

**SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK**

SPECIÁLIS EXCIMER LÉZEREK

/PhD-tézisek/

Szerző:

Bohus János

Témavezető:

Dr. Szatmári Sándor

a fizika tudomány doktora (az MTA doktora)

Szeged

2007.

I. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

Egy nemzetközi pályázat keretében azt a feladatot kaptam, hogy a félvezetőgyártásban alkalmazott mikrolitográfiára vonatkozó követelményt kielégítő lézerberendezést állítsak össze. Ebben az időszakban az iparban mikrolitográfiai célokra túlnyomó többségben a 248nm-es hullámhosszon működő keskenysávú KrF lézereket használtak. Ezeknek a lézereknek közös jellemzője, hogy egyetlen hangolt oszcillátorra épülnek. Bizonyos fizikai és technikai okok miatt - amelyeket részletesen ismertetek a PhD disszertációban – célszerű egy olyan az eddigiektől eltérő felépítésű lézerrendszert létrehozni, amelyben a megfelelő minőségű optikai jelet egy erre a célra optimalizált kis teljesítményű oszcillátor szolgáltatja, amelynek jelét egy nagy teljesítményű erősítő tovább erősíti. A fentiek figyelembe vételével,

célul tűztem ki mikrolitográfiai célokra optimalizált „mester-oszcillátor teljesítmény-erősítő” típusú lézerberendezés összeállítását.

A Kínai Atomenergetikai Intézet munkatársaival együttműködve, egy nagyintenzitású ($\sim 10^{17}$ W/cm²), hosszú (~ 60 ns) impulzusú KrF excimer lézerrendszer kifejlesztésében vettem részt. A lézerrendszer végerősítője egy elektronnyalábbal pumpált, nagy apertúrájú KrF lézer, amely - három vagy hat nyalábos multiplexeléses technikával - egy kisebb KrF lézerből nyert impulzusokat erősíti. A kutatások során problémát jelentett a multiplexelt magimpulzusok előerősítése vagy megfelelő energiájú, egymástól független magimpulzusok előállítása, egymáshoz képest kis időbeli bizonytalansággal. Ezért

célul tűztem ki egy olyan KrF excimer lézerrendszer létrehozását, amely alkalmas három, egymástól független lézerimpulzus generálására vagy erősítésére.

A szubpikuszekundumos, nagy intenzitású ultraibolya impulzusok egy lehetséges előállítási módja, a szilárdtest- vagy festéklézerben keltett rövid, frekvenciakonvertált magimpulzus KrF excimer lézerrel történő erősítése. Ismeretes, hogy az erősítőtől kinyerhető energia arányos az aktív közeg térfogatával, illetve hogy az erősítésben ténylegesen részt vevő gázkisüléssel gerjesztett excimer gázmolekulák mennyisége függ a kisülés homogenitásától, minőségétől. Kísérleteink azt mutatták, hogy az előionizáció erőssége és a gázkisülést tápláló

elektromos impulzus felfutási meredeksége számottevően befolyásolja a kisülés homogenitását és időbeli bizonytalanságát. Mivel számos kutatólaboratóriumban szükség van rövid impulzusok erősítésére alkalmas KrF lézerekre, ezért

célul tűztem ki rövid (szubpikoszekundumos) impulzusok erősítésére optimalizált, homogén gázkisüléssel gerjesztett KrF excimer erősítők kifejlesztését.

A fenti célkitűzések többségét sikerült megvalósítani. Az elért eredmények hozzájárulnak hazai és külföldi laboratóriumokban végzett fény-anyag kölcsönhatással kapcsolatos kutatómunkák színvonalának emeléséhez.

II. ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

Az általam használt FL2002E típusú keskenysávú festéklézer sávszélessége - a gyári leírás szerint - 1pm, 497nm-es hullámhosszon. A lézer beállítását a sávszélesség mérésével ellenőriztem, egy IT51-30 típusú Fabry-Perot interferométer segítségével. Ennek az interferométernek a bázistávolsága különböző méretű távtartókkal állítható be és a tükrök párhuzamossága csavarokkal feszíthető laprugókkal biztosítható. A tükrök párhuzamosságának ellenőrzése következőképpen történt: Egy He-Ne lézer nyalábjának nyílásszögét egy szórólencsével kis mértékben megnövelve az így kapott ~5mm átmérőjű nyalábbal az interferométer ~30mm átmérőjű tükrének egy kis felületét kivilágítottam. A nyert interferogramot egy CCD kamera segítségével rögzítettem. A tükrök akkor párhuzamosak, ha a He-Ne lézerrel végigpásztázva az interferométer felületét a megfigyelhető interferenciagyűrűk átmérője nem változik. Ezt felhasználva állítottam párhuzamosra a tükröket.

A keskenysávú ultraibolya lézerimpulzusok sávszélességének méréséhez nem állt rendelkezésemre elegendő spektrális felbontású spektrográf. Ezért a spektrum direkt mérése helyett a lézerimpulzus koherenciahosszát mértem meg, egy általam készített Michelson-interferométerrel. Az interferométerben nyalábosztóként ék alakú kvarclapot használtam. Ezzel a megoldással elkerülhető, a kvarclap első- és hátsó felületéről visszavert nyalábok által okozott interferencia. Minden optikai mérés során lézeroptikai minőségű tükröket, lencsákat, prizmákat használtam.

A keskenysávú KrF lézer – igen kicsiny - nyalábdivergenciájának mérése során arra a következtetésre jutottam, hogy a hagyományos lencsék leképezési hibái meghamisítják a mérést, mivel különböző fókusz távolságú lencsékkel különböző eredményeket kaptam. Ezért, lencse helyett parabolatükörrel fókuszáltam le a nyalábot.

A gyorsan változó nagy feszültségek mérését egy igen precíz, nagy sávszélességű (100MHz), feszültségosztóból és oszcilloszkópból álló mérőrendszerrel végeztem.

A lézerimpulzusok hosszát és késleltetését Thorlabs 410 típusú gyors, 1ns felfutási sebességű fotódiodával és 350 MHz sávszélességű oszcilloszkóppal mértem meg.

Az oszcillogramokat, interferogramokat egy számítógépből és egy képdigitalizálóból álló mérőrendszer segítségével vettem fel.

III. AZ ELÉRT EREDMÉNYEK

1. *Kifejlesztettem egy olyan új festék-excimer hibrid lézerrendszert, amely a lézerrendszer egyes lézereinek előnyös tulajdonságait integrálva, alkalmas kis sávszélességű (~0,2 pm), 248nm-es hullámhosszú, ~300 mJ energiájú lézerimpulzusok előállítására [1].*

Az általam előállított lézerben egy excimer lézerrel pumpált, a látható tartományban működő festéklézer szolgáltatja a magimpulzust, amelyet frekvenciakétszerezés után egy másik excimer lézer erősít. Az ilyen elrendezésnek – az iparban használatos keskenysávú excimer lézerekkel szemben - az az előnye, hogy a látható spektrumtartományban működő oszcillátort különböző fizikai és technikai okok miatt könnyebb előállítani. Továbbá előny az is, hogy az így előállított festéklézer hossza – azonos impulzushossz mellett – kisebb lehet mint egy excimer lézeré, ami kisebb sávszélességet is eredményez. Az általam végzett kísérletek időszakában az iparban használatos legkorszerűbb KrF lézerek sávszélessége ~0,4pm – 0,5pm [5,6]. Ez mintegy kétszerese az általam készített lézer sávszélességének.

2. *Két olyan áramköri kapcsolást terveztem, illetve állítottam össze, amelyek a soros mágneskapcsolót tartalmaz áramkörrel gerjesztett excimer lézerekben alkalmasak a mágneskapcsoló szivárgó áramának kompenzálására. Ezek az áramkörök javítják a kisülés homogenitását és gyakorlati előnyük, hogy bármikor beépíthetők a hagyományos gerjesztő kört használó excimer lézerekbe [2].*

Ha növeljük az erősítő excimer közegben tárolt energiát, akkor a rövid impulzusok erősítése hatékonyabb [7,8]. A gázkisülést gyors felfutású feszültségimpulzussal táplálva növelhető a gázkisülés homogenitása, az aktív közeg térfogata és így az abban tárolt energia [9,10]. A mágneses telítődés elvén működő mágneskapcsoló hátrányos tulajdonsága az, hogy nyitott állapotban impedanciája véges, ezért már ebben az állapotában is szivárgó áram folyik benne [11]. Ez az áram az excimer lézerben a gázkisülését tápláló katódra jutva, ott feszültségnövekedést „elővállat” okoz, még mielőtt a mágneskapcsoló zárt állapotba kerülne és az excimert gerjesztő gázkisülés beindulna. Ez az előváll a gondos előionizáció ellenére is ionsatornákat hoz létre az aktív közegben, lerontva ezzel a gázkisülés homogenitását illetve minőséget, különösen krypton-fluorid (KrF) esetén. [9,10] Az általam ajánlott egyik áramkörü megoldás az elővállal ellenkező polaritású áramot juttat a katódra s így kompenzálja azt. A másik áramkörü kapcsolás az anód feszültségét ugyanolyan ütemben változtatja, mint a katód feszültségét a szivárgó áram, majd ellenkezőjére váltja az anód polaritását – ezt differenciális pumpálásnak nevezzük. Ezzel a módszerrel nemcsak az előváll hatása küszöbölhető ki, de megnövelhető az elektródák közötti csúcsfeszültség is. A laboratóriumban készült, a differenciális pumpálás elvén működő lézer működik a Chicagói Tudományegyetem Fizika Tanszékének laboratóriumában.

- 3. *Kidolgoztam egy olyan új – elő-előionizációval támogatott - előionizáló módszert, amely az előionizáció hatékonyságának lényeges javításán keresztül megnöveli az excimer lézerekben létrejövő gázkisülés homogenitását és a pillanatnyilag tárolt energiát. Ennek az előionizációs módszernek a segítségével hagyományos – automatikus előionizációt használó - excimer erősítők alakíthatók át úgy, hogy szubpikuszekundumos impulzusok erősítésére lényegesen alkalmasabbak legyenek [3].***

Erősebb előionizáció segítségével növelhető a gázkisülés homogenitása, az aktív közeg térfogata és így az abban tárolt energia. [10]. Az általunk használt KrF excimer lézerekben az előionizációt a kisülési térbe integrált szikraközök biztosítják. Az erősebb előionizáció érdekében az előionizáló szikraközöket az eredeti 0,8mm-ről 3mm-re növeltem. A kísérleteim azonban azt az eredményt adták, hogy a megnövelt szikraközökkel járó előnyök mellett megnő az előionizáció időbeli bizonytalansága, ami megnöveli a gerjesztő kisülés időbeli bizonytalanságát is. Ez hátrányos lehet például akkor, ha az erősítőt egy oszcillátorral kell összehangolni. Ezt elkerülhetjük, ha az előionizáló szikraközöket is előionizáljuk (ezt

nevezük „elő-előionizációnak”), ami lecsökkenti az erősítőben a kisülés időbeli bizonytalanságát. Itt megjegyezzük, hogy az elő-előionizációs szikraközök is a kisülési térben vannak. Ezek elektromos táplálását két különböző áramkörrel oldottam meg. A 3. és 4. tézispontban röviden ismertetett újításokat Szatmári-típusú szubpikoszekundumos, off-axis, hibrid festék-excimer vagy szilárdtest-excimer lézerekbe építve alkalmazzuk. Ugyanezek a lézerek nyernek alkalmazást a Chicagói Tudományegyetem Fizika Tanszékének laboratóriumában és a Göttingeni Lézer Laboratóriumában (Németország).

4. Kifejlesztettem egy új, több különálló gázkisülési térrel rendelkező excimer lézer gerjesztésére alkalmas áramkört. Ennek az a különlegessége, hogy csak egy tirátront és csak egy speciális mágneses telítődés elvén működő „elosztott” kapcsolót tartalmaz, így a különálló gázkisülések egymáshoz viszonyítva, kis időbeli bizonytalansággal és nagy késleltetéssel gerjeszthetők. Az ily módon készült áramköri kapcsolás felhasználásával előállítottam egy három különálló kisülési térrel rendelkező KrF lézert, amely alkalmas három egymást 20-20 ns-al követő impulzus erősítésére, illetve oszcillátor üzemmódban történő előállítására, impulzusonként több mint 600 mJ energiával. Az impulzusok egymáshoz mért időbeli bizonytalansága 1 ns nagyságrendű [4].

a) Három különálló kisülési térrel rendelkező lézer építése során azt tapasztaltam, hogy a hagyományos, mágneskapcsolóval vezérelt gerjesztő kör nem alkalmas az elektromos energia egyenlő elosztására a kisülések között, ha azok között nagy - a gerjesztő impulzus felfutási idejének ~10%-nál nagyobb - késleltetéseket kívánunk beállítani. Tapasztalatom szerint, ha ebben az áramkörben a kívánt késleltetéseket – az iparban elterjedt szokásos módon - légmagos induktivitásokkal hozzuk létre, az egyes kisülésekhez tartozó gerjesztő impulzusok amplitúdói nem egyenlők. Feltevésem szerint ezt a kisülési csövek közötti parazita oszcillációk okozzák. Ezen oszcillációk elnyomása lehetséges, ha a mágneskapcsoló impedanciáját csökkentjük és a késleltetésért felelős induktivitásokat beleépítjük a mágneskapcsolóba. Számítógépes szimulációim azt mutatják, hogy létezik a kapcsolásért és a késleltetésért felelős induktivitások értékének egy optimális aránya, amely esetén az egyes gázkisülésekre ugyanakkora elektromos energia jut. Tapasztalataimat felhasználva, egy három különálló kisülési térrel rendelkező KrF lézert építettem, amelyet most a Kínai Atomenergia Intézet Nagyintenzitású Lézer Laboratóriumában alkalmaznak egy elektronnyalábbal pumpált excimer lézer előerősítőjeként.

b) A három kisülési térrel rendelkező lézer gerjesztő áramkörének vizsgálata, illetve optimalizálása során szerzett tapasztalataim szerint, ha a gerjesztő gázkisüléseket egymáshoz képest nagymértékben – több tíz vagy száz nanoszekundummal - kívánjuk késleltetni, akkor célszerű ezt egy új áramkörrel megvalósítani. Ebben az új áramkörben a kapcsolást egyetlen tirátron és – két kisülési térrel rendelkező lézer esetén - két mágneskapcsoló végzi. A mágneskapcsolóknak az a tulajdonságuk felhasználható, hogy zárt állapotba kerülésükhöz több tíz vagy száz nanoszekundum idő szükséges, felhasználható a gerjesztő impulzus késleltetésére. Ennek a megoldásnak a légmagos induktivitással történő késleltetéssel szemben az az előnye, hogy a mágneskapcsoló – geometriai méreteiből következően - zárt állapotban nem növeli számottevően a gerjesztő kör induktivitását, így a gerjesztő impulzus felfutási ideje kicsi marad. Ez szükséges feltétele az excimerek hatékony gerjesztésének. Tapasztalataimat felhasználva, tovább fejlesztettem a Szatmári Sándor professzor által vezetett Nagyintenzitású Lézer Laboratórium szubpikuszekundumos festék-excimer lézerrendszerének gerjesztő körét.

IV. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

Az elért eredmények közvetlenül hasznosításra kerültek több kutatólaboratóriumban. Így pl. a három kisülési térrel rendelkező KrF lézert egy nagyintenzitású lézerrendszer részeként alkalmazzák a Kínai Atomenergia Intézet Nagyenergiájú Lézer Laboratóriumában. A szubpikuszekundumos jelek erősítésére optimalizált gerjesztő körrel rendelkező KrF lézereket pedig a Göttingeni Lézer Laboratóriumban és a Chicagói Tudományegyetem Fizika Tanszékének laboratóriumában használják.

V. AZ ÉRTEKEZÉS ALAPJÁT ÉS A HIVATKOZÁSOKAT KÉPEZŐ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

Saját közlemények

- [1] **J. Bohus**, S. Szatmári: *An alternative approach for microlithography light source*. Applied Physics B, **80** (4-5) p.577 (2005)
- [2] S. Szatmári, **J. Bohus**: *Differential pumping scheme for discharge pumped excimer lasers*. Rev. Sci. Instrum. **77**, 045105 (2006)
- [3] S. Szatmári, Janicskó J., **J. Bohus**: *Two-step preionization scheme for discharge-pumped KrF excimer lasers* (Rev. Sci. Instrum.)
- [4] S. Szatmári, **J. Bohus**, G. Zhixing, X. Tang, N. Wang: *Three-channel KrF laser with distributed magnetic switch-based charging circuit*. Rev. Sci. Instrum. **77**, 115106 (2006)

Hivatkozott közlemények

- [5] Cymer: *ELS-6010 KrF excimer laser*. <http://www.cymer.com>
- [6] Lambda Physik: *New Novaline K2005 – The perfect match for high NA DUV scanners*. <http://www.lambdaphysik.com>
- [7] S. Szatmári: *High –brightness ultraviolet excimer lasers*. Appl.Phys. B, **58**, p.211 (1994)
- [8] Taylor A.J., Tallman C.R., Robrtes J.P., Lester C.S., Gosnell T.R., Lee P.H., Kyrala G.A.: *High intensity subpicosecond XeCl laser system*. Opt. Lett. **15**, p.39 (1990)
- [9] Jeffrey I. Levatter, Shao-Chi Lin: *Necessary conditions for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharges at high gas pressures*. J.Appl.Phys. **51** (1) p.210 (1980)
- [10] S.Sumida, K.Kunitomo, M.Kaburagi, M. Obara, T. Fujioka: *Effect of preionization uniformity on a KrF laser*. J.Appl.Phys. **52** (4) p.2682 (1981)
- [11] W.C. Nunnally: *Magnetic switches and circuits*. Los Alamos laboratory report LA-8862-MS (1982)

Társszerzői nyilatkozat

Bohus János *Speciális excimer lézerek* című PhD értekezésének téziseit megismertem, azokat a jelölt önálló kutatómunkával elért tudományos eredményeinek tekintem. A tézispontokban megfogalmazott eredményeket nem használtam, és nem is fogom felhasználni tudományos minősítés megszerzése céljából.

Szeged, 2007. február

Név

Dr. Szatmári Sándor
Dr. Janicskó József

Aláírás

