

УДК 535.44; 681.787(45)

ЗАСТОСУВАННЯ БРЕГІВСЬКИХ ГОЛОГРАФІЧНИХ ҐРАТОК ПРОПУСКНОГО ТИПУ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ ВІБРАЦІЙ

*Тихонов Є. О., д-р техн. наук; **Лямець О. К., **Давиденко В. О., **Пархоцевич В. В.

*Інститут фізики НАН України
**Національний авіаційний університет
etikh@iop.kiev.ua

Запропоновано оптико-електронну систему в складі об'ємної ґратки пропускового типу, лазера та проміжного чутливого до вібрацій дзеркала здатну реєструвати вібрації, кутова амплітуда яких перевищує кутову розбіжність лазерного променя. Подано математичну модель даного сенсора вібрацій у формі ряду Тейлора, що описує відгук, зокрема, ефект подвоєння частоти відгуку відносно частоти діючих вібрацій.

Ключові слова: фазова голографічна ґратка, оптичний сенсор вібрацій, кутова дифракційна селективність, кутова розбіжність оптичного променя, чутливість сенсору вібрацій.

It is shown that the optical-electronic system in the composition of the volume transmission grating, laser and intermediate sensitive to the vibrations mirror records the vibrations, whose angular amplitude exceed the angular divergence of laser beam. Is represented the mathematical model of this sensor of the vibrations in the form of Taylor series, which describes his response, in particular, the effect of the doubling of the recorded modulation frequency relative to the frequency of acting vibrations.

Key words: holographic phase grating, optical sensor of vibrations, angular diffraction selectivity, angular beam divergence, sensitivity of vibration sensor.

Вступ

У сучасній науковій та інженерній діяльності є області, які потребують моніторингу вібрацій різної природи. Розгорнута мережа сейсмографів постійно відстежує та аналізує глобальні землетруси та цунамі, а також сейсмічні сигнали від ядерних вибухів, варіацій тиску на дні океану, викликані хвилями і тощо. Постійно проводяться міжнародні конференції з вивчення шумів та інженерних вібрацій, які розв'язують досить важливі задачі з безпеки функціонування різноманітних технічних систем та споруд: від мостів та висотних башт до масштабних кораблів та літаків. Стислий перелік тематик включає такі напрямки досліджень: аероакустика, вимірювальна техніка вібрацій [1—3], нелінійна акустика, залізнична динаміка та вібрації, автомобільні шуми та вібрації і т. д.

Дифракційні оптичні елементи належать до класу оптичних виробів, які виконують різноманітні завдання керування та аналізу випромінювання за рахунок багатопроменевої інтерференції на властивій їм періодичній структурі. Типовим представником таких елементів є об'ємна періодична структура в голографічних дифракційних ґратках, які широко застосовуються у пристроях спектрального аналізу [4; 5; 6].

Фазові дифракційні ґратки з брегівським характером дифракції, які використовуються в цій роботі, записуються методами голографії реального часу на фотополімері ФПК-488.

Голографічний фотополімер ФПК-488 був розроблений в ІФ Національної АН України [5].

Брегівський характер дифракції випромінювання на таких ґратках супроводжується утворенням двох пучків на виході нульового та першого порядків дифракції. При цьому дифракція спостерігається у порівняно вузькому діапазоні відхилень відносно точного кута Бреґа: від десятків хвилин до декількох градусів — залежно від третього розміру ґратки — товщини T . Тривимірний характер таких ґраток робить їх схожими на фотонний кристал та суттєво підвищує їх спектральну роздільну здатність [6; 7; 8].

Мета

Мета цієї роботи — вивчення можливостей застосування голографічних фазових ґраток (ГФГ) пропускового типу для реєстрації малих коливань. У статті наведено результати, які підтверджують таку можливість застосування оптичної системи на основі ГФГ для реєстрації механічних вібрацій.

Модель сенсора вібрацій

Для кількісного опису параметрів ГФГ брегівського типу розроблена та широко застосовується теоретична модель зв'язаних хвиль, основою якої є наближення двоххвильової взаємодії дифрагованої та вхідної хвиль у періодичній структурі з гармонічною просторовою модуляцією показника заломлення [4].

Міра адекватності даної моделі розглянутим ГФГ на фотополімерному матеріалі потребує доказів, які проводилися в нашій роботі [6]. Вимірювання просторового періоду подібних ГФГ не пов'язане з вказаною теорією; його основою є безумовне виконання умови Бреґа для дифракції на періодичній структурі.

Другим важливим для використання теорії [7] моментом є віднесення дифракції світла на ґратках до багатохвильової чи двохвильової на основі критерію Кука—Клейна. Точні оцінки за цим критерієм можливі або при безпосередньому вимірюванні фактичної товщини T та періоду Λ дифракційних структур, або під час розрахунків на основі фактичних результатів вимірювання форм-фактора кутової селективності.

Перелічені представлення та накопичений досвід виготовлення фотополімерних ГФГ дає змогу цілеспрямовано записувати брегівські фазові ґратки пропускнуго типу, кутова селективність яких змінюється від декількох градусів до десятків кутових хвилин. Оцінка спектральної роздільної здатності і застосування таких ГФГ для вимірювання довжин хвиль оптичного випромінювання у видимому діапазоні наведена в праці [8].

Суть застосування об'ємних ГФГ для реєстрації вібрацій пов'язана з наявністю в них чіткої кутової залежності дифракційної ефективності (ДЕ). Тому кутові відхилення в системі ГФГ-хвильовий вектор падаючого світла призводять до амплітудної модуляції потужностей вихідного випромінювання нульового та першого порядків дифракції, що можна зареєструвати засобами електроніки.

Первинні оцінки очікуваної чутливості такої системи до кутових відхилень можна отримати, знаючи величини кутової селективності об'ємної ГФГ та розбіжність лазерного пучка.

Якщо селективність ГФГ знаходиться в діапазоні 20—60 кут. хв, то при використанні лазера з розбіжністю 1 мрад можна реєструвати кутові зміщення, які не менші променевої розбіжності, тобто 3,44 кут. хв.

Гранична чутливість серії стандартних сейсмографів типу АРСС (розробки 2008—2009 рр. ОКБ океанографічної техніки РАН) на частоті вібрацій 1 Гц становить 10^{-7} — 10^{-8} м/с. Якщо лінійні зміщення за 1 с, які відповідають вищевказаній чутливості, здатні викликати поворот лазерного пучка на 3—4 хв, то запропонована система лазер + ГФГ здатна зареєструвати кутове зміщення при використанні плеча, довжина якого перевищує $(10^{-7}$ — $10^{-8})\text{ м}/(10^{-4}\text{ рад}) = (1\text{—}0,1)\text{ мм}$, що технічно не важко забезпечити. Тому подібну систему на основі малогабаритних діодних лазерів та ґратки можна розглядати як сенсор вібрацій будь-якої природи, які викликають кутові відхилення.

З іншого боку, вивчення та визначення умов, які задають чутливість ґратки до вібрацій, має важливе значення для оберненої задачі знаходження умов пригнічення вказаної чутливості; вони суттєві при створенні на основі таких ґраток оптичних систем іншого призначення: інтер-

ферометрів, монохроматорів, регульованих атенуаторів та ін.

Елементи теорії ГФГ та сенсора вібрацій

Кутові залежності ДЕ для s - та p -лінійно поляризованих хвиль у розглянутій ГФГ, отримані в праці [7], можна записати такими зручними для аналізу виразами [6]:

$$\eta_s = \frac{\sin^2 \left(v_s \sqrt{1 + (n/n_1 \delta \sin(2\theta))^2} \right)}{1 + (n/n_1 \delta \sin(2\theta))^2}; \quad (1)$$

$$\eta_p = \frac{\sin^2 \left(v_p \sqrt{1 + (n/n_1 \delta \tan(2\theta))^2} \right)}{1 + (n/n_1 \delta \tan(2\theta))^2};$$

$$v_s = \frac{\pi n_1 T}{\lambda \cos \theta}; \quad v_p = \frac{\pi n_1 T \cos(2\theta)}{\lambda \cos \theta},$$

де θ , λ — внутрішній кут Бреґга при нульовому куті відхилення та довжина хвилі дифракції; $\delta = |\theta_0 - \theta|$ — відхилення відносно точного кута Бреґга; T — товщина та Λ — просторовий період ґратки; n та n_1 — показник заломлення фотополімера після запису ґратки та амплітуда його просторової модуляції, яка виникає внаслідок голографічного запису.

Приведені залежності показують, що ДЕ = max визначається лише силою ґратки v , а форм-фактор кутової залежності визначається функцією в квадратних дужках. Це дозволяє регулювати в необхідних межах фактор форми ДЕ у створеній ґратці та його залежність від довжини хвилі світла, яке надходить.

На рис. 1 показано типову залежність ДЕ від відхилення δ відносно точного кута Бреґга $\theta = 41,25^\circ$ для s -поляризованої хвилі 632,8 нм He-Ne-лазера.

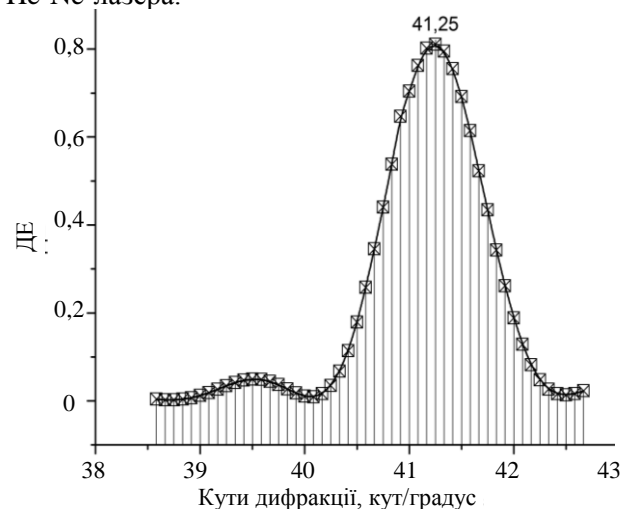


Рис. 1. Експериментальна ДЕ ГФГ пропускнуго типу на довжині хвилі $\lambda = 632,8\text{ нм}$, s -орієнтація лінійно-поляризованої хвилі

Вона чудово описується першою з вищенаведених розрахункових формул (1). Ця ГФГ використовувалася під час проведення експериментів з кутовими відхиленнями падаючого пучка, які створювалися вібраціями. Як приклад на рис. 2, 3 також подано розрахункову залежність ДЕ фазової ґратки пропускного типу та її похідна по куту відхилення $\delta = |\theta_0 - \theta|$.

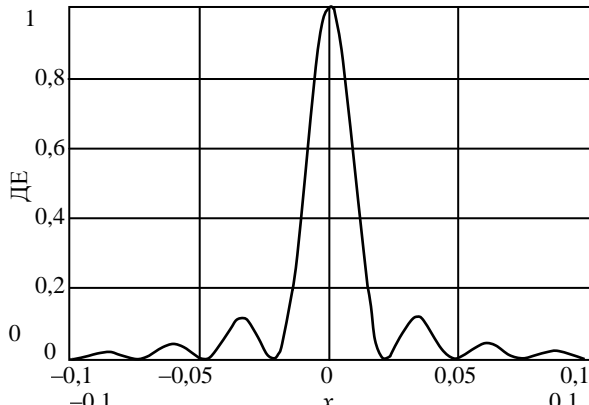


Рис. 2. Кутова залежність ДЕ, коли фазовий зсув («сила ґратки») дорівнює $\pi/2$ у випадку $\delta = 0$

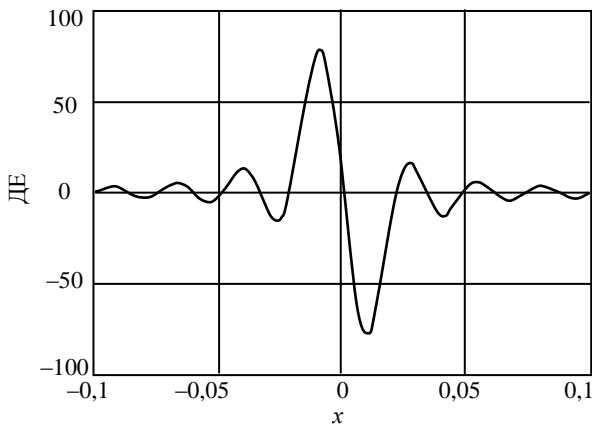


Рис. 3. Похідна ДЕ за кутовим відхиленням (x — у радіанах), коли фазовий зсув («сила ґратки») дорівнює $\pi/2$ для $\delta = 0$

При кутовому відхиленні в площині дифракції ГФГ лазерного пучка з розбіжністю, набагато меншою ніж кутова селективність ґратки, спостерігатимемо протифазну амплітудну модуляцію потужностей дифрагованого випромінювання.

Для наступного аналізу характеру модуляції випромінювання, яке дифрагує на вібруючій ґратці, визначимо положення характерних робочих точок на кривій ДЕ та її похідної на рис. 2 та 3. Це області максимуму ДЕ = max та нульового значення похідної ДЕ за відхиленням $\partial \text{ДЕ} / \partial \delta = 0$ на рис. 2, 3 відповідно. Робочі області на спадаючій лівій та правій частинах залежності ДЕ збігаються з положенням головних максимумів похідної ДЕ за відхиленням; їх також можна бачити на вказаних рисунках. У випадку фазового набігу, який дорівнює π , розрахункова залежність ДЕ для подібної ґратки подана на рис.4, 5.

У цьому випадку ДЕ має нульове значення на точному куті Бреґга та максимальне значення в двох симетрично розташованих максимумах.

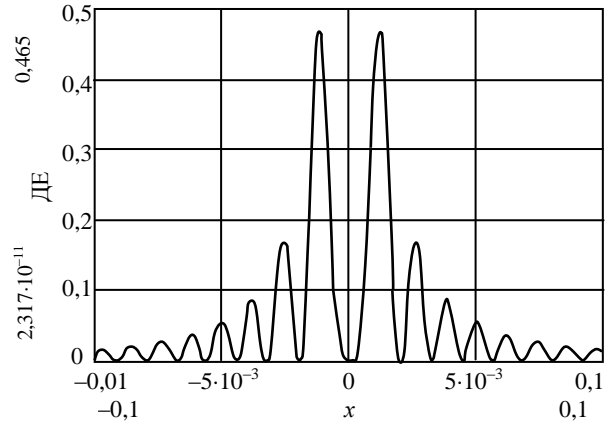


Рис. 4. Кутова залежність ДЕ при фазовому зсуві, який дорівнює π (x — у радіанах)

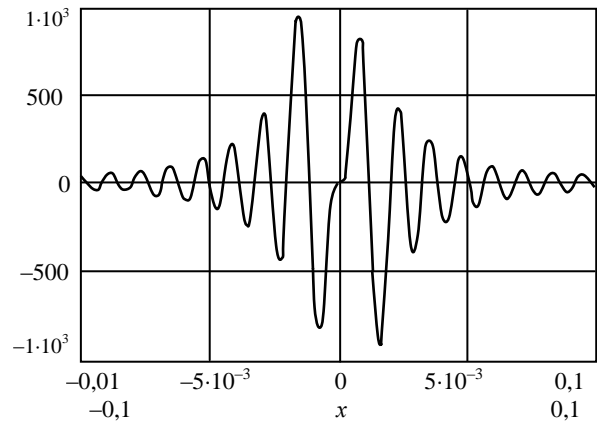


Рис. 5. Похідна ДЕ за кутовим відхиленням при фазовому зсуві, який дорівнює π (x — у радіанах)

Припустимо, що має місце кутове відхилення між ГФГ та променем (з розбіжністю, меншою порівняно з кутовою селективністю ґратки, яка визначається положенням перших нулів на залежності $\text{ДЕ} = f(\delta)$). Нехай зміна відхилення відносно робочої точки θ' описується гармонічними змінами у вигляді $\delta(t) = \delta_0 \sin(\Omega t)$. Характер залежності потужності дифрагованого випромінювання в описаних умовах можна представити рядом Тейлора зі значеннями похідних по куту дифракції θ в робочих точках θ' :

$$P_{out} = P_0 \eta(\theta \pm \delta_0 \sin(\Omega t)) + P_0 \left[\eta(\theta) \pm \delta_0 \sin(\Omega t) \times \left(\frac{d\eta(\theta)}{d\theta} \right)_{\theta'} \pm \frac{1}{2!} (\delta_0 \sin(\Omega t))^2 \left(\frac{d^2\eta(\theta)}{d\theta^2} \right)_{\theta'} \pm \dots \right]$$

Залежно від вибору робочої точки по куту θ , $\text{ДЕ}(\theta)$ та її похідна можуть набувати нульових значень, а це визначатиме відношення між частотами вібрацій Ω на вході ГФГ та на виході

після дифракції. Наприклад, якщо при $\theta' = \theta_0$ відхилення відсутнє, $DE = \max$, перша похідна DE по куту дорівнює нулю, але друга похідна набуває максимального значення, викликаючи зміну потужності випромінювання, яке виходить, на частоті 2Ω . У випадку вибору робочої точки в положенні, яке відповідає двом симетричним максимумам похідної (див. рис. 3), то модуляція $P(t)$ проходить на частоті вимушених вібрацій Ω . Ця та інші можливості будуть ілюстровані експериментально.

Інші можливості виникають під час кутового сканування ґратки (або вхідного випромінювання) у випадку ГФГ, фазовий набіг для якої дорівнює π (див. рис. 4, 5). При виборі робочої точки, яка відповідає точній умові Бреґга, постійна складова в пучку, який виходить, зовсім відсутня, оскільки $\eta(\theta_0) = 0$; змінна складова змінюється на подвоєній частоті сканування з тих причин, які були описані і в першому випадку. Вказану залежність DE можна використати в системах стабілізації положення пучка в просторі.

Експериментальні результати

Експериментальна апробація сенсора вібрацій здійснювалася в оптичній схемі у складі ГФГ з різними величинами кутової селективності, He-Ne-лазера на 632,8 нм при розбіжності пучка 1–2 мрад і s -орієнтації його площини поляризації. Вібруюче дзеркало з'єднувалось з електро-механічним вібратором, який працював на частотах до ≈ 160 Гц та викликав коливання в площині дисперсії ґратки з кутовою амплітудою до 35 кут/хв. (рис. 8). Ґратки монтувались на гоніометричному столі для можливості їх плавного кутового повороту і вибору початкового кута падіння — робочої точки, відносно якої відбувалось кутове сканування. Дифрагований пучок та пучок нульового порядку дифракції подавались на фотодіодні приймачі випромінювання ФД-24, які працювали в діодному режимі та були підключені на входи двопробеневого осцилографа.

Під час вибору робочої точки на одній з двох спадаючих віток відносно максимуму DE сканування вхідного пучка на частоті Ω супроводжувалось очікуваною протифазною модуляцією потужностей дифрагованого випромінювання та того, яке пройшло, на цій самій частоті (рис. 6). Швидкість розгортки не змінювалась, спостерігалось подвоєння частоти модуляції вихідних променів відносно приведених на рис. 6.

Робоча точка вибрана в максимумі похідної DE по куту дифракції (рис. 7).

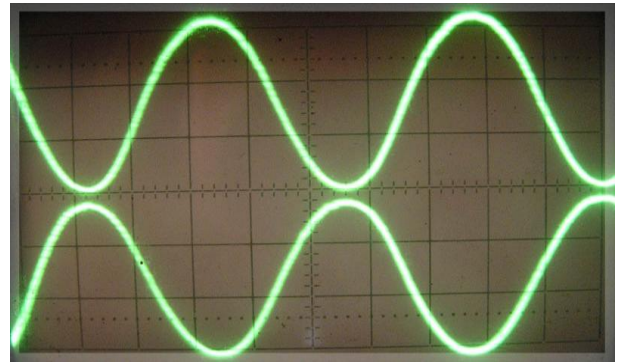


Рис. 6. Протифазна модуляція пучків на виході ґратки при скануванні вхідного пучка з амплітудою в декілька кутових хвилин

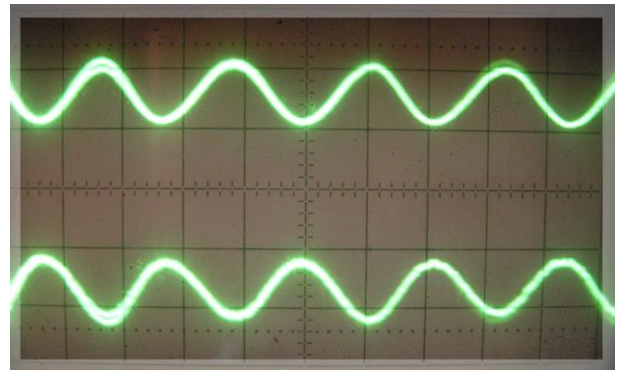


Рис. 7. Робоча точка збігається з максимумом DE , мінімумом першої похідної і максимумом другої похідної DE по куту

У разі заміни ґратки з кутовою селективністю $2,4^\circ$ на ґратку з селективністю 5° при інших незмінних параметрах глибина модуляції за тією самою амплітудою сканування зменшувалась багатократно.

Максимальна амплітуда сканування в наведених прикладах не перевищувала $0,5$ градуса і відповідала кутовій селективності вибраної ґратки рис. 1.

Видно, що амплітуда модульованого сигналу в декілька разів перевищувала рівень шумів реєстраційної системи при потужності лазерного випромінювання 10 мВт.

Був вимірний мінімальний кут сканування шляхом зменшення напруги живлення на генераторі вібрацій. Результати вимірювання на рис. 8 показують, що при амплітуді сканування, близькій до кутового розходження випромінювання лазера, сигнал датчика у вигляді модульованого сигналу наближався до нуля.

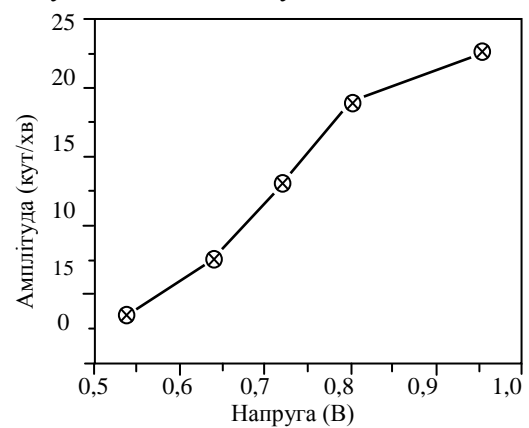


Рис. 8. Залежність амплітуди сканування від напруги живлення на генераторі вібрацій

Висновок

Показано, що оптико-електронна система в складі об'ємної голографічної ґратки пропускнуго типу, лазера та проміжного, чутливого до вібрацій дзеркала, реєструє коливання, кутова амплітуда яких перевищує кутову розбіжність лазерного пучка.

Чутливість системи до вібрацій, що вимірюється в кутових хвилинах, залежить від вибору робочої точки на графіку залежності ДЕ і максимальна за використання ґраток з кутовою селективністю близькою до кутової розбіжності лазерного пучка.

Представлено математичну модель функціонування сенсора у вигляді ряду Тейлора, що описує чутливість сенсора та ефект подвоєння частоти модуляції відносно частоти сканування.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Henriouille K.* Distributed actuators and sensors for active noise control // International Conference on

Noise&Vibration Engineering (ISMA) / K. Henriouille — 2001. url: http://www.isma-isaac.be/publications/phd2001/khenriouille_en.phtml

2. *Ausanio G.* Mechanical vibration sensor based on elastomagnetic composite // Sensors and Actuators / G. Ausanio, A. C. Barone, C. Hison and others. — 2006. — Vol. 129. — P. 25—28.

3. *Ollier E.* Micro-opto-mechanical vibration sensor integrated on silicon // Lightwave Technology Journal / E. Ollier, P. Philippe, C. Chabrol, P. Mottier. — 1999. — Vol. 17. — P. 26—29.

4. *Psaltis D.* Introduction to Volume Holographic Gratings (VHG) // Science / D. Psaltis. — 2002. — Vol. 298. — P. 1359—1363.

5. *Tikhonov E. A.* Holographic volume grating recorded on self-developing photopolymers: unseized advantages in optical engineering // Application of Photonic technology, Photopnic North 2000, SPIE / E. A. Tikhonov. — Vol. 4087. — P. 761—769.

6. *Тихонов Е. А.* Анализ и измерение параметров голографических Брэгговских решеток // Вестник С.Пб. Академия инженерных наук, 2008. — № 4. — С. 57—78.

7. *Kogelnik H.* Coupled wave theory for thick hologram grating // Bell Sys.Techn.J. / H. Kogelnik. — 1969. — Vol. 48, No. 9. — P. 2909—2918.

8. *Tikhonov E. A.* Measuring the Wavelength of Light Using Bragg Diffraction Grating // Journal of Optical Technology / E. A. Tikhonov, A. A. Tyutyunik. — 2007. — Vol. 74, No. 8. — P. 521—525.

Стаття надійшла до редакції 13.10.10.