

负折射率材料及其成像规律

——由2020年北京普高适应性测试物理卷第14题引发的思考

赵芸赫

(首都师范大学附属中学 北京 100048)

马宇翰

(中国工程物理研究院研究生院 北京 100193)

(收稿日期:2020-11-17)

摘要:针对最近热议的2020年北京普高适应性测试物理卷第14题中所涉及的负折射率材料,文中对这类材料的研究历史与前沿进展进行了简要介绍,对该问题中出现的“是否超光速”这一争议点进行了讨论.然后根据光在负折射率材料中的传播规律,对一块由负折射率材料构成的具有一定厚度的平板介质的成像特点进行了计算,得到了其成实像的判定条件,并与正折射率材料的成像特点进行了对比.最后,利用Matlab模拟直观展示了物体所发出的不同入射角度的光线经过不同折射率组合的介质后的传播规律.

关键词:负折射率 左手材料 光学成像 负折射率材料成像特点

2020年北京市普通高中学业水平等级性考试适应性测试物理卷的第14题描述了一道关于负折

射率材料的成像问题,笔者注意到这道题目引发了不少物理教师和学生的热议,问题原文如图1所示.

已知天然材料的折射率都为正值($n > 0$).近年来,人们针对电磁波某些频段设计的人工材料,可以使折射率为负值($n < 0$),称为负折射率介质.电磁波从正折射率介质入射到负折射率介质时,符合折射定律,但折射角为负,即折射线与入射线位于界面法线同侧,如图1所示.

点波源S发出的电磁波经一负折射率平板介质后,在另一侧成实像.如图2所示,其中直线SO垂直于介质平板,则图中画出4条折射射线(标号为1, 2, 3, 4)之中,正确的是()

- A.1 B.2
C.3 D.4

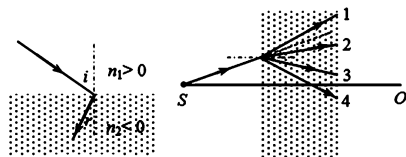


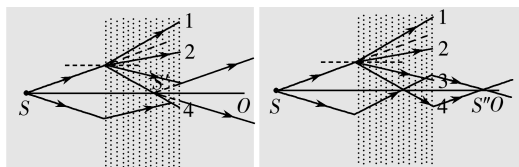
图1

图2

图1 北京市普通高中学业水平等级性考试适应性测试第14题

对于该问题情境,学生依据题意及图2的示例,可判断出本题的答案为D.

可以看到,该题在激发学生关注科学前沿,培养学生科学思维方面起到了很好的促进作用.考虑到本题背景所涉及的“负折射率材料”的研究历史与前沿进展,大家对于本题的争论点,以及这个问题中可以继续深挖的与中学物理教学相结合的内容,本文将如下3个问题进行讨论:(1)问题中所涉及的负折射率材料是否存在?(2)根据题目中答案D所显示的光线方向,部分同学认为这意味着此种材料的



(a)

(b)

图2 符合题意的光线3和4所对应的成像光路

相对折射率的绝对值小于1(从图中看来,折射角大于入射角),即光在该材料中的光速超过在真空中的光速,如何解释?(3)这种负折射率材料的成像与中学物理中所涉及的正折射率材料的成像(如透镜的成像)有什么区别?

1 负折射率材料的发展与应用

1.1 Veselago 和他的“负折射率材料”

根据麦克斯韦建立的电磁波理论,光的折射率可以利用所处介质的电磁学性质来描述,即 $n = \sqrt{\epsilon\mu}$. ϵ 和 μ 分别是介质的介电常数和磁导率. 已经被广泛了解和研究的右手材料具有正的折射率,而在上世纪 60 年代, Veselago 从理论上推广了斯涅耳定律^[1]. 他发现,当定义折射率为 $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$ 时,且折射角也相对于传统折射角看作是负角度时,斯涅耳定律依然成立,即预言了“负折射率材料”的存在. 根据 Veselago 的理论预言,可从光路图的角度对光在正/负均匀折射率介质中的折射规律进行一个整理,如图 3 所示.

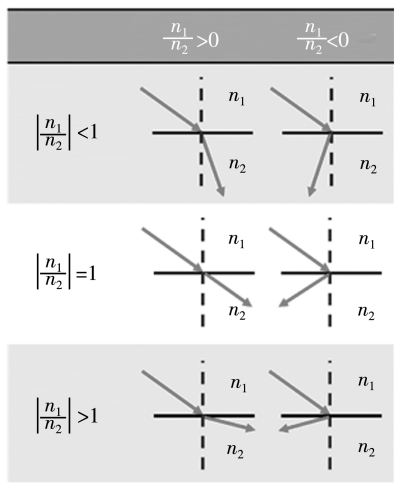


图3 光在正/负均匀折射率介质中的折射规律

但在 Veselago 的研究发表后的近 30 年内,由于人们在自然界中并没有找到 Veselago 所设想的 ϵ 和 μ 同时为负值的材料,对于负折射率材料的研究也渐渐被搁浅.

1.2 负折射率材料的实验研究

1996—1998 年间,美国加州大学圣迭戈分校的 Smith 等人,在微波实验中采用 Pendry 所提出的以一定间距周期排列的铜棒状阵列结构^[2,3],首次实现了在同一块材料里,让 ϵ 和 μ 同时为负值. 进一步地, Smith 等人利用这种复合材料观察到了负折射现象,从实验中证实了左手材料折射率的测量值确

实是负值^[4].

紧接着,2003 年,首先是美国 Boeing Phantom Works 小组的 Parazzoli 等人重复并改进了 Smith 等人的实验,他们的实验数据和模拟计算非常吻合,都显著而清晰地展示了负折射现象^[5]. 与此同时,美国 MIT 的 Houck 小组从实验上得到了不同入射角下测量到的负折射率是一致的,这一结果完全符合斯涅耳定律^[6].

至此,在 21 世纪初的这些实验从现象和定量的角度验证了 Veselago 的理论预言. 后来随着人工光子晶体结构研究的发展,爱荷华州大学的 S. Foteinopouloud 等提出了不借助金属,完全利用电介质材料组成的光子晶体来实现左手材料. 此后,在人工光子晶体中实现负折射的现象也得到了科学家们的实验验证^[7].

在此之后,对于负折射率材料的研究主要集中在可见光波段,2007 年,美国加州技术研究所的 H. J. Lezec 设计完成了一种金属-绝缘体-金属的特别波导结构,实现了该设计方式在光谱为蓝绿光谱区域中的负折射现象^[8],而后其他科学家也相继实现了在不同可见光波段的负折射率现象^[9].

2 对问题争议点“是否超光速”的讨论

实际上,根据已有的实验报道,现有的左手材料折射率都小于-1. 那么首先从这个问题的题设角度来说,未特殊说明点光源 S 所处的介质为真空条件,因此,只要满足该负折射率材料的折射率绝对值与光源 S 的背景介质折射率之比小于 1 的条件,就可以实现光线 4 的折射方向. 在这种情况下,也就不存在介质中光速超过真空中光速的悖论. 例如,光源所在环境折射率为 $n_1 = 2$,入射介质的折射率为 $n_2 = -1.5$.

若考虑点光源 S 所处的介质为真空的情形,这时就需要从波的群速度与相速度的角度来解释. 其实在中学阶段,对于波来说并未区分这两个概念,这是因为群速度和相速度只有在非单频波通过频散介质中才有差别,而在中学物理范围内通常不涉及这种情况.

实际上,相速度是跟随某一个相位移的点的速度(对应中学阶段 $v = \frac{c}{n}$ 中的 v),不代表波的能量传播的速度. 而波速一般指波能量传递速度,也就是群速度,即波包的包络在空间中所传递的速度. 对于左手材料来说,如光子晶体,一般都需要对材料折射

率的空间分布进行周期性调制,这就会改变介质的色散关系.因此,在左手材料中,电磁辐射的相速度可能在一些特定情况下(出现异常色散的情形)超过真空中的光速,但这并不表示任何超光速的信息或是能量转移.因为群速度才是能量或信息顺着波动传播的速度.物理学家阿诺索末非等对此皆有理论性描述.故从这点上来说,该问题也不违背物理规律.

3 负折射率材料的成像特点

本文一开始所列出题目的分析中,只定性地讨论了成实像的光路要满足的条件.现在,本文基于折射定律来具体计算和讨论物 S 的像 S' 的位置,进而分析对于这样一块负折射率平行板材料而言更为细致的成像规律.

首先,如图4所示,光的入射点和出射点分别为 A 和 A' ,入射角和折射角的大小分别为 θ_1 和 θ_2 .过 S 和 S' 的虚线为光轴,与光入射介质的界面交点为 B ,与光出射介质的界面交点为 B' .

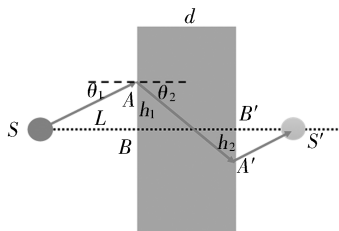


图4 物 S 经负折射率平板介质成像光路图
(另一条关于光轴对称的光线未作出)

图4中, $SB=L$, $AB=h_1$, $A'B'=h_2$, $B'S'=x$,介质的厚度为 d ,根据几何关系有

$$x = \frac{h_2}{\tan \theta_1} = \frac{d \tan \theta_2 - h_1}{\tan \theta_1} = \frac{d \tan \theta_2 - L \tan \theta_1}{\tan \theta_1} = d \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} - L \quad (1)$$

再利用折射定律,可得

$$\frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} = \frac{\sin \theta_2 \cos \theta_1}{\sin \theta_1 \cos \theta_2} = \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_2} = \frac{n_1}{n_2} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1}} \quad (2)$$

最终得到物像距 $SS' = L + d + x$ 为

$$SS' = d \left[\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 - 1}{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1}} + 1 \right] \quad (3)$$

因此,根据图4可知,物体 S 在介质后方成实像

的条件就是 $SS' > L + d$,代入即得

$$\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 - 1}{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1}} > \frac{L}{d} \quad (4)$$

显然,当 $\left|\frac{n_1}{n_2}\right| > 1$ 时,式(3)是关于 θ_1 的增函数,也就是该物体 S 的成像位置会随着其入射光线入射角的变化而变化,且入射角越大,物像距离越来越远.因此,只要物体所发出的各个方向的光线中,入射角大于某一特定角度,使得 $SS' > L + d$,均能在介质后面成实像.这就意味着,若物体所发出的光或者反射的光沿各方向都有,那么在两介质折射率满足 $\left|\frac{n_1}{n_2}\right| > 1$ 条件时,物体总能在这种负折射率介质后面成实像.

另一方面,若 $\left|\frac{n_1}{n_2}\right| < 1$,式(3)是关于 θ_1 的减函数,这就会导致物像距随着入射角的增大而减小.此时,在 $\theta_1 = 0$ 时,物像距取得最大值,为

$$SS'_{\max} \left(\left|\frac{n_1}{n_2}\right| < 1 \right) = d \left(\left|\frac{n_1}{n_2}\right| + 1 \right) \quad (5)$$

上式意味着,当

$$d \left(\left|\frac{n_1}{n_2}\right| + 1 \right) < L + d \quad (6)$$

也就是当物到介质表面的距离 $L > d \left|\frac{n_1}{n_2}\right|$ 时,在物体发出的光中,无论从什么角度入射介质,都无法在介质后方成实像了.

此外,如图5所示,若物体沿着平行于介质表面移动,则像也会在介质后沿着相同方向移动等大的距离.

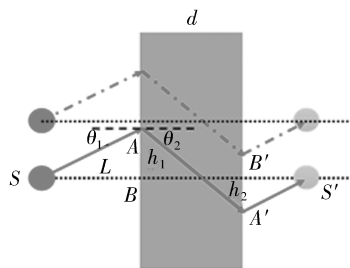


图5 物体沿平行于介质表面移动时像的移动

这表明,这种负折射率介质与我们熟知的正折射率介质制成的球面透镜不同,后者一般只有一个光轴.2003年美国西北大学的研究组用类似结构的光子晶体实现了负平板介质的成像,他们为了验证这种透镜不像传统透镜那样具有一个确定的主光

轴,将光源向上移动了4 cm,结果像也同样向上移动了相同的距离.这一现象可以在图6所示的实验结果中明显地看出^[10].

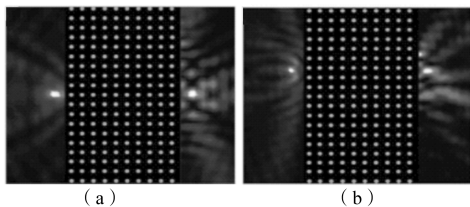


图6 负折射率材料平板成像实验

总的来说,当处于折射率为 $n_2 > 0$ 的正折射率介质中的物体经过这样一种折射率 $n_2 < 0$ 的负折射率材料制成的平板(以下简称“负平板介质”)后,与经过一正折射率材料制成的平板(以下简称“正平板介质”)所不同的是,它具有如下5条成像规律:

(1)物体经过这种“负平板介质”具体成实像还是虚像,与物体所发出光对介质的入射角 θ_1 ,物体距离透镜的距离 L ,介质厚度 d ,以及折射率比 $\left| \frac{n_1}{n_2} \right|$ 均有关系.而“正平板介质”仅能成虚像.“负平板介质”成实像的判别条件见上文式(4).

(2)当 $\left| \frac{n_1}{n_2} \right| > 1$ 时,若物体发光各方向都有,则总能在“负平板介质”后方成实像;若物体发光为单向的,则在入射角大于某一特定角度后(不超过全反

射角),可以在“负平板介质”后方成实像.

(3)当 $\left| \frac{n_1}{n_2} \right| < 1$,当物到“负平板介质”表面的距离 $L > d \left| \frac{n_1}{n_2} \right|$ 时,物体发出的光无论以什么方向入射介质,都无法在“负平板介质”后方成实像了.

(4)无论“负平板介质”成实像或是虚像时,物距与像距并不是一一对应的关系,一个物距所对应的像距是一个范围,“正平板介质”成虚像特点与之相同.在这个范围内“负平板介质”成实像时都能承接到该物体的清晰的像.

(5)这种“负平板介质”的光轴不止一个,所有垂直于介质表面的直线都可以视为光轴.“正平板介质”在这一点上与之相同,而与我们熟知的正折射率介质制成的球面透镜不同.

最后,基于上述理论计算,本文利用 Matlab 模拟了物体所发出的不同入射角的光线经过不同折射率组合的介质后的传播规律.如图7所示.图7模拟中的参数分别为,负平板介质厚度 $d=2$ cm,物体置于坐标原点且距离负平板介质 $L=4$ cm处.3条入射光线的入射角选为 $\theta_1 = \frac{\pi}{10}$, $\theta_1 = \frac{\pi}{6}$ 和 $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$,在图7中分别在其图像旁标出.

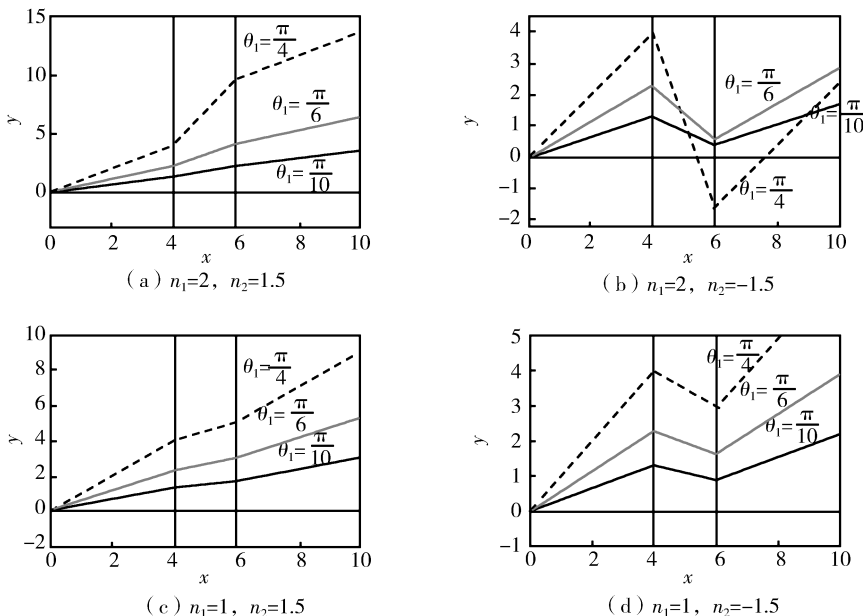


图7 物体所发出的不同入射角度的光经过不同折射率组合的介质后的光路图

图7(a)和(c)所示为光从正折射率介质入射到正折射率介质的情况,这与中学物理课堂中所习得的折射规律相符;而图7(b)和(d)所示为光从正折

射率介质入射负折射率介质的情况,不难看出,图中光路的情况与前面的理论分析一致.特别地,在图7(b)的3条光线中,可以看出 $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ 的光线会使得物

体在负平板介质后成实像,这与本文第3小节中总结的负折射率负平板介质成像规律是一致的.通过改变入射角 θ_1 ,物体距离透镜的距离 L ,透镜厚度 d ,以及折射率比 $\left|\frac{n_1}{n_2}\right|$,还可以得到更多丰富的光路情况,在此便不再赘述.

4 总结与讨论

在前三节中,本文从近期北京普高学业水平等级性考试适应性测试中的一道物理试题出发,对其所涉及的关于“负折射率”材料的背景,这种材料的前沿研究和应用前景,并以负折射率平板介质为例,对其成像规律进行了分析讨论.

其实,关于负折射率介质还有可以进一步拓展考核的方向,例如其全反射性质、更多以其制成的不同几何形状的透镜的成像规律等等,这些都是值得探讨和引发师生深入思考的问题.本文的讨论与分析为将“负折射率介质”这一新情境融入中学物理光学部分的教学提供参考.

参考文献

- 1 Veselago, Viktor G, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Sov. Phys. Usp, 1968, 10(4): 509~514
- 2 Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J., & Youngs, I. Extremely low frequency plasmons in metallic meso-

- structures[J]. Physical review letters, 1996, 76(25), 4773
- 3 Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. Low frequency plasmons in thin - wire structures [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1998, 10(22), 4785
- 4 Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. science, 2001, 292(5514), 77~79
- 5 Parazzoli C G, Greegor R B, Li K, et al. Experimental Verification and Simulation of Negative Index of Refraction Using Snell's Law [J]. Physical Review Letters, 2003, 90(10): 107401
- 6 Houck, Andrew A, Brock, Jeffrey B, Chuang, Isaac L. Experimental Observations of a Left - Handed Material That Obeys Snell's Law [J]. Physical Review Letters, 2003, 90(13): 137401
- 7 徐耿钊, 张伟华, 朱星. 奇妙的左手材料[J]. 物理, 2004(11): 801~808
- 8 Lezec H J, Dionne J A, Atwater H A. Negative Refraction at Visible Frequencies [J]. Ence, 2007, 316(5823): 430~432
- 9 Dolling G, Wegener M, Soukoulis C M, et al. Negative - index metamaterial at 780 nm wavelength [J]. Optics Letters, 2006, 32(1): 53~55
- 10 Parimi P V, Lu W T, Vodo P, et al. Photonic crystals: Imaging by flat lens using negative refraction [J]. Nature, 2003, 426(6965): 404~404

Negative Refraction Index Materials and Their Imaging Laws

Zhao Yunhe

(Capital Normal University High School, Beijing 100048)

Ma Yuhan

(Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100193)

Abstract: Aiming at the negative-index material involved in the 14th question of recently discussed 2020 Adaptability test of Beijing senior high school academic level-grading examination, this article gives a brief introduction to the research history and progress of this kind of material, and the controversial point that "whether it is faster than light" is discussed. Then according to the law of light propagation in the material with negative index of refraction, the imaging characteristics of the plate medium with a certain thickness made of material with negative index of refraction are calculated, and the conditions for determining its real-imaging process are obtained. The imaging characteristics are compared with the positive-index one. Finally, simulation by Matlab is used to visually present the propagation feature of light with different incidence angles emitted by the object after passing through the medium of different refractive index combinations.

Key words: negative index of refraction; left-handed materials; optical imaging; imaging characteristics of negative-index material