

物理实验



汽车车窗玻璃膜上出现超长亮线机理的探究

吴澄迪 张德邻 雷科建 吴青林

(华中师范大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430079)

摘要 随着膜技术的发展,在汽车贴膜上的应用也越来越多,在生活中发现的奇特现象也越来越多^[1],在本文中,根据发现“透过车窗玻璃膜观察路灯时会出现一条超长的亮线”这一现象,进行机理上的初步探究。本文先进行初步分析:运用光学知识分析以及 Matlab 仿真分析推断可能的结构与机理——在光源到人眼这一光路中一定存在某一超细的细缝(丝)或光栅结构,接着实验验证了相关光学理论,并相继观察了别的光源,判断出是由于汽车膜中的特殊光栅结构导致的“超长亮线”这一现象,接着搜寻相关资料去找出汽车膜中这一特殊的结构,得出结论。

关键词 光学;膜;衍射;实验

RESEARCH ON THE MECHANISM OF SUPER-LONG BRIGHT LINES ON AUTOMOBILE WINDOW GLASS FILM

WU Chengdi ZHANG Delin LEI Kejian WU Qinglin

(College of Physics Science And Technology, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079)

Abstract With the development of film technology, there are more and more applications in automotive film, and more and more peculiar phenomena are found in life^[7]. A super-long bright line will appear when the phenomenon occurs, and a preliminary exploration of the mechanism is carried out. This paper first conducts a preliminary analysis: using optical knowledge analysis and Matlab simulation analysis to infer possible structures and mechanisms—there must be an ultra-fine slit (wire) or grating structure in the optical path from the light source to the human eye, and then experimental verification. He studied the relevant optical theory, and observed other light sources one after another, and judged that the phenomenon of “ultra-long bright lines” was caused by the special grating structure in the automotive film. structure, draw conclusions.

Key words optics; film; diffraction; experiment

1 问题的提出

有关汽车车窗玻璃有一奇特的现象,透过贴有防晒膜的车窗玻璃观察路灯时,出现了一条极长的亮线(见图1)。

直接透过没有贴膜的车窗玻璃则观察不到这样的亮线。因此初步判断这一现象和车窗玻璃上贴的膜有关。与汽车贴膜的相关文献主要研究该膜的制作方法、热学性质、力学性质和部分光学性质^[2,3],并没有提及这种现象。本文将通过运用光学理论分析和实验验证及探究对该现象进行讨

收稿日期: 2022-03-05

通讯作者: 吴青林,男,副教授,研究方向为光学精密测量,qlwu@mail.ccnu.edu.cn。

引文格式: 吴澄迪,张德邻,雷科建,等. 汽车车窗玻璃膜上出现超长亮线机理的探究[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 113-118.

Cite this article: WU C D, ZHANG D L, LEI K J, et al. Research on the mechanism of super-long bright lines on automobile window glass film[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 113-118. (in Chinese)

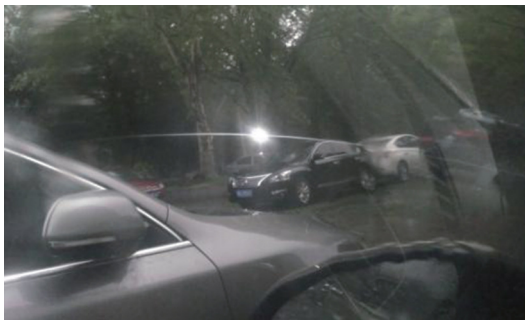


图1 透过车窗玻璃看光源

论。首先分析该现象可能会与夫琅禾费(Fraunhofer)单缝衍射及巴比涅原理(Babinet principle)有关,我们将通过实验来验证这两个原理所出现的现象,再通过进一步的对照实验——查找出可能导致出现该超长亮线的结构的所在位置,将理论现象与实际现象进行对比分析,分析导致出现该现象结构的大致参数,并查找资料来验证。

2 理论分析

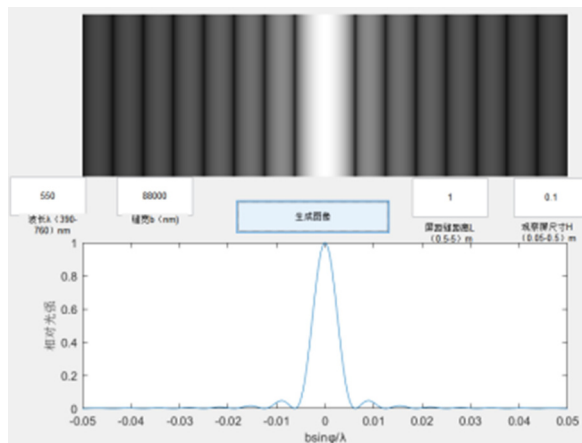
根据所观察的现象:这里的亮线是白色的而不是彩色的,推测这不是由缝宽较大的单缝或光栅常量较大的光栅衍射引起的。因为出现了超长亮线,所以会与单缝或者细丝衍射,或者光栅常量较小的光栅衍射有关。亮线有弧度则应该是因为车窗玻璃是曲面不是平面。这里需要探讨这条超长亮线出现的原因。

2.1 夫琅禾费(Fraunhofer)单缝衍射^[4]

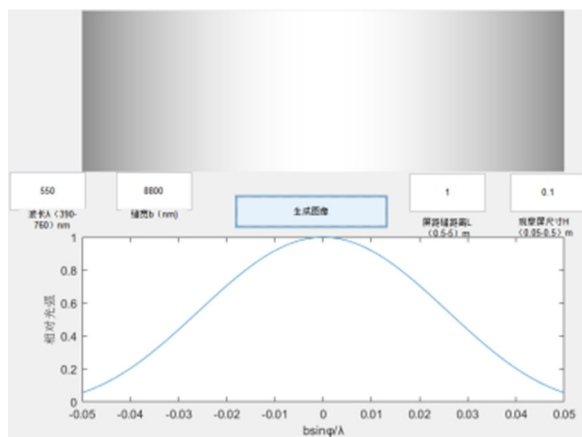
用 Matlab 模拟夫琅禾费单缝衍射得到其图像和光强分布曲线如图 2 所示(这里增加了对比度,实际几乎只能看见中央主极大)。

我们这里仅讨论中央亮斑宽度,可以知道中央亮条纹的长度与缝的粗细有关,缝越细,其中央亮条纹的角宽度越大。如果缝宽 a 接近于波长,那么中央亮纹的角宽度接近于 180° ,形成的图样就非常接近于图中的亮线。

实际的夫琅禾费单缝衍射如图 3(蓝光和白光在 $a=0.4\text{mm}$ 时的单缝衍射图样)所示,可以看出我们用 Matlab 模拟出的效果是十分逼真的。我们可以看见白光的单缝衍射图样出现了彩色的条纹,但是透过车窗上的防晒膜看见的白色亮线并不是彩色的,我们便需要继续探究。初步猜测是与缝的粗细有关,或者是彩色部分的光重叠,分辨不出来。



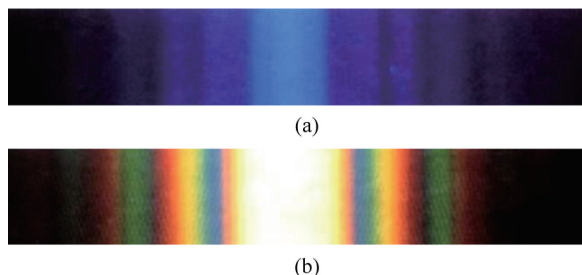
(a)



(b)

图2 用 MATLAB 模拟夫琅禾费单缝衍射(这里是用白色代替了 550nm 波长光的颜色)

(a) $\lambda=550\text{nm}$, $a=88000\text{nm}$; (b) $\lambda=550\text{nm}$, $a=8800\text{nm}$



(a)

(b)

图3 蓝光和白光的单缝衍射图

(a) 蓝光 $a=0.4\text{mm}$; (b) 白光 $a=0.4\text{mm}$

2.2 光栅(grating)^[5]

与单缝衍射类似,这里我们也用 Matlab 模拟,白光的光栅衍射如图所示,可以得到:光栅常量越小,中央主极大的宽度越大,且越不容易出现彩色条纹,而 N 越大,中央主极大的宽度则越小。

即使是 N 数量较多的光栅,也能出现较长白

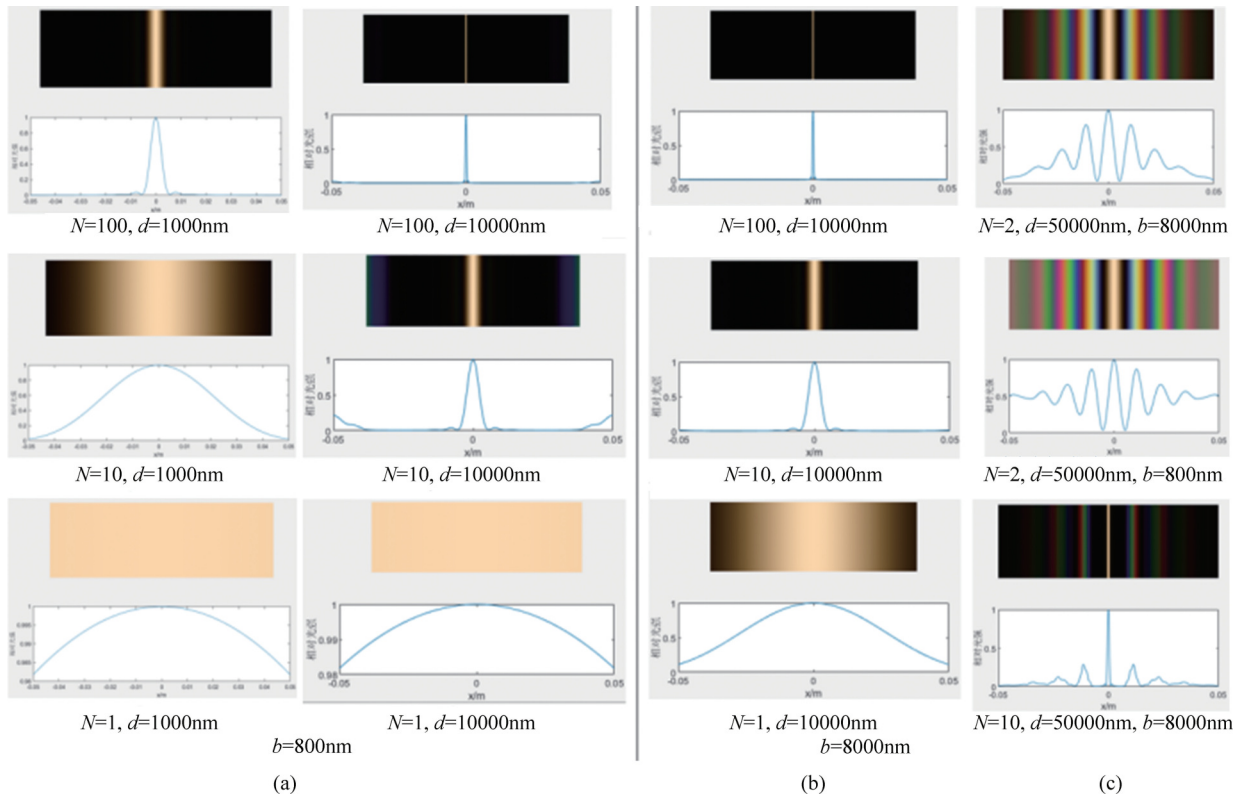


图4 用 Matlab 模拟白光衍射

色亮线的情况,条件是光栅常量与光波长相差不大(甚至比光波长还小),这样主极大的衍射角将变得很大。(可以参考下文 4.3 中的图 12)

2.3 巴比涅原理(Babinet principle)^[6]

前面得出了极细的细缝(或光栅常数极小的光栅)可以出现超长亮线的现象,其实其互补的结构也能出现超长亮线。除了几何像点之外,两个互补屏上的衍射图样是完全一样的(如图 5 所示,(a)~(d)为白光衍射图案,用于规则排列的孔径和互补屏,其形状为圆形加号;(e)和(f)为矩形孔和互补屏的规则阵列的衍射图样)^[7]

因此,直径接近于波长的细丝也能形成图中的亮线。

3 实验验证

3.1 验证夫琅禾费单缝衍射

这里我们用了红色激光以及白光进行夫琅禾费单缝衍射实验并得到图 6 的实验结果。结果符合单缝衍射的理论,但可以看见红光的中央亮条纹的宽度并不大,这和缝宽过大有关;白光的实验现象中我们用的并非点光源,所以和红光的不同,

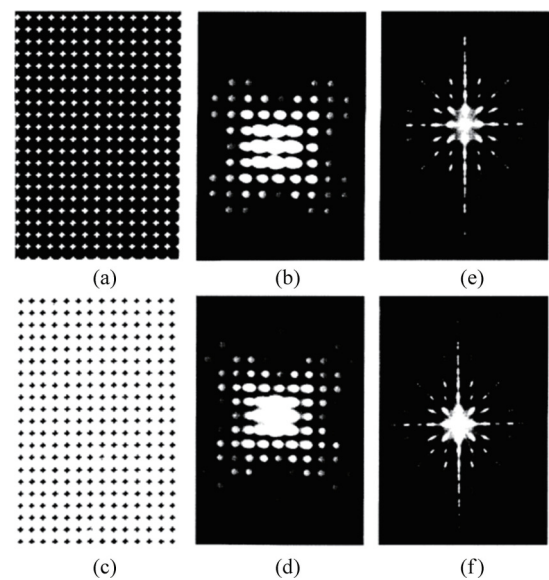


图5 巴比涅原理(白光衍射)

(a) 圆形加号形状规则阵列的孔径屏;(b) 圆形加号形状规则阵列的孔径屏下的白光衍射图案;(c) 圆形加号形状规则阵列孔径的互补屏;(d) 圆形加号形状规则阵列孔径互补屏下的白光衍射图案;(e) 矩形孔径屏下的白光衍射图案;(f) 矩形孔径互补屏下的白光衍射图案

是一大片,这里只能看出整体的条纹较宽而不能分辨出级次且未发现彩色的条纹。

透过车窗看见的白色细长亮线是没有彩色的成分的,我们认为是和缝宽(光栅常量)过小有关。

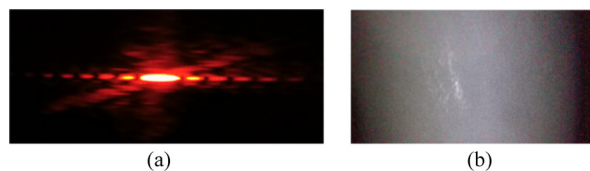


图6 单缝衍射实验图
(a) 红光单缝衍射; (b) 白光单缝衍射

3.2 验证细丝衍射

这里我们用红色激光以及白光进行了细丝衍射,发现实验结果(见图7(a))与单缝衍射的实验结果类似,在误差允许的范围内是满足巴比涅原理的。从细丝衍射的实验结果可以看出都产生了细长的亮线,与汽车玻璃上出现的亮线较为接近。这里我们用的细丝是肉眼可见的,而车窗上的‘细丝’是肉眼看不见的,可推出汽车玻璃上出现的亮线应该更长,实际现象也如此。

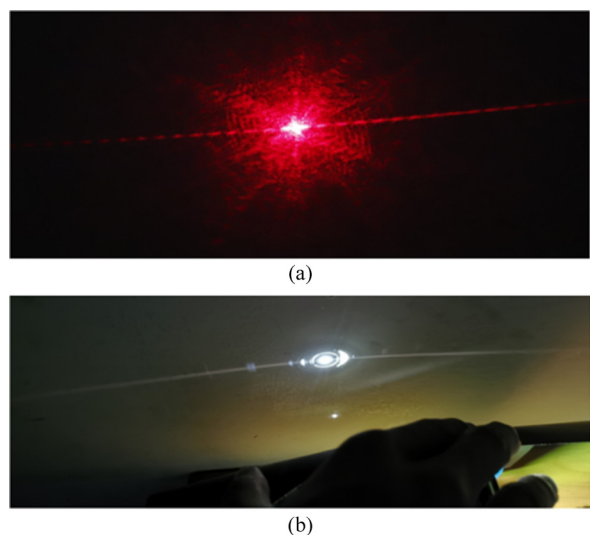


图7 细丝衍射实验图
(a) 红光细丝衍射; (b) 白光细丝衍射

图7(a)的分级现象比较明显,是由于用的是单色(红色)光照射,较容易分辨出不同级次(暗亮较为分明)且细丝的宽度相较光波长还是很大,但当离观测屏更远时,前几个级次就几乎不能分辨出来,于是乎就能看见一条“完整”的亮线。图7(b)的白光衍射则很难分辨出级次,看上去像是一条完整的亮线。(这里我们用的光源实际是用强白光透过一小孔得到的,因此出现了圆孔衍射的

现象,再由于其他打在屏上的白光也会影响衍射的结果。)能够看出白光的细丝衍射也出现了较长的亮线,且没有出现彩色部分,这个和车窗玻璃上出现的亮线很接近了。

我们作出进一步结论,光路中必定存在超细的细缝(丝)或光栅常量超小的光栅。

4 实践探究

4.1 初步探究

如果是狭缝的话,可能是镜头、车窗玻璃或者路灯玻璃罩上有细小的裂纹;如果是细丝,可能是镜头、车窗玻璃或者路灯玻璃罩上粘了细丝线之类,也可能是镜头上沾上了指纹。

(1) 首先排除镜头,没有裂缝和细丝,也没有指纹印,另外,转动镜头拍摄时,亮线与地平线夹角始终不变,就是说,光学结构不在拍摄的设备上。

(2) 其次排除路灯玻璃罩上有裂缝或细丝。

a. 检查玻璃罩,没有裂缝和细丝

b. 透过同一块车窗玻璃,拍摄手电筒和太阳,也出现亮线,证明和路灯玻璃罩无关(见图8)。

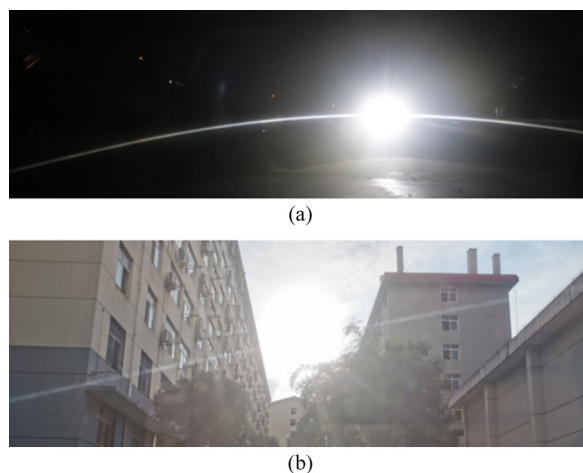


图8 观察其他光源
(a) 手电筒; (b) 太阳

(3) 然后排除车玻璃

透过贴有车膜的车窗看到亮线,但是透过未贴膜的车窗玻璃观察不到这样的亮线(见图9)。

(4) 最后只剩下防晒膜,查资料,确定防晒膜是何种结构,这里我们推测是车窗玻璃上会有很细



(a) (b)

图9 透过不同车窗观察路灯

(a) 前风窗玻璃(未贴膜); (b) 侧窗玻璃(贴膜)

的细丝或者光栅常量很小的光栅结构。我们在贴有防晒膜的车窗玻璃一侧任意位置观察太阳都有超长亮线,说明不可能只有一根细丝,必定是光栅结构。

4.2 查资料验证

“3M 创新科技产品晶锐光学微附汽车隔热膜,运用 240 层多层光学微附膜为基材并导入纳米科技,达到高透光、高隔热、高阻隔红外线与紫外线效果。”

图 10 为 3M 汽车隔热膜结构图。

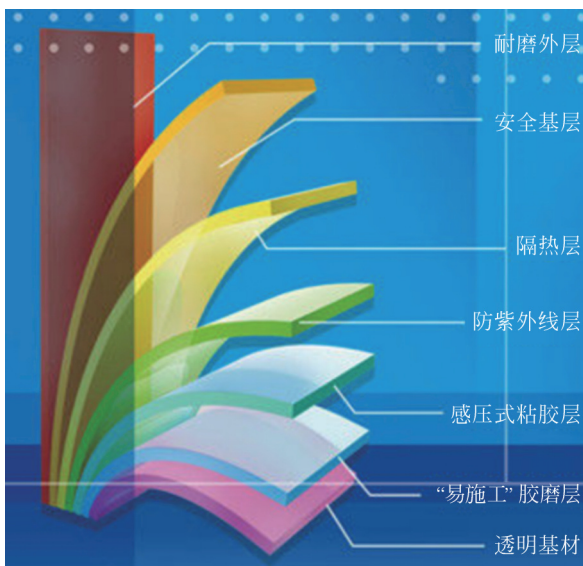
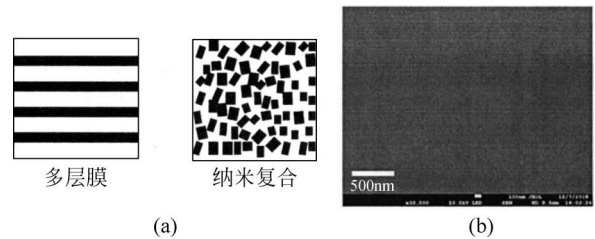


图 10 3M 汽车隔热膜结构图

因为透过贴膜车窗观察到的亮线很长(见图 8,亮线占尽了拍摄的屏幕),可推断光栅常数应与可见光波长量级接近甚至更小。查找纳米薄膜相关资料(见图 11):

从图 11(a)、(b)中可以看出汽车膜有类似光栅的结构,其光栅常数在几纳米到几十个纳米,根据光栅理论以及用 Matlab 模拟的白光的光栅衍



(a) (b)

图 11 某纳米膜结构图

(a) 不同涂层复合的结构示意图; (b) PVB/CsxWO3/ZnO 纳米复合隔热膜材料的 SEM 图

射图可以得出中央主极大的衍射角是很大的,符合我们所观察到的结果。

4.3 讨论

我们发现用单色激光透过细丝(缝)时,也能出现像图 1 那样的细长亮线,仔细观察亮线,发现亮线其实是有很多级的,但是一定距离下观察则会分辨不出级次,几乎只能看见一条长线,这也有可能是形成细长亮线的原因之一。

我们用 Matlab 模拟了 $N=300, d=20\text{nm}, b=10\text{nm}$ 的白光衍射(图 12),发现即使 N 很大,但当光栅常量很小(几十个纳米)时,依旧能出现主极大占主导且仅为白光的情况(这里符合 2.2 中我们得出的结论),再根据所查到的纳米膜资料(图 11(b)中可以看见较密的光栅结构,500nm 中至少有几十个光栅缝),我们断定:汽车膜中必定有一种光栅常量为几纳米到几十纳米的光栅结构。

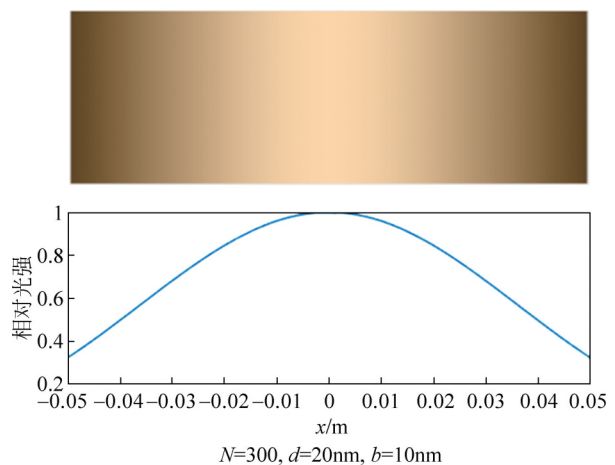


图 12 Matlab 模拟超小光栅常量的白光衍射

另外由于车窗玻璃不是平面,而是曲面的,所以出现的细长亮线也会才有一定弧度,图 1、图 7 都很好证实了。

5 结语

通过理论分析和实验验证,发现了透过汽车车窗膜看见超长亮线的原因是车窗上的隔热膜中存在一种光栅常量仅有几纳米到几十个纳米的光栅结构,其光栅常数很小,所以当光透过时可以衍射出很长的条纹,在强光下或者背景很暗时,我们能看见较亮较细的一级衍射光,所以我们看见的是一条很长的白色亮线。

我们从生活中的一个现象(透过车窗玻璃看见了超长亮线)出发,探究了该现象的本质,并试图研究产生该现象的结构。另外,通过查资料可以了解到,隔热膜的特殊结构除了防晒、防紫外线、防爆,还有双折射的光学特性^[1],或许以后还能从别的现象中找到隔热膜的新特性。到此为止,我们初步探究了车窗上出现细长亮线的原因,至于隔热膜中更具体的结构还需借助分辨率极高的仪器来探究,如扫描电镜。

参 考 文 献

- [1] 刘子健,高新红,王福合.汽车贴膜上出现彩色条纹的机理研究[J].物理与工程,2020,30(3):103-108.
LIU Z J, GAO X H, WANG F H. Research on the mechanism of color stripes appearing on automobile films[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(3): 103-108. (in Chinese)
- [2] 吴珊妮.纳米多层隔热膜的制备及性能研究[D].海南:海南大学,2019.
- [3] 张建军.汽车前风窗玻璃贴膜的光热性能评价[J].玻璃,2020,47(7):48-54.
ZHANG J J. Evaluation of photothermal performance of automotive front windshield film[J]. Glass, 2020, 47(7): 48-54. (in Chinese)
- [4] 姚启钧.光学教程[M].5版.北京:高等教育出版社,2014:85.
- [5] 姚启钧.光学教程[M].5版.北京:高等教育出版社,2014:93.
- [6] 赵凯华.《新概念物理教程》光学[M].北京:高等教育出版社,2005:4,169.
- [7] Eugene Hecht. Optics-5 edition[M]. Adelphi University: Pearson. 2017: 532.

(上接第112页)

参 考 文 献

- [1] 穆良柱.什么是ETA物理认知模型[J].物理与工程,2020,30(1):29-33.
MU L Z. What is ETA physical cognition model[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(1): 29-33. (in Chinese)
- [2] 《高等学校课程思政建设指导纲要》.(2020-06-01). http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202006/t20200603_462437.html
- [3] 王宝军.大学理科专业课程思政的特点和教学设计[J].中国大学教学,2019(10):37-40.
WANG B J. Characteristics and teaching design of ideological and political education for science majors in universities[J]. China University Teaching, 2019(10): 37-40. (in Chinese)
- [4] 于歆杰.合五为一连通课程思政建设的最后一公里[J].中国大学教学,2021(8):28-34,41.
YU X J. The last mile of the ideological and political construction of the curriculum is connected by the combination of five[J]. China University Teaching, 2021(8): 28-34,41. (in Chinese)
- [5] 杨祥,王强,高建.课程思政是方法不是“加法”——金课、一流课程及课程教材的认识和实践[J].中国高等教育,2020(8):4-5.
YANG X, WANG Q, GAO J. Ideological and political education is a method, not an addition—Understanding and

Practice of golden curriculum, first class curriculum and curriculum materials[J]. China Higher Education, 2020(8): 4-5. (in Chinese)

- [6] 关丽,王淑芳.物理学类课程思政建设成效评价体系的思考[J].物理与工程,2022,32(1):179-183.
GUAN L, WANG S F. Thinking on the evaluation system of ideological and political education in physics courses[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(1): 179-183. (in Chinese)
- [7] 李鹏,李志坚,马杰.课程思政的关键在于“潜移默化”和“润物无声”——大学物理课程开展课程思政的实践与思考[J].物理与工程,2022,32(1):184-189.
LI P, LI Z J, MA J. The key of curriculum ideology and politics lies in “imperceptible influence” and “moistening things silently”—The practice and thinking of carrying out curriculum thought and politics in college physics course[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(1): 184-189. (in Chinese)
- [8] 许祥云,王佳佳.高校课程思政综合评价指标体系构建——基于CIPP评价模式的理论框架[J].高等教育管理,2022(1):47-60.
XU X Y, WANG J J. Construction of the comprehensive evaluation index system of ideological and political education in colleges and universities—Based on the theoretical framework of CIPP evaluation model[J]. Higher Education Management, 2022, (1): 47-60. (in Chinese)