

FOTONICKÉ KRYŠTÁLY A NANOTECHNOLÓGIE

Parma Ludvík

Katedra fyziky, Fakulta humanitných a prírodných vied Prešovskej univerzity,
Ul. 17. novembra 1, 081 16 Prešov, SR

Resumé

V príspevku sú uvedené základné informácie o optických vlastnostiach a aplikáciách fotonických kryštálov – skupine materiálov, ktorých priestorová periodičita má dĺžkovú konštantu porovnateľnú s vlnovou dĺžkou optického žiarenia, s dôrazom na existenciu negatívneho indexu lomu v týchto štruktúrach. Cieľom príspevku je tiež informovať obecné o triede tzv. ľavotočivých materiálov (materiály s $\epsilon < 0$, $\mu < 0$), ktoré v spojení s nanotechnológiami majú vďaka svojim špecifickým vlastnostiam veľkú perspektívu a nájdu uplatnenie v širokých aplikáciách už v blízkej budúcnosti.

Abstract

The article presents basic information on optical properties and applications of photonic crystals – a group of materials, which spatial periodicity has length comparable with wavelength of optical radiation, with the accent of a negative index of refraction existence. The aim of presentation is also to get general information on „left-handed“ materials (materials with $\epsilon < 0$ and $\mu < 0$). Those sophisticated materials, due to connection with nanotechnology, have great perspectives of broad range of application in the near future.

1 Úvod

Prezentovaný príspevok je voľným pokračovaním predchádzajúcich dvoch vystúpení [1, 2]. Tento krát je hlbšie venovaný optickým vlastnostiam fotonických štruktúr, ktoré vedú ku vzniku negatívneho indexu lomu.

Základy teórie šírenia vlnení periodickými štruktúrami položil lord Rayleigh pred viac ako 120 rokmi, keď do „Filozofického magazínu a vedeckého časopisu“ zaslal svoj významný príspevok o šírení vln v prostredí s periodickou štruktúrou [3].

Pred 21 rokmi boli postulované termíny „fotonický kryštál“ a „fotonický zakázaný pás“ [4], ktoré vychádzajú z analógie medzi štruktúrou energetických hladín (alebo pásov dovolených a zakázaných energií) v polovodiči (ide tu o elektrický prúd – tok elektrónov; teda „elektronický“ kryštál) a týchto hladín v prírodných či umelo vytvorených (vďaka nanotechnológiám) periodických štruktúrach (tu ide o tok fotónov; teda „fotonický“ kryštál).

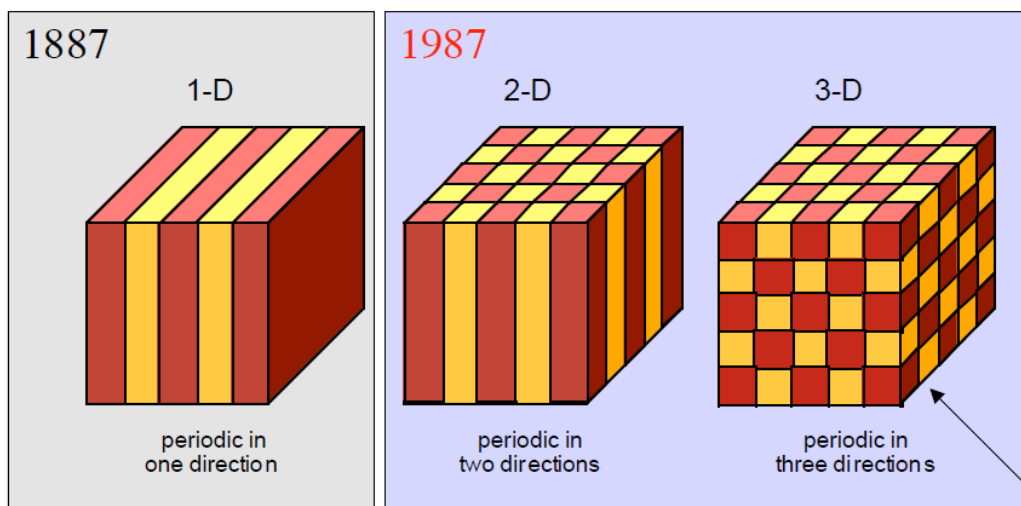
2 Fyzikálna podstata iridescencie fotonických kryštálov

Pre danú hodnotu \mathbf{k} vlnového vektora Blochovej vlny a daný potenciál existuje mnoho riešení Schrödingerovej rovnice pre Blochov elektrón. Energie elektrónov príslušné týmto riešeniam – energetické pásy – sú diskkrétne (separované) pre dané \mathbf{k} . Pokiaľ je táto separácia zachovaná pre všetky \mathbf{k} z 1. Brillouinovej zóny, vzniká pás zakázaných energií (zakázaný pás, gap) [5]. To znamená, že v danom polovodiči existujú energetické pásy, ktoré elektrón nemôže obsadiť.

Analógia medzi polovodičmi a fotonickými kryštálmi spočíva v zámene elektrónu v polovodiči za svetelnú (optickú, elektromagnetickú) vlnu; periodickej kryštalickej mriežky polovodiča s mriežkovou konštantou rádovo desiatín nm za periodickú štruktúru (nemusí byť kryštalická!) fotonického „kryštálu“ s konštantou rádovo vlnovej dĺžky aplikovanej svetelnej (optickej) vlny. (Samozrejme pohyb elektrónu je stále popísaný Schrödingerovou rovnicou, zatiaľ čo pohyb elektromagnetickej vlny Maxwellovými rovnicami) [2].

Analógiou k zakázanému pásu v polovodiči je potom pásmo zakázaných vlnových dĺžok (frekvencií, energií fotónu), ktoré sa nemôžu šíriť cez fotonický kryštál a sú teda reflektované.

Ako ukazujú teoretické rozbory, výpočty a modelovanie, tzv. **1D** fotonické kryštály vykazujú **vždy** existenciu úplného zakázaného pásu vlnových dĺžok, zatiaľ čo v **2D** a **3D** fotonických štruktúrach sa úplný zakázaný pás nachádza len **pre niektoré**, špeciálne konštruované štruktúry. A práve pri technológii spracovania týchto štruktúr rozhodujúcu úlohu hrajú nanotechnológie [7].



Lord RAYLEIGH

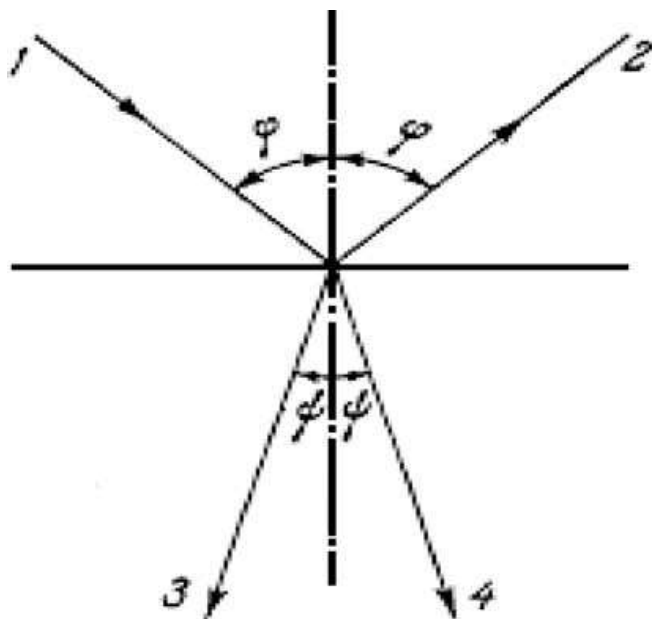
Eli YAbulonovitch / Sajeev John

Obr. 1. Schémy 1D, 2D a 3D fotonických kryštálov [4].

Fotonické kryštály *v okolí fotonického pásu zakázaných frekvencií* sa správajú tak, ako keby existoval ich *efektívny index lomu*, ktorý nie je priamo určený indexmi lomu materiálov, z ktorých sa fotonický kryštál skladá, ale *je určený štruktúrou fotonických pásov*. Tento index lomu *môže mať aj hodnotu menšiu ako 1, resp. hodnoty záporné*. A popri tom je možné stále používať Snelliov zákon k popisu šírenia optického žiarenia.

Obecne nemôžeme priradiť periodickej štruktúre ako celku adekvátny index lomu [7].

Za „otca“ myšlienky záporného indexu lomu a označenia materiálov ako pravotočivých ($\epsilon > 0$ aj $\mu > 0$) a ľavotočivých ($\epsilon < 0$ aj $\mu < 0$) je považovaný Veselago [8], ktorý teoreticky skúmal tieto materiály.



Nech horné a dolné prostredia na obr. 2 majú kladný index lomu $n_1 > n_2 > 0$. Potom lúč **1** sa láme tak, že pokračuje lúčom **4**. V prípade, že $n_1 > 0$ a $0 > n_2$, lúč **1** sa láme tak, že pokračuje lúčom **3**. V tomto prípade Snelliov zákon môžeme zapísať v tvare:

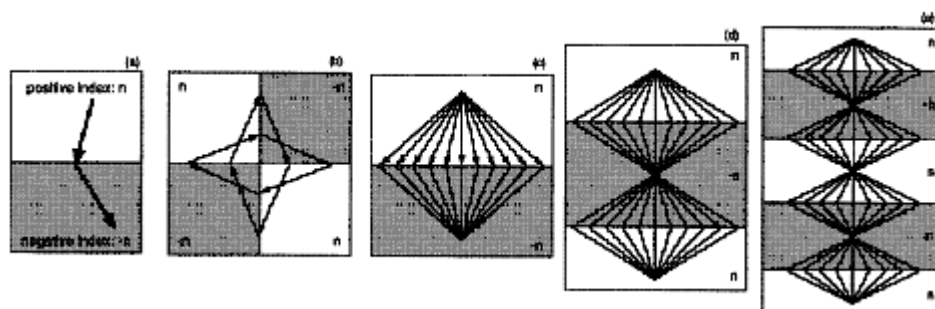
$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = n_{1, 2} = \frac{p_2}{p_1} \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}}$$

kde $p_1 = +1$ pre prostredie pravotočivé a $p_2 = -1$ pre prostredie ľavotočivé.

Obr. 2 Chod lúčov na rozhraní pravo- a ľavo-točivých materiálov [8].

3 Aplikácie

Fotonické kryštály sú atraktívne optické materiály pre riadenie a spracovanie optických zväzkov. 1D materiály sú už dnes bežne používané vo forme tenkých optických vrstiev napr. ako antireflexné či naopak vysoko reflexné povrchy optických elementov, alebo ako farbu meniace náterové farby či atramenty, 2D materiály začínajú nachádzať svoje uplatnenie ako fotonické kryštalické vlákna pre zariadenia nelineárnej optiky, prípadne pre vedenie „exotických“ vlnových dĺžok alebo pri konštrukcii nanometrických rezonátorov pre polovodičové lasery. Tak bol napr. skonštruovaný dutinový rezonátor objemu $0,03 \mu\text{m}$. 3D materiály sú zatiaľ v stave štúdia, návrhov štruktúr a testovania.



Obr. 3. Príklad aplikácie: Rozhranie pravo- a ľavo-točivých materiálov ako šošovka [7].

4 Záver

Odbor fotonických kryštálov (fotonických štruktúr, meta-materiálov, ľavotočivých materiálov), sa veľmi rýchlo rozvíja, niektoré aplikácie sú už na pokraji preniknutia do optoelektroniky a tak v nasledujúcom desaťročí aj do nášho každodenného života.

A práve toto nás, učiteľov fyziky, technických disciplín aj ďalších odborov, musí nútiť k zamysleniu, ako pozmeniť obsah výučby fyziky, základov techniky a ďalších predmetov na všetkých stupňoch škôl, aby naši študenti vstrebali do seba nielen „tradičné“ partie vyučovaných disciplín, ale zostal čas a miesto aj na výučbu nových, rodiacich sa odvetví.

Príspevok vznikol s podporou projektu KEGA č. 3/4114/06 „Rozširovanie edukačných kompetencií pedagogických pracovníkov“.

Literatúra

1. PARMA, L.: Nanotechnológie klopajú na dvere – sme na nich pripravení? In. Zborník z medzinárodnej vedecko-odbornej konferencie Učiteľ prírodovedných predmetov na začiatku 21. storočia. Prešov 2006. s.145-148 ISBN 80-8068-462-6
2. PARMA, L.: Fotonické kryštály. In. Sborník z mezinárodní vědecko-odborné konference XX. DIDMATTECH 2007 Olomouc, ČR, Votobia Olomouc 2007, Díl I. s. 223-226 ISBN 80-7220-296-0
3. RAYLEIGH, Lord: On the Maintenance of Vibrations by Forces of Double Frequency, and on the Propagation of Waves through a Medium endowed with a Periodic Structure, *Phil. Mag.* Ser. 5., Vol. **24** (1887). No 147, p. 145 – 159
4. YABLONOVITCH, E.: Photonics Crystals: Semiconductors of Light. *Sci. Am.*, Dec 2001, p. 48 – 55
5. BLOCH, F.: Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern. *Z. Physik* **52**, p. 555 – 600 (1928)
6. HILL, G. W.: On the part of the motion of the lunar perigee which is the function of the mean motions of the sun and moon. *Acta Math.* **8**, p.1 – 36 (1866)
7. NOTOMI, M.: Negative refraction in photonic crystals, *Opt. Quant. Electr.*, **34**, p.133-143, 2002
8. VESELAGO, V.G.: The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ ., *UFN* **92**, p. 517-526, 1967
9. JOHNSON, S. G.:Lecture material, IAP 2003, Lecture 1, <http://ab-initio.mit.edu/photons/tutorial/L1-bloch.pdf> , 30. 9. 2008