

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Fizika Doktori Iskola

„Lézer- és plazmafizika, lézerek alkalmazásai” program

Ultrarövid fényimpulzusok szóródása hullámhossznál kisebb nanoréseken

A PhD értekezés tézisei

Mechler Mátyás Illés

Témavezető:

dr. Kuhlevszkij Szergej

a fizikai tudományok kandidátusa



PÉCS, 2008.

1. Tudományos előzmények

A kis apertúrákon való fényáthaladás a diffrakció-elmélet klasszikus problémája, egyike a fizikai optika legfontosabb eredményeinek. Rayleigh kimutatta, hogy két objektum még felbontható, ha az egyik minta főmaximuma egybeesik a másik minta (első) minimumával. 1928-ban Synge bevezette a közeltéri mikroszkópia elvét. Eszerint kellően kicsiny (szubnanométeres szélességű) rést használva javítani lehet az optikai mikroszkópia Rayleigh-féle felbontási határán. 1944-ben Bethe, 1948-ban pedig Levine és Schwinger a tökéletes vezető fémbe kiképzett hullámhossznál kisebb (HHK) apertúrákon való fényáthaladás problémáját vizsgálták. Synge ötletét Lewis és társai, valamint Pohl és társai valósították meg 1984-ben.

A fényhullámok nanostrukturált optikai elemeken való szóródása az utóbbi évtized kedvelt kutatási területe lett. Az ilyen, hullámhossznál kisebb fém objektumokon való szóródás talán legérdekesebb tulajdonsága a rezonáns erősítés, melyet elsőként Ebbesen és társai mutattak ki HHK apertúrák periodikus rácsában, és amelynek eredete mindmáig vitatott kérdés: egyes elméletek a felületi plazmonoknak, mások az apertúrában belüli hullámvezető-módusoknak tulajdonítják.

Ugyancsak nagy fontossággal bírnak az ultrarövid (terahertzes, femtoszekundumos) impulzusok nanostrukturán való áthaladását vizsgáló kísérletek és az ezen folyamatot modellező elméletek. A kondenzált anyagokban és molekulákban lezajló számos fizikai folyamat a piko- illetve femtoszekundumos időskálán zajlik; ilyen többek között a molekulák vibrációs mozgása, a félvezetők sávszerkezetében a töltéshordozók átrendeződése, vagy az elektronok mozgása fémekben. A legtöbb, femtoszekundumos felbontású kísérletben az információ térben átlagolt. Ez az átlagolás különösen zavaró, ha a folyamatot nanostrukturált anyagban vizsgáljuk. Ezért a femtoszekundumos időbeli és nanométeres térbeli felbontású technikák fejlesztése különösen fontos.

2. Célkitűzés

A folytonos fény hullámhossznál kisebb nanorésen való áthaladására irányuló eddigi kutatások elsősorban az apertúra mögötti térrel illetve az apertúra transzmissziós koefficiensének a folytonos fényre gyakorolt hatásával foglalkoztak. Azonban az apertúra előtti és az apertúrabeli terekkel csak igen kis

számú tanulmány foglalkozott. Továbbá ennek a problémának a leírására kevés ismert analitikus formula létezik. A Takakura által kidolgozott, egyetlen résen való áthaladást leíró, a szakirodalomban általánosan elfogadott analitikus formula az irodalomban kimutatott transzmisszió-erősítés helyett gyengítést jelez előre.

Érdekes, elsősorban kísérletileg tárgyalt probléma továbbá az ultrarövid impulzusok apertúrán való áthaladása. Mindmáig nem tisztázott kérdés, hogy mennyiben módosul az impulzus térbeli és spektrális alakja valamint annak hossza a nanoapertúrákon való áthaladás során, továbbá az, hogy az impulzusnak és a résnek mely paraméterei befolyásolják és milyen mértékben a transzmittált impulzus alakját.

A dolgozat céljai a következők:

1. A folytonos fény hullámhossznál kisebb nanorésen való áthaladása során a rés előtt és a résben kialakuló elektromágneses terek vizsgálata, az azokat leíró formulák keresése. Reflexiós koeficiens meghatározása és vizsgálata.
2. Analitikus formulák keresése a rés előtti és mögötti EM terekre illetve a transzmissziós koeficiensre, valamint a korábbi analitikus és numerikus modellek eredményeivel való összevetés.
3. Femtoszekundumos impulzusok HHK nanorésen való áthaladását leíró modell kidolgozása. Az impulzusok erősített transzmissziójának illetve térbeli lokalizációjának, valamint az időbeli profil miatt a rés körüli térben fellépő módosulásoknak a vizsgálata.

3. Alkalmazott módszerek

A dolgozatban a Maxwell-egyenletek Neerhoff és Mur-féle megoldásán alapuló, Betzig és társai által kidolgozott numerikus eljárást alapul véve határoztunk meg formulákat a rés környezetében jelenlévő elektromágneses térre. Az eredeti formalizmus b vastagságú tökéletes vezető ernyőbe vágott $2a$ szélességű, y tengellyel párhuzamos résen áthaladó TM-polarizált folytonos fény diffrakcióját írja le. A megoldás során a kétdimenziós Green-tételt használták, a rés körüli három térrészben (előtte, benne és mögötte) más-más Green-

függvény felhasználásával. Ily módon négy integrálegyenlet kapható, amelyek numerikusan oldhatók meg.

A dolgozat ötödik fejezete a Betzig és társai írásából következő, de abból hiányzó első és második térrészbeli elektromágneses formulákat írja le. Ezekből lokális definíció adható a reflexiós koefficiensre.

A hatodik fejezetben a réstől kellően távol ($z \gg 2a$ távolság esetén) érvényes numerikus formulákat határoztunk meg. A numerikus eljárás során ugyanis a rést N részre osztották fel, amelyre az $N > 2a/z$ összefüggésnek kell fennállnia; ebből $z > 2a/N$ következik. Ha tehát a rést „egy részre osztjuk”, a fenti összefüggéshez jutunk; ekkor egyszerű analitikus formulák határozhatók meg az első és harmadik térrészben. Ezek a formulák helyes értéket adnak a transzmissziós rezonanciák helyére és azok nagyságára.

Végül a hetedik fejezetben a folytonos fény esetén igaz formulák segítségével kifejezzük az ultrarövid impulzusok áthaladása esetén az elektromágneses tér komponenseit. Ezt a gyors Fourier-transzformáció segítségével tettük meg.

A számításokat a *Maple* matematikai programcsomag különböző verzióinak, a *Mathcad 2000 Professional* matematikai programcsomagnak illetve Fortran és Pascal (Delphi) nyelven írt programoknak a segítségével végeztük el; az első két programcsomag esetében beépített algoritmusok segítségével dolgoztunk, amelyek nem mindig optimálisak az adott probléma feldolgozásánál. Az utóbbi programnyelvek használatával a problémára optimalizált algoritmusok segítségével jelentősen gyorsabb programokhoz jutottunk.

4. Új tudományos eredmények

Az alábbiakban a dolgozatban ismertetett új tudományos eredményeket összegzem.

1. Meghatároztam a nanométeres méretű réssre érkező folytonos fénynek (az impulzus mint hullámcsomag egy Fourier-komponensének) a vizsgált, hullámhossznál kisebb vastagságú ernyőbe vágott és hullámhossznál kisebb szélességű rés előtti és ezen résbeli elektromos és mágneses teret, valamint a reflexiós koefficienst. Kimutattam, hogy a fő reflexiós rezonanciák $\lambda/2$ periodicitással, a transzmissziós rezonanciákhoz képest kisebb résvastagságoknál jelennek meg; a transzmissziós rezonanciáknál a reflexiós görbének minimuma van. Kimutattam továbbá, hogy

a résbeli energiafluxus többszöröse a rés előtti illetve mögötti energiának. Numerikus számolásokkal támasztottam alá, hogy az erősített transzmissziót illetve a rés előtti tér erősödését elsődlegesen a résben kialakuló Fabry–Pérot-szerű elektromágneses tér rezonáns gerjesztése eredményezi.[S5,S6]

2. Analitikus formulákat határoztam meg a rés előtti és mögötti térre. Az ezekkel a formulákkal kapott eredményeket a pontos numerikus formulákkal kapott eredményekkel illetve az első térrészben a teret csupán a beeső és visszavert hullámok interferenciájaként leíró félanalitikus modell segítségével kapott eredményekkel összevetve kimutattam, hogy a transzmissziós rezonanciák helyére mind a három modell pontos értéket ad; azonban míg az előbbi számításokkal a transzmisszió erősödése mutatható ki, addig a félanalitikus modell az irodalomban (mind elméletileg, mind kísérletileg) kimutatott transzmisszió-erősítés helyett annak jelentős csökkenését indikálja.[S4]
3. A folytonos hullámokat leíró numerikus modellt továbbfejlesztettem femtoszekundumos impulzusokra.[S1,S2,S3] Megmutattam, hogy az impulzus a közeli zónában ($|z| \approx 0.1a$) a rés közelsége miatt deformációt szenved (a rés élének a hatása – csúcshatás), míg a távoli zónában ($|z| \approx 10a$) az impulzus patkó alakú téreloszlást mutat; a legkisebb deformációjú impulzusalak $|z| \approx a$ távolságon figyelhető meg.[S3]
4. Numerikus számítások segítségével igazoltam, hogy lehetséges nanométeres térbeli és femtoszekundumos időbeli optikai felbontás előállítása ultrarövid fényimpulzusok nanorésen való diffrakciójával.[S1,S2,S6] Kimutattam, hogy az időbeli kiszélesedés nélküli áthaladásnak határt szab a rés transzmissziós karakterisztikája. A $T(a, b, \lambda)$ transzmissziós koeficiens különböző paraméterek melletti vizsgálatával megmutattam, hogy a transzmittált impulzus alakját és erősítését az impulzushossz és a transzmissziós görbe viszonya határozza meg.[S2] Rövid impulzusok esetén a központi frekvenciától távol eső, az impulzust alkotó frekvencia-komponensek vizsgálata nyomán megállapítottam, hogy azok a központi frekvenciától eltérő mértékben erősödnek, ami impulzuskiszélesedést és az erősítés mértékének csökkenését eredményezi.[S2,S6]
5. Megállapítottam, hogy míg a folytonos hullámok esetén a rés szimmetriája miatt a közeli tér a rés előtt és mögött nagy mértékben hasonlít

[S5], addig a beeső, visszavert és diffraktált terek által előállított, rés előtti elektromágneses tér impulzusok esetén erősen eltérhet; ennek az eltérésnek az eredményeképpen jól elkülöníthető zérusszint alakulhat ki az első térrészben. Igazoltam, hogy impulzusok esetében – a folytonos hullámokhoz hasonlóan – a résbeli tér energiafluxusa többszöröse mind a rés előtti, mind az amögötti tér energiafluxusának. Az arány értékét az impulzushossz és a rés geometriájából származó transzmissziós karakterisztika határozza meg. Az időbeli és z tengely menti téreloszlások vizsgálata során három eltérő tulajdonságú (stacionárius, kvázistacionárius és nem stacionárius), különböző hosszúságú impulzusokkal jellemezhető erősítési tartományt találtam ultrarövid impulzusok esetén.[S6]

5. Saját publikációk

A disszertációhoz kapcsolódó saját publikációk

- [S1] S.V. KUKHLEVSKY, M. MECHLER, L. CSAPO, K. JANSSENS. *Near-field diffraction of fs and sub-fs pulses: super-resolution of NSOM in space and time.* Phys. Lett. A, **319**:439-447, December 2003.
- [S2] S.V. KUKHLEVSKY, M. MECHLER, L. CSAPO, K. JANSSENS, O. SAMEK. *Enhanced transmission versus localization of a light pulse by a subwavelength metal slit.* Phys. Rev. B, **70**:195428, November 2004.
- [S3] S.V. KUKHLEVSKY, M. MECHLER. *Detailed structure of femtosecond and sub-femtosecond pulses diffracted by a nanometre-sized aperture.* J. Opt. A: Pure Appl. Opt., **5**:256-262, May 2003.
- [S4] S.V. KUKHLEVSKY, M. MECHLER, O. SAMEK, K. JANSSENS. *Analytical model of the enhanced light transmission through subwavelength metal slits: Green's function formalism versus Rayleigh's expansion.* Appl. Phys. B, **84**:19-24, July 2006.
- [S5] S.V. KUKHLEVSKY, M. MECHLER, L. CSAPÓ, K. JANSSENS, O. SAMEK. *Resonant backward scattering of light by a subwavelength metallic slit with two open sides.* Phys. Rev. B, **72**:165421, October 2005.
- [S6] M. MECHLER, O. SAMEK, S.V. KUKHLEVSKY. *Enhanced transmission and reflection of few-cycle pulses by a single slit.* Phys. Rev. Lett., **98**:163901, April 2007.

Konferenciák, előadások

- [K1] M. MECHLER, S.V. KUKHLEVSKY. *Anomalous backward scattering of light by a two-side-open subwavelength metallic slit*. In: Device and Process Technologies for Microelectronics, MEMS, and Photonics IV, Proceedings of SPIE. Eds.: J.-C. Chiao, A.S. Dzurak, C. Jagadish, D.V. Thiel 6037, 2005.
- [K2] S.V. KUKHLEVSKY, M. MECHLER, L. CSAPO, K. JANSSENS, O. SAMEK. *Non-diffractive subwavelength beam nano-optics*. In: The International symposium on optical science and technology. Plasmonics: metallic nanostructures and their optical properties. 2. SPIE 5512-21. / N.J. Halas, T.R. Huser. - Denver, Col. : SPIE, 2004. - 37.
- [K3] M. MECHLER, L. CSAPÓ, S.V. KUKHLEVSKY. *Enhanced transmission and localization of light at a nanometer-size metallic slit on the femtosecond time scale*. Conference of ESF Femtochemistry & Femtobiology (Ultra) Program, (2004)

Egyéb publikációk

1. S.V. KUKHLEVSKY, M. MECHLER. *Diffraction-free subwavelength-beam optics at nanometer scale* Opt. Commun., **231**:35-43, February 2004.
2. O. GÜHNE, M. MECHLER, G. TÓTH, P. ÁDÁM. *Entanglement criteria based on local uncertainty relations are strictly stronger than the computable cross norm criterion*. Phys. Rev. A (Rapid Communication), **74**:010301(R), July 2006.