

**Lézerimpulzusok tér és időbeli
tulajdonságainak javítása rövid impulzusú
optikai rendszerekben**

PhD tézispontok

**Készítette:
Bakonyi Zoltán**



**Témavezetők:
Dr. Szatmári Sándor
Dr. George Onishchukov**

**Szegedi Tudományegyetem
Kísérleti Fizikai Tanszék
2000**

Bevezetés, tudományos előzmények

Az elmúlt évtizedekben a rövid impulzusú lézertechnológia fejlődésével az optikai rendszerek egészen új alkalmazási területekre vonultak be. Ezen gyors fejlődés két, talán legközvetlenebbül érintett területe a távközlés és a nagy intenzitásoknál lejátszódó kölcsönhatások vizsgálata. A rövid impulzusú lézertechnológia térnyerésével párhuzamosan az alkalmazások egyre szigorúbb követelményeket támasztanak a fényimpulzus paramétereivel szemben.

A nyolcvanas években az üvegszál-optikai adatátvitel széles körben elterjedt. Mivel a technológia jól megfelel az olyan feltörekvő új médiumok kívánalmainak, mint például az internet vagy a digitális műsorszórás, nagyon valószínű, hogy századunk információs forradalma az optikai információs technológia fejlődésével karöltve fog lezajlani.

Az üvegszál-optikai adatátviteli rendszerekben a felgyülemelő veszteségeket ellensúlyozni kell. Korábban optoelektronikai ismétlőket (*repeaterket*) alkalmaztak erre a célra. Az optikai jelet elektromos jellé alakították, felerősítették, majd visszaalakították optikai jellé. Egy ilyen eszköz nemcsak igen költséges, sávszélessége korlátozott, hanem a több optikai csatornát egyidejűleg használó rendszerekben alkalmazásuk gyakorlatilag lehetetlen. Jelenleg már szinte minden, a gyakorlatban használt üvegszál-optikai rendszerben optikai erősítőket alkalmaznak. Az általánosan alkalmazott kvarc adatátviteli üvegszál-kábel fizikai tulajdonságaiból eredően két egymástól elkülönülő spektrális tartomány használatos adatátvitelre: az $1,3\mu\text{m}$ -es és az $1,5\mu\text{m}$ -es telekommunikációs ablak. Az előbbiben a csoportsebesség-diszperzió alacsony, az utóbbiban pedig a veszteségek kicsik. Az $1,5\mu\text{m}$ -es ablakban általában erbiummal szennyezett üvegszál erősítőket (*Erbium Doped Fiber Amplifier; EDFA*) alkalmaznak nagyobb erősítési

tényezőjük, kisebb zajuk és az adatátviteli sebességhez képest hosszú feléledési idejük miatt. Ugyanakkor az $1,3\mu\text{m}$ -es tartományban az üvegszál erősítők technológiája kiforrotlan és meglehetősen költséges.

Elvileg a félvezető optikai erősítők igen vonzó alternatívát kínálnak az adatvonalon belüli erősítésre magas hatásfokok, mérsékelt árak és kis méretük miatt. Ugyanakkor, a félvezető optikai erősítők alkalmazhatóságát számos nemkívánatos tulajdonságuk korlátozza: nagyobb zajállandójuk, az átviteli sebességgel összemérhető feléledési idejük okozta mintázódás (*patterning*), az alacsony telítési energiájuk és a nagy alfa-faktoruk. A legsúlyosabb korlátozás azonban az erősített spontán emisszióból eredő zaj gyors növekedése. Ez a jelenség szintén az átviteli sebességgel összemérhető feléledési időből ered. A probléma kiküszöbölésének két lehetséges módja a kvázi folytonos hullámot eredményező fázismodulált adatátviteli formátum (*phase-shift keying; PSK*) alkalmazása, vagy az amplitúdó modulált adatátviteli formátumot megtartva, telítődő abszorbensek használata az adatvonalban.

A dolgozatban megmutatom, hogy a *PSK* adatátviteli formátum alkalmazását nemcsak a félvezető optikai erősítők által bevezetett erős fáziszaj, hanem - az általunk először bemutatott -, a félvezető optikai erősítőben kialakuló nemlineáris *chirp* és az alkalmazott adatvonalon sáváteresztő optikai szűrő kölcsönhatásából eredő modulációs instabilitás is korlátozza. Így a telítődő abszorbensek használata várhatóan az egyetlen hatékony eszköz a probléma megoldására. A telítődő abszorbensek alkalmazásának külön gyakorlati előnye, hogy könnyen integrálhatók félvezető lézer erősítőkkel.

A dolgozatom egyik fő célkitűzése, annak bemutatása, hogy a kombinált, telítődő abszorbens-félvezető lézer erősítő alapú rendszerek, a jövőben versenyképes alternatívát jelenthetnek az üvegszál optikai erősítőn alapuló rendszerek mellett.

Nemlineáris optikai elemek segítségével nemcsak az ultrarövid lézérimpulzusok időbeli tulajdonságai, hanem azok térbeli eloszlása is javítható. A nagyintenzitású lézerekkel végzett kísérletekben rendkívül fontos, hogy a lézérimpulzusok térbeli eloszlása egyenletes legyen, mivel bármely inhomogenitás a fókuszoltba koncentrált energia csökkenéséhez vezet. Ezen túlmenően az intenzitásprofil véletlenszerű fluktuációja leronthatja a kísérlet megismételhetőségét. Annak ellenére, hogy a hatvanas évek óta számos hatékony módszert fejlesztettek ki a fénynyalábok térbeli eloszlásának javítására, a nagy teljesítményű rövid impulzusú lézernyalábok intenzitáseloszlásának javítása jelenleg is igen nehezen megoldható feladat. Egyes, a gyakorlatban elterjedt eljárások alkalmazása az impulzusidő kiszélesedéséhez vezetnek, más módszerek pedig igen érzékenyek a szűrni kívánt lézernyaláb terjedési irányára. Ily módon ezek a módszerek nem vagy csak igen erős korlátozásokkal alkalmazhatók nagy összetett lézerrendszerekben. A dolgozat bemutat egy olyan új, a korlátozott iránytartóságú lézernyalábok szűrésére is alkalmas elrendezést, amely a térbeli intenzitáseloszlás javítása mellett az impulzusok időbeli kontrasztját is javítja.

A dolgozatban szereplő üvegszáloptikai adatátviteli vonalakkal kapcsolatos eredményeim a jénai *Friedrich Schiller Egyetem Alkalmazott Fizikai Intézetében* születtek. A rövid impulzusú lézernyalábokkal végzett kísérleteimet pedig a *Szegedi Tudományi Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén* végeztem.

Kísérleti módszerek

Az adatátviteli kísérleteket egy recirkulációs üvegszál-hurok elrendezés segítségével végeztem. Az ilyen elrendezések alkalmasak arra, hogy az egymással megegyező szegmensekből felépülő adatátviteli vonalak viselkedését tanulmányozzák. Az elrendezésben először egy adott időtartamú optikai jelsorozatot állítanak elő, majd ezt az üvegszál-hurokba csatolják. A bevezetett optikai jelet először erősítik és formálják, majd egy adott hosszúságú üvegszálon áthaladva a jel visszaérkezik az erősítő bemenetéhez (azaz a hurok kezdetéhez). Az optikai jel energiájának bizonyos része diagnosztikai célból a hurokelrendezés több pontján kicsatolható. A kicsatolt jelet megfelelően kapuzva, a kívánt számú adatátviteli szegmensben áthaladt optikai jel tulajdonságai tanulmányozhatók.

Kísérleteim során a következő berendezéseket használtam:

- Fényforrásként egy *Radians Imova TUN-1300ML* „aktív mode-lockolt” külső rezonátorú hangolható félvezető lézert alkalmaztam, amely 20ps-os impulzusokat bocsátott ki általában 10 GHz ismétlési frekvenciával. Ezen kívül használtam még egy *Advanced Optics GmbH TMLL 1300/70-10/1-25M* típusú hangolható „aktív mode-lockolt” lézert is, ami 10 GHz ismétlési frekvenciával 1,5ps-os impulzusokat biztosított.
- Az átvinni kívánt bitsorozatokat egy *Anritsu MP1701A* „bitminta” generátorral állítottam elő és egy *Sumitomo Osaka Cement Co. T-MZI 3-10* típusú intenzitásmodulátorral alakítottam át RZ (return to zero) amplitúdó-modulált optikai jellé.
- A szemdiagrammokat egy *HP83480A* kommunikációs analizátor segítségével vettem fel. A műszer egy 20GHz-es *HP83483A* fiókot és egy 50GHz-es *HP83484A* fiókot tartalmazott. Optikai vevőegységként 13GHz sávszélességű

HP11982A típusú "Lightwave Convertereket" valamint egy 25GHz sávszélességű New Focus M1414 típusú fotodetektor alkalmaztam.

- Az optikai spektrumot egy HP70951B kapuzható optikai spektrumanalizátorral rögzítettem.
- Az impulzusidőt egy APE GmbH Pulse Check soklövéses autokorrelátorral mértem.
- A félvezető optikai erősítőket a JDS UNIPHASE-cég biztosította.
- A felhasznált telítődő abszorbens modul a berlini *Henrich Herz Intézetben* készült. A telítődő abszorbens réteg feléledési ideje $\sim 30ps$ volt és a maximális kifakulás pedig $3-4dB$.
- A „clock recovery” egység egy 10GHz-es rezonáns filter alapú házilag elkészített berendezés volt.
- Alkalmanként az optikai vevő egységek jelét egy HP8564E mikrohullámú spektrumanalizátorral is megfigyeltük.

A kísérletek során pikoszekundumos RZ amplitúdó-modulált impulzusok terjedését tanulmányoztuk a zéró csoportsebesség diszperzióhoz tartozó hullámhossz ($\sim 1,3\mu m$) közelében. A recirkulációs hurokelrendezés a kísérletek során (10-38) km standard egymódusú telekommunikációs optikai üvegszál-kábelt tartalmazott.

A modulációs instabilitás tanulmányozása során a Mach-Zender rendszerű amplitúdó-modulátor helyett alkalmanként egy UTP 9603 fázis-modulátort alkalmaztam. Az optikai jel spektrumát pedig egy burleigh FSP-9000 pásztázó Fabry-Perot interferométer és egy Tektronix 620B 500MHz-es digitális oszcilloszkóp segítségével rögzítettem.

A pumpa-próba mérések próba impulzusát az Advanced Optics GmbH TML. 1300:70-10/1-25 „aktívan mode-lockolt” hangolható félvezető lézer szolgáltatja. A lézer 10GHz-es ismétlési frekvenciával 1,5ps-os impulzusokat

biztosított. A 10GHz-es impulzussorozatot egy *Sumitomo Osaka Cement Co. T-MZI 3-10* típusú *Mach-Zehnder* rendszere intenzitásmodulátorral 1.25GHz-esre konvertáltam. A pumpáló impulzust a *Radians Innova TUN-1300ML* - hangolható, külső rezonátorú- félvezetőlézer szolgáltatta. A lézer-rezonátort úgy építettem fel, hogy az $1,25\text{GHz} + 2\text{kHz}$ ismétlési frekvenciával szolgáltasson $\sim 20\text{ps}$ -os impulzusokat. A lézerimpulzusokat egy félvezető optikai erősítővel (JDS UNIPASE CQF822/0 SOA) erősítettem és a széles spektrumú ASE-t egy $0,9\text{nm}$ -es sáváteresztő optikai szűrővel blokkoltam. A pumpa impulzusok energiája a „pumpa blokk” végére helyezett változtatható attenuátorral szabályoztam. A pumpa és a próba impulzusokat egy 90% / 10%-os csatoló segítségével vezettem a vizsgálni kívánt egységbe. Közvetlenül az bevezetés előtt a pumpa impulzusok maximális energiája $\sim 1\mu\text{J}$, míg a próba impulzusok energiája $0,3\text{fJ}$ volt. A egység után a különbözőnek választott hullámhosszú próba- és pumpa impulzusokat egy HP 70951B optikai spektrum analízátorral szeparáltam, majd a próba- jelet egy HP54603B 60MHz-es oszcilloszkóp segítségével rögzítettem. A mérés a hasonló frekvenciájú próba- és pumpa impulzusok lebegésén alapult.

A nyitott optikai kísérletek során egy *Szatmári-típusú DFDL* alapú festéklézert alkalmaztam fényforrásként. A lézer 500fs-os és $\sim 100\mu\text{J}$ energiájú impulzusokat szolgáltatott az 500nm-es központi hullámhosszon. Nemlineáris komponensként egy 52° -ban vágott $0,5\text{mm}$ vastagságú BBO kristálylapot alkalmaztam. A lézerimpulzusok térbeli eloszlását egy házi készítésű UV-érzékeny CCD kamera alapú számítógépes képrögzítő egység segítségével vettem fel.

Új tudományos eredmények

- 1. Kísérleti úton, egy új típusú modulációs instabilitási jelenséget mutattam ki félvezető lézer alapú távközlési rendszerekben. Az effektus a félvezető optikai erősítő és az alkalmazott adatvonalbeli sáváteresztő szűrő kölcsönhatásának eredménye. A kísérleti megfigyelések alapján nyert eredmények jó egyezést mutatnak az elméleti úton számított eredményekkel. [1].**

Az amplitúdó modulált adatátviteli formátumot használó, félvezető optikai erősítő alapú adatátviteli rendszerekben az átviteli távolságra vonatkozó egyik legsúlyosabb korlátozást az impulzusok közötti ASE zaj gyors felnövekedése jelenti. Ezért az amplitúdó modulált helyett, a fázismodulált átviteli formátum alkalmazása tűnhet előnyösnek, mivel ilyenkor a lézersugárzás kvázifolytonos. Ennek ellenére a kísérletek során azt találták, hogy az ilyen rendszerek teljesítőképessége *10Gb/s*-os átviteli sebesség mellett néhány száz kilométeres távolságra korlátozódik. Az ilyen eredményeket tárgyaló publikációkban a legfőbb korlátozó tényezőként a félvezető lézer erősítőben fellépő véletlenszerű töltéshordozó-fluktuáció hatására kialakuló erős fáziszajt jelölték meg. Kísérleti úton megmutattam, hogy a modulációs instabilitási jelenségek is a fázis- és az amplitúdózaj gyors felnövekedéséhez vezethetnek. A kísérleti eredményeket összehasonlítottam az elméleti úton jósolt eredményekkel.

- 2. Megállapítottam, hogy az amplitúdó modulált adatátviteli formátumot felhasználó félvezető optikai erősítő (továbbiakban FAO) alapú optikai távközlési rendszerek teljesítőképessége növelhető az adatvonalai tellítődő abszorbensek (a továbbiakban TA) alkalmazásával. A kombinált,**

félvezető optikai erősítő - telítődő abszorbens (a továbbiakban FOE-TA) alapú távközlési rendszerek legfőbb jellemzőit az egység erősítését leíró, kvázi-analitikus formulán alapuló numerikus szimulációk segítségével meghatároztam. [2,3].

A tisztán félvezető optikai erősítő alapú amplitúdó modulált RZ formátumot alkalmazó távközlési rendszerekben az erősítés telítődése és az adatátviteli sebességgel összehasonlítható feléledési idő miatt a jel kevésbé erősödik mint az impulzusok közötti *ASI* zaj. Az effektus csökkenthető adatvonalai sávszűrők használatával, illetve megfelelő erősítési térkép alkalmazásával, de meg nem szüntethető. Az adatvonalba helyezett telítődő abszorbensekkel az impulzusok közötti *ASE* zaj felnövekedése teljességgel kiküszöbölhető. Egy ilyen kombinált FOE-TA alapú távközlési rendszer alapvetően másképpen viselkedik mint egy tisztán *FOE* alapú távközlési rendszer. Megmutattam, hogy egy adott küszöbenergia alatt a rendszer elnyomja a bejövő impulzusokat. A küszöbenergia fölött viszont a bemenő impulzus energiájától függetlenül az impulzus egy stabil, csak a rendszerre jellemző energiát ér el. Numerikus szimulációk segítségével meghatároztam a stabil impulzusenergia függését az adatátviteli sebességtől, illetve az átvitt bitmintától.

- 3. Recirkulációs üvegszálhurok-elrendezést alkalmazva kísérleti úton megmutattam, hogy a kombinált FOE-TA alapú adatátviteli rendszerekben létezik egy, - a bemeneti impulzusparamétereiktől független- stacionárius terjedési állapot. [4,5].**

A kísérletek azt mutatták, hogy a zero csoportsebesség-diszperzióhoz tartozó hullámhossz ($\sim 1,3\mu\text{m}$) közelében működő FOE-TA alapú adatátviteli vonalban az impulzusok egy stacionárius terjedési állapotba jutnak. Az impulzusok paraméterei (spektrum, impulzusidő, impulzus energia) a stacionárius állapotban

egyedül a rendszerre jellemzőek és nem függenek a bemeneti impulzus-paramétereiktől.

- 4. A FOA-TA alapú optikai adatátviteli rendszerekben az impulzusokkal együtt terjedő zaj csökkentésért felelős új effektív mechanizmust mutattam ki. [6, 7, 8].**

A kombinált FOA-TA alapú rendszer zajelnyomási mechanizmusait tanulmányozva, azt tapasztaltam, hogy a rendszer nem csak az impulzusok közötti zajt csökkenti, hanem az impulzusokkal együtt terjedő zajt is hatékonyan elnyomja. Kísérletileg bizonyítottam, hogy a zajelnyomási mechanizmus akkor működik hatékonyabban ha az egyes újraerősítési egységek távolságát növeljük. A rendszer viselkedésére kvalitatív magyarázatot adtam.

- 5. Kísérleti úton tanulmányoztam a kombinált FOE-TA alapú adatátviteli rendszerekben fellépő amplitúdó és spektrális mintázódást. Azt tapasztaltam, hogy a véletlenszerű impulzussorozatok átvitele során a különböző stabil energiájú impulzusok egymáshoz képest elmozdulnak. Az időbeli elcsúszás a távolsággal egyenesen arányos. A jelenséget értelmeztem. [5, 6].**

A rendszerben „pseudo random impulzus sorozatok” (PRBS) átvitele során diszkrét energiaszintek megjelenését és - stacionárius terjedési állapotban- a távolsággal egyenesen arányos időbeli „lemozdulását” tapasztaltam. A különböző terjedési sebességet az impulzusenergia-függő stacionárius spektrum és a telítődés hatására lejátszódó impulzus-formálódás okozza. A kísérletileg mért lemozdulási értékeket összehasonlítva egy egyszerű modell alapján számított értékekkel jó egyezést kaptam. Az időbeli lemozdulás mértéke az

adatvonalai optikai szűrő hangolásával minimalizálható.

- 6. Az összetett FOE-TE rendszerben szereplő félvezető optikai erősítő optimális működési feltételeit meghatároztam és „hibamentes” 5Gb/s-os információátvitelt valósítottam meg, 30000km távolságra. [6].**

A FOE-TA alapú rendszerekkel - a hatékony zajelnyomási mechanizmusok miatt- az információ nagyobb távolságra vihető át. Az ilyen rendszerekben, az optikai zaj mellett –a FOE-nek a bitréssel összehasonlítható feléledési ideje miatt – a fellépő amplitúdó mintázódás az egyik leginkább korlátozó tényező. Az erősítő feléledési idejének csökkentése a mintázódás megszüntetésének egy lehetséges módja. Kísérletileg megmutattam, hogy az alkalmazott félvezető optikai erősítőt nagyobb árammal meghajtva, a feléledési idő és a mintázódás jelentősen csökkenthető. A kombinált rendszerben a mintázódás a zaj rovására optimalizálható. A rendszer optimalizálása után hibamentes 5Gb/s-os információátvitelt valósítottam meg 30000km távolságra.

- 7. Kísérleti úton megmutattam, hogy a rögzített erősítésű félvezető optikai erősítők (Gain Clamped Semiconductor Optical Amplifier) alkalmazhatók a mintázódás kompenzációjára. [7,8,9,10]**

A rögzített erősítésű félvezető optikai erősítőkben Bragg-tükrök segítségével optikai visszacsatolás hozható létre egy adott hullámhosszon. Ismeretes hogy, ha az egy körbefutás során elszennvedett veszteségek megegyeznek az aktív közeg erősítésével, akkor lézerműködés jön létre. Mivel elvileg ezen a ponton az aktív anyag töltéshordozó-sűrűsége rögzített, ezért egy más hullámhosszon érkező optikai jel erősítési tényezője is az lesz. Pumpa-próba mérések segítségével megmutattam, hogy a „rögzítő lézer” relaxációs oszcillációjának amplitúdója és frekvenciája hangolható a meghajtó árammal, a működési hőmérséklettel és a

bemenő impulzus energiájával. A recirkulációs üvegszálhurok-elrendezést felhasználva megmutattam, hogy a rögzített erősítésű félvezető optikai erősítők alkalmasak a hagyományos félvezető optikai erősítők által bevezetett mintázódás kiegyenlítésére.

8. *A telítődő abszorbens modulból és egy rögzített erősítésű félvezető optikai erősítőtől álló kombinált rendszerben hibamentes 10Gb/s-os adatátvitelt valósítottam meg, 5000km távolságra. [8,9,10]*

Az integrált telítődő abszorbens modul félvezető optikai erősítője által bevezetett mintázódást egy rögzített erősítésű félvezető optikai erősítővel kompenzálva, 10Gb/s-os, $2^{31}-1$ PRBS jel hibamentes átvitelét demonstráltam, 5000km-es távolságra.

9. *Egy új kísérleti elrendezést javasoltam korlátozott iránytartóságú nyalábok térbeli eloszlásának javítására. [11]*

Megmutattam, hogy nemlineáris optikai elemek segítségével nemcsak a lézerimpulzusok időbeli kontrasztja javítható, hanem szabad optikai környezetben az impulzusok térbeli eloszlása is homogenizálható. Egy olyan új térszűrési elrendezést javasoltam, amely a *Fourier* síkon a központi térkomponens kiválasztására a hagyományosan alkalmazott tülyuk helyett egy nemlineáris áteresztő képességű optikai elemet használ fel. Az elrendezés a lézernyaláb térbeli eloszlásának javításán kívül az időbeli kontrasztot is javítja.

A szerzőnek a tézispontokhoz kapcsolódó közleményei

1. M. Göllés, S. Daramanyan, G. Onishchukov, A. Stipulin, Z. Bakonyi, V. Lokhnygin, F. Lederer:
Modulation instability in a transmission system with semiconductor optical amplifiers and in line filters
Optics Letters, 25, 293 (2000)
2. C. Knöll, M. Göllés, Z. Bakonyi, G. Onishchukov, F. Lederer:
Features of a Semiconductor Optical Amplifier/Saturable Absorber Module in Signal Transmission Lines
CLEAO/Europe'00, Nice, France, CTuD 0004 (2000)
3. C. Knöll, M. Göllés, Z. Bakonyi, G. Onishchukov, F. Lederer:
Noise suppression with Saturable Absorber in Transmission Lines driven by Semiconductor Optical Amplifier
közlésre elfogadva (Optics Communications)
4. G. Onishchukov, Z. Bakonyi, C. Knöll, M. Göllés, F. Lederer, R. Ludwig:
In-line semiconductor optical amplifiers with saturable absorbers for cascaded transmission systems
ECOC'99, Nice, France, 2 260-261(1999)
5. Z. Bakonyi:
Experimental investigations of 10Gbit/s transmission in fiber systems with semiconductor optical amplifiers
DFG-Kolloquium "Optische Übermittlungsverfahren in der Informationstechnik", Dortmund (1999)
6. Z. Bakonyi, G. Onishchukov, C. Knöll, M. Gnölles, F. Lederer, R. Ludwig:
In-line saturable absorber in cascaded SOA based transmission systems
IEEE Photonics Technology Letters, 12 570-572 (2000)

7. **Z. Bakonyi, G. Onishchukov, C. Knöll, M. Gölles, F. Lederer, R. Ludwig, E. Hilliger:**
Noise suppression in transmission lines using saturable absorbers
Symposium des INK 1/B1 "Optische Informationstechnik", Eyba (1999)
8. **Z. Bakonyi G. Onishchukov, C. Knöll, F. Lederer:**
Noise suppression by saturable absorber in transmission systems with semiconductor optical amplifiers
CLEO'2000, San Francisco, USA, CWK56/329 (2000)
9. **Z. Bakonyi, G. Onishchukov, C. Knöll, M. Gölles, F. Lederer:**
10Gb/s RZ transmission in systems with combined saturable absorber-semiconductor amplifier.
COST 266-267 Workshop 2000, Berlin, 64-66 (2000)
10. **Z. Bakonyi, G. Onishchukov, C. Knöll, M. Gölles, F. Lederer:**
10 Gb/s RZ transmission over 5000 km with gain-clamped semiconductor optical amplifiers and saturable absorbers
Electronics Letters, 36, 1790-1791 (2000)
11. **S. Szatmári, Z. Bakonyi, P. Simon:**
Active spatial filtering of laser beams
Optics Communications, 134, 199-204 (1997)

Társszerzői nyilatkozat

Bakonyi Zoltán "Nonlinear methods for spatial and temporal noise reduction in short pulse optical systems" című értekezésének téziseit megismertem, azokat a jelölt önálló kutatómunkával elért eredményének tekintem. A tézispontokban felhasznált eredményeket nem használtam és nem is fogom felhasználni tudományos minősítés megszerzésére.

Jena, 2000. július 17.

Név

Dr. Simon Péter

Dr. Szatmári Sándor

. Aláírás

