

·光电器件与材料·

空气间隙对多层衍射光学元件衍射效率的影响

龚 豪, 邸 旭, 薛常喜

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要: 基于多层衍射光学元件衍射效率的表达式, 推导出了双层衍射光学元件空气间隙与衍射效率的关系。分析了空气间隙、周期、入射波段对衍射光学元件在可见光波段、红外中波、红外长波衍射效率的影响。以 $400\sim 700\text{ nm}$ 、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段为例, 分别以聚碳酸酯(PC)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为可见光波段双层衍射光学元件第一、第二层的基底, 以硫化锌(ZnS)和硒化锌(ZnSe)为红外中波和长波双层衍射光学元件第一、第二层基底材料。在特定周期情况下, 确定了双层衍射光学元件空气间隙的大小对多层衍射光学元件的衍射效率的影响。

关键词: 衍射效率; 空气间隙; 微结构高度; 周期

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-06-0022-04

Air Gap on Diffraction Efficiency for Multilayer Diffractive Optical Element

GONG Hao, DI Xu, XUE Chang-xi

(Department of Optics and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the expression of diffraction efficiency for multilayer diffractive optical element, the relationship between the air gap of a two-layer diffractive optical element and diffraction efficiency is derived. The influence on diffraction efficiency of the diffraction optical element in visible spectrum, infrared medium wave and infrared long wave from air gap, period and incident wave is analyzed. Taking $400\sim 700\text{ nm}$, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ and $8\sim 12\ \mu\text{m}$ wavelength as examples, with polycarbonate (PC), poly methyl methacrylate (PMMA) as the first layer basement and the second layer basement of the two-layer diffraction optical element in visible wavelength respectively, with zinc sulfide (ZnS) and zinc selenide (ZnSe) as the first layer basement and the second layer basement of the two-layer diffraction optical element in infrared medium wave and infrared long wave. In particular period situation, the influence on diffraction efficiency of multilayer diffractive optical element from the size of air gap of two-layer diffraction optical element is determined.

Key words: diffraction efficiency; air gap; micro-structure height; period

单层衍射光学元件在工作波长偏离设计波长时, 衍射效率急剧下降, 影响系统在可见光波段、红外波段的性能^[1-2]。近年来出现的多层衍射光学元件克服了这一缺陷, 实现了宽波段衍射效率的提高^[3-6]。目前衍射效率是评价衍射光学元件性能的重要参数, 衍射效率的大小决定着衍射光学元件的应用性能。因此, 分析可见光波段、红外波段双层

衍射光学元件之间空气间隙大小对其衍射效率的影响有重要意义。根据单层衍射光学元件衍射效率与周期关系的表达式, 推导出双层衍射光学元件衍射效率与周期关系的表达式; 然后, 建立双层衍射光学元件衍射效率与空气间隙关系的数学分析模; 最终, 以聚碳酸酯(PC)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和硫化锌(ZnS)、硒化锌(ZnSe)分别为可见光

收稿日期: 2015-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61108044); 吉林省自然科学基金(20150101062JC)

作者简介: 龚豪(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事衍射光学方面的研究。

段和红外中波、长波的基底材料举例,给出了在可见光波段和红外波段内获得所需衍射效率,空气间隙大小的范围。

1 基本原理

1.1 衍射光学元件设计理论

如图1所示,在标量衍射理论中,浮雕表面的衍射光学元件的衍射效率表达式为^[7]

$$\eta_m^z(\lambda) = \text{sinc}^2[m - \phi(\lambda)] \quad (1)$$

其中, $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$; m 为衍射级次; $\phi(\lambda)$ 为位相延迟。通常一级衍射最重要,因此尽可能使一级衍射的效率达到最大。由式(1)可知,当 m 和 $\phi(\lambda)$ 都为1时,衍射效率为100%。这表明在标量近似下,衍射效率可以实现100%。

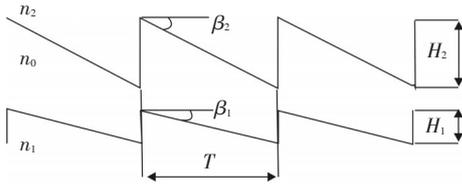


图1 多层衍射光学元件示意图

在文献[8]中,给出了多层衍射光学元件微结构高度 H_1, H_2 的表达式如下

$$\begin{cases} H_1 = \frac{\lambda_1(n_2(\lambda_2) - 1) - \lambda_2(n_2(\lambda_1) - 1)}{(n_1(\lambda_1) - 1)(n_2(\lambda_2) - 1) - (n_1(\lambda_2) - 1)(n_2(\lambda_1) - 1)} \\ H_2 = \frac{\lambda_2(n_1(\lambda_1) - 1) - \lambda_1(n_1(\lambda_2) - 1)}{(n_1(\lambda_1) - 1)(n_2(\lambda_2) - 1) - (n_1(\lambda_2) - 1)(n_2(\lambda_1) - 1)} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, λ_1, λ_2 是设计波长; $n_1(\lambda_1), n_2(\lambda_1), n_1(\lambda_2)$ 和 $n_2(\lambda_2)$ 是基底材料在波长 λ_1, λ_2 时的折射率。

参考文献[9],对于单层衍射光学元件,存在周期误差时,单层衍射光学元件的衍射效率表达式为

$$\eta = \eta_m \text{sinc}^2\left(\frac{T_1 - T_{10}}{T_{10}}\right) \quad (3)$$

$$\eta = \text{sinc}^2\left\{m - \frac{d_0}{\lambda}[n(\lambda) - 1]\right\} \times \text{sinc}^2\left(\frac{T_1 - T_{10}}{T_{10}}\right) \quad (4)$$

式(3)、式(4)中, T_{10}, T_1 分别为理论设计和实际工作的周期宽度。单层衍射元件的周期宽度误差如图2所示。

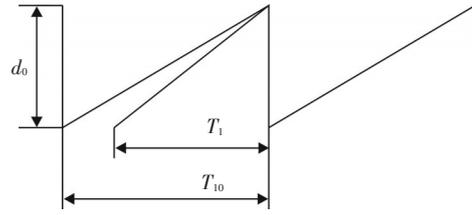


图2 单层衍射元件的周期宽度误差

1.2 空气间隙对其衍射效率的影响

图3是双层衍射元件的周期宽度误差。

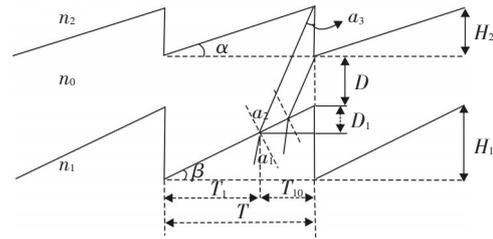


图3 双层衍射元件的周期宽度误差

由图3可知,入射光在周期 T_{10} 范围内,形成衍射光学元件形成杂散光,衍射光学元件有效工作周期是 T_1 ,周期 T 为衍射光学元件的理论设计周期。

根据几何关系和折射定律有下式

$$\tan\beta = \frac{H_1}{T} \quad (5)$$

$$n_1 \sin a_1 = n_0 \sin a_2 \quad (6)$$

$$a_3 = a_2 - \beta \quad (7)$$

$$\tan\beta = \frac{D_1}{T_{10}} \quad (8)$$

$$\tan a_3 = \frac{T_{10}}{H_2 + D + D_1} \quad (9)$$

联立式(1)~式(5),得衍射光学元件形成杂散光的周期 T_{10} 为

$$T_{10} = \frac{(H_2 + D)\tan[\arcsin(n_1 \sin a_1/n_0) - \beta]}{1 - \frac{H_1}{T}\tan[\arcsin(n_1 \sin a_1/n_0) - \beta]} \quad (10)$$

则衍射光学元件的有效工作周期 T_1 为

$$T_1 = T - T_{10} \quad (11)$$

参考文献[10],双层衍射光学元件衍射效率表达式为

$$\eta = \text{sinc}^2\left(m - \frac{(n_1(\lambda) - 1) \times H_1 + (n_2(\lambda) - 1) \times H_2}{\lambda}\right) \times \text{sinc}^2\left(\frac{T_1 - T}{T}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{T_2 - T}{T}\right) \quad (12)$$

双层衍射光学元件第二层的有效工作周期为理论设计周期,则 $\sin^2(\frac{T_2 - T}{T}) = \sin^2(0)$ 。

由式(10)、式(11)、式(12)可知,双层衍射光学元件空气隙间隔对衍射效率影响的表达式为

$$\eta = \sin^2(m - \frac{(n_1(\lambda) - 1) \times H_1 + (n_2(\lambda) - 1) \times H_2}{\lambda}) \cdot \sin^2(-\frac{T_{10}}{T}) \sin^2(0) \quad (13)$$

由于双层衍射光学元件之间的介质为空气,则 n_0 为 1。则双层衍射光学元件空气隙间隔对衍射效率影响的表达式为

$$\eta = \sin^2(m - \frac{(n_1(\lambda) - 1) \times H_1 + (n_2(\lambda) - 1) \times H_2}{\lambda}) \cdot \sin^2(0) \sin^2(-\frac{(H_2 + D) \tan[\arcsin(n_1 \sin a_1) - \beta]}{1 - \frac{H_1}{T} \tan[\arcsin(n_1 \sin a_1) - \beta]}) T \quad (14)$$

式中, H_1 、 H_2 分别表示双层衍射光学元件第一层、第二层的表面微结构高度; D 表示双层衍射光学元件的空气隙间隔; T_1 、 T_2 分别表示第一层、第二层衍射光学元件的有效工作周期宽度; T 表示衍射光学元件的理论设计周期宽度; β 表示双衍射光学元件第一层的倾斜因子。

2 实验结果

图4~图6表示在不同周期下,衍射光学元件衍射效率和空气隙间隔的关系。图7表示衍射光学元件衍射效率和空气隙间隔、波长的关系。

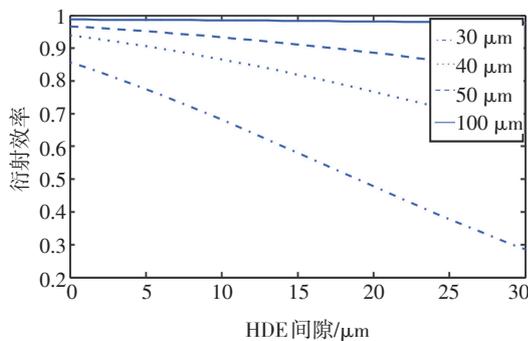


图4 不同周期下衍射效率与空气隙间隔的关系(400~700 nm)

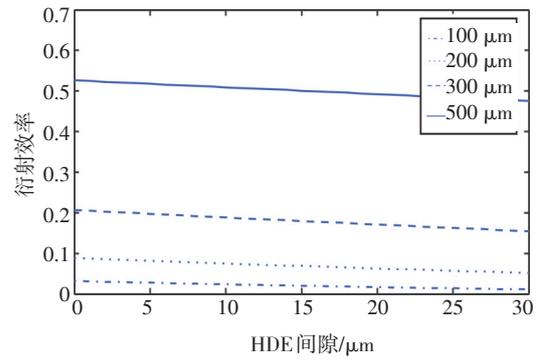


图5 不同周期下衍射效率与空气隙间隔的关系(3~5 μm)

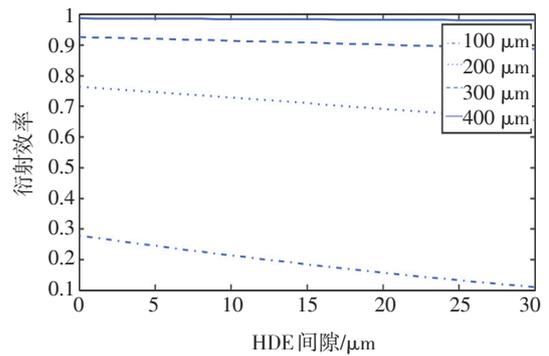


图6 不同周期下衍射效率与空气隙间隔的关系(8~12 μm)

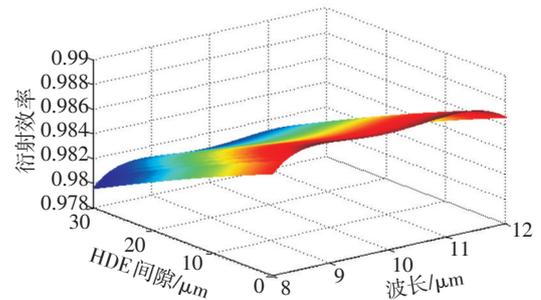


图7 衍射效率与空气隙间隔的关系(T=400 μm)

3 分析与讨论

3.1 可见光波段(400~700 nm)

PC、PMMA 为可见光波段双层衍射光学元件第一、第二层的基底。 H_1 、 H_2 分别为 13.180 6 μm、16.903 3 μm。

表1为双层衍射光学元件,周期宽度为 0 μm、

40 μm 、50 μm 、100 μm 和空气间隙为 0 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm 与衍射效率的关系。

表1 双层衍射光学元件,周期宽度为 0 μm 、40 μm 、50 μm 、100 μm 和空气间隙为 0 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm 与衍射效率的关系

空气间隙/ μm	0	10	20	30
周期宽度/ μm	$T=30$	$T=40$	$T=50$	$T=100$
	0.856 9	0.681 6	0.477 9	0.285 6
衍射效率	0.939 1	0.865 9	0.767 6	0.652 0
	0.967 0	0.933 4	0.886 2	0.827 1
	0.987 8	0.985 4	0.981 9	0.977 4

由表1可知,在可见光波段(400~700 nm),不同周期下,空气间隙大小对衍射效率的影响。当周期 $T=100 \mu\text{m}$ 时,空气间隙由 0 增大到 30 μm ,衍射效率由 98.78%降低到 97.74%,随着空气间隙的增大,对衍射效率降低不是很明显,在此空气间隙内,衍射效率整体偏高。当周期 $T=30 \mu\text{m}$ 时,空气间隙由 0 增加到 30 μm ,衍射效率由 85.69%降低到 28.56%,空气间隙增大,对衍射效率降低明显,在此空气间隙内,衍射效率整体偏低。

3.2 红外中波(3~5 μm)

硫化锌(ZnS)和硒化锌(ZnSe)为双层衍射光学元件第一、第二层的基底。 H_1 、 H_2 分别为 486.034 4 μm 、427.311 2 μm 。

表2为双层衍射光学元件,周期宽度为 100 μm 、200 μm 、300 μm 、500 μm 和空气间隙为 0 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm 与衍射效率的关系。

表2 双层衍射光学元件,周期宽度为 100 μm 、200 μm 、300 μm 、500 μm 和空气间隙为 0 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm 与衍射效率的关系

空气间隙/ μm	0	10	20	30
周期宽度/ μm	$T=100$	$T=200$	$T=300$	$T=500$
	0.031 7	0.023 5	0.016 7	0.011 2
衍射效率	0.088 4	0.075 0	0.062 8	0.051 8
	0.206 4	0.188 3	0.171 0	0.154 6
	0.526 0	0.509 1	0.492 2	0.475 5

由表2可知,在红外中波(3~5 μm),不同周期下,空气间隙大小对衍射效率的影响。当周期 $T=500 \mu\text{m}$ 时,空气间隙由 0 增大到 30 μm ,衍射效率由 52.60%降低到 49.22%,随着空气间隙的增大,衍射效率降低。当周期 $T=30 \mu\text{m}$ 时,空气间隙由 0 增加到 30 μm ,衍射效率由 3.170%降低到 1.120%,空气间隙增大,衍射效率降低。在红外中波,周期 T (100~500 μm)、空气间隙(0~30 μm)范围内,衍射效率整体偏低。衍射元件固有周期越小,整个空气间隙范围内,衍射元件的整体衍射效率越低。

3.3 红外长波(8~12 μm)

硫化锌(ZnS)和硒化锌(ZnSe)为双层衍射光学元件第一、第二层的基底。 H_1 、 H_2 分别为 134.466 1 μm 、121.777 7 μm 。

表3为双层衍射光学元件,周期宽度为 100 μm 、200 μm 、300 μm 、400 μm 和空气间隙为 0 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm 与衍射效率的关系。

表3 双层衍射光学元件,周期宽度为 100 μm 、200 μm 、300 μm 、400 μm 和空气间隙为 0 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm 与衍射效率的关系

空气间隙/ μm	0	10	20	30
周期宽度/ μm	$T=100$	$T=200$	$T=300$	$T=400$
	0.278 1	0.213 7	0.157 4	0.109 8
衍射效率	0.764 3	0.728 9	0.692 1	0.654 3
	0.926 7	0.914 6	0.901 7	0.888 0
	0.972 4	0.967 8	0.962 8	0.957 5

由表3可知,在红外中波(8~12 μm),不同周期下,空气间隙大小对衍射效率的影响。当周期 $T=400 \mu\text{m}$ 时,空气间隙由 0 增大到 30 μm ,衍射效率由 97.24%降低到 95.75%,空气间隙增大,衍射效率降低。当周期 $T=100 \mu\text{m}$ 时,空气间隙由 0 增加到 30 μm ,衍射效率由 27.81%降低到 1.098%,空气间隙增大,衍射效率降低。在红外长波,周期 T (100~400 μm)、空气间隙(0~30 μm)范围内,空气间隙固定,周期越大,衍射效率越高。

由图4~图6可知,衍射光学元件在可见光波段、红外中波、红外长波,衍射效率随着空气间隙的增(下转第74页)

输入控制、简洁性设计、多路复用测试等技术等,减小了系统电路的规模,有效提升了系统的可靠性、测试性、维修性和安全性水平,可以广泛应用于航空航天领域。

参考文献

- [1] 杨培杰,李金明,王阵.电火工品等效天线模型的建立与分析[J].装备环境工程,2012,9(2):46-48.
- [2] 王雪松,卫鑫.电磁环境对舰艇火工品的安全影响[J].舰船电子工程,2012,32(6):133-136.
- [3] 周奎军,陈红俊,叶淑琴,等.钝感型瞬时/延期两用点火具的研究[J].火工品,2007,(6):39-42.
- [4] 许萌,李执力,王鹏.武器装备的“五性”工作研究[J].国防技术基础,2009(9):26-29.
- [5] 沈文,Eagle lee,詹卫前.AVR单片机C语言开发入门指导[M].北京:清华大学出版社,2003:17-264.
- [6] 海涛.ATmega系列单片机原理及应用—C语言教程[M].

北京:机械工业出版社,2008:6-310.

- [7] 张军.AVR单片机应用系统开发典型实例[M].北京:中国电力出版社,2005:229-248.
- [8] 童诗白,华成英.模拟电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,2001:23-48.
- [9] 阎石.数字电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,2001:78-81.
- [10] 魏忠林,李天刚,刘于端,等.电子设备测试性设计及系统划分的研究[J].科学技术与工程,2005,5(23):1800-1802.
- [11] 杨冬健,王红,刘金甫.航空设备的测试性设计和验证技术概述[J].测控技术,2006,25(10):1-5.
- [12] 童军,马晓莉,南权,等.基于多路复用技术的多种信号测量系统[J].微计算机信息,2008,24(1-1):78-80.
- [13] 顾耀林,翁丽华,王正山.AVR单片机在多回路数据采集器中的应用[J].微计算机信息,2007,23(12-2):110-111,92.

(上接第25页)

大而降低;当空气间隙的大小固定,周期越大,衍射效率越高。当周期和空气间隙远远大于衍射光学元件的微结构高度时,空气间隙和周期的大小对衍射效率的影响就微乎其微。当空气间隙、周期和衍射元件微结构高度接近时,随着空气间隙的增大,衍射效率下降的比较明显。选择合适的周期,控制好多层衍射光学元件空气间隙的大小,对提高衍射光学元件的衍射效率有重要意义。由图7可知,在同一波段范围内,空气间隙固定,波长对衍射效率的影响不大。

4 结论

根据衍射光学理论,推导了双层衍射光学元件的衍射效率表达式,建立含有空气间隙的双层衍射光学元件衍射效率分析模型,得到了可见光波段、红外波段内双层衍射光学元件衍射效率对应的合理空气间隙范围。在双层衍射光学元件设计和制造过程中,空气间隙和周期必须控制在合理范围内。由计算结果可知,双层衍射光学元件衍射效率在一定空气间隙范围内对其影响不敏感,当空气间隙逐渐增大时,衍射效率将随空气间隙的增大而降低。对于不同材料在不同波段的组合,尽管数值计算结果上有差异,但不会改变空气间隙对其衍射效

率的总体变化。

参考文献

- [1] 赵丽萍,邬敏贤,金国藩.折衍射混合单透镜的色球差校正研究[J].光学学报,1998,18(5):621-626.
- [2] 孙强,卢振武,王肇圻.谐衍射/折射双波段系统设计[J].光学学报,2004,24(6):830-833.
- [3] 范长江,王肇圻,吴环宝,等.红外双波段双层谐衍射光学系统设计[J].光学学报,2007,27(7):1266-1270.
- [4] 白剑,马韬,沈亦兵,等.多层衍射光学元件的特性分析[J].红外与激光工程,2006,35(s):44-47.
- [5] 马韬,沈亦兵,杨国光.利用多层表面微结构提高DOE宽波段衍射效率[C]//2006年全国光电技术学术交流会会议论文集:F集,成都:中国宇航学会,2006:233-239.
- [6] 崔庆丰.折衍射混合光学系统的研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械研究所,1996.
- [7] 吴宗凡,柳美琳,张绍举,等.红外与微光技术[M].北京:国防工业出版社,1998:286-300.
- [8] Arieli Y, Ozeri S, Eisenberg N, et al. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth [J]. Opt. Lett, 1998, 23: 823-824.
- [9] Fujita F, Nishihara H, Koyama J. Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography[J]. Opt.Lett, 1982, 7: 578-580.
- [10] 杨亮亮.多层衍射光学元件衍射效率的研究[D].长春:长春理工大学,2013.