

DOKTORI (PH.D.) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**Rövidimpulzusú Gauss-nyalábok fókuszálás és  
szabad terjedés során bekövetkező fázis- és  
polarizáció változásai**

SZERZŐ  
**Major Balázs**

TÉMAVEZETŐ  
**Horváth Zoltán**  
*egyetemi docens*  
SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

KONZULENS  
**Miguel A. Porras**  
*profesor*  
Departamento de Energía y Combustibles, Universidad Politécnica de  
Madrid



Fizika Doktori Iskola  
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék  
Természettudományi és Informatikai Kar  
Szegedi Tudományegyetem

Szeged  
2016

# 1. Bevezetés

A Föld minden lakójának lételeme a napfény, hiszen ez a növények és számos egysejtű — valamint rajtuk keresztül a többi életforma — elsődleges energiaforrása, meghatározza bolygónk klímáját, de emellett szintén a fény az, amely a legtöbb információval szolgál az ember számára környezetéről. Feltehetően ennek egyik egyszerű oka, hogy számtalan fizikai, kémiai vagy biológiai folyamat, amely a környezetünkben történik, és mindennapjainkat meghatározza, fénykibocsátással vagy éppen fényelnyeléssel jár. Így az evolúció során is nagy hangsúly került az ilyen folyamatokon alapuló érzékelésre. Így lehet az is, hogy a tudományos kutatások egyik legfontosabb „eszköze” a fény, akár direkt, akár indirekt módon. Ahhoz azonban, hogy ezt a „kísérleti eszközt” megfelelően tudjuk használni, kutatási eredményeinket a tudomány által megkövetelt megalapozottsággal tudjuk interpretálni, kellő mértékben ismernünk kell azt.

Egy ilyen „megfelelően ismert” fényforrás került a kutatók kezébe a lézer 1960-as megjelenésével. Ez a felfedezés a fény jól kontrollálható módon való felhasználhatóságának lehetőségét nyújtja, és ami így azóta számos tudományág kutatásaiban kapott igen jelentős szerepet. A lézer által előállított fény egyedi tulajdonságai közé tartozik például, hogy, megfelelő technológiával és beállításokkal, rendkívül rövid elektromágneses hullámcsomagok hozhatók létre. Ez két szempontból is fontos. Egyrészt, a másodperc törtrészéig tartó (napjaink lézereivel a  $10^{-15}$  s nagyságrendbe eső) felvillanás lehetővé teszi nagyon gyors folyamatok vizsgálatát, olyanokét, amelyeket más módon (például elektronikával) nem tudnánk kellő időfelbontással elemezni. Másrészt, mivel az energia rövid időintervallumra korlátozódik, így a fellépő elektromos télerősség az egyéb módon előállítható terekhez képest nagyságrendekkel nagyobb lehet. Amennyiben a rövidimpulzusú lézernyalábot le is fókuszáljuk, ez a télerősség már vetekszik az elektronok által az atomban érzékelt télerősségekkel, illetve sok esetben meg is haladhatja azt. Ez az, amit ugyan különböző fizikai folyamatokon keresztül, de sok rövidimpulzusú lézerezrendszereket alkalmazó orvosi, anyagtudományi vagy éppen kémiai kísérletben kihasználunk.

A fókuszálás szükségessége és használata azonban egy újabb kérdést felvet. Mi történik az impulzusokkal a fókuszálás során?

Megtartja-e a gondosan kialakított tulajdonságait a lézerrel vagy egyéb (legtöbbször a lézerhez szorosan kapcsolódó) módon előállított ultrarövid impulzus, ha a felhasználáshoz fókuszáljuk azt?

## 2. Tudományos előzmények

Az első kísérleti demonstrálás óta eltelt több mint 60 évben a lézertechnológia rengeteget fejlődött. A számos alkalmazási lehetőség arra sarkallta a kutatókat és mérnököket, hogy minél nagyobb teljesítményű, minél rövidebb elektromágneses impulzusokat előállító lézerrendszereket fejlesszenek ki. Ennek eredményeképp ma már néhány femtoszekundumos ( $10^{-15}$  s) impulzusok hozhatók létre lézer-oscillátorok vagy lézererősítők segítségével. Ez azt jeleneti, hogy legtöbbször a lézerből kilépő hullámcsomagok olyan röviddek, hogy az elektromos (és mágneses) térnek mindössze néhány oszcillációja következhet be ennyi idő alatt. Ezért nevezik ezeket néhány ciklusú impulzusoknak. Ezen impulzusok teszik lehetővé a napjainkban igen nagy érdeklődésre számot tartó nemlineáris optikai folyamatok, vagy az új tudományterület, az „attofizika” kérdésköreinek vizsgálatát. Emellett legtöbbször ilyen ultrarövid impulzusokat előállító lézerek segítségével hozhatók létre a más hullámhossztartományban működő, sokszor szintén rövidimpulzusokat előállító, sugárzási források, elég csak a lézeres terahertz- vagy távoliultraibolya-fényforrásokra gondolni. Természetesen meg kell említeni, hogy számos anyagtudományi, orvosi, biológiai vagy éppen kémiai felhasználása is van a legújabb megoldásoknak, amelyeknek egy kiváló példája a Nobel-díjjal jutalmazott ötlet, a „femtokémia”.

Az, hogy az ultrarövid lézerimpulzusok ilyen sokrétűen használhatóak, többek között annak köszönhető, hogy jellemzőiket az adott feladat igényeinek megfelelően lehet beállítani. Ezen paraméterek közé tartozik például a polarizációs állapot vagy az úgynevezett „vivő-burkoló fázis” (angolul „carrier-envelope phase”, CEP). Ez utóbbi a korábban említett néhány ciklusú impulzusoknál lényeges, hiszen az elektromos tér időbeli lefutását jelentősen befolyásolja azáltal, hogy értéke megadja a vivőhullám és a burkoló relatív fázisát. Ennek jelentősége már több kísérlet során, nem sokkal a néhány ciklusú lézerimpulzusok megjelenése után, megmutatkozott. Az első-

ként említett jellemző, a polarizációs állapot esetén pedig elmondható, hogy bár az impulzusok polarizációja a legtöbbször lineáris, egyre gyakrabban alkalmaznak ettől eltérő, vagy akár időben változó polarizációs állapotú elektromágneses hullámcsomagokat. Mivel szinte minden alkalmazáskor fókuszálják a lézernyalábot, így a kérdés az, hogy ez a lépés befolyásolja-e, és ha igen, hogyan módosítja ezen jellemzőket. Ennek elméleti és kísérleti vizsgálatához először át kell tekinteni, hogy hogyan írhatók le az ultrarövid impulzusok és jellemzőik matematikai módszerekkel, miképpen tehető meg ugyanez a fókuszálás folyamatával, és milyen kísérleti eszközök állnak rendelkezésre ezek elemzésére.

## 2.1. Az ultrarövid lézerimpulzusok jellemzői és matematikai leírása

Az ultrarövid lézerimpulzusok matematikai leírásának egyik legfontosabb lépése a Fourier-transzformáció, amely Fourier tétele értelmében azt teszi lehetővé, hogy a rövid hullámcsomagot végtelen hosszú, monokromatikus, különböző frekvenciájú hullámok szuperpozíciójaként állítsuk elő. A Fourier-transzformáció így kapcsolatot teremt a hullámok időbeli alakja és spektrális reprezentációja között. Ez az eljárás azért széles körben alkalmazott, mert a szinuszhullámok könnyebben kezelhetők, sokkal nagyobb ismeret áll rendelkezésre leírásukhoz, valamint a hullámegyenlet megoldását is számos esetben ez a felbontás teszi lehetővé. Így a vizsgálni kívánt hullámterjedési probléma megoldható úgy, hogy a kezdeti impulzust komponenseire bontjuk, ezen komponensek változásait határozzuk meg, majd belőlük újra előállítjuk az időbeli alakot a vizsgálni kívánt helyen. A megoldandó tudományos probléma így a második lépés, az egyes komponensek változásainak meghatározása, amelyre számos megközelítés létezik attól függően, hogy milyen aspektusból és milyen körülmények között vizsgáljuk a fény terjedését. Ezen megoldások néhány példáját egy későbbi fejezet taglalja. A következőkben három olyan, a néhány ciklusú elektromágneses hullámokat jellemző, paraméter bemutatására kerül sor, amelynek munkámban kiemelt szerepe van.

**A vivő-burkoló fázis** A térerősség időbeli változását leíró kifejezés, azaz az impulzus időbeli alakja, egy gyorsan változó vivőhullám és egy lassabban változó burkoló szorzataként írható fel. A CEP — bár a pontos definíció egy adott témakörben jellemző szokásoktól függ — minden esetben a vivőhullám és impulzusburkoló relatív időbeli helyzetét (amely fázisként is értelmezhető) adja meg. Ebben a munkában a CEP egy olyan definíciója használatos, amely az izolált impulzusok jellemzésére szolgál (nem impulzus-sorozatokéra). Eszerint *egy impulzus vivő-burkoló fázisa a hullámcsomag fázisa abban az időpillanatban, amikor az időbeli burkoló a maximális értékét veszi fel.* Ez a definíció lehetővé teszi a CEP értelmezésének kiterjesztését változó-polarizációs állapotú impulzusokra, valamint a meghatározásból adódóan a CEP zérus volta biztosítja a legnagyobb térerősség elérését adott időbeli burkoló esetén. Olyan kísérleteknél, ahol a céltárggyal való kölcsönhatás nagyobb térfogatban történik, vagy nem pont a fókuszszíkban, fontos kérdés, hogy a fókuszpont környezetében hogyan változik meg a CEP, hiszen a fény-anyag kölcsönhatás eredményét a térerősség pontos időbeli lefutása határozza meg számos esetben.

**Polarizáció** Az elektromágneses hullámok egy másik nagyon fontos jellemzője polarizációjuk. Rövidimpulzusok esetén is a monokromatikus hullámoknál használt eszközök szolgálhatnak alapul ennek leírására. Különös figyelmet igényel azonban az, a vizsgált folyamat — a fókuszálás — miatt, hogy a valóságban csak a síkhullámok lennének tisztán transzverzális elektromágneses hullámok. Szerencsére azonban a legtöbb esetben, a paraxiális közelítés érvényességékor, az esetlegesen megjelenő longitudinális térkomponens elhanyagolható, és a (fókuszált) Gauss-nyalábok is kezelhetők transzverzális hullámként. Ez azért előnyös, mert így használhatók a monokromatikus síkhullámok polarizációját jellemző mennyiségek, hiszen a nyaláb is kezelhető úgy, mint két skaláris, oszcilláló térmennyiség összege. Az egyik, a polarizációs állapotot megadó leírasmód, a polarizációs ellipszissel való leírás. Mivel két egymásra merőleges rezgés összege általános esetben egy ellipszispályát ír le, így ennek az ellipszisnek a jellemzőivel (az orientációval, az ellipticitással és a félnagy tengely hosszával) írható le a polarizációs állapot. Egy másik, a kísérletek-

ben nagyon elterjedt, megoldás a Stokes-paraméterekkel való jellemzés. Ennek előnye, hogy az egyes paraméterek már definíciójukban megadják a mérés módját. Természetesen a két leírásmód között közvetlen kapcsolat áll fent.

Az (ultra)rövid lézerimpulzusoknál a monokromatikus esethez képest változást jelent, hogy azok polarizációs állapota időben változhat. Egyre több olyan kutatás van, ahol ezt a lehetőséget ki is használják, például az úgynevezett koherens kontroll egyik eszközeként. Megmutatható, hogy mind a polarizációs ellipszissel, mind a Stokes-paraméterekkel való leírás kiterjeszthető időben változó polarizációs állapot leírására. Ez esetben azonban oda kell figyelni, hogy a polarizációs ellipszis már kevesebb jelentést hordoz, mint a monokromatikus hullámoknál. A térerősség időbeli változása már nem követi az ellipszissel leírt pályát, az időfüggő ellipszis csak azt adja meg, hogy a mindkét merőleges komponensre érvényes időfüggetlen fázistolás eredményeképp hogyan változna a tér. A Stokes-paraméterek esetében az első paraméter elveszíti jelentőségét a pillanatnyi állapot jellemzésre, hiszen a polarizálatlanság ilyenkor nem értelmezhető. Mindkét leírásmód azonban jól szemlélteti, ha valamilyen okból (például szabad terjedéskor vagy fókuszáláskor) változás történik a polarizációs állapotban, hiszen annak egyértelmű jellemzési módját adják.

**Fázis- és csoportsebesség** A fázissebesség a nemlineáris optikában meghatározza számos folyamat hatásfokát. Megadja, hogy a hullám azonos fázisú pontjai milyen sebességgel haladnak a térben. Síkhullámokra ez esetben is nagyon egyszerű összefüggések adódnak, nyalábok esetén azonban figyelembe kell venni, hogy a fázisfrontok görbültek. Ennek eredménye, hogy a hullámok fázissebessége nem csak terjedési irányban, de arra merőlegesen is változhat, a síkhullám-esettel ellentétben. Egy érdekesség, hogy a fókuszálás során a fázisfrontok a fókuszpont közelében akár a fénysebességnél is gyorsabban haladhatnak a Gouy-féle fázistolás következtében. Ez azonban nem sérti a kauzalitás elvét, mert a fázissal információ nem terjed. A problémát inkább az jelenti, hogy ez a változás a nemlineáris folyamatokhoz jó hatásfokú kihasználásához szükséges fázisillesztést gátolja.

A csoportsebesség egy hullámcsomag, mint egész terjedési sebességét írja le. Erre is igaz, akárcsak a fázissebességre, hogy a nyalábok esetén kiszámítása bonyolultabb, mint síkhullámokra, és a fókuszpont közelében ennek értéke is szuperluminális (fénysebességnél nagyobb) lehet. Ez sem sérti azonban a relativitáselmélet elveit, mivel a csoportsebesség sincs kapcsolatban az információterjedés sebességével, ugyanis az energia ettől eltérő sebességgel terjedhet. A csoportsebesség jelentősége ebben a munkában az, hogy a fázissebességgel együtt befolyásolják, hogy a CEP a terjedés során hogyan változik.

## 2.2. Nyalábterejedési és fókuszálási modellek

A lézerekkel előállított hullámcsomagok nem csak időben, de térben is korlátozott kiterjedésűek. Így, hogy az elektromágneses hullámok nyalábok, és nem végtelen síkhullámok formájában terjednek, leírásuk is komplikáltabb. Az optikai tartományban nagy előnyt jelent, hogy a kicsiny hullámhosszaknak köszönhetően egyszerűsítések tehetők, amelyek például a szabad terjedés egyszerűbb modellezését teszik lehetővé. A fókuszálás azonban egy olyan eset, aminek kellően pontos leírásához ezek az egyszerűsítő feltételezések nem használhatók ki. Az alábbiakban néhány olyan modell rövid leírása következik, amely a korábban említett három főbb lépésből álló impulzusterjedési szimulációk második, a két Fourier-transzformáció közti lépéseként használhatók.

**Sugárkövetés** A fényterjedés modellezésére használt egyik leg-egyszerűbb és legrobosztusabb megoldást a sugárkövetés jelenti, amely a geometriai optika egyik eszköze. Ez esetben a hullámokat a terjedési irányban haladó fénysugarak segítségével írhatjuk le. A hullámterjedési problémát a különböző törő- és visszaverő felületeken való irányváltozások kiszámításával oldhatjuk meg, a fénytörés és fényvisszaverődés egyszerű törvényei alapján. Az eljárás előnye, hogy a kevés paraméternek köszönhetően a fény terjedése igen bonyolult optikai rendszerek esetén is viszonylag kis számításigénnyel kezelhető. Hátránya azonban, hogy a fény hullámtermészete több tekintetben a közelítések miatt elveszik, ezáltal olyan esetekben, ahol a fény diffrakciója vagy interferenciája releváns mértékű, (például a fókuszálásnál) ott nem ad teljesen helytálló eredményeket. Ilyen, a

hullámtermészetből adódó effektusok többségében olyan pontokban lépnek fel, ahol több fénysugár találkozik. Így ameddig a szimulációkban azok távol haladnak egymástól, a sugárkövetés jól használható. Ilyen esetben a sugárkövetés, részben a hullámtermészetet is megtartva, hullámfrontok meghatározására is alkalmas lehet.

**Mátrixoptika** Amennyiben a geometriai optika közelítései mellett még a hengerszimmetriát is feltételezhetjük, akkor a sugárkövetés egy analitikus modelljét, a mátrixoptikát is használhatjuk. A mátrixoptika jól alkalmazható például a paraxiális hullámegyenlet egy megoldásának, a Gauss-nyalábok terjedésének leírására. Bár a diffrakció és interferencia jelenségeinek leírására ez a modell sem alkalmas, a Gauss-nyalábok fókuszálásnak számos aspektusát helyesen jellemzi (megjelenik például a nyalábnyak fókuszáló elem felé történő eltolódása laza fókuszálásakor). Így a monokromatikus Gauss-nyalábok mátrixoptikával való jellemzése az ultrarövid impulzusok leírásánál nagy segítséget jelent, amennyiben a monokromatikus komponensek és a hullámcsomagok közti átmenet (a Fourier-transzformáció) is analitikusan kezelhető.

**A fókuszálás skalárdiffrakciós modellje** Ahogy ez korábban szerepelt, a geometriai optika eszközei nem alkalmasak a hullámtermészet minden velejárójának leírására. Például közismerten a kísérleti tapasztalatoktól eltérő eredményt adnak a geometriai fény és árnyék határán. Ez a tartomány fókuszálás esetén magában foglalja a fókuszálási tartomány legrelevánsabb részeit. Így a fókuszálás helyes leírásához hullámoptikai modellt kell alkalmaznunk. Ennek egyik megoldása lehet a Huygens–Fresnel-elven alapuló skalárdiffrakciós elmélet használata, aminek eszközei Maxwell-egyenletekből közvetlenül is levezethetők. A Kirchhoff-féle diffrakciós integrál, például, már a XIX. század végén kidolgozásra került, és azóta számos esetben bizonyította, hogy a kísérleti megfigyelésekkel nagyon jól egyező eredményt ad. Ez az integrál a Maxwell-egyenletek közvetlen numerikus megoldásánál kisebb számításigényű, de a hullámtermészet következményeit nagy pontossággal leíró formulát jelent. Így a fókuszált hullám fázis- és amplitúdójellemzői ezen leírás segítségével kiválóan modellezhetők.



### 2.3. A vivő-burkoló fázis változásainak mérési módszerei

A vivőhullám és a burkoló relatív fázisának mérése nagyon nehéz feladat az optikai tartományban. A legtöbb megoldás, amelyik a CEP-re vonatkozóan kíván információval szolgálni, nem is képes annak értékét, csak impulzusról impulzusra történő változásának mértékét megadni. A lézerimpulzusok CEP-jét, amit sokszor „abszolút” fázisnak is neveznek, jelenleg közvetlenül csak egyetlen módszerrel lehet megbízhatóan mérni. Ez a „stereo-ATI”, ami a küszöb feletti ionizáció erős térerősség függését használja ki, és két egymással szemben elhelyezett detektor jelének viszonyából következtet a CEP értékére. Ez azonban nagyon költséges kísérleti eszközparkot, valamint bonyolult mérési és kiértékelési eljárást jelent. Így napjainkban is aktív kutatási téma olyan fizikai folyamatokat keresni, és így egy olyan egyszerű kísérleti eszközt építeni, amivel a CEP értéke egyszerűen, bármely laboratóriumban megmérhető.

Azonban nincs ezen bonyolult eljárásra szükség, amennyiben csak a CEP változásait akarjuk mérni. Ez esetben lineáris optikai eszközök, például a spektrális interferometria megfelelő, eszközt jelentenek a CEP változásának detektálására. Bár az eljárás első ilyen céllal történő alkalmazása eredetileg egymást követő impulzusok „CEP-csúszásának” mérésére lett tervezve, az alapelv lehetővé teszi, hogy térbeli változások is mérhetők legyenek, megfelelő kísérleti összeállítással. A spektrális interferometria nevéhez híven hullámok interferenciájának, pontosabban annak spektrális felbontásának segítségével (az interferogram felvételével) ad információt a vizsgálni kívánt széles spektrumú fényforrás (például egy oszcillátorból kilépő lézerimpulzus) spektrális fázisáról. Ennek a fázisnak a mért interferogramból való kinyerésére számos különböző eljárás létezik, különböző előnyökkel és hátrányokkal. Az, hogy a spektrális fázisból a CEP értékének meghatározása hogyan történik, a körülményektől függően eltérő bonyolultságú lehet, ahogy azt a lenti tézispontokhoz kapcsolódó eredmények is mutatják. Fontos azonban itt is kiemelni, hogy a mért fázis relatív fázist jelent a referenciaként szolgáló másik fényforráshoz képest, amivel a vizsgált impulzus interferál. Így a spektrális interferometria nem alkalmas az „abszolút” fázis mérésére.

### 3. Eredmények

A felvázolt tudományos előzmények ismeretében célul tűztem ki fókuszált, rövidimpulzusú Gauss-nyalábok szabad terjedése és fókuszálása során bekövetkező fázis- és polarizációsállapot-változásainak elméleti és kísérleti vizsgálatát. A kutatás egyik kiemelt témája a fókuszált nyalábok fázis- és csoportsebességének elemzése, amely a térbeli fázisviszonyok két fontos jellemzője. Ehhez kapcsolódóan munkám során kiemelt figyelmet fordítottam a fókuszálási tartományon áthaladó impulzus vivő-burkoló fázisának elméleti és kísérleti tanulmányozására, különös tekintettel arra, hogy annak értéke a térbeli terjedés során hogyan változik. A kitűzött célok között szerepelt az is, hogy a fókuszálás, mint elhajlási jelenség, hatásait önmagában, illetve több különböző fókuszálást befolyásoló tényező jelenlétében is megvizsgáljam. Ezen tényezők a Gauss-nyaláb csonkolása, a nyaláb jellemzőinek hullámhosszfüggése, illetve a fókuszáló elem kromatikus valamint monokromatikus leképezési hibái (gömbi hiba, asztigmatizmus, kóma, képmező görbület és torzítás). Végül megvizsgáltam, hogy időben változó polarizációs állapottal rendelkező impulzusok a szabad terjedés során megváltoztatják-e polarizációjukat, és ha igen, milyen módon. Fontos volt tisztázni azt is, hogy ezen módosulásokat milyen törvényszerűségek írják le. A munka főbb eredményei az alábbi pontokban foglalhatók össze.

**I.** Olyan analitikus kifejezéseket vezettem le, amelyek megadják fókuszált Gauss-nyalábok fázis- és csoportsebességét az optikai tengelyen, figyelembe véve a hullámhosszfüggő nyalábparaméterek hatását. A levezetéskor konkrétan meghatároztam, hogy melyek ezen csoportsebességet befolyásoló nyalábjellemzők. Analitikus kifejezéseket adtam arra, hogy ezek hogyan határozhatók meg a bejövő nyaláb valamint a fókuszáló optika paramétereiből. Az előző eredmények alapján pontosan megadtam azon kizárólagos feltételeket, amelyek teljesülése esetén a fókuszált Gauss-nyaláb csoportsebessége nem változik a fókuszálási tartományon való áthaladás során. A kidolgozott képletek azt is megmutatták, hogy egy, a kromatikus aberrációhoz hasonló effektus felléphet fókuszáláskor abban az esetben is, amikor a fókuszáló elem ilyen típusú képalkotási hibával nem

rendelkezik. Ez esetben a jelenség okául a nyaláb hullámhosszfüggő paramétereit szolgálják.

Olyan összefüggéseket dolgoztam ki, amelyekkel kiszámítható a fókuszált Gauss-nyaláb fázis- és csoportsebessége az optikai tengelyen abban az esetben is, amikor a fókuszálás az optikai elem kromatikus- vagy elsődleges monokromatikus hibái által terhelt. Ezen kifejezések kidolgozása során külön figyelmet szenteltem annak, hogy, a lehetőségekhez mérten, a számítások minél nagyobb részét analitikusan végezzem el, ezáltal növelve azok alkalmazhatósági körét és pontosságát a numerikus számítások során. Emellett, az így kapott eredményeimet arra használtam, hogy megvizsgáljam, hogy a nyaláb csonkolása, a kromatikus hiba vagy az elsődleges monokromatikus leképezési hibák hogyan befolyásolják egy fókuszált, rövidimpulzusú Gauss-nyaláb fázis- és csoportsebességét az optikai tengelyen. Eredményeimet összevettem más kutatók elsődleges aberációk fázismódosító hatásaira vonatkozó konklúzióival, és azokkal nagyon jó egyezésben lévő eredményeket kaptam [T1].

**II.** Kifejlesztettem egy sugárkövetésen és a fókuszálás skalárdiffrakciós modelljén alapuló numerikus számítást, ami alkalmas az elektromos tér lencsék vagy lencserendszerek fókuszpontjának környezetében történő meghatározására. Ezt a modellt arra használtam, hogy numerikus szimulációk segítségével igazoljam azt, hogy transzmissziós optikai elemek segítségével is lehetséges néhány ciklusú optikai impulzusokat úgy lefókuszálni, hogy az ne járjon a fókuszált impulzus releváns torzulásával. Megmutattam, hogy ennek eléréséhez elegendő a fókuszáló elemet az optikai tengelyen jellemző diszperziós effektusok kompenzálása. A szimulációk segítségével igazoltam egy, a fókuszált, rövidimpulzusú Gauss-nyalábok vívóburkoló fázis változását az optikai tengelyen leíró analitikus kifejezés helyességét is. Az előző két eredmény segítségével megmutattam azt, hogy lencsékkel történő fókuszálás esetén elérhető az, hogy néhány ciklusú optikai impulzusok a fókuszálási tartományban az optikai tengelyen mentén úgy haladjanak, hogy a hullámterjedés során az elektromos tér időbeli lefutása ne változzon [T2–T4].

**III.** Megterveztem és megépítettem egy kísérleti elrendezést, amely alkalmas rövidimpulzusú optikai nyalábok fázisának térbeli változásainak mérésére nagy térbeli feloldással. Ezt az elrendezést arra használtam, hogy kísérleti úton megvizsgáljam egy néhány ciklusú impulzus vivő-burkoló fázisának változásait egy akromatikus lencse fókuszpontjának környezetében. Elvégeztem a fókuszálás előtti lézernyaláb paramétereinek hullámhossz-felbontott mérését. A mérési eredményeket felhasználva, a kísérleti vizsgálatokkal megegyező körülményekre, szimulációkat végeztem a tanulmányozott vivő-burkoló fázis változásokra vonatkozóan. Az összehasonlítás eredménye igazolta az elemezni kívánt elmélet legfontosabb aspektusait, azaz, hogy a fókuszált nyaláb paramétereinek hullámhosszfüggése befolyásolja az impulzus vivő-burkoló fázisának térbeli változást a fókuszálási tartományban, és azt, hogy ez a térbeli változás a Gouy-fázistól eltérhet [T5].

**IV.** Numerikus szimulációk segítségével igazoltam egy olyan analitikus nyalábterjedési elméletet, amely leírja a rövidimpulzusok pillanatnyi polarizációs állapotának változását szabad terjedés vagy fókuszálás során. Megfelelő példák segítségével szintén alátámasztottam azt a törvényszerűséget, hogy a pillanatnyi polarizációt jellemző polarizációs ellipszis egyik paraméterének (orientáció vagy ellipticitás) időbeli változása a terjedés során a másik jellemző megváltozását eredményezi. A numerikus szimulációim rámutattak arra, hogy ezek a hullámterjedés okozta polarizációsállapot-változások a nyalábok szabad térben történő „diffrakciójának” következményei, így a módosulások minden rövidimpulzusú nyalábra jellemzőek. Szimulációim segítségével megmutattam, hogy a pillanatnyi polarizációs állapotban bekövetkező ezen változások jelei kísérleti módon, térben és időben integráló detektorok segítségével, is megfigyelhetők [T6, T7].

# Publikációk

## A tézispontokhoz kapcsolódó referált folyóiratcikkek és konferenciakiadványban megjelent publikációk

- [T1] **B. Major**, Z. L. Horváth, and M. A. Porras. “Phase and group velocity of focused, pulsed Gaussian beams in the presence and absence of primary aberrations”. *J. Opt.* 17.6 (2015), 065612. DOI: [10.1088/2040-8978/17/6/065612](https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/6/065612).
- [T2] M. A. Porras, **B. Major**, and Z. L. Horvath. “Focusing to transform-limited, phase-controlled, few-cycle pulses with lenses”. *AIP Conf. Proc.* 1462 (2012), 49–52. DOI: [10.1063/1.4736758](https://doi.org/10.1063/1.4736758).
- [T3] M. A. Porras, Z. L. Horvath, and **B. Major**. “On the use of lenses to focus few-cycle pulses with controlled carrier–envelope phase”. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* 108.3 (2012), 521–531. DOI: [10.1007/s00340-012-5073-y](https://doi.org/10.1007/s00340-012-5073-y).
- [T4] M. A. Porras, **B. Major**, and Z. L. Horvath. “Carrier-envelope phase shift of few-cycle pulses along the focus of lenses and mirrors beyond the nonreshaping pulse approximation: the effect of pulse chirp”. *J. Opt. Soc. Am. B* 29.12 (2012), 3271–3276. DOI: [10.1364/JOSAB.29.003271](https://doi.org/10.1364/JOSAB.29.003271).
- [T5] **B. Major**, D. Nemes, M. A. Porras, Z. L. Horváth, and A. P. Kovács. “Carrier-envelope phase changes in the focal region: propagation effects measured by spectral interferometry”. *Appl. Opt.* 54.36 (2015), 10717–10724. DOI: [10.1364/AO.54.010717](https://doi.org/10.1364/AO.54.010717).
- [T6] **B. Major**, M. A. Porras, and Z. L. Horváth. “Rotation of the polarization direction and reversal of helicity of ultrashort pulsed beams propagating in free space”. *J. Opt. Soc. Am. A* 31.6 (2014), 1200–1205. DOI: [10.1364/JOSAA.31.001200](https://doi.org/10.1364/JOSAA.31.001200).
- [T7] **B. Major**, M. A. Porras, A. P. Kovács, and Z. L. Horváth. “The Influence of Generalized Focusing on Polarization-Shaped Few-Cycle Pulsed Beams”. *Ultrafast Phenomena XIX*. Vol. 162. Springer Proceedings in Physics. 2015, 813–816. DOI: [10.1007/978-3-319-13242-6\\_199](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13242-6_199).

## További referált folyóiratcikkek

- [1] V. Tosa, K. Kovács, **B. Major**, E. Balogh, and K. Varjú. “Propagation effects in highly ionised gas media”. *Quantum Electron.* 46.4 (2016), 321–326. DOI: [10.1070/QEL16039](https://doi.org/10.1070/QEL16039).

- [2] B. Schütte, P. Weber, K. Kovács, E. Balogh, **B. Major**, V. Tosa, S. Han, M. J. J. Vrakking, K. Varjú, and A. Rouzée. “Bright attosecond soft X-ray pulse trains by transient phase-matching in two-color high-order harmonic generation”. *Opt. Express* 23.26 (2015), 33947–33955. DOI: [10.1364/OE.23.033947](https://doi.org/10.1364/OE.23.033947).
- [3] K. Kovacs, V. Tosa, **B. Major**, E. Balogh, and K. Varju. “High-Efficiency Single Attosecond Pulse Generation With a Long-Wavelength Pulse Assisted by a Weak Near-Infrared Pulse”. *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.* 21.5 (2015), 1–7. DOI: [10.1109/JSTQE.2015.2411580](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2015.2411580).
- [4] T. Ajtai, N. Utry, M. Pintér, **B. Major**, Z. Bozóki, and G. Szabó. “A method for segregating the optical absorption properties and the mass concentration of winter time urban aerosol”. *Atmos. Environ.* 122 (2015), 313–320. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2015.09.072](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.072).
- [5] Z. L. Horváth, **B. Major**, A. P. Kovács, and Z. Bor. “Pulse front distortions caused by primary aberrations”. *J. Opt. Soc. Am. B* 30.7 (2013), 1853–1863. DOI: [10.1364/JOSAB.30.001853](https://doi.org/10.1364/JOSAB.30.001853).