

PACS numbers: 42.50.Nn, 42.65.Re, 42.79.Fm, 42.79.Wc, 78.47.-p, 78.67.Pt, 82.53.Mj

Многослойные наноструктуры с высокой временной и пространственной дисперсией

Ю. А. Первак, В. Ю. Первак

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
просп. Акад. Глушкова, 2,
03022 Київ, Україна

Синтезированы многослойные структуры, содержащие 138, 165 и 202 чередующихся слоев Nb_2O_5 и SiO_2 на стеклянной подложке, которые характеризуются линейной спектральной зависимостью групповой задержки (GD) в диапазоне от 1520 до 1560 нм. Для 138-, 165- и 202-слойных структур изменение GD в указанном спектральном диапазоне равно 1544, 2056 и 2544 фс, а величина пространственной дисперсии — 2,55, 3,4 и 4,2 мкм/нм соответственно. Высокая пространственная дисперсия полученных структур и линейность спектральной зависимости групповой задержки обеспечивают высокую отрицательную дисперсию групповой задержки ($< 2 \cdot 10^{-5}$ фс²).

Синтезовано багат шарові структури з 138, 165 і 202 шарів Nb_2O_5 та SiO_2 , що чергуються, на скляній підложці. Структури характеризуються лінійною спектральною залежністю групової затримки (GD) у діапазоні від 1520 до 1560 нм. Для 138-, 165- і 202-шарових структур зміна GD у зазначенім спектральнім діапазоні складала 1544, 2056 і 2544 фс, а величина просторової дисперсії — 2,55, 3,4 і 4,2 мкм/нм відповідно. Висока просторова дисперсія одержаних структур і лінійність спектральної залежності групової затримки забезпечують високу негативну дисперсію групової затримки ($< 2 \cdot 10^{-5}$ фс²).

The multilayer structures, which consist of 138, 165 and 202 alternating layers of Nb_2O_5 and SiO_2 on the glass substrate, are synthesized. All structures have the linear spectral dependence of the group delay (GD) at range from 1520 to 1560 nm. The GD change in the range indicated is 1544, 2056 and 2544 fs, and the value of spatial dispersion is 2.55 $\mu\text{m}/\text{nm}$, 3.4 $\mu\text{m}/\text{nm}$ and 4.2 $\mu\text{m}/\text{nm}$ for 138-, 165- and 202-layers structure, respectively. The high spatial dispersion of fabricated structures and the linearity of spectral dependence of the group delay provide high negative group-delay dispersion ($< 2 \cdot 10^{-5}$ fs²).

Ключевые слова: дисперсионное многослойное покрытие, временная

дисперсия, пространственное смещение.

(Получено 28 ноября 2007 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в развитии оптики сверхкоротких световых импульсов и нанотехнологий привел к созданию нового научного направления — световой электроники [1]. Световые импульсы длительностью в несколько фемтосекунд стали рабочим инструментом фундаментального изучения электронных процессов в атомах и молекулах твердого тела, жидкостей и газов [2–7]. В значительной мере эти успехи обязаны решению фундаментальной проблемы генерации и управления сверхкороткими световыми импульсами фемто- и аттосекундной длительности [8, 9]. Генерация и управление сверхкороткими световыми импульсами во многом стала возможной благодаря созданию и интенсивному развитию уникальных многослойных наноструктур — чирпованных зеркал, позволяющих управлять временной дисперсией световых импульсов [10]. Необходимость получения все более коротких световых импульсов стимулировала совершенствование методов синтеза чирпованных зеркал [11–13], а также выяснение граничных возможностей таких структур [14]. Было высказано предположение, что при современном уровне развития технологии реально получить рабочий диапазон чирпованного зеркала до двух третей оптической октавы [14]. Однако вскоре удалось синтезировать и изготовить чирпованные зеркала с рабочим диапазоном в 1,5 октавы [15]. Особенностью чирпованных зеркал является линейность волновой зависимости групповой задержки, что позволяет использовать их не только как элементы компенсации временной дисперсии, но и как базовые элементы устройств многоканальной частотной селекции [16–19]. Была предложена эмпирическая модель, позволяющая оценить параметры многослойной структуры, обеспечивающей получение требуемой временной или пространственной дисперсии [19]. Однако предложенная модель дает существенно заниженные максимальные значения достижимой групповой задержки и пространственного смещения, что будет показано в данной работе.

2. РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

При заданных параметрах многослойной структуры (q — число слоев; n_r — показатель преломления; k_r — экстинкция; d_r — толщина r -го слоя; n_m и k_m — оптические постоянные подложки, n_0 и k_0

— оптические постоянные внешней среды; θ_0 — угол падения) легко вычисляются матричным методом [20] спектр отражения $R(\lambda)$, изменение фазы при отражении $\phi(\lambda)$, групповая задержка GD и дисперсия групповой задержки GDD :

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*, \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\operatorname{Im} \left[\eta_0 (CB^* - BC^*) \right]}{(\eta_0^2 BB^* - CC^*)}, \quad (2)$$

$$GD = -\frac{d\phi}{d\omega} = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\phi}{d\lambda}, \quad (4)$$

$$GDD = -\frac{d^2\phi}{d\omega^2} = -\frac{\lambda^2}{(2\pi c)^2} \left(\lambda^2 \frac{d^2\phi}{d\lambda^2} + 2\lambda \frac{d\phi}{d\lambda} \right). \quad (5)$$

При этом характеристическая матрица ансамбля имеет вид

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left(\prod_{r=1}^q \begin{bmatrix} \cos \delta_r & (i \sin \delta_r) / \eta_r \\ i \eta_r \sin \delta_r & \cos \delta_r \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_m \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где фазовая толщина r -го слоя

$$\delta_r = \frac{2\pi N_r d_r \cos \theta_r}{\lambda}, \quad (7)$$

оптические проводимости слоев и подложки —

$$\begin{aligned} \eta_r &= \chi_{vac} N_r \cos \theta_r \text{ для ТЕ волн и} \\ \eta_r &= \chi_{vac} N_r / \cos \theta_r \text{ для ТМ волн,} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \eta_m &= \chi_{vac} N_m \cos \theta_m \text{ для ТЕ волн и} \\ \eta_m &= \chi_{vac} N_m / \cos \theta_m \text{ для ТМ волн;} \end{aligned} \quad (9)$$

λ — длина волны; $N_r = n_r - ik_r$, $\chi_{vac} = 2,6544 \cdot 10^{-3}$ сименс — проводимость вакуума, η_0 — проводимость внешней среды, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света.

Значения углов θ_r определяются законом Снелиуса:

$$N_0 \sin \theta_0 = N_r \sin \theta_r = N_m \sin \theta_m. \quad (10)$$

Максимальное изменение групповой задержки ΔGD прямо пропорционально пространственному смещению Δs , обратно пропор-

ционально групповой скорости вдоль слоев v_{gx} и согласно эмпирической модели [19] оценивается выражением

$$\Delta GD = \frac{\Delta s}{v_{gx}} \approx 16\Delta n \frac{L}{c}, \quad (11)$$

где Δn — разность показателей преломления слоев (многослойная структура образована чередующимися слоями двух разных оптических материалов); L — полная толщина многослойной структуры; c — скорость света.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При синтезе многослойных структур и моделировании их спектральных характеристик учитывалась дисперсия выбранных пленкообразующих материалов: оксидов кремния (SiO_2) и ниобия (Nb_2O_5). Для описания дисперсии материалов использовали формулу Коши. Показатели преломления слоев SiO_2 определяли по формуле $n_L = 1,46 + (3,35 \cdot 10^{-3}/\lambda^2) + (1,41 \cdot 10^{-5}/\lambda^4)$, а слоев Nb_2O_5 по формуле $n_H = 2,22 + (2,18 \cdot 10^{-2}/\lambda^2) + (4 \cdot 10^{-3}/\lambda^4)$, где λ длина волны в мкм. Учитывалась также дисперсия показателя преломления подложки, показатель преломления которой определялся выражением $n_S = 1,50 + (5,33 \cdot 10^{-3}/\lambda^2) + (4,92 \cdot 10^{-4}/\lambda^4)$. Экстинкция пленкообразующих слоев и подложки в исследуемом спектральном диапазоне не превышает 10^{-5} и в расчетах не учитывалась. Поиск конструкции многослойной структуры с максимальной временной дисперсией в диапазоне 1520–1560 нм выполнялся без начального приближения по процедуре, ранее описанной в [21].

На рисунке 1 для трех синтезированных структур показано изменение оптических толщин в зависимости от номера слоя. Все структуры образованы чередованием слоев Nb_2O_5 и SiO_2 . Последний слой граничит с воздухом, первый находится на подложке из оптического стекла. Все структуры образованы чередованием слоев Nb_2O_5 и SiO_2 . Структуры, состоящие из 138 (рис. 1, а) и 165 (рис. 1, б) слоев, начинаются слоями из Nb_2O_5 . В структуре из 202 слоев первый слой из SiO_2 . Во всех структурах оптические толщины большинства слоев близки $\lambda_0/4$ на длине волны $\lambda_0 = 1550$ нм (рис. 1). При этом физические толщины слоев Nb_2O_5 составляли 180 нм, а слоев SiO_2 — 294 нм. Минимальные толщины слоев в структурах из 138, 165 и 202 слоев равны соответственно 4,9 (138 слой), 41,9 (29 слой) и 6,37 нм (185 слой). В структуре из 138 слоев 106 слой имеет максимальную оптическую толщину $1,35\lambda_0/4$, что составляет 357,6 нм. В структуре из 165 слоев есть два слоя, оптическая толщина которых близка $\lambda_0/2$. Это 124 слой с толщиной 568,5 нм (оптическая толщина $2,15\lambda_0/4$) и 70 слой с толщиной 545 нм (оптическая толщина $2,06\lambda_0/4$). В структуре

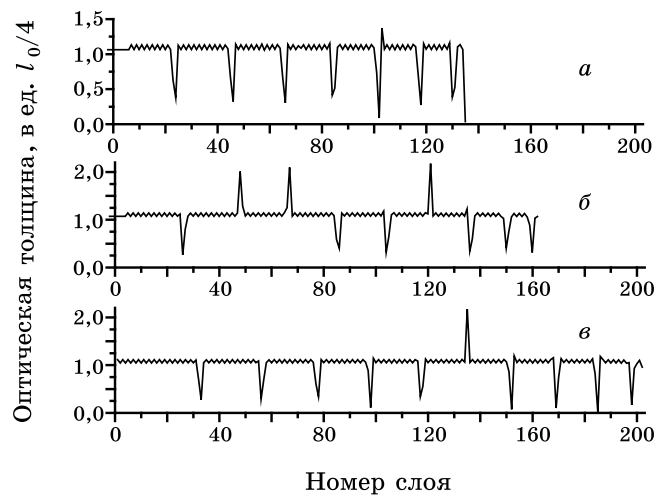


Рис. 1. Зависимость оптической толщины от номера слоя для структур с 138 слоями (а), 165 слоями (б) и 202 слоями (в).

из 202 слоев всего один слой, оптическая толщина которого близка $\lambda_0/2$. Этот 135 слой имеет толщину 574,6 нм (оптическая толщина $2,17\lambda_0/4$).

Несмотря на отсутствие полуволновых слоев, структура из 138 слоев характеризуется спектром отражения с наибольшим уменьшением отражения на длине волны 1553 нм ($R = 97,89\%$), что свидетельствует о существовании полуволнового резонатора в структуре (рис. 2, а). Такой резонатор может быть образован любой из групп слоев, в центре которой находится слой с оптической толщиной существенно меньшей $\lambda_0/4$. В структуре из 138 слоев таких слоев 8. Это 27 (толщина 63 нм), 49 (толщина 53,25 нм), 69 (толщина 49,63 нм), 87 (толщина 69,16 нм), 105 (толщина 11,96 нм), 121 (толщина 44,27 нм) и 133 (толщина 64,49 нм) слои.

В структуре из 165 слоев количество экстремальных слоев равно 9, причем три из них, 51, 70 и 124, имеют оптические толщины порядка $\lambda_0/2$. Еще 6 слоев (29, 89, 107, 139, 153, 163) могут быть центральными слоями полуволновых резонаторов, образованных несколькими соседними слоями. Отражение, как и в предыдущем случае, минимально на длине волны 1553 нм и равно 99%. Минимальный провал в спектре отражения наблюдается для 202-слойной структуры. Отражение равно 99,61% на длине волны 1554 нм. В 202-слойной структуре всего один явно выраженный полуволновой резонатор, образованный 135 слоем, и 9 могут быть образованными группами слоев.

Описанные структуры позволяют получить линейную спектральную зависимость GD в диапазоне от 1520 до 1560 нм. Для 138-, 165- и

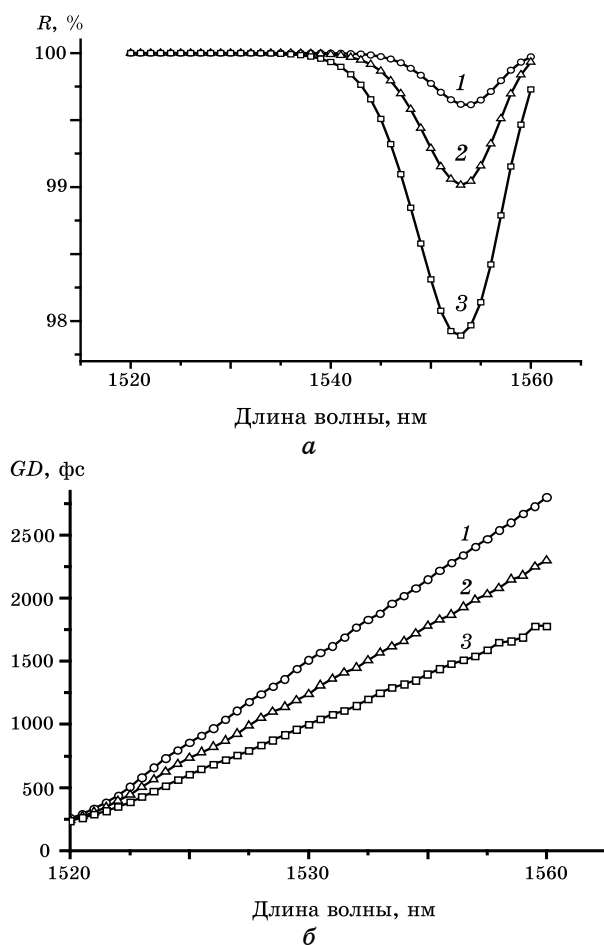


Рис. 2. Спектральные зависимости отражения (а) и групповой задержки (б) для структур с 138 слоями (кривые 1), 165 слоями (кривые 2) и 202 слоями (кривые 3).

202-слойных структур изменение GD в указанном спектральном диапазоне равно 1544, 2056 и 2544 фс, соответственно. Эти значения существенно выше получаемых по формуле (11). Полная толщина L рассматриваемых 138-, 165- и 202-слойных структур равна 30803, 38507 и 46139 нм, соответственно. Разность показателей преломления Δn соседних слоев Nb_2O_5 и SiO_2 в области 1500–1600 нм близка 0,77.

Из выражения (11) получаем для 138-, 165- и 202-слойных структур значения ΔGD , равные 1265, 1581 и 1895 фс, соответственно. Используя предложенную в [18, 19] процедуру определения групповой скорости v_{gx} вдоль слоев, получаем значения 15,14 фс/мкм для 138-слойной структуры, 15,128 фс/мкм для 165-слойной структуры и

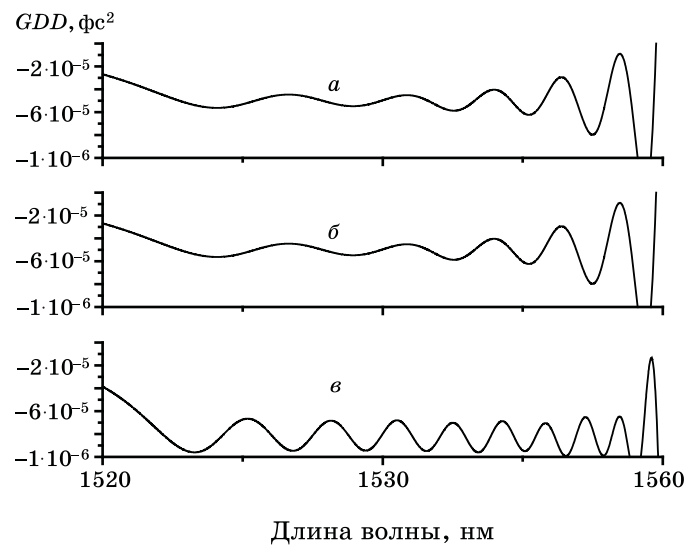


Рис. 3. Спектральные зависимости дисперсии групповой задержки структур с 138 слоями (*a*), 165 слоями (*б*) и 202 слоями (*в*).

15,135 фс/мкм для 202-слойной структуры. Это позволяет оценить пространственное смещение s светового потока вдоль границы раздела многослойной структуры с воздухом. Для 138-, 165- и 202-слойных структур значения s , равны 101,98, 135,9 и 168,1 мкм, соответственно. Следовательно, величина пространственной дисперсии для исследованных 138-, 165- и 202-слойных структур составляет 2,55, 3,4 и 4,2 мкм/нм, соответственно. Высокая пространственная дисперсия исследованных структур и линейность спектральной зависимости групповой задержки обеспечивают высокую отрицательную дисперсию групповой задержки (рис. 3).

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенная ранее в [19] эмпирическая модель для оценки параметров многослойной структуры, обеспечивающей получение желаемой временной и пространственной дисперсии, дает существенно заниженные максимальные значения групповой задержки. Это можно объяснить несовершенством оптимизационных процедур, использованных в [19] для определения параметров многослойной структуры. Кроме того, можно также утверждать, что и полученные в данной работе значения групповой задержки и пространственного смещения не являются максимально достижимыми для заданного спектрального диапазона, хотя они и существенно превышают соответствующие значения, предсказываемые

эмпирической моделью. Только в случае решения задачи поиска глобального минимума многопараметрической функции можно будет с уверенностью говорить о синтезе многослойных структур, позволяющих получать предельно достижимые значения временной и пространственной дисперсии.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. E. Goulielmakis et al., *Science*, **317**: 769 (2007).
2. E. Goulielmakis et al., *Science*, **320**: 1614 (2008).
3. R. Kienberger and F. Krausz, *Physica Scripta*, **T110**: 32 (2004).
4. M. Uiberacker, Th. Uphues, M. Schultze et al., *Nature*, **446**: 627 (2007).
5. A. Baltuska et al., *Nature*, **421**: 611 (2003).
6. M. Drescher et al., *Nature*, **419**: 783 (2002).
7. O. Smirnova, M. Spanner, and M. Y. Ivanov, *J. Phys. B*, **39**: 323 (2006).
8. M. Nisoli, S. DeSilvestri, and O. Svelto, *Appl. Phys. Lett.*, **68**: 2793 (1996).
9. M. Nisoli et al., *Opt. Lett.*, **22**: 522 (1997).
10. R. Szipöcs, K. Ferencz, C. Spielmann, and F. Krausz, *Opt. Lett.*, **19**: 201 (1994).
11. F. X. Kärtner et al., *Opt. Lett.*, **22**: 831 (1997).
12. F. X. Kärtner et al., *J. Opt. Soc. Am. B*, **18**: 882 (2001).
13. N. Matuschek, L. Gallmann, D. H. Sutter, G. Steinmeyer, and U. Keller, *Appl. Phys. B*, **71**: 509 (2000).
14. G. Steinmeyer, *Appl. Opt.*, **45**: 1484 (2006).
15. V. Pervak et al., *Appl. Phys. B*, **87**: 5 (2007).
16. B. Momeni and A. Adibi, *Appl. Phys. B*, **77**: 555 (2003).
17. M. Gerken and D. A. B. Miller, *Appl. Opt.*, **42**: 1330 (2003).
18. M. Gerken and D. A. B. Miller, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**: 1097 (2003).
19. M. Gerken and D. A. B. Miller, *Appl. Opt.*, **44**, No. 16: 3349 (2005).
20. H. A. MacLeod, *Thin-Film Optical Filters* (Philadelphia: Institute of Phys. Publish.: 2001).
21. V. Pervak et al., *Optics Express*, **16**, No. 14: 10220 (2008).