

УДК 535.345.67

Первак Ю.О., д.ф.-м.н., проф.

Yu.O. Pervak, Dr. Sci.

### Широкопугове дисперсійне дзеркало з негативною дисперсією групової затримки

### Wide band dispersive mirror with negative group delay dispersion

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

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

Досліджено особливості структури 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  $-800 \text{ fs}^2$ . Дзеркало утворено нанесенням на скляну підкладку багатошарової структури (86 шарів) з оксидів танталу і кремнію, що чергуються. Повна фізична товщина багатошарової структури дорівнює 10053 нм. Аналіз просторово-спектрального розподілу електричного поля свідчить про наявність в структурі семи резонаторів, з яких три утворені окремими шарами з високим показником заломлення, а чотири - 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

The features of structure of dispersive mirror with the operating range from 750 to 850 nm were investigated. A mirror has linear dependence of group delay (GD) and negative group delay dispersion (GDD). The middle level of GDD equals  $-800 \text{ fs}^2$ . A mirror was formed by deposited multi-layer structure (86 layers) from the oxides of tantalum and silicon, that alternate on the glass substrate. The complete physical thickness of multi-layer structure equals 10053 nm. The analysis of spatially-spectral distribution of electric-field testifies to the presence in the structure of seven resonators, from which three is formed separate layers with the high index of refraction, and four - no less as by three nearby layers the total optical thickness of which is near the half of wave-length middle of working range.

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 негативною GDD часто вимагає використовувати схеми компенсаторів, що налічують десятки ДД. Для генерації надкоротких світлових імпульсів потрібно суттєво розширювати спектральний діапазон точного контролю значень GD/GDD. Спектральний діапазон довжин хвиль в дві октави, дозволяє генерувати імпульси тривалістю менше 2 фс у видимому діапазоні [4]. Саме тому, проектування ДД з бажаними спектральними характеристиками (відбиття та

GDD), дуже важливе у фізиці надкоротких імпульсів.

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. Це обумовлено принципом невизначеності і тісно пов'язане з фазовими властивостями багатошарових структур [5]. Нещодавно отримані результати [8] дозволили оцінити максимально досяжні значення GDD, що відповідають одному відбиттю. Проте поза увагою залишилися особливості будови таких ДД.

Тому в даній роботі досліджено особливості структури ДД з максимально високою негатив-

вною GDD на прикладі ДД з робочим діапазоном від 750 до 850 нм, в якому ДД має лінійну залежність групової затримки (GD) і максимальну негативну дисперсію групової затримки (GDD). Дзеркало утворено нанесенням на скляну підкладку багат шарової структури (86 шарів) з оксидів

танталу (H) і кремнію (L), що чергуються. Повна фізична товщина структури дорівнює 10053 нм. Оптичні товщини на довжині хвилі середини робочого діапазону ( $\lambda_0 = 800$  нм) усіх 86 шарів структури показано на рис.1.

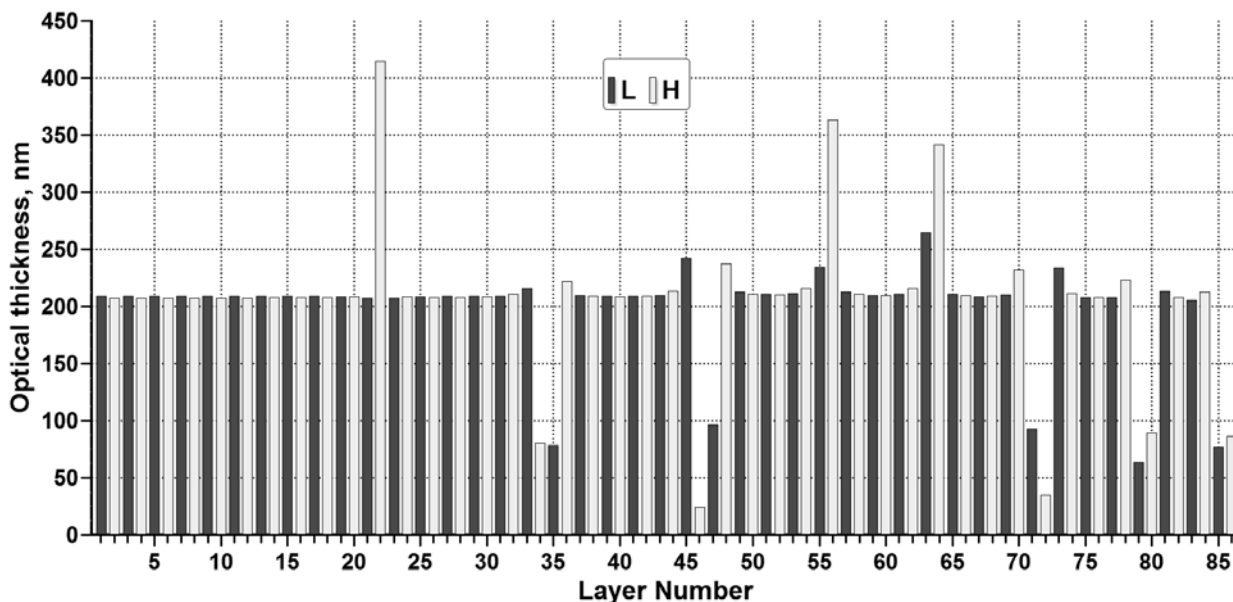


Рис.1. Оптичні товщини шарів (нумерація шарів починається від підкладки).

Процедура отримання конструкції ДД з використанням програмного пакету Optilayer [9, 10] детально описана раніше [11]. Критерії пошуку конструкції визначалися умовами отримання максимального негативного значення GDD і відбиван-

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

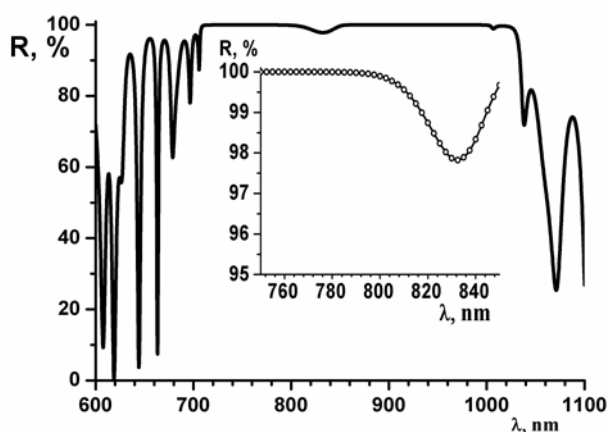


Рис.2. Спектральна залежність відбивання  $R_p$  при куті падіння  $10^\circ$ .

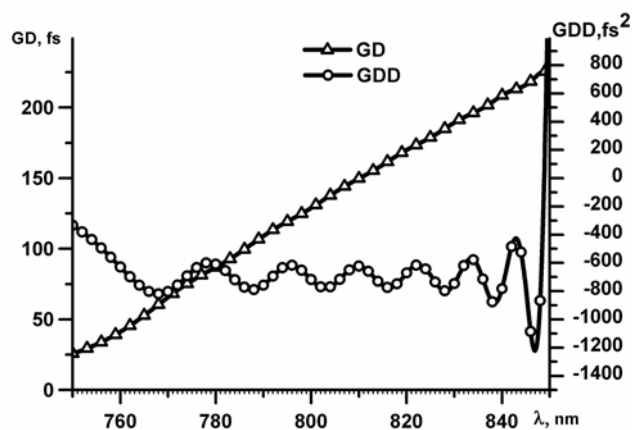


Рис.3. Спектральна залежність GD і GDD при куті падіння  $10^\circ$ .

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

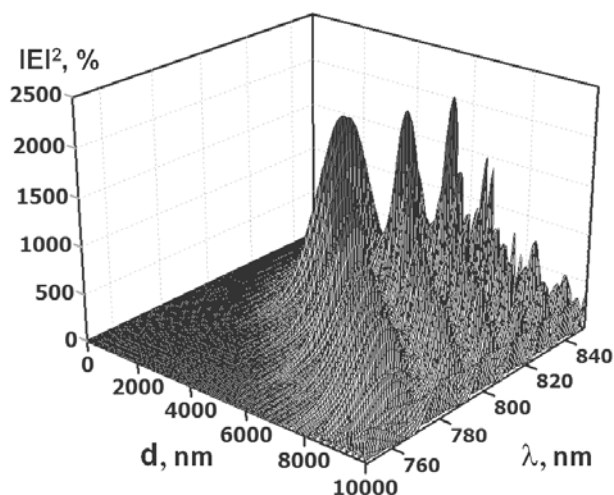


Рис.4. Просторово-спектральний розподіл електричного поля ДД (просторова координата  $d$  відраховується від підкладки)

Таблиця 1

Характеристики резонаторів

Номер резонатору	Номер шару	Матеріал	Оптична товщина шару, нм	Оптична товщина резонатору, нм
1	81	SiO <sub>2</sub>	213,470	366,478
	80	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	89,883	
	79	SiO <sub>2</sub>	63,125	
2	73	SiO <sub>2</sub>	233,757	361,602
	72	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	35,231	
	71	SiO <sub>2</sub>	92,614	
3	64	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	343,399	343,399
4	56	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	365,157	365,157
	47	SiO <sub>2</sub>	96,728	
	46	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	24,448	
5	45	SiO <sub>2</sub>	242,5	363,676
	35	SiO <sub>2</sub>	78,118	
	34	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	80,829	
6	33	SiO <sub>2</sub>	215,706	374,653
	22	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	417,059	
7	22	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	417,059	417,059

Перший резонатор (нумерація резонаторів починається від зовнішнього середовища), найближчий по поверхні ДД, утворений 79, 80 і 81 шарами. З рис.1 видно, що усі парні шари мають вищий показник заломлення (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), ніж непарні (SiO<sub>2</sub>). Отже центральний шар першого резонатору має високий показник заломлення. Оптична товщина 79, 80 і 81 шарів дорівнює 63,125; 89,883 і 213,470 нм, відповідно. Сумарна товщина цих трьох шарів дорівнює 366,478 нм, що трохи менше половини довжини хвилі середини ро-

бочої області ДД. Комбінацію 79, 80 і 81 шарів можна розглядати як деякий еквівалентний шар з відносно низьким показником заломлення. Це підтверджується характером просторово-спектрального розподілу електричного поля. Електричне поле концентрується в 81 шарі поблизу межі 80 і 81 шарів. Мінімальні значення поля досягаються на інтерфейсах 78 – 79 і 81- 82 шарів.

Другий резонатор утворений 71, 72 і 73 шарами. Тут центральний шар має високий показник заломлення, але він дуже тонкий. Комбінація 71, 72 і 73 шарів, як і в першому резонаторі, еквівалентна одному шару з низьким показником заломлення. Сумарна товщина цих трьох шарів дорівнює 361,602 нм, що теж трохи менше половини довжини хвилі середини робочої області ДД. Відповідні значення параметрів для усіх резонаторів зведено в таблиці.

Також утворені з трьох шарів п'ятий і шостий резонатори. Вони також можуть бути представлені еквівалентними шарами з низьким показником заломлення. П'ятий резонатор утворений 45, 46 і 47 шарами. Електричне поле концентрується в 45 шарі поблизу інтерфейсу 45 – 46 шарів. В шостому резонаторі поле концентрується на інтерфейсі 33 – 34 шарів.

Третій, четвертий і сьомий резонатор утворені 64, 56 і 22 шарами, відповідно. Ці шари мають високий показник заломлення (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) і електричне поле концентрується на їх інтерфейсах та мінімальне всередині. Оптична товщина резонаторів збільшується в напрямку до підкладки.

Електричне поле довгохвильових компонентів випромінювання концентрується в усіх семи 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 принциповою 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 [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.

Таким чином, півхвильові резонатори, введені в звичайну чверть хвильову стопу дозволяють, завдяки ефекту накопичення енергії в резонато-

рах, отримувати максимальну високу негативну дисперсію групової затримки. При цьому півхвильовий резонатор утворюється як одним шаром, так і комбінацією з трьох шарів. А сумарна оптична товщина комбінації трохи менша половини довжини хвилі середини робочого спектрального діапазону дисперсійного дзеркала.

### 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. – Vol.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. – Vol.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. – Vol.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. – Vol.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. – Vol.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. – Vol.19. – N.3. – P.2371–2380.
7. *Krausz F.* Attosecond physics / F. Krausz // *Rev. Mod. Phys.* – 2009. – Vol.81. – N.1. – P.163–234.
8. *Wirth A.* Synthesized light transients / A. Wirth, M.T. Hassan, V. Pervak, et al. // *Science.* – 2011. – Vol.334. – P.195–200.
9. *Tikhonravov A.V.* Phase properties of multilayers / A.V. Tikhonravov, B.W. Baumeister, K.V. Popov // *Appl. Opt.* – 1997. – Vol.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. – Vol.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. WIRTH, A. et al. (2011) Synthesized light transients. *Science.* 334. p.195–200.
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 25.03.14