INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Název projektu: Mezinárodní centrum pro informaci a neurčitost

Registrační číslo: CZ.1.07/2.3.00/20.0060

Zpráva z účasti na stáži

Datum konání stáže:	7.8.2011 - 29.8.2012
Navštívené pracoviště:	Skupina QUIN (Quantum Information Group), Institut fyziky Dánské technické univerzity (DTU Physics), Fysikvej, Building 309, 2800 Kgs. Lyngby, Dánsko
Zahraniční garant:	prof. Ulrik L. Andersen
Účastník stáže:	Mgr. Miroslav Ježek, Ph.D.

Stručný popis navštíveného pracoviště

Skupina kvantové informace (QUIN) na Dánské technické univerzitě v Lyngby u Kodaně byla založena prof. Andersenem v roce 2007. Během několika málo let dosáhla světové úrovně na poli experimentální kvantové optiky, zpracování informace podléhající kvantové neurčitosti a nových integrovaných zdrojů fotonů. Pracoviště řešitele již s touto skupinou spolupracuje v oblasti teoretické kvantové informatiky (především člen řešitelského týmu MCIN Doc. Radim Filip, Ph.D.) a nově v oblasti experimentální kvantové optiky (člen řešitelského týmu Mgr. Miroslav Ježek, Ph.D. od roku 2009). Cílem spolupráce se skupinou prof. Andersena je udržení a kvalitativní stejně jako kvantitativní rozvíjení odborných kontaků, transfer technologií a další aktivity nezbytné k zařazení našeho pracoviště do celoevropské sítě vědeckých skupin v dané oblasti.

Skupina kvantové informace (QUIN) se orientuje na výzkum v oblasti kvantové optiky, kvantové informace a interakce záření a látky. Hlavními tématy jsou: zpracování kvantové informace přenášené spojitým optickým polem (tzv. spojité kvantové proměnné), generace neklasických stavů světla (především stavů světla s definovaným počtem fotonů a superpozic koherentních stavů) a jejich využití pro kvantové počítaní a kvantovou metrologii, generace jednotlivých fotonů novými integrovanými pevnolátkovými systémy na bázi NV center v diamantu a jejich přenos plazmonovými vlnovody a dalšími mikro-vlnovodnými strukturami. Nově jsou studovány planární mikrorezonátory na bázi SiN pro generaci neklasických stavů světla na optickém čipu.

Skupina QUIN v nejužším smyslu má v současnosti 13 pracovníků a společně s dalšími devíti skupinami tvoří Institut fyziky Dánské technické univerzity (DTU Physics). Hlavním těžištěm

výzkumu Institutu fyziky jsou oblasti biofyzikálních a dalších složitých systémů, fyzika nanometriálů a povrchových jevů a kvantová fyzika. Vedle Institutu fyziky funguje na Dánské technické univerzitě také Institut fotoniky, který se specializuje na optické komunikace, optické vlastnosti nových materiálů a aplikace optických technologií v biologii a medicíně.

Další vědečtí pracovníci z cílového pracoviště
Mikael Østergaard Lassen, Ph.D. (postdoc), Alexander Huck, Ph.D. (postdoc), Bo Melholt Nielsen, Ph.D. (postdoc), Ying-Wei Lu, PhD. (postdoc), Jonas Schou Neergaard-Nielsen, Ph.D. (postdoc), Christian Kothe-Termén, Ph.D. (postdoc), Ulrich Busk Hoff (doktorský student), Shailesh Kumar (doktorský student), Amine Laghaout (doktorský student), Adriano Berni (doktorský student).

Průběh stáže
V rámci stáže ve skupině QUIN jsem se seznámil s novou technologií a experimentálními metodami integrované fotoniky a nano optiky. Jmenovitě jsem sledoval a diskutoval následující projekty: (1) NV centra v diamantu a plazmonové vlnovody, spintronika NV center, (2) optomechanika s mikro-toroidními rezonátory a (3) nelineární planární mikro rezonátory. Dále jsem pokračoval v dříve započaté spolupráci na projektech: (4) využití koherentní detekce a optimalizace zpracování dat pro zvýšení fázového rozlišení při zobrazení fázových objektů, (5) generace stavu optické Schrodingerovy kočky a jeho využití pro kvantové počítání.

Seznámení s novými projekty související s integrovanou fotonikou a nano optikou
(1) Skupina QUIN, konkrétně laboratoř Dr. Hucka, disponuje technikou generace jednotlivých fotonů z pevnolátkových struktur na bázi NV center v nanočásticích diamantu. Tato vakanční centra vykazují chování kvantové tečky, tedy umělého atomu schopného vyzářit jednotlivý foton po excitaci externím laserovým zdrojem. Významnou vlastností NV centra je neschopnost dvojí excitace a tedy emise více fotonů v časovém intervalu daném přirozenou dobou života excitovaného stavu centra. Velkým problémem při využití jednotlivých fotonů generovaných NV centrem je prostorová emisní charakteristika: foton je emitován prakticky všesměrově a jeho navázání do cílového optického modu je komplikované. To vede k velmi nízké celkové účinnosti generace fotonu NV centrem v daném modu. Možným řešením je využití plazmonových vlnovodů založených na nanometrových kovových strukturách (Ag nano-drátky), které ovlivňují elektromagnetické pole ve své blízkosti. Emise světla z NV centra vykazuje odlišnou charakteristiku v přítomnosti plazmonového vlnovodu a generovaný foton je s vyšší pravděpodobností veden plazmonovým vlnovodem. Efekt lze demonstrovat jednak detekcí fotonu na konci plazmonového vlnovodu a jednak změnami doby života NV centra. V rámci stáže jsem obsolvoval prohlídku laboratoře NV center a diskutoval možnosti a technické problémy využití NV center a plazmonových vlnovodů s pracovníky skupiny QUIN zabývající se tímto tématem. Dále jsem se seznámil s možnostmi ovládání stavu kvantového spinu NV centra a diskutoval možnosti jeho využití pro kvantové zpracování informace. Spinový systém NV centra je extrémně odolný vůči termálním fluktuacím diamantu a vykazuje až milisekundové doby života. Má tak potenciál pro implementaci pevnolátkového kvantového bitu při pokojové teplotě.
(2) Skupina QUIN, ve spolupráci se skupinou prof. Warwicka Bowena (Brisbane), nově testuje možnosti zvýšení citlivosti spektroskopie mechanických modů mikro-toroidního rezonátoru s využitím neklasického stlačeného světla. V kombinaci s chlazením využívajícím zpětnovazebně ovládaného elektrického pole by následně bylo možné snížit optický výkon nutný k laserovému chlazení do základního stavu příslušného mechanického modu. V rámci

odborné stáže jsem získal základní znalosti o mikro-toroidních rezonátorech, adresaci jednotlivých mechanických vibračních modů a seznámil jsem se se souvisejícími experimentálními technikami.
(3) Dále jsem diskutoval návrh a výrobu planárních mikro-rezonátorů z materiálu SiN vykazující dobrou propustnost v oblasti vlnových délek cca 800-900 nm a současně nelineární vlastnosti (slabé druhého řádu a relativně silné třetího řádu). Cílem tohoto nového projektu je dosažení nelineární frekvenční konverze na optickém čipu a dále generace neklasického stlačeného světla. Integrované optické struktury nacházejí využití v telekomunikacích, ale také například jako biosenzory. Zdroj stlačeného světla na optickém čipu by pak umožnil zvýšení jejich citlivosti.

Využití koherentní detekce a optimalizace zpracování dat pro zvýšení fázového rozlišení
(4) V rámci stáže také pokračovala diskuse na téme zvýšení rozlišení optické fáze s využitím koherentní homodynní detekce a pokročilého zpracování dat. Předchozí spolupráce v této oblasti vyústila společným experimentálním projektem demonstrující rozlišení fázových struktur lepší než Rayleighův limit, a to při zachování sensitivity měření a s využitím pouze klasických zdrojů. V průběhu první poloviny roku 2012 pokračoval projekt rozšířením teorie na fázové super-rozlišení při současném vylepšení sensitivity za rámec klasického měření a experimentální realizací tohoto měření. Během stáže jsem diskutoval zpracovaní dat a nutné podmínky pro překročení standardní kvantové limity měření.

Generace stavu optické Schrodingerovy kočky a jeho využití pro kvantové počítání
(5) Skupina QUIN disponuje technikou generace pulzního stlačeného světla na jeden průchod nelineárním materiálem a subtrakce fotonu z tohoto stavu. Operace subtrakce fotonu je realizována pomocí odštěpení části optického svazku na nevyváženém děliči a následné detekce odraženého fotonu pomocí jednofotonového detektoru. Dále laboratoř skupiny QUIN disponuje koherentní detekcí stavu světla (homodynní detektor) s ultra-nízkým šumem a vysokým časovým rozlišením. Tyto experimentální techniky byly vyvinuty během mého postdoc pobytu ve skupině QUIN od srpna 2009 do března 2010. S využitím těchto metod se podařilo generovat stav superpozice optických koherentních stavů (stav optické Schrodingerovy kočky) a následně ve spolupráci Katedry optiky UP a skupiny QUIN demonstrovat první kvantové logické hradlo provádející transformaci mezi koherentními stavy a jejich superpozicemi [A. Tipsmark, R. Dong, A. Laghaout, P. Marek, M. Ježek, and U.L. Andersen, Experimental demonstration of a Hadamard gate for coherent state qubits, Physical Review A 84, 050301(R) (2011)]. V rámci odborné stáže v roce 2012 proběhla diskuse možných dalších aplikací zmíněných experimentálních technik a jejich rozvoj.

Další aktivity
Během stáže jsem se aktivně účastnil pravidelných porad skupiny, přednášek pořádaných v rámci neformálního semináře a dalších aktivit spojených s činností skupiny QUIN.

Dále, dne 21. srpna jsem se účastnil celodenního interního semináře skupiny QUIN s následujícím programem:

9:00-9:30: Niels I. Kristiansen, NV center physics – optical properties: optical transitions (spin and non-spin conserving), spectral diffusion, stark shift, strain, phononic coupling.

9:30-10:00: Alexander Huck, NV center physics – spin properties: spin transitions, Zeeman split, coherence time, spin manipulation, spin read-out, coupling to other spins.

10:00-10:30: Shailesh Kumar, Enhancement of the decay rate and efficient collection of single photons by means of waveguides, cavities, antennas and SILs; optical and plasmonic.

10:30-11:00: Jonas S. Neergaard-Nielsen, Nonlinear optics with NV centers: EIT based schemes, Raman schemes, Jaynes-cummings schemes.

11:00-11:30: Ying-Wei Lu, Fabrication of NV centers and diamond structures.

13:00-13:30: Ulrik L. Andersen, Squeezing: generation/detection of CV squeezing, pulsed squeezing, novel methods for the generation of squeezing in micro resonators.

13:30-14:00: Adriano Berni, Quantum Correlations: non-Markovian quantum channels.

14:00-14:30: Lars S. Madsen, Quantum information and discord.

14:30-15:00: Amine Laghaout, Cat-States and QI with cat-states.

15:00-15:30: Christian Kothe-Termén, Polarization of light: new measures and quantification of quantum polarization.

15:30-16:00: Bo M. Nielsen, Phase-Estimation: phase-estimation with feed-back control.

16:00-16:30: Ulrich B. Hoff, Opto-mechanics: measuring the mechanical resonance with SQL light, cooling the mechanical resonance by applying a feedback.

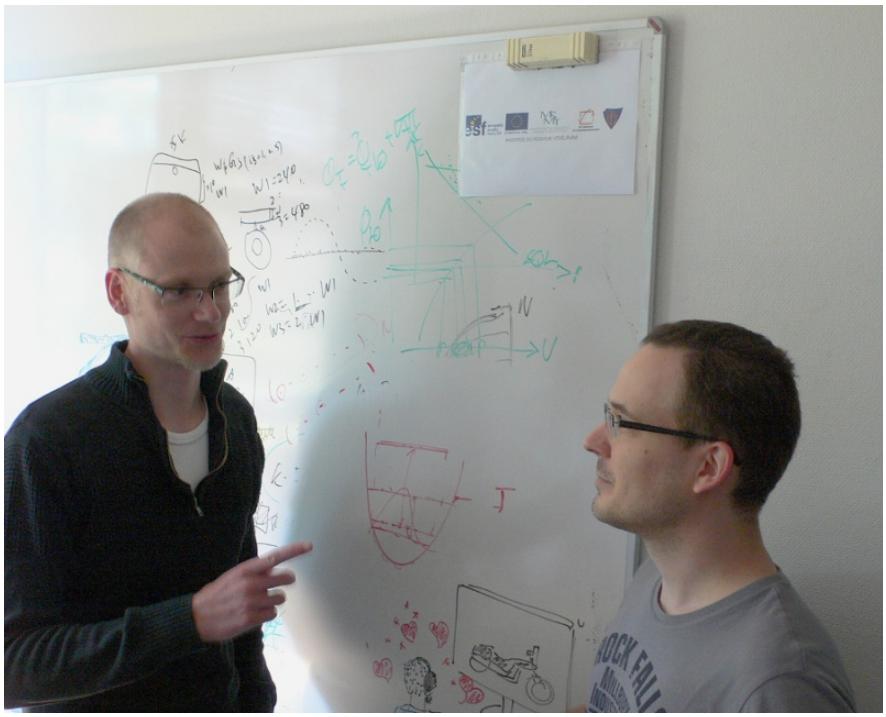
16:30-17:00: Hugo Kerdoncuff, Electrical feedback cooling for micro-resonators.

Publikace rozpracované během stáže
V návaznosti na uskutečněné vědecké diskuse byla započata příprava společné publikace prezentující získané výsledky z oblasti kvantové metrologie optické fáze.

Navázání kontaktů
Stáž významně přispěla k posílení a prohloubení vědecké spolupráce se skupinou prof. Ulrika Andersena. Byla stanovena a rozpracována témata, na něž bude vzájemná spolupráce dále orientována.

Shrnutí stáže
Stáž plně splnila svůj účel. Došlo k posílení vědecké spolupráce se špičkovým vědeckým pracovištěm v oblasti experimentální kvantové optiky a optického kvantového zpracování informace. V rámci stáže jsem získal řadu nových poznatků a doplnil si znalosti o aktuálních trendech v dané oblasti výzkumu. Tyto poznatky budou dále předány cílové skupině formou odborných seminářů.

Fotografická dokumentace



Fotografie zachycující diskuzi na téma využití planárních SiN mikro-rezonátorů na optickém čipu pro generaci neklasických stavů světla. Na snímku Bo M. Nielsen (vlevo) a Miroslav Ježek (vpravo).