

# Ověření zákona lomu počítačovou simulací

J. Stříteský

Gymnázium, Pardubice, Mozartova 449

jistrites@gmail.com

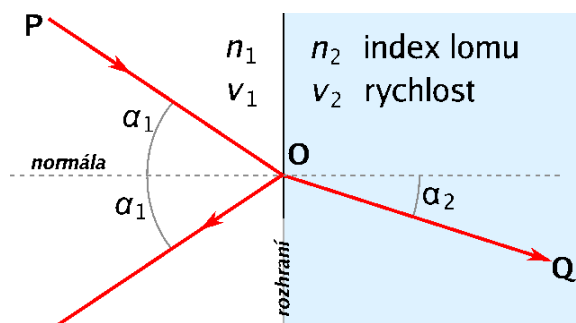
Ivan Richter, Pavel Kwiecien, Milan Burda, školitelé – KLFF FJFI ČVUT v Praze

## Abstrakt:

Práce ukazuje platnost zákona lomu v porovnání s numerickým výpočtem na počítači. Jsou diskutovány různé hodnoty indexu lomu a různé konfigurace vstupní elektromagnetické vlny. Počítačové simulace jsou provedeny metodou FDTD v programu Ansys Lumerical.

## 1 Úvod

Rychlost světla ve vakuu je konstantou (označujeme písmenem  $c$ ) a má hodnotu  $299792458 \text{ ms}^{-1}$ . Pokud světlo vstoupí z vakua např. do dielektrického materiálu, tak se jeho rychlost sníží na rychlost  $v$ . Takto můžeme definovat materiálovou optickou konstantu – index lomu  $n$  jako podíl rychlosti světla ve vakuu vůči rychlosti světla v materiálu  $n = c/v$ . Pro izotropní dielektrické materiály je typická hodnota indexu lomu mezi hodnotama 1 až 4. Pro další typy materiálů to již nemusí být reálné kladné číslo (kovy – komplexní číslo). Celá řada materiálů se v přírodě chová komplikovaněji a pro jejich popis je zapotřebí uvažovat index lomu v podobě tenzoru, tím lze zohlednit materiálovou disperzi vůči polarizaci a různým směrům šíření dané vlny. Dodejme, že polarizací vlny se rozumí orientace vektoru elektrického pole vůči rovině dopadu, určenou rozhraním a směrovým vektorem šíření vlny. Leží-li elektrický vektor v rovině dopadu, jedná se o p-polarizaci, je-li orientován kolmo na rovinu dopadu jedná se o s-polarizaci.



**Obrázek 1.** Zákon lomu, znázornění směru šíření paprsku (červená přímka) v rovině dopadu definovanou rozhraním a vektorem šíření vlny, při průchodu z prostředí s indexem lomu  $n_1$  do prostředí s indexem lomu  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ). Obrázek převzat z [https://cs.wikipedia.org/wiki/Snell%C5%AFv\\_z%C3%A1kon#/media/Soubor:Snelluv\\_zakon.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Snell%C5%AFv_z%C3%A1kon#/media/Soubor:Snelluv_zakon.svg)

Uvažujme rozhraní mezi izotropními prostředími s indexem lomu  $n_1$  a prostředím s indexem lomu  $n_2$ . - viz obrázek 1 Postupuje-li rovinná vlna směrem k rozhraní pod úhlem  $\alpha_1$ , tak se na tomto rozhraní částečně odráží, opět pod úhlem  $\alpha_1$  (na druhou stranu od normály) a částečně prochází do druhého prostředí, pro výchozí úhel  $\alpha_2$  platí zákon lomu - Snellův zákon [1]

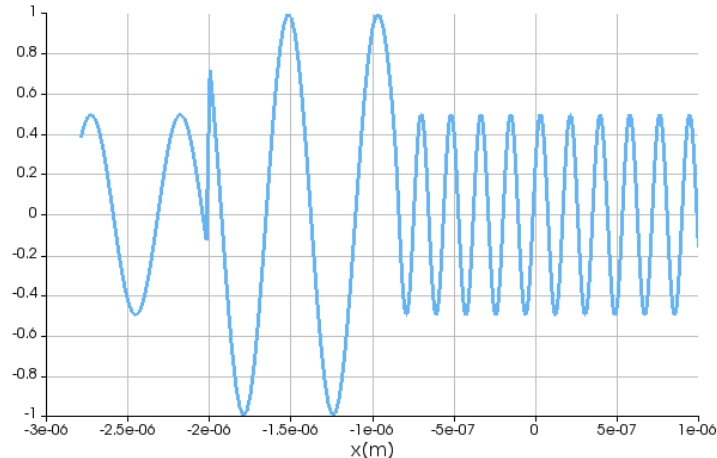
$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Pro různé konfigurace vstupní vlny (úhel, polarizace) mohou nastat různé situace (Brewsterův úhel, totální odraz, ...), které budeme dále zkoumat.

## 2 Simulace

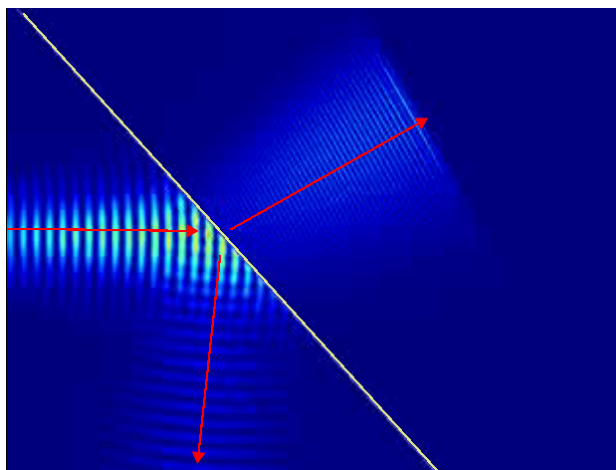
Simulace se prováděly v programu Ansys Lumerical FDTD [2]. Tato metoda řeší Maxwellovy rovnice [3] pomocí konečných diferencí v časové doméně (anglická zkratka FDTD) [4].

Význam veličiny indexu lomu pro izotropní prostředí názorně ukazuje simulace na obrázku 2, který znázorňuje, v řezu dvou prostředí, prvního o indexu lomu 1 a druhého o indexu lomu 3, vývoj hodnot elektrického pole. Z obrázku je patrné, že po vstupu rovinné vlny do druhého prostředí se vlnová délka vlny zmenšila na  $\frac{1}{3}$  původní vlnové délky ve vakuu, to tedy znamená, že za daný časový interval urazila vlna v druhém prostředí o indexu lomu 3 třetinovou vzdálenost oproti vzdálenosti ve vakuu, jež má hodnotu indexu lomu  $n = 1$ . Na průběh křivky náležitě prvnímu prostředí je mimo jiné patrný vliv odražené vlny.



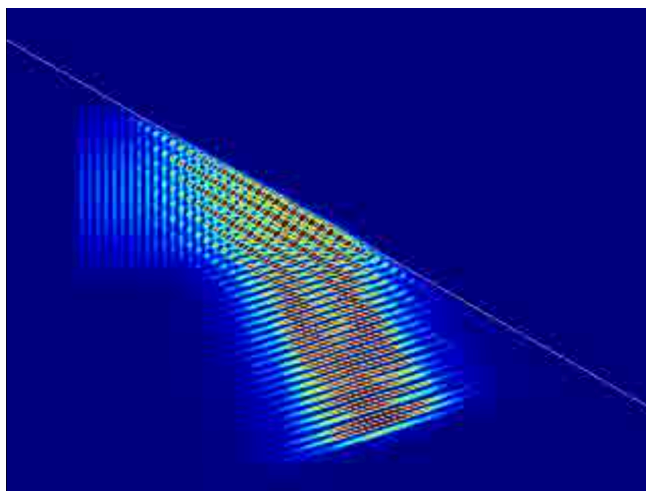
**Obrázek 2.** Simulace vývoje hodnot elektrického pole rovinné vlny při kolmém dopadu vlny z vakua do prostředí s indexem lomu  $n = 3$ .

Dále může být úhel dopadu různý od nuly. V tomto případě jsme porovnali zákon lomu s numerickou simulací. Po dosažení zadaných hodnot do zákona lomu vyšel výstupní úhel stejně jako v simulaci. Ukázka vývoje v určitém čase je vidět na obrázku 3.



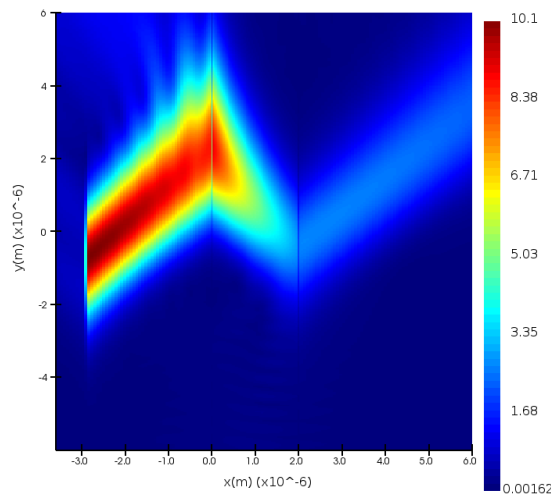
**Obrázek 3.** Simulace zákona lomu, vlna postupuje z vakua do prostředí s indexem lomu 3. Šipky po řadě ukazují dopadající, odraženou a do druhého prostředí prošlou vlnu.

Při detailnější diskuzi zákona lomu zjistíme, že pokud vstupuje záření z prostředí s vyšším indexem lomu do prostředí s nižším indexem lomu, tak může nastat případ tzv. totálního odrazu [5], kdy se jednoduché rozhraní chová stejně jako zrcadlo. Mezní úhel dopadu (bráno od kolmice k rozhraní) po jehož překročení nastává totální odraz lze snadno zjistit ze Snellova zákona viz úvod, dodejme, že tento úhel je nezávislý na polarizaci dopadající vlny.



**Obrázek 4.** Simulace totálního odrazu, vlna se zcela odráží od rozhraní.

Materiálovým inženýrstvím, speciálním návrhem struktury a kombinací materiálů, je možné vytvořit prostředí, které se svými vlastnostmi vymyká od materiálů běžně se vyskytujících v přírodě. Pro takováto prostředí se vžil označení metamateriál. Na obrázku 5 je uvedena simulace vývoje intenzity elektrického pole dopadající vlny v podobě Gaussova svazku interagující s metamateriálem, jehož efektivní hodnota indexu lomu je blízká -1.



**Obrázek 5.** Simulace metamateriálu (prostřední část), může docházet ke vzniku záporného indexu lomu  $n = -1$  (vlnová délka je 760 nm), vstupní vlna se v tomto případě láme “podivně”.

### 3 Shrnutí

V rámci tohoto příspěvku jsme se seznámili se základními vztahy popisu a jevy, které mohou nastat při dopadu elektromagnetické vlny na rozhraní dvou optických prostředí. Věnovali jsme se především veličině indexu lomu, Snellově zákonu a případu totálního odrazu.

### Poděkování

Poděkování patří organizačnímu výboru Týdne vědy na Jaderce, zejména pak Vojtěchu Svobodovi jako hlavnímu organizátoru této akce.

### Reference

- [1] *Snell's law*. Online. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Snell%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Snell%27s_law). [cit. 2024-06-18].
- [2] *Ansys Lumerical FDTD*. Online. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/optics/fdtd>. [cit. 2024-06-18].
- [3] *Maxwell's equations*. Online. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s\\_equations](https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations). [cit. 2024-06-18].
- [4] *Finite-difference time-domain method*. Online. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Finite-difference\\_time-domain\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite-difference_time-domain_method). [cit. 2024-06-18].
- [5] *Total internal reflection*. Online. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Total\\_internal\\_reflection](https://en.wikipedia.org/wiki/Total_internal_reflection). [cit. 2024-06-18].
- [6] *Metamaterial*. Online. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>. [cit. 2024-06-18].