Закони геометријске оптике на основу Хајгенс - Фреснел принципа

Ненад Стевановић, Владимир М. Марковић

Универзитет у Крагујевцу, Природно-математички факултет, Крагујевац, Србија

Апстракт. Закони геометријске оптике се изучавају на часовима физике у основној и средњој школи. Таласни феномени (интерференција и дифракција) су део градива у средњим школама. Простирање светлости као таласа се описује Хајгенсовим принципом, док је математички опис дао Фреснел (Хајгенс-Френелов принцип- ХФП). На основу тог принципа могу се описати таласни феномени светлости. Циљ овог рада је да се на основу ХФП покаже којим условом важе закони геометријске оптике.

Кључне речи: оптика, талас, дифракција, интерференција.

ПРИРОДА СВЕТЛОСТИ

Оптика, или наука о светлости, је област физике у којој се проучавају особине светлости и њена интеракција са материјалном средином. Настала је првобитно као покушај да се одговори на питање зашто је човек у стању да види предмете који гаs окружују. Као основно својство светлости, још у старој Грчкој су истицали њено праволинијско простирање у хомогеној средини. Следеће битно својство светлости је способност светлостних зрака да при пресецању не ометају један другог [1,2].

Иако се развитак оптике, све до почетка 19. века, базирао на представама о светлосним зрацима који се простиру праволинијски, још у 17. веку биле су познате чињенице које су указивале на то да постоје одступања од праволинијског простирања светлости (на пример дифракција). Простирање светлости по линији наводило је на мисао да светлост представља флукс (проток) честица које излећу из извора и крећу се у хомогеној средини праволинијски и равномерно. Корпускуларну теорију светлости поставио је Исак Њутн, представљајући светлост као проток врло брзих честица, чије кретање подлеже законима класичне физике [1,2].

Упоредно са корпускуларном теоријом развијала се и таласна теорија светлости, по којој светлост представља таласни процес. Ту теорију поставио је холандски научник Кристијан Хајгенс (Christian Huygens) 1677. године. Он је сматрао да светлост представља простирање таласа у етру. Хајгенсовим принципом може се објаснити закон простирања светлости. Могуће објашњење појава дифракције и интерференције светлости поставили су тек Томас Јанг (Thomas Young) и Августин Френел (Augustin Fresnel) почетком 19. века.

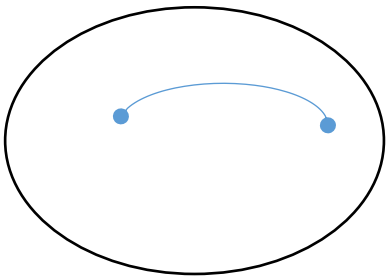
Све до прве половине 19. века светлосне осцилације представљане су у виду механичких еластичних осцилација континуалне средине - етра. Кларк Максвел (Clark Maxwell), доказао је 1865. године да светлост поседује електромагнетне особине. После открића електромагнетних таласа постало је јасно да су светлосни таласи у ствари електромагнетни таласи. Хајнрих Херц (Heinrich Hertz), потврдио је Максвелову теорију, а Макс Планк (Max Planck) увео је 1900. године појам кванта енергије по којој светлосни

извори емитују кванте- фотоне. Комптоновим ефектом, 1921. године, потврђена је фотонска природа светлости. Електромагнетна теорија светлости, која је имала велику улогу у развитку физике 19. и почетка 20. века, указала је на јединство светлосних и електромагнетних појава. Луј де Брољ (Louis de Broglie) је 1924. године извршио синтезу Максвелове електромагнетне теорије светлости и Планкове теорије кванта.

Данас важи мишљење да је природа светлости дуалистичка. Појаве везане за простирање светлости обајашњавају се електромагнетном теоријом, а интеракција светлости са материјом представља корпускуларну појаву [1-3].

ФЕРМАТОВ ПРИНЦИП

Начин простирања светлосног зрака кроз средину описује Фермат-ов принцип (Pierre de Fermat) [2,3]. Замислимо једну средину која се карактерише релативном диелектричном константом ε_r и релативном магнетном пермеабилношћу μ_r, односно, индексом преламања, $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$.



СЛИКА 1. Оптичка дужина пута.

Ако је индекс преламања средине *n*, тада је брзина светлости кроз ту средину једнака $c=c_0/n$. Означимо један сегмент путање светлости *dl*. Време које је потребно да светлост пређе то растојање једнако $dt=dl/c$, односно

$$dt = \frac{1}{c_0} \cdot n \cdot dl \tag{1}$$

Време које је потребно да светлост пређе растојање од тачке 1 до тачке 2 износи

$$\tau = \frac{1}{c_0} \int_1^2 n \cdot dl \tag{2}$$

Из израза (2) се види да интеграл представља карактеристику средине и да је димензија тог интеграла пређени пут (дужина). Отуда се може увести величина

$$L = \int_1^2 n \cdot dl \tag{3}$$

која представља **оптичку дужину пута**.

Према Ферматовом принципу, светлост се простире тако да време простирања светлости буде минимално $\tau = \tau_{min}$. Дакле, мора да важи да је

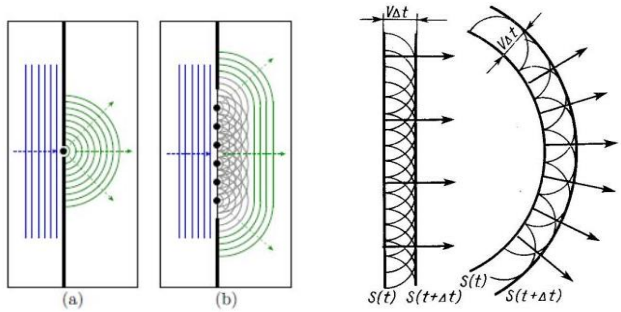
$$\frac{dL}{dx} = 0 \text{ и } \frac{d^2L}{dx^2} > 0 \tag{4}$$

Геометријска опитка заснива се на следећа четири закона:

- Закон праволинијског простирања светлости
- Закон међусобне независности простирања светлосних зрака
- Закон одбијања светлости
- Закон преламања светлости.

ХАЈГЕНС - ФРЕНЕЛОВ ПРИНЦИП

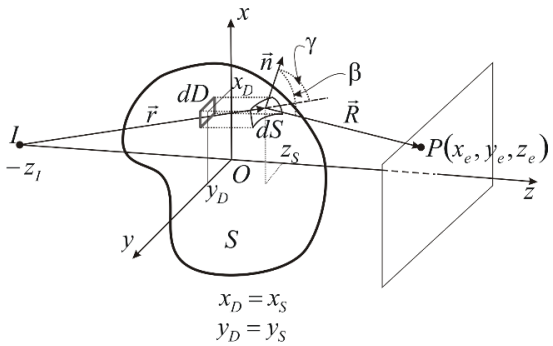
Појава дифракције се објашњава помоћу Хајгенсовог принципа у чијој основи су два постулата. У првом постулату Хајгенс дефинише средину кроз коју се простире светлост, називајући је етер. Други постулат је кључан и дефинише начин преношења поремећаја. Према овом постулату, може се одредити положај таласног фронта у тренутку $t + \Delta t$ ако је познат облик таласног фронта у тренутку t и брзина таласа v. Тражени положај фронта $S(t + \Delta t)$ у тренутку $t + \Delta t$ поклапа се са обвојницом секундарних таласа и графички је приказан на слици 2 [3].



СЛИКА 2. Простирање таласног фронта кроз прорезе

Хајгенсов принцип упућује на геометријски рецепт за цртање таласних фронтова и решава само задатак о правцу простирања таласног фронта, али не води рачуна о амплитуди што значи ни о интензитету таласа. Зато он има ограничену примену при објашњавању законитости простирања светлости.

Френел 1815. год. први развија приближни метод за израчунавање амплитуде и фазе таласа на обвојници [4-8]. Светлост таласне дужине λ емитује се са тачкастог извора I, допире до површи S и на екрану E се посматра дифракциона слика. Извор је позициониран на z-оси, на растојању z_I од површи S и има координате $(0,0,-z_I)$. Екран је раван нормална на z-осу и на растојању z_e од xOy равни. Сегмент површи dS има координате (x_s,y_s,z_s).



СЛИКА 3 Геометрија дифракције светлости

У односу на извор, *I*, сегмент површи *dS* је дефинисан вектором $\vec{r}$. Тачка *P* на екрану, до које допире светлост, има координате $P(x_e,y_e,z_e)$ и дефинисана је вектором $\vec{R}$ у односу на сегмент *dS*.

Јачина електричног поља E_P светлости која допире до тачке *P* дефинисана је следећим изразом [4-8]:

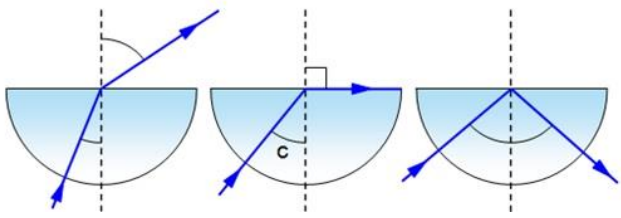
$$E_P = \iint_S -\frac{i}{\lambda}\frac{1}{rR}a(\beta,\gamma)E\,e^{i\left(\omega t-\vec{k}\vec{r}-\vec{k}\vec{R}\right)}ds \tag{5}$$

који се назива Френел-Кирхофов интеграл, где је $a(\beta,\gamma)$ инклинациони фактор, λ је таласна дужина светлости у вакууму, ω је кружа учестаност, а *к* је талсни број. Интензитет светлости у тачки P се може одредити као [7,8]

$$I = \left|E_p\right|^2 \tag{6}$$

ЗА РАЗМИШЉАЊЕ

Ако посматрамо сноп светлости који емитује ласерски извор и уперимо према граничној површи, долази до рефлексије и преламања светлосног снопа. Правци простирања одбијеног и преломљеног дела ласерске светлости се могу описати законима геометријске оптике. Угао који заклапа одбијени зрак са нормалом, једнак је углу који упадни зрак заклапа са нормалом. Преломљени зрак се простире ка нормали (од нормале) ако упада у оптички гушћу (ређу) средину.



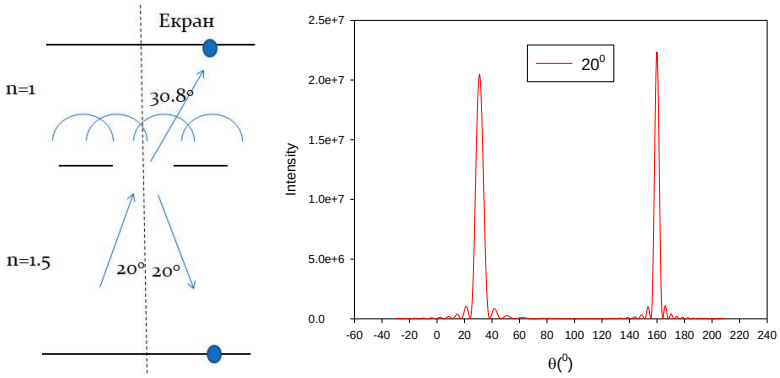
СЛИКА 4. Преламање и тотална рефлексија

Поставља се следеће питање: Ако је светлост талас, који се простире, према Хајгенсовом принципу тако што свака тачка погођена светлосним таласом постаје извор

таласа, зашто имамо привилеговане правце простирања светлости? Где нестају таласи који се стварају према Хајгенсовом принципу?

Да бисмо одговорили на то питање написали смо програмски код који симулира простирање светлосног таласа кроз прорез на граничној површи између две хомогене средине на основу ХФП. Резултат програма је расподела интензитета светлости на екрану. Разматрани су многи случајеви, један од њих је приказан на следећој слици.

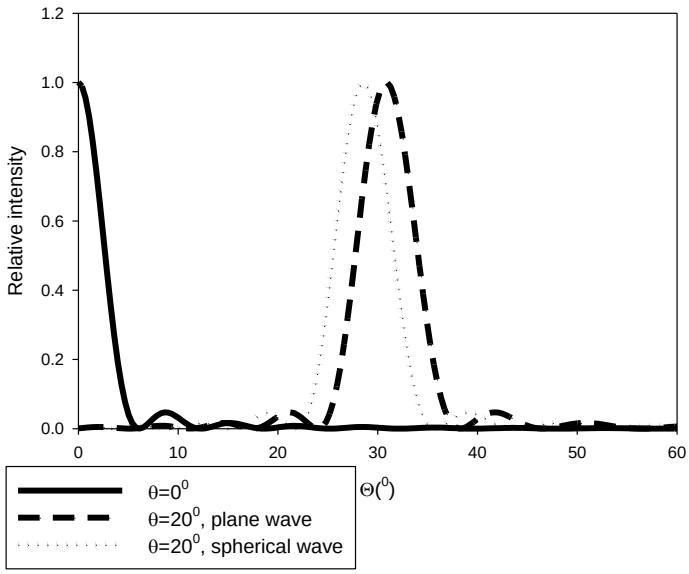
На слици 5 приказан је правац упадног раванског светлосног фронта, под углом 20^0 у односу на нормалу на прорез, граничну површ, која раздваја средине индекса преламања n=1,5 и n=1. На графику је приказана угаона расподела интензитета светлости и показује се да максималан интензитет јавља под углом од 30.8^0 и 160^0, што одговара преломном и одбијеном углу према законима преламања и одбијања. Закони геометријске оптике важе за равански светлосни талас.



СЛИКА 5. Одбијање и преламање светлости

Овај резултат је само један од многих резулата који произилазе из програмског кода. На основу разматраних резултата одговор на горе постављена питања је следећи: Од сваке тачке, погођена таласом, емитују се таласи према ХФП, који међусобно интерферирају. У свим правцима настаје деструктивна интерференција и таласи се међусобно поништавају, осим у правцу који се може одредити и на основу закона геометријске оптике. У том делу простора долази до конструктивне интерференције, што се на графику види као појачан интензитет светлости. Са графика, на слици 5, се такође може видети да сноп светлости (која може бити ласерска светлост) није паралелан сноп зрака, већ је интензитет нехомогено распоређен унутар снопа. Сноп светлости је последица дифракције таласа који се емитује са извора.

На слици 6 приказан је график расподеле интензитета светлости око граничне површи, на коју пада равански, односно сферни светлосни талас, који под углом θ упада у односу на нормалу на граничну површ. Са графика се може видети да у случају да на граничну површ упада равански светлостни талас, максималан интензитет светлости (конструктивна интерференција), након граничне површи,настаје у правцу, под углом, који се може прорачунати на основу закона преламања. У случају да на површ пада сверни светлосни тлас, тада се након граничне површи формира максималан интензитет светлости чији правац (угао) одступа од угла који се добија на основу закона преламања. Ово исто важи и за закон одбијања (резултат није приказан на графику). Из приложеног се може закључити да закони геометријске оптике важе само за раванске светлосне таласе.



СЛИКА 6. Преламање сферног и раванског светлосног таласа

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је подржан од стране Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије, кроз пројекат 171021.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Ландсберг, Оптика. Научна књига, Београд, 1967.
2. Д. М. Ивановић и В. М. Вучић, Физика II – електромагнетика и оптика- Нучна књига, Београд ,1980.
3. D. M. Nikolić. Eksperimenti sa difrakcijom svetlosti i njihov značaj za nastavu fizike.Doktorska disertacija, Prirodno–matematički fakultet, Niš, 2013.
4. K. G. Makris, D. Psaltis. Huygens–Fresnel diffraction and evanescent waves. Optics Communications **284**, 1686, 2011.
5. Y. Cui, W. Zhang, J. Wang, M. Zhang, S Teng. Fresnel diffraction of aperture with rough edge. Journal of Optics **17**, 065607, 2015.
6. K. M Abedin, S.M. M Rahman, The iterative Fresnel integrals method for Fresnel diffraction from tilted rectangular apertures: Theory and simulations. Optics & Laser Technology 44, 939, 2012.
7. N. Stevanovic, V.M. Markovic, D. Nikezic New method for determination of diffraction light pattern od arbitrary surfaces. Optics & Laser Technology, 90, 90, 2017.
8. N. Stevanovic, V.M. Markovic. Diffraction pattern by rotated conical tracks in solid state nuclear track detectors Optics & Laser Technology 80, 204, 2016**.**