# Ultrarychlá laserová spektroskopie

Autor: Marek Böhm

# Úvod

Optická spektroskopie je fyzikální obor, který využívá interakce světla s látkami ke zkoumání jejich vlastností. Ultrarychlá se spektroskopie nazývá tehdy, pokud je dosažené rozlišení lepší než stovky pikosekund, v posledním desetiletí lepší než stovky femtosekund. V současné době jsou k dispozici attosekundové a více než terawattové laserové pulzy. Ultrarychlá spektroskopie studuje dynamiku excitaci v mikrosvětě tak, že sleduje časový vývoj určitých optických vlastností zkoumané látky poté, co byla excitována krátkým laserovým pulzem. Synchronizace a přesné nastavení času záznamu optických vlastností je zajišťováno zpravidla nastavováním dráhových rozdílů mezi prolétávajícími světelnými pulzy. Využívá se tak velké, ale konečné hodnoty rychlosti šíření světla: světelný pulz urazí ve vzduchu přibližně 300 *μs* za 1 *ps*.

Časové rozlišení měření určuje délka používaného impulsu. Časová délka impulsu a jeho spektrální šířka souvisí vztahem (plné šířky v polovině maxima časového a spektrálního profilu):

kde hodnota konstanty K závisí na tvaru impulsu a je přibližně rovna jedné (0.441 pro gaussovský impuls). Pokud v rovnici platí rovnost, je nosná frekvence impulsu v čase konstantní (nazývají se také transformačně omezené impulsy). Vztah () ukazuje, že čím je impuls kratší v čase, tím je jeho spektrální šířka větší. V dané spektrální oblasti je pro běžné symetrické tvary impulsů minimální časová délka impulsů, pod níž nelze jít. Musí být splněno:

kde: – nosná vlnová délka

– časová perioda kmitu vlny na nosné frekvenci

Ve viditelné spektrální oblasti se tato hranice nazývá femtosekundová bariéra, neboť T nabývá hodnoty jednotek femtosekund. Pokud studujeme dynamiku určitého jevu v laserové spektroskopii, je nutné volit kompromis mezi rozlišením v časové a spektrální oblasti. Elektrické pole ultrakrátkého impulsu je složeno z nosné vlny s jistou frekvencí a absolutní fází, která je v čase modulována obálkovou funkcí. Vysoká světelná intenzita, které je důsledkem velmi krátkého trvání laserových impulsů, je využívána v nelineárně optických experimentech a při opracování materiálů.

2. Ultrarychlé lasery a zesilovače

2.1 Oscilátory

Ultrarychlé pulzy jsou generované lasery se synchronizací módů. Konstruktivní interferencí je vytvořen krátký puls, kdy je v laserovém oscilátoru mnoho podélných módů ve fázi. Synchronizace módů se obvykle dělí na aktivní a pasivní. Aktivní synchronizace módů využívá modulátoru v optickém rezonátoru, při pasivní synchronizaci se používá saturovatelného absorbéru. Moderní pevnolátkové lasery používají techniku známou jako self-mode-locking. Nejvýznamnějším představitelem této skupiny laserů je Titan-safírový laser. Synchronizace je dosaženo nelineární Kerrovou čočkou (?)…

Základní konfigurace oscilátoru je ukázána na Obrázku 1. Laser je čerpán přibližně 5 W z kontinuálního laserového zdroje, obvykle diodově čerpaného Nd:YAG laseru. Tento laser je fokusován do krystalu titan-safírového laseru, kolineárně s osou laseru skrze jedno ze zrcadel. Laserový oscilátor se skládá z Titan-safírového zesilovacího prostředí pod Brewsterovým úhlem, 5 a méně milimetrů v délce, který absorbuje přibližně 90 % dopadajícího záření z Nd:YAG laseru a dvou konkávních zrcadel, vysoce reflektivního zrcadla a output coupleru.

A pair of Brewster-cut fused-silica

prisms are inserted to control the spectral dispersion

(chirp) introduced in the laser rod. Dispersion arises

from the variation of the refractive index of the material

across the gain bandwidth of the laser, which can lead to place a limit on the generated bandwidth

a temporal separation of the resonant wavelengths and

Mezi další významné pevnolátkové materiály patří Cr:Li-SAF (chromium-doped lithium–strontium–aluminium fluoride), který může být čerpán červenými diodovými lasery a emituje záření v blízkosti peak (? - změnit) vlnové délky Titan-safírového laseru. Dalším významným laserem je Cr4C : YAG, který emituje záření okolo vlnové délky 1,5 μm, která je významná v komunikačních technologiích. Lasery založené na Cr : forsterite, které emitují okolo vlnové délky 1,2 μm mohou být frekvenčně zdvojeny do viditelného spektra a mohou být použity pro imaging applications. Dále byly vyvinuty lasery frekvenčně zdvojené s pasivní synchronizací módů založené na erbiem dopovaných optických vláknech. Tyto lasery pracují na vlnových délkách mezi 1530 – 1610 nm a efektivní frekvenční zdvojení je možné mezi 765 – 805 nm. Tyto lasery mohou být použity místo Titan-safírových laserů v mnoha aplikacích. Jejich výhodou je, že jsou levné a kompaktní, neboť nevyžadují složité prvky na kompenzaci disperze. Mohou být čerpány levnými laserovými diodami používanými v komunikační technice. Naneštěstí je délka impulsu omezena dolní hranicí okolo 100 fs.

Disperze a rozšíření impulzu

Difrakčně omezený impuls má spektrální šířku danou Fourierovou transformací jeho časově závislého profilu. Například 10 fs FWHM (full width at half maximum) gaussovský impuls se středem na vlnové délce 800 nm má šířku pásma 94 nm. Pokud krátký impuls prochází disperzivním médiem, jsou jeho frekvenční komponenty rozděleny v čase. Na Obrázku lze vidět efekt disperze na Gaussovský impuls procházející sklem. Střed impulsu je zpožděn vzhledem k impulsu procházejícím vzduchem. Tento jev se obvykle nazývá skupinovým zpožděním a nejedná se o puls rozšiřující efekt. Média s normální disperzí jako například sklo působí na impuls pozitivním frekvenčním posuvem „čirpem“ a modré komponenty jsou opožděné vůči komponentám červeným.

K vysvětlení efektu čirpu často pracujeme s fázovým posuvem jako s funkcí frekvence ω. Fáze lze rozvinout do Taylorovy řady s centrální frekvencí , za předpokladu, že se fáze mění s frekvencí jen pomalu podle rovnice (1):

kde pro derivace platí:

kde: - skupinové zpoždění

- disperse skupinového zpoždění (GVD – Group Velocity Dispersion)

- disperse třetího řádu (TOD)

- disperse čtvrtého řádu (FOD)

Pro zjednodušení předpokládáme transformačně omezený Gaussovský impuls s centrální frekvencí a šířkou impulsu (FWHM) . Elektrické pole poté nabývá tvaru:

Elektrické pole po průchodu disperzním médiem lze vypočítat transformací do frekvenční domény a přidáním komponent z rozložení do Taylorovy řady

z rovnice (1) před zpětnou transformací do časové domény. Pokud uvažujeme pouze příspěvek z , poté nabývá elektrické pole tvaru jako v rovnici (4):

kde:

Efekty disperse jsou dvojí. Za prvé je výstupní impuls rozšířen vzhledem ke vstupnímu impulsu faktorem:

Za druhé má vystupní impuls frekvenční posun se znaménkem opačným vzhledem k . Disperze skupinového zpoždění (GDD) je lineárně závislá na délce materiálu a na druhé derivaci indexu lomu podle vlnové délky:

Obrázek ukazuje závislost indexu lomu na vlnové délce pro některé běžné materiály a Obrázek ukazuje GVD. Pokud použijeme rovnic () a () spolu s daty o závislosti indexu lomu na vlnové délce, lze spočítat GVD, která nastává jako efekt průchodu impulsu materiálem. Obrázek ukazuje důsledek průchodu krátkého impulsu 10 mm křemenného skla. Pokud uvažujeme o impulsu 100 fs dlouhém, je efekt minimální, ale viditelný. Naproti tomu impuls o délce 10 fs je rozšířen o faktor více než 10.

Dobrá znalost disperze je nutná k dopravení krátkého impulsu ke vzorku. Zároveň je nutné kontrolovat fázový posun. Pro kompenzaci těchto efektů se používá návrhů používajících optických mřížek a hranolů. Dvě nejdůležitější konstrukce jsou zobrazeny na Obrázcích () a (). Titan-safírový oscilátor používá dvojici optických hranolů. Toto uspořádání vytváří delší dráhu skrze optický hranol pro červené vlnové délky ve srovnání s modrými a způsobuje negativní disperzi. Pokud je vzdálenost mezi hranoly od vrcholu k vrcholu dvojice hranolů dostatečná, je možné použitím dvojice hranolů pozitivní disperzi materiálu vyrovnat.

The prism apex angle is cut such that at

minimum deviation of the center wavelength, the angle

of incidence is the Brewster angle. Here, the Fresnel

reflection losses for the correct linear polarization are

minimized and the system is essentially loss free

Tak to bude oříšek, hodně štěstí.

Druhou používanou konstrukcí je dvojice rovnoněžných optických mřížek. Znovu je vytvořena delší optická dráha pro červené vlnové délky než pro modré. Dvojice mřížek zavádí negativní GVD pro poměrně malé vzdálenosti, což činí tuto konstrukci kompaktní, ale zároveň zavádí ztráty, které se blíží k 50 %.

Dodělat, je to na straně 8.

Chirped-pulse Amplification

Zesilování femtosekundových impulsů na úrovni nanojoulů je komplikované vzhledem k extrémně vysokým špičkovým výkonům. 1-mJ 20-fs impuls, který je fokusovaný na 100 μm dosahuje špičkového toku okolo . Práh poškození většiny optických materiálů je pouze několik gigawattů na centimetr čtvereční., tedy přibližně 1000 nižší. Tento problém lze vyřešit prodloužením impulsu v čase, kdy používáme disperzi v náš prospěch. Po prodloužení impulsu v čase je impuls zesílen a následně je provedena jeho komprese na původní délku. Tato technika má také výhodu v tom, že odstraňuje nechtěné nelineární efekty v zesilujícím prostředí. Diagram ukazující princip CPA je na Obrázku. The lenses are placed at a distance 2f from each other (they act as a 1:1 telescope), and at a distance L from the gratings. If L<f, the setup acts as a *positive-dispersion* stretcher and if L>f, it is a negative-dispersion stretcher. And the case L=f is used in the [pulse shaper](https://en.wikipedia.org/wiki/Femtosecond_pulse_shaping). Usually, the focusing element is a spherical or cylindrical mirror rather than a lens. As with the configuration in Figure 1, it is possible to use an additional mirror and use a single grating rather than two separate ones. This setup requires that the beam diameter is very small compared to the length of the telescope; otherwise undesirable aberrations will be introduced. For this reason, it is normally used as a stretcher before the amplification stage, since the low-intensity seed pulses can be collimated to a beam with a small diameter.

Faktor, o který je impuls rozšířen, je dáno vzdáleností mezi mřížkami je dána jako:

kde: *f* – ohnisková vzdálenost spojné čočky

– vzdálenost čočky od mřížky

Typicky je délka impulse zvýšena na 100 ps nebo vice. Pokud , disperse nenastává, a pokud , disperse mění znamení. Prakticky jsou čočky nahrazeny jedním sférickým nebo parabolickým zrcadlem in a folded geometry, which eliminates

chromatic aberration and allows gold-coated holographic

gratings to be used near their most efficient Littrow

angle of incidence, arcsin.lc=2*d*/, where lc is the central

wavelength and *d* the line separation of the grating.

Technologie CPA zaznamenala značný pokrok v 90. letech 20. století. Pevnolátkové materiály mají obvykle delší dobu života excitovaných stavů než aktivní protředí barvivových laserů. Velký saturační tok ( 1 J/cm2 ) a dlouhá doba udržení (3 μs) Titan-safíru z něho dělají vynikajícíc aktivní prostředí. Pro tento materiál existují dvě základní konstrukce pro zesilovač, a to regenerativní nebo tzv. multipass zesilovač. Regenrativní zesilovač operuje na 10 – 20 Hz, je čerpaný Q-spínaným Nd:YAG laserem, který dává 100 mJ při 532 nm, multipass zesilovač je čerpaný je frekvenčně zdvojený akusto-opticky modulovaný CW Nd:YLF laser, který může dodat až 10 W při 527 nm v 200 ns impulsu. Tyto čerpací lasery jsou obvykle diodově čerpané. Obrázky () a () ukazují dvě sestavy pro regenerativní zesilovač. Uspořádání na Obrázku se často používá při frekvenci 1 kHz. Jediný vertikálně polarizovaný impuls, který je rozšířený přibližně na 100 p, je zaveden do zesilovače s pomocí rychle spínající Pockelsovy cely. Obvykle impuls v dutině vykoná 12 oběhů předtím, než je zisk saturován. Faradayův rotátor je použit, aby byl výstupní impuls odizovlován od vstupního.

The arrangement in Figure 9(b).35/

differs in two respects. First, the focusing in the cavity

is relaxed in order to remain near the saturation fluence

for the more energetic pulses at 10Hz. Second, the PC is

used to switch the pulse in and out while it is traveling

in opposite directions. This has two great advantages for

short pulses: (1) there is only one pass made through the

Faraday isolator, which has extremely large dispersion and only a limited spectral bandwidth, and (2) it is only

necessary to apply a half-wave voltage to the PC at the

moment the pulse is switched in or out of the cavity.

Again, this is to avoid bandwidth-limiting effects.

Alternativou k předcházejícímu uspořádání je multipass zesilovač. Jedno z uspořádání pro použití pro kilohertzové opakovací frekvence je na Obrázku (). Pockelsova cela je požita k zavedení jednoho impulsu z vlaku impulsů na frekvenci 80 MHz, kde projde 8 průchodu s mírným ofsetem předtím, než je zachycen a vyveden ven.

? Zpětná komprese impulsů

? Saturační efekty

3. KONVERZE VLNOVÉ DÉLKY

Ultrarychlé lasery a zesilovače obvykle operují na velmi omezeném rozsahu vlnových délek. Napřiklad Titan-safírové lasery jsou laditelné v rozsahu 700 – 1000 nm, ale obvykle nejlépe pracují okolo 800 nm. Vysoký špičkový výkon těchto systémů může být ale použit ke konverzi světla na rozdílné vlnové délky. Nyní popíšeme některé techniky, které umožňují převést femtosekundové laserové impulsy viditelných vlnových délek na jiné vlnové délky.

3.1 Generace bílého světla a optický Kerrův efekt

Při vysokých intenzitách světla se index lomu každého materiálu stane funkcí intenzity záření. Kerrův efektu lze popsat rovnicí:

kde: - normální index lomu

- nelineární index lomu

Nelineární index lomu obvykle bývá velmi malý, pro křemenné sklo má hodnotu *n*2 \_ 3 \_. Laserový impuls procházející prostředím délky L získá posun vlnové délky o a efekty nelineárního indexu lomu začnou být patrné, pokud bue tato optická fáze srovnatelná s vlnovou délkou. Abychom pochopili, jak Kerrův jev dokáže modifikovat spektrální vlastnosti ultrakrátkého impulsu, musíme pochopit, jak nelineární index lomu modifikuje optickou fázi impulsu. Elektrické pole impulsu postupujícího ve směru osy x lze popsat rovnicí:

kde: je vlnové číslo

Vlnové číslo závisí na indexu lomu ( i nelineárním) materiálu, impuls získá časově závislou fázi způsobenou Kerrovým jevem. Vložením rovnice do rovnice a rozvinutím do Taylorovy řady okolo centrální frekvence dostáváme vztah:

kde závisí na nelineárním indexu lomu, šířce impulsu a špičkovém výkonu a uražené vzdálenosti. Nelineární index lomu následně způsobí lineární frekvenční posun a spektrum impulsu se rozšíří v důsledku nelineární interakce. Spektrální rozšíření v důsledku nelineárního indexu lomu je užitečné pro spektroskopické aplikace. Například femtosekundový impuls na 800 nm může být veden skrze krátké optické vlákno a na výstupu poté bude širokopásmový impuls. For this

reason, such spectrally broadened pulses are referred to as

white-light continuum pulses. The white-light continuum

generated in a fiber has been used to generate some of the

world’s shortest pulses of around 5 fs..46;47/ A white-light

continuum pulse is an ideal seed for an optical parametric

amplifier (see section 3.3).

4 KORELACE, ČASOVĚ ROZLIŠENÁ MĚŘENÍ

Většina elektronických zařízení nedokáže měřit rychleji nežli 1 ns. I když existují specializovaná zařízení jako například streak kamery, které jsou schopny rozlišit pikosekundové až femtosekundové přechody v reálném čase, běžně se pro detekci pro ultrakrátké jevy používají jiné techniky. Techniky jsou obvykle založené na autokorelaci dvou svazků femtosekundových impulsů.

4.1 Autokorelace

V autokorelátoru je příchozí impuls rozdělen na dva. Jeden svazek prochází dráhou s fixní délkou, druhý dráhou, která zahrnuje optickou zpožďovací linku. Optická zpožďovací linka se skládá z dvojice zrcadel. Poloha zrcadel v této konfiguraci je přímo svázaná se zpožděním mezi dvěma svazky impulsů. Oba svazky jsou fokusovány do nelineárního krystalu (např. BBO nebo KDP) a svazky jsou frekvenčně zdvojeny. Intenzita autokorelačního signálu měřená pomalým detektorem nabývá tvaru:

kde: je susceptibilita druhého řádu pro nelineární krystal a je zpoždění mezi dvěma impulsy. Zajímáme se o průměrnou intenzitu signálu jako funkci časového zpoždění. Autokorelační signál jako funkce časového zpoždění je úměrný tvaru příchozího impulsu. Například v případě autokorelace impulsu s gaussovskou obálkou, má autokorelace signálu jako funkce zpoždění také gaussovskou obálku. V tomto případě můžeme změřit FWHM autokorelačního signálu a najít šířku a obálky intenzit vynásobením faktorem 0.71. Faktor závisí na tvaru impulsu a liší se pro různé tvary impulsů. V praxi je dobré použít nelineární fitování křivek pro určení tvaru impulsu a příslušného konverzního faktoru. Autokorelační signál obsahuje málo informací o tvaru impulsu. Například asymetrický tvar impulsu není autokorelačním měřením detekován. Autokorelační měření také nedává skoro žádné informace o možném čirpu impulsu. Lepší metodou pro měření čirpu je interferometrická autokorelace a je dána překrytím dvou vstupních svazků. Korelační signál je nyní o mnoho složitější a osciluje na frekvencích, které odpovídají fundamentální a druhé harmonické frekvenci laseru. Intenzita druhé harmonické je úměrná čtverci dopadající intenzity záření a detekovaná intenzita druhé harmonické jako funkce zpoždění je dána:

kde: T – doba měření a .

Další užitečnou metodou pro charakterizaci femtosekundových impulsů se nazývá FROG (z anglického Frequency Resolved Optical Gating), pomocí které je možné současně změřit intenzitu a fázi femtosekundového impulsu. FROG provádí autokorelační měření současně jako funkci časového zpoždění a frekvence. Tak jako v předchozích technikách je svazek nejprve rozdělen a poté rekombinován v nelineáním krystalu. Tyto dva svazky jsou fokusovány v nelineárním krystalu s pomocí cylindrické čočky. Různé pozice v krystalu poté odpovídají různým časovým zpožděním. Pokud z krystalu vystupuje svazek s druhou harmonickou, bude mít v sobě vystupující svazek zakódovanou autokorelační stopu. Pokud je signální svazek poslán skrze spektrometr, může 2-D detektor jako například CCD kamera použita k měření signálu, který závisí na zpoždění v jednom směru a na frekvenci ve směru druhém.

Experimentální uspořádání ultrarychlé laserové spektroskopie

V současné době mezi základní metody měření ultrarychlé laserové spektroskopie patří měření přechodné absorpce nebo odrazivosti metodou excitace a sondování, metoda směšování vln a měření doznívání fotoluminiscence excitované ultrakrátkým optickým impulsem.

### Metoda excitace a sondování (pump-and-probe technique)

Jedná se dvojpulzní metodu, kdy je excitační a sondovací svazek získán amplitudovým dělením původního laserového svazku. Časpvý interval mezi excitačním a sondovacím impulsem se nastavuje změnou rozdílu optické dráhy impulsů pomocí optické zpožďovací linky. Excitační impuls má velkou intenzitu a způsobí vznik excitací ve vzorku. Tento jev následně vede ke změně absorpce sondovací impulsu v důsledku plnění dostupných energetických stavů. Pro různá vzájemná zpoždění τ mezi excitačním a sondovacím impulsem se měří energie sondovacího impulsu po průchodu vzorkem. Výsledkem měření je normovaná diferenční transmise:

kde: – transmise vzorku měřená sondovacím impulsem po dopadu excitačního impulsu

- transmise vzorku měřená sondovacím impulsem bez excitace

Transmisní změny lze poté měřit s přesností . Experimentální uspořádání pro měření transmisních změn je zobrazeno na Obr.. Zdrojem impulsů je titan-safírový laser s impulsy délky 70 fs a opakovací frekvencí 82 MHz. Lze používat přerušovat svazků a fázově citlivou detekci (lock-in zesilovač).

### Ultrarychlá luminiscenční měření

Rychlé doznívání luminiscence v subpikosekundové časové oblasti se měří pomocí nelineární optické metody upkonverze (neboli sčítání frekvencí). Princip upkonverze spočívá v generaci součtové frekvence v opticky nelineárním dielektrickém krystalu. Aby upkonverze byla účinná, je nutné zajistit několik podmínek:

* podmínka sfázování (zákon zachování hybnosti) v nelineárním krystalu

kde: – vlnový vektor součtového svazku

– vlnový vektor luminiscenčního svazku

– vlnový vektor luminiscenčního svazku

* optimální sběr luminescence a a její sběr do nelineárního krystalu
* prostorovou a spektrální filtraci součtového svazku
* maximální citlivost detekce

Při splnění těchto podmínek dojde při setkání luminiscenčního záření se spínacím laserovým impulsem ke vzniku impulsu záření, jehož frekvence se rovná součtu frekvence luminiscence a spínacího impulsu:

Záření na součtové frekvenci lze díky jeho odlišné frekvenci vybrat ze světelného svazku vycházejícího z krystalu monochromátorem, a pote detekovat pomoci např. fotonového čítaní. Intenzita generovaného součtového záření je úměrná intenzitě luminiscenčního záření v okamžiku průchodu spínacího pulzu, a proto změnou

vzájemného zpožděni spínacího pulzu a delší luminiscence lze získat její časový vývoj

### Metoda přechodné mřížky (multidimenzionální femtosekundová spektroskopie, měření fotonového echa)

Jedná se o metodu vícevlnného směšování, kdy ve zkoumané látce dochází k interakci mezi několika vlnami. Volí se vhodné směry impulsů, vhodné délky impulsů a různá vzájemná časová zpoždění. Impulsy v látce vytvářejí koherentní polarizaci látky, která vede ke vzniku vln vystupujících z látky v různých směrech. Analýza vystupujících impulsů umožňuje studovat ultrarychlé koherentní procesy v látkách. Pokud na látku dopadají současně dva impulsy stejné vlnové délky λ, které jsou absorbovány, vznikne v látce díky jejich interferenci populační mřížka. Populační mřížka se chová jako optická mřížka s modulací komplexního indexu lomu. Pulz třetí vlny, dopadající se zpožděním, je pak na mřížce difraktován s účinností úměrnou kvadrátu hloubky modulace populací. Populační mřížka se rozplývá s dobou života excitací (například

elektronděrových párů v polovodiči), ale také jejich difuzí.

5. APLIKACE¨

Krátké laserové impulsy s nevysokými energiemi mohou mít velmi vysoké špičkové výkony. Toto dělá z ultrakrátkých impulsů výborný nástroj pro laserovou ablaci materiálu, multifotonovou absorpci. Velmi vysoký špičkový výkon také umožňuje efektivní konverzi na jiné vlnové délky použitím nelineárních krystalů. Pokud jsou femtosekundové lasery použity na opracování materiálu, jsou výsledné řezy o mnoho lepší než při použití laserů s delšími impulsy, neboť laserové impulsy mění materiál v plasma a jen ho neroztaví. Nyní si povíme o některých významných aplikacích.

5.1 Studium rychlých chemických reakcí

V 80. a 90. letech byla provedena série experimentů různými skupinami, které vešly ve známost jako femtochemie nebo také femtobiologie. Tyto experimenty využívaly vlastnosti, že pokud je excitována lasserovým impulsem kratším než perioda oscilací daných vibrací v molekule, je v excitovaném stavu vytvořen koherentní vibrační vlnový balík. Vibrace s periodou kratší než je délka impulsu nejsou excitovány. ¨

5.2 Zobrazování

Nelineární ultrarychlá optika má nedocenitelnou hodnotu studium biologických vzorků. Femtosekundové impulsy lze použit pro zobrazování pomocí multifotonové absorpce. Pomocí této technologie lze zobrazit prostorové rozložení jedné specifické molekuly v žijící buňce. Laditelné femtosekundové implusy v blízké infračervené oblasti jsou pro tyto účely vhodné, neboť je snížen rozptyl a poškození v porovnání s použitím UV záření. Generované UV záření je možné detekovat pomocí fotonásobiče nebo CCD kamery. Dochází ke vzniku a následné detekci nelinearit třetího řádu. Efektivita konverze je malá, ale dostatečná na to, aby bylo možné generovat detekovatelný signál třetího řádu bez poškození vzorku. Je použito záření v blízké infračervené oblasti na 1.2 μm, signál třetí harmonické je v oblasti 400 nm. Tyto vlnové délky nejsou tolik škodlivé pro žijící vzorky jako UV záření.

Dynamika elektronů v křemíkových nanokrystalech

Výzkum nových forem křemíku jako porézního křemíku, hydrogenizovaného amorfního křemíku nebo nanokrystalického křemíku nabývá v posledních letech na důležitosti v souvislosti s pokroky ve fotovoltaice a optoelektronice. Některé z těchto forem křemíku vykazují luminiscenci ve viditelné části spektra. Pro nanokrystalický křemík je typická delokalizace v prostoru kvazihybností, a tím se zvyšuje pravděpodobnost přímých optických přechodů. U křemíkových nanokrystalů jsou měření ultrarychlé dynamiky luminiscence motivována možností konstrukce křemíkového laseru. V laseru je pro dosažení optického zisku nutné dosažení inverze obsazení energetických hladin. V křemíkových nanokrystalech nastává problém, neboť nosiče náboje v excitovaných stavech způsobují další absorpci světla, což způsobuje optické ztráty. Dále při excitaci více nosičů náboje ve velmi malém objemu nanokrystalu dochází k silné coulombické interakci mezi nosiči, což vede k velmi účinné nezářivé rekombinaci, místo aby byla vyzářena ve formě světla (Augerova rekombinace). Augerova rekombinace je proto v křemíkových nanokrystalech podrobně studována.

Generace koherentních fotonů a studium jejich dynamiky

Koherentní vlastnosti kvazičástic fononů lze účinně studovat pomocí ultrarychlé laserové spektroskopie. Po dopadu femtosekundového laserového impulsu dochází v krystalové mříži polovodiče k rozkmitání iontů. Kmity krystalové mříže vedou k modulaci dielektrické konstanty materiálu, která se projeví jako oscilace propustnosti nebo odrazivosti vzorku. Jako příklad měření lze uvést nanokrystaly . Z měření vyplynulo, že dominantním příspěvkem k rozfázování koherentních fononů v nanokrystalech je kubická anharmonicita krystalové mříže.

Dynamika nosičů náboje v kvantových bodech III-V

Kvantové body (nanokrystaly), které jsou útvary o velikosti < 10 nm jsou studovány pro jejich potenciální využití v mnoha aplikacích – polovodičové lasery, LED diody, paměti, detektory. Nanokrystaly z III-V polovodičů jsou připravovány tzv. samoorganizovaným růstem. Jako příklad výzkumu lze uvést ultrarychlé procesy v kvantových bodech InAs obklopených bariérou tvořenou GaAs. Excitované nosiče náboje v InAs jsou poté prostorově omezeny a klasická pásová energetická struktura se změní na strukturu diskrétní. Je měřena dynamika dohasínání luminiscence buzené femtosekundovými impulsy.