

Генерация наносекундных импульсов с частотой повторения 2.2 МГц в $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазере с непрерывной диодной накачкой, работающем в режиме пассивной модуляции добротности^{*,**}

Н.Т.Нгиа, Н.В.Хао, В.А.Орлович, Н.Д.Хунг

*Предложена новая конфигурация наносекундного лазера с высокой частотой повторения импульсов на основе зеркала с полупроводниковым насыщающимся поглотителем – SESAM. SESAM является стандартным техническим решением для пассивной синхронизации мод на длине волны 1064 нм и одновременно применяется в качестве высокоотражающего зеркала и насыщающегося поглотителя в высокодобротном и коротком резонаторе лазера на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ *a*-срезы с торцевой непрерывной диодной накачкой. Для вывода из резонатора одновременно двух лазерных пучков использовался тонкий внутрирезонаторный расщепитель с малым отражением. Исследованы лазерные характеристики в зависимости от параметров накачки и резонатора. При использовании непрерывной диодной накачки мощностью 1.8 Вт на длине волны 808 нм лазер с пассивной модуляцией добротности с помощью SESAM генерирует импульсы длительностью 22 нс с частотой повторения 2250 кГц и средней мощностью 275 мВт.*

Ключевые слова: лазерный резонатор, насыщающийся поглотитель, пассивная модуляция добротности, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$, SESAM.

1. Введение

Компактные наносекундные импульсные лазерные источники с высокой частотой повторения импульсов открывают возможность простого решения широкого круга прикладных задач, связанных, например, с быстрой дальнометрией или дистанционным зондированием. Одним из наиболее эффективных методов генерации импульсов наносекундной длительности является модуляция добротности твердотельных лазеров с диодной накачкой. Добротность лазеров с диодной накачкой модулировалась активно с помощью электрооптического модулятора либо пассивно за счет использования материалов с насыщающимся поглощением [1–3]. Однако возможности варьирования параметров этих материалов, таких как время восстановления и глубина модуляции, ограничены, что сужает область применения данных материалов в качестве насыщающихся поглотителей. Чистый GaAs был впервые использован для пассивной модуляции добротности в работе [4], что позволило авторам получить импульс генерации малой длительности (~3 нс). В 2001 г. был создан $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазер с модуляцией добротности и самосинхронизацией мод насыщающимся поглотителем из $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ [5]. Импульсы лазера длительностью ~250 нс имели частоту повторения 260 кГц. В 2004 г. были исследованы характеристики $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазера с пассивной модуляцией добротности с помощью насыщающегося поглотителя из $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ [6]. В 2005 г. в работе [7] использовалась

селекция частот для удаления неосновных импульсов внутри огибающей модуляции добротности и была получена чистая модуляция добротности с длительностью импульсов 150 нс и частотой их повторения 76.3 кГц.

Недавно композитный полупроводниковый поглотитель, специально изготовленный с помощью метода металлоорганического химического осаждения паров (MOCVD), использовался как для пассивной модуляции добротности, так и в качестве элемента связи. Лазер генерировал импульсы длительностью 8.3 нс с частотой повторения свыше 2 МГц [8].

В настоящем эксперименте в качестве активной среды использовался кристалл $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ *a*-срезы, популярность которого обусловлена его большим коэффициентом усиления, низким порогом генерации и большими коэффициентами поглощения на длинах волн накачки. Данный кристалл имеет сечение вынужденного излучения на длине волны $\lambda = 1064$ нм (25×10^{-19} см²), примерно в четыре раза большее, чем у $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ (6×10^{-19} см²), и его эффективность при диодной накачке может превышать 60% [5–10]. Эти преимущества делают $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ более предпочтительным, чем $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ для применения во многих приложениях. В последние годы кристаллы $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ интенсивно использовались в качестве усиливающих сред в полностью твердотельных лазерах с диодной накачкой.

В данной работе мы предлагаем новую компактную и простую конфигурацию резонатора $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазеров с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности зеркалом с полупроводниковым насыщающимся поглотителем (semiconductor saturable absorber mirror – SESAM) для генерации стабильных наносекундных лазерных импульсов с большой частотой повторения и высокой эффективностью преобразования. SESAM на основе кристалла InGaAs, который широко применяется для пассивной синхронизации мод на $\lambda = 1064$ нм, используется одновременно в качестве высокоотражающего зеркала и насыщающегося поглотителя в высокодобротном и коротком резонаторе $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазера с торцевой непрерывной диодной

* Доложена на конференции «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, июнь 2010 г.

** Перевод с англ. В.В.Шувалова.

N.T.Nghia, N.V.Hao, N.D.Hung. Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology; e-mail: ntngia@iop.vast.ac.vn

В.А.Орлович. Институт физики им. Б.И.Степанова, НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Независимости, 70

накачкой и пассивной модуляцией добротности. Вывод из резонатора одновременно двух лазерных пучков осуществлялся с помощью внутрирезонаторного тонкого расщепителя с малым отражением. Были исследованы лазерные характеристики в зависимости от параметров накачки и резонатора. Nd³⁺:YVO₄-лазер с пассивной модуляцией добротности генерирует одиночные импульсы длительностью 22 нс с частотой повторения 2250 кГц и средней мощностью 275 мВт.

Насколько нам известно, такая частота повторения импульсов является самой высокой из когда-либо генерируемых непосредственно Nd³⁺:YVO₄-лазером с непрерывной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности обычным SESAM. Для сравнительного анализа использовался кристалл Cr⁴⁺:YAG (начальное пропускание 90%) в качестве внутрирезонаторного насыщающегося поглотителя для пассивной модуляции добротности Nd³⁺:YVO₄-лазера. Сравнение этих лазеров показывает преимущества использования SESAM для получения устойчивой генерации лазера с пассивной модуляцией добротности при большой частоте повторения импульсов и высокой эффективности преобразования.

2. Эксперимент

На рис.1 представлена схема нашего Nd³⁺:YVO₄-лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности. Активная среда размером 3×3×3 мм из кристалла YVO₄, легированного ионами Nd³⁺ с концентрацией 0.1% (Casix), накачивается на λ = 808 нм излучением диодного лазера (ATC-Semiconductor Devices) с максимальной мощностью 2.0 Вт. При использовании лазерного диода с шириной области генерации 200 мкм и простой оптической системы ввода, состоящей из одного объектива с фокусным расстоянием 2.5 см, мы смогли получить небольшое пятно накачки в кристалле Nd³⁺:YVO₄ при сохранении компактности установки.

Для сравнительного анализа характеристик генерации лазеров с пассивной модуляцией добротности с помощью SESAM и кристалла Cr⁴⁺:YAG вначале мы использовали в качестве насыщающегося поглотителя кристалл

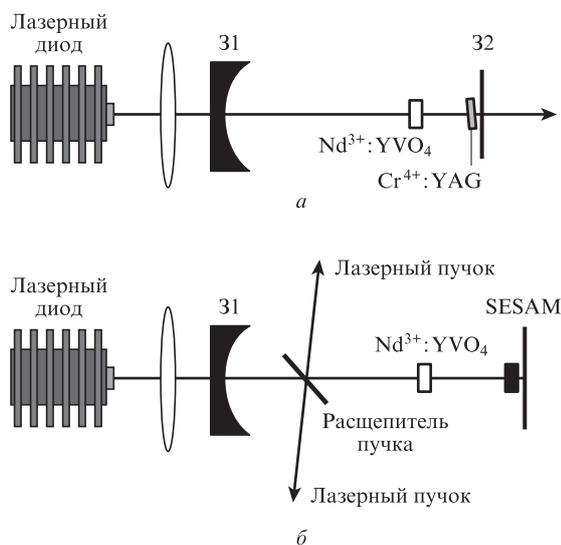


Рис.1. Схема Nd³⁺:YVO₄-лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности с помощью кристалла Cr⁴⁺:YAG (а) и SESAM (б); 31 и 32 – зеркала резонатора.

Cr⁴⁺:YAG (Casix) толщиной 1 мм с начальным пропусканием 90%. Резонатор лазера на кристалле Nd³⁺:YVO₄ *a*-среза с пассивной модуляцией добротности кристаллом Cr⁴⁺:YAG является устойчивым линейным резонатором (рис.1,а). В нашем эксперименте при использовании непрерывной накачки излучением лазерного диода мощностью 1.8 Вт на λ = 808 нм в Nd³⁺:YVO₄-лазере с пассивной модуляцией добротности с помощью кристалла Cr⁴⁺:YAG генерировались импульсы длительностью 35 нс с максимальной частотой повторения 42 кГц и дифференциальной эффективностью 10.5%.

Теоретически для получения большей частоты повторения импульсов данного Nd³⁺:YVO₄-лазера требуется большая мощность диодной накачки и меньшая длина резонатора. Последнее реально при использовании преимуществ SESAM, способного одновременно служить высокоотражающим зеркалом и насыщающимся поглотителем для пассивной модуляции добротности. На рис.1,б показана конфигурация лазера на кристалле Nd³⁺:YVO₄ *a*-среза с пассивной модуляцией добротности с помощью SESAM. Мы использовали SESAM (SE-1064-2-0), предоставленный фирмой Vator [9], в качестве заднего высокоотражающего зеркала и внутрирезонаторного насыщающегося поглотителя. Параметры SESAM (Vator) представлены ниже.

Длина волны лазера λ (нм)	1064
Диапазон высокого отражения (R > 99%) (нм)	1020–1110
Поглощение A ₀ (%)	2
Глубина модуляции ΔR (%)	1.2
Плотность энергии насыщения F _{sat} (мкДж/см ²)	70
Время релаксации τ (пс)	20
Ненасыщаемые потери A _{ns} (%)	менее 0.8
Порог разрушения (МВт/см ²)	800
Размер поверхности SESAM (мм)	5×5
Толщина SESAM (мкм)	350
Защитное покрытие	фронтальное диэлектрическое

Зависимости коэффициента отражения SESAM от длины волны приведены на рис.2. Короткий (3 см) высокодобротный резонатор Nd³⁺:YVO₄-лазера образован SESAM (используется одновременно как высокоотражающее зеркало (32) и внутрирезонаторный насыщающийся поглотитель) и задним зеркалом (31) с радиусом кривизны 5 см,

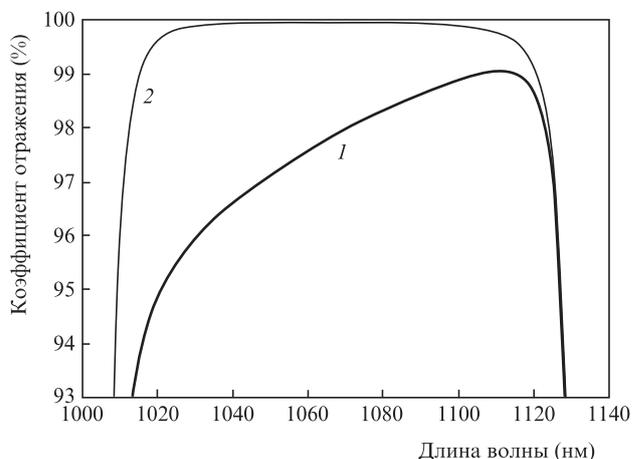


Рис.2. Коэффициент отражения SESAM (SE-1064-2-0) в ненасыщенном (1) и насыщенном (2) состояниях.

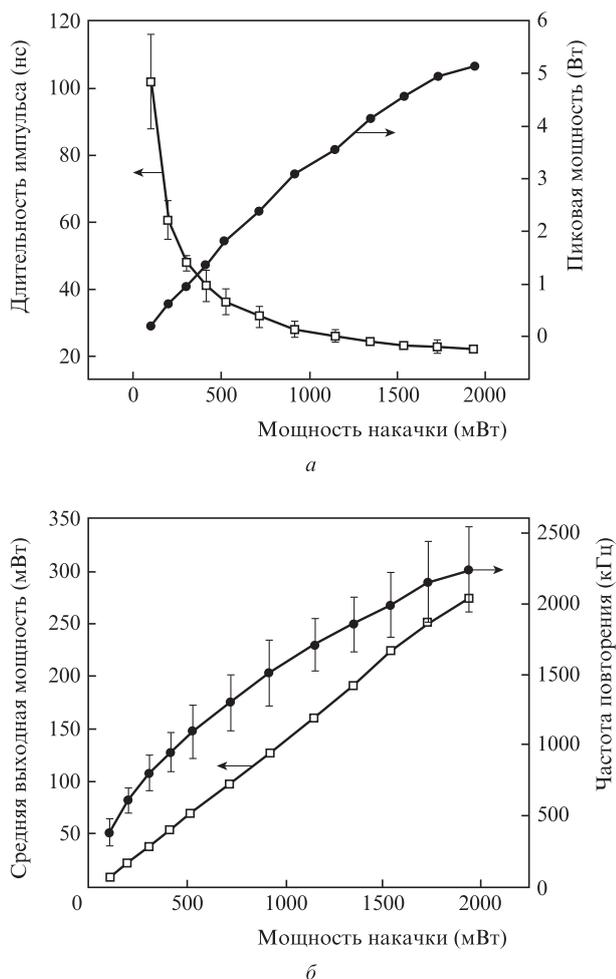


Рис.3. Характеристики Nd³⁺:YVO₄-лазера с пассивной модуляцией добротности с помощью SESAM: длительность импульса и пиковая мощность (а), средняя выходная мощность и частота повторения импульсов (б).

сильно отражающим на $\lambda = 1064$ нм и слабо отражающим на $\lambda = 808$ нм. Для вывода излучения используется внутрирезонаторный тонкий расщепитель с низким коэффициентом отражения для лазерного излучения (4%), расположенный под углом Брюстера для излучения накачки (рис.1,б). Для уменьшения тепловой нагрузки кристалл Nd³⁺:YVO₄ и SESAM были смонтированы на медных блоках. Подробная информация о конструкции рассматриваемого лазера была представлена в работах [10, 11].

Выходные импульсы лазеров с модуляцией добротности контролировались быстрым фотодиодом (Hamamatsu; время нарастания 0.3 нс) и цифровым осциллографом (Tektronix TDS 7154B, 1.5 ГГц, частота дискретизации 20 ГГц). Энергии импульсов измерялись широкополосными измерителями энергии (Laser Precision и Melles Griot).

На рис.3 и 4 представлены характеристики Nd³⁺:YVO₄-лазера с пассивной синхронизацией мод с помощью SESAM. При использовании лазерного диода накачки мощностью 1.8 Вт на $\lambda = 808$ нм лазер с модуляцией добротности с помощью SESAM генерировал импульсы длительностью 22 нс при частоте повторения до 2.15 МГц и средней мощности 275 мВт, что соответствует эффективности преобразования 15.3% (рис.3). При максимальной мощности (2.0 Вт) лазерного диода накачки лазер генерировал импульсы примерно той же длительности (22 нс), но с более высокой частотой повторения (2.25 МГц). Однако обыч-

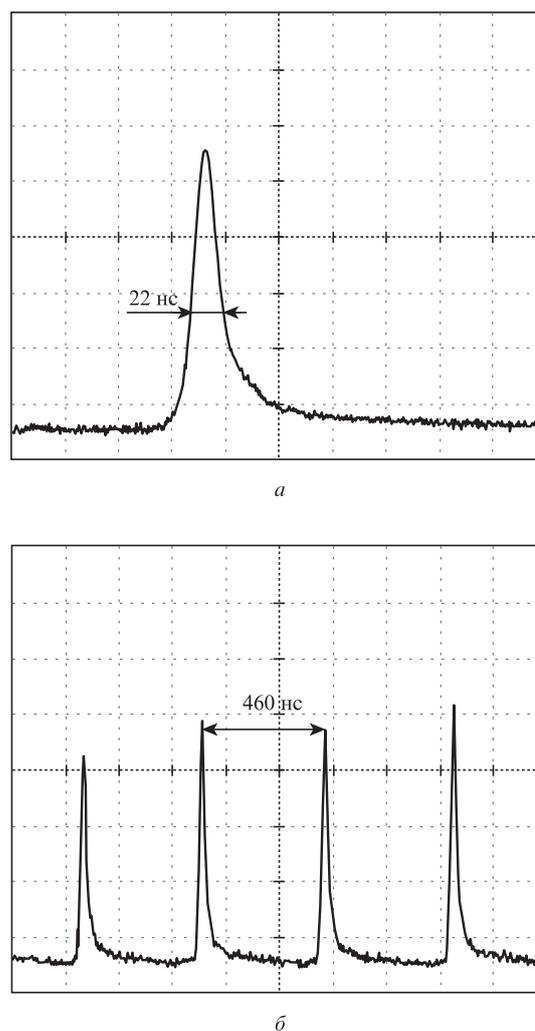


Рис.4. Осциллограммы импульса (а) и последовательности импульсов (б) Nd³⁺:YVO₄-лазера с пассивной модуляцией добротности с помощью SESAM.

но в наших лазерных экспериментах использовалась мощность лазерного диода накачки 1.8 Вт.

Таким образом, лазер с модуляцией добротности с помощью SESAM обеспечивал одновременно меньшую длительность гигантского импульса, большую лазерную эффективность и, в частности, значительно более высокую частоту повторения импульсов (до 2.25 МГц), чем лазер с модуляцией добротности кристаллом Cr⁴⁺:YAG.

Наносекундные лазерные импульсы излучения с $\lambda = 1064$ нм регистрировались с двух выходов Nd³⁺:YVO₄-лазера с модуляцией добротности с помощью SESAM и оказались идентичными. Конфигурация резонатора наносекундного лазера с такими двумя выходами излучения достаточно привлекательна для приложений, где требуется высокая частота повторения импульсов, кратная частотам, получаемым за счет синхронизирующей электроники, или где нужно управлять временным интервалом между двумя лазерными импульсами.

Кроме того, исследование лазера на кристалле Nd³⁺:YVO₄ *a*-среза с пассивной модуляцией добротности с помощью SESAM выявило ряд преимуществ использования SESAM для пассивной модуляции добротности твердотельных лазеров. Во-первых, длина резонатора может быть сделана предельно малой, что позволит получать гигантские импульсы меньшей длительности. Во-вторых, нет никаких

специальных требований к изготовлению SESAM и можно использовать обычные коммерческие образцы, причем их запрещенную зону можно контролировать и изменять для использования SESAM с лазерными материалами на разных длинах волн. Это относится также и к конфигурации резонатора, которая позволяет осуществлять независимую подстройку интенсивности насыщения.

3. Заключение

Продемонстрирована простая и компактная конфигурация лазерного резонатора для Nd³⁺:YVO₄-лазеров с непрерывной торцевой диодной накачкой, высокой частотой повторения импульсов и пассивной модуляцией добротности с помощью стандартного SESAM (для синхронизации мод). При использовании непрерывной диодной накачки мощностью 2.0 Вт этот лазер обеспечивает длительность импульса 22 нс при эффективности преобразования более 15% и частоте повторения импульсов до 2250 кГц. Параметры накачки и лазерного резонатора могут быть улучшены для получения более высокой частоты повторения импульсов и меньшей длительности им-

пульса, а также для использования их с другими лазерными материалами и на разных длинах волн.

Авторы благодарят за финансовую поддержку Вьетнамский национальный фонд развития науки и технологий (NAFOSTED; проект № 103.06.89.09).

1. Feldman R., Shimony Y., Burshtein Z. *Opt. Mater.*, **24**, 393 (2003).
2. Miller I., Alcock A., Bernard J., in *Advanced Solid State Lasers* (Washington, DC, OSA, 1992, vol. 13, p. 332).
3. Spühler G.J., Paschotta R., Fluck R., Braun B., Moser M., Zhang G., Gini E., Keller U. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 367 (1999).
4. Kajava T.T., Gaeta A.L. *Opt. Lett.*, **21**, 1224 (1996); *Opt. Commun.*, **137**, 93 (1997).
5. Chen Y.F., Tsai S.W., Wang S.C., Chen J. *Appl. Phys. B*, **73**, 115 (2001).
6. Villafana E., Alexander R., Kir'yanov V. *Opt. Commun.*, **242**, 241 (2004).
7. Pan H.F., Xu S.X., Zeng H.P. *Opt. Express*, **13**, 2755 (2005).
8. Wang Y.G., Ma X.Y., Peng J.Y., Tan H.-M., Qian L.-S. *Appl. Opt.*, **45** (25), 6616 (2006).
9. <http://www.batop.com/sesam/>.
10. Nghia N.T., Khanh D.Q., et al. *Comm. Phys. (VAST)*, **19**, Special issue, 145 (2009).
11. Nghia N.T., Hoang N.D., Thang D.D., et al. *Proc. 5th Asian Symposium on Intense Laser Science* (Beijing, China, 2010, pp 354–358).