

Autoreferat

Wykształcenie:

Data uzyskania tytułu:

doktora, 2002,

Instytut Chemii Fizycznej PAN, Warszawa.

Promotor: Doc. dr hab A. Mordzinski

magistra, 1997

Dniepropetrowsk National University, Dniepropetrowsk, UKRAINA

Promotor: Prof. V. Moiseenko

Zatrudnienie:

od 2009, Instytut Chemii Fizycznej PAN, adiunkt.

2007-2008, Uniwersytet w Newadzie Reno, Reno, USA.

2002-2006, Uniwersytet Stanu Montana, Bozeman, USA (kilka miesięcy w roku).

1998-2002, Instytut Chemii Fizycznej PAN, asystent.

Obszar zainteresowań:

Nowe metody i techniki w optyce nieliniowej, ultraszybkiej spektroskopii oraz technologii ultraszybkich laserów.

Stypendia:

DAAD, Austria, Institute of Theoretical and Radiochemistry, Vienna University, 1999.

Osiągnięcia naukowo-badawcze:

1. Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych:
całkowita liczba publikacji: **27**
w tym liczba publikacji w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR):
25
2. Sumaryczny impact factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR),
IF - **74.352**

3. Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS);
561 (bez samocytowań)
4. Indeks Hirscha opublikowanych publikacji według bazy Web of Science (WoS);
10
5. Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach;
 - a) kierownik projektu, grant KBN 7T09A00321 "Laserowe badania układów izolowanych w strumieniu naddźwiękowym oraz zimnych kropelkach helowych", 2001-2004.
 - b) główny wykonawca, 1P03B02926, „Parametryczne wzmacnianie femtosekundowych impulsów światła”, 2004-2006.
 - c) główny wykonawca, grant KBN N20201932/0698, "Parametryczne wzmacnianie ultrakrótkich impulsów światła; rola konfiguracji niewspółosiowej", 2008-2010.
 - d) główny wykonawca, N62909-11-1-7024, grant Office of Naval Research Global, projekt w trakcie realizacji.
 - e) główny wykonawca, UDA-POIG.01.03.01-22-080/09-03, „Urządzenie laserowe do femtosekundowej mikroobróbki materiałów”, projekt w trakcie realizacji.
 - f) kierownik projektu, N R02 0019 10, projekt rozwojowy NCBIr, „Femtosekundowy laser terawatowy bazujący na wzmacnianiu parametrycznym”, projekt w trakcie realizacji
 - g) kierownik projektu, N62909-11-1-4045, Visiting Scientist Program, Office of Naval Research Global, projekt w trakcie realizacji.
6. Zgłoszenia patentowe, udzielone patenty międzynarodowe lub krajowe,
"Układ i sposób zwiększania częstości repetycji impulsów laserowych." Szwajcaria DE700076,
Polska P-391054, zgłoszenie patentowe
7. Współpraca z zagranicznymi ośrodkami naukowymi
 - a. Uniwersytet Stanowy w Montanie, Bozeman, USA, grupa prof. A. Rebane
 - b. Uniwersytet w Nevadzie Reno (Nevada Terawatt Facility), Reno, USA.
8. Działalność dydaktyczna
 - a. opieka nad studentami w ramach praktyk studenckich w Instytucie Chemii Fizycznej
 - b. seria wykładów z optyki ultraszybkich impulsów (letnia szkoła optyki kwantowej 2009)

Przebieg pracy naukowej

Po obronie pracy magisterskiej w 1997 roku na Wydziale Fizyki na Uniwersytecie w Dniepropetrowsku (Ukraina) rozpocząłem studia doktoranckie w Instytucie Chemii Fizycznej PAN w Warszawie pod kierownictwem doc dr hab. A. Mordzińskiego. Głównym obszarem moich badań podczas studiów doktoranckich była wysokorozdzielcza laserowa spektroskopia wybranych związków organicznych oraz ich kompleksów w wiązkach naddźwiękowych oraz zimnych kropelkach helowych. W mojej pracy doktorskiej zostały przedstawione wyniki pomiarów, które dają wgląd w pierwsze stadia procesu solwatacji. Między innymi zostały zaprezentowane wyniki badań spektroskopowych struktury molekularnej mikrokłasterów kilku pochodnych antracenu z cząsteczkami rozpuszczalników, takich jak woda, metanol, chloroform, czterochlorek węgla oraz benzen. Wszystkie badania były przeprowadzone z detekcją optyczną oraz masowo rozdzielczymi metodami spektroskopii laserowej. W czasie trwania studiów doktoranckich opublikowałem 5 prac w czasopismach z listy filadelfijskiej.

W 2002 roku po obronie pracy doktorskiej z wyróżnieniem zmieniłem i rozszerzyłem obszar swoich zainteresowań naukowych w stronę ultraszybkich metod spektroskopii laserowej, nowych metod wytwarzania i charakteryzacji ultrakrótkich impulsów laserowych, ultraszybkiej optyki nieliniowej oraz fizyki laserów o dużej mocy szczytowej.

W roku 2003 rozpocząłem trwającą do dziś współpracę z grupą prof. A. Rebane z Uniwersytetu Stanowego w Montanie (USA). Podczas moich pobytów w laboratorium prof. Rebane rozwijałem nowy system do pomiarów widm absorpcji dwufotonowej. System ten został użyty do pomiarów współczynnika absorpcji dwufotonowej pochodnych porfiryny, porficyny oraz ftalocyjaniny – cząsteczek, które znajdują szerokie zastosowanie w terapii fotodynamicznej, mikroskopii dwufotonowej oraz objętościowych nośnikach informacji.

W wyniku tej współpracy powstał szereg artykułów, w których zostały przedstawione szczegółowe badania widm dwufotonowej absorpcji w obszarze bliskiej podczerwieni (800-1600 nm) oraz absolutnych wartości przekrojów czynnych dużej serii tetrapiroli z różnymi podstawnikami, ich dimerów oraz ich makromolekularnych nanostruktur. W rezultacie tych badań ustaliliśmy oraz zaproponowaliśmy model wyjaśniający między innymi:

1. efekt rezonansowego wzmocnienia dwufotonowej absorpcji, który uwidoczni się, jeżeli długość fali wzbudzenia leży blisko dozwolonego przejścia Q.
2. pojawienie się w obszarze jednofotonowego przejścia Soreta w niektórych podstawionych tetraazaporfirynach dozwolonego dwufotonowego przejścia *gerade*.

3. zwiększenie wartości współczynnika absorpcji dwufotonowej nawet tysiąckrotnie poprzez modyfikację tetrapiroli podstawieniem różnych grup funkcyjnych.
4. wykazywanie przez niektóre dimery porfiryny olbrzymich wartości przekrojów czynnych na absorpcję dwufotonową w porównaniu do odpowiednich monomerów.

Poniżej przedstawiam listę prac wraz z ich streszczeniem.

1. M. Drobizhev, **Y. Stepanenko**, Y. Dzenis, A. Karotki, A. Rebane, P. N. Taylor, and H. L. Anderson, "Understanding strong two-photon absorption in pi-conjugated porphyrin dimers via double-resonance enhancement in a three-level model," *Journal of the American Chemical Society* 126, 15352–15353 (2004).

Przedstawiamy widma dwufotonowej absorpcji (2PA) dla serii sprzężonych dimerów porfiryny. Pokazujemy, że posiadają one ekstremalnie duży przekrój czynny 2PA sięgający do $\sigma_2 = 1 \times 10^4$ GM w obszarze bliskiej podczerwieni. Pokazane wartości przekroju czynnego są wśród najwyższych dotąd zmierzonych dla cząsteczek organicznych. Pokazujemy również, że teoria zaburzeń drugiego rzędu zastosowana dla prostego trzypoziomowego modelu daje idealnie ilościowy opis zaobserwowanych przekrojów czynnych 2PA. Porównując wszystkie czynniki trzypoziomowego modelu dla dimerów z czynnikami dla odpowiedniego monomeru, dla którego $\sigma_2 = 20$ GM, uzasadniamy 500- krotne wzmocnienie σ_2 . Uzasadniamy również, że najbardziej istotnym czynnikiem jest intensywność przejścia do stanu wzbudzonego. Element macierzy momentu dipolowego tego przejścia wynosi ekstremalnie dużą wartość 30-40 D dla sprzężonych dimerów porfiryny, który może być odpowiedzialny za wielki promień delokalizacji (wielkie rozseparowanie elektron-dziura) w tym stanie. Pokazujemy efektywną generację tlenu singletowego w procesie jedno- i dwufotonowego wzbudzenia dimerów porfiryny, która ma szerokie zastosowanie w terapii fotodynamicznej.

2. M. Drobizhev, **Y. Stepanenko**, Y. Dzenis, A. Karotki, A. Rebane, P. N. Taylor, and H. L. Anderson, "Extremely Strong Near-IR Two-Photon Absorption in Conjugated Porphyrin Dimers: Quantitative Description with Three-Essential-States Model," *J. Phys. Chem. B* 109, 7223-7236 (2005).

Zbadaliśmy widma dwufotonowej absorpcji w obszarze bliskiej podczerwieni serii sprzężonych dimerów porfiryny oraz odpowiadających im monomerów. Wszystkie badane dimery wykazały duże wartości przekrojów czynnych $\sigma_2 = (3-10) \times 10^3$ GM ($1 \text{ GM} = 1 \times 10^{-50} \text{ cm}^4 \text{ s}$), co stanowi wartość stukrotnie większą niż wartości dla odpowiednich monomerów w tym samym obszarze widmowym. Wyjaśnieniem takiego dramatycznego efektu wzmocnienia może być kombinacja kilku przyczyn, takich jak wzmocnienie najniższego jednofotonowego przejścia Q, polepszone warunki rezonansu w trzypoziomym systemie, wzmocnienie przejścia singlet-singlet do stanu wzbudzonego oraz równoległe ustawienie się momentów kolejnych przejść elektronowych w dimerze w odróżnieniu od prostopadłej orientacji w monomerze. Pokazujemy, że absolutne wartości przekroju czynnego na absorpcję dwufotonową w badanych cząsteczkach ilościowo można opisać wyrażeniem wyprowadzonym na podstawie trzypoziomowego modelu. Pokazujemy również możliwość wyprodukowania tlenu singletowego po wzbudzeniu dimerów jedno- lub dwufotonowo, co czyni te cząsteczki szczególnie atrakcyjnymi dla zastosowań w terapii fotodynamicznej.

3. M. Drobizhev, N. S. Makarov, **Y. Stepanenko**, and A. Rebane, "Near-infrared two-photon absorption in phthalocyanines: Enhancement of lowest gerade-gerade transition by symmetrical electron-accepting substitution," *J. Chem. Phys.* 124, 224701 (2006).

Manuskrypt przedstawia, według naszej najlepszej wiedzy, pierwsze badania widm dwufotonowej absorpcji szeregu symetrycznie podstawionych ftalocyjanin w zakresie długości fal wzbudzenia od 800 to 1600 nm. Wybrane molekuly różnią się pozycją podstawienia (α lub β) albo liczbą grup podstawników 4, 8, lub 16, oraz obecnością lub brakiem metalu (Al lub Zn) w środku. Dla wszystkich ftalocyjanin zmierzaliśmy umiarkowaną ($\sigma_2 \sim 100-200$ GM) wartość dwufotonowego gerade-gerade przejścia, które objawia się jako stosunkowo wąski pik w obszarze energii pomiędzy przejściem Q oraz B ($\lambda_{wzb.} = 870-1100$ nm). W pochodnych ftalocyjaniny z jonem metalu kilka dwufotonowych przejść o wyższej częstotliwości nakłada się na wyżej wspomniane przejście g-g. W niektórych pochodnych bez jonu metalu, odkryliśmy drugie wyżej leżące dwufotonowe przejście. Zarówno w przypadku niepodstawionych, jak i metaloftalocyjanin, stwierdziliśmy monotoniczny wzrost całkowitej siły najniższego przejścia g-g w funkcji akceptorowej zdolności podstawników wyrażonej przez ich stałą Hammetta. Stosując trójpoziomowy - w przypadku metaloftalocyjanin oraz czteropoziomowy model - w przypadku ftalocyjaniny bez jonu metalu, pokazujemy rolę momentu przejścia ze stanu wzbudzonego na wyższe stany wraz ze zmianą stałej Hammetta.

4. M. Drobizhev, Y. Stepanenko, A. Rebane, C. J. Wilson, T. E. O. Screen, and H. L. Anderson, "Strong Cooperative Enhancement of Two-Photon Absorption in Double-Strand Conjugated Porphyrin Ladder Arrays," *Journal of the American Chemical Society* 128, 12432-12433 (2006).

Przestawiamy widma dwufotonowej absorpcji serii sprzężonych oligomerów porfiryry, składających się z N=2, 4, 8 oraz 13 monomerów, połączonych w pozycji meso-meso oraz z łącznikiem butadienowym. Pokazujemy, iż w geometrii koplarnarnej wzrasta dramatycznie długość sprzężenia, prowadząc do wzmocnienia dwufotonowej absorpcji. Analizujemy możliwość zwiększenia dwufotonowej absorpcji w układach z geometrią jedno- lub dwuwarstwową, uwalniającą lub hamującą rotację oraz pokazujemy, w jaki sposób efektywna długość sprzężenia w obu przypadkach wpływa na wielkość dwufotonowej absorpcji. Wprowadzając termin "conjugation signature" dla wielkości dwufotonowej absorpcji pokazujemy, że dla dwupasmowej geometrii efektywne sprzężenie widoczne jest na poziome struktury tetrameru, lecz w geometrii jednopasmowej sprzężenie obejmuje aż do 8 członów łańcucha. Zarejestrowanie ekstremalnie wysokich wartości ($\sigma_2 \sim 10^5$ GM) dla dwuwarstwowej geometrii z maksimum na 1.3 μm pozwala na użycie badanych cząsteczek w urządzeniach telekomunikacyjnych.

5. M. Drobizhev, F. Meng, A. Rebane, Y. Stepanenko, E. Nickel, and C. W. Spangler, "Strong Two-Photon Absorption in New Asymmetrically Substituted Porphyrins: Interference between Charge-Transfer and Intermediate-Resonance Pathways," *J. Phys. Chem. B* 110, 9802-9814 (2006).

Przeprowadzamy badania dwufotonowej absorpcji (2PA) w dwóch seriach porfiryry z 4-(difenylamino)sylbenem lub 4,4'-bis-(difenylamino)sylbenem (BDPAS) dołączonych za pomocą mostków π -sprzęgających do pozycji mezoporfiryry. Pokazujemy, że modalność podstawników zwiększa przekrój czynny 2PA w paśmie Soreta (dł. fali wzbudzenia 750-900 nm) o dwa rzędy wielkości z $\sigma_2 \approx 10$ GM dla mezo-fenylporfiryry do $\sigma_2 \approx 10^3$ GM dla pary: porfiryryna-BDPAS połączonej mostkiem etylowym. Właściwości dwufotonowej absorpcji opisano ilościowo rozpatrując interferencję pomiędzy dwoma ścieżkami dwufotonowej absorpcji. Pierwsza ścieżka zawiera w sobie wirtualne przejście do pośredniego poziomu jednofotonowego. Druga ścieżka omija pośredni rezonans i zachodzi dzięki dużej stałej różnicy momentów przejścia pomiędzy stanem podstawowym oraz końcowym wzbudzonym stanem elektronowym. Zgodnie z naszą najlepszą wiedzą, jest to pierwsza eksperymentalna obserwacja efektu łączenia tych dwóch ścieżek w jednym przejściu dwufotonowym, w wyniku czego powstaje modulowana interferencją kwantową intensywność przejścia 2PA.

Innym zagadnieniem rozwijanym podczas współpracy z grupą prof. Rebane były badania interferencji kwantowej pomiędzy jedno- oraz trójfotonowym przejściem w organicznych ciałach stałych w temperaturze pokojowej. W procesie naświetlenia cienkiej folii polimerowej z chromoforem o relatywnie dużym współczynniku trójfotonowej absorpcji po raz pierwszy udało nam się zarejestrować przestrzenne prążki interferencyjne widoczne gołym okiem. Główny problem w tym eksperymencie polegał na tym, że zazwyczaj wielofotonowa absorpcja jest bardzo słaba i aby zarejestrować kwantową interferencję używane były zwykle specjalistyczne bardzo czułe i skomplikowane metody detekcji. Bardzo małe prawdopodobieństwo absorpcji trzech fotonów naraz wymagało w poprzednich eksperymentach bardzo dużych intensywności laserów wzbudzających, co praktycznie wykluczało obserwacje prążków interferencyjnych. W naszym eksperymencie do zwiększenia sygnału zastosowaliśmy nowy typ dendrymerów organicznych – cząsteczek o niezwykle dużym współczynniku absorpcji trójfotonowej. Trzeba zauważyć, że w tych cząsteczkach maksimum przejścia jednofotonowego pokrywa się z maksimum przejścia trójfotonowego, co sugeruje, że przejście zachodzi pomiędzy tym samym początkowym i końcowym stanem elektronowym.

Streszczenie prac związanych z interferencją kwantową.

A. Rebane, N. Christensson, M. Drobizhev, Y. Stepanenko, and C. Spangler, "Quantum interference in organic solid," *Optics Express* 13, 6033–6038 (2005).

Prezentujemy interferencję kwantową o dużym kontraście pomiędzy jedno- oraz trójfotonowym przejściem w substancji organicznej w temperaturze pokojowej. Naświetlając cienką folię polimerową aktywowaną za pomocą fluoryzującego dendrymerycznego chromoforu z dużym przekrojem czynnym absorpcji trójfotonowej dwoma impulsami femtosekundowymi o częstotliwości w bliskiej podczerwieni (1300 nm) oraz częstotliwością potrojoną, obserwujemy powstanie struktury interferencyjnej widocznej nieuzbrojonym okiem.

Duży wysiłek również włożyłem w rozwijanie nowych metod w ultraszybkiej spektroskopii. We współpracy Wydziałem Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego opracowaliśmy metodę czasowo rozdzielczego pomiaru widm fluorescencji. Aby zwiększyć czułość oraz uzyskać rozdzielczość czasową, w naszej metodzie użyliśmy procesu mieszania trzech fal w kryształach nieliniowych:

P. Fita, Y. Stepanenko, and C. Radzewicz, "Femtosecond transient fluorescence spectrometer based on parametric amplification," *Appl. Phys. Lett.* 86, 021909 (2005).

Przedstawiamy nową metodę rejestracji femtosekundowych czasowo rozdzielczych widm fluorescencji w zakresie widzialnym. Metoda jest oparta o proces niewspółliniowego wzmocnienia parametrycznego w kryształach beta-boranu baru i zapewnia rozdzielczość czasową rzędu 100 fs. Pokazujemy, że korzystając z naszej metody można rejestrować widma o szerokości około 6000 cm^{-1} w procesie pojedynczego skanu w czasie. Aby pokazać użyteczność przedstawionej metody, zmierzaliśmy czasową dynamikę widma fluorescencji kumaryny-6 rozpuszczonej w anilinie.

W roku 2007 nawiązałem współpracę z wydziałem Uniwersytetu Nevady w Reno (USA)- Nevada Terawatt Facility (NTF), specjalizującego się w przeprowadzaniu badań w obszarze fizyki wysokich gęstości energii, badaniu zachowania materii poddanej działaniu ekstremalnie wysokich temperatur oraz ciśnień – w warunkach bliskich panującym w gwiazdach oraz reaktorach jądrowych.

W tym samym roku udałem się tam na staż naukowy, w czasie którego prowadziłem badania metod wytwarzania oraz diagnostyki impulsów laserowych o bardzo dużej mocy szczytowej. Uruchomiłem wzmacniacz na szkle neodymowym o czasie trwania impulsów 300 fs i mocy szczytowej 50 TW. Częstość repetycji impulsów tego typu lasera wynosiła jeden strzał na godzinę, co stanowiło duże wyzwanie dla systemu diagnostyki, ponieważ nie istniała możliwość uśredniania impulsów. Zaprojektowałem oraz uruchomiłem system diagnostyczny takiego lasera, który się składał z jednostrzałowego systemu pomiaru funkcji autokorelacji oraz układu odzyskiwania fazy spektralnej impulsu laserowego metodą FROG (Frequency Resolved Optical Gating) oraz systemu optycznego, obrazującego przekrój wiązki laserowej w komorze eksperymentalnej.

Jednotematyczny cykl prac stanowiący znaczny wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej.

Jako swoje główne osiągnięcie naukowe mogę wskazać rozwinięcie metody wieloprześciowego parametrycznego wzmacniania ultrakrótkich impulsów laserowych. W roku 2005 we współpracy z prof. Czesławem Radzewiczem z Uniwersytetu Warszawskiego opracowaliśmy metodę efektywnego wzmocnienia impulsów laserowych w procesie parametrycznym do dużych energii szczytowych przy użyciu pompujących laserów komercyjnych. W tym samym roku ukazała się pierwsza z cyklu praca dotycząca tego tematu.

Parametryczne wzmacnianie światła jest jednym z najbardziej aktywnie rozwijanych w ostatnich latach kierunków w dziedzinie wytwarzania ultrakrótkich impulsów laserowych. Impulsy takie stosuje się między innymi w diagnostyce i sterowaniu przebiegiem reakcji fotochemicznych, kontroli kwantowej, standardach częstości i czasu, mikroobróbce materiałów, mikroskopii wielofotonowej, generacji spójnego promieniowania w głębokim nadfiolecie, laserowych akceleratorach cząstek elementarnych czy też optycznej tomografii medycznej. Optyczne procesy parametryczne są znane i intensywnie badane od czasu skonstruowania pierwszych laserów dużej mocy. W odpowiednich kryształach nieliniowych (np. KDP, BBO, BiBO, LiNbO₃), w których pojawia się składowa polaryzacji ośrodka proporcjonalna do kwadratu pola elektrycznego fali wymuszającej, zachodzi mieszanie trzech fal. W

jednym z kilku możliwych wariantów tego procesu, nazywanym wzmacnianiem parametrycznym, na kryształ padają dwie fale: silna wiązka krótkofalowa (pompująca) i dużo słabsza długofalowa (sygnałowa). Wskutek nieliniowego oddziaływania z ośrodkiem fala sygnałowa jest wzmacniana kosztem energii fali pompującej.

Pierwsze doniesienia o użyciu optycznego wzmacniacza parametrycznego do generacji impulsów femtosekundowych o bardzo dużej mocy szczytowej pojawiły się w roku 1992 za sprawą litewskiej grupy badawczej na czele z A. Dubietisem (A. Dubeitis, G. Jonasauskas, A. Piskarskas, *Opt. Commun.* **88**, 437 (1992)).

W pierwszej pracy teoretycznej na ten temat, która ukazała się 5 lat później, I. N. Ross i jego współpracownicy jako pierwsi argumentują, że technika ta doskonale nadaje się do wytwarzania impulsów laserowych o ekstremalnie dużej mocy ($\geq 10 \text{ PW} = 10^{16} \text{ W}$) i ekstremalnie dużych natężeniach ($> 10^{23} \text{ W/cm}^2$) (I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie, A. J. Langley, J. L. Collier, *Opt. Commun.* **144**, 125 (1997)). W tej samej pracy po raz pierwszy pojawił się termin OPCPA (ang. *Optical Parametric Chirped Pulse Amplifier*).

Technika CPA (ang. *Chirped Pulse Amplification*) polega na rozciągnięciu impulsu w domenie czasowej przy pomocy układu dyspersyjnego (streczera), jego wzmocnieniu, a następnie skróceniu (kompresji) do pierwotnego czasu trwania w układzie o odwrotnej dyspersji. Czasowe rozciągnięcie impulsu przed etapem wzmocnienia ma na celu uniknięcie wysokich mocy szczytowych, które skutkują katastroficznymi uszkodzeniami wzmacniacza.

W mojej pierwszej z cyklu pracy wykonanej w Instytucie Chemii Fizycznej we współpracy z prof. Czesławem Radzewiczem zaproponowaliśmy i z powodzeniem przetestowaliśmy nowe podejście do konstrukcji układu OPCPA wykorzystujące względnie tani komercyjny laser nanosekundowy Nd:YAG z przetwarzaniem na drugą harmoniczną jako źródło impulsów pompujących.

Y. Stepanenko and C. Radzewicz, "High-gain multipass noncollinear optical parametric chirped pulse amplifier," *Appl. Phys. Lett.* **86**, 211120 (2005).

Demonstrujemy wieloprześciowy niewspółliniowy optyczny wzmacniacz parametryczny zasiewany impulsami z femtosekundowego oscylatora na kryształach szafiru domieszkowanego jonami tytanu. Pompowanie wzmacniacza parametrycznego realizowane było przez drugą harmoniczną z komercyjnego lasera Nd:YAG z modulacją dobroci wnęki. Po czterech przejściach przez kryształ beta boranu baru uzyskaliśmy wzmocnienie większe od 10^6 oraz energię impulsu sięgającą 1.7 mJ. Dobra jakość przestrzenna wiązki oraz duże wzmocnienie i szerokie pasmo czynią wieloprześciowy wzmacniacz parametryczny atrakcyjną alternatywą do wzmacniaczy na kryształach szafiru domieszkowanego jonami tytanu.

Aby efektywnie wykorzystać relatywnie długi (8 ns) impuls pompujący do wzmacniania krótkiego (1 ns) impulsu rozciągniętego zastosowaliśmy nowatorską konstrukcję wzmacniacza wieloprześciowego. W

przedstawionym rozwiązaniu, tak jak w rozwiązaniach stosowanych w zwykłych wzmacniaczach laserowych, impuls wzmacniany wykonuje kilka przejść przez jeden kryształ nieliniowy korzystając ze wzmocnienia wytwarzanego przez kolejne odcinki czasowe długiego impulsu pompującego. Wykorzystanie procesu parametrycznego w naszym przypadku wymusza, aby dla fotonów pompujących oraz zasiewających spełniały się relacje zachowania pędu oraz energii. Oznacza to między innymi, iż w każdym przejściu przez kryształ nieliniowy kąt pomiędzy wiązką pompującą i wzmacnianą oraz kąt tych obu wiązek do osi optycznej kryształu musi być taki sam. Implikuje to fakt, że każda kolejna wiązka musi być ułożona na stożku dopasowania fazowego utworzonego przez wiązkę pompującą. Trzeba również pamiętać, że proces parametryczny jest procesem natychmiastowym, w konsekwencji czego, kryształ nieliniowy nie może odgrywać roli ośrodka magazynującego energię. Ten fakt powoduje, że czasowo-przestrzenne nakrywanie między impulsem pompującym i wzmacnianym odgrywa kluczową rolę. Ten wymóg nakłada ograniczenie na całkowity czas obiegu impulsu wzmacnianego we wnętrzu wzmacniacza do czasu szerokości impulsu pompującego, który wynosił około 8ns.

Pokazaliśmy, że w jednostopniowym wzmacniaczu na kryształach BBO można wzmocnić impulsy femtosekundowe wprost z oscylatora szafirowego o czynnik powyżej 10^7 , zachowując szerokie pasmo i uzyskując dużą energię.

W kolejnej z tego cyklu pracy zademonstrowałem możliwość rekompresji impulsów wzmocnionych w wieloprzejściowym wzmacniaczu parametrycznym. Udało się skompresować impulsy do szerokości czasowej 23 fs przy energii impulsu 4.5 mJ. Osiągnęliśmy wzmocnienie całkowite na poziomie 1.8×10^7 . Ustalona została również maksymalna energia impulsu wynikająca z ograniczenia nałożonego wzmocnioną spontaniczną fluorescencją parametryczną.

Y. Stepanenko and C. Radzewicz, "Multipass non-collinear optical parametric amplifier for femtosecond pulses," Opt. Express 14, 779-785 (2006)

Demonstrujemy udaną próbę rekompresji impulsów o czasie trwania 30 fs i o energii 4.5 mJ. Impulsy laserowe, pochodzące z oscylatora na bazie szafiru domieszkowanego tytanem, wzmocnione były za pomocą pierścieniowego wieloprzejściowego optycznego wzmacniacza parametrycznego używając kryształu beta boranu baru pompowanego drugą harmoniczną komercyjnego lasera Nd:YAG. Czas trwania otrzymanych impulsów laserowych bliski jest ograniczeniu Fourierowskiemu.

Rozwijając naszą metodę, poszukiwaliśmy sposobu na zwiększenie mocy szczytowej naszego wzmacniacza. Do tego celu idealne wydawało się być rozwiązanie zaproponowane przez japońską grupę teoretyczną (T. Harimoto, and K. Yamakawa, "Numerical analysis of optical parametric chirped pulse amplification with time delay," Opt. Express 11(8), 939-943 (2003)). W następnej przedstawionej przeze

mnie pracy z cyklu po raz pierwszy na świecie została zaprezentowana eksperymentalna możliwość konstrukcji dwustopniowego wzmacniacza parametrycznego poszerzonego o stopień mocy ustawionego w konfiguracji z przesunięciem czasu (time-shearing),

P. Wnuk, Y. Stepanenko, and C. Radzewicz, "Multi-terawatt chirped pulse optical parametric amplifier with a time-shear power amplification stage," *Optics Express* 17, 15264–15273 (2009)

Pokazujemy prosty oraz charakteryzujący się zwartą konstrukcją układ szerokopasmowego optycznego wzmacniacza parametrycznego femtosekundowych impulsów. Impulsy pochodzące bezpośrednio z oscylatora szafirowo-tytanowego wzmocnione zostały do mocy szczytowej 2 TW. Nasz system polega na nowej technice „przesunięcia czasu”, która poprawia nakrywanie czasowe pomiędzy impulsem zasiewającym oraz pompującym, a zatem, poprawia efektywność stopnia mocy pompowanego nanosekundowymi impulsami. Parametryczne wzmocnienie było realizowane wykorzystując dwustopniową geometrię. Pierwszy stopień ustawiony został w geometrii wieloprzejściowego niewspółliniowego parametrycznego wzmacniacza optycznego z pojedynczym kryształem beta boranu baru. Drugi stopień – stopień mocy, składał się z trzech kryształów beta-boranu baru, które były ustawione według nowego schematu „przesunięcia czasu”. Obydwa stopnie pompowane były impulsami drugiej harmonicznej komercyjnego lasera Nd:YAG o częstotliwości repetycji 10 Hz. Nasz system dostarcza impulsy o energii 49 mJ, o czasie trwania 23 fs i zapewnia całkowitą efektywność przetwarzania wynoszącą 10% po rekompresji.

Korzystając ze standardowego lasera Nd:YAG z gaussowskim profilem czasowym impulsu udało nam się osiągnąć efektywność układu 10% przy mocy szczytowej impulsów wzmocnionych na poziomie 2 TW. Warto zauważyć, że nasze wyniki zostały dostrzeżone przez inne grupy naukowe zajmujące się podobną tematyką. Opis naszych rozwiązań znalazł się już w podręcznikach z fizyki laserów oraz spektroskopii laserowej (F. Träger, „Springer handbook of lasers and optics”, 2007, Springer; W. Demtröder, „Laser Spectroscopy: Vol. 2: Experimental Techniques”. Forth edition, 2008, Springer.

Następna praca poświęcona jest metodom uzyskania niezwykle potrzebnych (np. w ultraszybkiej spektroskopii molekularnej) femtosekundowych impulsów w obszarze ultrafioletu.

P. Wnuk, Y. Stepanenko, and C. Radzewicz, "High gain broadband amplification of ultraviolet pulses in optical parametric chirped pulse amplifier," *Opt. Express* 18, 7911-7916 (2010)

Pokazujemy szerokopasmowe wzmocnienie ultrafioletowych impulsów femtosekundowych używając parametrycznego wzmacniacza w technologii CPA. Szerokopasmowe ultrafioletowe impulsy zasiewające były otrzymane techniką achromatycznego dublowania częstotliwości impulsów femtosekundowych pochodzących z oscylatora szafirowo-tytanowego. Rozciągnięte impulsy zasiewające były wzmocnione w wieloprzejściowym parametrycznym wzmacniaczu na pojedynczym kryształ BBO pompowanym nanosekundowymi impulsami czwartej harmonicznej z lasera Nd:YAG. Do szerokopasmowego wzmocnienia była użyta niewspółliniowa geometria. Całkowite wzmocnienie po rekompresji wyniosło 2.5×10^5 z impulsami o energii 30 μJ oraz czasem trwania 24 fs. Ustaliliśmy, że zmierzone wzmocnienie ograniczone było efektami termicznymi indukowanymi absorpcją lasera pompującego na centrach barwnych w kryształ BBO.

Uzyskanie impulsów w ultrafiolecie wiąże się z poważnymi utrudnieniami, takimi jak mała sprawność czy ograniczona szerokość pasma przetwarzania. Dlatego użyliśmy naszej metody wieloprześciowego wzmacniania ultrakrótkich impulsów promieniowania w nadfiolecie, gdzie znajdują się pasma absorpcji wielu ważnych substancji chemicznych i biologicznych. Okazuje się, że dostępne obecnie kryształy nieliniowe umożliwiają budowę takiego urządzenia, gdyż w geometrii niewspółosiowej można wybrać konfigurację zapewniającą szerokopasmową pracę wzmacniacza w obszarze spektralnym 320-450 nm.

W przedstawionej pracy zostały przeprowadzone badania szerokopasmowego wzmacniacza parametrycznego typu NOPCPA (ang. Noncollinear Optical Parametric Chirped Pulse Amplifier) na kryształach beta-boranu baru (BBO) pracującego w obszarze spektralnym 350-450 nm. Podobnie jak w przypadku IR NOPCPA źródłem impulsów pompujących był komercyjny laser Nd:YAG. Wykorzystaliśmy czwartą harmoniczną promieniowania tego lasera (266 nm, 8 ns) do pompowania wzmacniacza wieloprześciowego. Jako impulsy zasiewające (wzmacniane) zastosowaliśmy drugą harmoniczną z szerokopasmowego femtosekundowego oscylatora szafirowego.

Pomimo naszych starań sprawność wszystkich naszych wzmacniaczy parametrycznych była na poziomie tych, które korzystają z kryształu szafiru domieszkowanego jonami tytanu, jako ośrodka wzmacniającego. Największa sprawność przekazywania energii pompy do wiązki wzmacnianej w naszym rozwiązaniu wyniosła maksymalnie 15%. Głównym powodem niskiej sprawności była mała całka nakrywania czasowego dwóch impulsów o przebiegu czasowym w kształcie Gaussa. Aby usprawnić efektywność układu wzmacniacza potrzebne są metody ulepszające nakrywanie czasowo-przestrzenne impulsów pompujących oraz wzmacnianych.

W ostatniej pracy z cyklu poświęconego wzmacniaczom parametrycznym zajmowałem się analizą efektywności oraz stabilności wieloprześciowego wzmacniacza pompowanego impulsem laserowym z prostokątnym rozkładem czasowym.

Y. Stepanenko, "On the efficiency of a multiterawatt optical parametric amplifier: numerical model and optimization," J. Opt. Soc. Am. B 28, 2337-2346 (2011))

Przedstawiamy symulacje numeryczne oraz analizę wysokoefektywnego oraz stabilnego układu niewspółliniowego optycznego wzmacniacza parametrycznego wykonanego w technice CPA. Zaprezentowany układ zoptymalizowany został ze względu na prostokątny czasowo-przestrzenny profil impulsu pompującego. Pokazujemy również, że efektywność dwustopniowego systemu, składającego się z wieloprześciowego przedwzmacniacza oraz wzmacniacza mocy w geometrii „przesunięcia czasu” może sięgać wartości 0.9. Dyskutujemy praktyczne schematy „kilku okresowego” OPCPA używającego różnych kryształów nieliniowych. Do zrównoważenia stabilności oraz efektywności systemu zastosowane zostały wyniki symulacji Monte Carlo.

W publikacji tej opracowałem i opisałem model matematyczny wieloprześciowego wielostopniowego szerokopasmowego wzmacniacza parametrycznego o dużej efektywności. Model pozwala na odwzorowanie zachowania impulsu w rzeczywistym wzmacniaczu parametrycznym składającym się ze stopnia wieloprześciowego przedwzmacniacza oraz stopnia mocy. Pozwala również na odzyskanie widmowych oraz czasowo przestrzennych charakterystyk impulsu wzmacnianego w czasie rzeczywistym. Przeprowadziłem również analizę źródeł niestabilności energii wyjściowej impulsu z takiego wzmacniacza i zaproponowałem praktyczne schematy wzmacniaczy o efektywności sięgającej 50%-60%, co odpowiada efektywności kwantowej 75%-90%. Przedstawiłem oszacowania oraz sposoby poprawy kontrastu impulsu w stosunku do poziomu wzmocnionej fluorescencji parametrycznej.

W chwili obecnej jestem kierownikiem grantu rozwojowego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju na lata 2011-2013, którego głównym celem jest zbudowanie wysokoefektywnego wzmacniacza ultrakrótkich impulsów laserowych w oparciu o nowatorskie metody rozwijane przeze mnie i moich współpracowników.

Warszawa, dnia 08/12/2011

Y. Stepanenko