



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109341137 A

(43)申请公布日 2019.02.15

(21)申请号 201811243300.7

(22)申请日 2018.10.24

(71)申请人 苏州融睿纳米复材科技有限公司  
地址 215000 江苏省苏州市高新区同心路  
58号

(72)发明人 詹耀辉 姚凯强 戴明光 马鸿晨  
赵海鹏 张添顺

(74)专利代理机构 苏州市中南伟业知识产权代  
理事务所(普通合伙) 32257  
代理人 张红卫 郭磊

(51)Int.Cl.  
F25B 27/00(2006.01)

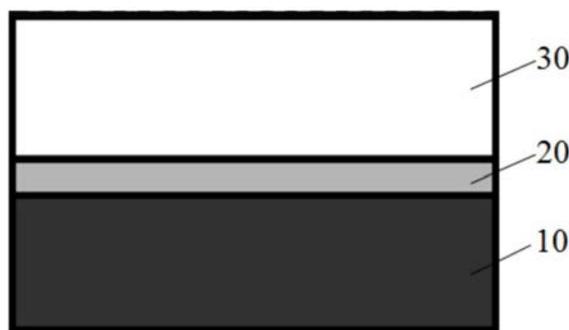
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

基于光子晶体的被动制冷结构

(57)摘要

本发明公开了一种基于光子晶体的被动制冷结构,其包括:上部辐射层和下部反射层和衬底,上部辐射层设于下部反射层上,下部反射层设于衬底上;下部反射层用于反射透过上部辐射层入射至下部反射层上的可见光,并将衬底下待降温物体的热量传递至上部辐射层;上部辐射层为一维光子晶体层,用于产生光子禁带,增大对可见光的反射率,并将衬底下待降温物体的热量从大气窗口波段向外辐射。本发明的基于光子晶体的被动制冷结构中的一维光子晶体层使得结构对可见光的反射更加明显,不单单依靠下部反射层的反射,降低了下部反射层对可见光的吸收,具有很好的散热效果,可以达到节能减排的目的,达到被动制冷的效果。其次,该结构简单,制备难度较低。



1. 基于光子晶体的被动制冷结构,其特征在于,包括:上部辐射层和下部反射层和衬底,所述上部辐射层设于所述下部反射层上,所述下部反射层设于所述衬底上;

所述下部反射层用于反射透过所述上部辐射层入射至所述下部反射层上的可见光,并将所述衬底下待降温物体的热量传递至所述上部辐射层;

所述上部辐射层为一维光子晶体层,用于产生光子禁带,增大对可见光的反射率,并将所述衬底下待降温物体的热量从大气窗口波段向外辐射。

2. 如权利要求1所述的基于光子晶体的被动制冷结构,其特征在于,所述制冷结构的净冷却功率 $P_{cool}$ 如下:

$$P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv}$$

在上式子中, $P_{rad}(T)$ 为制冷结构的热辐射功率,计算公式为:

$$P_{rad}(T) = A \int d\Omega \cos \theta \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T, \lambda) \epsilon(\lambda, \theta)$$

其中 $\lambda$ 为光波长, $\theta$ 为入射光的角度, $A$ 为面积,计算功率时候取单位面积1, $\Omega$ 为半球上角度积分范围, $I_{bb}$ 是黑体辐射的辐射率;

$P_{atm}(T_{amb})$ 是与大气对制冷结构表面辐射功率大小,计算公式如下:

$$P_{atm}(T_{amb}) = A \int d\Omega \cos \theta \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \epsilon(\lambda, \theta) \epsilon_{atm}(\lambda, \theta)$$

$A$ 为单位面积;

$P_{sun}$ 是材料吸收的太阳热辐射功率,其计算公式如下:

$$P_{Sun} = A \int_0^{\infty} d\lambda \epsilon(\lambda, \theta_{Sun}) I_{AM1.5}(\lambda)$$

$I_{AM1.5}$ 为AM1.5的大气环境下太阳的照射能谱, $\lambda$ 为太阳光波长;

$P_{cond+conv}$ 为制冷结构与环境的热传递和对流关系,功率计算如下:

$$P_{cond+conv}(T, T_{amb}) = Ahc(T_{amb} - T)$$

所述 $T$ 为材料的温度, $T_{amb}$ 为环境温度, $hc$ 是综合的非辐射热系数取 $6.9Wm^{-2}K^{-1}$ 。

3. 如权利要求1所述的基于光子晶体的被动制冷结构,其特征在于,所述一维光子晶体层由SiO2层与TiO2层交替堆叠而成,或者由SiO2层与HfO2层交替堆叠而成。

4. 如权利要求3所述的基于光子晶体的被动制冷结构,其特征在于,所述SiO2层的厚度为5-300nm,所述TiO2层的厚度为5-180nm。

5. 如权利要求4所述的基于光子晶体的被动制冷结构,其特征在于,所述SiO2层的厚度为119nm,所述TiO2层的厚度为74nm。

6. 如权利要求1所述的基于光子晶体的被动制冷结构,其特征在于,所述下部反射层为Ag或Al层或Cr层。

7. 如权利要求6所述的基于光子晶体的被动制冷结构,其特征在于,所述Ag层的厚度为10-180nm。

8. 如权利要求7所述的基于光子晶体的被动制冷结构,其特征在于,所述Ag层的厚度为80nm。

## 基于光子晶体的被动制冷结构

### 技术领域

[0001] 本发明涉及制冷技术领域,特别涉及一种基于光子晶体的被动制冷结构。

### 背景技术

[0002] 被动制冷材料研究一直是为了减少电力等降温能源的使用,达到节能减排的目的,在过去的几十年一直被科学家们探讨和研究。实现被动冷却,能够达到并保持温度低于周围空气的温度。在美国,以空调所消耗的能源为例,占建筑物使用的电力能源的大约15%,而电力使用可能对全球能量消耗产生重大影响。因此设计一种被动降温材料来减小电力能源显得十分有实际价值。

[0003] 随着科学的发展,一种夜间的被动降温材料已经被发现了,它是基于一种名为“大气窗口”的物理机制而实现的,机理是暴露在天空中的装置通过将8至13微米的波长的电磁波辐射至大气层中的透明窗口,来实现向外部空间辐射热量,以达到被动降温的目的。然而白天由于太阳光的能量辐射使得温度上升的被动制冷的材料很难被突破。因此解决太阳热辐射的问题成为白天被动降温材料研制的一大难点。

[0004] 由于微纳加工技术的不断成熟化,使得一些微观的结构材料的研发来实现在白天的被动降温已经被一些研发人员所提出。微纳材料由于体积小、性能优越、结构多样化、加工成本低,已经被广泛应用于工业生产的很多领域。

[0005] 随着光子晶体的提出,为一些微纳加工带来了巨大的研究前景,光子晶体是一种具有特殊属性的微纳结构,光子晶体由不同折射率的介质周期性排列而成的人工微结构。光子晶体即光子禁带材料,从材料结构上看,光子晶体是一类在光学尺度上具有周期性介电结构的人工设计和制造的晶体。与半导体晶格对电子波函数的调制相类似,光子带隙材料能够调制具有相应波长的电磁波,当电磁波在光子带隙材料中传播时,由于存在布拉格散射而受到调制,电磁波能量形成能带结构。能带与能带之间出现带隙,即光子带隙。所具能量处在光子带隙内的光子,不能进入该晶体。

[0006] 在专利CN108104289A中,公开了一种基于铝合金板与隔热层的辐射散热薄膜,此种降温材料耗材多,结构较为复杂,且实用场合比较单一,使得操作性比较复杂,使用范围受限。专利CN108219172A是基于铝薄膜与二氧化硅、二氧化钡颗粒的一种多层结构,这种结构颗粒均匀性,以及涂层的厚薄受到了很大的挑战,制作工业相当繁琐,不适合生产实践。在Raman这篇名为Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight的ACS论文中介绍了一种多层膜的被动降温材料,其薄膜参数太多且材料制备繁琐,不利于实际加工。

### 发明内容

[0007] 针对现有技术的不足,本发明目的在于提供一种结构简单,降温效果好,基于光子晶体的被动制冷结构。其采用如下技术方案:

[0008] 基于光子晶体的被动制冷结构,其包括:上部辐射层和下部反射层和衬底,所述上

部辐射层设于所述下部反射层上,所述下部反射层设于所述衬底上;

[0009] 所述下部反射层用于反射透过所述上部辐射层入射至所述下部反射层上的可见光,并将所述衬底下待降温物体的热量传递至所述上部辐射层;

[0010] 所述上部辐射层为一维光子晶体层,用于产生光子禁带,增大对可见光的反射率,并将所述衬底下待降温物体的热量从大气窗口波段向外辐射。

[0011] 作为本发明的进一步改进,所述制冷结构的净冷却功率 $P_{cool}$ 如下:

[0012]  $P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv}$

[0013] 在上式子中, $P_{rad}(T)$ 为制冷结构的热辐射功率,计算公式为:

$$[0014] \quad P_{rad}(T) = A \int d\Omega \cos \theta \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T, \lambda) \epsilon(\lambda, \theta)$$

[0015] 其中 $\lambda$ 为光波长, $\theta$ 为入射光的角度, $A$ 为面积,计算功率时候取单位面积1, $\Omega$ 为半球上角度积分范围, $I_{bb}$ 是黑体辐射的辐射率;

[0016]  $P_{atm}(T_{amb})$ 是与大气对制冷结构表面辐射功率大小,计算公式如下:

$$[0017] \quad P_{atm}(T_{amb}) = A \int d\Omega \cos \theta \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \epsilon(\lambda, \theta) \epsilon_{atm}(\lambda, \theta)$$

[0018]  $A$ 为单位面积;

[0019]  $P_{sun}$ 是材料吸收的太阳热辐射功率,其计算公式如下:

$$[0020] \quad P_{Sun} = A \int_0^{\infty} d\lambda \epsilon(\lambda, \theta_{Sun}) I_{AM1.5}(\lambda)$$

[0021]  $I_{AM1.5}$ 为AM1.5的大气环境下太阳的照射能谱, $\lambda$ 为太阳光波长;

[0022]  $P_{cond+conv}$ 为制冷结构与环境的热传递和对流关系,功率计算如下:

[0023]  $P_{cond+conv}(T, T_{amb}) = Ahc(T_{amb} - T)$

[0024] 所述 $T$ 为材料的温度, $T_{amb}$ 为环境温度, $hc$ 是综合的非辐射热系数取 $6.9W m^{-2}K^{-1}$ 。

[0025] 作为本发明的进一步改进,所述一维光子晶体层由SiO<sub>2</sub>层与TiO<sub>2</sub>层交替堆叠而成,或者由SiO<sub>2</sub>层与HfO<sub>2</sub>层交替堆叠而成。

[0026] 作为本发明的进一步改进,所述SiO<sub>2</sub>层的厚度为5-300nm,所述TiO<sub>2</sub>层的厚度为5-180nm。

[0027] 作为本发明的进一步改进,所述SiO<sub>2</sub>层的厚度为119nm,所述TiO<sub>2</sub>层的厚度为74nm。

[0028] 作为本发明的进一步改进,所述下部反射层为Ag或Al层或Cr层。

[0029] 作为本发明的进一步改进,所述Ag层的厚度为10-180nm。

[0030] 作为本发明的进一步改进,所述Ag层的厚度为80nm。

[0031] 本发明的有益效果:

[0032] 本发明的基于光子晶体的被动制冷结构中的一维光子晶体层,可产生光子带隙,使得结构对可见光的反射更加明显,不单单依靠下部反射层的反射,降低了下部反射层对可见光的吸收,具有很好的散热效果,可以达到节能减排的目的,达到被动制冷的效果。

[0033] 其次,该结构简单,一维光子晶体的周期性结构使得制备难度较低,具有广阔的市场前景和应用前景。

[0034] 上述说明仅是本发明技术方案的概述,为了能够更清楚了解本发明的技术手段,而可依照说明书的内容予以实施,并且为了让本发明的上述和其他目的、特征和优点能够更明显易懂,以下特举较佳实施例,并配合附图,详细说明如下。

### 附图说明

[0035] 图1是本发明实施例一中基于光子晶体的被动制冷结构的示意图;

[0036] 图2是本发明实施例一中上部辐射层的结构示意图;

[0037] 图3是本发明实施例一中基于光子晶体的被动制冷结构在不同中心波长对应的电磁波吸收率图;

[0038] 图4是本发明实施例一中基于光子晶体的被动制冷结构中不同厚度的银层对应的电磁波吸收率。

[0039] 标记说明:10、衬底;20、下部反射层;30、上部辐射层;40、光栅层。

### 具体实施方式

[0040] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明,以使本领域的技术人员可以更好地理解本发明并能予以实施,但所举实施例不作为对本发明的限定。

[0041] 被动降温主要是利用一个热辐射的机制,使得材料的净降温功率大于0。在白天的天空中,辐射功率受到太阳辐射和大气的影。辐射冷却器的净冷却功率 $P_{cool}$ 得到由下式给出:

$$[0042] \quad P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv}$$

[0043] 在上式子中, $P_{rad}(T)$ 为材料的热辐射功率。计算公式为:

$$[0044] \quad P_{rad}(T) = A \int d\Omega \cos \theta \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T, \lambda) \epsilon(\lambda, \theta)$$

[0045] 其中 $\lambda$ 为光波长, $\theta$ 为入射光的角度, $A$ 为面积,计算功率时候取单位面积1, $\Omega$ 为半球上角度积分范围, $I_{bb}$ 是黑体辐射的辐射率。

[0046]  $P_{atm}(T_{amb})$ 是与大气对材料表面辐射功率大小,计算公式如下:

$$[0047] \quad P_{atm}(T_{amb}) = A \int d\Omega \cos \theta \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \epsilon(\lambda, \theta) \epsilon_{atm}(\lambda, \theta)$$

[0048]  $A$ 取1视为单位面积。

[0049]  $P_{sun}$ 是材料吸收的太阳热辐射功率,其计算公式如下:

$$[0050] \quad P_{Sun} = A \int_0^{\infty} d\lambda \epsilon(\lambda, \theta_{Sun}) I_{AM1.5}(\lambda)$$

[0051]  $I_{AM1.5}$ 为AM1.5的大气环境下太阳的照射能谱, $\lambda$ 为太阳光波长。

[0052]  $P_{cond+conv}$ 为材料与环境的热传递和对流关系,功率计算如下:

$$[0053] \quad P_{cond+conv}(T, T_{amb}) = Ahc(T_{amb} - T)$$

[0054]  $T$ 为材料的温度, $T_{amb}$ 为环境温度, $hc$ 是一种综合的非辐射热系数取 $6.9W m^{-2}K^{-1}$ 。

[0055] 由上述的公式我们可以求出其净制冷功率。其中 $P_{atm}(T_{amb})$ 与 $P_{cond+conv}$ 是不可控的。主要考虑增大 $P_{rad}(T) - P_{sun}$ 的大小。为了达成这一目的,需要设计一种结构材料使得该结构

材料在可见光波段有好的反射率,以避免吸收具有高能量的可见光,且在大气窗口有很高的辐射效率,这里引入基尔霍夫定律,即在某一波段范围内好的吸收体必定是好的辐射体,因此需要在大气窗口波段寻找一个具有高吸收率的材料与结构,也就是说设计的材料必须具备很好的选择透过性能。

[0056] 如图1所示,为本发明实施例一中基于光子晶体的被动制冷结构的示意图。该被动制冷结构包括:上部辐射层30和下部反射层20和衬底10,上部辐射层30设于下部反射层20上,下部反射层20设于衬底10上;

[0057] 下部反射层20用于反射透过上部辐射层30入射至下部反射层20上的可见光,并将待降温物体表面的热量传递至上部辐射层30;

[0058] 上部辐射层30为光子晶体层,用于产生光子禁带,增大对可见光的反射率,并将待降温物体表面的热量从大气窗口波段向外辐射。

[0059] 如图2所示,为本发明实施例一中上部辐射层的结构示意图。在本实施例中,上部辐射层30为a层b层交替堆叠结构,具体为SiO<sub>2</sub>层与TiO<sub>2</sub>层交替堆叠而成,或者SiO<sub>2</sub>层与HfO<sub>2</sub>层交替堆叠而成;下部反射层20可以为Ag、Al层、Cr层等高反射金属层,或者半透膜层,半透膜层可以用于玻璃上以取得更好的透光效果;基底10为材料Si、SiO<sub>2</sub>、Al等。

[0060] 优选的,上部辐射层30为SiO<sub>2</sub>层与TiO<sub>2</sub>层交替堆叠而成,其中SiO<sub>2</sub>层的厚度为5-300nm,TiO<sub>2</sub>层的厚度为5-180nm,下部反射层20为Ag层,Ag层的厚度为10-180nm,基底10为材料Si。

[0061] 优选的,SiO<sub>2</sub>厚度为119nm,TiO<sub>2</sub>的厚度为74nm,Ag层的厚度为80nm。

[0062] 根据光子晶体公式:SiO<sub>2</sub>层与TiO<sub>2</sub>层的厚度 $d = \lambda/4n$ ,其中n为材料在该中心波长下的折射率, $\lambda$ 为中心波长,所谓中心波长是指光在某一个波长入射到光子晶体时,光波不能在此周期性结构中传播,即这种结构本身存在“禁带”,通过选取的中心波长可以算出光子晶体的厚度。

[0063] 如图3所示,为本发明实施例一中基于光子晶体的被动制冷结构在不同中心波长对应的电磁波吸收率。其中横坐标为电磁波的波长,纵坐标为吸收率。从图中可以看出:在中心波长为700nm时,该结构对8-14 $\mu$ m的电磁波吸收率较好,此时,由公式 $d = \lambda/4n$ 可以得出SiO<sub>2</sub>厚度为119nm(SiO<sub>2</sub>在700nm处的折射率为1.47),TiO<sub>2</sub>此时的厚度为74nm(TiO<sub>2</sub>在700nm处的折射率为2.365)。

[0064] 出于对Ag透光性的考虑,下面对银的厚度进行研究。如图4所示,为本发明实施例一中基于光子晶体的被动制冷结构中不同厚度的银层对应的电磁波吸收率。其中横坐标为电磁波的波长,纵坐标为吸收率,其中银层的厚度为20nm到180nm。从图中可以看出:当银厚度在20nm和60nm时,该结构对电磁波的吸收率有一定的影响,这时由于会有一部分电磁波会透过Ag层,当Ag层的厚度达到80nm及以上时,该结构对电磁波的吸收达到饱和状态。

[0065] 综上所述,得到在中心波长为700nm,Ag的厚度为80nm时,该结构能达到较好的制冷效果,材料也最节省。由上述的公式我们可以求出其净制冷功率。经COMSOL模拟并计算得到,当环境温度315K,大气环境为AM1.5时,辐射器温度为300K时,净降温功率为95.5W/m<sup>2</sup>,通过多组数据拟合,得到稳定时候辐射器温度303.065K,比环境温度低11.94摄氏度,达到了很好的降温效果。

[0066] 本发明的有益效果:

[0067] 本发明的基于光子晶体的被动制冷结构中的一维光子晶体层,可产生光子带隙,使得结构对可见光的反射更加明显,不单单依靠下部反射层的反射,降低了下部反射层对可见光的吸收,具有很好的散热效果,可以达到节能减排的目的,达到被动制冷的效果。

[0068] 其次,该结构简单,一维光子晶体的周期性结构使得制备难度较低,具有广阔的市场前景和应用前景。

[0069] 以上实施例仅是为充分说明本发明而所举的较佳的实施例,本发明的保护范围不限于此。本技术领域的技术人员在本发明基础上所作的等同替代或变换,均在本发明的保护范围之内。本发明的保护范围以权利要求书为准。

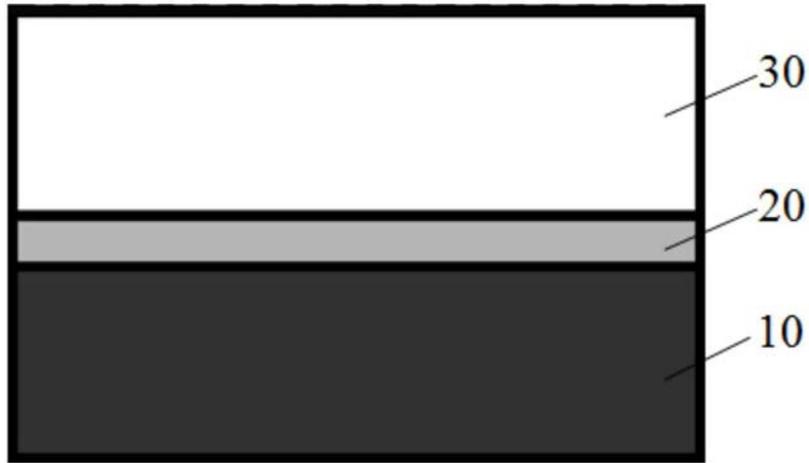


图1

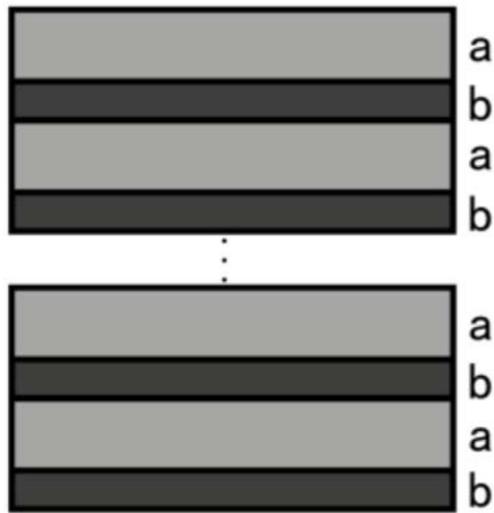


图2

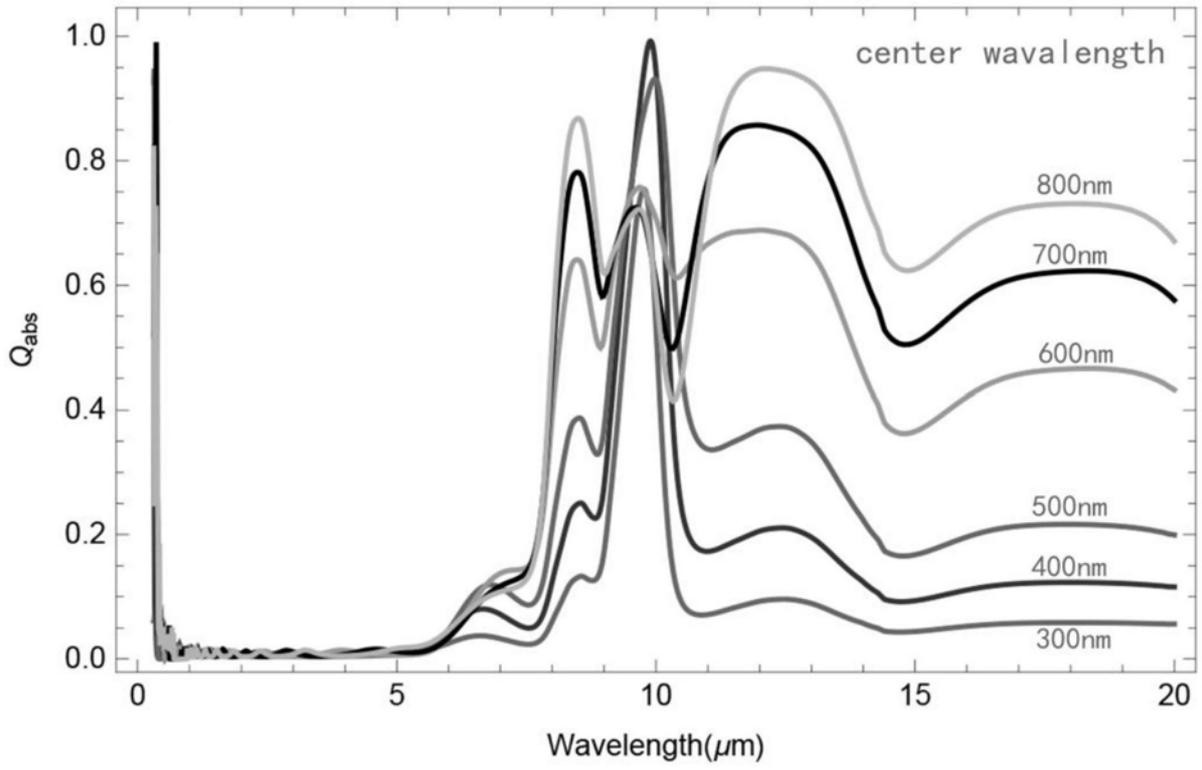


图3

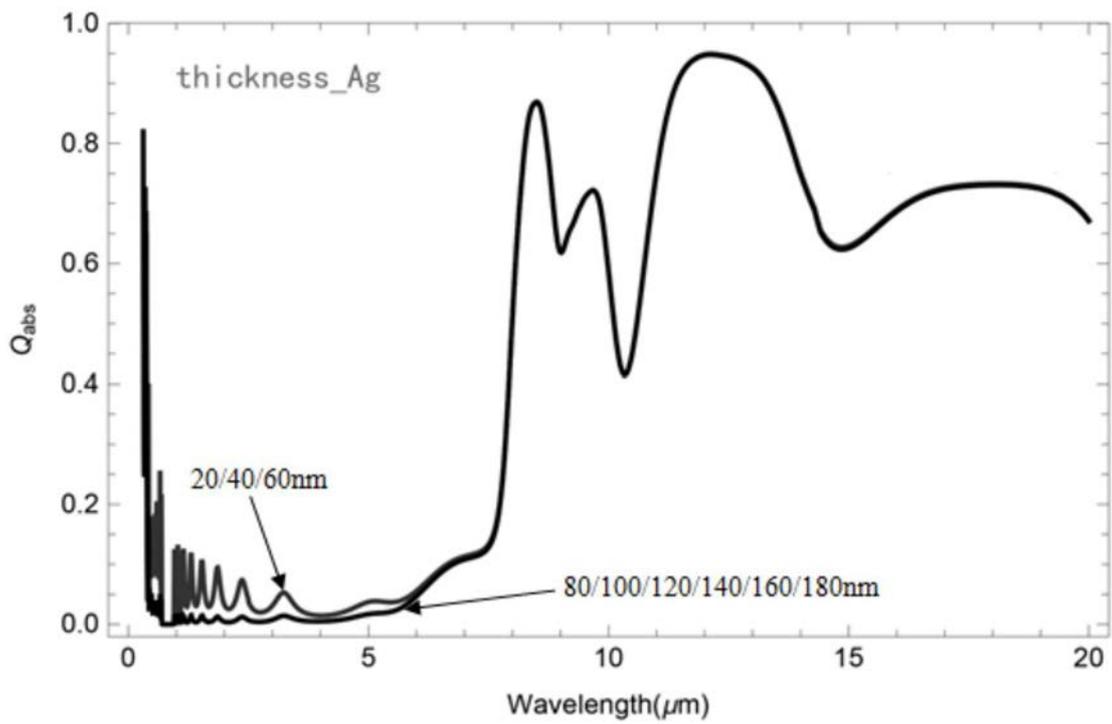


图4