

AZ ELSŐ CSÖRPÖLT TÜKÖR MEGTERVEZÉSE ÉS ELKÉSZÍTÉSE BUDAPESTEN

Szipőcs Róbert

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

A *Fizikai Szemle* Krausz Ferenc 2023-as fizikai Nobel-díjához kapcsolódó tematikus számában cikket írtam a kutató-fejlesztő munkáról, ami a Bécsi Műszaki Egyetemen a 90-es évek közepén folyt, benne arról a fejlesztésről, amit az MTA SZFKI Optikai Vékonyréteg-laboratóriumában végeztünk – többek között az általam megtervezett és Ferencz Kárpát kollégám által elkészített csörpölt tükrökhöz kapcsolódó tevékenységről [1].

Az idén januárban megjelent cikkemben a történet 1993. július elején (napra pontosan 1993. július 12-én) kezdődik, amikor egy osztrák–magyar TÉT-együttműködés keretében kiutaztam Krausz Feriékhez a Bécsi Műszaki Egyetemre, hogy az általunk előző héten Budapesten megtervezett és elkészített („SOL_D3” jelzésű) csörpölttükör-mintákat először egy fehérfényű interferométerrel – Anton nevű ottani mérnök-kollégám és Christian Spielmann segítségével – minősítsem, vagyis ellenőrizzem, hogy a tükrök mért diszperziós tulajdonságai megfelelnek-e az általam tervezett elméleti, a csoportképletetést a hullámhossz függvényében leíró függvénynek. További célunk volt, hogy a reményeink szerint széles, a 730–840 nm-es hullámhossztartományon közel állandó, $GDD \sim -50$ fs² csoportképletetés-diszperzióval (ang. *group delay dispersion*) rendelkező tükrök felhasználásával olyan Ti-zafir oszcillátorokat építsünk, amelyekben diszperziókompenzálásra kizárólag ezeket a speciális, kvadratikusan fázistolással rendelkező lézertükröket használjuk a korábban használt prizmapárok helyett [2]. A most hivatkozott, *Optics Letters* folyóiratbeli cikk második ábráján szereplő másodrendű, interferometrikus autokorrelációs függvény, illetve lézerspektrum az első ilyen, kizárólag a fenti, még Budapesten megtervezett, „SOL_D3” jelzésű tükrökkel diszperziókompenzált Ti-zafir lézere vonatkozik, ami az akkor elvégzett mérések szerint

$\tau_{FWHM} \sim 14$ fs-os lézerimpulzusokat állított elő már 1993 júliusában, augusztus 8-i hazautazásomat megelőzően.

Az első tükrökompenzált (MDC) Ti-zafir lézeroszcillárral [2] elért eredményekről (illetve a korábban a gradiens törésmutatójú aperiodikus szerkezetű dielektrikumtükrökhöz kapcsolódó modelledményeimről) már pár nappal hazaérkezésem után, az 1993. augusztus 9. és 13. között a Budapesti Kongresszusi Központban zajló, 16. ICO-kongresszuson beszámoltam egy poszter formájában [3], majd a poszterszekciót követően többek között olyan nemzetközi szaktekintélyekkel, mint Bor Zsolt professzorral (JATE Szeged, jelenleg SZTE) valamint Takayoshi Kobayashi professzorral sikerült a témáról egy kávé mellett beszélgetnünk. Zsolt – aki akkor már az MTA levelező tagja, a JATE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének vezetője volt – körülbelül a következő szavakkal hívott kávézni: „Gyere, Robi, üljünk le egy kicsit, hadd tanuljunk valamit!” Na – gondoltam – valami igen fontos dolgot csinálhattunk Ferivel, ha Zsolt ezzel a felütéssel invitál beszélgetni...

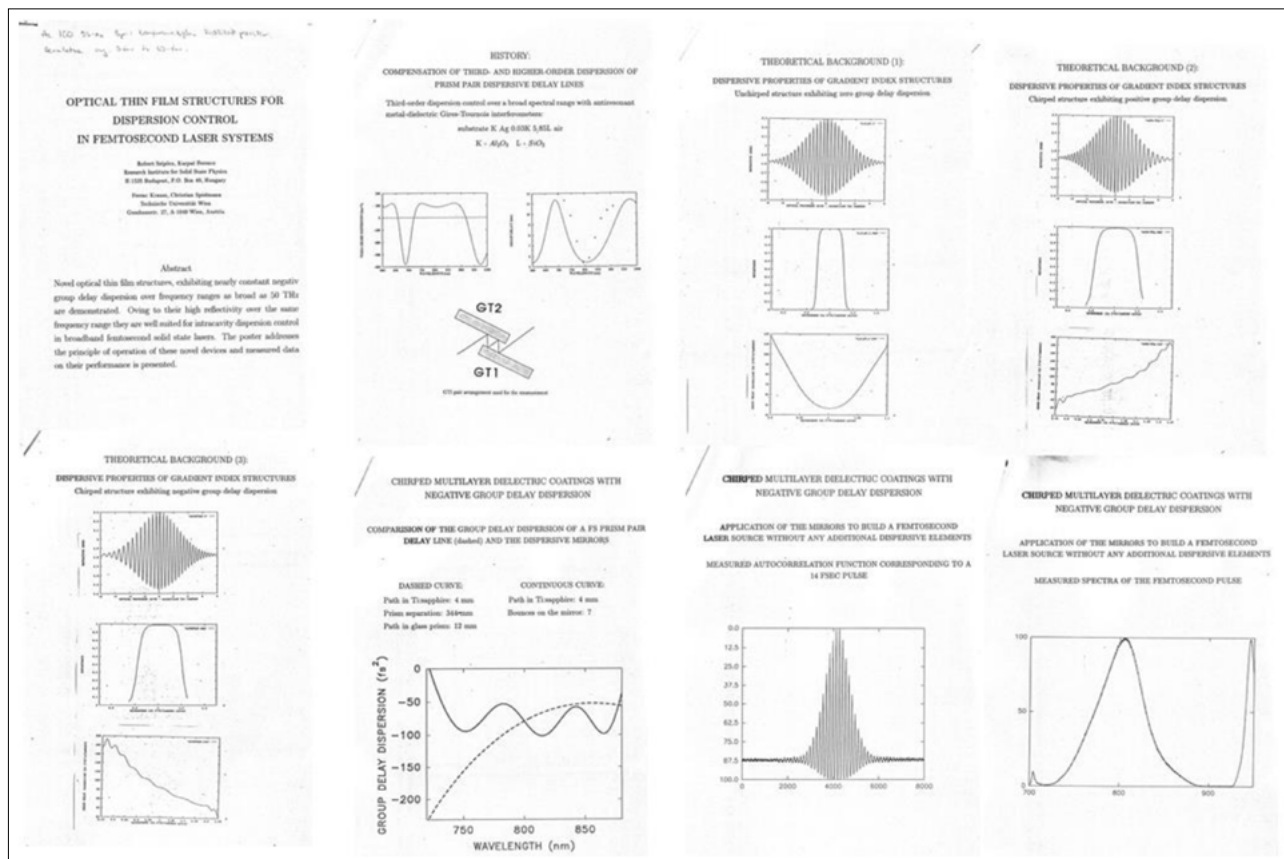
Fontos itt megjegyeznem, hogy a nyomtatásban megjelent, a konferencián a résztvevőknek a regisztrációkor kiosztott 16. ICO-kongresszusi kiadványban [3] a most említett eredmények értelemszerűen nem szerepeltek, hiszen az arra vonatkozó anyagokat már hónapokkal korábban le kellett adnunk. A kirakott poszter anyagát viszont, amit A4-es lapokra Krausz Ferivel még Bécsben, hazaindulásomat megelőzően nyomtattunk ki – egy, akkor nálunk még ritkaságszámba menő lézernyomtatóval –, azóta is őrzöm a jegyzeteim között (1. ábra). Az eredeti kéziratához tartozó anyag összesen egy oldalt tett ki ebből.

A 2023. decemberében megírt *Fizikai Szemle*-cik kem [1] januári megjelenését követően többekben merült fel – jogosan – az a kérdés, hogy hogyan jutottam el az első, szélessávú diszperziókompenzálásra kísérleti körülmények között is alkalmas (közel állandó negatív GDD -vel), illetve kis reflexiós veszteségekkel ($R > 99,8\%$) rendelkező, „SOL_D3” jelzésű csörpölt tükrök megtervezéséig, illetve a Ferencz Kárpát által közel negyedhullámú TiO_2 és SiO_2 rétegekből történő megvalósításáig a kiutazásomat megelőző héten, Budapesten.

A témáról csak egy későbbi, 1997-ben az *Applied Physics B*-ben, Kőházi-Kis Ambrus kollégámmal megírt, meghívott cikkünkben, illetve a 2000-ben angol nyelven megírt PhD-disszertációmban [4] közöltem részleteket.



Szipőcs Róbert, PhD, okleveles villamosmérnök (BME, MSc), lézerfizikus (SZTE, PhD), a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa, az R&D Ultrafast Lasers Kft. ügyvezetője. A részben Krausz Ferencsel közösen, a femtoszekundumos lézertechnológia fejlesztése területén elért eredményeiért többek között Nemzetközi Gábor Dénes-díjat, Akadémiai Szabadalmi Nívódíjat, az ELFT Bródy Imre-díját és az MTA Fizikai Tudományok Osztálya Fizikai Díját kapta.

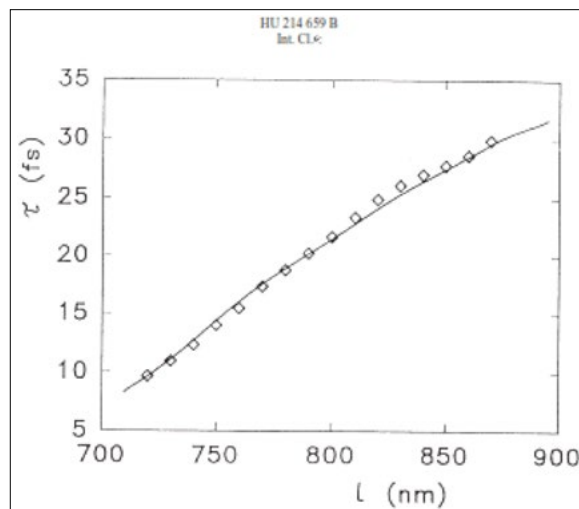


1. ábra. A 16. ICO-kongresszuson a Budapesti Kongresszusi Központban 1993. augusztus 10-én bemutatott poszterünk anyaga [3]. A második ábrán az eredetileg beküldött kéziratához (GT1 tükrök) tartozó illusztráció, a következő három ábrán – a még 1993 májusában Budapesten, az MTA SZFKI-ban egy IBM RISC 6000-es munkaállomáson elvégzett modellszámításaim eredményeit bemutató – a folyamatos törésmutató-profilal rendelkező dielektrikum-rétegszerkezetek számított reflexiós függvényei: intenzitásreflexió (R) és csoportképletelés (GD) a normalizált hullámszám ($2\pi/\lambda_0$) függvényében. Az utolsó három lapon a júliusban Bécsben kizárólag „SOL_D3” jelzésű csörpölt tükrök felhasználásával megépített Ti-zaffir lézerre vonatkozó GDD-számítási eredmények összehasonlítva a korábban lézerben használt prizmás kompresszor diszperziós függvényével (szagatott vonallal), valamint a lézer fényimpulzusaira vonatkozó mérési eredmények (másodrendű interferometrikus autokorrelációs függvény és mért spektrum) szerepeltek

Ennek oka nagyon prózai volt: az első csörpölt tükrök megtervezését egy több éves – általam még egyetemista-ként 1986-ban egy Commodore 64-es gépen megkezdett

– programfejlesztői munka és egy nagyjából egy évig tartó elméleti modellező és kísérleti munka előzte meg, és az ebből adódó helyzeti előnyünket, a „know how”-t nem

 HU 0 0 0 2 1 4 6 5 9 B		
(19) Országkód: HU  MAGYAR KÖZTÁRSASÁG MAGYAR SZABADALMI HIVATAL	SZABADALMI LEÍRÁS (21) A bejelentés ügyszám: P 93 02398 (22) A bejelentés napja: 1993. 08. 23. (40) A közzététel napja: 1995. 09. 28. (45) A megadás meghirdetésének dátuma a Szabadalmi Közlönyben: 1998. 04. 28.	(11) Lajstromszám: 214 659 B (51) Int. Cl. ⁶ G 02 F 1/19 G 02 B 5/26
(72) Feltalálók: Szípcős Róbert, 70%, Budaörs (HU) Krausz Ferenc, 30%, Pusztavám (HU)		
(73) Szabadalmaz: Szilárdtestfizikai Kutatóintézet, Budapest (HU)		
(74) Képviselet: S.B.G. & K. Budapesti Nemzetközi Szabadalmi Iroda, Budapest		
(54) Diszperzív dielektrikumtűkrök és eljárás annak tervezésére		



2. ábra. Az 1993. augusztus 23-án Krausz Ferenc feltalálótársammal Budapesten benyújtott, diszperziós (csörpölt) tükrökre vonatkozó szabadalmi bejelentésünk (bal oldalon) és az elsőbbségi okirathoz csatolt egyik jellemző ábra (jobb oldalon), ami a diszperzív tükrök számított és mért csoportképletelését ábrázolja a hullámhossz függvényében

akartuk idő előtt a nagy nyilvánossággal megosztani, hanem Krausz Ferivel egymást segítve, 1993. augusztus 23-án közösen beadott magyar szabadalmi bejelentésünkre [5] is alapozva kamatoztatni.

A jelen kézirat írása közben, 2024. április 25-én „Understanding phase properties of multilayer dielectric mirrors: a long but exciting road to the first chirped mirror design” címmel előadást tartottam az ELTE Ort-vay Kollokviumának szervezésében, amelynek rövid írásos kivonatát olvashatják a következő oldalakon. Az előadás anyagát mindenki számára elérhetővé tettem pdf formában személyes honlapomon [6].

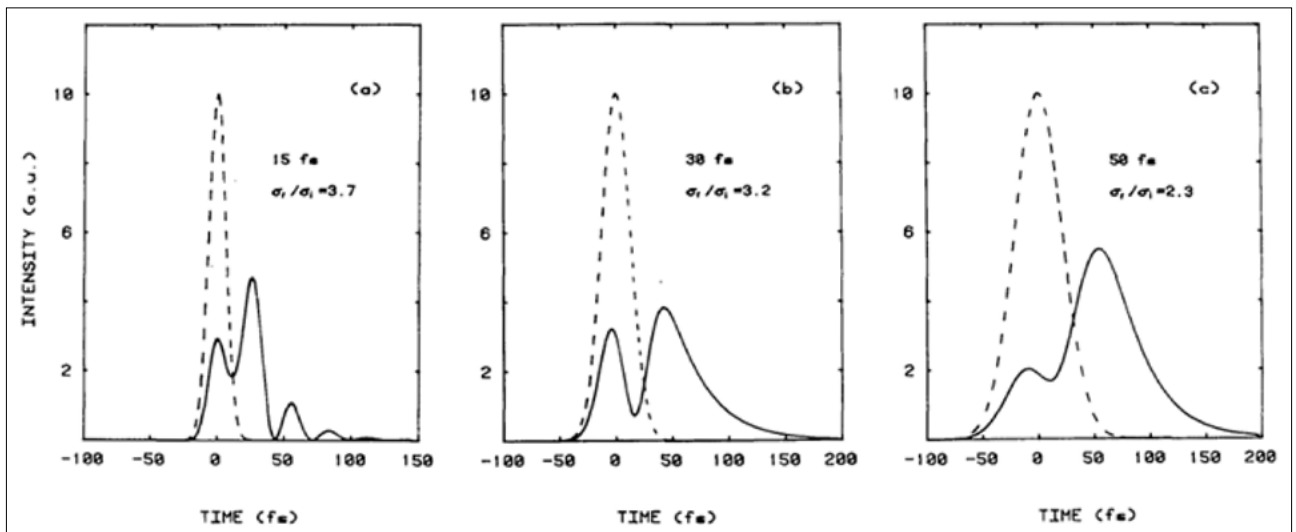
Áprilisi előadásom első részében a téma előzményeit, az akkoriban témában elérhető szakirodalmat mutattam be. Az 1993 előtt megépített, prizmapárt tartalmazó femtoszekundumos lézerrendszerekben [7] tipikusan negyedhullámú (ang. „quarter-wave”, QW), váltakozó kis és nagy törésmutatójú rétegekből álló dielektrikumtüköröket használtak, használtunk [8], mert ezek diszperziója megfelelően alacsony volt a nagy reflexiójú tartomány túlnyomó részén. A nagy reflexiójú (HR), valamint a nyitótükörök (OC) sáv szélességét alapvetően a két használt optikai bevonat anyagának n_H/n_L törésmutató-hányadosa határozta meg, ami a TiO_2 (H) és SiO_2 (L) réteganyagok választása esetén tipikusan 200 nm sáv szélességet jelentett a Ti-zafír lézer ~ 790 nm-es erősítési maximuma környékén. Megjegyezzük, hogy a rétegrendszerek leírásánál tipikusan S betűvel jelöljük a hordozót (ang. *substrate*), A betűvel a beeső oldali közeget, ami tipikusan levegő (ang. *air*), míg a nagy és kis törésmutatójú, negyedhullámú rétegeket H és L betűkkel jelöljük. A „negyedhullámú” megjelölés mindkét réteg esetében arra vonatkozik, hogy az adott réteg optikai vastagsága a λ_0 referencia-hullámhossz negyede, vagyis: $n_H \cdot d_H = n_L \cdot d_L = \lambda_0/4$.

Már az első, femtoszekundumos festéklézerek megépítését követően felmerült az igény, hogy a negyedhul-

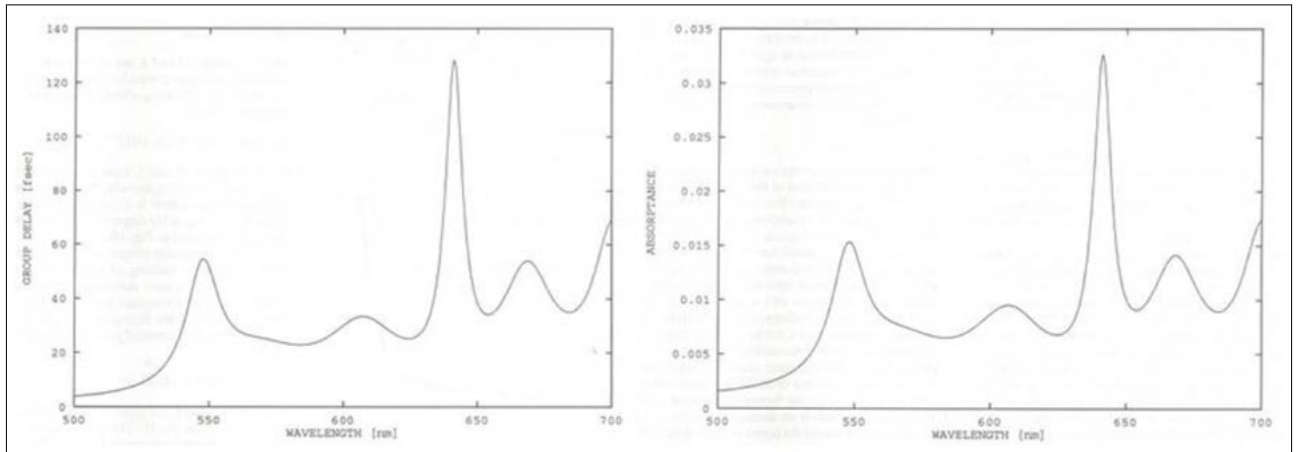
lámú rétegekből álló dielektrikumtükörök sáv szélességét – megfelelő tervezéssel – megnöveljék, hiszen mind az alkalmazott lézeraktív közegek sáv szélessége, mind a különböző festékek egymástól eltérő, gyakorlatilag a teljes látható hullámhossz-tartományt lefedő emissziós spektruma ezt igényelte; arról már nem is beszélve, hogy már a nyolcvanas évek közepén sikerült az impulzusok kompressziójával a negyedhullámú tükrök sáv szélességét bőven meghaladó, ~ 6 fs-os lézerimpulzusokat előállítani, amelyeket csak kis diszperziójú fémtükrökkel (pl. Ag) lehetett jelentős fázishibák nélkül a kísérletek, az impulzushosszmérések helyszínére továbbítani, ami a lézerimpulzusok energiájának néhány százalékos csökkenését eredményezte minden egyes visszaverődés után.

Ezen munkák közül mindenképpen kiemelendő Paolo Laporta and Vittorio Magni 1985-ös, az *Applied Optics*-ben megjelent cikke [9], amelyben különböző szerkezetű, szélessávú dielektrikumtükörök fázistulajdonságait, valamint ezeknek a különböző hosszúságú ($\tau = 15$ fs, 30 fs vagy 50 fs) lézerimpulzusok intenzitás-idő függvényeire gyakorolt hatását vizsgálták. A vizsgált szélessávú dielektrikumtükörök alapvetően három különböző szerkezettel rendelkeztek: a) úgynevezett „double-stack” szerkezettel, b) olyan aperiodikus szekezettel, amiben a rétegvastagságok geometriai sor, c) illetve számtani sorozat szerint változtak. Ezen túl a szerzők megvizsgálták mindhárom tükröszerkezet esetében azt a két esetet, amikor a rétegvastagságok a tükrör felületéhez képest csökkentek, illetve növekedtek. Mind a hat említett esetben azt tapasztalták, hogy a rétegszerkezetek extrém meredek fázisfüggvényeket produkáltak bizonyos, a nagy reflexiójú tartományba eső hullámhosszakon, ahol a lézerimpulzusok is nagyon jelentős alakváltozást szenvedtek (3. ábra).

A hivatkozott cikkben a különböző tükröszerkezetekre számított, komplex amplitúdóra vonatkozó reflexiók fázisfüggvényei szerepeltek, így azok a jelenséget



3. ábra. Különböző impulzushosszal rendelkező lézerimpulzusok (szaggatott vonal) alakváltozása (folytonos vonal) a szélessávú dielektrikumtükörökön történő visszaverődést követően azokon a hullámhosszakon, ahol a tükrök meredeken változó fázisfüggvénnyel rendelkeznek a nagy reflexiójú tartományban [9]



4. ábra. A Substrate / $0.6(H\ 2L\ H)^9\ 0.5(H\ 2L\ H)^9\ 0.42(H\ 2L\ H)^9$ / Air szerkezetű, „multi-stack” tükörre számított $\tau(\lambda)$ csoportkésleltetés-, illetve $A(\lambda)$ abszorpciós függvény [8]. Szembetűnő a két függvény alakjának egyezése, ami nagy segítséget nyújt a lézertükrök diszperziós tulajdonságainak megértésénél

magyarázó fizikai kép szempontjából nem túl sok információt közöltek. Azokat tehát most – az ELTE-n elhangzott előadásomtól eltérően – nem ismertetem. Az 1992-ben megírt, 1993-ban megjelent *Optical Engineering*-cikkünkben [8] viszont bemutatok két ábrát, ami segít a 3. ábrán bemutatott jelenség megértésében, miszerint a lézertükrökben felépülő (Fabry–Perot-interferométerhez hasonló) rezonáns állóhullámú elektromágneses terek a fázisfüggvényre hatással vannak. Cikkünkben először is bemutattam egy, $S\ 0.6(H2LH)^9\ 0.5(H2LH)^9\ 0.42(H2LH)^9$ A „multi-stack” szerkezetű dielektrikum általam Triesztben leírt fázisfüggvényét, valamint számított $\tau(\lambda)$ csoportkésleltetés-, illetve $A(\lambda)$ abszorpciós-hullámhossz függvényeit (4. ábra). Az ábrán jól látható, hogy a két függvény alakja – jó közelítéssel – megegyezik, amennyiben a rétegrendszerben fellépő, a komplex törésmutató-függvény ($\hat{n} = n - ik$) képzetes részével (k) jellemzett abszorpciós tényező ($\alpha = 2\pi/\lambda k$) közel állandó a vizsgált hullámhossz-tartományban, valamint ugyanott a tükröszerkezet nagy visszaverő-képességgel rendelkezik, azaz $R \sim 100\%$ [4].

Ha a fényt (ami hullám és részecske is egyszerre) egy véges időtartamú, adott középfrekvenciával rendelkező hullámcsomagnak képzeljük, a 4. ábrát a következőképpen értelmezhetjük: a) először is a különböző „színű” hullámcsomagok a mélyebben lévő negyedhullámú rétegszerkezetekről később érkeznek vissza, amit a hosszabb hullámhosszak felé átlagban növekvő csoportkésleltetési (és abszorpciós) értékek mutatnak, b) az így létrejövő, monoton növekvő csoportkésleltetés-függvényt kisebb-nagyobb rezonanciáktól származó, megnövekedett csoportkésleltetés-értékek tarkítanak. Ez utóbbit úgy képzelhetjük el, hogy amikor az adott hullámhosszon teljesül a rezonancia fázisfeltétele, vagyis amikor a hordozó-rétegrendszer, illetve rétegrendszer-levegő felületek között a fázistolás egy irányban π -nek az egész számú többszöröse, akkor a hullámcsomag a rezonancia mértékének megfelelően többször is körbefut a két felület között, mielőtt kilépne a tükröszerkezetből. Összefoglalva:

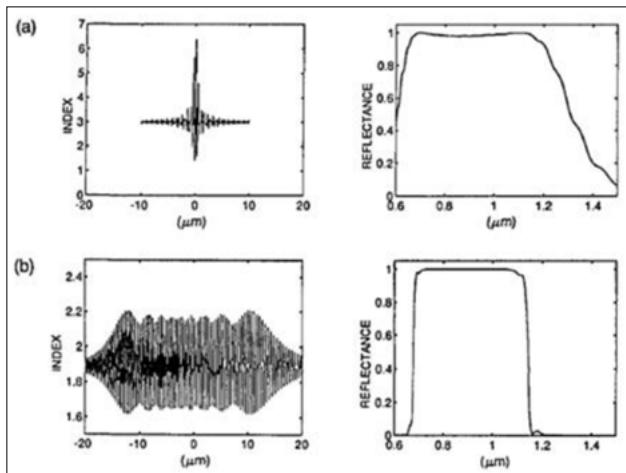
a lézertükrök diszperzióját alapvetően két fizikai jelenség, a hullámhossz-függő behatolási mélység, valamint a bizonyos hullámhosszakon jelentkező rezonanciák együttes hatása határozza meg [4].

Az *Optical Engineering*-cikkünkben [8] többek között megvizsgáltam még egy, a 700–1000 nm-es tartományon közel állandó transzmisszióval rendelkező nyitótükör csoportkésleltetés-hullámhossz függvényét is, aminek – mint látni fogjuk – a későbbiekben szintén fontos szerepe lesz az első, MTA SZFKI-ban megtervezett és legyártott csörpölt tükörhöz vezető úton.

A fenti eredmények alapján már sejthető volt, hogy az aperiodikus Bragg-szerkezetek megoldást jelenthetnek a diszperziókompenzálás problémájára, legyen szó akár optikai szálas átviteli rendszerekről [10], akár a femtoszekundumos lézerekben alkalmazott dielektrikum-lézertükrökről. Ehhez a felismeréshez az elméleti háttér az $n(x)$ folyamatos törésmutató-függvénnyel rendelkező optikai vékonyréteg-szerkezetek és optikai szűrők szintéziséhez már korábban is használt Fourier-transzformációs módszer ad, amelynek részletes ismertetésétől most eltekintek, csak hivatkozom egy 1993-ban publikált, az *Optics Letters*-ben megjelent cikk [11] egyik fontos eredményére, ami az 5. ábrán látható.

A cikkben bemutatott Fourier-szintézis módszerrel és megfelelő fázisfüggvény megválasztásával egy olyan, $\sim 40\ \mu\text{m}$ optikai vastagágú törésmutató-profilot produkáltak (5b. ábra), amelyben a szintézissel kapott $n(x)$ függvény értékei az 1,6–2,2 tartományba estek (ahol x az optikai távolság a rétegrendszer közepétől), és a szerkezet $R = 99\%$ -os értéket meghaladó reflexióval rendelkezett a Ti-zafír lézer 700–1100 nm-es erősítési tartományán. A hivatkozott cikkben azt is megmutatták, hogy diszperziómentes, $\varphi = 0$ fázisfüggvénnyel jellemzett specifikáció esetén a valóságban nem megvalósítható törésmutató-profilok állnak elő, vagyis praktikusán diszperziómentes szélessávú tükör nem készíthető (5a. ábra).

A cikkben – érdekes módon – sem azt nem említik, hogy a (b) ábrán látható törésmutató-profil aperiodikus

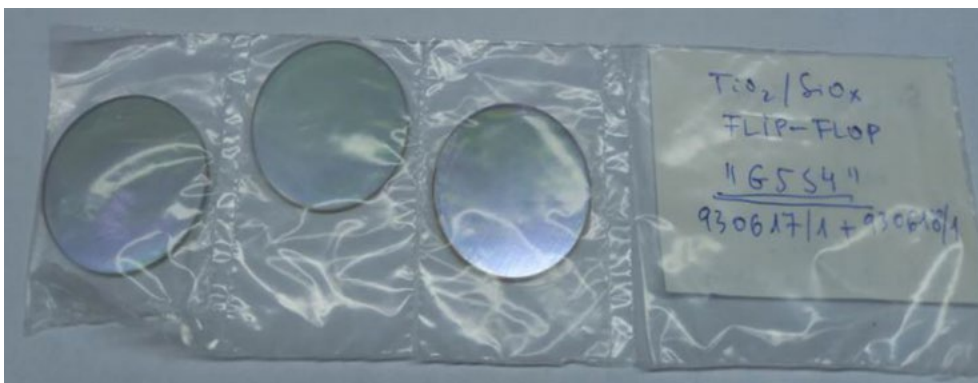
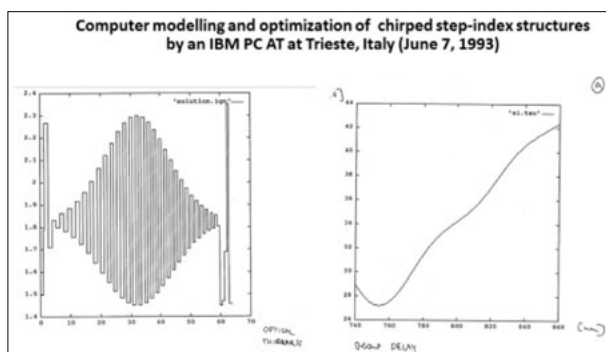


5. ábra. A $\sim 40 \mu\text{m}$ optikai vastagágú, folyamatos törésmutató-profilal és $R = 99\%$ -os reflexióval rendelkező Ti-zafír lézertükrök törésmutató-profilja (bal oldalon) és számított reflexiós függvénye (a) $\varphi = 0$ és (b) „optimális” fázisfüggvény esetén

(csörpölt) szerkezet lenne, sem azt, hogy az „optimális”-nak nevezett fázisfüggvény egy parabolikus fázisfüggvény, pedig ez joggal feltételezhető. 1993 májusában hasonló számításokat végeztem az MTA SZFKI-ban akkoriban vásárolt IBM RS 6000-es munkaállomáson egy általam korábban IBM PC-re írt vékonyréteg-modellező program megfelelő módosítása után, aminek fontosabb eredményeit már a cikk 1. ábráján (az 1993-as ICO-konferencia poszteranyagán) már megmutattam. Ott lát-

ható, hogy megfelelő burkolófüggvény megválasztása esetén [12] az aperiodikus szerkezetű, folyamatos függvény szerint változó törésmutató-profilokkal rendelkező dielektrikumtükrök alapvetően pozitív (normális) vagy negatív (anomális) diszperzióval rendelkeznek attól függően, hogy a rétegrendszerre eső fény először a kisebb vagy nagyobb térfrekvenciájú Bragg-szerkezetekkel találkozik. Előbbi esetben normális, míg a második esetben anomális diszperzióval rendelkezik a tükrök. Az 1. ábra negyedik és ötödik lapjain ez látható.

1993 júniusában hasonló számításokat végeztem Triesztben, az ICTP-ben egy általam IBM PC-re fejlesztett vékonyréteg-tervező programmal olyan vékonyréteg-szerkezetekre, amelyekben már nem folyamatosan változó törésmutató-profilokkal, hanem azokat közelítő lépcsős függvényekkel dolgoztam, így a vonatkozó számítások lényegesen kisebb számítástechnikai kapacitást igényeltek, illetve lehetőségem volt az egyes rétegeket (i) leíró rétegvastagság-értékek (d_i), valamint törésmutató-értékek (n_i) számítógépes optimalizációjára az előírt reflexiós és diszperziós függvények alapján. Ennek segítségével sikerült mind a hordozó-rétegrendszer, mind a rétegrendszer-levegő átmenetek impedanciaillesztését megoldanom, így már közelítettem egy olyan törésmutató-profil megtervezése felé, amit (elvileg) akár a Budapesten lévő vákumppárológató berendezésünkkel is meg lehetett volna valósítani. Modelleredményeimről mind Krausz Ferenc kollégámat Bécsben, mind Ferencz



6. ábra. Lépcsős törésmutató-profilal jellemzett csörpölt rétegrendszer, ahol az impedanciaillesztést a hordozóhoz ($n_s = 1,51$) és levegőhöz ($n_A = 1,0$) a rétegrendszer alján és tetején lévő néhány réteg vastagság- és törésmutató-értékeinek megfelelő megválasztásával biztosítjuk egy számítógépes optimalizását követően. A fenti képen egy ilyen törésmutató-profil, illetve a hozzá tartozó csoportképletelés-hullámhossz függvény, míg a lenti képen egy hasonló törésmutató-profilal rendelkező, „G5S4” jelzésű tükrrendszer fotója látható, amit Ferencz Kárpát kollégám 1993. június 17-én a flip-flop módszer felhasználásával igyekezett terveim alapján megvalósítani – sikertelenül

Kárpát kollágámat Budapesten folyamatosan tájékoztattam. A 6. ábrán példaként bemutatok egy olyan törésmutató-profilt, amit Triesztben (egy ottani Olivetti gyártmányú gépen) egy Ti-zafir lézerben történő diszperzió kompenzálására terveztem, és az ún. „flip-flop” módszerrel [13] akár meg is lehetett volna valósítani.

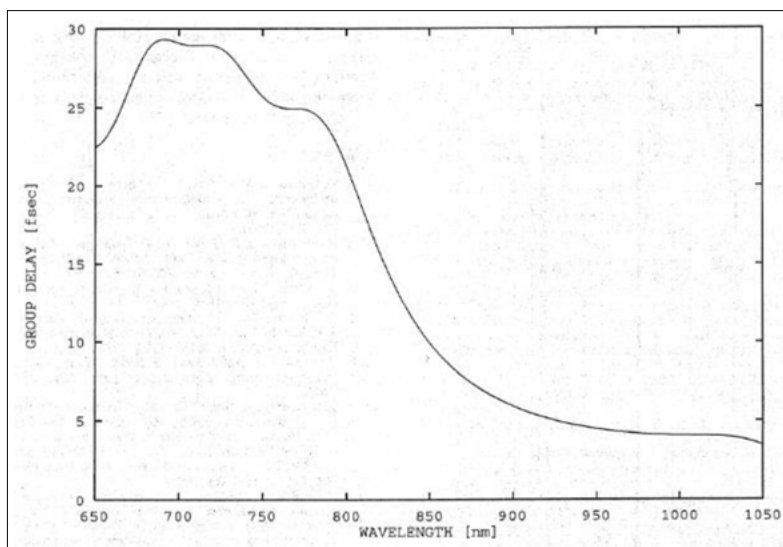
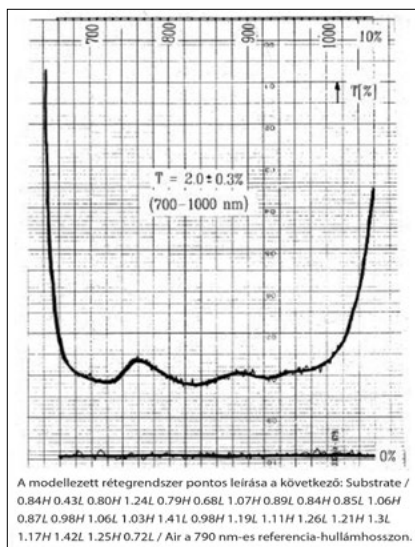
Sajnos a „G5S4” jelzésű mintán optikai spektrométerrel végzett transzmissziósfüggvény-mérések eredményei egyértelműen azt mutatták, hogy a 6. ábrán szereplő lépcsős függvény a mi vákuumpárológató rendszerünkön a flip-flop módszerrel nem megvalósítható, miután a gépünk rezgőkvarcos rétegvastagság-mérésének pontossága legalább egy nagyságrenddel rosszabb a szükséges értéknél.

Amikor szembesültünk ezekkel a tényekkel, akkor egyértelművé vált, hogy valamilyen más – a vákuumpárológató berendezésünk képességeit nem meghaladó – megoldást kellene találnom, például közel negyedhullámú rétegekből felépülő lézertükröket, kiindulásként a Paolo Laporta és Vittorio Magni által leírt aperiodikus szerkezetek [9] megfelelő számítógépes optimalizációjával.

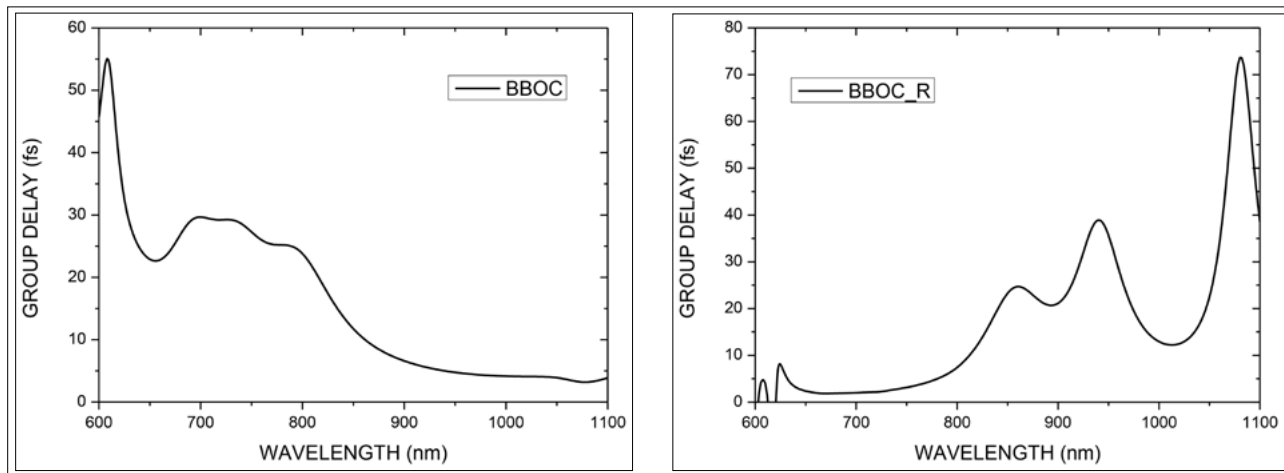
Talán itt érdemes pár mondatot írnom a vékonyréteg-rendszerek, azon belül a speciális fázistulajdonságokkal rendelkező lézertükrök tervezésére általam Pascal nyelven megírt tervezőprogramról, amit még egyetemistaként 1986-ban egy Commodore 64-es gépen, majd az MTA SZFKI-ban egy 640 kB operatív memóriával, 20 MB háttértárolóval és VGA grafikus kártyával rendelkező IBM PC AT gépen írtam. A gépen DOS operációs rendszer futott, a programfejlesztést Turbo, majd Borland Pascal környezetben végeztem. A program hozzávetőleg 8600 programsort tartalmazott, amit egyéb munkáim mellett fejlesztettem folyamatosan – mindig attól függően, hogy volt-e további funkcióra igény a ré-

tegrendszerek megtervezésénél. A program tartalmazott egy „MATH” egységet (unitot), amiben a számításokhoz szükséges komplex függvényeket definiáltam. A rétegrendszerek analíziséhez azt a mátrixos módszert alkalmaztam, aminek részletes leírása megtalálható Agnus A. Macleod könyvében [14]. A módszer alkalmazásával többek között ki tudtam számolni az adott fizikai rétegvastagságukkal (d_i) és törésmutatójukkal (n_i) jellemzett rétegrendszerek intenzitásreflexió (R), transzmisszió (T), abszorpció (A) függvényeit, valamint a komplex amplitudóreflexió $\varphi(\omega) = -\arg(r(\omega))$ fázisfüggvényének frekvencia szerinti deriváltjaiként számított $GD(\omega) = \varphi'(\omega)$ csoportkésleltetési, a második deriváltként számított $GDD(\omega) = \varphi''(\omega)$ csoportkésleltetés-diszperziós függvényeket, valamint a rétegrendszerekben felépülő állóhullámú elektromos teret (E) és energiasűrűséget (nE^2) különböző beesési szögek illetve polarizációk esetére. A program tartalmazott még egy – lokális optimum keresésére alkalmas, viszonylag gyors – optimalizációs eljárást, amit először az előírt intenzitásreflexió $R(\lambda)$ és transzmisszió $T(\lambda)$ függvényekre, majd 1993 májusától a lézertükrök diszperziójára jellemző előírt $GDD(\lambda)$ függvényekre alkalmaztam. Az általam alkalmazott algoritmus angol neve „flexible polyhedron search”, azaz rugalmas poliéderkeresés volt, ami tapasztalataim szerint viszonylag gyors optimalizációt tett lehetővé a változtatható paraméterek száma szerinti többdimenziós vektortérben.

A flip-flop módszerhez megtervezett rétegszerkezet mérési eredményeit látva tehát másik megoldást kellett találnom, hogy az 1993. július 12. és augusztus 8. közötti időtartamra tervezett bécsi látogatásom Krausz Feriék-nél értelmet nyerjen. Miután pár napon keresztül eredménytelenül próbálkoztam azzal, hogy optimalizációs



7. ábra. Az *Optical Engineering* folyóiratban 1993-ban publikált, Ti-zafir-lézer szélessávú nyitótükrére vonatkozó mért transzmissziós függvény (bal oldalon), valamint a rétegszerkezet reflektált csoportkésleltetés-függvényére $r(\lambda)$ vonatkozó számításaim eredménye (jobb oldalon). A 26 db, váltakozó törésmutatójú (H, L) rétegekből álló nyitótükrő közel állandó, $R \sim 98\%$ -os reflexióval rendelkezik a 700–1000 nm-es hullámhossztartományon, míg számított csoportkésleltetés-függvénye a hullámhossz függvényében folyamatosan csökkenő, vagyis normális diszperzióra jellemző tendenciát mutat. A rétegszerkezet pontos leírása a bal oldali ábra aláírásában található

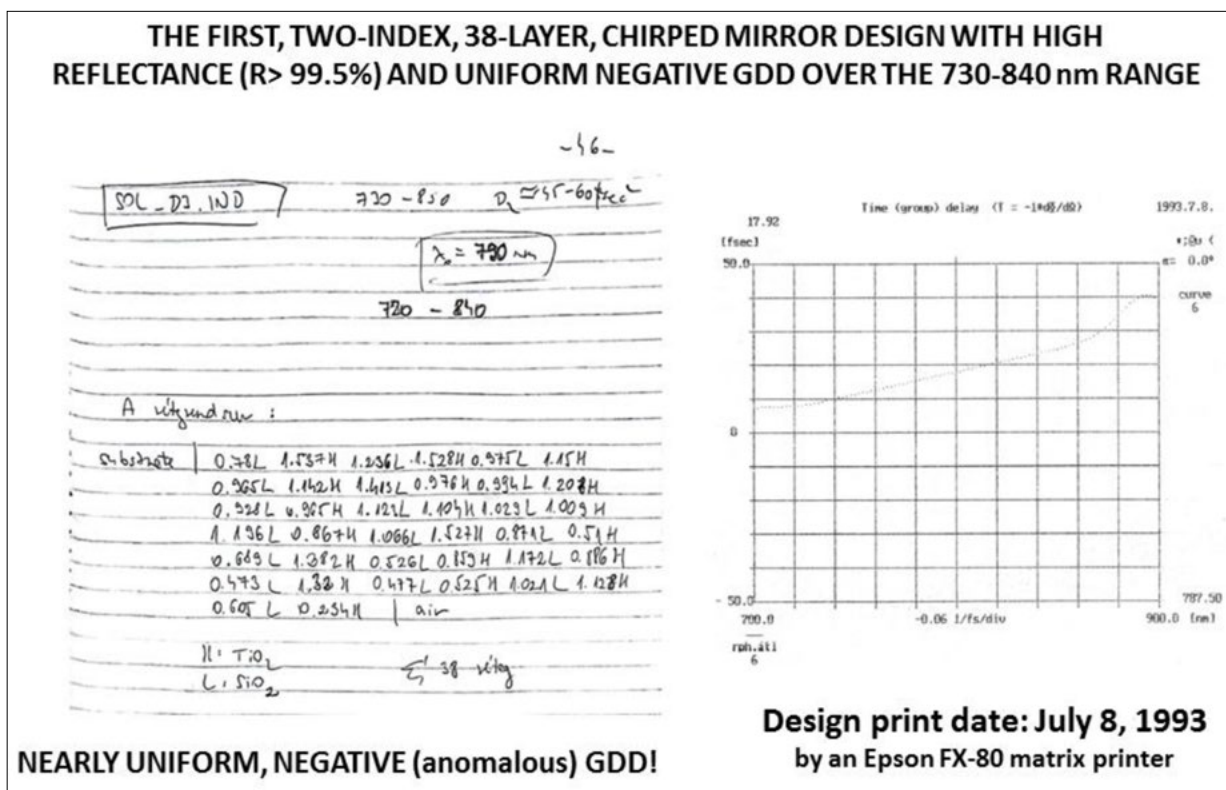


8. ábra. A 7. ábrán bemutatott nyitótükör (BBOC) hullámhossz függvényében számított $\tau(\lambda)$ csoportkésleltetés-függvénye (bal oldalon), míg ugyan-ezen rétegszerkezet tükrözésével, a rétegszerkezet rétegeinek párologtatási sorrendjét megfordítva kapott tükör (BBOC_R) számított $\tau(\lambda)$ csoportkésleltetés-függvénye

algoritmusom segítségével a Paolo Laporta és Vittorio Magni cikkében leírt aperiodikus rétegszerkezetekben fellépő rezonanciákat megszüntessem, azon gondolkodtam, vajon milyen kiindulási rétegszerkezet vezet eredményre. Nézegettem az 1992 karácsonya környékén megírt *Optical Engineering*-cikkünk ábráit, és látva a korábban már említett szélessávú nyitótükörről vonatkozó csoportkésleltetési függvényt (7. ábra), felmerült bennem a kérdés: vajon milyen csoportkésleltetés-függvényt

kapnék, ha a rétegszerkezet párologtatási sorrendjét felcserélném, vagyis az először párologtatott réteg kerülne fel utoljára, és fordítva? Ha ez a tükröszerkezet egy, a korábban modellezett aperiodikus (csörpölt) rétegszerkezethez hasonlóan viselkedik, akkor a számított csoportkésleltetés-függvény meredekségének is előjelet kellene váltania!

A 8. ábrán az Ortvay Kollokvium-előadásom előtt reprodukált modellszámításaim segítségével megmutat-



9. ábra. Az első, 38 rétegből álló, „SOL_D3” jelzésű csörpölt tükör szerkezete (a munkafüzetemből kimásolva), illetve az 1993. július 8-án itthon kinyomtatott, számított $\tau(\lambda)$ csoportkésleltetés-függvény, ami a 730–840 nm-es tartományon közel állandó, $GDD = -50 \text{ fs}^2$ nagyságú anomális diszperziót és legalább 99,8%-os visszaverőképeséget biztosít



10. ábra. A Ti-zafir lézerben először eredményesen tesztelt, 1993. július 9-én elkészített, „SOL_D3” jelzésű csörpölt tükörről készült fénykép (bal oldalon), valamint a jelen cikkben bemutatott modellszámításokat tartalmazó munkafüzet fényképe

tom, hogy a rétegszerkezet párologtatási sorrendjének megfordítása milyen változást eredményez a számított csoportkésleltetés-hullámhossz függvényben. Az 1993 nyarán elvégzett és idén áprilisban megismételt modellszámítások eredménye azt mutatta, mutatja, hogy a nyitótükör csoportkésleltetés-függvényének meredeksége – nagy átlagban – előjelet váltott a rétegrendszer párologtatási sorrendjének megfordításával, vagyis az így kapott tükörszerkezet a tükör reflexió tartományának jelentős részén és átlagban is anomális diszperziót mutat.

A 8. ábrán bemutatott modellszámítások eredményének ismeretében, 1993. június végén, július első napjaiban már „csak” annyi dolgom volt, hogy optikai vékonyréteg-tervező programom segítségével megnöveljem a tükörszerkezet rétegszámát (a kezdeti 26-ról) annyira, hogy a reflexió az általam akkor specifikált 730–840 nm-es hullámhossztartományon elérje legalább a 99,8%-os értéket, valamint a rétegszerkezet diszperzióját közel állandó értéken tartsam ugyanezen a hullámhossz-tartományon. A rétegek számát az egyes optimalizációs rutinok között általában kettőszereztem úgy, hogy az újonnan, különböző fizikai pozíciókba behelyezett rétegpárok vastagsága megfeleljen a szomszédos rétegek vastagságértékeinek. Így jutottam el egy olyan, a fenti követelményeket kielégítő, 38 rétegből álló szerkezethez, amelyet az akkor használt munkafüzetemben leírtam. A vonatkozó csoportkésleltetés-hullámhossz függvényt a rétegrendszer lepárologtatását megelőzően itthon az irodámban egy Epson FX-80-as mátrixnyomtatóval, kiutazásomat megelőzően kinyomtatattam (9. ábra).

A 9. ábrán bemutatott rétegrendszert még Bécsbe indulásomat megelőzően, 1993. július 9-én lepárologtattuk Budapesten, amelyekből egy példányt (10. ábra) azóta is nagy becsben őrzök a KFKI-telephelyen lévő szekrényben, a jelen cikk alapjául szolgáló, az 1993. május 18. és 1993. augusztus 8. közötti időszakot átfogó munkafüzetem társaságában.

Irodalom

1. Szipőcs Róbert: Az izolált attoszekundumos impulzusok előállítását megalapozó lézerfizikai fejlesztések a kilencvenes évek közepén a Bécsi Műszaki Egyetemen. *Fizikai Szemle* 74 (2024) 12–15.
2. Stingl A., Spielmann C., Krausz F., Szipőcs R.: Generation of 11-fs pulses from a Ti:sapphire laser without the use of prisms. *Opt. Lett.*, 19 (1994) 204.
3. Szipőcs R., Ferencz K., Krausz F., Spielmann Ch.: Optical thin film structures for dispersion compensation in femtosecond laser systems. In: Optics as a Key to High Technology: 16th ICO and SPIE Congress, p. 282 (1993)
4. Szipőcs Róbert: Dispersive Properties of Dielectric Laser Mirrors and their Use in Femtosecond Pulse Lasers. Doktori disszertáció (SZTE, 2000).
5. Szipőcs Róbert, Krausz Ferenc: Diszperzív dielektrikumtükör és eljárás annak tervezésére. Szabadalmi leírás, Lajstromszám: 214 659 B, Bejelentés napja: 1993. 08. 23.
6. Szipőcs Róbert: Understanding phase properties of multilayer dielectric mirrors: a long but exciting road to the first chirped mirror design. Ortway kollokvium-előadás (ELTE), 2024. április 25. http://www.szipocs.com/picks/Ortway_ea_20240425_Final_w_Q&A.pdf
7. Curley P. F., Spielmann Ch., Brabec T., Krausz F., Wintner E., Schmidt A. J.: Operation of a femtosecond Ti:sapphire solitary laser in the vicinity of zero group-delay dispersion. *Opt. Lett.*, 18 (1993) 54–56.
8. Szipőcs R., Ferencz K.: Recent developments of laser optical coatings in Hungary. *Opt. Engineering*, 32 (1993) 2525.
9. Laporta P., Magni V.: Dispersive effects in the reflection of femtosecond optical pulses from broadband dielectric mirrors. *Appl. Opt.*, 24 (1985) 2014–2020.
10. Hill K. O., Theriault S., Malo B., Bilodeau F., Kitagawa T., Johnson D. C., Albert J., Takiguchi K., Kataoka T., Hagimoto K.: Chirped in-fiber Bragg grating dispersion compensator: Linearization of dispersion characteristic and demonstration of dispersion compensation in 100 km, 10 Gb/s optical fiber link. *Electron. Lett.*, 30 (1994) 1755–1756.
11. Druessel J., Grantham J., Haaland P.: Optimal phase modulation for gradient-index optical filters. *Opt. Lett.*, 18 (1993) 1583–1585.
12. Southwell W. H.: Using apodization functions to reduce sidelobes in rugate filters. *Appl. Opt.*, 28 (1989) 5091–5094.
13. Ferencz K., Szipőcs R.: High precision controlling of refractive index gradient in optical thin films using the “flip-flop” method. In: Proc. OPTIKA 88, (1988) p. 461.
14. Macleod H. A.: Thin film optical filters. Chapter 2. Basic Theory (5th Ed.), 2017. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/b21960>