽的同步优化，大大提升了该宽带光参量啁啾脉冲放大器的可输出最高峰值功率，提高了该光参量啁啾脉冲放大器的性能。

- [53] 分光镜 50，用于对经周期性极化晶体 40 出射的放大的啁啾脉冲激光 ω_s' 与残余的泵浦光 ω_p' 进行分离，以确保仅有的放大的啁啾脉冲激光 ω_s' 入射至脉冲激光压缩器 60。
- [54] 脉冲激光压缩器 60，用于压缩放大的啁啾脉冲激光 ω_s' 的脉冲宽度，将其重新压缩至原来的经过脉冲激光展宽器 10 展宽之前的脉冲宽度，得到高功率的超短脉冲激光。
- [55] 综上所述，本发明第二个实施例所提供的宽带光参量啁啾脉冲放大器，同时解决了现有技术中的能量回流问题以及增益带宽窄化问题，实现转换效率与增益带宽的同步优化，通过对脉冲能量（转换效率）与脉冲宽度（增益带宽）这两个决定超短脉冲激光峰值功率的关键参数的优化，显著提升了该宽带光参量啁啾脉冲放大器的可输出最高峰值功率，提高了该光参量啁啾脉冲的性能。同时，通过调整扩/缩束系统的扩/缩束倍数，还可以简便地调控光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽，啁啾脉冲激光 ω_s 与泵浦光 ω_p 的光斑口径越小，其增益带宽越宽。通过周期性极化晶体以及扩/缩束系统对增益带宽的双重优化，使得该宽带光参量啁啾脉冲放大器具有更高的可输出最高峰值功率。
- [56] 作为本发明的第三个实施例，提供了一种宽带光参量啁啾脉冲放大器，其由窄带皮秒激光器，脉冲激光展宽器，光学耦合镜，扩/缩束系统，周期性极化晶体，分光镜以及脉冲激光压缩器构成。
- [57] 信号光为 800nm 的钛宝石脉冲激光。脉冲激光展宽器为 Öffner 型光栅展宽器，脉冲激光压缩器为 Treacy 型光栅压缩器。800nm 的钛宝石脉冲激光经 Öffner 型光栅展宽器展宽，其啁啾展宽后的脉冲宽度与泵浦光相当。窄带皮秒激光器为 532nm 皮秒脉冲激光器，其输出的 532nm 脉冲激光，与待放大的 800nm 的啁啾脉冲激光时间同步，经过光学耦合镜，与 800nm 的啁啾脉冲激光一同依次经

过扩 / 缩束系统和周期性极化晶体，以波长为 532nm 的皮秒脉冲激光为泵浦光，对 800nm 的啁啾脉冲激光进行放大。扩 / 缩束系统可以等比例的改变信号光与泵浦光于周期性极化晶体的光斑口径，以此实现光参量啁啾脉冲放大器增益带宽的动态调控。再由分光镜，将残余的泵浦光从放大后的信号光中分离。放大后的信号光经 Treacy 型光栅压缩器压缩，最终得到高峰值功率的超短脉冲激光。

[58] 其中，周期性极化晶体为如图 2 所示的具有周期性畴反转结构的周期性极化晶体，可以实现宽带宽的相位匹配以及抑制能量的回流。闲频光与啁啾脉冲激光 / 泵浦光传输方向之间的夹角 α 等于群速度匹配角 Ω ， $\Omega = \arccos(v_{\text{signal}}/v_{\text{idler}})$ ，其中， v_{signal} 、 v_{idler} 分别表示啁啾脉冲激光与闲频光在周期性极化晶体中的群速度，即闲频光于啁啾脉冲激光传输方向上的群速度分量与信号光的群速度相等， $v_{\text{signal}} = v_{\text{idler}} * \cos(\alpha)$ 。再由夹角 α ，夹角 β ，以及极化周期 Λ 之间的映射关系确定该周期性极化晶体的极化周期 Λ 与夹角 β 。

[59] 在本实施例中，夹角 α 等于 15.4 度；首先由 α 确定 β 跟 Λ ；然后在 β 和 Λ 确定的周期性极化晶体中，闲频光自然会偏离啁啾脉冲激光与泵浦光 α 角度走离。周期性极化晶体为满足 0 类准位相匹配的 5%MgO 掺杂周期性极化铌酸锂晶体（MgO:PPLN）。工作温度设定在 24.5 摄氏度。如图 3 所示，在 800nm 信号光，532nm 泵浦光以及对应的 1588nm 闲频光条件下，闲频光与信号光 / 泵浦光传输方向之间的夹角 α 应等于 15.4 度。对应的，为了满足 0 类准相位匹配，周期性极化晶体的极化周期，即畴长 Λ 为 2.5 μm ，其周期性畴反转的方向与激光传输方向之间的夹角 β 为 63 度。

[60] 假定 800nm 的啁啾脉冲激光与 532nm 的泵浦光的光斑直径相同，5%MgO:PPLN 晶体的非线性区域的总长度为 20mm，其中第一非线性区域与第二非线性区域各 10mm。如图 4 所示，图中给出了本发明所提供的宽带光参量啁啾脉冲放大器不同信号光 / 泵浦光光斑直径条件下的增益带宽。图中还同时给出了基于共线相位匹配的常规光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽。由图中可见，相比于共线相位匹配，本发明可显著提升光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽。而且，利用扩 / 缩束系统可简便的等比例改变信号光与泵浦光于周期性极化晶

体的光斑口径，以此实现光参量啁啾脉冲放大器增益带宽的动态调控。一般的，光斑口径越小，光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽越宽。以 1.1mm 的光斑直径（ $1/e^2$ 高全宽）为例，其对应的增益带宽超过 100 nm，这样的增益带宽可支持脉冲宽度大于等于 20fs 的超短脉冲激光的有效放大。

[61] 基于全维度（时间 - 空间）的仿真实验，如图 5 所示，图中给出了本发明所提供的光参量啁啾脉冲放大器的放大后的 800nm 信号光的 '空间 - 光谱' 图。图中给出了 800nm 信号光不同半径区域的激光光谱。具体的，800nm 信号光的初始脉冲为 70fs（ $1/e^2$ 高全宽），经 Öffner 型光栅展宽器，将其脉冲啁啾展宽至 70ps，对应的，532nm 泵浦光的脉冲宽度为 100ps。800nm 信号光与 532nm 泵浦光的光斑直径均为 1.1mm。5%MgO:PPLN 晶体中的泵浦光强为 $75\text{MW}/\text{cm}^2$ ，信号光光强为泵浦光光强的 1‰。作为子图，图中还一同给出了入射的 800nm 信号光的 '空间 - 光谱' 图。由图中可见，放大后的 800nm 信号光基本保留了初始的光谱信息，没有出现因为增益带宽不足导致的光谱的窄化。与此同时，其对应的量子转换效率超过 70%。得益于脉冲能量（转换效率）与脉冲宽度（增益带宽）的同步优化，在相同的工作条件下，本实施例所提供的光参量啁啾脉冲放大器的可输出最高峰值功率是基于共线相位匹配的常规光参量啁啾脉冲放大器的 5-10 倍。

[62] 综上所述，本发明第三个实施例所提供的宽带光参量啁啾脉冲放大器，从仿真数据可以表明，其同时解决了现有技术中的能量回流问题以及增益带宽窄化问题，实现了转换效率与增益带宽的同步优化，通过对脉冲能量（转换效率）与脉冲宽度（增益带宽）这两个决定超短脉冲激光峰值功率的关键参数的优化，显著提升了该宽带光参量啁啾脉冲放大器的可输出最高峰值功率，提高了该光参量啁啾脉冲的性能。

[63] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权利要求书

- [权利要求 1] 一种宽带光参量啁啾脉冲放大器，其特征在于，所述宽带光参量啁啾脉冲放大器包括：
- 脉冲激光展宽器，用于对入射的超短脉冲激光进行啁啾展宽，以使得到的啁啾脉冲激光的脉宽与入射的泵浦光的脉宽相同，所述啁啾脉冲激光进入光学耦合镜；
- 所述光学耦合镜，用于使所述啁啾脉冲激光与所述入射的泵浦光空间耦合，并一同进入周期性极化晶体；
- 所述周期性极化晶体，用于基于入射的泵浦光对啁啾脉冲激光进行放大，同时生成闲频光；及，将所述闲频光、与所述啁啾脉冲激光和所述泵浦光进行分离，以抑制所述宽带光参量啁啾脉冲放大器进入饱和放大后的能量回流；及，在抑制能量回流的同时，实现对所述啁啾脉冲激光的宽带宽的光参量放大；放大的啁啾脉冲激光与残余的泵浦光一同进入分光镜；
- 所述分光镜，用于对放大的啁啾脉冲激光与残余的泵浦光进行分离，以确保仅有放大的啁啾脉冲激光进入脉冲激光压缩器；
- 所述脉冲激光压缩器，用于压缩所述放大的啁啾脉冲激光的脉冲宽度，得到高峰值功率的超短脉冲激光。
- [权利要求 2] 如权利要求1所述的宽带光参量啁啾脉冲放大器，其特征在于，所述宽带光参量啁啾脉冲放大器还包括扩/缩束系统；
- 所述扩/缩束系统，置于所述光学耦合镜与所述周期性极化晶体之间，用于改变所述光学耦合镜出射的所述啁啾脉冲激光与所述泵浦光的光斑口径；经光斑口径调整的所述啁啾脉冲激光与所述泵浦光一同进入所述周期性极化晶体。
- [权利要求 3] 如权利要求2所述的宽带光参量啁啾脉冲放大器，其特征在于，通过调整所述扩/缩束系统的扩/缩束倍数，改变所述啁啾脉冲激光与所述泵浦光的光斑口径，以实现对所述宽带光参量啁啾脉冲放大器的增益带宽的动态调控。

- [权利要求 4] 如权利要求1所述的宽带光参量啁啾脉冲放大器，其特征在于，所述周期性极化晶体包括依次相连的第一非线性区域、线性区域及第二非线性区域；其中，所述第一非线性区域与所述第二非线性区域均具有周期性畴反转结构；
- 所述第一非线性区域的周期性畴反转方向与所述啁啾脉冲激光传输方向的夹角为 β ，所述第二非线性区域的周期性畴反转方向与所述啁啾脉冲激光传输方向的夹角为 $-\beta$ ，以使所述第一非线性区域的畴结构与所述第二非线性区域的畴结构沿所述啁啾脉冲激光传输方向呈轴对称；
- 所述第一非线性区域用于使生成的第一闲频光从所述啁啾脉冲激光和泵浦光的一侧走离，第二非线性区域用于使生成的第二闲频光从所述啁啾脉冲激光和泵浦光的另一侧走离。
- [权利要求 5] 如权利要求1所述的宽带光参量啁啾脉冲放大器，其特征在于：
- 夹角 α 表示所述闲频光与所述啁啾脉冲激光和泵浦光传输方向之间的夹角；
- 所述夹角 α 等于满足宽带相位匹配所需的群速度匹配角 Ω ，以实现所述啁啾脉冲激光的宽带宽的光参量放大；其中， $\Omega = \arccos(v_{\text{signal}}/v_{\text{idler}})$ ， v_{signal} 表示所述啁啾脉冲激光在所述周期性极化晶体中的群速度， v_{idler} 表示所述闲频光在所述周期性极化晶体中的群速度， $v_{\text{signal}} = v_{\text{idler}} * \cos(\alpha)$ 。
- [权利要求 6] 如权利要求4所述的宽带光参量啁啾脉冲放大器，其特征在于，所述周期性极化晶体的周期性畴反转结构具有使 k_p 、 k_s 、 k_i 和 k_g 四路波矢构成波矢四边形的能力，其中，所述 k_s 表示所述啁啾脉冲激光的波矢、所述 k_p 表示所述泵浦光的波矢、所述 k_i 表示所述闲频光的波矢，所述 k_g 表示所述周期性极化晶体的倒格矢，所述 k_s 与所述 k_p 共线。
- [权利要求 7] 如权利要求6所述的宽带光参量啁啾脉冲放大器，其特征在于，所述周期性极化晶体的极化周期 Λ 与所述夹角 β ，基于夹角 α 、夹角 β

、和 k_g 之间的映射关系以及所述夹角 α 进行设定，以使所述周期性极化晶体满足相位匹配；其中， $\Lambda=2\pi/k_g$ ，所述夹角 α 表示所述闲频光，与所述啁啾脉冲激光和泵浦光传输方向之间的夹角。

[权利要求 8]

如权利要求1所述的宽带光参量啁啾脉冲放大器，其特征在于，所述宽带光参量啁啾脉冲放大器还包括窄带皮秒激光器；

所述窄带皮秒激光器，用于输出泵浦光；

所述窄带皮秒激光器输出的泵浦光与所述展宽后得到的啁啾脉冲激光时间同步。

[权利要求 9]

如权利要求1所述的宽带光参量啁啾脉冲放大器，其特征在于，所述泵浦光与所述啁啾脉冲激光以共线正入射的方式，进入所述周期性极化晶体。

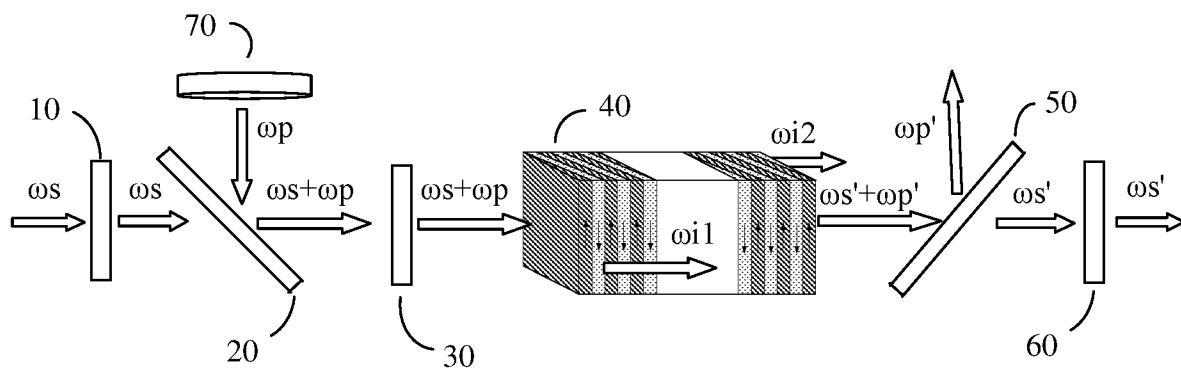
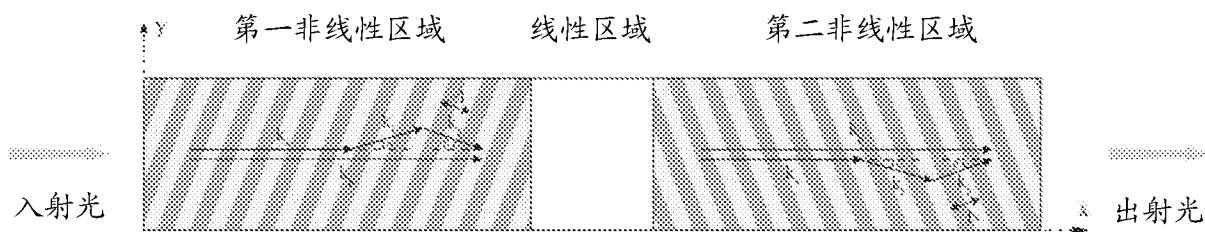


图 1



$\alpha = \arccos(v_{\text{signal}}/v_{\text{idler}})$, v_{signal} 、 v_{idler} 分别表示啁啾脉冲激光与闲频光在周期性极化晶体中的群速度

图 2

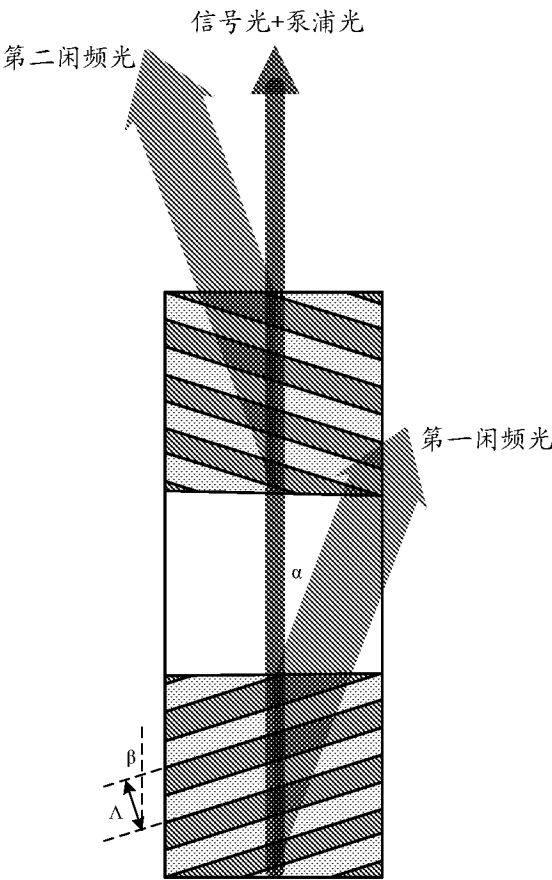


图 3

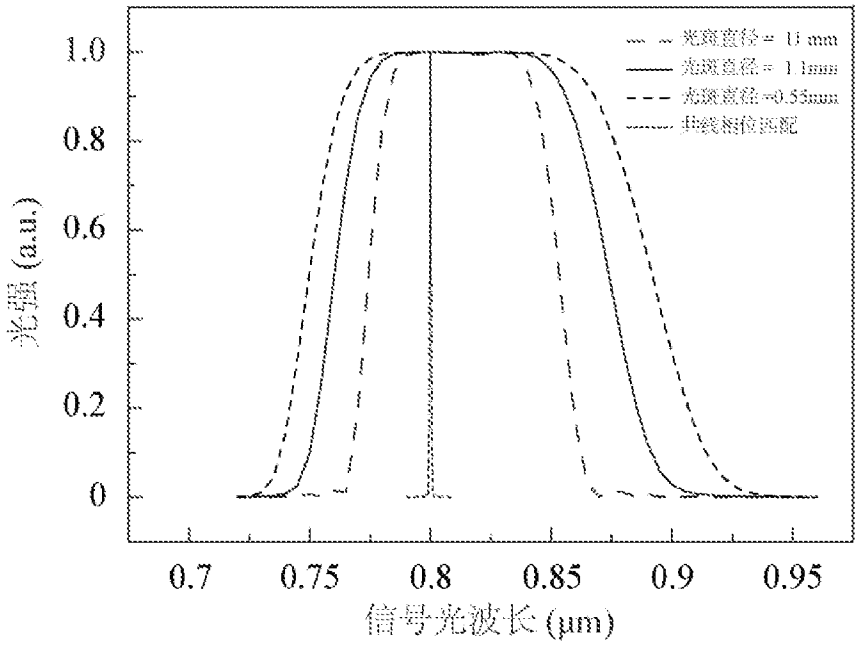


图 4

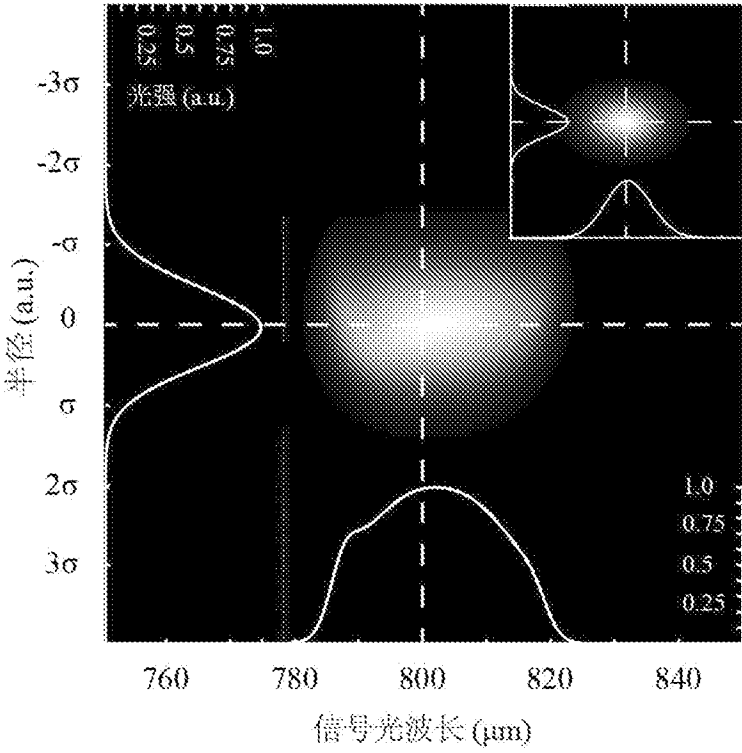


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/097583

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01S 3/00 (2006.01) i; G02F 1/39 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01S; G02F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT; CNKI; WPI; EPODOC: 光参量, 啁啾, 放大, OPCPA, CPA, OPA, 展宽, 周期, 极化, PPLN, PPLT, PPKTP, 闲频光, 分离, 走离, 分开, 离开, 饱和, 压缩, optic+, paramet+, chirp+, amplif+, broaden+, period+, polari+, poled, poling, idler, walk+, off, separat+, leav+, saturat+, compress+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 106911056 A (SHENZHEN UNIVERSITY), 30 June 2017 (30.06.2017), claims 1-9, description, paragraphs [0034]-[0061], and figures 1-5	1-9
PX	LI, Ying et al., "Versatile Backconversion-inhibited Broadband Optical Parametric Amplification Based on an Idler-separated QPM Configuration", OPTICS LETTERS, 42(14), 13 July 2017 (13.07.2017), pages 2806-2809, and figures 1-4	1-9
X	YUAN, Peng et al., "High-contrast Near-IR Short Pulses Generated by a Mid-IR Optical Parametric Chirped-pulse Amplifier with Frequency Doubling", OPTICS LETTERS, 35(11), 26 May 2010 (26.05.2010), page 1879, left-hand column, paragraph 1 to right-hand column paragraph 1, and figures 2-3	1-3, 5, 8, 9
A	CN 106207718 A (SHENZHEN UNIVERSITY), 07 December 2016 (07.12.2016), entire document	1-9
A	CN 104300354 A (SHENZHEN UNIVERSITY), 21 January 2015 (21.01.2015), entire document	1-9
A	CN 103217851 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY), 24 July 2013 (24.07.2013), entire document	1-9

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 11 January 2018	Date of mailing of the international search report 01 February 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer SUN, Xian Telephone No. (86-10) 53962398

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/097583

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2003112494 A1 (THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA), 19 June 2003 (19.06.2003), entire document	1-9

International application No.
PCT/CN2017/097583

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/097583

A. 主题的分类

H01S 3/00(2006.01)i; G02F 1/39(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H01S;G02F

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT;CNKI;WPI;EPDOC:光参量, 啁啾, 放大, OPCPA, CPA, OPA, 展宽, 周期, 极化, PPLN, PPLT, PPKTP, 闲频光, 分离, 走离, 分开, 离开, 饱和, 压缩, optic+, paramet+, chirp+, amplif+, broaden+, period+, polari+, poled, poling, idler, walk+, off, separat+, leav+, saturat+, compress+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 106911056 A (深圳大学) 2017年 6月 30日 (2017 - 06 - 30) 权利要求1-9、说明书第[0034]-[0061]段、图1-5	1-9
PX	LI, Ying 等. "Versatile backconversion-inhibited broadband optical parametric amplification based on an idler-separated QPM configuration" OPTICS LETTERS, 第42卷, 第14期, 2017年 7月 13日 (2017 - 07 - 13), 第2806-2809页、图1-4	1-9
X	YUAN, Peng 等. "High-contrast near-IR short pulses generated by a mid-IR optical parametric chirped-pulse amplifier with frequency doubling" OPTICS LETTERS, 第35卷, 第11期, 2010年 5月 26日 (2010 - 05 - 26), 第1879页左栏第1段-右栏第1段、图2-3	1-3, 5, 8, 9
A	CN 106207718 A (深圳大学) 2016年 12月 7日 (2016 - 12 - 07) 全文	1-9
A	CN 104300354 A (深圳大学) 2015年 1月 21日 (2015 - 01 - 21) 全文	1-9
A	CN 103217851 A (华中科技大学) 2013年 7月 24日 (2013 - 07 - 24) 全文	1-9

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2018年 1月 11日

国际检索报告邮寄日期

2018年 2月 1日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10) 62019451

受权官员

孙菀

电话号码 (86-10) 53962398

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	US 2003112494 A1 (THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA) 2003年 6月 19日 (2003 - 06 - 19) 全文	1-9

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/097583

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	106911056	A	2017年 6月 30日	无			
CN	106207718	A	2016年 12月 7日	无			
CN	104300354	A	2015年 1月 21日	US	2017018904	A1	2017年 1月 19日
				CN	104300354	B	2017年 7月 18日
				US	9748728	B2	2017年 8月 29日
				WO	2016065905	A1	2016年 5月 6日
CN	103217851	A	2013年 7月 24日	CN	103217851	B	2016年 4月 13日
US	2003112494	A1	2003年 6月 19日	US	6873454	B2	2005年 3月 29日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)