

### 问题B

#### 热光电发电技术中热发射器的优化设计

近年来，世界各大国一个接一个地转向“星海”，制定了各种太空探索计划。2020年，中国的“天1号”发射并通过太空进入火星；2021年，“朱融”号完成了计划任务，留在火星上，仍在寻找更多广阔宇宙的发现。为了确保月球车携带的各种仪器和设备能够在不晒太阳的情况下运行良好，并为其长期工作提供必要的技术支持，科学家们探索并开发了热光电技术。下图显示了一个热光电装置的测试原型。

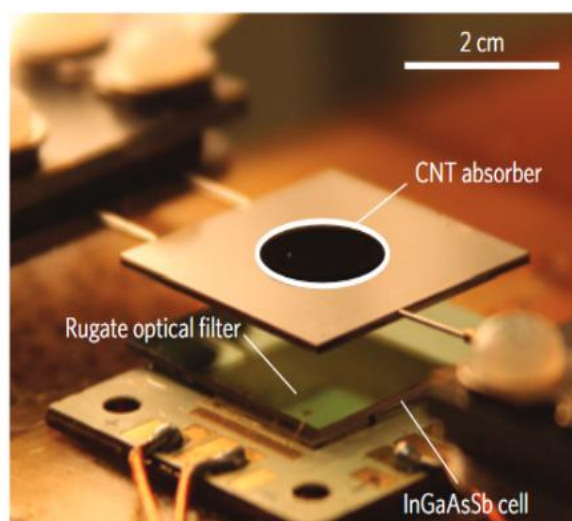


图1：热光电装置的测试原型

热光电技术是一种利用各种热源加热热发射器（吸收器），然后通过光伏电池将热发射器的红外辐射转化为电能的技术。热源有很多种类型，包括化学能、太阳能、核能等。系统中的热发射器主要利用不同的材料结构来调节所吸收热的发射，使发射的光子大多在光伏电池的带隙波长以下。光伏电池主要转换在特定带隙波长以下的高能光子。它具有一定的带隙能量，因此也具有相应的带隙波长。例如，一个带隙波长为1100纳米的硅太阳能电池只能吸收上述波长以下的高能光子，并将其转换为

电能，而电池吸收波长以上的低能光子不能通过光电效应转化为电能。相反，它们只能转化为热能，从而降低了电池的光电转换效率。因此，为了提高热光电系统的热电转换效率，必须调节热发射器的发射光谱。发射光谱的计算方法主要包括传输矩阵法 (TMM) [1-2]、有限差分时域法 (FDTD) 和严格耦合波分析方法 (RCWA)。而影响热发射器发射光谱的主要因素是材料的光学性质（折射率或介电常数）和结构性质（厚度）。王等人。[3]开发了一种亚微量厚的多层选择性太阳能吸收器，它由钨、二氧化硅和氮化硅组成，在太阳波段的吸收率可达0.95。2014年，麻省理工学院的王伊芙琳团队设计了一种光子控制的太阳能热光电装置，在实验中运行良好。在他们的工作中，热发射器是由硅和二氧化硅组成的多层薄膜结构。优化了每一层的厚度，使其发射光谱对应于铟砷化镓 (InGaAs) 电池的带隙。不同材料的折射率或介电常数可以通过检索文档或参考材料[5]的光学性质数据库来找到，该数据库提供了普通材料的折射率。请按上述介绍的方式来解决以下问题。

(1) 请说明单层结构的发射光谱与材料性能（折射率、厚度）的关系，并计算出0.3-5微米范围内50纳米厚钨（如图所示）的发射光谱。



图2：50纳米厚的钨丝结构示意图

(2) 请说明多层结构的发射光谱与材料性能（折射率、厚度）的关系，并计算钨（50nm）和二氧化硅（50nm）（如下图所示）在0.3-5微米范围内形成的复合结构的发射光谱。

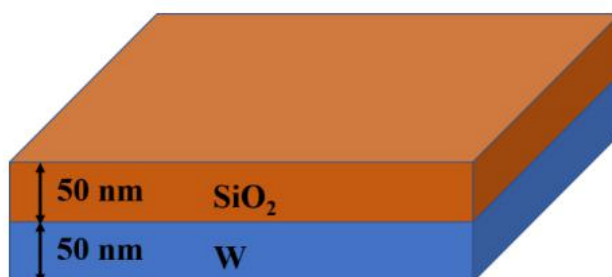
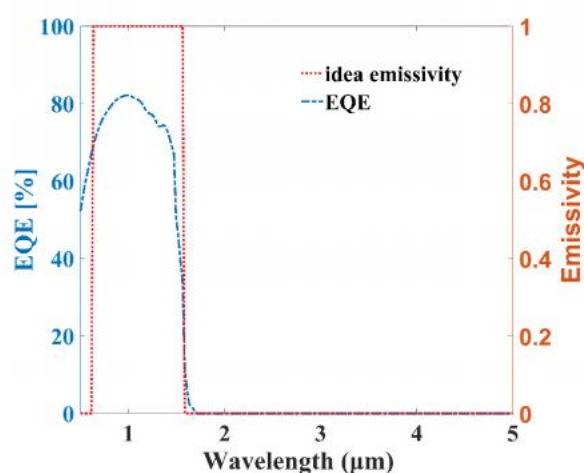


图3：钨、二氧化硅形成的多层结构示意图

(3) 为了提高散热器的光谱控制能力，有时热发射器设计为窄带形式发射，即发射集中在很小的带内，从而提高热光电器件的热电转换效率，如樱井等设计的多层窄带发射器。[6]与硅、二氧化硅和锆结合。请选择合理的材料，设计一个多人热发射器，使其发射尽可能窄、高，并给出多层结构的设计参数（包括层数、每层材料和厚度）及其发射光谱。需要注意的是，这个问题中的热发射器具有1.5微米的锐而高的热发射，计算出的波长范围为0.3-5微米。

(4) 碲化镓(GaSb)电池目前还比较先进。假设其带隙波长为1.71微米。其理想化的热发射器的发射光谱大致用下图中的红色虚线表示。蓝虚线表示外部量子效率(EQE)，可以适当地考虑其影响。请选择合理的材料，为GaSb电池设计一个多层热发射器，以达到尽可能高的热电转换效率，并给出多层结构的设计参数（包括层数、每层材料和厚度）及其发射光谱。

图4：热光电技术中GaSb的EQE和理想发射光谱



注：这里的发射光谱都为垂直发射。

### 专业术语说明：

热电光电：包括热源、散热器、光伏电池和散热系统等的装置。用于将热能转化为电能。

热发射器：在加热时发出热辐射的部件。

### 参考资料：

[1] 穆罕默德ZH。采用转移矩阵法计算多层薄膜的菲涅尔系数 $t_{mm}[C]$ //IOP会议系列：材料科学与工程。IOP出版公司，2019年，518年，（3）：03,2026年。

[2] 卡西迪斯，锡普卡斯一世。具有相干、部分相干和非相干干涉的光学多层系统的一般转移矩阵方法。应用光学学，2002年，41（19）：3978-3987。

[3] 王H，AlshehriH，SuH，等。具有空气中优异热稳定性的超薄超薄多层选择性太阳能涂层的设计、制造和光学表征。太阳能材料和太阳能电池，2018,174：445-452。

[4] LenertA，BiermanDM，NamY，等。一种纳米光子子的太阳能热光电器件。自然纳米技术，2014,9（2）：126-130。

[5] <https://refractiveindex.info/>（折射率索引数据库）

[6] 樱井A，YadaK，村村T等。采用贝叶斯优化技术设计的超周期多层超材料的超箭头波段波长选择性热发射。ACS中央科学杂志，2019年，5（2）：319-326。