

УДК 535.345.67

Первак Ю.О., д.ф.-м.н., проф.

Структурні особливості дисперсійних дзеркал з максимально високою негативною дисперсією групової затримки

Досліджено особливості структури дисперсійного дзеркала з робочим діапазоном від 780 до 820 нм, в якому дзеркало має лінійну залежність групової затримки (GD) і негативну дисперсію групової затримки (GDD). Середній рівень GDD дорівнює -2200 фс^2 . Дзеркало утворено нанесенням на скляну підкладку багатошарової структури (89 шарів) з оксидів танталу і кремнію, що чергуються. Повна фізична товщина багатошарової структури дорівнює 10001,3 нм. Аналіз просторово-спектрального розподілу електричного поля свідчить про наявність в структурі шести резонаторів, з яких лише один утворений окремим шаром, оптична товщина якого близька половині довжини хвилі середини робочого діапазону. Інші п'ять резонаторів утворені не менш як трьома сусідніми шарами, сумарна оптична товщина яких близька половині довжини хвилі середини робочого діапазону.

Ключові слова: дисперсійне дзеркало, негативна дисперсія групової затримки

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр-т. Глушкова 4г,
e-mail: yupervak@univ.kiev.ua

Yu.O. Pervak, Dr. Sci.

Structural features of dispersive mirrors with maximally high negative group delay dispersion

The features of structure of dispersive mirror with the operating range from 780 to 820 nm were investigated. A mirror has linear dependence of group delay (GD) and negative group delay dispersion (GDD). The middle level of GDD equals -2200 fs^2 . A mirror was formed by deposited multi-layer structure (89 layers) from the oxides of tantalum and silicon, that alternate on the glass substrate. The complete physical thickness of multi-layer structure equals 10001,3 nm. The analysis of spatially-spectral distribution of electric-field testifies to the presence in the structure of six resonators, from that only one forms a separate layer the optical thickness of that is near to the half of wavelength of middle of operating range. Other five resonators are formed no less as by three nearby layers the total optical thickness of that is near to the half of wavelength of middle of operating range.

Key words: dispersive mirror, negative group delay dispersion

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
03680, Kyiv, Glushkova st., 4g,
e-mail: yupervak@univ.kiev.ua

Статтю представив д.техн.н., проф. Погорілий С.Д.

Здатність багатошарових структур з півхвильовими резонаторами накопичувати енергію електромагнітного поля в резонаторі [1-3] зробила їх найбільш ефективними структурами для виготовлення різноманітних систем керування параметрами надкоротких світлових імпульсів фемто- і аттосекундної тривалості.

Впродовж останніх 20 років технології дисперсійних дзеркал (ДД) [4-17] стали широко застосовуватися у фізиці фемто- і аттосекундних імпульсів [18, 19]. В наш час оптичні елементи на основі ДД забезпечують точний контроль GD і GDD у різних частотних діапазонах, що дуже важливо при створенні фемтосекундних лазерів. Наприклад, точний контроль значень GD/GDD в діапазоні довжин хвиль в дві октави, дозволяє

генерувати імпульси тривалістю менше 2 фс у видимому діапазоні [19]. Саме тому, проектування ДД з бажаними спектральними характеристиками (відбиття та GDD), дуже важливе у фізиці надкоротких імпульсів.

Проектування складних надшвидких лазерних систем, вимагає знання властивостей ДД, щоб забезпечувати контроль GD/GDD у таких системах. Необхідно досконало визначати властивості ДД, що не завжди вдається внаслідок існуючих обмежень. Це досить ускладнює проектування надшвидких систем. Наприклад, розробка систем стиснення у часі надкоротких лазерних імпульсів за допомогою ДД, вимагає визначення необхідної кількості відбивань від ДД імпульсів, базою для визначення якої є тривалість вхідного імпульсу і

фазова модуляція. Нещодавно отримані результати [20] дозволили оцінити максимально досяжні значення GDD, що відповідають одному відбиттю. Необхідна кількість відбивань легко отримується діленням GDD вхідного імпульсу на отримане значення максимальної GDD для одного відбиття. Широкодіапазонна оптика на основі ДД з великими від'ємними значеннями GDD використовується для компенсації GDD, накопиченої імпульсом при проходженні через дисперсійні середовища, оптичні підсилювачі та ін. Чим ширший робочий спектральний діапазон, тим менше середнє значення GDD може бути отримано [9, 10, 14]. Це обумовлено принципом неви-

значеності і тісно пов'язане з фазовими властивостями багатошарових структур [21].

Мета даної роботи – дослідження особливості структури ДД з робочим діапазоном від 780 до 820 нм, в якому дзеркало має лінійну залежність групової затримки (GD) і максимальну негативну дисперсію групової затримки (GDD). Дзеркало утворено нанесенням на скляну підкладку багатошарової структури (89 шарів) з оксидів танталу (H) і кремнію (L), що чергуються. Повна фізична товщина структури дорівнює 10001,3 нм. Оптичні товщини на довжині хвилі середини робочого діапазону ($\lambda_0 = 800$ нм) усіх 89 шарів структури показано на рис.1.

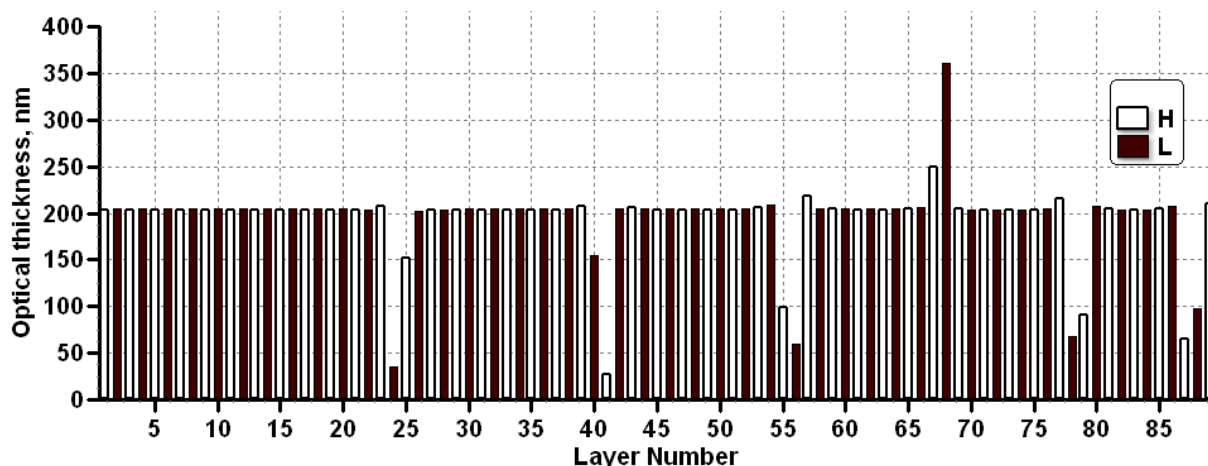


Рис.1. Оптичні товщини шарів (нумерація шарів починається від підкладки).

Процедура отримання конструкції ДД з використанням програмного пакету Optilayer [22] детально описана раніше [20]. Критерії пошуку конструкції визначалися умовами отримання максимального негативного значення GDD і відбиван-

ня не менше 99% для p -поляризованого світла при куті падіння 10° . Спектральна залежність відбивання R_p досліджуваного ДД показана на рис.2, а відповідні спектральні залежності GD і GDD на рис.3.

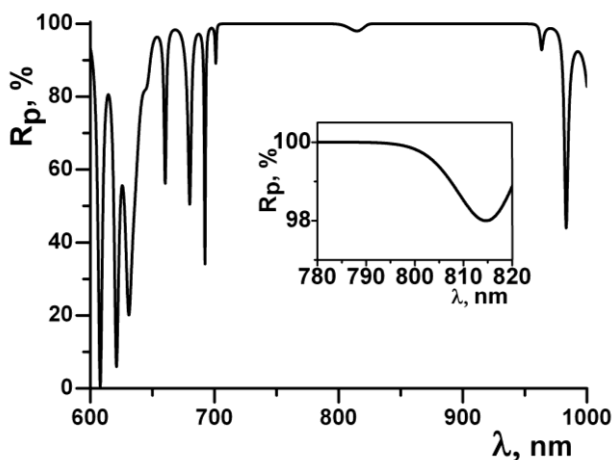


Рис.2. Спектральна залежність відбивання R_p при куті падіння 10° .

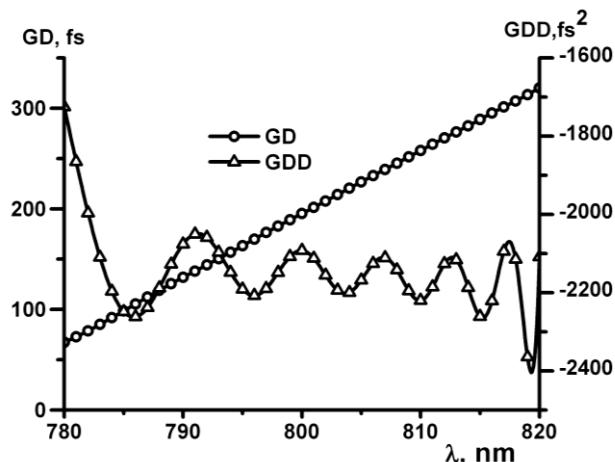


Рис.3. Спектральна залежність GD і GDD при куті падіння 10° .

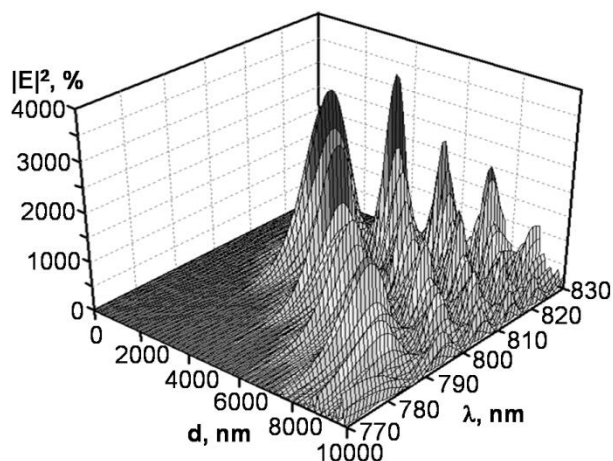


Рис.4. Просторово-спектральний розподіл ефективного поля ДД (просторова координата d відраховується від підкладки).

Аналіз просторово-спектрального розподілу електричного поля всередині багат шарової структури (рис.4) свідчить про наявність в ній шести резонаторів, в яких поле концентрується.

Таблиця.

Номер резонатору	Номер шару	Матеріал	Оптична товщина шару, нм	Оптична товщина резонатору, нм
1	86	SiO ₂	208,084	372,173
	87	Ta ₂ O ₅	65,798	
	88	SiO ₂	98,091	
2	77	Ta ₂ O ₅	216,797	375,788
	78	SiO ₂	67,292	
	79	Ta ₂ O ₅	91,699	
3	68	SiO ₂	361,719	361,719
4	55	Ta ₂ O ₅	98,877	377,119
	56	SiO ₂	59,250	
	57	Ta ₂ O ₅	218,992	
5	40	SiO ₂	155,449	387,765
	41	Ta ₂ O ₅	27,834	
	42	SiO ₂	204,482	
6	23	Ta ₂ O ₅	208,208	397,157
	24	SiO ₂	35,774	
	25	Ta ₂ O ₅	153,175	

Перший резонатор (нумерація резонаторів починається від зовнішнього середовища), найближчий по поверхні ДД, утворений 86, 87 і 88 шарами. З рис.1 видно, що усі парні шари мають нижчий показник заломлення (SiO₂), ніж непарні (Ta₂O₅). Отже центральний шар першого резонатору має високий показник заломлення. Оптична товщина 86, 87 і 88 шарів дорівнює 208,084; 65,998 і 98,091 нм, відповідно. Сумарна товщина

цих трьох шарів дорівнює 372,173 нм, що трохи менше половини довжини хвилі середини робочої області ДД.

Другий резонатор утворений 77, 78 і 79 шарами. Тут центральний шар має низький показник заломлення, а оптична товщина 77, 78 і 79 шарів дорівнює 216,797; 67,292 і 91,699 нм, відповідно. Сумарна товщина цих трьох шарів дорівнює 375,788 нм, що теж трохи менше половини довжини хвилі середини робочої області ДД. Відповідні значення параметрів для усіх резонаторів зведено в таблиці.

Оптична товщина резонаторів поступово збільшується від зовнішнього середовища до підкладки. В першому і п'ятому резонаторах центральний шар має високий показник заломлення, а в усіх інших центральний шар з низьким показником заломлення. Причому центральний шар завжди найтонший. З рис.4 видно, що електричне поле довгохвильових компонентів випромінювання концентрується в усіх шести резонаторах, в той час як електричне поле короткохвильових компонентів випромінювання концентрується в резонаторах, найближчих до поверхні, що контактує з зовнішнім середовищем. Це забезпечує більшу групову затримку довгохвильових компонентів електромагнітного поля відносно короткохвильових і негативну дисперсію групової затримки (див. рис.3).

Потрібно відзначити, що принципово відмінністю досліджуваного ДД є саме наявність в його конструкції пів хвильових резонаторів. І саме тому такі конструкції дзеркал називають дисперсійними дзеркалами, на відміну від традиційних чирпованих дзеркал [4], які вперше дозволили отримати негативну дисперсію групової затримки і вирішити проблему компенсації дисперсії надкоротких світлових імпульсів. В традиційних чирпованих дзеркалах не було півхвильових резонаторів, а збільшення GD з довжиною хвилі і значно менша, ніж в ДД негативна GDD досягалися за рахунок поступового збільшення оптичної товщини шарів від зовнішнього середовища до підкладки.

Таким чином, півхвильові резонатори, введені в звичайну чверть хвильову стопу дозволяють, завдяки ефекту накопичення енергії в резонаторах, отримувати максимальну високу негативну дисперсію групової затримки. При цьому пів хвильовий резонатор найчастіше утворюється не одним шаром з пів хвильовою оптичною товщиною, а комбінацією з трьох шарів. Центральний шар в такій комбінації завжди є найтоншим і може мати як низький, так і високий показник за-

ломлення. А сумарна оптична товщина комбінації трох менша половини довжини хвилі сере-

дини робочого спектрального діапазону дисперсійного дзеркала.

Список використаних джерел

1. *Pervak Yu.O., Fedorov V.V.* Features of spectral characteristics of multilayer structures with three half-wave resonators // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ser.: Phys.&Mathematics.– 2011. – N.2. – P. 201-204.(in Ukrainian).
2. *Pervak Yu.O., Fedorov V.V.* Features of electric-field distribution in 1-D photonic with three half-wave resonators of different nature // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ser.: Phys.&Mathematics. – 2012. – N.2. – P. 287-290.(in Ukrainian).
3. *Pervak Yu.O., Fedorov V.V.* Features of electric-field distribution in 1 - D photonic crystals with three half-wave defects // Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2012. – Vol.10. – №3. – P.467-476.(in Ukrainian).
4. *Szipocs R., Ferencz K., Spielmann C., Krausz F.* Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers // Opt. Lett. – 1994. – Vol.19. – N.3. - P. 201–203.
5. *Pervak V., Ahmad I., Trushin S. A., Major Z., Apolonski A., Karsch S., Krausz F.* Chirped-pulse amplification of laser pulses with dispersive mirrors // Opt. Express. – 2009. – Vol. 17. – N.21. – P.19204–19212.
6. *Dombi P., Racz P., Lenner M., Pervak V., Krausz F.* Dispersion management in femtosecond laser oscillators with highly dispersive mirrors // Opt. Express. – 2009. – Vol.17. – N.22. – P.20598–20604.
7. *Golubovic B., Austin R.R., Steiner-Shepard M.K., Reed M.K., Diddams C.A., Jones D.J., Van Engen A.G.* Double Gires-Tournois interferometer negative-dispersion mirrors for use in tunable mode-locked lasers // Opt. Lett. – 2000. – Vol.25. – N.4. – P.275–277.
8. *Pervak V., Ahmad I., Trubetskov M.K., Tikhonravov A.V., Krausz F.* Double-angle multilayer mirrors with smooth dispersion characteristics // Opt. Express. 2009. – Vol.17. –N.10. – P.7943–7951.
9. *Pervak V., Teisset C., Sugita A., Naumov S., Krausz F., Apolonski A.* High-dispersive mirrors for femtosecond lasers // Opt. Express. – 2008.- Vol.16. – N.14. – P.10220–10233.
10. *Pervak V., Pronin O., Razskazovskaya O., Brons J., Angelov I., Trubetskov M.K., Tikhonravov A.V., Krausz F.* High-dispersive mirrors for high power applications // Opt. Express. – 2012. – Vol.20. – N.4. – P.4503–4508.
11. *Birge J.R., Kartner F.X., Nohadani O.* Improving thin-film manufacturing yield with robust-optimization // Appl. Opt. – 2011. – Vol.50. – N.9. – P. C36–C40.
12. *Steinmeyer G.* Femtosecond dispersion compensation with multilayer coatings: toward the optical octave // Appl. Opt. – 2006. – Vol.45. – N.7. – P.1484–1490.
13. *Dombi P., Yakovlev V.S., O’Keeffe K., Fuji T., Lezius M., Tempea G.* Pulse compression with timedomain optimized chirped mirrors // Opt. Express. – 2005, - Vol.13. – N.26. – P.10888–10894.
14. *Pervak V.* Recent development and new ideas in the field of dispersive multilayer optics // Appl. Opt. – 2011. – Vol.50. – N.9. – P.C55–C61.
15. *Nohadani O., Birge J.R., Kartner F.X., Bertsimas D.J.* Robust chirped mirrors // Appl. Opt. – 2008. – Vol.47. – N.14. – P.2630–2636.
16. *Pervak V., Trubetskov M.K., Tikhonravov A.V.* Robust synthesis of dispersive mirrors // Opt. Express.– 2011. – Vol.19. – N.3. – P.2371–2380.
17. *Kartner F.X., Morgner U., Ell R., Schibli T., Fujimoto J.G., Ippen E.P., Scheuer V., Angelow G., Tschudi T.* Ultrabroadband double-chirped mirror pairs for generation of octave spectra // J. Opt. Soc. Am. B. – 2001. – Vol.18, - N.6. – P.882–885.
18. *Krausz F.* Attosecond physics // Rev. Mod. Phys. – 2009. – Vol.81. – N.1. – P.163–234.
19. *Wirth A., Hassan M.T., Grguras J., Gagnon J., Moulet A., Luu T.T., Pabst S., Santra R., Alahmed Z.A., Azzeer A.M., Yakovlev V.S., Pervak V., Krausz F., Goulielmakis E.* Synthesized light transients // Science. – 2011. – Vol.334. – P.195–200.
20. *Pervak V., Fedorov V., Pervak Yu.A., Trubetskov M.K.* Empirical study of the group delay dispersion achievable with multilayer mirrors // Opt. Express. –2013. – Vol.21. – N.15. – P.18311-18316.
21. *Tikhonravov A.V., Baumeister B.W., Popov K.V.* Phase properties of multilayers // Appl. Opt. – 1997. – Vol.36. – N.19. – P.4382–4392.
22. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K.* OptiLayer software // <http://www.optilayer.com>.

Надійшла до редколегії 15.11.13