

UNIVERZITA KARLOVA

ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM III.  
PRO OBOR OBECNÁ FYZIKA

---

**XXVII. Kerrov jav  
v pevnej látke**

---

*Autor:*  
Samuel Kočíšćák

2. mája 2017

## 1 Pracovné úlohy

1. Zostavte aparatúru pre pozorovanie priečného elektrooptického javu v pevnej vzorke. Laser umiestnite tak, aby bol zdroj svetla polarizovaný kolmo k vodorovnej rovine. (Vopred nájdite smery ľahkého priechodu polarizátorov používaných v paratúre).
2. Zmerajte závislosť intenzity svetla dopadajúceho na detektor na napätí priloženom na elektródy vzorky (neprekračujte 1 kV !). Spracujte graficky, určite polvlnné napätie.
3. Zo smernice závislosti fázového posunu medzi riadnym a mimoriadnym lúčom na štvorci priloženého napätia určite *Kerrovu konštantu* vzorky.

## 2 Teoretická časť

*Kerrovým elektrooptickým javom* nazývame vznik umelého dvojlomu pôsobením elektrostatického poľa v pôvodne opticky izotropnej látke. Lineárne polarizované svetlo prechádza vhodným elektrooptickým prvkom (napríklad tzv. *PLZT kryštálom*), v ktorom je homogénna elektrická polarizácia, ktorej vektor zvierá s rovinou polarizácie prechádzajúceho svetla  $45^\circ$ . Dopadajúci lúč svetla sa rozštiepi na mimoriadny a riadny lúč, teda lúč rovnobežný a lúč kolmý na elektrické pole v doštičke. Elektrickým poľom vyvolaná nehomogenita spôsobuje šírenie jednotlivých lúčov rôznou rýchlosťou, vďaka čomu je narušená lineárna polarizácia svetla, toto sa stáva všeobecne elipticky polarizovaným. Veľkosť fázového posunu pri výstupe z kryštálu zodpovedá výslednej polarizácii svetla a závisí na hrúbke kryštálu, veľkosti priloženého elektrického poľa a vlnovej dĺžke svetla. Možno ho merať napríklad meraním intenzity  $I$  svetla prechádzajúceho cez o  $90^\circ$  otočený analyzátor umiestnený za elektrooptickým kryštálom.

Ak dôjde k fázovému posunu medzi riadnou a mimoriadnou vlnou o práve  $\lambda/2$ , výsledné svetlo bude lineárne polarizované s rovinou polarizácie sklonenou o  $90^\circ$  oproti pôvodnej rovine polarizácie. Napätiu potrebnému na túto orientáciu vravíme polvlnné napätie, značme ho  $U_{\lambda/2}$ .

Ak je index lomu v smere kolmom na elektrickú polarizáciu prechádzajúceho svetla  $n_o$  a index lomu v smere rovnobežnou s elektrickou polarizáciou v kryštáli  $n_e$ , potom pre fázový posun  $\Delta$  platí vzťah

$$\Delta = 2\pi \frac{l}{\lambda} (n_e - n_o), \quad (1)$$

kde  $\lambda$  je vlnová dĺžka použitého svetla vo vákuu a  $l$  je hrúbka kryštálu. Možno ukázať<sup>[51]</sup>, že pre výsledný fázový posun  $\Delta$  platí vzťah

$$\Delta = 2\pi K l E^2, \quad (2)$$

kde  $E$  je intenzita elektrického poľa v prištáli. Konštantu úmery  $K$  nazývame *Kerrovou konštantou*. Ak je elektrické pole v kryštáli homogénne, možno ho vyjadriť

ako

$$E = \frac{U}{d}, \quad (3)$$

kde  $U$  je vonkajšie napätie na kryštáli a  $d$  je vzdialenosť elektród (pričný rozmer kryštálu).

Pre intenzitu svetla  $I$  za o  $90^\circ$  otočeným analyzátorom platí vzťah

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta}{2} \Leftrightarrow \Delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}, \quad (4)$$

kde  $I_0$  je intenzita svetla za polarizátorom v prípade, že analyzátor je otočený rovnako, ako polarizátor a na elektrooptickom kryštáli nie je žiadne napätie. Zo vzťahov 2, 3 a 4 možno získať vzťah

$$I = I_0 \sin^2 \left( \frac{\pi K l U^2}{d^2} \right), \quad (5)$$

ktorý možno poľahky upraviť do tvaru

$$U^2 = \frac{d^2}{\pi K l} \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}} = \frac{d^2 \Delta}{2\pi K l} = Q \Delta, \quad (6)$$

zo smernice  $Q$  závislosti  $U^2 = f(\Delta)$  možno určiť Kerrovu konštantu vzorky  $K$  podľa vzťahu

$$Q = \frac{d^2}{2\pi K l} \Leftrightarrow K = \frac{d^2}{2\pi Q l}, \quad (7)$$

v ktorom  $d$  je šírka vzorky (vzdialenosť elektród) a  $l$  je hrúbka vzorky.

### 3 Výsledky merania

Meranie prebehlo v priestoroch základného fyzikálneho praktika pri teplote okolitého vzduchu približne  $23^\circ\text{C}$ , tlaku vzduchu  $998\text{ hPa}$  a relatívnej vlhkosti vzduchu  $22\%$ . Pred samotným meraním sme nechali laser približne pol hodinu svietiť, aby sa jeho výkon ustálil.

Smer ľahkého priechodu polarizátormi sme určili metódou popísanou v [Pm] (obrázok 1), t.j. hľadaním minima prejdeného svetla odrazeného od vertikálnej skledenej doštičky sledovenej cez polarizátor pod uhlom blízkym Brewsterovmu uhlu na zhodnú hodnotu pre oba polarizátory (orientované vertikálne – umiestnené v stojane):  $\beta = 4(1)^\circ$  (najnižšia intenzita pri  $\alpha = -86(1)^\circ$ ).

Intenzitu svetla prešlého cez polarizátor, kryštál a analyzátor sme merali fotodiódou pripojenou na multimeter *Peaktech 2010 DMM*<sup>[PT]</sup>, z ktorého sme pri neskoršom meraní závislosti intenzity na čase pri premennom napätí  $U$  na vzorke zbierali dáta pomocou 12-bitového A/D prevodníka a pomocou softwaru *KUSB zapisovač*<sup>[NP]</sup>.

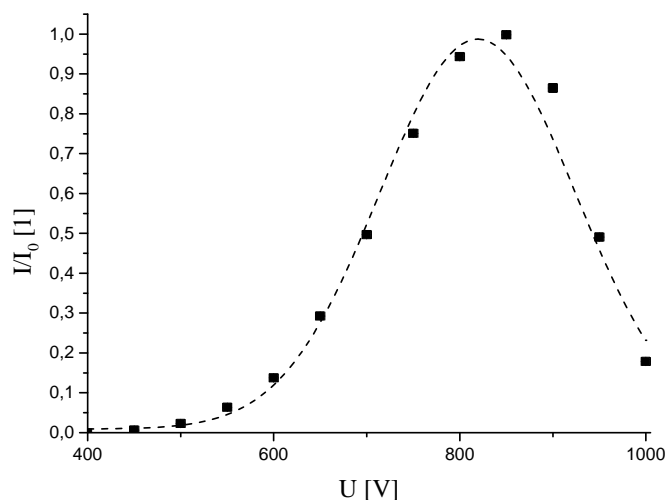
Polarizátor sme umiestnili pred laser a zorientovali do smeru ľahkého priechodu pre zvislo polarizované svetlo. Najprv bez analyzátora (avšak s PLZT kryštálom bez

napätia) sme otáčaním lasera (okolo osi lúča) hľadali maximum intenzity prešlého svetla, aby sme sa uistili, že lúč je polarizovaný vertikálne. Potom sme do sústavy pridali analyzátor (medzi elektrooptický kryštál a fotodiódu), tento sme orientovali kolmo na polarizátor.

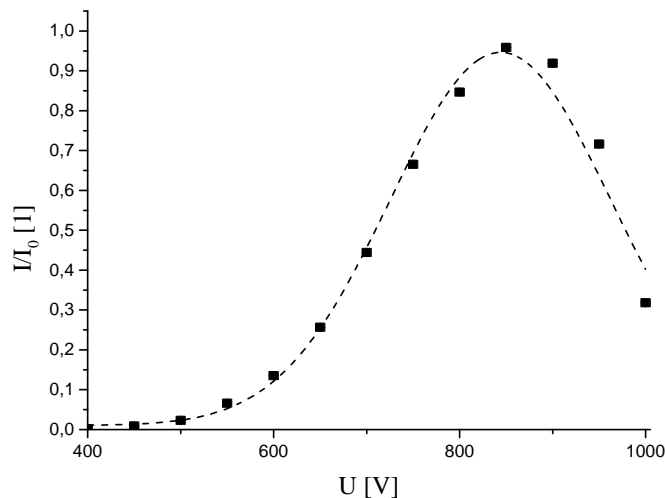
Na zosilňovači pripojenom k dióde sme nastavili ofset napätia na nízku zápornú hodnotu  $-0,252\text{ V}$  (pri zatičenom laseri), aby sme využili obe polarizácie zosilovača a mohli pracovať na citlivejšom rozsahu meracieho prístroja ( $2\text{ V}$ ).

Závislosť relatívnej intenzity  $I/I_0$  na napätí  $U$  na kryštáli sme merali dvakrát, obakrát v rozmedzí  $400\text{ V}$  až  $1000\text{ V}$  s krokom  $50\text{ V}$ . Pri prvom behu sme nechali každú hodnotu napätia konštantnú približne 2 minúty, pri druhom behu približne 4 minúty. Za správnu hodnotu  $I$  prislúchajúcu každému napätiu  $U$  považujeme aritmetický priemer posledných 5 hodnôt pred tým, ako sa zvýšilo napätie. Za presnosť napätia považujeme  $\pm 5\text{ V}$ .

Hodnoty tvaru  $U = f(I)$  sme prepočítali na hodnoty tvaru  $U = f(I/I_0)$ , kde  $I$  je napätie udané multimetrom zaznamenané počítačom upravené o ofset a  $I_0$  je hodnota udaná multimetrom pre laser prechádzajúci súhlasne orientovanými polarizátormi upravené o ofset, pričom sme pri prepočte zohľadnili percentuálnu aj digitálnu neistotu v  $I$  aj  $I_0$ , tú sme vo štvorci sčítali so smerodajnou odchýlkou na sade piatich použitých bodov a odmocnili. Dáta tohto tvaru sú vynesené v grafoch na obrázkoch 1 resp. 2 pre prvé resp. druhé meranie.



Obr. 1: Závislosť relatívnej intenzity prepusteného svetla na napätí na PLZT - prvé meranie



Obr. 2: Závislosť relatívnej intenzity prepusteného svetla na napätí na PLZT - druhé meranie

Závislosti v grafoch na obrázkoch 1 a 2 sme preložili závislosťou podľa predpisu

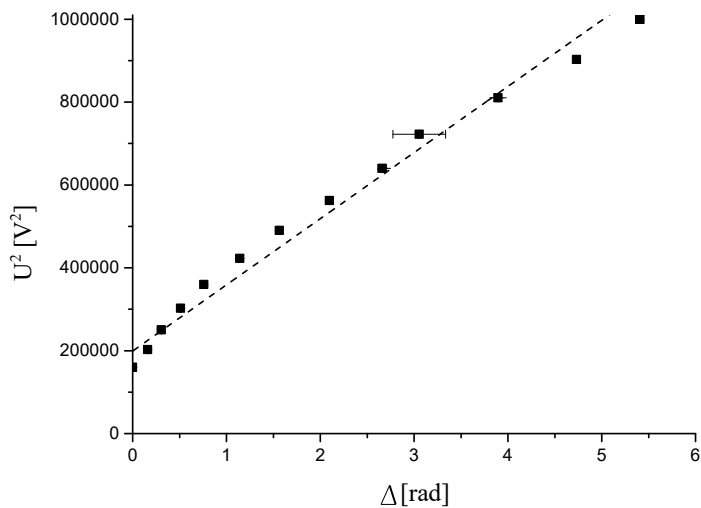
$$I/I_0 = k + A \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{U - B}{C}\right)^2\right), \quad (8)$$

ktorá nadobúda maxima pri napätí  $U_{\frac{\lambda}{2}} = 819(4)$  V pre dáta z prvého merania a pri napätí  $U_{\frac{\lambda}{2}} = 843(4)$  V pre dáta z druhého merania. Toto sú napätia, pre ktoré bolo svetlo polarizované rovnobežne s alanzátorom, teda polvlnné napätia. K ich presnosti sa vrátíme v diskuii.

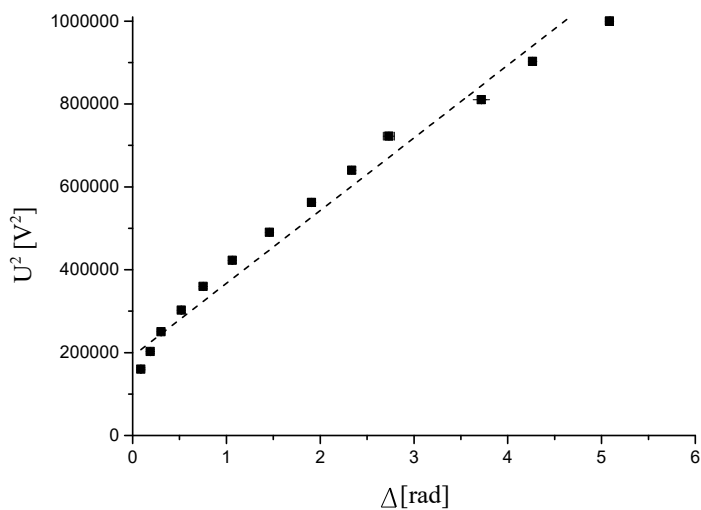
Dáta tvaru  $U = f(I/I_0)$  sme pomocou vzťahu 4 za prenesenia chyby podľa vzťahu

$$\sigma_{\Delta} = \frac{2\sigma_{\frac{I}{I_0}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{I}{I_0}\right)^2}}, \quad (9)$$

prerobili na dáta formátu  $U = f(\Delta)$ , pričom sme museli poupraviť funkciu  $\arcsin(x)$ , na funkciu, ktorej funkčné hodnoty sú pre hodnoty za maximom krivky  $U = f(I/I_0)$  väčšie, ako  $\pi$ . Pri umocnení  $U$  sme na  $U^2$  preniesli dvakrát zväčšnú relatívnu chybu (kvôli exponentu). Závislosti  $\Delta = f(U^2)$  sú vynesené v grafoch na obrázkoch 3 resp. 4 pre prvé resp. druhé meranie.



Obr. 3: Závislosť štvorca napätia na fázovom posune mimoriadnej vlny voči riadnej - prvé meranie



Obr. 4: Závislosť štvorca napätia na fázovom posune mimoriadnej vlny voči riadnej - druhé meranie

Závislosti na obrázkoch 3 a 4 sú preložené afínnym fitom predpisu  $U^2 = Q\Delta + U_0^2$ , určené koeficienty  $Q$  a  $U_0^2$  sú zapísané v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Fitovaním určené hodnoty koeficientov  $Q$  a  $U_0^2$

meranie	$Q$ [ $V^2\text{rad}^{-1}$ ]	$\sigma_Q$ [ $V^2\text{rad}^{-1}$ ]	$U_0^2$ [ $V^2$ ]	$\sigma_{U_0^2}$ [ $V^2$ ]
1	$1,99 \times 10^5$	$1,3 \times 10^4$	$1,60 \times 10^5$	$7 \times 10^3$
2	$1,92 \times 10^5$	$1,5 \times 10^4$	$1,75 \times 10^5$	$9 \times 10^3$

Vychádzajúc zo vzťahu 7 a znalosti<sup>[Pm]</sup>  $d = 1,4$  mm;  $l = 1,5$  mm (a predpokladu, že tieto hodnoty sú presné až na 0,1 mm) môžeme prenesením chyby  $\sigma_Q$  na chybu  $\sigma_K$  podľa vzťahu

$$\sigma_K^2 = 4 \left(\frac{K}{d}\right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{K}{Q}\right)^2 \sigma_Q^2 + \left(\frac{K}{l}\right)^2 \sigma_l^2 \quad (10)$$

určiť Kerrovu konštantu vzorky  $K$  na

$$K_1 = 1,05(18) \times 10^{-9} \text{ mV}^{-2} \quad (11)$$

na základe prvého resp. na

$$K_2 = 1,08(19) \times 10^{-9} \text{ mV}^{-2} \quad (12)$$

na základe druhého merania.

## 4 Diskusia výsledkov

Pri meraní vnášalo veľkú chybu to, že dióda merajúca intenzitu prešlého svetla bola v miestnosti bez akéhokoľvek odtienenia od okolitého svetla, dokonca natočená oproti oknu. Presnosť by výrazne zvýšilo, keby meranie prebehlo v tmavej miestnosti.

Pri spracovaní výstupu zo osilňovača sme predpokladali, že dióda aj zosilňovač sa v meranom rozsahu správajú lineárne. Toto nie je samozrejmosť a malo by to byť overené nezávislým meraním.

Polvlnné napätie sme určili ako stred Gaussovského fitu v grafoch 1 a 2, ktorý na dáta celkom dobre sedí, aj keď je nefyzikálny. Jeho nepresnosť je preto značná. Príkláňame sa viac k hodnote udanej druhým meraním, keďže toto meranie prebiehalo pomalšie, preto sú hodnoty  $I$  lepšie saturované a presnejšie. Určiť polvlnné napätie bolo možné napríklad zjemnením intervalu v okolí očakávanej hodnoty  $U_{\frac{\lambda}{2}} \approx 820V$ .

V grafe na obrázku 3 má jeden bod zjavne vyššiu nepresnosť, ako ostatné. Je to preto, že  $x$ -ová pozícia tohto bodu leží veľmi blízko hodnote  $\pi$ , teda v jej okolí je funkcia  $\arcsin x$  veľmi strmá.

## 5 Záver

Úspešne sme zostavili apratúru na meranie priečného Kerrovho javu v pevnej látke.

Určili sme polvlnné napätie použitého elektrooptického kryštálu na  $U_{\frac{\lambda}{2}} = 819(4)$  V resp.  $U_{\frac{\lambda}{2}} = 843(4)$  V prvým resp. druhým meraním, viac sa prikláňame k hodnote udanej druhým meraním.

Určili sme Kerrovu konštantu vzorky  $K$  na  $K = 1,05(18) \times 10^{-9}$  mV<sup>-2</sup> resp.  $K_2 = 1,08(19) \times 10^{-9}$  mV<sup>-2</sup> na základe prvého resp. druhého merania.

## 6 Zoznam použitej literatúry

- [St] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Študijný text k meraniu: Kerrov jav v pevnej látke*. [cit. 2017-05-01]. URL: <[http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_327.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_327.pdf)>.
- [Pm] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Pokyny pro měření: Kerrov jav v pevnej látke*. [cit. 2017-05-01]. URL: <[http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/pokyny/mereni\\_327.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/mereni_327.pdf)>.
- [PT] MyVolt.de. *Digital-Multimeter PeakTech P-2010* [cit. 2017-05-01]. URL: <<http://www.myvolt.de/index.php?cat=KAT64&product=P32092-AA&sid324EC0293F5F4A4B8C3E41A64533477D=c42863c9157ac35f4cc0df1ddecce69f>>.
- [Np] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Návod k programu: Záznam dát pomocou KUSB modulu*. [cit. 2017-05-01]. URL: <[http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/pokyny/mereni\\_327\\_2.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/mereni_327_2.pdf)>.