

Пассивные затворы для модуляции добротности лазера на эрбиевом стекле с диодной накачкой

В.Э.Кисель, В.Г.Щербицкий, Н.В.Кулешов, Л.И.Постнова,
В.И.Левченко, Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, С.Е.Сверчков

Проведены исследования лазера на эрбиевом стекле ($\lambda = 1.54$ мкм) с диодной накачкой, работающего в режиме пассивной модуляции добротности, при использовании в качестве насыщающихся поглотителей кристаллов селенида цинка (ZnSe), легированных ионами Co^{2+} и Cr^{2+} , и кристаллов магний-алюминиевой шпинели ($MgAl_2O_4$), легированных ионами Co^{2+} . Показано, что в зависимости от типа насыщающегося поглотителя, мощности накачки и конфигурации резонатора энергия лазерных импульсов может варьироваться от 0.2 до 13 мкДж, длительность – от 16 до 980 нс, а частота следования – от 0.1 до 30 кГц.

Ключевые слова: монокристаллы $Cr : ZnSe$, $Co : ZnSe$, $Co : MgAl_2O_4$, модуляция добротности, пассивный затвор.

1. Введение

Широкое практическое применение лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1.4–1.6 мкм, обусловлено тем, что излучение в этом диапазоне является наиболее безопасным для зрения, обладает малыми потерями при прохождении через атмосферу, а дисперсия и поглощение в кварцевом волокне в указанном диапазоне имеют низкие значения. Вследствие этого лазеры с длиной волны излучения вблизи 1.5 мкм широко используются в офтальмологии, волоконно-оптических системах связи, оптической локации и дальнометрии. Для данных практических приложений требуются, как правило, короткие импульсы с высокой пиковой мощностью. Одним из простых и надежных способов получения таких импульсов является режим пассивной модуляции добротности (ПМД).

В настоящее время для получения режима ПМД лазеров на эрбиевом стекле с непрерывной диодной накачкой используются различные насыщающиеся поглотители, например полупроводниковое зеркало с насыщением поглощения (SESAM) [1], легированные ионами Co^{2+} кристаллы $LaMgAl_{11}O_{19}$ [2] и $MgAl_2O_4$ [3]. В данных системах получены лазерные импульсы с энергией 1–15 мкДж и длительностью 1.2–10 нс. Перспективным является применение кристаллов селенида цинка (ZnSe) с примесью ионов Co^{2+} [4, 5] и Cr^{2+} [6] в качестве насыщающихся поглотителей для лазера на эрбиевом стекле с импульсной ламповой накачкой. К достоинствам леги-

рованных ионами Co^{2+} и Cr^{2+} материалов, используемых в качестве пассивных затворов, относятся относительно высокие поперечные сечения поглощения из основного состояния ($\sim 10^{-19}$ см²) и незначительные потери на поглощение из возбужденного состояния. В настоящей работе впервые исследованы кристаллы $Co : ZnSe$ и $Cr : ZnSe$, используемые в качестве пассивных затворов для лазера на эрбиевом стекле с непрерывной продольной диодной накачкой; проведено их сравнение с затворами на основе кристаллов $Co : MgAl_2O_4$ в одинаковых экспериментальных условиях.

2. Эксперимент

Образцы кристаллов селенида цинка, легированные хромом и кобальтом, готовились методом диффузионного легирования [7], а кристаллы $Co : MgAl_2O_4$ были выращены методом Чохральского.

Спектры поглощения кристаллов $Co : ZnSe$, $Cr : ZnSe$ и $Co : MgAl_2O_4$ в области 1.5 мкм приведены на рис.1.

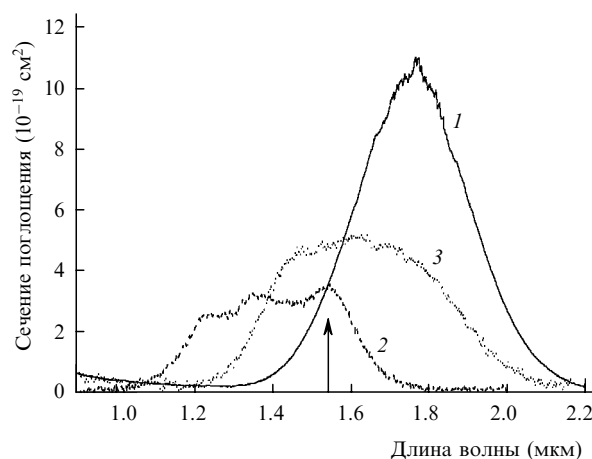


Рис.1. Сечения поглощения из основного состояния кристаллов $Cr : ZnSe$ (1), $Co : MgAl_2O_4$ (2) и $Co : ZnSe$ (3) в спектральной области 1.5 мкм. Стрелкой показана длина волны эрбиевого лазера.

В.Э.Кисель, В.Г.Щербицкий, Н.В.Кулешов. Международный лазерный центр БНТУ, Белоруссия, 220013 Минск, просп. Ф.Скорины, 65, корп. 17; e-mail: VEKisel@ilc.by, svg@ilc.by, nkuleshov@ilc.by
Л.И.Постнова, В.И.Левченко. Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссия, 220072 Минск, ул. П.Бровки, 17; e-mail: levchen@iftt.bas-net.by

Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, С.Е.Сверчков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: galagan@ran.gpi.ru, Denker@lst.gpi.ru, Glasser@lst.gpi.ru

Поступила в редакцию 31 марта 2005 г., после доработки – 17 мая 2005 г.

Полосы поглощения принадлежат тетраэдрически координированным ионам Cr^{2+} (переход ${}^5T_2 \rightarrow {}^5E$) и Co^{2+} (переход ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1({}^4F)$) [6, 8]. Данные кристаллы имеют примерно равные поперечные сечения поглощения ($(3-5) \times 10^{-19} \text{ см}^2$) на $\lambda = 1.54 \text{ мкм}$, но различные времена жизни возбужденных состояний при комнатной температуре: 290 мкс в $\text{Co}:\text{ZnSe}$, 5.4 мкс в $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ и 350 нс в $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ [5, 6, 8, 9].

Кристаллы, используемые в качестве пассивных затворов, исследовались с помощью представленной на рис.2 экспериментальной установки. Резонатор длиной от 48 до 6 мм состоял из входного (по отношению к излучению накачки) плоского зеркала со 100 %-ным отражением на длине волны генерации 1540 нм и высоким (более 95 %) пропусканием на длине волны накачки 981 нм и вогнутого выходного зеркала с радиусом кривизны -50 мм и пропусканием на длине волны генерации 1 % и 2 %. Активный элемент толщиной 2 мм на основе фосфатного стекла, легированного ионами Yb^{3+} и Er^{3+} , был закреплен на алюминиевом теплоотводе, охлаждаемом проточной водой. Накачка осуществлялась лазерным InGaAs -диодом, излучающим на длине волны 981 нм, с максимальной мощностью 0.85 Вт и оптоволоконным выходом (волокно диаметром 150 мкм с числовой апертурой 0.12 и качеством излучения $M^2 = 30$). Излучение полупроводникового лазера коллимировалось и фокусировалось на активном элементе системой из двух линз с фокусным расстоянием 12 мм. Диаметр перетяжки пучка накачки составлял около 170 мкм с конфокальной длиной 2.3 мм. Наилучшее перекрытие моды резонатора и накачки было достигнуто при длине резонатора 48 мм, при этом диаметр TEM_{00} -моды резонатора в активном элементе составлял около 160 мкм.

Для получения режима пассивной модуляции добротности использовались полированные образцы $\text{Cr}:\text{ZnSe}$, $\text{Co}:\text{ZnSe}$ и $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ без антиотражающих покрытий с пропусканием T на длине волны 1535 нм, составляющим 98 %, 98 % и 99 %, соответственно. Насыщающиеся поглотители располагались на расстоянии 2 мм от активного элемента. Параметр внутрирезонаторной фокусировки излучения (отношение поперечных сечений моды резонатора на активном элементе и просветляющейся среде) составлял 0.92.

Выходная мощность излучения измерялась с помощью измерителя мощности фирмы Orphic с фоточувствительной головкой 3A-P-CAL. Временные параметры излучения анализировались Ge-фотодиодом с постоянной времени менее 1 нс и цифровым осциллографом Tektronix TDS3052B с полосой пропускания 500 МГц.

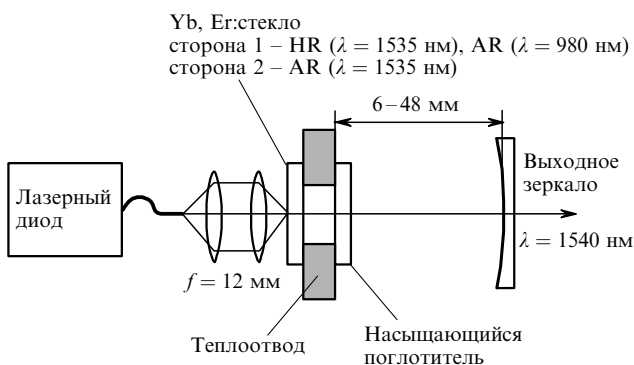


Рис.2. Схема экспериментальной установки для исследования режима пассивной модуляции добротности лазера на эрбиевом стекле.

3. Результаты экспериментов

Выходные характеристики эрбиевого лазера в непрерывном режиме генерации (без пассивных затворов) представлены на рис.3. Его максимальная выходная мощность при дифференциальной эффективности генерации η относительно поглощенной мощности накачки 28 % составляла 120 мВт и была получена в резонаторе длиной 48 мм с пропусканием выходного зеркала $T = 1 \%$; при $T = 2 \%$ выходная мощность составляла 75 мВт, а эффективность была равна $\sim 22 \%$.

Лучшие характеристики лазера в режиме модуляции добротности были получены с пропусканием выходного зеркала 2 %. Наибольшая средняя выходная мощность 68 мВт (рис.4) при длительности импульсов 280 нс, энергии в одном импульсе 7 мкДж и поглощенной мощности накачки около 600 мВт была достигнута при использовании образца $\text{Cr}:\text{ZnSe}$. С увеличением поглощенной мощности накачки от 110 до 600 мВт частота следования импульсов изменялась от 100 Гц до 10 кГц, а длительность импульсов – от 400 до 280 нс (рис.5). Средняя выходная мощность 50 мВт с импульсами длительностью 150 нс и энергией в одном импульсе 13 мкДж при поглощенной мощности накачки около 600 мВт была достигнута с образцом $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$.

Для эрбиевого лазера с затвором из $\text{Co}:\text{ZnSe}$ в режиме модуляции добротности средняя выходная мощность

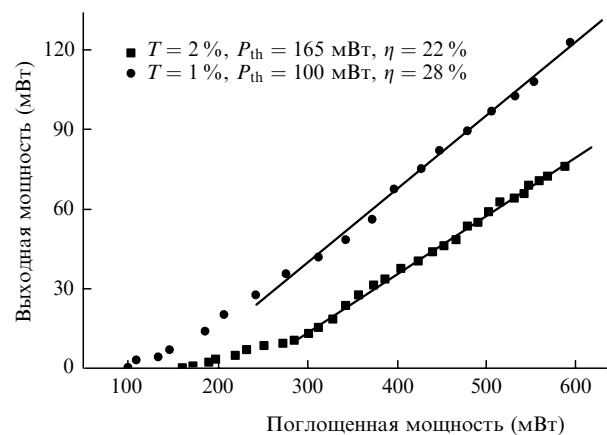


Рис.3. Выходные характеристики эрбиевого лазера в непрерывном режиме генерации.

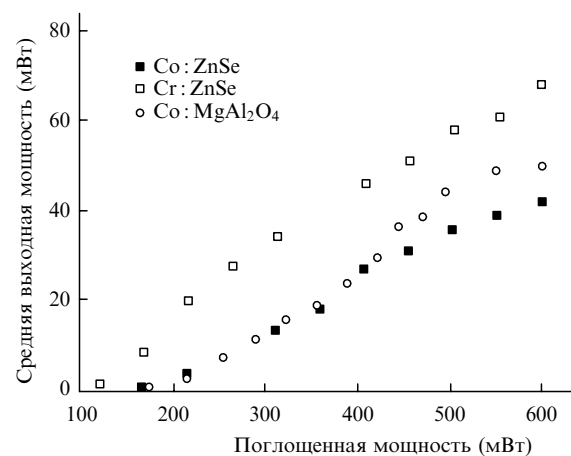


Рис.4. Зависимости средней выходной мощности эрбиевого лазера в режиме пассивной модуляции добротности с затворами на основе кристаллов $\text{Cr}:\text{ZnSe}$, $\text{Co}:\text{ZnSe}$ и $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$.

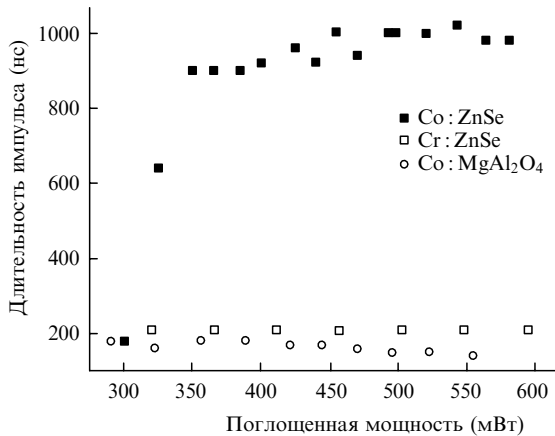


Рис. 5. Зависимость длительности импульсов эрбиевого лазера от поглощенной мощности в режиме пассивной модуляции добротности с затворами на основе кристаллов Cr: ZnSe, Co: ZnSe и Co: MgAl₂O₄.

составляла 42 мВт (см. рис.4), длительность импульса изменялась от 140 до 980 нс (рис.5), а частота следования – от 140 Гц до 30 кГц при увеличении мощности накачки от пороговой до максимальной.

Оциллограммы импульсов эрбиевого лазера с пассивным затвором из Co: ZnSe представлена на рис.6. При мощности накачки, близкой к пороговой, наблюдается высокоинтенсивный наносекундный импульс, за которым следуют до десяти импульсов с малой интенсивностью. С увеличением мощности накачки образуется последовательность субмикросекундных импульсов с одинаковой амплитудой и высокой частотой следования. Это объясняется сравнительно большим временем релаксации ионов Co²⁺ в ZnSe (около 290 мкс), что приводит к уменьшению насыщающихся потерь на затворе (глубины модуляции затвора) при высоких частотах следования импульсов (более 3.5 кГц), когда временной интервал между импульсами меньше времени релаксации насыщающегося поглотителя.

Эффективность модуляции добротности (отношение средней выходной мощности в режиме модуляции добротности к выходной мощности в режиме непрерывной генерации) с затворами на основе кристаллов Cr: ZnSe, Co: MgAl₂O₄ и Co: ZnSe составила 90 %, 65 % и 57 % соответственно.

С целью уменьшения длительности лазерных импульсов были проведены исследования режима пассивной модуляции добротности в коротком (6 мм) резонаторе. Для резонатора такой длины лучшие характеристики были получены с зеркалом, пропускание которого составляло 1 %. Выходная мощность лазера в непрерывном режиме генерации снизилась до 50 мВт. Это объясняется снижением эффективности накачки из-за неполного перекрытия пучка накачки (диаметр 170 мкм) и мо-

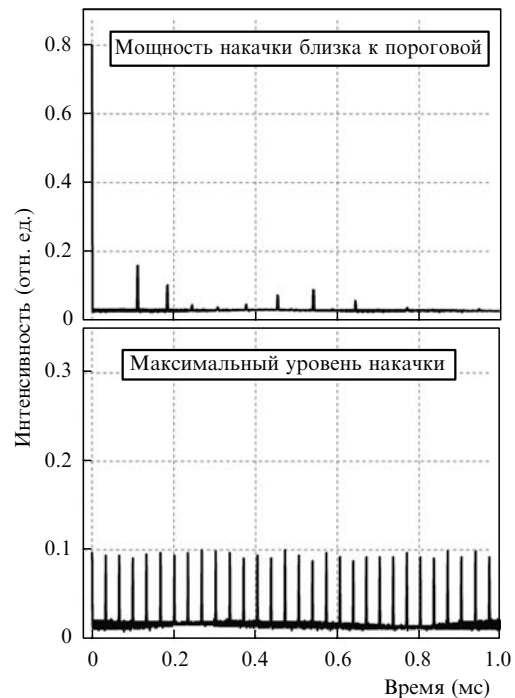


Рис. 6. Оциллограмма импульсов эрбиевого лазера в режиме пассивной модуляции добротности с затвором на основе кристалла Co: ZnSe.

ды резонатора (диаметр 200 мкм). Наибольшая средняя выходная мощность – 36 мВт – при длительности импульсов 16 нс, энергии в одном импульсе 5.5 мкДж и поглощенной мощности накачки 600 мВт была достигнута с образцом Co: MgAl₂O₄. Частота следования импульсов составляла 6.5 кГц. При той же мощности накачки, длительности импульсов 60 нс, энергии в одиночном импульсе 4.7 мкДж и использовании образца Cr: ZnSe средняя выходная мощность составила 20 мВт. Частота следования импульсов в этом случае была равна 4.3 кГц.

Для эрбиевого лазера с затвором из Co: ZnSe в режиме модуляции добротности средняя выходная мощность составляла 15 мВт. Длительность импульса зависела от мощности накачки так же, как и в случае резонатора длиной 48 мм. При увеличении поглощенной мощности накачки от 100 до 600 мВт частота следования импульсов изменялась от 2 до 16.5 кГц, длительность – от 60 до 400 нс.

Результаты экспериментов по исследованию режима пассивной модуляции добротности эрбиевого лазера с использованием насыщающихся поглотителей на основе кристаллов Cr: ZnSe, Co: ZnSe и Co: MgAl₂O₄ представлены в табл.1.

Лазерные импульсы, полученные в настоящей работе

Табл.1.

Тип затвора	Длина резонатора (мм)	Длительность импульса (нс)	Энергия импульса (мкДж)	Частота повторения (кГц)	Выходная мощность (мВт)	Пиковая мощность (Вт)
Cr: ZnSe		280	7	9.7	68	25
Co: ZnSe	48	170–980	1.4–9	30	42	1.4–52
Co: MgAl ₂ O ₄		150	13	3.9	50	86
Cr: ZnSe		60	4.7	4.3	20	78
Co: ZnSe	6	60–400	0.2–1	16.5	15	0.5–17
Co: MgAl ₂ O ₄		20	5.5	6.5	36	275

с использованием кристаллов $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$, несколько уступают по длительности (и пиковой мощности) импульсам, полученным в работе [3], длительность которых составляла 2.3–8 нс, максимальная энергия – около 9 мкДж, а пиковая мощность варьировалась от 0.2 до 2 кВт, однако превосходят последние по энергии. Это обусловлено различной конфигурацией резонаторов: в работе [3] эксперименты проводились с микролазером с длиной резонатора 1 мм.

Из результатов, приведенных в табл.1, видно, что наиболее перспективными материалами для пассивных затворов (из исследованных материалов) для лазера на эрбиевом стекле являются кристаллы $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ и $\text{Cr}:\text{ZnSe}$. Наибольшие пиковые мощности импульсов излучения были получены в лазере с коротким резонатором.

4. Заключение

Экспериментально исследован режим пассивной модуляции добротности лазера на эрбиевом стекле с непрерывной диодной накачкой с насыщающимися поглотителями на основе кристаллов $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$, $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ и $\text{Co}:\text{ZnSe}$. В зависимости от типа затвора, мощности накачки и конфигурации резонатора энергия лазерных импульсов составила 0.2–13 мкДж, длительность – от 16 до 980 нс и частота следования – от 0.1 до 30 кГц. Относительно большое время релаксации просветления затвора на основе кристалла $\text{Co}:\text{ZnSe}$ (290 мкс) приводит к увеличению частоты следования, уменьшению энергии и возрастанию длительности лазерных импульсов. Значительное снижение средней выходной мощности лазеров с пассивными затворами из $\text{Co}:\text{ZnSe}$ и $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ при использовании короткого резонатора объясняется большей чувствительностью лазера на эрбиевом стекле (ква-

зитрехуровневая схема генерации) к потерям, возникающим вследствие неполного перекрытия пучка накачки (диаметр 170 мкм) и моды резонатора (диаметр 200 мкм). Более высокие потери, вносимые данными кристаллами по сравнению с кристаллом $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$, обусловлены меньшим начальным пропусканием (98 %) и большим коэффициентом преломления кристалла-матрицы ($n_{\text{ZnSe}} = 2.44$), что увеличивает потери за счет френелевского отражения от граней затворов (без антиотражающих покрытий). Из исследованных материалов наиболее перспективными пассивными затворами для лазера на эрбиевом стекле с непрерывной диодной накачкой являются кристаллы $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ и $\text{Cr}:\text{ZnSe}$.

Работа поддерживалась совместным проектом БРФФИ (грант № Ф04Р-145) и РФФИ (грант № 04-02-81015 Бел 2004А).

1. Fluck R., Haring R., Paschotta R., Gini E., Meichior H., Keller U. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3273 (1998).
2. Thony Ph., Ferrand B., Molva E. *OSA TOPS*, **19**, 150 (1998).
3. Karlsson G., Pasiskevicius V., Laurell F., Tellefsen J.A., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. *Advanced Solid-State Lasers, OSA Techn. Digest* (Washington DC: OSA, 2001).
4. Tsai T.Y., Birnbaum M. *J. Appl. Phys.*, **87**, 25 (2000).
5. Podlipensky A.V., Shcherbitsky V.G., Kuleshov N.V., Mikhailov V.P., Levchenko V.I., Yakimovich V.N. *Opt. Lett.*, **24**, 960 (1999).
6. DeLoach L.D., Page R.H., Wilke G.D., Payne S.A., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 885 (1996).
7. Levchenko V.I., Yakimovich V.N., Postnova L.I., Konstantinov V.I., Mikhailov V.P., Kuleshov N.V. *J. Crystal Growth*, **198-199**, 980 (1999).
8. Kuleshov N.V., Mikhailov V.P., Shcherbitsky V.G., Prokoshin P.V., Yumashev K.V. *J. Lumin.*, **55**, 265 (1993).
9. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Prokoshin P.V., Mikhailov V.P. *Appl. Phys. B*, **70**, 179 (2000).