

## Měření optických nelinearit různých krystalů

Vedoucí: RNDr. Martin Kozák, Ph.D. (kozak@karlov.mff.cuni.cz), KCHFO MFF UK

Konzultant: M.S. Pawan Suthar (pkmsuthar@karlov.mff.cuni.cz), KCHFO MFF UK

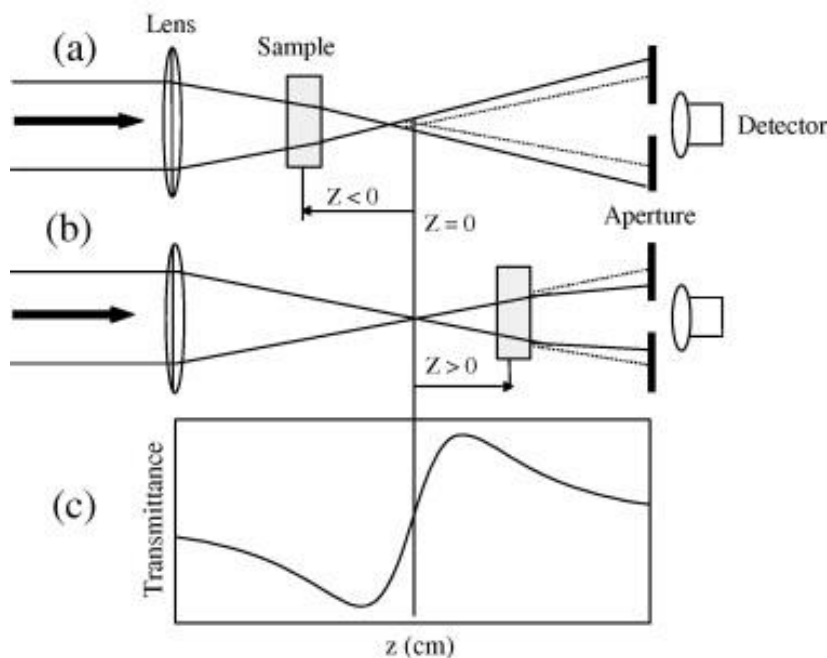
Nelineárně-optická odezva materiálů se začíná projevovat při vysokých špičkových intenzitách světla, jaké jsou dosahovány např. v případě femtosekundových laserových pulzů. Jedním z projevů nelineární optiky je závislost indexu lomu na intenzitě světla, která je v prvním přiblížení lineární a je určena materiálově-závislou konstantou, tzv. nelineárním indexem lomu. K měření této konstanty lze s výhodou použít jednosvazkovou metodu z-sken, při které se studovaný vzorek posouvá přes ohnisko laserového svazku a měří se intenzita světla prošlého aperturou umístěnou za vzorkem (viz. obrázek).

Cílem projektu je studovat nelineární index lomu různých krystalických materiálů pomocí metody z-sken. Student se nejprve stručně seznámí s fyzikální podstatou nelineárního indexu lomu a základy metody z-sken. Poté změří touto metodou nelineární index lomu krystalů LiF, CaF<sub>2</sub>, MgO, GGG a dalších pomocí femtosekundových laserových pulzů v blízké a střední infračervené spektrální oblasti.

Literatura:

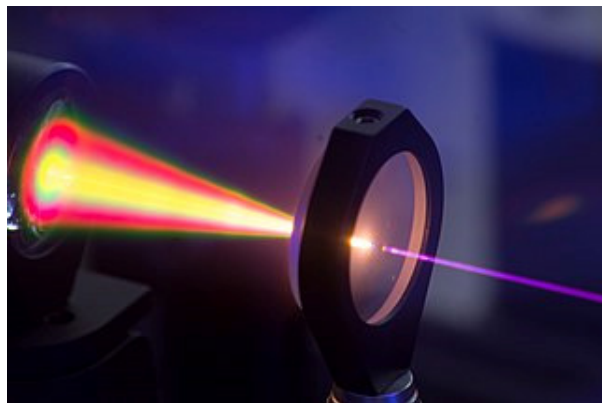
R. Boyd, *Nonlinear Optics*, Academic Press 2003.

Vybraná časopisecká literatura.

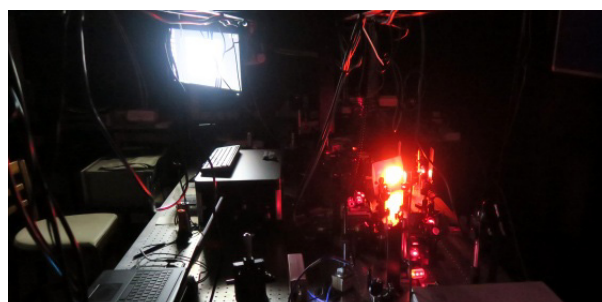


## Generace kontinua femtosekundovými laserovými pulzy

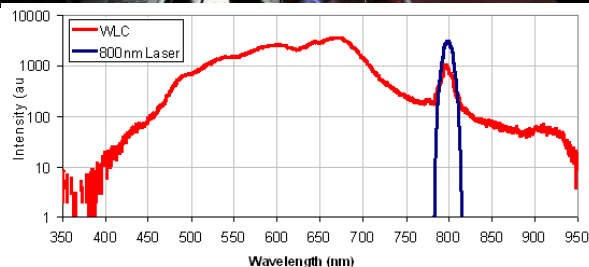
Vedoucí: doc. RNDr. František Trojáněk, Ph.D. ([trojanek@karlov.mff.cuni.cz](mailto:trojanek@karlov.mff.cuni.cz)), KCHFO  
MFF UK



Interakce mezi látkou a světelným zářením silně závisí na intenzitě světla. Pokud je intenzita hodně veliká, jako je tomu například v případě laserových pulzů dlouhých několik stovek femtosekund, přestávají platit běžné zákony optiky a začíná oblast nelineární optiky. Jedním z velice zajímavých jevů, ke kterým v tomto případě může docházet, je změna vlnové délky (barvy) laserového záření. Ve vhodně zvolených materiálech může být tato změna dokonce tak veliká, že vzniklé světlo obsahuje prakticky veškeré vlnové délky z viditelné části spektra a proto se takové světlo jeví okem jako bílé.



V rámci tohoto studentského projektu budou studovány a optimalizovány vlastnosti takto vyvolaného světla, tzv. femtosekundového kontinua, z hlediska jeho následného využití pro spektroskopická měření v laserové laboratoři.



### Literatura:

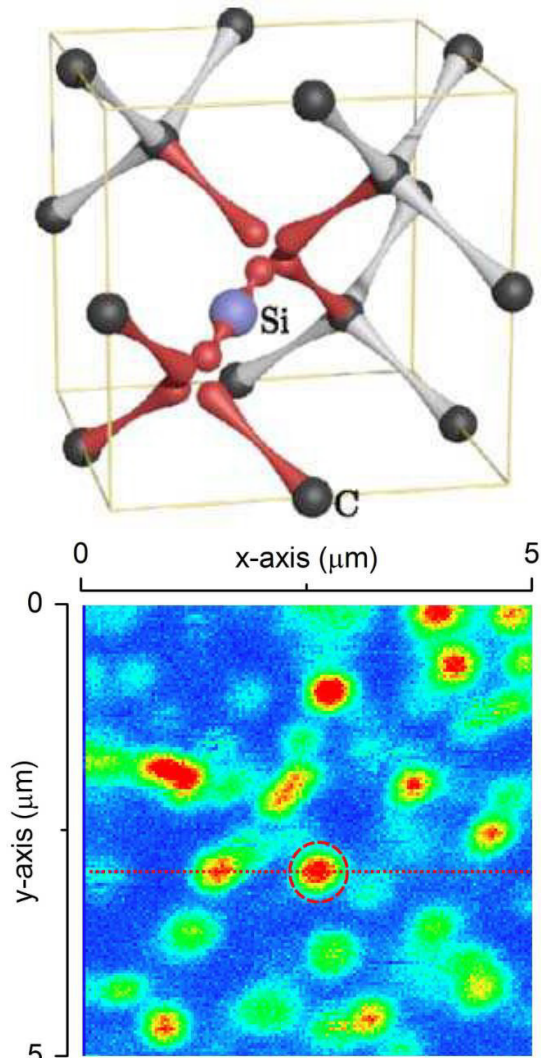
H. Reichlová: Použití nelineární optiky pro změnu vlnové délky laserových pulzů, Bakalářská práce, MFF UK, Praha, 2008

N. Streshkova, Femtosekundová absorpční spektroskopie v štúdiu stimulovanej emisie, Bakalářská práce, MFF UK, Praha, 2020

R. Boyd, Nonlinear Optics, Academic Press, 2003

## Luminiscence barevných SiV center v diamantu

Vedoucí: doc. RNDr. František Trojáněk, Ph.D. ([trojanek@karlov.mff.cuni.cz](mailto:trojanek@karlov.mff.cuni.cz)), KCHFO MFF UK



Y. Liu et al., Sci. Rep. 5, 12244, 2015

A. Siphigil et al., Phys. Rev. Lett. 113, 11, 2014.

Některé bodové defekty v diamantu se v posledních době těší velké pozornosti jak z hlediska teoretické fyziky, tak i z hlediska jejich uplatnění v praxi. Tyto izolované defekty, tzv. barevná centra, mohou sloužit například jako biosenzory, zdroje jednotlivých fotonů nebo potenciální základní jednotky pro kvantové počítače. Vysoce kvalitní diamantové vzorky s dostatečnou koncentrací barevných center také mohou být studovány jako média pro zesílení světla stimulovanou emisí. Pro využití barevných center v různých aplikacích jsou zapotřebí přesné znalosti vlastností jejich optických přechodů.

Cílem tohoto projektu bude optická charakterizace vybraných diamantových vzorků zejména s SiV (silicon-vacancy) centry pomocí luminiscenčních měření za různých teplot (13 – 300 K). Projekt je možné rozšířit i o měření luminiscence s vysokým časovým rozlišením. Vzorky pro tento projekt jsou vyvíjeny a připravovány spolupracujícím pracovištěm FzÚ AV ČR.

### Literatura:

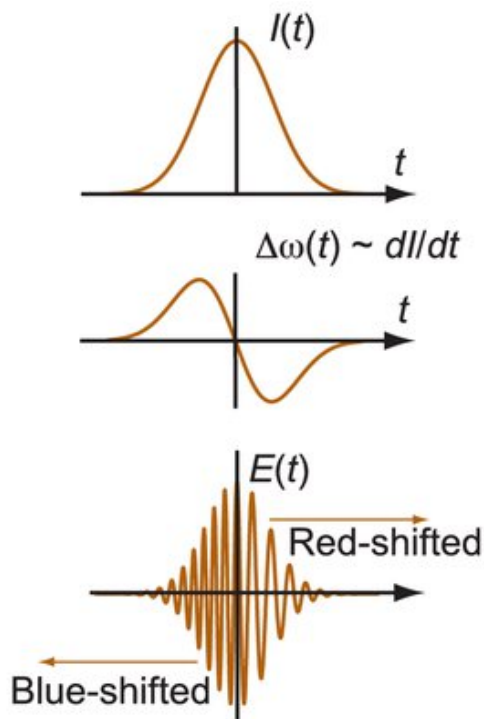
I. Pelant, V. Valenta, Luminiscenční spektroskopie I., II., Academia, Praha, 2006

[https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon-vacancy\\_center\\_in\\_diamond](https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon-vacancy_center_in_diamond)

K. Hamráček, Časově rozlišená spektroskopie SiV center v diamantu, Diplomová práce, MFF UK, Praha, 2021

## Modelování automodulace fáze ultrakrátkého laserového pulzu

Vedoucí: doc. RNDr. František Trojánek, Ph.D. ([trojane@karlov.mff.cuni.cz](mailto:trojane@karlov.mff.cuni.cz)), KCHFO MFF UK



Důsledkem nelineárního, tj. intenzitně závislého indexu lomu je automodulace fáze. Jedná se o jev, který se projevuje při šíření ultrakrátkých, velmi silných laserových pulzů nelineárním prostředím. Dochází při něm ke změně spektra v časovém průběhu pulzu a díky disperzi prostředí (závislosti indexu lomu na frekvenci) k časovému a spektrálnímu rozšiřování pulzu.

Automodulace fáze se projevuje tím, že se přední a zadní část pulzu šíří různě rychle (mají různou okamžitou frekvenci, a tím i index lomu) a pulz se rozšiřuje v čase. Tento efekt může být větší než při klasické disperzi, kdy k rozšiřování pulzu dochází vlivem přirozené šířky spektra ultrakrátkého pulzu. Pokud nelineární index lomu je kladný, přední část pulzu (časově) má sníženou okamžitou frekvenci, tzn. frekvence je posunuta do *červené*. Kdežto zadní část pulzu má frekvenci zvýšenou, je posunuta do *modré*.

Cílem projektu bude odvození vztahů pro různé tvary pulzů a modelování jejich tvaru a spektra při šíření konkrétním nelineárním prostředím.

### Literatura:

R. Boyd, Nonlinear Optics, Academic Press, 2003

[https://en.wikipedia.org/wiki/Self-phase\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Self-phase_modulation)

## Femtosekundový optický spínač

Vedoucí: RNDr. Martin Kozák, Ph.D. (kozak@karlov.mff.cuni.cz), KCHFO MFF UK

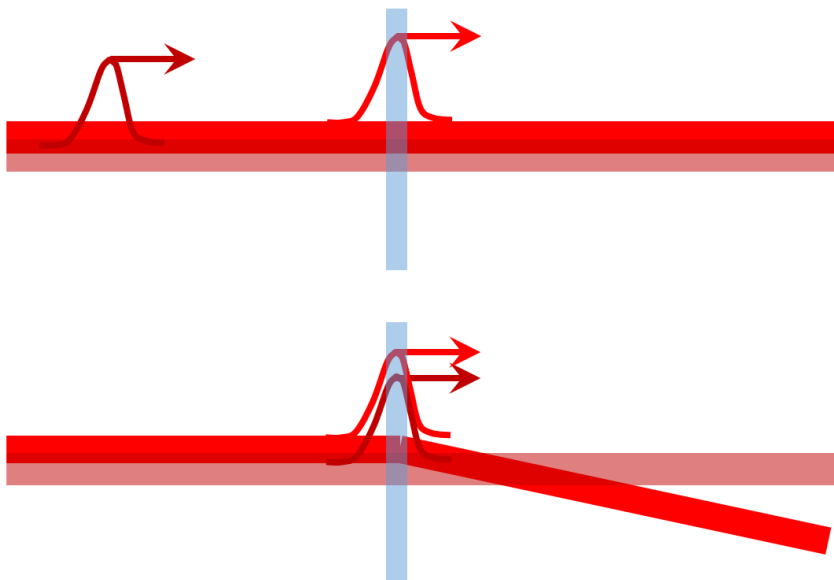
V lineární optice platí princip superpozice a světelné svazky se navzájem nemohou ovlivňovat. Pro potřeby optických komunikací či výpočetní techniky založené na optických signálech jsou třeba optické součástky, které umožňují kontrolovat směr šíření optických pulzů pomocí jiných optických pulzů s menší intenzitou. Toho lze dosáhnout za pomoci nelineární optiky, konkrétně např. díky závislosti indexu lomu na intenzitě světla. Pokud se světlo s vysokou intenzitou šíří materiálem, index lomu se mění a tato změna je v prvním přiblížení úměrná intenzitě světla. Pokud krátký pulz ve formě světelného svazku vytvoří gradient indexu lomu, dojde při průchodu jiného pulzu osvětlenou oblastí k jeho odklonu, tedy ke změně směru šíření.

Cílem projektu je sestavit a studovat optický spínač s časovým rozlišením několika femtosekund, ve kterém směr šíření jednoho optického pulzu bude řízen druhým optickým pulzem. Princip bude založen na vytvoření gradientu indexu lomu v tenkém sklíčku pomocí fokusace kontrolního svazku. Za nepřítomnosti kontrolního pulzu projde světlo kontrolovaného pulzu přímo. Po vytvoření gradientu indexu lomu se svazek odchýlí do jiného směru. K provedení tohoto experimentu bude využito již existující experimentální uspořádání dovolující kontrolovat zpoždění dvou vysokoenergetických femtosekundových optických pulzů v různých částech viditelného a infračerveného spektra.

Literatura:

R. Boyd, *Nonlinear Optics*, Academic Press 2003.

Vybraná časopisecká literatura.



# Metačočky

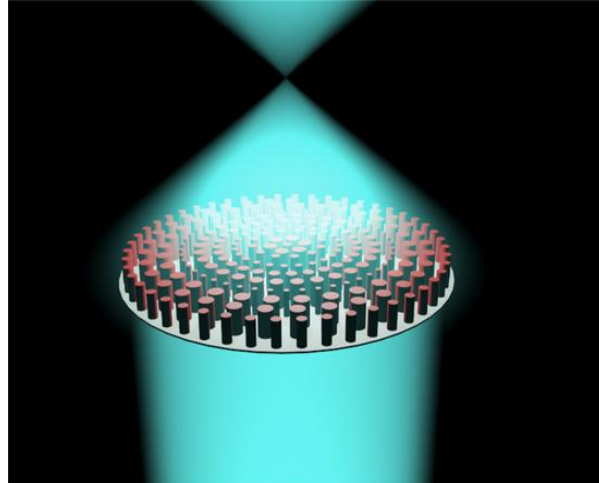
Vedoucí: RNDr. Martin Kozák, Ph.D. (kozak@karlov.mff.cuni.cz), KCHFO

Konzultant: Mgr. Pavel Peterka (pppeterka@email.cz), KCHFO

Běžné objemové čočky se používají pro fokusování světla po stovky let. V nedávné době byly vyvinuty ploché dvoudimenzionální struktury tzv. metačočky umožňující fokusovat elektromagnetické záření. Jde například o nanostrukturu složenou z dielektrických válců o různých poloměrech, které mění fázi procházejícího světla. Metačočky mají oproti klasickým čočkám řadu výhod. Umožňují vyhnout se některým vadám čoček a dosáhnout lepší kvality fokusace.

K výpočtům šíření elektromagnetického vlnění strukturami bude použita metoda finite-difference time-domain (FDTD). Metoda je založená na numerickém řešení diferenciálních rovnic v časové doméně, v tomto případě konkrétně Maxwellových rovnic. Metoda se využívá k řešení mnoha vědeckých a inženýrských problémů týkajících se interakce elektromagnetické vlny s materiály a umí se jednoduše vypořádat s různými typy materiálů, jako jsou dielektrika, disperzní, nelineární i anizotropní materiály.

Cílem projektu bude zejména aby se student naučil pracovat se softwarem Lumerical FDTD. Dále budou provedeny výpočty změny fáze světla při průchodu nanostrukturou.



Kanwal, Saima, et al. "Polarization insensitive, broadband, near diffraction-limited metalens in ultraviolet region." *Nanomaterials* 10.8 (2020): 1439.

## Doporučená literatura:

P. Malý, Optika, Karolinum (2013)

Lumerical FDTD Solver Course

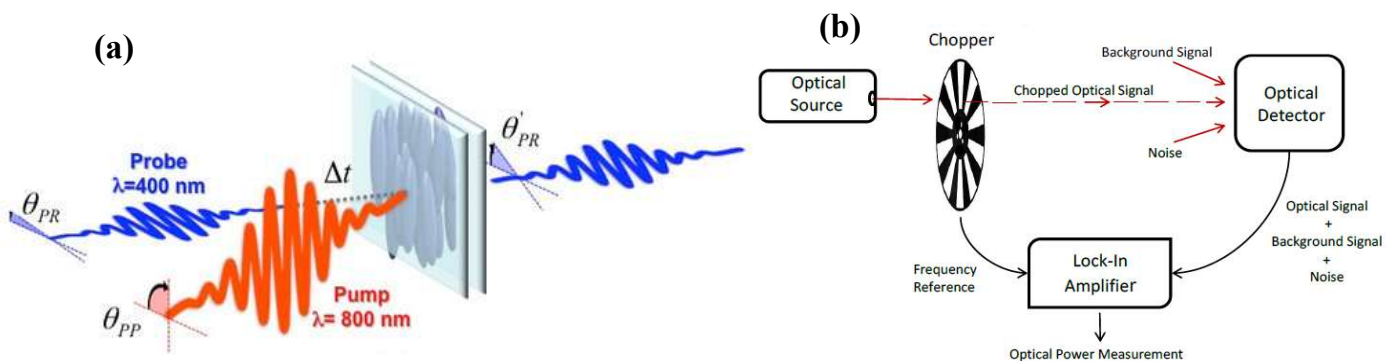
# Využití fázově citlivé detekce v ultrarychlé laserové spektroskopii

Vedoucí: RNDr. Eva Schmoranzarová, Ph.D. ([eva.schm@karlov.mff.cuni.cz](mailto:eva.schm@karlov.mff.cuni.cz)), KCHFO

Konzultant: Msc. Zeynab Sadeghi

Metody ultrarychlé laserové spektroskopie jsou založeny na excitaci vzorků pomocí krátkých laserových pulsů, typicky řádově desítky femtosekund [1]. Laserové pulsy vyvolávají v materiálu dynamickou odezvu, která je zaznamenávána pomocí časově zpožděného sondovacího pulsu (Obr. 1 (a)). Laserem vyvolané změny v materiálech jsou však extrémně malé, a celý experiment proto vyžaduje velice citlivou detekci optických signálů. Za tímto účelem je ve většině časově rozlišených optických měření implementována tzv. fázově citlivá (tzv. „lock-in“) detekce, která funguje na principu kombinace měřeného modulovaného signálu z fotodetektoru s referencí o shodné frekvenci a pevné fázi [2], viz Obr. 1 (b).

Cílem tohoto projektu bude vylepšení stávajícího časově rozlišeného experimentu implementací nově zakoupeného lock-in zesilovače SR860. Jde o výrazně modernizovanou verzi původních zesilovacích jednotek SR830, které jsou v laboratořích užívány v současné době. Student si osvojí detailnější principy lock-in detekce, a otestuje funkcionalitu a nové možnosti tohoto zesilovače - např. přímou komunikaci s přerušovačem svazku, využití dvojitě referenční atd. Veškeré testování bude probíhat v rámci experimentů probíhajících v Laboratoři Optospintroniky, student tedy bude mít možnost seznámit se i s pokročilými metodami ultrarychlé spektroskopie, a podílet se na reálném měření.



Obr.1 (a) Princip fungování metod ultrarychlé laserové spektroskopie  
(b) fázově citlivá detekce pomocí lock-in zesilovače



## Literatura:

[1] <https://www.newport.com/n/ultrafast-spectroscopy>

[2] <https://www.zhinst.com/europe/en/resources/principles-of-lock-in-detection>

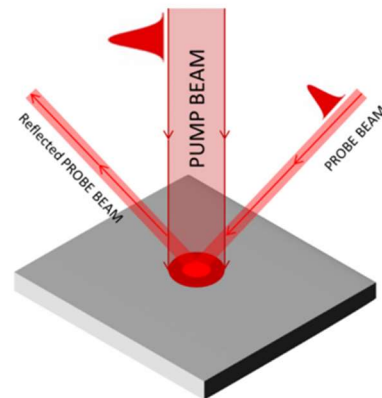
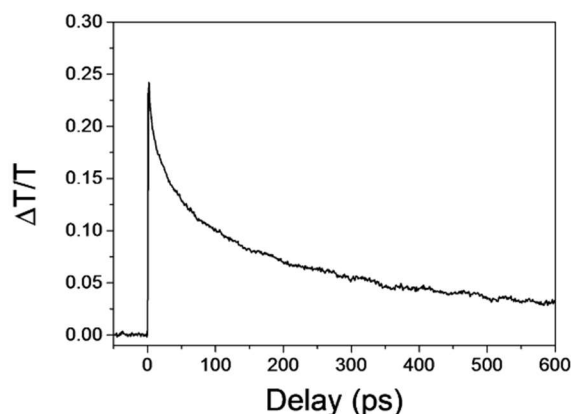
## Balancing detectors for noise cancelling in ultrafast laser spectroscopy experiments

Supervisor: Zeynab Sadeghi ([zeynab.sadeghi@matfyz.cuni.cz](mailto:zeynab.sadeghi@matfyz.cuni.cz))

Consultant: Eva Schmoranzeroва ([eva.schm@karlov.mff.cuni.cz](mailto:eva.schm@karlov.mff.cuni.cz))

In our Laboratory of Opto-Spintronic (LOS), light is used to study ultrafast spin dynamics in magnetic materials. In the so-called “pump&probe” methods, we are exciting magnetic sample with a strong laser pulse (pump) of a duration of only 100fs, triggering non-equilibrium spin dynamics. The dynamics is then studied using weaker “probe” pulses, time-delayed with respect to the “pump” beam. Both pump and probe beams are spatially and temporally overlapped on the sample.

In our particular experimental settings, the pump-induced spin dynamics is studied by means of time-resolved magneto-optics, which requires extremely sensitive detection of changes of polarization state of the probe beam. For this purpose, a special detection scheme – an optical bridge – is implemented which contains two crucial components. Firstly, the *photodetectors* are to detect the light from the sample and to transfer it to an electronic signal readable by a computer. Secondly, a differential preamplifier serves to subtract signals from two detectors to record small changes in the optical bridge while cancelling optical and electronic noise. Up to now, we have been using home-made preamplifiers and detectors. Recently we have purchased a highly sensitive balanced detector from Thorlabs that promises a better sensitivity and higher signal-to-noise ratio. These new systems now need to be tested in a real experiment and find its ultimate working conditions, which is an objective of this student project.



[1] M. Surýnek, L. Nádvorník, E. Schmoranzeroová, and P. Němec, *Quasi-nondegenerate pump-probe magneto-optical experiment in GaAs/AlGaAs heterostructure based on spectral filtration*, New J. Phys. 22, 093065 (2020).



# Spintronic emitters – nový způsob generování terahertzových elektromagnetických pulzů

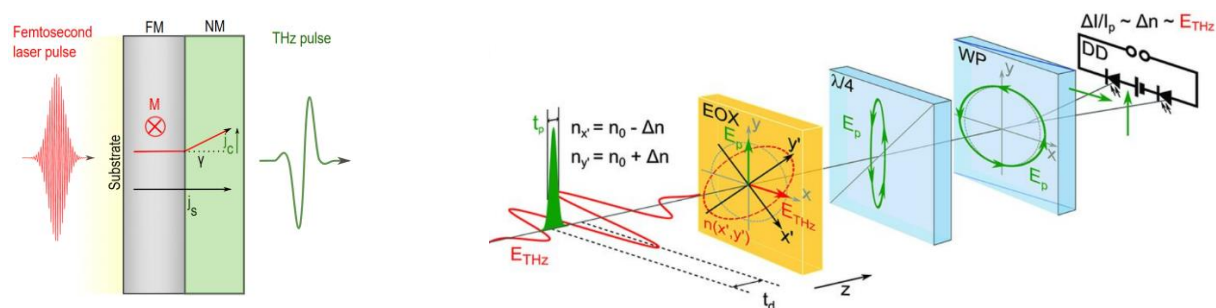
Vedoucí: RNDr. Lukáš Nádvořník, Ph.D. (nadvořnik@karlov.mff.cuni.cz), KCHFO

Konzultant: Mgr. Jiří Jechumtál (jiri.jechumtal@matfyz.cuni.cz), KCHFO

Nedávný objev spintronických emitorů terahertzových (THz) pulzů [1] vedl k významnému posunutí možností efektivní a uživatelsky přívětivé generace THz pulzů pro časově rozlišenou THz spektroskopii. Kloubí v sobě možnosti generování širokospektrálního THz záření, neb narozdíl od nelineárních krystalů dřívě běžně užívaných pro THz emisi [2] nemají frekvence tlumené interakcí s kmity mřížky, a snadné manipulace s polarizací. Dále přináší možnost výzkumu fyzikálních efektů intrinsicky spjatých s THz emisí jako kupříkladu spinového hallova jevu [3], ultrarychlé demagnetizace [4] či ultrarychlých spinových proudů [5].

Standardní způsob detekce THz pulzů v časově rozlišené THz spektroskopii je elektrooptické vzorkování využívající stroboskopické odečítání elektrického pole THz pulzu pomocí dvojlomu, jež indukuje v nelineárním optickém krystalu [2]. Různé detekční krystaly jsou ovšem kvůli různým rezonančním frekvencím kmitů atomové mřížky a různým tloušťkám schopny detekovat jen určité spektrální oblasti s různou efektivitou.

Cílem projektu je charakterizace efektivnosti a fluenční závislosti nově vyrobené sady spintronických emitorů THz záření, které budou dále používány v laboratoři terahertzové spintroniky na KCHFO a stejně tak charakterizace efektivnosti a spektrální citlivosti sady různě tlustých detekčních krystalů GaP a ZnTe. Projekt je vhodný i pro studenty 1. ročníku. Student se během řešení detailně seznámí s časově rozlišenou THz spektroskopií.



## Seznam literatury

- [1] T. Seifert et Al., Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation. *Nat. Phot.* 10, 483 (2016).
- [2] S. L. Dexheimer. Terahertz Spectroscopy principles and applications. *CRC Press*, New York (2008).
- [3] T. Seifert et Al., Terahertz spectroscopy for all-optical spintronic characterization of the spin-hall-effect metals Pt, W and  $\text{Cu}_{80}\text{Ir}_{20}$ . *Journal of Physics D: Applied Physics* 51, 36 (2018).
- [4] R. Rouzgar et Al., Laser-induced terahertz spin transport in magnetic nanostructures arises from the same force as ultrafast demagnetization, *Phys. Rev B* 106, 144427 (2022).
- [5] J. Jechumtál, Diploma Thesis: Study of spin dynamics in magnetic metals using terahertz and optical spectroscopy, Charles University, Faculty of Mathematics and Physics (2022).

# Štúdium anizotropných vlastností antiferomagnetických materiálov pre spintronicke pamäte pomocou azimutálnej modulácie THz polarizácie

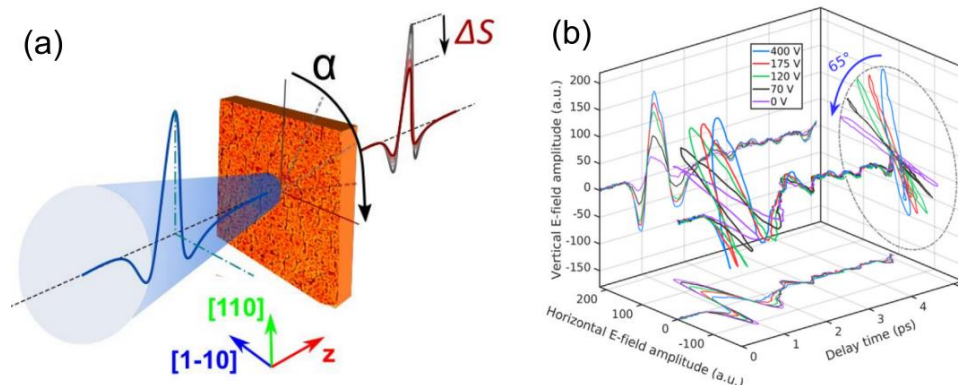
Vedúci: RNDr. Lukáš Nádvorník, Ph.D. (nadvornik@karlov.mff.cuni.cz), KCHFO

Konzultant: Mgr. Peter Kubaščík, (peter.kubascik@matfyz.cuni.cz), KCHFO

THz spektrálna oblasť patrí v súčasnej dobe medzi veľmi skúmanú, nakoľko do nedávna neexistovali efektívne zdroje tohto žiarenia a tiež spôsoby efektívnej detekcie. Obecne sa jedná o frekvenčnú oblasť 1-10 THz, teda frekvencie medzi rádiovými vlnami (<100 GHz) a optickou spektrálnou oblasťou (>100 THz), pričom s optikou má spoločné, že sa môže šíriť vo forme dobre definovaných zväzkov a s rádiovými vlnami možnosť priamej detekcie jednotlivých kmitov elektrického poľa. Nakoľko sa však jedná voči optike o veľmi mladú techniku, niektoré metódy, ako napríklad ľubovoľné točenie THz polarizáciou ostáva oriešok.

V súčasnej dobe sa na oddelení KCHOF MFF UK snažíme študovať THz anizotropné vlastnosti antiferomagnetických materiálov pre novú generáciu spintronicke pamätí. Aktuálne riešenie spočíva v mechanickej rotácii vzorky voči polarizácii THz pulzu [1] (Obr. 1a), čo vedie k rade nevýhod, ako napríklad posun laserovej stopy do vzorky, či komplikovanej justáže. Navyše nie je možné jednoducho meniť vonkajšie parametre experimentu ako napríklad teplotu. Optimálne riešenie by bolo točiť polarizáciu THz pulzu voči vzorky. To však naráža na problém, že aj samotná THz detekcia je silne polarizačne závislá [2]. Jedným z možných východísk je implementácia experimentálneho usporiadania pre meranie stočenia roviny polarizácie (viď Obr. 1b) [3].

Hlavným cieľom je vyskúšať techniku azimutálnej modulácie na základe merania stočenia roviny polarizácie. Študent sa pri riešení projektu oboznámi s časovozlíšenou THz spektroskopiou a detekciou stočenia roviny polarizácie THz pulzov. V ďalšej fáze pod vedením vedúceho projektu navrhne a zrealizuje experimentálne usporiadanie pre azimutálnu moduláciu a premera anizotropnú vodivosť antiferomagnetu CuMnAs, ktorá už bola v minulosti charakterizovaná. V prípade úspešného riešenia projektu táto technika, rozšíri naše experimentálne možnosti o merania teplotnej závislosti a experimentov anizotropného zápisu informácie a v prípade záujmu bude možné o tieto merania projekt rozšíriť. Jedná sa o experimentálne komplikovanejší projekt, ktorý však nepredpokladá žiadne hlboké predošlé znalosti a preto ho zvládnu aj študenti prvého ročníku



**Obr. 1:** (a) Ukážka merania anizotropnej vodivosti založená na rotácii vzorky. (b) Azimutálne modulovaná PMN-PT spintronicke emitor. Prevzaté z [2].

## Seznam literatury:

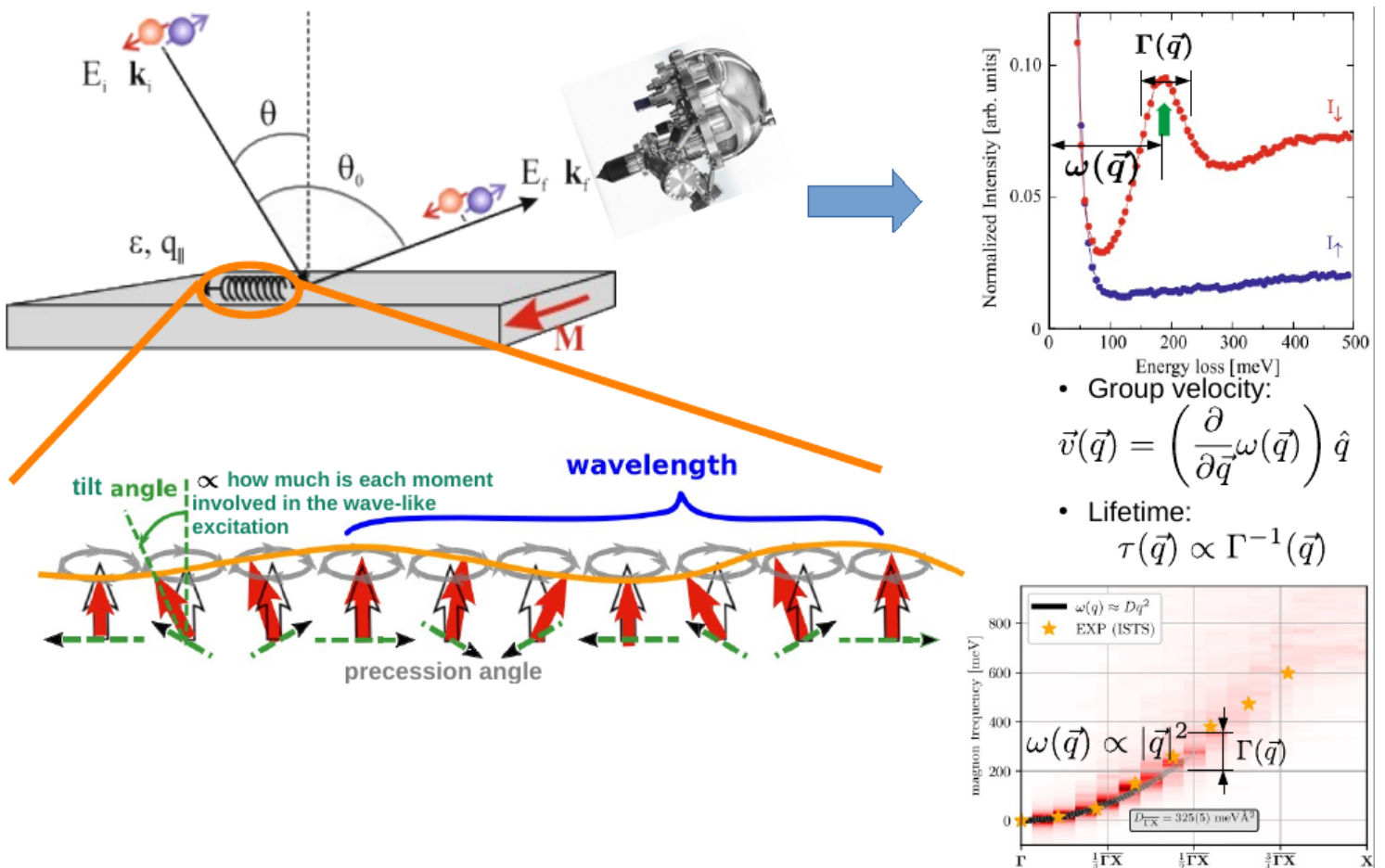
[1] P. Kubaščík et. al. Terahertz probing of anisotropic conductivity and morphology of CuMnAs epitaxial thin films. <https://arxiv.org/abs/2303.15268>

[2] LEE, Yun-Shik. *Principles of terahertz science and technology*. Springer Science & Business Media, 2009

[3] G. Lezier et al. Fully reversible magnetoelectric voltage controlled THz polarization rotation in magnetostrictive spintronic emitters on PMN-PT. *Appl. Phys. Lett.* 120, 152404 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0080372>

## Internship project: Magnons beyond ferromagnets

Magnons are a particular type of excitations which can exist in magnetic materials. At the simplest level they can be visualized as a coherent, wave-like precession of atomic magnetic moments, each slightly tilted away from its equilibrium direction of e.g. ferromagnetic order. This level of description highlights some similarities with the case of phonons, while other aspects of the physics are electronic in nature [1]. The study of magnetism beyond the ground state addresses not only fundamental questions in condensed matter physics and material science, but it has been also proposed as a possible ingredient for practical future technological applications [2].



Theoretical methods allow to describe this phenomenology at different scales and degrees of realism, depending on the features of interest. The atomic magnetic order and its dynamics are typically described by the Heisenberg model and by the Landau-Lifshitz equation of motion [3]. Further extensions can account e.g. for higher order magnetic interactions [4], or for various types of external perturbations [5]. On the other hand, a deeper study of the problem in terms of the underlying electronic structure allows to estimate from *first principles* the material-specific parameters which enter the above approximations, and to pursue quantitative comparison with experiments. Scientific computing approaches and *ab initio* theory allow in particular to perform systematic numerical simulations, sometimes ahead of actual measurements; and to put to test possible ideas and conjectures for the understanding of underlying physical mechanisms.

This internship project concerns the theoretical/numerical study of magnons in materials, where these excitations acquire interesting features thanks to “external” fields with respect to the basic viewpoint of a basic lattice of atomic magnetic moments to host the excitation. The origin of such enriched phenomenology can be e.g. the internal crystal field already present within a material due to non-magnetic atoms [6]–[8], and/or an applied perturbation which could offer an external handle to control various features of the system [9]–[11]. Further work in this area fits within presently ongoing research lines, and it will pursue the question of how large effects could be expected to be in different materials, what criteria could be useful to identify further candidates, how one might think about future measurements.

The particular theme will be used as “training ground” to get started with density functional theory (DFT) and its actual usage for the realistic study of concrete materials, in combination with advanced electronic structure codes [12] and high-performance / scientific computing approaches. Depending on interests and evolution of the project, it may evolve more toward the atomistic spin dynamics side, or toward the underlying electronic structure aspects [13].

In case of interest, please do not hesitate to get in touch for further discussion!  
Thanks,

Dr. Alberto Marmodoro  
[marmodoro@fzu.cz](mailto:marmodoro@fzu.cz)

Institute of Physics (FZU),  
Czech Academy of Sciences, Praha  
/  
/ New Technologies Center (NTC),  
University of West Bohemia, Plzen.

**Bibliography:**

- [1] M. P. Marder, *Condensed Matter Physics*. Wiley & sons, 2010.
- [2] A. Barman *et al.*, “The 2021 Magnonics Roadmap,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 33, p. 4130016, 2021.
- [3] J. Hellsvik, “Atomistic Spin Dynamics Theory and Applications,” Uppsala University, 2010.
- [4] S. Mankovsky and H. Ebert, “Accurate scheme to calculate the interatomic Dzyaloshinskii-Moriya interaction parameters,” *Phys. Rev. B*, vol. 96, p. 104416, 2017.
- [5] K. Carva, P. Balaz, and I. Radu, “Laser-Induced Ultrafast Magnetic Phenomena,” in *Handbook of Magnetic Materials*, vol. 26, Elsevier, p. 291, 2017.
- [6] L. D. Yuan, Z. Wang, J. W. Luo, and A. Zunger, “Strong influence of nonmagnetic ligands on the momentum-dependent spin splitting in antiferromagnets,” *Phys. Rev. B*, vol. 103, p. 224410, 2021.
- [7] L. Šmejkal, A. Marmodoro, K. Ahn, R. Gonzalez-Hernandez, I. Turek, S. Mankovsky, H. Ebert, S. D'Souza, O. Šipr, J. Sinova, T. Jungwirth, “Chiral magnons in altermagnetic RuO<sub>2</sub>,” *Phys. Rev. Lett.*, in press, 2023.
- [8] L. Šmejkal, J. Sinova, and T. Jungwirth, “Beyond Conventional Ferromagnetism and Antiferromagnetism: A Phase with Nonrelativistic Spin and Crystal Rotation Symmetry,” *Phys. Rev. X*, vol. 12, p. 031042, 2022.
- [9] S. Mankovsky, E. Simon, S. Polesya, A. Marmodoro, and H. Ebert, “Electric-field control of exchange interactions,” *Phys. Rev. B*, vol. 104, p. 174443, 2021.
- [10] E. Simon, A. Marmodoro, S. Mankovsky, and H. Ebert, “Theoretical study on the electric field effect on magnetism of Pd / Co / Pt thin films,” *Phys. Rev. B*, vol. 103, p. 064406, 2021.
- [11] A. Marmodoro, S. Mankovsky, H. Ebert, J. Minár, and O. Šipr, “Electric field control of magnons in magnetic thin films: ab initio predictions for 2D metallic heterostructures,” *Phys. Rev. B*, vol. 105, p. 174411, 2022.
- [12] H. Ebert, D. Ködderitzsch, and J. Minár, “Calculating condensed matter properties using the KKR-Green’s function method—recent developments and applications,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 74, no. 9, p. 096501, 2011.
- [13] M. Odashima, A. Marmodoro, P. Buczek, A. Ernst, and L. M. Sandratskii, “Chirality dependent magnon lifetime in a compensated half-metallic ferrimagnet,” *Phys. Rev. B*, vol. 87, p. 174420, 2013.