

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОТІЛЬНИХ МІНІЛАЗЕРІВ З ПАСИВНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ДОБРОТНОСТІ НЕЛІНІЙНО-ПОГЛИНАЮЧИМИ ПОЛІМЕРНИМИ ЗАТВОРАМИ

В.І. БЕЗРОДНИЙ,<sup>1</sup> О.О. ЩЕНКО,<sup>2</sup> А.М. НЕГРІЙКО,<sup>1</sup> А.О. ЯСКОВЕЦЬ,<sup>1</sup>  
А.А. ДЕМИДОВИЧ,<sup>3</sup> М.Б. ДАНАІЛОВ,<sup>3</sup> В.А. ОРЛОВИЧ,<sup>4</sup> П. ШПАК<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізики НАН України  
(Просп. Науки, 46, Київ 03028)

<sup>2</sup>Інститут органічної хімії НАН України  
(Вул. Мурманська, 5, Київ 02094)

<sup>3</sup>Синхротрон Трієст, Лазерна лабораторія  
(Страда статале 14-км 163,5, 34012 Трієст)

<sup>4</sup>Інститут фізики ім. Б.І. Степанова, Національна академія наук Білорусі  
(Вул. Незалежності, 68, Мінськ 220072, Білорусь)

УДК 538.567.4, 535.37  
© 2011

Досліджено характеристики мініатюрних компактних лазерів на Nd:YAG та Nd:YVO<sub>4</sub> з діодною накачкою у режимі пасивної модуляції добротності. З використанням полімерного лазерного затвора на основі поліуретану, забарвленого барвником біс-4-діметиламінодітіобензил нікелю, реалізована генерація на довжині хвилі 1,064 мкм з частотою слідування імпульсів до 25 кГц, тривалістю 2–5 нс та потужністю до 130 мВт при накачці до 3,5 Вт. Твердотільні мінілазери з діодною накачкою і пасивною модуляцією добротності затворами сендвічевого типу є ефективними компактними джерелами коротких потужних імпульсів з високою оптичною якістю пучка.

### 1. Вступ

Нелінійна оптика, незважаючи на тривалу півстолітню історію, продовжує привертати до себе пильну увагу вчених як напрямок фізики, який активно і плідно розвивається. Нагадаємо, що на відміну від класичної оптики, при високих інтенсивностях світлового потоку, характерних для лазерних пучків, оптичні властивості середовища, зокрема його поглинання, показник заломлення, дисперсія залежать від інтенсивності світла. Порушується принцип суперпозиції, у процесі поширення через середовище може змінюватися частота світлових коливань тощо. Нелінійні ефекти різної природи спостерігаються при поширенні інтенсивних потоків світла у твердих тілах, рідинах, атомних і молекулярних газах, плазмі.

Нелінійно-оптичні ефекти лежать у основі таких елементів керування параметрами лазерного випромінювання, як генератори оптичних гармонік, пара-

метричні генератори, електрооптичні та акустооптичні модулятори, модулятори добротності. Зокрема, у компактних твердотільних лазерах часто застосовують пасивну модуляцію добротності. Лазери з пасивними модуляторами генерують короткі потужні світлові імпульси наносекундної тривалості, при цьому не потребують складних електронних систем керування та високих напруг і завдяки цьому знаходять численні практичні застосування. Для неодимових лазерів, що працюють на довжині хвилі 1,064 мкм, застосовуються пасивні лазерні затвори (ПЛЗ) на основі ітрій-алюмінієвого граната, легованого іонами хрому Cr<sup>4+</sup>:YAG [1–3], ПЛЗ на радіаційно забарвленому фториді літію [4] напівпровідникові затвори з насиченням поглинання [5, 6]. Недавно повідомлялося про використання насиченого поглинання графену для модуляції добротності неодимового лазера на кристалі Nd:GdVO<sub>4</sub> [7]. Дешевими та доступними для виготовлення в лабораторних умовах є ПЛЗ на органічних барвниках у полімерних матрицях. У роботі [8] запропоновано використовувати як матрицю ПЛЗ сітчатий поліуретан, тверднення якого, на відміну від епоксидних полімерів, протікає у м'яких умовах при кімнатній температурі та нейтральному середовищі, що дозволяє вводити в нього барвники різних класів без їх розпаду. ПЛЗ на основі такого полімеру, виготовлені у вигляді триплексної конструкції сендвічевого типу, забезпечують ефективну модуляцію добротності у лазерах з ламповою накачкою [8]. Для лазерів з діодною накачкою найбільш поширеними сьогодні є ПЛЗ з такими матрицями, як ацетат

целюлози [9, 10], полівінілкарбазол [11]. Разом з тим ПЛЗ сендвічевого типу на основі поліуретану можуть розглядатися як перспективні системи для модуляції міні- та мікролазерів з діодною накачкою завдяки високій променевої стійкості та високій оптичній якості.

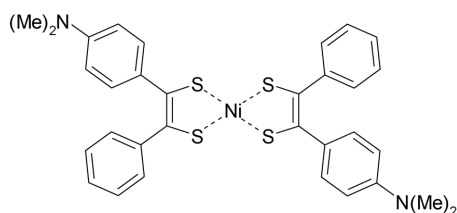
Метою даної роботи є дослідження пасивної модуляції добротності мінілазерів з затвором сендвічевого типу на основі забарвленого поліуретану.

## 2. Експериментальні дослідження характеристик мінілазера з пасивним модулятором

### 2.1. Експериментальна установка

У роботі використано твердотілий ПЛЗ на основі органічного барвника, розчиненого у полімерній матриці. Конструктивно ПЛЗ виготовляли у вигляді триплекса (полімер між двома скляними пластинками), зовнішні робочі поверхні якого просвітлені до рівня  $\rho \leq 0,2\%$  у спектральній області 1,06 мкм. Завдяки тому, що показник заломлення матриці міг регулюватися у діапазоні від 1,48 до 1,52 вибором концентрацій компонентів полімеру, втрати на відбиття на межі полімер–скло можна було звести практично до нуля.

Полімерна матриця активувалася фотостійким барвником біс-4-діметиламінодітобензил нікелю (BDN), який отримували при реакції 4-діметиламінобензоїну з пентасульфідом фосфору в кип'ячому діоксані з домішкою водного розчину хлориду нікелю. Структурна хімічна формула барвника BDN має вигляд



Цей барвник добре себе зарекомендував у полімерних ПЛЗ в імпульсних лазерах з ламповою накачкою [11]. Полімерною матрицею служила поліуретанова композиція, яку синтезували реакцією поліконденсації діола з діізоціанатом за схемою

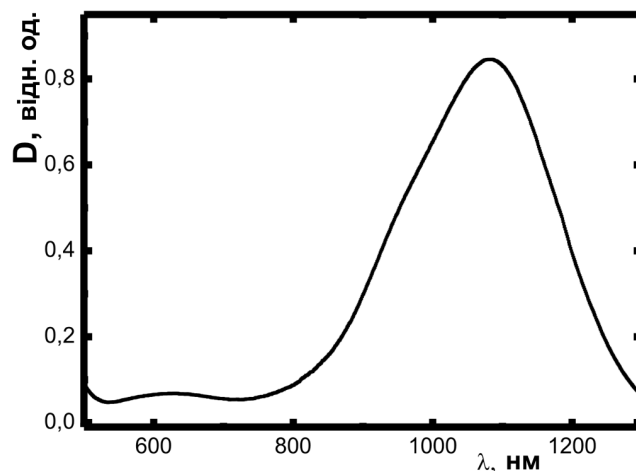
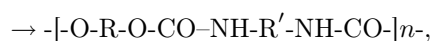
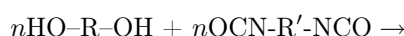


Рис. 1. Спектр поглинання барвника BDN у поліуретановій матриці

де  $n$  – кількість молекул, R, R' – аліфатичні чи ароматичні вуглеводні групи. Вибрана уретанова полімерна композиція є сітчастим еластомером, в якому всі складові молекули поєднані хімічними зв'язками різної природи. Важливою особливістю полімерів є те, що в них розчиняються без формування димерів чи більш складних утворень органічні барвники основних класів, що застосовуються в лазерній техніці. Металоорганічні комплекси (барвник BDN є одним з них) добре вводяться у початкові складові вибраної поліуретанової полімерної композиції в широкому концентраційному інтервалі ( $10^{-4}$ – $10^{-7}$  моль/г полімеру) без агрегації. Нам вдавалось вводити в цей полімер навіть поліметинові барвники [12, 13], хоча відомо, що, наприклад, в широко використовуваному поліметилметакрилаті ці барвники розпадаються практично повністю ще на стадії полімеризації.

Схему лазерної експериментальної установки показано на рис. 2. Джерелом накачки служив діодний лазер з довжиною хвилі 808 нм з електронним блоком LDS 80, що забезпечував як неперервний, так і імпульсний режим роботи. Випромінювання накачки подавалось по світлопроводі з діаметром сердеччини 200 мкм на блок модуляції, за допомогою якого здійснювався імпульсно-періодичний режим накачки, а поляризаційний регулятор пропускання дозволяв ослаблювати накачку без просторового зміщення пучка. Коліматори формували пучок накачки діаметром 280 мкм в активному середовищі.

Найбільш поширеними лазерами з діодною накачкою, що випромінюють у ближній інфрачервоній області на довжині хвилі 1,06 мкм, є лазери на алю-

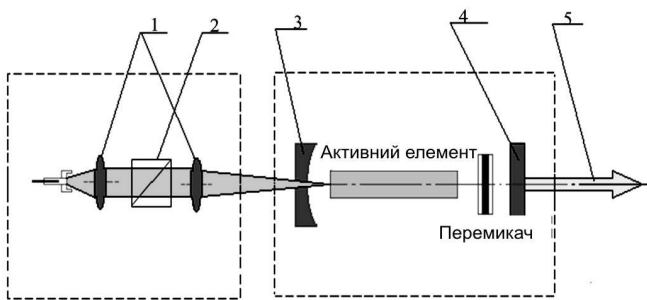


Рис. 2. Схема лазера з пасивною модуляцією добротності і поздовжньою накачкою: 1 – колімуючі об’єктиви, 2 – модулятор, 3 – глухе дзеркало, 4 – вихідне дзеркало, 5 – вихідний лазерний пучок

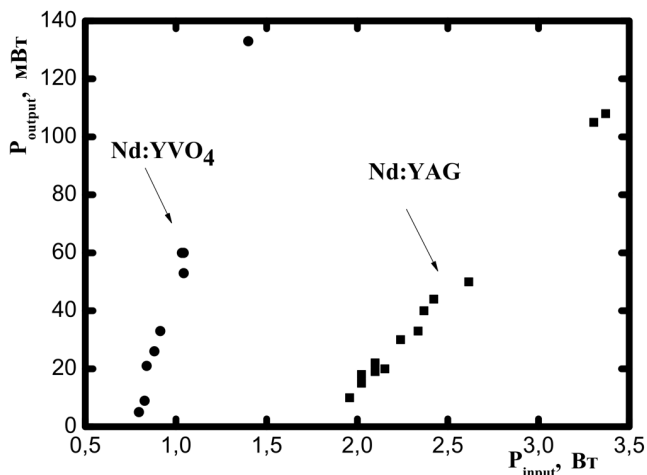


Рис. 3. Середня потужність генерації Nd:YVO<sub>4</sub> та Nd:YAG мінілазерів з модуляцією добротності пасивним затвором

мітрієвому гранаті з неодимом (Nd:YAG) та на ванадаті ітрію (Nd:YVO<sub>4</sub>). В обох цих кристалах у спектрі поглинання Nd є широка смуга поглинання на довжині хвилі близько 808 нм, яка збігається з довжиною хвилі випромінювання напівпровідникового лазера накачки. Кристал Nd:YVO<sub>4</sub> має смугу поглинання у шість разів ширшу, ніж кристал Nd:YAG, що зменшує вимоги до температурної стабільності спектра випромінювання накачки для лазера на Nd:YVO<sub>4</sub>. Крім того, кристал Nd:YVO<sub>4</sub> у порівнянні з Nd:YAG має коефіцієнт поглинання приблизно у чотири рази більший при однаковій концентрації неодиму [14]. У роботі досліджували лазери на Nd:YVO<sub>4</sub> та Nd:YAG з активними елементами циліндричної форми (довжина 8 мм, діаметр 3 мм) з непаралельністю робочих поверхонь, просвітлених на довжини хвиль 808 і 1064 нм, не більше 10 куткових секунд.

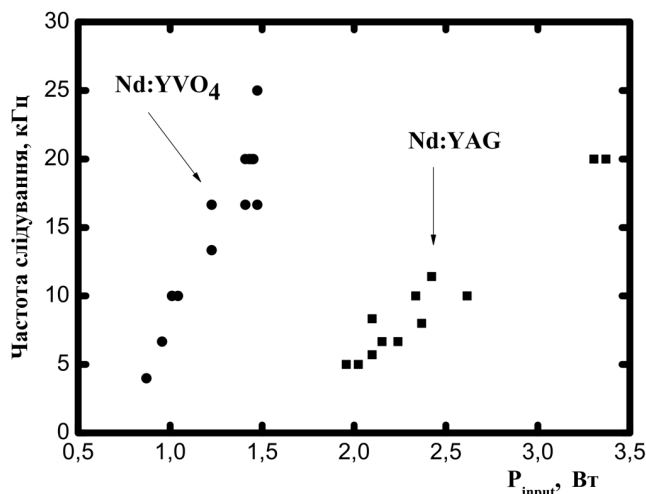


Рис. 4. Частота слідування вихідних імпульсів мінілазерів з модуляцією добротності

Середню потужність лазерного випромінювання визначали вимірювачем Laser Star Powermeter. Для вимірювання тривалості імпульсів застосовувався чотириканальний осцилограф TDS 7104 Digital Phosphor Oscilloscope зі смугою пропускання 1 ГГц та фотодіод ET 3500F зі смугою пропускання 12 ГГц. Профіль лазерного випромінювання визначали за допомогою CCD камери.

## 2.2. Експериментальні результати та обговорення

У роботі було досліджено характеристики мінілазера в режимі пасивної модуляції добротності при поздовжній діодній накачці з активними елементами Nd:YAG і Nd:YVO<sub>4</sub>. Для зменшення теплових навантажень на активні елементи застосовували імпульсний режим накачки. Тривалість імпульсу накачки становила 5 мс при частоті проходження 20 Гц. Резонатор мінілазера довжиною 18 мм утворювався глухим дзеркалом радіусом 150 мм та плоским вихідним дзеркалом з коефіцієнтом відбиття 70% на довжині хвилі генерації.

На рис. 3 наведено залежність вихідної середньої потужності мінілазера на Nd:YAG і Nd:YVO<sub>4</sub> з ПЛЗ, що мав початкове пропускання 62%. З цим же пасивним затвором досліджено залежність частоти слідування імпульсів від потужності накачки (рис. 4). Частоту імпульсів визначали на проміжку часу дії імпульсу накачки (тобто протягом 5 мс). Визначено тривалості імпульсів при різних рівнях накачки (рис. 5 для лазера на Nd:YAG і рис. 6 для лазера на

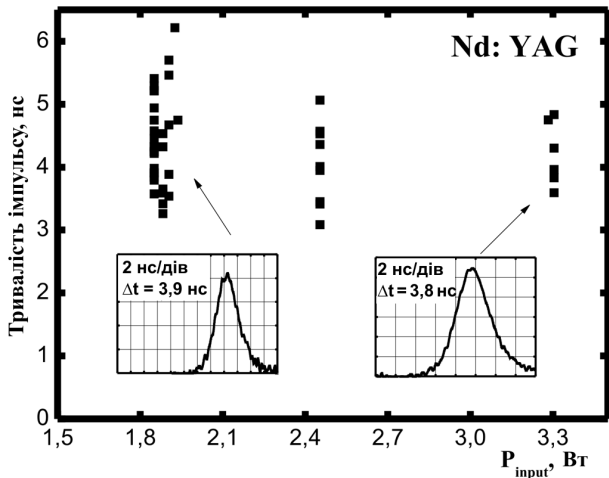


Рис. 5. Форма та відтворюваність гігантського імпульсу Nd:YAG мінілазера

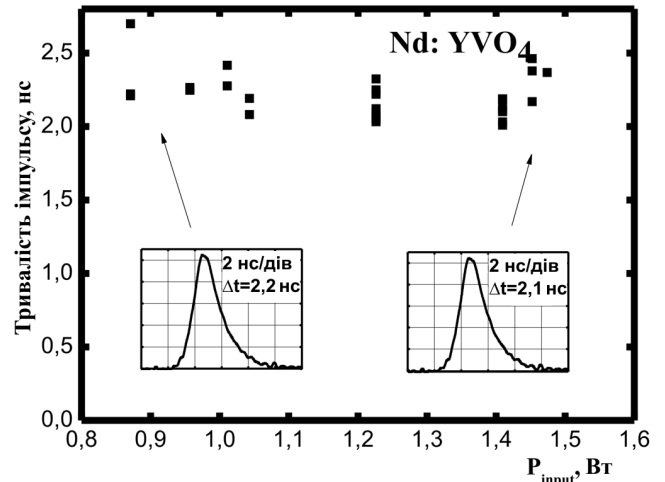


Рис. 6. Форма та відтворюваність гігантського імпульсу Nd:YVO<sub>4</sub> мінілазера

Nd:YVO<sub>4</sub>). У лазера на гранаті тривалість імпульсів в межах від 3 до 5 нс і вона практично не залежала від потужності накачки. Тривалість імпульсів мінілазера на ванадаті становила 2,2 нс. Стабільність тривалості імпульсів у лазері на гранаті та ванадаті (рис. 6) спеціально не досліджувалась, проте можна стверджувати, що вона значно вища для лазера на Nd:YVO<sub>4</sub>. Оптимізація вихідних параметрів мінілазера з діодною накачкою не була завданням даного дослідження.

На відміну від плівкових ПЛЗ на барвниках [9–11], затвори сендвічевого типу можуть працювати при більших середніх потужностях завдяки кращому відведенню тепла з робочої зони. За оптичною якістю ПЛЗ сендвічевого типу не поступається іншим складовим резонатору (дзеркалам, активному елементу), що забезпечує генерацію лазерного випромінювання високої якості та роботу лазера в режимі однієї поперечної моди.

Як видно з досліджень енергетичних характеристик, мінілазер на Nd:YVO<sub>4</sub> у порівнянні з Nd:YAG має більш високу ефективність. Поріг генерації при використанні ванадату приблизно у 2,5 раза нижчий, ніж у лазері з гранатом. У дослідженому діапазоні значень накачки до 3,5 ват вихідна потужність лазера лінійно зростає з накачкою для обох типів активних елементів. Частота слідування вихідних імпульсів теж лінійно залежить від потужності (рис. 4), що свідчить про надійну роботу ПЛЗ сендвічевого типу при досягнутих потужностях генерації.

Просторова структура випромінювання мінілазера (рис. 7), отримана камерою ССД і апроксимована ме-

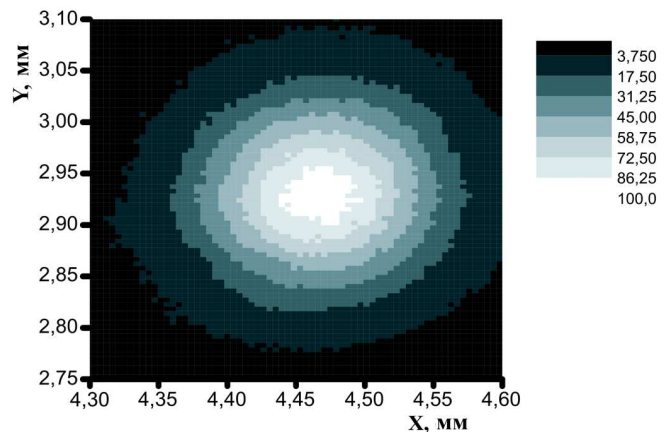


Рис. 7. Просторова структура пучка випромінювання у площині пасивного лазерного затвора

тодом Гауса, вказує на симетричний розподіл енергії у лазерному пучку, поперечний переріз якого зростає з ростом накачки.

### 3. Висновки

Пасивна модуляція добротності мінілазерів з діодною накачкою полімерними затворами сендвічевого типу на основі забарвленого барвником BDN поліуретану дозволила забезпечити успішну генерацію коротких інтенсивних імпульсів наносекундного діапазону. При довжині резонатора 18 мм і початковому пропусканні ПЛЗ  $T_0=62\%$  в лазері з активним елементом Nd:YAG отримано вихідну потужність 120 мВт, а з Nd:YVO<sub>4</sub> значення потужності дорівнювало 130 мВт. Відповідно для цих активних елементів частоти слідування

становили 20 і 25 кГц. Тривалість імпульсів лежить в межах від 2 до 5 наносекунд. Мала тривалість імпульсів зумовлює велику імпульсну потужність, що дозволить застосовувати компактні лазери з діодною накачкою і пасивною модуляцією добротності затворами сендвічевого типу на основі активованого барвником поліуретану у нелінійній оптиці та для прикладних задач.

Роботу виконано за фінансової підтримки та у межах проєктів НАН України 1.4.1. В/137, 1.4.1. ВЦ/139, українсько-білоруського проєкту ДФФД України Ф. 29.1/021. А.О.Я. висловлює подяку за підтримку Науковим центрам вторинної мережі Центральної Європейської ініціативи в Мінську та Трієсті (Італія, Міжнародний центр теоретичної фізики ім. А. Салама).

1. C. Li, J. Song, D. Shen, J. Xu, and K. Ueda, *Opt. Comm.* **186**, 245 (2000).
2. N. Lai, M. Brunel, F. Bretenaker, and A. Floch, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1073 (2001).
3. C. Zuo, J. He, H. Huang, B. Zhang, Z. Jia, and C. Dong, *Optics & Laser Technology* **41**, 17 (2009).
4. J.A. Morris and C.R. Pollock, *Opt. Lett.* **15**, 440 (1990).
5. R. Fluck, R. Häring, R. Paschotta, E. Gini, H. Melchior, and U. Keller, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 3273 (1998).
6. G. J. Spühler, S. Reffert, M. Haiml, M. Moser, and U. Keller, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2733 (2001).
7. X. Li, J. Xu, Y. Wu, J. He, and X. Hao, *Opt. Exp.* **19**, 9950 (2011).
8. В.І. Безродний, Л.В. Вовк, Н.А. Деревянко, А.А. Іщенко, Л.В. Карабанова, И.Л. Мушкало, *Квантовая электроника* **22**, 245 (1995).
9. L. A. Zenteno, H. Po, and N.M. Cho, *Opt. Lett.* **15**, 115 (1990).
10. R. Salas-Montiel, L. Bastard, G. Grosa, and J. Broquin, *Materials Science and Engineering B* **149**, 181 (2008).
11. A. Inoue, J. Hayashi, T. Komikado, and S. Umegaki, *Opt. Lett.* **32**, 2807 (2007).
12. V.I. Bezrodnyi and A.A. Ishchenko, *Optics & Laser Technology* **34**, 7 (2002).
13. V.I. Bezrodnyi, N.A. Derevyanko, A.A. Ishchenko, and Yu.L. Slominskii, *Quantum Electronics* **25**, 823 (1995).
14. K. Waichman and Y. Kalisky, *Opt. Mat.* **19**, 149 (2002).

Одержано 14.09.11

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИНИЛАЗЕРОВ С ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ НЕЛИНЕЙНО-ПОГЛОЩАЮЩИМИ ПОЛИМЕРНЫМИ ЗАТВОРАМИ

В.И. Безродный, А.А. Ищенко, А.М. Негрийко, А.О. Ясковец, А.А. Демидович, М.Б. Данайлов, В.А. Орлович, П. Шпак

### Резюме

Исследованы характеристики миниатюрных компактных лазеров на Nd:YAG та Nd:YVO<sub>4</sub> с диодной накачкой в режиме пассивной модуляции добротности. С использованием полимерного лазерного затвора на основе полиуретана с красителем бис(4-диметиламинодितिобензил) никеля реализована генерация на длине волны 1,064 мкм с частотой следования импульсов до 25 кГц, длительностью 2–5 нс и средней мощностью до 130 мВт при накачке до 3,5 Вт. Твердотельные минилазеры с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности затворами сендвичевого типа являются эффективными компактными источниками коротких мощных импульсов с высоким оптическим качеством пучка

## CHARACTERISTICS OF SOLID-STATE LASERS WITH PASSIVE Q-SWITCHING BY POLYMER SATURABLE ABSORBERS

V.I. Bezrodnyi<sup>1</sup>, A.A. Ishchenko<sup>2</sup>, A.M. Negriyko<sup>1</sup>, A.O. Yaskovets<sup>1</sup>, A.A. Demidovich<sup>3</sup>, M.B. Danailov<sup>3</sup>, V.A. Orlovich<sup>4</sup>, P. Shpak<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics, Nat. Acad. of Sci. of Ukraine (46, Nauky Prosp., Kyiv 03028, Ukraine),

<sup>2</sup>Institute of Organic Chemistry, Nat. Acad. of Sci. of Ukraine (5, Murmanska Str., Kyiv 02660, Ukraine),

<sup>3</sup>Laser Laboratory Sincrotrone-Trieste (Strada Statale 14-km, 163.5, Trieste 34012, Italy),

<sup>4</sup>B.I. Stepanov Institute of Physics, Nat. Acad. of Sci. of Belarus (68, Nezalezhnast Ave., Minsk 220072, Belarus)

### Summary

The characteristics of miniaturized diode-pumped compact passively Q-switched Nd:YAG and Nd:YVO<sub>4</sub> lasers have been studied. Lasing at a wavelength of 1.064 μm with a pulse repetition rate of up to 25 kHz, a pulse duration of 2–5 ns, an average power of 130 mW, and a pump power of 3.5 W was realized with the use of a polymer Q-switch on the basis of polyurethane doped with the bis-(4-dimethylaminodithiobenzyl)-nickel dye. Diode-pumped solid-state mini lasers with passive Q-switching by sandwich-type modulators are efficient compact sources of short powerful light pulses with a high optical quality of the beam.