



H U 0 0 0 2 1 4 6 5 9 B

(19) Országkód

HU



**MAGYAR
KÖZTÁRSASÁG**

**MAGYAR
SZABADALMI
HIVATAL**

SZABADALMI LEÍRÁS

(21) A bejelentés ügyszáma: P 93 02398
(22) A bejelentés napja: 1993. 08. 23.

(40) A közzététel napja: 1995. 09. 28.
(45) A megadás meghirdetésének a 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:

Szipócs Róbert, 70%, Budaörs (HU)
Krausz Ferenc, 30%, Pusztavám (HU)

(73) Szabadalmas:

Szilárdtestfizikai Kutatóintézet, Budapest (HU)

(74) Képviseelő:

S.B.G. & K. Budapesti Nemzetközi Szabadalmi
Iroda, Budapest

(54)

Diszperzív dielektrikumtükör és eljárás annak tervezésére

KIVONAT

A találmány dielektrikumtükör, amelynek az elektromágneses hullámokra vonatkozó nagy visszaverőképességű hullámhossz-tartománya van, és amely tükör egy hordozó sík felületén egymásra rétegzett, a felület normálisának irányában (x) változó törésmutatójú (n) rétegszerkezetet tartalmaz.

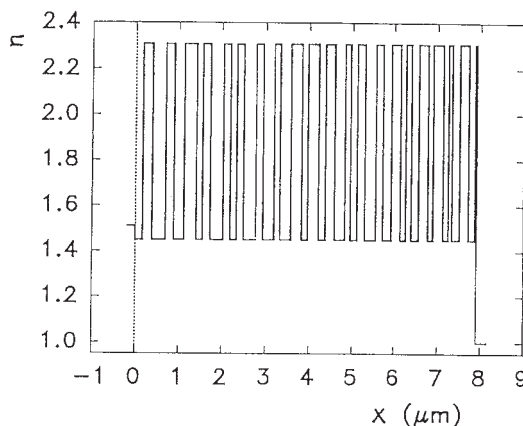
A találmány szerinti tükör rétegszerkezetében a törésmutató (n) normális irányú (x) változása az

$$n(x) = c \exp \left[\int_{-\infty}^x \frac{r(k)}{k} \exp \{i(\vartheta(k) - kx)\} dk \right]$$

függvény vagy az azt közelítő, rétegvastagságonként konstans értékű lépcsős függvény szerint van kialakítva, ahol c egy valós konstans; i a képzetes egység; k a hullámszám; r(k) a komplex amplitúdóreflexió függvénye; és $\vartheta(k) = \arg r(k)$ a létrehozandó fázis másodfokú tagot legalább tartalmazó függvénye. A rétegszerkezetben a $\tau(k)$ csoportkésleltetés hullámszám szerinti függvénye lineáris jellegű a tükör nagy visszaverőképességű tartományának legalább a felét meghaladó részén.

A tükörtervezési eljárásban az első lépésben egy p számú különböző frekvenciának megfelelő pontban adott $\tau(k_i)$ csoportkésleltetés célfüggvénynek megfelelő kiindulási dielektrikum szerkezetet vesznek fel intuitív módon vagy a vékonyréteg szerkezetek Fourier-transzformációs tulajdonságán alapuló direkt módon. A kö-

vetkező lépésben a kiindulási dielektrikum szerkezet optimalizálást hajtanak végre a $\tau(k_i)$ csoportkésleltetés célfüggvény pontoktól való eltérést jelentő hibafüggvény és a dielektrikumtükör reflexiójának amplitúdójára vonatkozó hibafüggvény együttes minimalizálásával.



1. ábra

A leírás terjedelme 8 oldal (ezen belül 3 lap ábra)

HU 214 659 B

A találmány tárgya olyan dielektrikumtükör, amelynek az elektromágneses hullámokra vonatkozó nagy visszaverőképességű hullámhossztartománya van, és amely tükrök egy hordozó sík felületén egymásra rétegzett, a felület normálisának irányában változó törésmutatójú rétegrendszer tartalmaz.

Mint ismeretes, a passzívan móduszkronizált ultrarövid impulzusú, más szóval femtomásodperces lézerek működésénél meghatározó szerepet játszanak a lézerrezonátoron belül elhelyezett optikai elemek diszperziós tulajdonságai (R. L. Fork és társai, *J. Quantum Electronics QE-19*, 500. oldal, [1983]). A lézerrezonátoron belül elhelyezett, Brewster-szögnél alkalmazott prizmapárok negatív csoportkésletetés diszperziója a pozitív anyagi (például üveg) diszperzióval kombinálva napjainkig megbízható, általános megoldást adott a lézerrezonátoron belüli diszperzió pontos beállítására (R. L. Fork és társa, *Optics Letters 9*, 150. oldal, [1984]). A femtomásodperces szilárdtestlézerekben az impulzusok kialakulása lézeraktív közegben létrejövő önfázismoduláció miatt a rezonátoron belüli eredően negatív – azaz anomális – csoportkésletetés diszperzió alapul (szolitonszerű impulzusformálódás), ezért e lézerekben a prizmapárok alapvető fontosságú alkotóelemeké váltak.

A prizmapárt tartalmazó femtomásodperces szilárdtestlézerek hátrányos tulajdonsága, hogy a csoportkésletetés diszperzió (GDD) erősen függ a hullámhossztól. E lézerekben ez az, alapvetően az alkalmazott prizmapároktól származó hullámhossz- (vagy frekvencia-) függés korlátozza az elérhető minimális impulzushosszat (F. Krausz és társai, *J. Quantum Electronics QE-28*, 2097. oldal, [1992]).

A lézerrezonátort alkotó dielektrikumtükörök diszperziós tulajdonságait nem sokkal az első femtomásodperces festéklézerek megjelenése után mind elméletileg (S. De Silvestri és társai, *Optics Letters 9*, 335. oldal, [1984]), mind kísérletileg (A. M. Weiner és társai, *Optics Letters 10*, 71. oldal, [1985]) vizsgálták. Felmerült annak gondolata is, hogy a dielektrikumtükörök diszperziós tulajdonságát mint impulzusformáló tényezőt alkalmazzák, és olyan rövidimpulzusú lézerrezonátort építsenek, amely állítható diszperzív elemként csak dielektrikumtüköröket tartalmaz (J. Heppner és társa, *Applied Physics Letters 47*, 453 [1985]; M. Yamashita és társai, *J. Quantum Electronics QE-23*, 2005. oldal, [1987]). Ezeknél a megoldásoknál azonban a frekvenciától függő csoportkésletetés a dielektrikum szerkezetekben kialakuló Fabry–Perot-szerű rezonanciákon alapult (dielektrikum Gires–Tournois interferométer, illetve két negyedhullámú tükrökből megfelelően összerakott kombinált dielektrikumtükör), melynek következtében a csoportkésletetés diszperziója még a prizmapárnál is erősebben változott a hullámhossz függvényében, így ezek a megoldások el sem terjedtek a femtomásodperces lézertechnikában.

A találmánnyal célunk az volt, hogy az ultrarövid impulzusú szilárdtestlézerekben a csoportkésletetés diszperzió hullámhosszfüggését lecsökkentsük, és a

prizmapár elhagyásával a rezonátor konfigurációt egyszerűbbé, megbízhatóbbá tegyük.

Találmányunk célkitűzése közelebről olyan diszperzív tulajdonságú dielektrikumtükör kialakítása volt, amely fény vagy egyéb elektromágneses impulzusokon visszaverődéskor a frekvenciától adott, praktikusan közel lineáris, monoton függvény szerint függő csoportkésletetést hoz létre széles, a dielektrikumtükör nagy visszaverőképességű ($R > 99\%$) frekvenciatartományának jelentős, legalább a felét meghaladó részén. A találmány szerinti dielektrikumtükör így alkalmazható az ultrarövid impulzusú lézertechnikában és ennek alkalmazásaiban, tágabb értelemben az elektromágneses, a mikrohullámú és ennél nagyobb frekvenciájú impulzustechnikában.

A találmányhoz az a felismerés vezetett, hogy ennek megfelelően a lézerrezonátorok egyébként is szerves részét képező dielektrikumtükörök diszperziós tulajdonságait megfelelő tervezési eljárás segítségével úgy alakítsuk ki, hogy a hullámhossztól (frekvenciától) függő csoportkésletetésük éppen a femtomásodperces szilárdtestlézerek működéséhez szükséges, a hullámhossztól csak kismértékben függő negatív csoportkésletetés diszperziót vigye be a rendszerbe. Ezáltal az impulzusok időbeli szétesésűsége kompenzálható, elkerülhető. További felismerésünk volt, hogy milyen változó törésmutató-profilú dielektrikumtükör az, amely erre alkalmas. Végül felismertük, hogy ezen ideálisnak nevezhető profil lépcsős függvénnyel – homogén törésmutatójú rétegekkel – való közelítése is meglepően jó eredményt ad.

Ezen felismerés realitását megalapozza, hogy a dielektrikumtükörökben stacionárius körülmények között felépülő, adott frekvenciához tartozó állóhullámú elektromágneses tér integrális nagysága és az ugyanahhoz a frekvenciához, mint középfrekvenciához tartozó csoportkésletetés között egyértelmű, arányos kapcsolat áll fenn (K. Ferencz, R. Szipőcs, *Optical Engineering* októberi száma [1993]). Megfelelő tervezési eljárással konstruálható olyan diszperzív dielektrikumtükör, melyben széles frekvenciatartományon az elektromágneses hullám behatolási mélysége, így az elektromágneses tér integrális nagysága, és így a csoportkésletetés is a frekvencia monoton, közel lineáris függvénye.

Felismerésünkkel összhangban találmányunk általános megoldása a bevezetőben definiált tükrökre vonatkozóan az, hogy a rétegrendszerben a törésmutató normális irányú változása

$$n(x) = c \exp \left[\int_{-\infty}^x \frac{r(k)}{k} \exp \{i(\phi(k) - kx)\} dk \right] \quad (I)$$

függvény szerinti vagy az azt közelítő, rétegvastagságonként konstans értékű lépcsős függvény szerinti. A képletben c egy valós konstans, i a képzetes egység, k a hullámszám, $r(k)$ a komplex amplitúdó-reflexió függvény, és $\phi(k) = \arg r(k)$ a létrehozandó fázis másodfokú tagot legalább tartalmazó függvénye. Ekkor a rétegrendszerre a k hullámszám szerinti $\tau(k)$ csoportkésletetés függvénye lineáris jellegű.

A tervezési eljárás két fő lépésből áll: az első lépésben egy p számú különböző frekvenciának megfe-

lelő pontban adott $\tau(k_i)$ csoportképletelés célfüggvénynek megfelelő kiindulási dielektrikumszerkezetet veszünk fel intuitív módon vagy a vékonyréteg-szerkezetek Fourier-transzformációs tulajdonságán alapuló direkt módon. A következő lépésben találmányunk szerint a kiindulási dielektrikumszerkezeten számítógépes optimalizálást hajtunk végre a $\tau(k_i)$ csoportképletelés célfüggvény pontjaitól való eltérést jellemző hibafüggvény és a dielektrikumtükör reflexiójának amplitúdójára vonatkozó hibafüggvény együttes minimalizálásával.

A kiindulási dielektrikumtükör megkonstruálása történhet direkt módon a dielektrikum vékonyrétegrendszerek Fourier-transzformációs tulajdonságát alapul véve (L. Sossi, Easti NVS Tead. Akad. Toim. fuss. Mat. 25, 171. oldal, [1976]) vagy intuitív módon, például a dielektrikumrétegek vastagságát algebrai vagy geometriai sor szerint megfelelően megválasztva. Az optimalizálási eljárásához különféle numerikus módszerek alkalmazhatóak (lásd például J. A. Dobrowolski és társa, Applied Optics 29, 2876. oldal, [1988]), egy fontos megkötéssel: a hibafüggvénynek tartalmaznia kell a négyzetes (vagy abszolút) eltérést mind a specifikált amplitúdótól, mind a specifikált fázistól, illetve így a csoportképletelésre jellemző függvénytől.

A találmányt egy kiviteli példa kapcsán, rajzok alapján ismertetjük közelebbről. A mellékelt rajzok a következők.

1. ábra: egy adott diszperzív dielektrikumtükör törésmutató-profilját mutatja.

2. ábra: az 1. ábrán szereplő törésmutató-profilra számolt, a rétegrendszerben kialakuló térerősség eloszlását szemlélteti a hullámhossz függvényében.

3. ábra: az 1. ábrának megfelelő, gyakorlatban megvalósított diszperzív dielektrikumtükör mért és számított csoportképletelési függvényét mutatja.

A következőkben a konkrét megvalósítást illusztráló, és technológiailag az egyik legegyszerűbben elkészíthető példa kedvéért bemutatjuk a találmányunk szerinti diszperzív dielektrikumtükör egy Ti:zafir lézerhez használatos kiviteli alakját.

Az adott dielektrikumtükör TiO_2 és SiO_2 egymással váltakozó rétegeiből áll, amelyeket vákuumpárológatással egymás után vittünk fel egy üveg hordozó síkra polírozott felületére.

Az 1. ábra a vékonyréteg-struktúra lépcsős függvényként változó n törésmutatójának profilját mutatja az x optikai vastagság függvényében, mégpedig a hordozóra merőleges, azaz annak normálisa irányában mutató változást.

A rétegszerkezet tervezése során a szakemberek körében jól ismert Fourier-transzformációs eljárás segítségével vettünk fel egy kiindulási rétegelrendezést. Esetünkben a SiO_2 törésmutatója $n_L=1,45$, a TiO_2 törésmutatója $n_H=2,31$ volt. Ezután a kiindulási dielektrikumszerkezeten számítógépes optimalizálást hajtottunk végre az elérendő $\tau(k_i)$ csoportképletelés célfüggvény pontjaitól való eltérést jelentő hibafüggvény és a dielektrikumtükör reflexiójának amplitúdójára vonatkozó hibafüggvény együttes minimalizálásával. A cél-

függvényt itt az említett lézer mérhető csoportképletelés diszperziójából számítottuk, annak kompenzálása céljából.

A következő táblázat oszlopaiban a 42 rétegre numerikus eljárással kapott eredményeket, az egymás utáni rétegvastagság-adatokat mutatjuk be (μm egységekben), ahol a SiO_2 negyedhullámú réteget L-lel, míg a TiO_2 negyedhullámú réteget H-val jelöltük.

1. táblázat

Hordozó		
0,8746 L	1,3090 L	1,0344 L
1,1360 H	0,6899 H	1,0867 H
1,5804 L	1,3003 L	0,6247 L
0,9773 H	1,2912 H	0,6587 H
1,1753 L	0,6874 L	0,8736 L
1,4465 H	1,2995 H	1,1185 H
0,7483 L	0,8073 L	0,6232 L
0,9600 H	1,0661 H	1,2079 H
1,5724 L	1,2475 L	0,6283 L
0,8492 H	0,6651 H	0,4309 H
0,7299 L	0,8142 L	0,9267 L
0,8378 H	0,9649 H	1,0710 H
1,4494 L	1,3478 L	0,7758 L
0,8468 H	0,8796 H	0,1600H
		Levegő

A referencia-hullámhosszat a kérdéses lézernek megfelelően 790 nm-re választottuk. Az 1. ábrán látható tükröt alkotó rétegek vastagsága a hordozó, az optikai vastagság irányában átlagban fokozatosan nő.

A 2. ábra az E elektromos térerő E^2 négyzetének eloszlását mutatja az x optikai vastagság és az L hullámhossz függvényében. Az ábrázolt eredményeket számítógépes modellezéssel kaptuk. Megfigyelhető, hogy az elektromágneses hullámok behatolási mélysége az L-es hullámhosszal közel lineárisan nő, ami széles, körülbelül 80 THz frekvenciatartományra lényegében állandó negatív csoportképletelés diszperziót biztosít. Szintén jól látható, hogy a tükröknek 700 és 900 nm között nagy visszaverő-képességű hullámhossz-tartománya van, mivel a térerő a hordozó felületénél, azaz az $x=0$ optikai vastagságnál lényegében nullává csökken.

A rétegrendszerben a törésmutató (n) normális irányú (x) változását találmányunk értelmében alapvetően itt is a következő jó közelítést adó egyenlet írja le:

$$n(x) = c \exp \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|r(k)|}{k} \exp \{i(\varphi(k) - kx)\} dk \right] \quad (I)$$

Mivel azonban az $n(x)$ függvény folytonos, amit technológiailag nehéz megvalósítani, így közelítő, rétegvastagságonként konstans értékű lépcsős függvény szerint alakítottuk ki $n(x)$ lehető legjobb közelítését. Megjegyezzük, hogy a folytonos profil esetén a réteg-

rendszer egyetlen rétegből is állhat, azonban ez a technika jelenlegi állása szerint más, gyakorlati akadályokba ütközik. A fenti képletben c egy valós konstans; i a képzetes egység; k a hullámszám; $r(k)$ a komplex amplitúdó-reflexió függvény. A $\phi(k)=\arg(r(k))$ fázis egy másodfokú tagot legalább tartalmazó függvény. A másodfokú tag előjele határozza meg, hogy a diszperzió negatív vagy pozitív.

A 3. ábrán a számított (folytonos vonallal ábrázolt) és a mért (kis négyzetekkel jelölt) τ csoportkésleltetés látható az L hullámhossz függvényében. Megállapíthatjuk, hogy a rétegrendszerben a $\tau(k)$ csoportkésleltetés k hullámszám szerinti függvénye lényegét tekintve lineáris jellegű.

A találmányunk szerinti dielektrikumtükörök csoportkésleltetés diszperziójuk révén, amely a természetes eredetű csoportkésleltetés diszperzióval szemben lehet negatív előjelű is, jól alkalmazhatók femtomásodperces impulzushosszú szilárdtestlézerekben. Itt a rezonátorban régebben szokásosan alkalmazott prizmapárokat lehet általuk kiváltani, így a rezonátor felépítése a prizmapár elhagyásával egyszerűbbé tehető, mérete csökkenthető, működése megbízhatóbbá tehető.

A fenti tükröt az említett lézerbe építettük be, az a tükrökön kívül más szélessávú diszperzív elemet nem tartalmazott. Méréseink szerint a lézer 9 fs-os impulzusokat állított elő, amely jelenleg a világon előállított legrövidebb fényimpulzus. Az impulzusidőt a diszperziós tükrök révén sikerült így leszorítani.

Igen jelentős lehet a találmányunk szerinti dielektrikumtükörök lézerezősítő rendszerekben való használata, ahol kisugárzott impulzusokat szét kell húzni (stretching), majd ennek inverzeként össze kell nyomni (compressing). Erre megfelelő, egymáshoz képest inverz diszperziós karakterisztikájú tükröpárt lehet használni.

A találmányunk szerinti diszperzív dielektrikumtükörök a mikrohullámok alsó frekvenciatartományától egészen a röntgensugárzás felső végéig jól realizálható eszközt nyújtanak az elektromágneses impulzustechnikában.

SZABADALMI IGÉNYPONTOK

1. Dielektrikumtükör, amelynek az elektromágneses hullámokra vonatkozó nagy visszaverő-képességű hullámhossz-tartománya van, és amely tükrök egy hordozó sík felületén egymásra rétegezett, a felület normálisának irányában változó törésmutatójú rétegrendszert tartalmaz, *azzal jellemezve*, hogy a rétegrendszerben a törésmutató (n) normális irányú (x) változása az

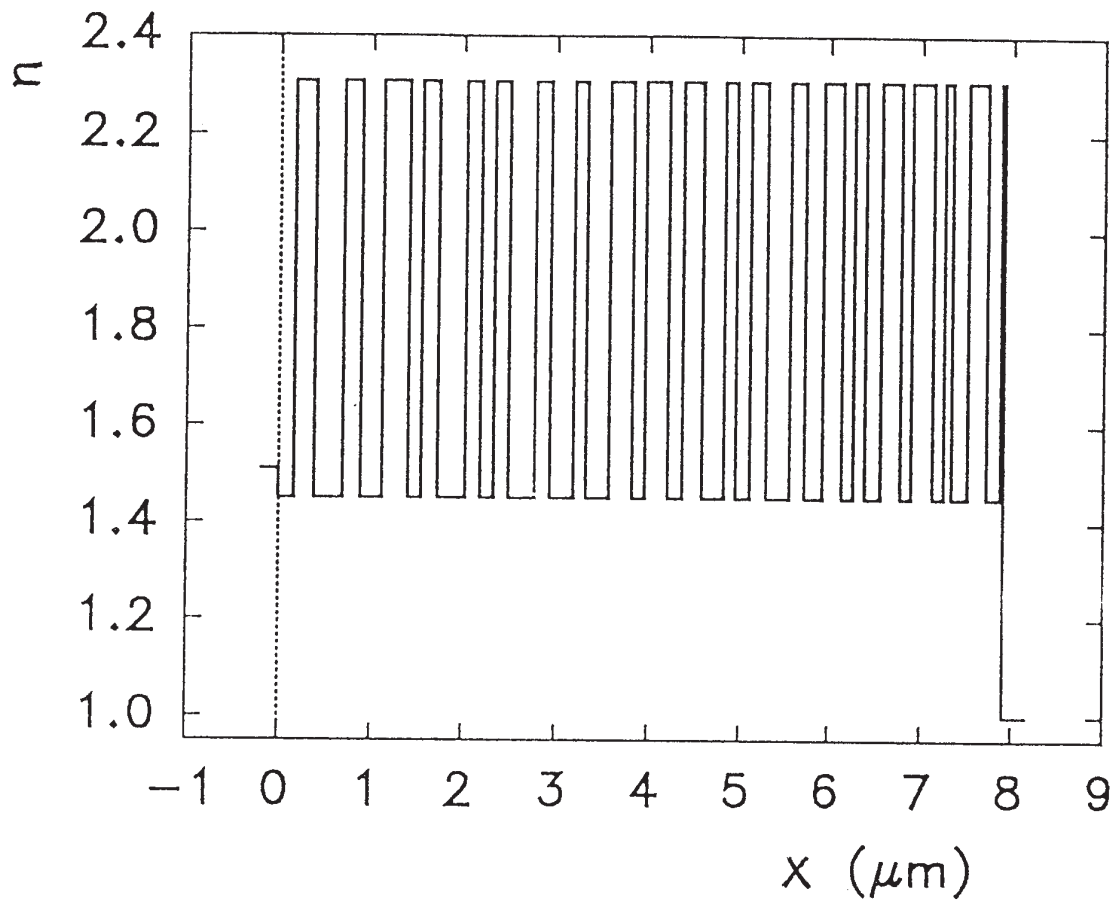
$$n(x) = c \exp \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|r(k)|}{k} \exp \{i(\phi(k) - kx)\} dk \right]$$

függvény vagy az azt közelítő, rétegvastagságonként konstans értékű lépcsős függvény szerint van kialakítva, ahol c egy valós konstans; i a képzetes egység; k a hullámszám; $r(k)$ a komplex amplitúdóreflexió függvény; és $\phi(k)=\arg r(k)$ a létrehozandó fázis másodfokú tagot legalább tartalmazó függvénye; továbbá a rétegrendszerben a $\tau(k)$ csoportkésleltetés hullámszám (k) szerinti függvénye lineáris jellegű a tükrök nagy visszaverő-képességű hullámhossz-tartományának legalább a felét meghaladó részén.

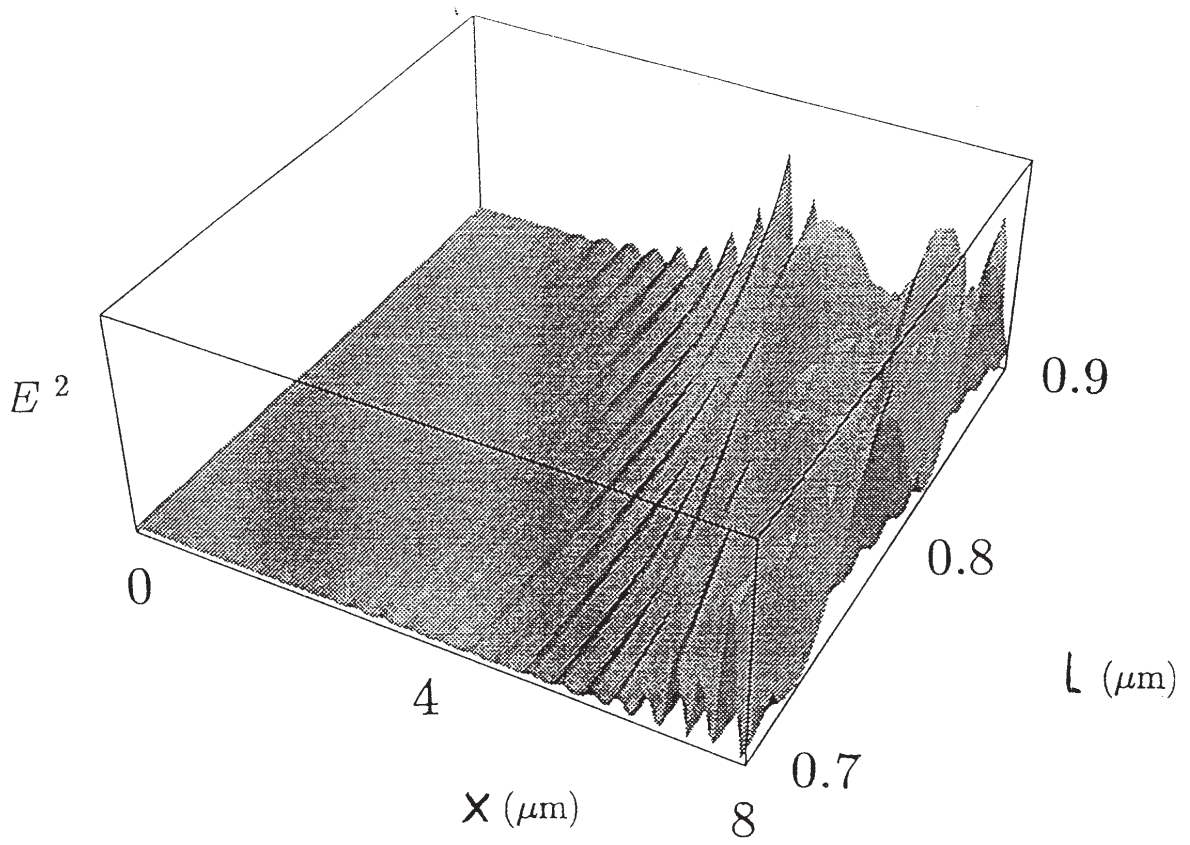
2. Az 1. igénypont szerinti dielektrikumtükör, *azzal jellemezve*, hogy a törésmutató (n) normális irányú (x) változása kétértékű lépcsős függvény, ahol egy-egy lépcsőnek egy-egy adott homogén törésmutatójú (n) réteg felel meg.

3. Az 1. vagy 2. igénypont szerinti dielektrikumtükör, *azzal jellemezve*, hogy a $\tau(k)$ csoportkésleltetés hullámszám (k) szerinti függvénye monoton csökkenő lineáris függvény.

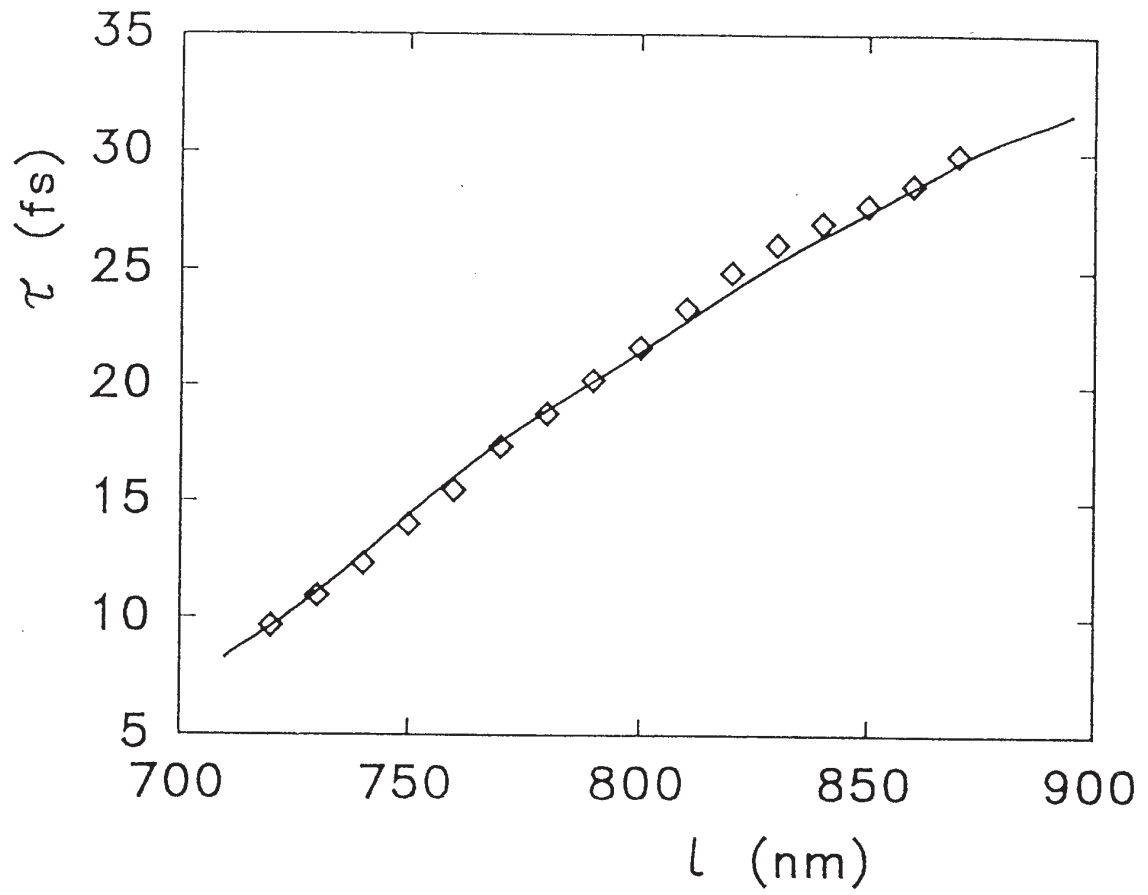
4. Eljárás az előző igénypontok bármelyike szerinti dielektrikumtükör tervezésére, amelyben az első lépésben egy p számú különböző frekvenciának megfelelő pontban adott $\tau(k_i)$ csoportkésleltetés célfüggvénynek megfelelő kiindulási dielektrikumszerkezetet veszünk fel intuitív módon vagy a vékonyréteg-szerkezetek Fourier-transzformációs tulajdonságán alapuló direkt módon, *azzal jellemezve*, hogy a következő lépésben a kiindulási dielektrikumszerkezetet számítógépes optimalizálást hajtunk végre a $\tau(k_i)$ csoportkésleltetés célfüggvény pontjaitól való eltérést jelentő hibafüggvény és a dielektrikumtükör reflexiójának amplitúdójára vonatkozó hibafüggvény együttes minimalizálásával.



1. ÁBRA



2. ÁBRA



3. ÁBRA

Kiadja a Magyar Szabadalmi Hivatal, Budapest
A kiadásért felel: Gyurcssekné Philipp Clarisse osztályvezető
Windor Bt., Budapest