

УДК 535.345.67

Первак Ю.О., д.ф.-м.н., проф.

Вплив поглинання на спектральні характеристики дисперсійних дзеркал

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

Yu.O. Pervak, Dr. Sci.

Impact of absorption on the spectral characteristics of dispersive mirrors

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

Досліджено вплив поглинання на спектральні і просторово-спектральні характеристики дисперсійного дзеркала з робочим діапазоном від 750 до 850 нм, в якому дзеркало має лінійну залежність групової затримки (GD) і негативну дисперсію групової затримки (GDD). Середній рівень GDD дорівнює -600 фс^2 . Дзеркало утворено нанесенням на скляну підкладку багатошарової структури (73 шари) з оксидів ніобію і кремнію, що чергуються. Повна фізична товщина багатошарової структури дорівнює 9331,7 нм. В структурі налічується сім резонаторів, кожен з яких утворений трьома сусідніми шарами. Центральний шар в двох резонаторах має високий показник заломлення, а в п'яти – низький., Електричне поле завжди концентрується в центральних і бічних шарах з низьким показником заломлення. Поглинання в шарах структури приводить до суттєвого зменшення коефіцієнта відбивання і напруженості електричного поля, що концентрується в резонаторах. Фазові характеристики (фаза відбитого випромінювання, його групової затримки і дисперсія групової затримки від поглинання не залежать).

Ключові слова: дисперсійне дзеркало, негативна дисперсія групової затримки

The influence of absorption on spectral and spatially spectral descriptions of dispersible mirror with the working range from 750 to 850 nm, in which a mirror has linear dependence of group delay (GD) and negative dispersion of group delay (GDD) were investigated. A mirror has linear dependence of group delay (GD) and negative group delay dispersion (GDD). The middle level of GDD equals -600 fs^2 . A mirror consists deposited multilayer structure (73 layers) from the oxides of niobium and silicon that alternate on the glass substrate. The complete physical thickness of multi-layer structure equals 9331,7 nm. Seven resonators are counted in a structure, each of which is formed three nearby layers. A central layer in two resonators has a high index of refraction, and in five – low., The electric field is always concentrated in central and lateral layers with the low index of refraction. Absorption in the layers of structure results in the substantial diminishing of coefficient reflection and tension of the electric field which is concentrated in resonators. Phase-shift-frequencies (phase of the reflected radiation, him a group delay and dispersion of group delay) does not depend from absorption.

Key words: dispersive mirror, negative group delay dispersion

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

Прогрес в технології дисперсійних дзеркал (ДД) [1-5] дозволив подолати проблему компенсації дисперсії при генерації фемто- і аттосекундних імпульсів [6, 7]. Оптичні елементи на основі ДД забезпечують точний контроль GD і GDD у різних частотних діапазонах, що дуже важливо при створенні фемтосекундних лазерів. Однак, отримання необхідного для компенсації дисперсії високого рівня негативної GDD часто вимагає використовувати схеми компенсаторів, що налічують десятки ДД. Якщо відбивання окремого

ДД дорівнює 99%, то в результаті лише десяти відбивань інтенсивність світлового сигналу зменшується майже на 10%. Тому відбивання кожного окремого ДД повинно бути максимально високим. Основним чинником зменшення відбивання є поглинання в багатошаровій структурі ДД. Окрім відбивання, іншими важливими характеристиками ДД є групової затримка (GD) і дисперсія групової затримки (GDD), вигляд спектральної залежності яких визначається структурою ДД. Необхідні спектральні характеристики ДД

отримують за допомогою чисельного моделювання їх структури. Керування цими характеристиками означає керування просторово-спектральним розподілом електромагнітного поля в структурі ДД.

Метою даної роботи було дослідження впливу поглинання в окремих шарах ДД на основні його характеристики. В якості модельного об'єкту було вибрано ДД, структура і спектральні характеристики якого при відсутності поглинання досліджено в роботі [8]. Дзеркало утворено нанесенням на скляну підкладку багат шарової структури (73 шари) з оксидів ніобію (Nb_2O_5) і кремнію (SiO_2), що чергуються. Повна фізична товщина багат шарової структури дорівнює 9331,7 нм. ДД має лінійну залежність групової затримки (GD) і максимальну негативну дисперсію групової затримки (GDD).

Процедура отримання досліджуваних характеристик ДД з використанням програмного пакету Optilayer [9, 10] детально описана раніше [11]. Вплив поглинання досліджено шляхом введення незалежних від частоти значень показника поглинання $k = 10^{-3}$, 10^{-4} і 10^{-5} .

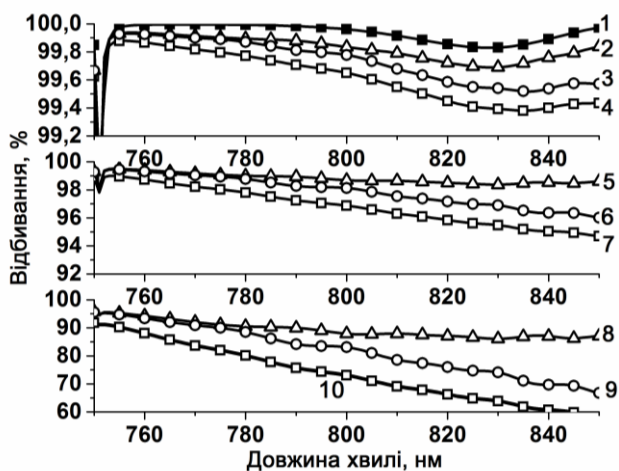


Рис.1. Відбивання ДД без поглинання (1) та при наявності поглинання лише в шарах SiO_2 (3, 6, 9), лише в шарах Nb_2O_5 (2, 5, 8), в усіх шарах (4, 7, 10). Показник поглинання k дорівнює: 0 (1), 10^{-5} (2, 3, 4), 10^{-4} (5, 6, 7), 10^{-3} (8, 9, 10),

На рис.1 приведено спектральні зміни коефіцієнта відбивання ДД при відсутності і наявності поглинання в шарах структури ДД. При відсутності поглинання коефіцієнт відбивання вищий за 99,8% в усьому робочому діапазоні ДД (750 – 850 нм). При наявності поглинання лише в шарах Nb_2O_5 коефіцієнт відбивання зменшується, причому це зменшення буде меншим порівняно з

випадком поглинання лише в шарах SiO_2 . Це пояснюється тим, що сумарна фізична товщина шарів Nb_2O_5 складає 3796,112 нм, а шарів SiO_2 – 5547,435 нм. Відповідні сумарні значення оптичної товщини майже однакові і складають 8593,741 нм для шарів Nb_2O_5 та 8111,148 нм для шарів SiO_2 на довжині хвилі середини робочого діапазону (800 нм). Якщо поглинання відбувається в усіх шарах коефіцієнт відбивання зменшується ще більше, але це зменшення не є простою сумою зменшення відбивання при поглинанні в шарах Nb_2O_5 і SiO_2 . Це пов'язано із тим, що загальне зменшення коефіцієнта відбивання залежить від зменшення амплітуди електромагнітної хвилі внаслідок поглинання при багаторазовому проходженні окремих шарів структури ДД. При одноразовому проходженні шару товщиною d амплітуда хвилі зменшується в $\exp(-2\pi k/\lambda)$ разів. При $k = 10^{-3}$ в усіх шарах ДД на довгохвильовій межі робочого діапазону коефіцієнт відбивання зменшується до 60%.

На відміну від відбивання, фазові характеристики (зміна фази при відбиванні $\varphi = \text{Im}(\Gamma)/\text{Re}(\Gamma)$, де Γ – амплітудний коефіцієнт відбивання; група затримка $GD = d\varphi/d\omega$; дисперсія групової затримки $GDD = d^2\varphi/d\omega^2$) від поглинання не залежать. Для прикладу на рис.2-4 наведено спектральні залежності зміни фази, групової затримки і дисперсії групової затримки, відповідно. Спектральні залежності фазових характеристик абсолютно однакові при будь-яких значеннях показника поглинання k .

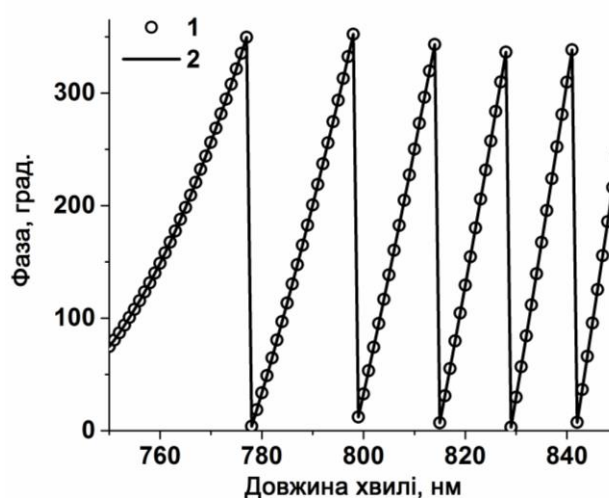


Рис.2. Спектральна залежність зміни фази при відбиванні при відсутності (1) і наявності (2) поглинання.

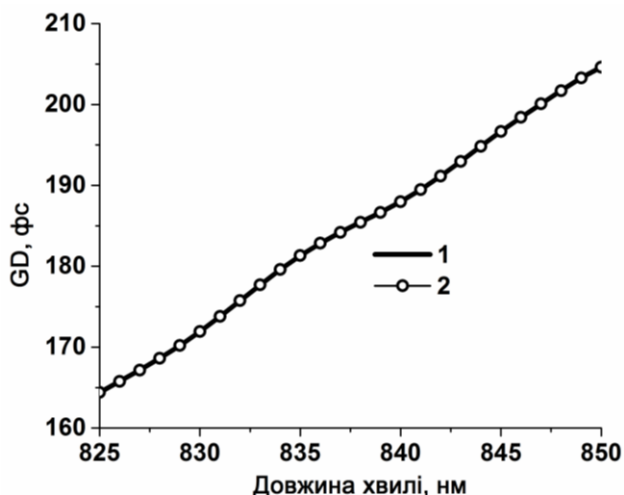


Рис.3. Спектральна залежність GD при відсутності поглинання (1) і при наявності ахроматичного поглинання (2).

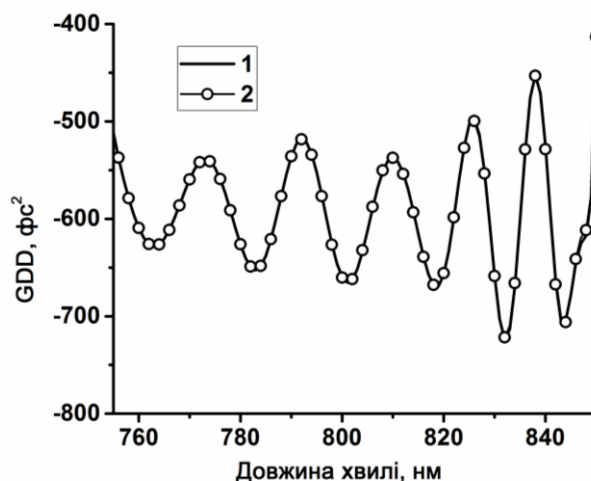


Рис.4. Спектральна залежність GDD при відсутності поглинання (1) і при наявності ахроматичного поглинання (2).

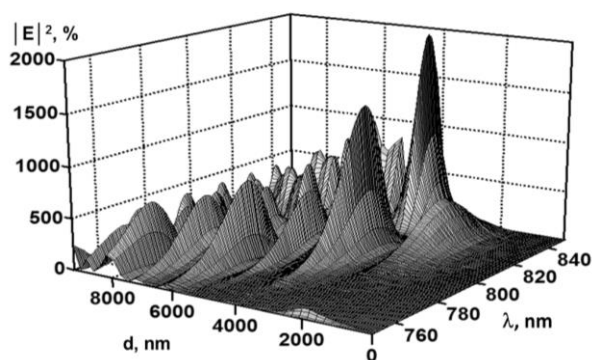


Рис.5. Просторово-спектральний розподіл електричного поля $|E|^2$ при відсутності поглинання.

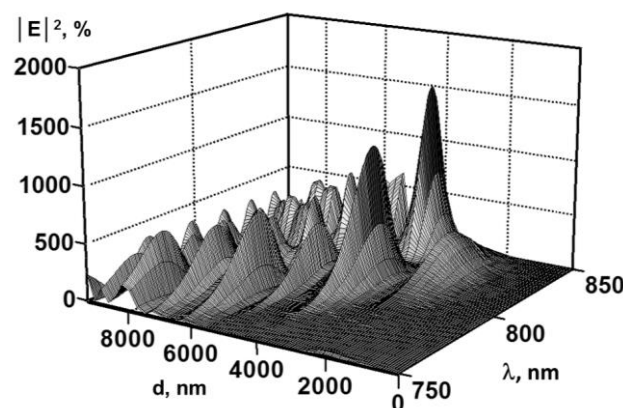


Рис.6. Просторово-спектральний розподіл електричного поля $|E|^2$ при наявності поглинання в усіх шарах ДД ($k = 10^{-3}$).

Раніше було показано [8], що принциповою відмінністю досліджуваного ДД є наявність в його конструкції пів хвильових резонаторів. І саме тому такі конструкції дзеркал називають дисперсійними дзеркалами, на відміну від традиційних чирпованих дзеркал [1], 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. В ДД з резонаторами необхідні значення GD і GDD досягаються завдяки

концентрації електричного поля в резонаторах. Наявність поглинання зменшує абсолютну величину електричного поля в резонаторах, але залишає незмінним загальний вигляд просторово-спектрального розподілу електричного поля.

Таким чином, для виготовлення дисперсійних дзеркал з високим рівнем відбивання і необхідними фазовими характеристиками необхідно використовувати матеріали з надзвичайно низьким поглинанням. Показник поглинання матеріалів повинен бути не менш ніж на порядок меншим за значення $k = 10^{-5}$. Зміна фазових характеристик ДД відбуватиметься лише при зміні величини дійсної частини комплексного показника заломлення.

Список використаних джерел

1. Szipocs R. Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers / R. Szipocs, K. Ferencz, C. Spielmann, F. Krausz // *Opt. Lett.*—1994—**19**— N.3.— P.201–203.
2. Pervak V. High-dispersive mirrors for femtosecond lasers/ V.Pervak, C.Teisset, A.Sugita, et al.//*Opt.Express.* — 2008.—**16** — N.14. — P. 10220–10233.
3. Pervak V. High-dispersive mirrors for high power applications / V. Pervak, O. Pronin, O. Razskazovskaya, et al. // *Opt. Express.* — 2012.—**20**. — N.4. — P.4503–4508.
4. Pervak V. Recent development and new ideas in the field of dispersive multilayer optics / V. Pervak // *Appl.Opt.*—2011. —**50**. — N.9. — P.C55–C61.
5. Nohadani O., Birge J.R., Kartner F.X., Bertsimas D.J. Robust chirped mirrors / O. Nohadani, J.R. Birge, F.X. Kartner, D.J. Bertsimas // *Appl. Opt.* — 2008.—**47**. — N.14. — P.2630–2636.
6. Pervak V. Robust synthesis of dispersive mirrors / V. Pervak, M.K. Trubetskov, A.V. Tikhonravov // *Opt.Express.*—2011.—**19**—N.3.—P.2371–2380.
7. Krausz F. Attosecond physics / F. Krausz // *Rev. Mod. Phys.* — 2009. —**81**. — N.1. — P.163–234.
8. Pervak Yu.O. Features of the structure of dispersive mirrors with negative group delay / Yu.O. Pervak // *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ser.: Phys.&Mathematics.* — 2015. - №2. — P. 259–262.(in Ukrainian).
9. Tikhonravov A.V. Phase properties of multilayers / A.V. Tikhonravov, B.W. Baumeister, K.V. Popov // *Appl. Opt.* — 1997. —**36**. — N.19. — P.4382–4392.
10. Tikhonravov A.V. OptiLayer software / A.V. Tikhonravov., M.K. Trubetskov// <http://www.optilayer.com>.
11. Pervak V. Empirical study of the group delay dispersion achievable with multilayer mirrors / V. Pervak, V. Fedorov, Yu.A. Pervak, M.K. Trubetskov // *Opt. Express.* —2013.—**21**. — N.15. — P.18311–18316.

References

1. SZIPOCS, R. et al.(1994) Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers. *Opt. Lett.* 19 (3). p. 201–203.
2. PERVAK, V. et al. (2008) High-dispersive mirrors for femtosecond lasers. *Opt. Express.* 16 (14). p.10220–10233.
3. PERVAK, V. et al.(2012) High-dispersive mirrors for high power applications. *Opt. Express.* 20 (4). p.4503–4508.
4. PERVAK, V. (2011) Recent development and new ideas in the field of dispersive multilayer optics. *Appl. Opt.* 50 (9). p. C55–C61.
5. NOHADANI, O. et al. (2008) Robust chirped mirrors. *Appl. Opt.* 47 (14). p.2630–2636.
6. PERVAK, V. & Trubetskov, M., Tikhonravov, A. (2011) Robust synthesis of dispersive mirrors. *Opt. Express.* 19. N.3. P.2371–2380.
7. KRAUSZ, F. (2009) Attosecond physics. *Rev. Mod. Phys.* 81 (1). p.163–234.
8. PERVAK Yu.O. (2015) Features of the structure of dispersive mirrors with negative group delay. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ser.: Phys.&Mathematics.* №2. P. 259–262.(in Ukrainian).
9. TIKHONRAVOV, A.V. & BAUMEISTER, B.W. POPOV, K.V. Phase properties of multilayers. *Appl. Opt.* 36 (19). p.4382–4392.
10. TIKHONRAVOV A.V. & TRUBETSKOV M.K. OptiLayer software. <http://www.optilayer.com>.
11. PERVAK, V. et al.(2013) Empirical study of the group delay dispersion achievable with multilayer mirrors. *Opt. Express.* 21 (15). p.18311–18316.

Надійшла до редколегії 12.10.2015