

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum III



Úloha č. 27

Název úlohy: Kerrův jev v pevné látce

Jméno: Vojtěch Votruba

Datum měření: 2024-03-01

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Použitá literatura	0–1	
Celkem	max. 17	

Posuzoval:

dne:

Pracovní úkoly

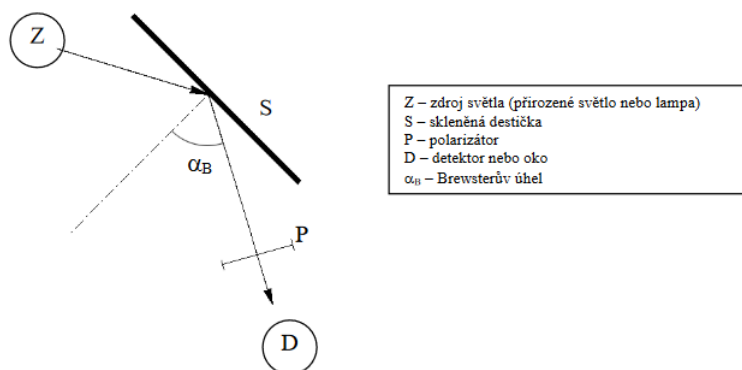
1. Najděte směry snadného průchodu polarizátorů používaných v aparatuře.
2. Sestavte aparaturu pro sledování příčného elektrooptického jevu v pevném vzorku. Laser umístěte tak, aby byl zdroj světla polarizován kolmo k vodorovné rovině. Ověřte polarizaci světla za vzorkem pro nulové napětí na elektrodách vzorku.
3. Změřte závislost intenzity světla dopadající na detektor na napětí přiloženém na elektrody vzorku (nepřekračujte 1kV !). Zpracujte graficky, určete půlvlnné napětí. Ověřte polarizaci světla za vzorkem pro půlvlnné napětí.
4. Ze směrnice závislosti fázového posunu mezi řádným a mimořádným paprskem na čtverci přiloženého napětí určete Kerrovu konstantu vzorku. Srovnajte s teoretickou závislostí.

1 Teoretická část

1.1 Průchod polarizátorem

Polarizátor je optický prvek, jehož smyslem je změnit polarizaci vstupujícího světla. V této úloze budeme termín polarizátor, resp. analyzátor používat ve smyslu polarizátoru, na jehož výstupu bude lineárně polarizovaná vlna. Obecně dochází při průchodu světla polarizátorem ke ztrátě na intenzitě v závislosti na jeho natočení, tzv. *směrem snadného průchodu* nazveme natočení polarizátoru, které odpovídá maximu prošlé intenzity [1].

Směr snadného průchodu v této úloze budeme hledat pomocí uspořádání na obr. 1



Obrázek 1: Experimentální uspořádání pro hledání směru snadného průchodu polarizátorem, [1]

1.2 Kerrův jev

Kerrův jev, který máme v této úloze zkoumat, je reakcí určitých látek (v této úloze budeme používat PLZT vzorek – keramika s obsahem olova, zirkonia, titanu a lanthanu) na jejich vložení do elektrostatického pole. Jeho hlavní pozorovatelný důsledek je, že se jinak izotropní látka stává anizotropní a při průchodu světla touto látkou tak můžeme pozorovat dvojlom [1].

Dvojlom v látkách obecně popisujeme tzv. extraordinárním (mimořádným) a ordinárním (řádým) indexem lomu. Dopadne-li světlo do anizotropního prostředí s mimořádným indexem lomu n_e a řádným indexem lomu n_o , rozdělí se svazek na dvě vlny navzájem kolmé lineární polarizace. Tyto dvě vlny se budou také nazývat řádnou, resp. mimořádnou a jejich rychlosti budou odpovídat právě onomu řádnému, resp. mimořádnému indexu lomu [1]. Po výstupu z anizotropního prostředí tyto dvě vlny superponují.

Vyjádříme-li si fázový rozdíl Δ vzniklý průchodem přes geometrickou dráhou l řádné a mimořádné vlny, dostáváme

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

kde λ je vlnová délka daného světla ve vakuu [1].

Centrálním vztahem této úlohy bude závislost fázového rozdílu Δ na intenzitě v našem vzorku přítomného elektrického pole E . Jde o kvadratickou závislost v podobě

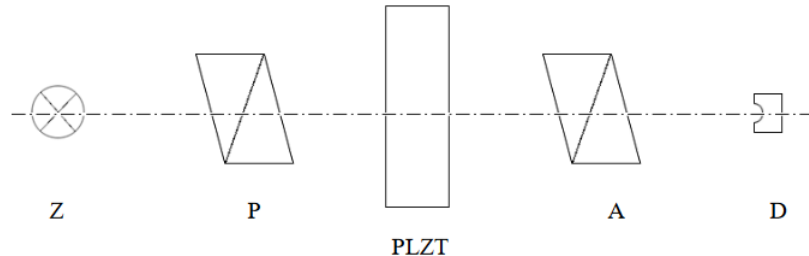
$$\Delta = 2\pi K l E^2, \quad (2)$$

¹Pro náš vzorek $l = 1,50(1)$ mm.

kde K je tzv. *Kerrová konstanta* vzorku. Intenzita elektrického pole je obecně gradientem potenciálu, a proto pro ni při napětí U na vzdálenosti d ² můžeme psát $E = \frac{U}{d}$, po dosazení do (2) dostáváme [1]

$$\Delta = 2\pi K l \frac{U^2}{d^2}. \quad (3)$$

K měření Kerrova jevu použijeme aparaturu znázorněnou na obr. 2 Máme-li aparaturu nastavenou tak, že



Obrázek 2: Aparatura pro měření polarizace světla: Z – He-Ne laser (s napájecím zdrojem), P – polarizátor v držáku s úhlovou stupnicí, A – analyzátor v držáku s úhlovou stupnicí, D – fotodetektor (fotodioda se zesilovačem a multimetrem), [1]

polarizátor a analyzátor budou navzájem zkříženy a vzorek bude vůči nim natočen o 45° , platí pro intenzitu světla I na detektoru vztah

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

kde I_0 odpovídá intenzitě při nulovém napětí. Význačná pro nás také bude hodnota při tzv. půlvlnném napětí, která odpovídá fázovému rozdílu mezi ordinární a extraordinární vlny o π – tato hodnota bude v naší zkoumané závislosti intenzity na přiloženém napětí maximem [1]. Po spojení vztahů (3) a (4) získáváme finálně

$$U^2 = \frac{d^2}{\pi K l} \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}. \quad (5)$$

2 Výsledky a zpracování měření

2.1 Podmínky pokusu

Měření bylo provedeno v místnosti PIII v budově MFF UK na Karlově. Změřené podmínky termo-hygrobarometrem při pokusu byly následující: Teplota $t = 25,2(4)^\circ\text{C}$, relativní vlhkost $\Phi = 38(3)\%$, tlak $p = 979(2) \text{ hPa}$.

2.2 Směr snadného průchodu a sestavení aparatury

Pro začátek měření, ke kterému nám byly poskytnuty dva polarizátory, bylo potřeba stanovit směr snadného průchodu těchto dvou optických prvků. To jsme udělali podle obr. 1 pomocí běžné lampy a skla, co jsme měli k dispozici v laboratoři. Úhel dopadu jsme nastavili přibližně na hodnotu Brewsterova úhlu, při kterém se od skla odráží pouze polarizace kolmá na rovinou dopadu, a přes polarizátory jsme jejich otáčením hledali minima intenzity prošlého světla.

Minimum se nám u prvního polarizátoru podařilo stanovit na $\vartheta = 84^\circ$ a u druhého polarizátoru (analyzátoru) na $\vartheta = 82,5^\circ$. Směr snadného průchodu pak odpovídá úhlu $\vartheta - 90^\circ$, což nám tedy vyšlo u prvního polarizátoru jako -6° a u druhého jako $-7,5^\circ$. Nejistotu jsme odhadli velikostí nejmenšího dílku na úhloměru připevněném k polarizátoru $\sigma_\vartheta = 0,5^\circ$.

Poté, co jsme našli směr snadného průchodu, bylo potřeba sestavit aparaturu. Učinili jsme tak podle schématu na obr. 2. Pro ověření polarizace světla jsme různě otáčeli polarizátory a sledovali jsme, jak se mění hodnota detekovaná na připojeném multimetru. Důležité bylo poznamenat si hodnotu I_0 , to experimentátor bohužel neudělal, ale zapamatoval si, že šlo o hodnotu okolo 0,9 a.u.³ Význačnou hodnotou bylo minimum, které nastávalo při kolmém zkřížení obou polarizátorů. Toto minimum bylo potřeba pro splnění dalších pracovních úkolů, a proto jsme po jeho nastavení polarizátory už neotáčeli.

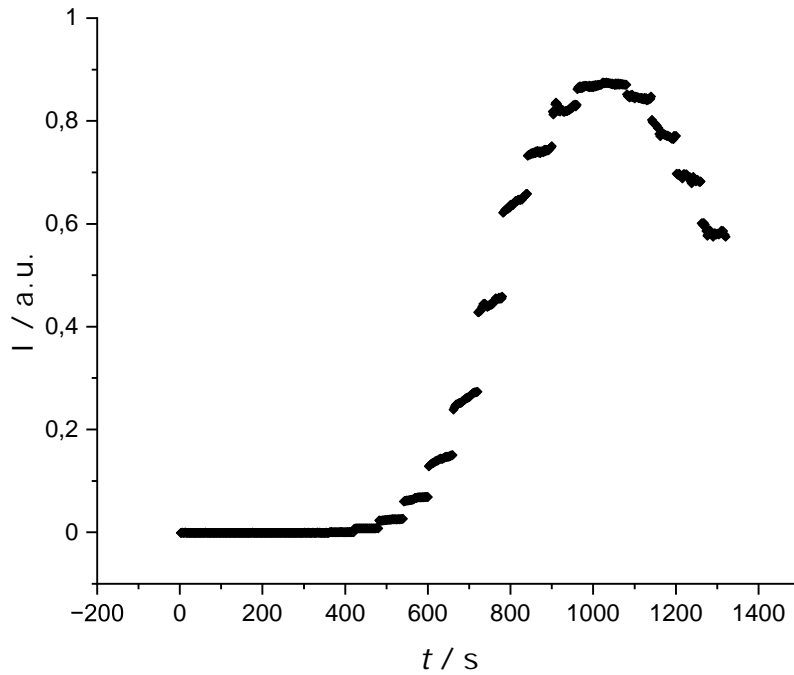
²Pro náš vzorek $d = 1,40(1) \text{ mm}$.

³Arbitrary units – Detektor snímá napětí, ale jeho velikost odpovídala světelné intenzitě. Ta může být definována různě: časová střední hodnota Poyntingova vektoru, časová střední hustota elektrické energie, časově středovaný kvadrát elektrického pole...

2.3 Měření Kerrova jevu

Celé měření této části probíhalo pomocí A/D převodníku a připojeného počítače. Na počítači experimentátor obsluhoval software KUSB zapisovač speciálně vyvinutý pro účel praktika. Software zaznamenával hodnoty napětí na detektoru (poměrově odpovídající intenzitě světla) v čase, proto měření probíhalo tak, že jsme nastavili danou hodnotu napětí a nechali software zaznamenat určitý počet hodnot.

Abychom dostatečně proměřili oblast maxima, probíhalo měření ve dvou částech. V první části jsme hrubě proměřili zadanou závislost, abychom odhadli přibližnou hodnotu pólvního napětí (≈ 850 V), a ve druhé části jsme již zahustili oblast okolo oné odhadnuté polohy. V softwaru jsme použili vzorkovací frekvenci 2 sekundy a vždy jsme pro jedno nastavené napětí na vzorku měřili po dobu 1 minuty. Konkrétně jsme podle instrukcí napětí na vzorku měnili na začátku o 100 V později o 50 V a v okolí maxima o 25 V. Druhý naměřený časový průběh je vykreslen do grafu na obr. 3 programem Origin.



Obrázek 3: Závislost intenzity I naměřené na detektoru na čase t

Dále jsme pro každou nastavenou hodnotu napětí spočetli průměrnou naměřenou intenzitu a z ní pak i fázový posun pomocí vztahu (4). Výsledky tohoto výpočtu jsou uvedeny v tabulce 1. Nejistotu napětí jsme odhadli jako 5 V, protože o tuto hodnotu přibližně napětí kolísalo a stoupalo na měřicím přístroji. Chybu zprůměrované intenzity jsme odhadli jako výběrovou odchylku z naměřených hodnot pro onu konkrétní hodnotu napětí na vzorku. Dle instrukcí jsme zpracovali závislosti i graficky pomocí programu Origin. Konkrétně tedy šlo o závislost intenzity I na napětí U a o závislost čtverce napětí U^2 na fázovém posunu Δ . Výsledky zpracování jsou k vidění na obr. 4 a na obr. 5.

Pro první ze závislostí jsme zároveň pomocí odečtení v Originu stanovili pólvní napětí a získali jsme tak získali hodnotu $U_{1/2} = 891(5)$ V.

Pro druhou závislost jsme potřebovali zjistit Kerrovu konstantu, to jsme provedli pomocí fitování vztahu (3). Vynesenu závislost na obr. 5 jsme částečně proložili přímkou a pomocí funkce Linear Fit v Originu jsme získali její směrnici $q = 1,8(2) \times 10^{-4} \text{ }^\circ \cdot \text{V}^{-1}$ i s nejistotou, to nám po přepočtení dává Kerrovu konstantu $K = 6,5(7) \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{V}^{-2}$, kde jsme její nejistotu určili podle metody přenosu chyb jako

$$\sigma_K = K \sqrt{\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_q}{q}\right)^2 + 2\left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2}. \quad (6)$$

Tabulka 1: Naměřené hodnoty intenzity I v závislosti na napětí U , fázový posun Δ byl dopočten

U / V	σ_U / V	$I / \text{a.u.}$	$\sigma_I / \text{a.u.}$	$\Delta / ^\circ$
0	5	0,00083	0,00009	3,5
100	5	0,0009	0,0001	3,7
200	5	0,0009	0,0001	3,6
300	5	0,0009	0,0001	3,7
350	5	0,0009	0,0001	3,7
400	5	0,0008	0,0003	3,4
450	5	0,000	0,001	2,4
500	5	0,008	0,003	10,6
550	5	0,025	0,006	19,1
600	5	0,07	0,01	31,3
650	5	0,14	0,02	46,7
700	5	0,26	0,03	64,9
750	5	0,44	0,03	89,3
800	5	0,64	0,02	115,1
825	5	0,74	0,01	130,2
850	5	0,824	0,009	146,2
875	5	0,867	0,002	158,0
900	5	0,872	0,004	159,8
925	5	0,845	0,008	151,5
950	5	0,78	0,02	136,8
970	5	0,69	0,02	122,1
995	5	0,585	0,008	107,4

3 Diskuse výsledků

3.1 Směr snadného průchodu a sestavení aparatury

V této části měření nebylo mnoho kvantitativních výsledků, a proto je náročné zhodnotit jeho úspěšnosti či případně hledat nezapočtené zdroje chyby. Jednou z věcí, na kterou se zde ale můžeme zaměřit je například nepřesnost určení směru snadného průchodu. Nastavení Brewsterova úhlu zde bylo provádění „od oka“ a je tak možné, že se experimentátor mohl dopustit poměrně velké chyby při jeho odhadu. Na druhou stranu změřený směr snadného průchodu přibližně odpovídal vertikální ose, což bylo pedagogem nápomocným studentovi při měření potvrzeno jako orientačně správný směr.

Největší chyby se zde však experimentátor dopustil pravděpodobně tím, že si přesně nezapsal hodnotu I_0 a musel se tak spoléhat na svou paměť, což bylo již rozvedeno v sekci Výsledky a zpracování měření.

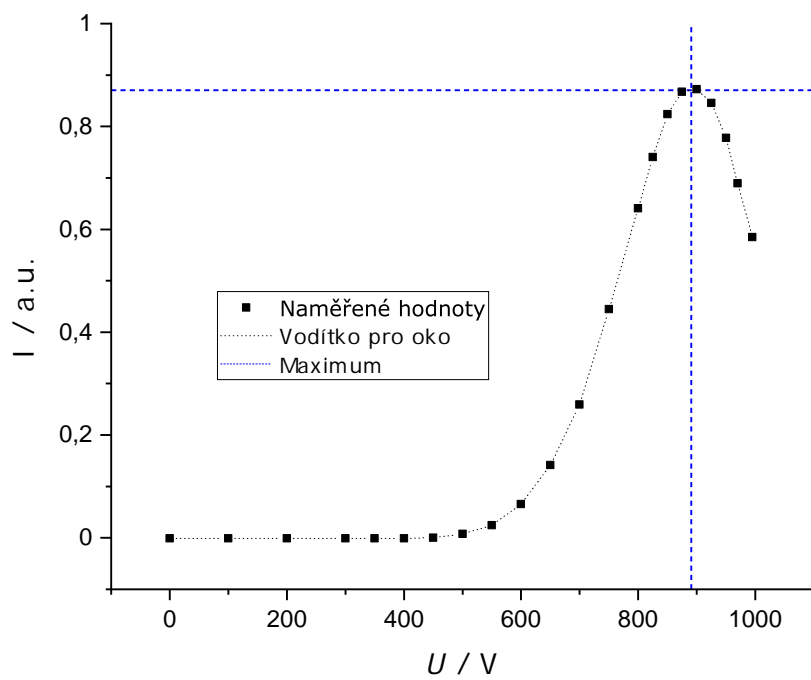
3.2 Měření Kerrova jevu

V příložených dokumentech na pracovním stole se experimentátor mohl přesvědčit, že naměřený časový průběh intenzity (viz obr 3) je rozumný, nejsou vidět ani žádné zásadnější oscilace a bylo tak možné pro určení půlplnného napětí použít prostý odečet z grafu. Tato metoda by mohla být nahrazená nějakou matematicky rigidnější nebo přesnější, avšak experimentátor se domnívá, že nejistota naměřených dat je dostatečně vysoká na to, aby hrubý odpočet výrazně nezvýšil celkovou nejistotu půlplnného napětí. Pokud bychom chtěli měření zpřesnit mohli jsme v okolí maxima měření ještě více zjemnit a posouvat napětí například po nikoliv 25, ale např. 10 V.

Bohužel nemáme k dispozici referenční hodnotu pro Kerrovu konstantu konkrétního vzorku, proto nemůžeme zhodnotit, jak uspokojivý je námi dosažený výsledek. V každém případě vidíme, že závislost není lineární a nejspíše bychom potřebovali další informace o vztahu (2) a jeho odvození, abychom mohli tento fenomén vysvětlit.

4 Závěr

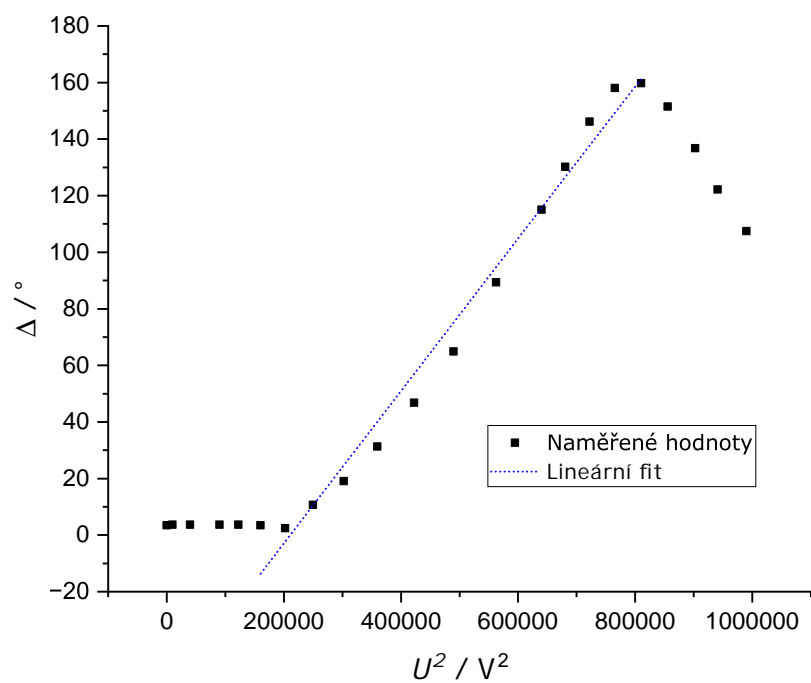
Pro poskytnutý PLZT vzorek jsme v praktiku proměřili Kerrův jev a dvojlom, který se objevuje v jeho důsledku. V rámci pracovních úkolů jsme proměřili a našli směr snadného průchodu, sestavili jsme a ověřili jsme funkčnost aparatury a po měření jsme stanovili půlplnné napětí $U_{1/2}$ na hodnotu $1,8(2) \times 10^{-4} \text{ } ^\circ \cdot \text{V}^{-1}$ a Kerrovu konstantu vzorku na hodnotu $K = 6,5(7) \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{V}^{-2}$.



Obrázek 4: Závislost intenzity I na přiloženém napětí U , vyznačeno půvlnné napětí

Reference

- [1] (27) *Kerrův jev v pevné látce* [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/327>



Obrázek 5: Závislost fázového posunu Δ na čtverci přiloženého napětí U^2