

SZÉLES SPEKTRÁLIS TARTOMÁNYON TÁG BEESÉSI SZÖGTARTOMÁNYBAN NAGY REFLEXIÓJÚ DIELEKTRIKUMTÜKRÖK SZÁMÍTÓGÉPES TERVEZÉSE

COMPUTER BASED DESIGN OF DIELECTRIC MIRRORS WITH HIGH REFLECTIVITY ON WIDE SPECTRAL AND ANGULAR RANGE

*Kóházi-Kis Ambrus**

Természet- és Műszaki Alaptudományi Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar,
Kecskeméti Főiskola, Magyarország

Kulcsszavak:

dielektrikum tükör
nagy reflexió
széles spektrális tartomány
harmadrendű diszperzió
evolúciós algoritmus

Keywords:

dielectric mirror
high reflectivity
wide spectral range
third order dispersion
evolutionary algorithm

Cikktörténet:

Beérkezett 2015. október 10.
Átdolgozva 2015. október 31.
Elfogadva 2015. november 5.

Összefoglalás

Széles spektrális tartományon tág beesési szögtartományon nagy reflexióképességű tükör újszerű tervezési lehetőségét mutatom be. A tervezési feladat direkt megközelítése helyett egy eredményes, hatékony kerülő utat fedeztem fel: a cél elérhető a lézertükörnek csupán a reflexiója maximumára és a harmadrendű fázisderiváltja abszolút értékének minimumára optimalizálni. Egy evolúciós keresési eljárás segítségével egy 600 nm-től 1200 nm-ig terjedő hullámhossztartományban a merőleges beeséstől 20 fokos beesési szögig legalább 97% reflexiójú rétegszerkezetet kaptam.

Abstract

A new method of designing of dielectric mirrors with high reflection in a wide wavelength and angle of incidence ranges is presented. It is shown that this optimization can be carried out just by optimizing for the high reflectivity and for the vanishing third-order dispersion of the mirror. The design method is based on genetic algorithm method combined with a trust-region local optimization procedure. Dielectric mirror with more than 97% is obtained in the 600-1200 nm wavelength range in the angle of incidence range of 0-20 degrees.

1. Bevezetés

Különleges, újszerű jellemzőkkel bíró lézertükrök, szűrők tervezéséhez esetenként újszerű módszerekre is szükség van. A legmodernebb tervezési módszerek integrálásával egy nagyon rugalmas, hatékony tervező platformot állítottam össze. Ezzel a dielektrikum rétegszerkezetet modellező és tervező programmal folytatott vizsgálataimról számolok be.

Számos alkalmazáshoz szükség van széles spektrális és beesési szögtartományokban egyenletesen nagy reflexióképességgel rendelkező dielektrikumtükrökre, amelyekkel kiválthatók a fémtükrök, amelyek a látható és a közeli infravörös hullámhossztartományon 90-95%-ban korlátozott reflexióképességgel rendelkeznek, továbbá a vissza nem vert fényt elnyelik, így nem alkalmazhatók hatékonyan nagy teljesítményű fénynyalábok esetén.

* E-mail cím: kohazi-kis.ambrus@gamf.kefo.hu

A nagy reflexióképességnek a széles spektrális tartományon és a széles beesési szögtartományon történő szimultán optimalizálása nagyon sok tesztpontra felvételét igényli. Például a 600-1200 nm-es hullámhossztartományon érdemes felvenni legalább 600, míg a 0-30 fokos beesési szögtartományon legalább 10 pontot, azaz $600 \times 10 = 6000$ pontban kell kiértékelni a rétegszerkezetet – az eljárás nagyon lassú volt és nem volt eléggé sikeres.

Valamelyest független próbálkozásként optimalizáltam a 600-1200 nm-es hullámhossztartományon egy legfeljebb 70 réteges dielektrikumtükört 15 fokos beesési szög mellett maximális reflexióra és minimális harmadrendű fázisdiszperzióra. Az utóbbinak elvileg nem kellene hatással lennie a rétegszerkezet reflexió tulajdonságára egyéb beesési szögek esetén, ezért meglepő, hogy az optimalizált tükör széles beesési szögtartományban is nagy reflexióképességet mutatott. A rétegszerkezet másodrendű diszperziója egyébként még mindig olyan nagy értékek között ingadozik, hogy a tükör nem alkalmas femtoszekundumos fényimpulzusok torzítástól mentes visszaverésére, csupán olyan alkalmazásokban használható, ahol a tükör fázismodulációs hatása nem kritikus.

2. Lézertükörök automatizált tervezési módszere

A dielektrikum tükörök vizsgálatára az F. Abeles által kifejlesztett mátrix kalkulust alkalmazom [1, 2]. Sokréteges dielektrikumtükörök tervezésére nélkülözhetetlenek az analitikusan számolt deriváltakkal segített optimalizációs eljárások [2]. A lokális optimumok meghatározására másodrendű deriváltak analitikus számolásán alapuló lokális modellt (trust-region) használó saját fejlesztésű eljárást alkalmazok. J. Hrdina kifejlesztett egy eljárást [3, 4] dielektrikumtükörök reflexiója, transzmissziója másodrendű deriváltjainak számolására, amely segítségével a rétegvastagságok szerinti elsőrendű deriváltak kifejezhetők a másodrendű deriváltak [4], ami lényegesen megrövidíti a számolási időt. Ez azért olyan fontos, mert például egy 70 réteges dielektrikumtükör optimalizálása során minden egyes lépés során a másodrendű derivált szimmetrikus Hesse-mátrixának $(70 \times 70 - 70) / 2 + 70 = 2485$ elemét kell számolni.

A szakirodalomban széleskörűen alkalmazott trust-region módszer szerint a másodrendű deriváltak ismeretében az optimalizálandó függvényt lokálisan egy általános másodrendű függvénnyel közelítik, hogy egy megbízhatósági sugáron belül lokális optimumba juthassanak, hogy onnan a célfüggvény deriváltjainak számolásával újabb lokális modell alkotásával haladjanak tovább [5]. Viszont az általam kifejlesztett trust-region eljárás során a másodrendű lokális modellt arra használom, hogy legmeredekebb lejtő út vonalát analitikusan számolva haladjak a globális optimum irányába [6]. A szimmetrikus Hesse-mátrix saját rendszerében egyszerűen, analitikusan számolható a másodrendű közelítésben az optimum felé vezető út. Az eljárás fontos része ezek szerint a Hesse-mátrix sajátértékeinek és sajátvektorainak megkeresése. A hatékony és gyors eljárás segítségével akár 100 réteg vastagságainak szimultán optimalizálása lehetséges a megfelelő numerikus segéd eljárások [7] alkalmazásával.

A lokális optimumkeresés precíz eljárása az, alapja a túloptimalizálásos eljárásoknak is, amelyekkel egy primitív rétegből kiindulva a rétegszerkezet összetettségét fokozva juthatunk el a kívánt globálisan optimális rétegszerkezethez [8]. Az eljárásnak azonban jelentős hátránya, hogy segítségével nem lehet figyelembe venni a rétegszerkezetek jóságának a rétegek előállítási pontatlanságára mutatott érzékenységét. Továbbá azt is tapasztaltam a túloptimalizáció vizsgálata során, hogy mindig, makacsul a legjobb utat követő eljárás sem juthat el feltétlenül a globális optimumhoz, ha az optimalizációs pálya megfelelő bonyolult.

Kifejlesztettem egy genetikus algoritmuson [9] alapuló optimalizálási eljárást, amelyben a lokális optimumokon keresztül keresek globális optimumokat. A lokális optimumok keresését azért kell belevenni a keresési eljárásba, mert a rétegszerkezetek célfüggvényei nagyon sok éles lokális optimummal rendelkeznek, ezért egy-egy rétegszerkezet jóságát sokkal jobban befolyásolja, hogy milyen távol van a lokális optimumtól, mint az, hogy a globális tendenciák szerint mennyire van közel a globális optimumhoz. Bár az eljárás lényegesen lassabb, mint a túloptimalizálás módszere, de lényeges előnye, hogy menet közben figyelembe lehet venni a lokális optimumok hibaérzékenységét is. Ezzel alternatívaként szolgál a szakirodalomban 2011-ben megjelent [10] a túloptimalizálást továbbfejlesztő olyan új eljárásnak, amely szintén figyelembe veszi a tükörnek a rétegek vastagságára mutatott hibaérzékenységét is.

3. Az alkalmazott keresési eljárás paraméterei

Maximum 70 réteges dielektrikumtükörrejeget terveztem. Az lokális optimumszámolás, ha egy rétegre a 0.01 nm-nél kevesebbet adott, akkor azt a réteget nulla vastagságúnak tekintettem.

1. Táblázat. Az alkalmazott rétegek diszperziós együtthatói

Anyagok megnevezése	A	B	C
SiO ₂ (L)	1.46525 + j 1.0E - 06	0	4.710E - 04
Ta ₂ O ₅ (H)	2.065572 + j 1.0E - 06	0.01683	0.001686
SiO ₂ (hordozó)	1.50086	3.26477E - 03	5.0404E - 04

Az egyes rétegek törésmutatóit az 1. táblázatban adott paraméterekkel az alábbi Cauchy-formulával közelítettem:

$$n(\lambda) = A + B \cdot \lambda^{-2} + C \cdot \lambda^{-4} \quad (1)$$

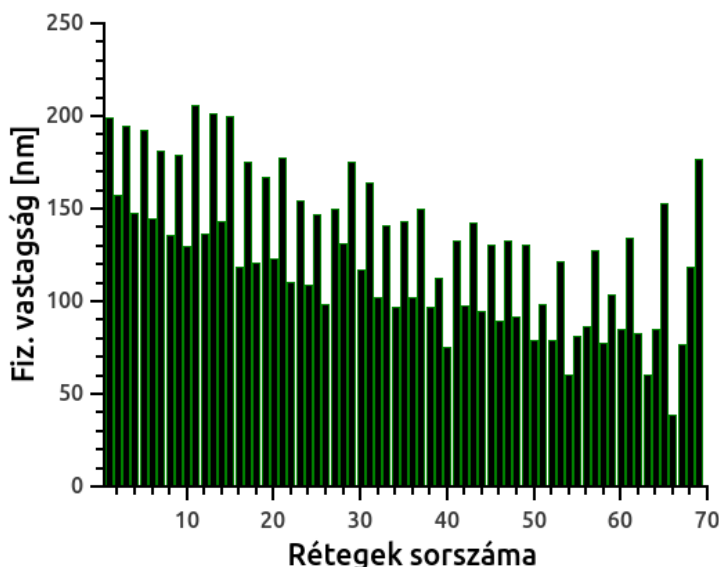
A rétegszerkezeteket a rétegek vastagságaitól (d) és a hullámhossztól (λ) függő intenzitásfüggő reflexió ($R(d, \lambda_i)$) és a harmadrendű csoportkésleltetés diszperzió ($D3(d, \lambda_i)$) értékére optimalizáltam:

$$CelFv(d) = \sum_{i=0}^{600} \left[(R(d, \lambda_i) - 1)^4 + \beta (D3(d, \lambda_i) - 0)^4 \right] \quad (2)$$

A genetikus algoritmust 30 fős populációval futtattam.

4. Eredmények

Összesen kilenc optimalizációs eljárást futtattam le, ezek közül négy eljárás eljutott a legjobbnak talált rétegszerkezethez (1. ábra). Legjobbnak olyan rétegszerkezetet kaptunk, amely 69 rétegből áll, legfelső rétege a kisebb törésmutatójú réteg.

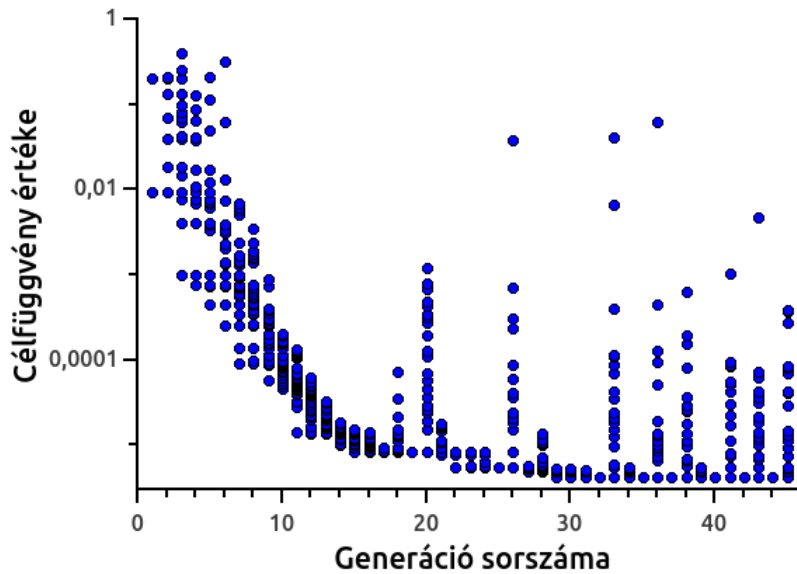


1. ábra. Az optimálisnak talált rétegszerkezet rétegeinek fizikai vastagsága (a rétegek sorszáma a hordozóra történő felpárologatás sorrendjét adja)

Több eljárás már 30 alatti generáció után eljutott a talált legjobb értékhez. A 2. ábrán az egyik optimalizáció során a populációnak az egyenlő kisebb célfüggvény-értékű egyedek célértékeinek változását figyelhetjük meg a generációk változása során.

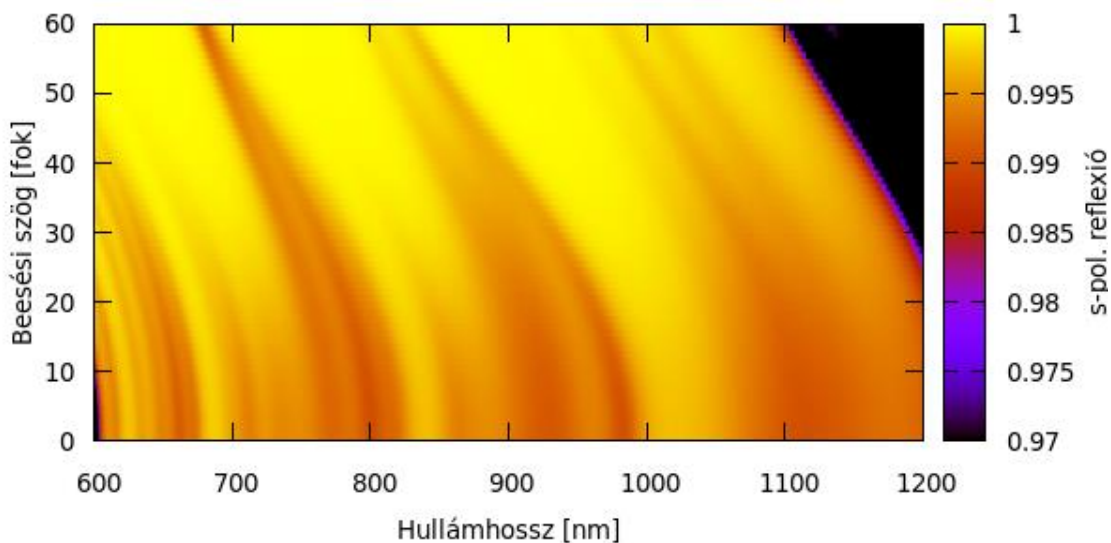
Jól látható annak a hatása, hogy amikor a populáció egyedei túlságosan a legjobb egyedükhöz hasonlítanak, akkor a következő generációban mesterségesen megnövelt mutáció révén a populáció kikölkenthető lokális optimumából (2. ábra).

Érdekes azonban megjegyezni, hogy több olyan optimalizációs eljárás is lefutott, amelyek során még az 50. generáció után sem találtuk meg a legjobb rétegszerkezetünket. Azt is fontos azonban eszünkben tartani, hogy a megtalált legjobb rétegszerkezetünk nem bizonyosan a globális optimum még akkor sem, ha a legjobb értékünket többször is megtaláltuk. Hiszen az evolúciós eljárások, mint a többi globalizációs eljárás a globális tendenciákat követve jut el a legjobb megoldáshoz. A keresési térben, ha van egy olyan globális optimum, amely a globális tendenciák elől elrejtőzik, akkor az efféle globális optimumok megtalálására igen csekély az esélyünk.



2. ábra. A genetikus algoritmus generációi során a populáció egyedeinek célfüggvény-értékeinek változása

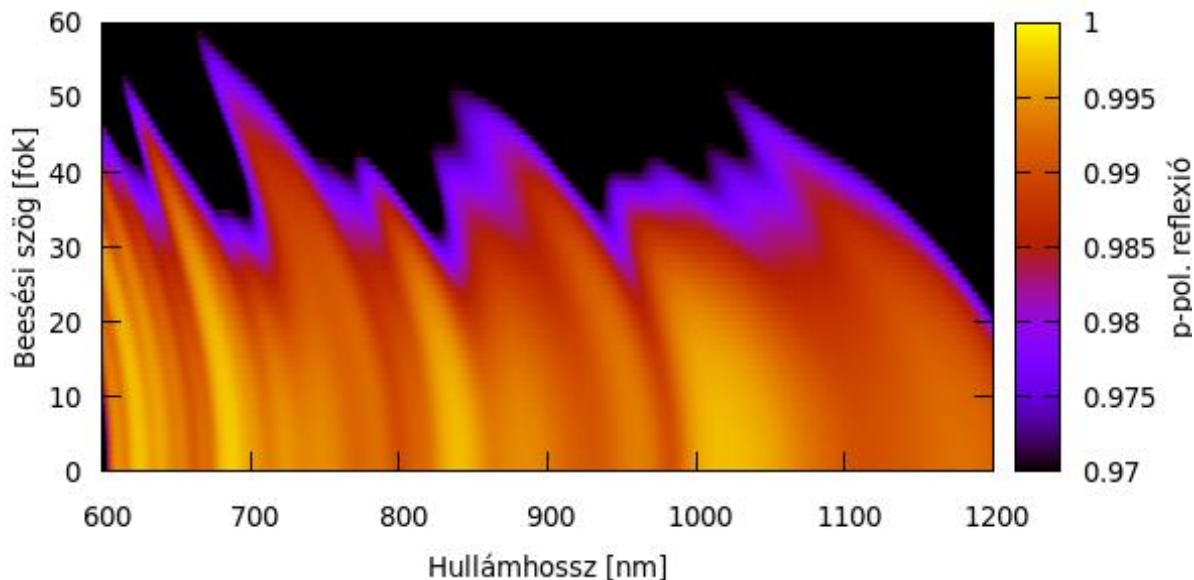
A kapott dielektrikumtükörnek a beesési síkra merőlegesen polarizált beeső fény melletti reflexióképességét a 3. ábra mutatja a hullámhossz és a beesési szög függvényében. Jól látható, hogy 1100 nm alatt még akár 60 fokos beesési szög esetén is a reflexió tényező nagyobb, mint 98%.



3. ábra. A legjobbnak talált tükör reflexió tényezője a beesési síkra merőlegesen polarizált fényre, mint a hullámhossz és a beesési szög függvénye

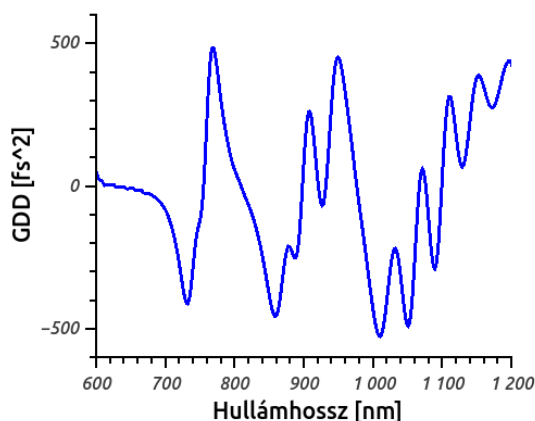
Beesési síkban poláros beeső fény esetén lényegesen rosszabb a helyzet (4. ábra). A széles spektrális tartományon gyakorlatilag 30 fokos beesési szög felett a reflexió lényegében a 97%-os érték alá esik.

Számos optikai eszközön, mint lencséken, tükrökön a nem túlságosan nagy beesési szögek esetén a rétegszerkezet gyakorlatilag ideális fémes, azaz egyenletesen reflektáló bevonatként viselkedik.



4. ábra. A legjobbnak talált tükör reflexiók tényezője a beesési síkban polarizált fényre, mint a hullámhossz és a beesési szög függvénye

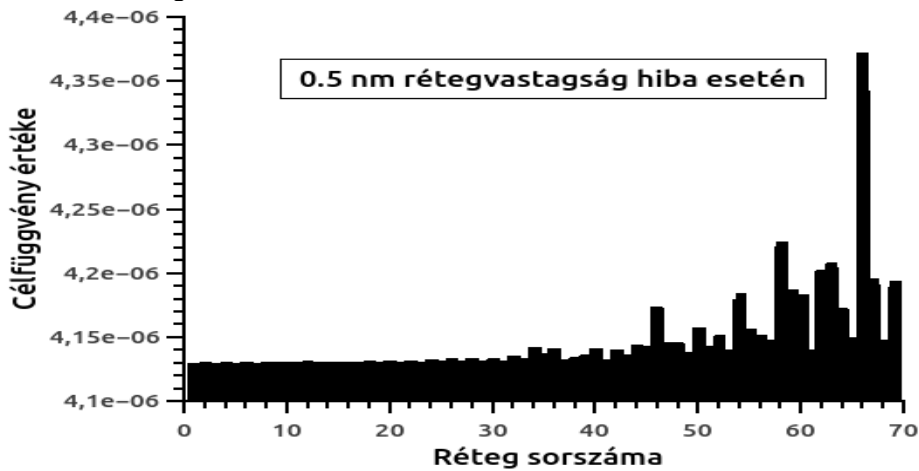
Megjegyzem, hogy annak ellenére, hogy a tükör minimális harmadrendű diszperzióra is optimalizálva lett tervezve a lézer diszperziós tulajdonságai még így is a másodrendű diszperzió eléggé jelentős ingadozásával bír (5. ábra). Mivel a másodrendű csoportkésleltetés diszperzió (GDD – Group Delay Dispersion) az adott hullámhossz közelében megadja a reflexió késleltetési idejének változási gyorsaságát, ezért az ilyen erős GDD-vel bíró szerkezetek ultrarövid fényimpulzusok reflektálása során erőteljesen torzítják a fényimpulzusokat [11]. Azaz a rétegszerkezet csupán legfeljebb pikoszekundumos, vagy annál hosszabb fényimpulzusok reflektálására ajánlott, ha a reflektált fényimpulzusok időbeli alakjának torzulása kritikus az adott felhasználás szempontjából. A nagyon széles spektrális tartományon erősen reflektáló tükrök diszperzióját nagyon nehéz kicsiny értékre korlátozni.



5. ábra. A legjobbnak talált rétegszerkezet másodrendű diszperziójának (GDD) ingadozása

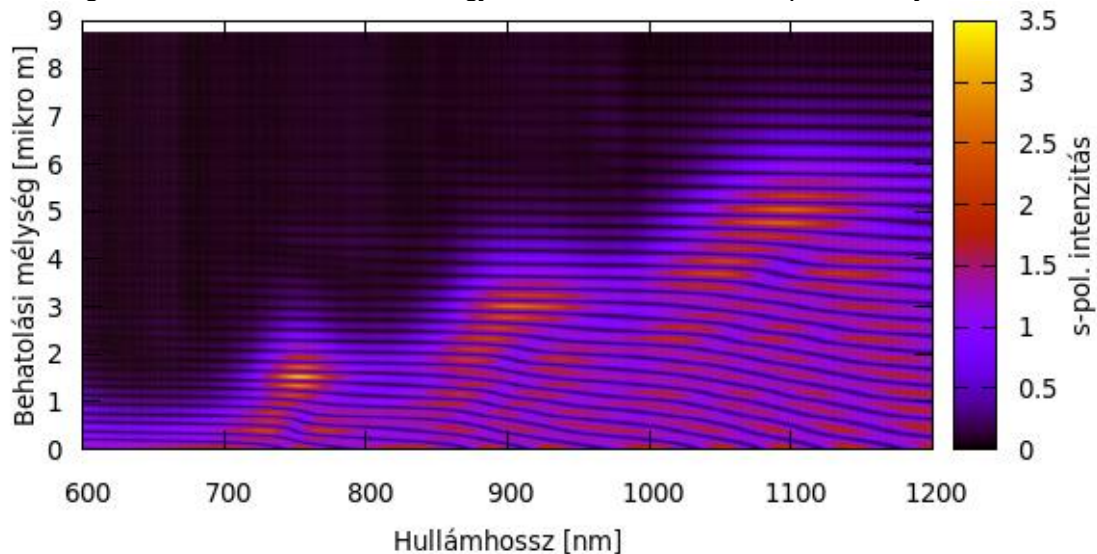
Ha a rétegszerkezetnek a rétegek vastagságaira vonatkozó érzékenységét nem vesszük figyelembe a tervezés során, akkor nagyon hamar olyan rétegszerkezetre juthatunk, amely az egyatomos rétegek vastagságának nagyon kis hányadához tartozó vastagságtérletek esetén is a

rétegszerkezet jóságának (célfüggvényének) jelentős elromlásához vezetnek – az ilyen tükörök a gyakorlatban nem is valósíthatók meg. A legjobbnak talált rétegszerkezet rétegeinek vastagsághibájából adódó célfüggvény-érték növekedése a 6. ábrán figyelhető meg, ha az adott réteg vastagsága 0.5 nm-rel eltér a tervezett értéktől. A 0.5 nm-es rétegvastagság pontosság a modern dielektrikumréteg-növesztési technikákkal elérhető.



6. ábra. A legjobbnak talált rétegszerkezet másodrendű diszperziójának (GDD) ingadozása

A nagyon széles spektrális tartományon erősen reflektáló dielektrikumtükörök általános jellemzője, hogy a különböző hullámhosszú fénykomponensek a rétegszerkezet különböző mélységéből verődnek vissza, mint ahogyan ez a 7. ábrán is jól megfigyelhető (a két polarizációra nincs lényeges különbség). A behatolási mélység változása okozta késleltetés diszperzióját csupán a rétegszerkezetben óhatatlanul megjelenő rezonanciák kompenzálhatják, mérsékelhetik.



7. ábra. A legjobbnak talált rétegszerkezetben a különböző hullámhosszú fénykomponensek behatolása a dielektrikumtükör belsejébe

Irodalomjegyzék

- [1] Born, M., Wolf, E., Principles of Optics, Pergamon press, London, 1984.
- [2] MacLeod, A. H., Thin Film Optical Filters, Taylor&Francis, London, 2001.
- [3] Hrdina, J., J. Modern Optics, 37, 1087-1094, 1990.
- [4] Hrdina, J., J. Modern Optics, 41, 129-136, 1994.
- [5] Shiqua, W., Fang, W., Acta Mathematicae Sinica, 7, 354-362, 1991.
- [6] Kőházi-Kis Ambrus, A GAMF Közleményei, Kecskemét, XXIII,
- [7] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., Numerical recipes: The art of scientific computing, Cambridge University Press, 3rd edition, 2007.

- [8] Tikhonravov, A. V., Trubetskov, M. K., DeBell, G. W., *Applied Optics*, 35, 5493-5508, 1996.
- [9] Greiner, H., *Applied Optics*, 35, 5477-5483, 1996.
- [10] Pervak, V., Trubetskov, M. K., Tikhonravov, A. V., *Optics Express*, 19, 2371-2380, 2011.
- [11] Diels, J.C., Rudolph, W., *Ultrashort Laser Pulse Phenomena*, Academic Press, 2006.