

(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 7 月 12 日 (12.07.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/126841 A1

- (51) 国际专利分类号:
G02B 1/00 (2006.01) **G02B 27/00** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2017/115047
- (22) 国际申请日: 2017 年 12 月 7 日 (07.12.2017)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201710011883.X 2017 年 1 月 8 日 (08.01.2017) CN
- (71) 申请人: 复旦大学 (FUDAN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国上海市杨浦区邯郸路 220 号, Shanghai 200433 (CN)。
- (72) 发明人: 蒋寻涯 (JIANG, Xunya); 中国上海市杨浦区邯郸路 220 号, Shanghai 200433 (CN)。高胜 (GAO, Sheng); 中国上海市杨浦区邯郸路 220 号, Shanghai 200433 (CN)。窦宇身 (DOU, Yushen); 中国上海市杨浦区邯郸路 220 号, Shanghai 200433 (CN)。李裘粹 (LI, Qiucui); 中国上海市杨浦区邯郸路 220 号, Shanghai 200433 (CN)。
- (74) 代理人: 上海光华专利事务所 (普通合伙) (J.Z.M.C. PATENT AND TRADEMARK LAW OFFICE (GENERAL PARTNERSHIP)); 中国上海

市杨浦区国定路 335 号 5022 室余明伟, Shanghai 200433 (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))。

(54) Title: PHOTONIC CRYSTAL LENS WIDELY ADJUSTABLE IN FOCAL LENGTH AND DESIGN METHOD THEREFOR

(54) 发明名称: 一种焦距大幅可调的光子晶体透镜及其设计方法

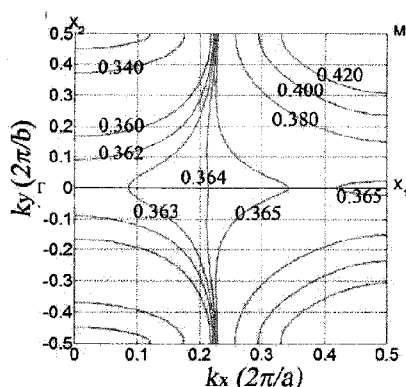


图 1

(57) Abstract: A photonic crystal lens widely adjustable in focal length and a design method therefor. The method comprises: preliminarily selecting a photonic crystal material and structure to obtain an equal-frequency diagram, and finding a frequency-sensitive auto-collimation region; determining a working phase space according to an actually required working frequency interval and an incidence angle range; optimally designing structure parameters and material parameters of the photonic crystal, so that the sensitivity of an equal-frequency contour curvature to the refractive index of the photonic crystal material is as high as possible, and equal-frequency contour degeneracy is also prevented from occurring in the working phase space; and selecting, according to material characteristics, an appropriate mode to change the refractive index of a constituent material of the photonic crystal, thereby changing the position of a beam focus point or a virtual focus point. Under the same conditions, the refractive index change required by this scheme is multiple orders of magnitude smaller than that of a block material or a common photonic crystal, and is easy to be achieved. The designed photonic crystal lens has excellent integration and can be applied in the fields such as beam focusing, beam width control and sensitivity detection.

(57) 摘要：一种焦距大幅可调的光子晶体透镜及其设计方法。该方法包括：初步选定光子晶体材料和结构，获得等频图，找到频率敏感自准直区域；针对实际需要工作频率区间和入射角范围，确定工作相空间；对光子晶体进行结构参数和材料参数优化设计，使得等频线曲率对光子晶体材料折射率的敏感度尽可能大，同时避免在工作相空间内出现等频线简并；根据所选材料特性，选择合适的方式，改变光子晶体组成材料的折射率，进而改变光束聚焦点或虚焦点的位置。在相同条件下，本方案所需折射率的变化比块体材料或普通光子晶体要小多个数量级，易于实现。本设计集成性好，能应用于光束调焦、光束宽度控制、敏感探测等领域。

一种焦距大幅可调的光子晶体透镜及其设计方法

技术领域

本发明属于光电子、光通信等技术领域。具体涉及一种焦距大幅可调的光子晶体透镜及其设计方法。

背景技术

光子晶体是折射率在空间周期性变化的介质材料，它能够有效地控制光子的传播行为。自 E. Yablonovitch 和 S. John 在二十年前提出这一概念以来，人们就对光子晶体的应用给予广泛关注。特别是在光通信技术领域，光子晶体光纤、微谐振腔激光器、滤波器、集成光路等光子晶体器件有着广阔的应用前景。半导体材料微细加工技术的不断提高大大地推动了二维甚至三维光子晶体器件在实际中的应用步伐。近年来，可调光子晶体透镜及其应用成为了业界关注的热点，因为光学微透镜是光波整形、光探测等领域中的核心器件之一。光子晶体可调透镜通过改变外界条件，使单色小尺寸光束在光子晶体内部的会聚点连续变化。它的特点一方面是体积小易于集成，而另一方面它提供了一种直接的小尺寸光束波前调制的方法。现有文献公开了一种光子晶体可调透镜。它利用 MEMS 技术制作微动装置来改变光子晶体的晶格常数以达到改变光子晶体特性的目的。这种光子晶体可调透镜不可避免地存在制作工艺复杂、稳定性差等问题，不利于器件在集成光路中的应用。

通过降低晶格对称性，调节范霍夫奇异点的位置，使得低群速度区域与自准直区域重合，可以实现频率敏感的自准直现象。我们发现在这类结构中，光束行为也是对折射率敏感的，而且在自准直频率两侧，光子晶体天然地能够充当凹透镜和凸透镜。基于此结构设计新型光子晶体可调透镜，可以有效的解决之前的问题。

发明内容

本发明的目的在于提供一种焦距大幅可调的光子晶体透镜及其设计方法，使该光子晶体透镜具有制作简单、工作条件易于达到、面积小巧等优点。

本发明提供的焦距大幅可调的光子晶体透镜的设计方法，是一种基于频率敏感自准直效应的衍射调控的设计方法，具体步骤如下：

步骤 1、选定介质材料，确定光子晶体结构类型和结构参数，获得该光子晶体的等频图，

在等频图中寻找频率敏感的自准直区域；

步骤 2、针对实际需要工作频率区间和入射角范围，确定工作“相空间”，即频率空间和波矢空间的范围；

步骤 3、对光子晶体进行结构参数和材料参数优化设计，使得等频线曲率对光子晶体材料（某种或多种）折射率的敏感度尽可能大，同时避免在工作相空间内出现“等频线简并”；

步骤 4、根据所选材料特性，选择合适的方式，比如电光、热光、非线性或其他物理效应，使一种或多种光子晶体组成材料的折射率改变，进而改变光束聚焦点或虚焦点的位置。

本发明中，步骤 1 的操作可参见已有技术“支持高频率敏感度自准直现象的光子晶体及设计方法和应用. 申请号：201310625054.2. 申请日期：2013-11-27.（发明专利,PCT 国际专利申请号：PCT/CN2014/074280）”。

本发明中，步骤 2 中所述的工作频率范围包括所有电磁波段,如可见光波段、红外波段、太赫兹波段和微波段等；

所述的入射角范围包括正入射情况，也包括斜入射情况；

所述的波矢空间的范围是通过布里渊区的等入射角线以及光束宽度来确定。

本发明中，步骤 3 中所述的光子晶体的结构参数包括但不限于晶格类型、晶格常数、填充比、单原胞内的结构形状和结构参数等；

所述的光子晶体的材料参数包括但不限于光子晶体各个组成材料的介电常数、磁导率常数和折射率等；

所述的光子晶体的晶格类型，可以是二维、三维或层状准二维周期结构，包括但不限于正方晶格、长方晶格、三角晶格、密堆、金刚石等晶格结构；

所述的等频线曲率对折射率的敏感度，是指等频线曲率对光子晶体材料（某种或多种）折射率的导数，它可以用理论计算的方法得到，也可以用实验的方法得到；所述的“等频线简并”是指不同的等频线具有相同的频率，这个简并包括同一能带的简并，也包括不同能带的简并；

所述的优化后的自准直等频线曲率对折射率的敏感度，一般需要大于 $30 \frac{\lambda_0}{2\pi}$ （ λ_0 为光束真空波长），大约是块体材料的 300 倍以上，才易实现焦距可调。

本发明设计方法设计得到的光子晶体透镜的焦距大幅可调，当折射率变化 0.2% 时，焦距可以增大一个数量级，并且制作简单、工作条件易于达到、面积小巧。这种焦距高度可调的光子晶体透镜能广泛应用于能应用于光束调焦、光束宽度控制、敏感探测等领域。

附图说明

图 1 选定光子晶体结构等频图。

图 2 微调折射率控制焦距的数值实验结果的结构示意图。

图 3 微调折射率控制焦距的数值实验结果图。其中，(a) - (c) 对应的微调后的 Ge 的折射率分别为 $n_1 = 3.988$ ， $n_2 = 3.992$ ， $n_3 = 3.996$ 。

具体实施方式

下面通过一个具体实施例来说明本发明的光子晶体透镜的设计方法，

1、选定光子晶体材料，确定材料折射率，选择光子晶体结构类型，确定结构参数：本发明具体实施例中选用材料 Ge，折射率为 $n=4.0$ ，这种材料的制备技术成熟。由这种介质柱构造光子晶体是由多个介质柱组成的长方晶格结构，介质柱的半径为 $r=0.27a$ ，这里 a 是晶格周期，长宽比为 1.2。并利用平面波展开法计算该结构的色散关系，选择第二个能带并计算该能带的等频图，图 1 为计算结果。

2、选定实际需要工作频率区间和入射角范围，确定工作“相空间”，即频率空间和波矢空间的范围：选定工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ ，是目前广泛应用光通信波段，晶格周期 $a=564\text{nm}$ ，采用正入射方案，光束宽度为 $15a$ ，纵向波矢 k_y 限定在 $(-0.05\frac{2\pi}{a}, 0.05\frac{2\pi}{a})$ ，横向波矢由工作波长确定。

3、计算该光子晶体的等频线曲率对折射率的敏感度，判断敏感度是否足够大以及自准直频率是否存在简并；若敏感度不够大或存在简并，则继续优化参数。此设计结构计算所得的等频线曲率对折射率的敏感度为 $1200\frac{\lambda_0}{2\pi}$ （ λ_0 为光束真空波长），约为块体材料的 10000 倍。

4、选定光子晶体尺寸以及工作波长后，通过热光效应微调 Ge 的折射率，光入射到光子晶体内部会产生不同的衍射特性。图 2(b)-(d) 对应的微调后的 Ge 的折射率分别为 $n_1 = 3.988$ ， $n_2 = 3.992$ ， $n_3 = 3.996$ 。它们的会聚点位置有显著差别，从而说明此种光子晶体透镜的焦距高度可调。这种焦距高度可调的光子晶体透镜能广泛应用于能应用于光束调焦、光束宽度控制、敏感探测等领域。

权 利 要 求 书

1、一种焦距大幅可调的光子晶体透镜的设计方法，其特征在于，具体步骤为：

步骤 1、选定介质材料，确定光子晶体结构类型和结构参数，获得该光子晶体的等频图，在等频图中寻找频率敏感的自准直区域；

步骤 2、针对实际需要工作频率区间和入射角范围，确定工作“相空间”，即频率空间和波矢空间的范围；

步骤 3、对光子晶体进行结构参数和材料参数优化设计，使得等频线曲率对光子晶体材料折射率的敏感度尽可能大，同时避免在工作相空间内出现“等频线简并”；

步骤 4、根据所选材料特性，选择合适的方式，包括电光、热光、非线性或其他物理效应，使一种或多种光子晶体组成材料的折射率改变，进而改变光束聚焦点或虚焦点的位置。

2、根据权利要求 1 所述的设计方法，其特征在于，步骤 2 中所述的工作频率范围为所有电磁波段，包括可见光波段、红外波段、太赫兹波段和微波段；

步骤 2 所述的入射角范围包括正入射情况，也包括斜入射情况；

步骤 2 所述的波矢空间的范围是通过布里渊区的等入射角线以及光束宽度来确定。

3、根据权利要求 1 所述的设计方法，其特征在于，步骤 3 中所述的光子晶体的结构参数包括晶格类型、晶格常数、填充比、单原胞内的结构形状和结构参数；

所述的光子晶体的材料参数包括光子晶体各个组成材料的介电常数、磁导率常数和折射率；

所述的光子晶体的晶格类型是二维、三维或层状准二维周期结构，包括正方晶格、长方晶格、三角晶格、密堆、金刚石的晶格结构；

4、根据权利要求 1 所述的设计方法，其特征在于，步骤 3 中所述的等频线曲率对折射率的敏感度，是指等频线曲率对光子晶体材料折射率的导数，它用理论计算的方法得到，或者用实验的方法得到。

5、根据权利要求 1 所述的设计方法，其特征在于，步骤 3 中所述的“等频线简并”是指不同的等频线具有相同的频率，这个简并包括同一能带的简并，也包括不同能带的简并。

6、根据权利要求 1 所述的设计方法，其特征在于，步骤 3 中优化后的自准直等频线曲率对折射率的敏感度，需要大于 $30 \frac{\lambda_0}{2\pi}$ ， λ_0 为光束真空波长，是块体材料的 200-300 倍以上。

7、由权利要求 1-6 之一所述的设计方法得到的焦距大幅可调的光子晶体透镜。

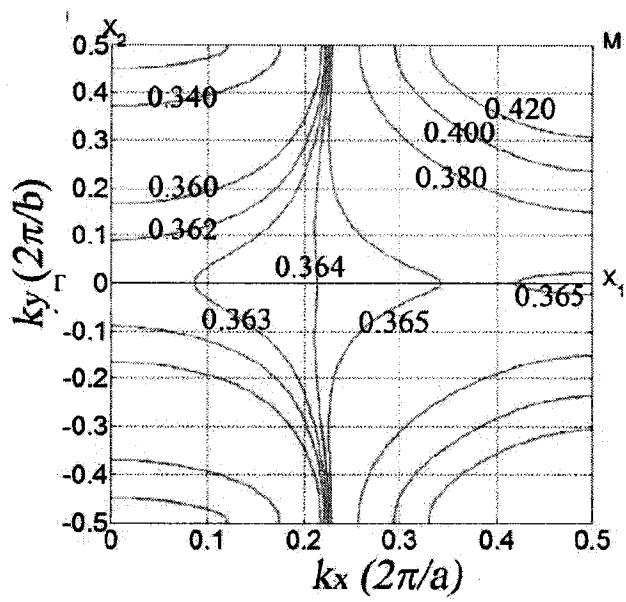


图 1

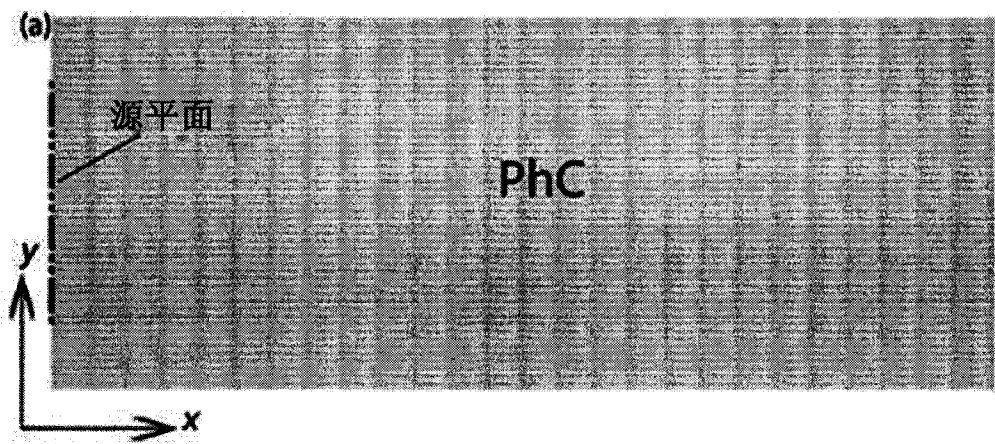


图 2

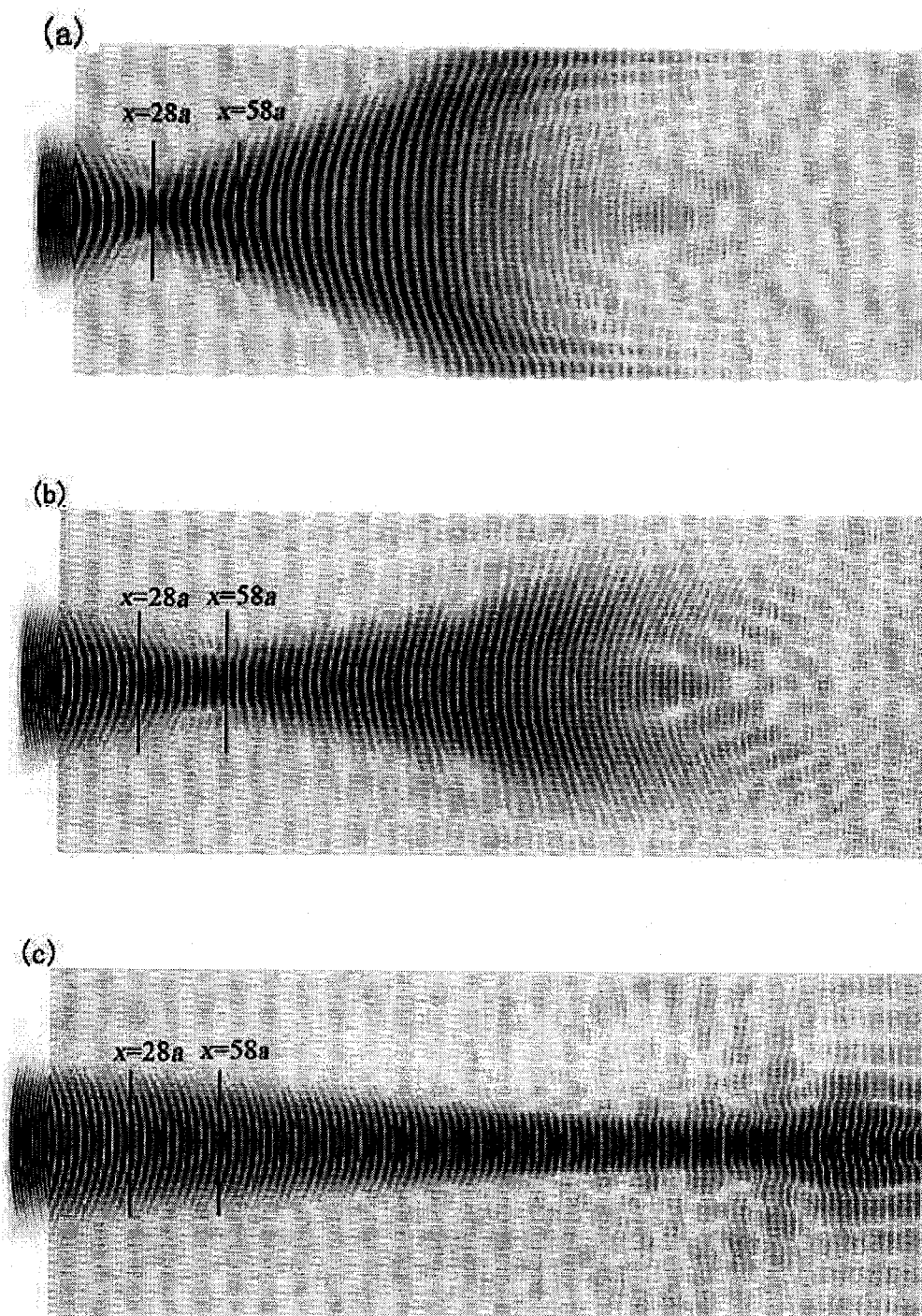


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/115047

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B 1/00 (2006.01) i; G02B 27/00 (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)

G02B

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: 光子晶体, 焦距, 等频, 敏感度, 折射率, 透镜, 自准直, 波矢, 焦点; focal length, adjustable, photonic, crystal, lens, frequency, focus, sensitive frequency

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 106842371 A (FUDAN UNIVERSITY), 13 June 2017 (13.06.2017), claims 1-7	1-7
X	CN 104678491 A (SHANGHAI INSTITUTE OF MICROSYSTEM AND INFORMATION TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES et al.), 03 June 2015 (03.06.2015), description, paragraphs [0058] and [0072]-[0101], and figures 1 and 7-19	1-7
A	CN 101055400 A (SHANGHAI INSTITUTE OF MICROSYSTEM AND INFORMATION TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES), 17 October 2007 (17.10.2007), entire document	1-7
A	CN 105116490 A (NANJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS), 02 December 2015 (02.12.2015), entire document	1-7
A	CN 105425504 A (SHANDONG UNIVERSITY), 23 March 2016 (23.03.2016), entire document	1-7
A	US 2007297734 A1 (IBANESCU, M. et al.), 27 December 2007 (27.12.2007), entire document	1-7

☐ 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 22 February 2018	Date of mailing of the international search report 07 March 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 WU, Songjiang Telephone No. (86-10) 53962563

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/115047

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 106842371 A	13 June 2017	None	
CN 104678491 A	03 June 2015	US 2016259090 A1	08 September 2016
		US 9684094 B2	20 June 2017
		WO 2015078119 A1	04 June 2015
CN 101055400 A	17 October 2007	CN 101055400 B	14 December 2011
CN 105116490 A	02 December 2015	None	
CN 105425504 A	23 March 2016	None	
US 2007297734 A1	27 December 2007	WO 2007149853 A2	27 December 2007
		US 7421171 B2	02 September 2008

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/115047

A. 主题的分类

G02B 1/00(2006.01)i; G02B 27/00(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)

G02B

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, EPODOC: 光子晶体, 焦距, 等频, 敏感度, 折射率, 透镜, 自准直, 波矢, 焦点; focal length, adjustable, photonic, crystal, lens, frequency, focus, sensitive frequency

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 106842371 A (复旦大学) 2017年 6月 13日 (2017 - 06 - 13) 权利要求1-7	1-7
X	CN 104678491 A (中国科学院上海微系统与信息技术研究所 等) 2015年 6月 3日 (2015 - 06 - 03) 说明书第[0058], [0072]-[0101]段、图1, 7-19	1-7
A	CN 101055400 A (中国科学院上海微系统与信息技术研究所) 2007年 10月 17日 (2007 - 10 - 17) 全文	1-7
A	CN 105116490 A (南京邮电大学) 2015年 12月 2日 (2015 - 12 - 02) 全文	1-7
A	CN 105425504 A (山东大学) 2016年 3月 23日 (2016 - 03 - 23) 全文	1-7
A	US 2007297734 A1 (IBANESCU, MIHAI 等) 2007年 12月 27日 (2007 - 12 - 27) 全文	1-7

☐ 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 2月 22日

国际检索报告邮寄日期

2018年 3月 7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

吴松江

电话号码 (86-10) (86-10) 53962563

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/115047

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	106842371	A	2017年 6月 13日	无			
CN	104678491	A	2015年 6月 3日	US	2016259090	A1	2016年 9月 8日
				US	9684094	B2	2017年 6月 20日
				WO	2015078119	A1	2015年 6月 4日
CN	101055400	A	2007年 10月 17日	CN	101055400	B	2011年 12月 14日
CN	105116490	A	2015年 12月 2日	无			
CN	105425504	A	2016年 3月 23日	无			
US	2007297734	A1	2007年 12月 27日	WO	2007149853	A2	2007年 12月 27日
				US	7421171	B2	2008年 9月 2日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)