

УДК 621.373.826

Гранат-неодимовый лазер с синхронизацией мод акустооптическим модулятором бегущей волны и сферическим зеркалом

© 2020 г. **А. В. Грибанов, канд. физ.-мат. наук; Д. В. Яковин; М. Д. Яковин**

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

E-mail: gribanov84@mail.ru

Поступила в редакцию 20.01.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-06-03-08

Представлены результаты экспериментов по исследованию генерационных характеристик диодно-накачиваемого Nd: YAG лазера с синхронизацией мод сферическим зеркалом и акустооптическим модулятором бегущей волны. Измерены характеристики дифрагированного излучения, выводимого из резонатора акустооптическим модулятором в случае плотного резонатора и в случае создания в резонаторе потерь, аналогичных пропусканию выходного зеркала. Также рассмотрен случай с дополнительным резонатором по дифрагировавшим лучам, возвращающим их обратно в резонатор лазера.

Ключевые слова: Nd: YAG лазер, диодная накачка, модуляция добротности, синхронизация мод.

Коды OCIS: 140.3530, 140.3480, 140.3540, 140.4050.

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые синхронизация мод с помощью модулятора на бегущей акустической волне была получена в работе [1]. Синхронизация мод в такой схеме возникает, благодаря возвращению дифрагированного в акустооптическом модуляторе (АОМ) излучения обратно в резонатор лазера. Похожая работа была выполнена авторами [2], которые отметили, что использование бегущих ультразвуковых волн для синхронизации мод сопряжено со значительным усложнением оптической схемы, связанным с необходимостью возвращения дифрагировавших волн обратно в оптический резонатор. В своей работе они использовали V-образный резонатор, при этом оба дифрагировавших в АОМ луча возвращались в резонатор лазера. Резонатор, предложенный в работе [2], был теоретически исследован авторами [3]. Ими было показано, что возникающая в таком резонаторе синхронизация мод экви-

валентна наблюдаемой в лазерах с внутрирезонаторной частотной модуляцией излучения.

В работах [4–8] был предложен новый метод, позволяющий получать одновременно синхронизацию мод и модуляцию добротности (QML) в твердотельных лазерах. Режим QML достигался с помощью комбинации АОМ бегущей волны и концевого сферического зеркала резонатора (метод СЗАОМ) при периодическом отключении звуковой волны модулятора. В работе [6] была наиболее подробно рассмотрена схема работы метода СЗАОМ, показаны лучи возникающие в акустооптическом модуляторе за счёт дифракции. Синхронизация мод возникает, благодаря возвращению одного из дифрагировавших в АОМ лучей обратно в резонатор лазера. За счёт второго подвергнутого дифракции луча, выходящего из резонатора, достигается режим модуляции добротности, однако характеристики этого луча, а также его влияние на динамику генерации

лазера, изучены не были. В работе [8] был обнаружен «автоQML режим», при котором модуляция добротности возникает на частоте релаксационных колебаний лазера и режим QML формируется без отключения звуковой волны. Основными преимуществами СЗАОМ по сравнению с другими методами является возможность переключения между режимами генерации (непрерывная генерация, модуляция добротности, синхронизация мод, автоQML и QML режим) без необходимости изменения оптической схемы лазера или замены каких-либо её элементов, а также сравнительная простота настройки и низкая стоимость изготовления лазера с СЗАОМ. Теоретически метод СЗАОМ исследовался авторами [9, 10]. Представляет интерес исследовать характеристики дифрагировавшего пучка, выходящего из резонатора. Оценить возможность использования его в качестве выходного излучения лазера.

В настоящей работе рассмотрена схема Nd:YAG лазера с методом СЗАОМ, в которой дифрагировавший в акустооптическом модуляторе луч может быть без потерь выведен из резонатора и в частности использоваться в качестве выходного излучения лазера. Получены зависимости средней выходной мощности и режимов синхронизации мод в зависимости от дифракционной эффективности АОМа для случая плотного резонатора, излучение из которого выводится только акустооптическим модулятором. Автокорреляционным методом измерена длительность импульсов выходного излучения. Для установления вклада в выходную мощность лазера, вносимого дифрагировавшим лучом, измерена средняя выходная мощность лазера в случае, когда в резонаторе вводятся потери, аналогичные пропусканию выходного зеркала. Также рассмотрен вариант схемы лазера, когда оба дифрагировавших луча возвращаются в резонатор лазера. В этом случае выявлено изменение динамики генерации лазера.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В предыдущих работах [4–8] использовалась четырёхзеркальная схема резонатора Nd:YAG лазера. Однако в такой схеме исследовать дифрагировавший пучок не удалось, так как его вывод без потерь из резонатора был невозмо-

жен из-за близкого расположения элементов резонатора (АОМа и активного кристалла) и малости угла дифракции. В связи с чем, был рассчитан и собран трёхзеркальный резонатор. Экспериментальная схема лазера показана на рис. 1. Активным элементом служил кристалл Nd:YAG диаметром 2 мм и длиной 63 мм с поперечной диодной накачкой на длине волны 808 нм. Радиусы кривизны сферических зеркал 31, 32, и 33 составляли 200, 400 и 500 мм соответственно, а их коэффициент отражения на рабочей длине волны $\lambda = 1064$ нм составлял более 99,5%. Несмотря на малый угол дифракции, в плоскости установки зеркала 32 расстояние между дифрагировавшим и основным лазерным пучком составляло 3,5 мм. Это позволяло вывести дифрагировавший пучок из резонатора без потерь для дальнейшего его использования. Оптическая длина резонатора равнялась $L \approx 150$ см. Акустооптический модулятор с просветлёнными торцами (модель МЗ-322) располагался под углом Брэгга к оптической оси резонатора рядом с концевым сферическим зеркалом 31. Оптическая длина пути между зеркалом 31 и центром модулятора была равна радиусу кривизны этого зеркала. На пьезопреобразователе АОМа подавалась рабочая частота $f = 50049,6$ кГц, равная половине межмодового интервала ($c/2L = 2f$). Между активным элементом и поляризатором могла устанавливаться плоскопараллельная пластинка из плавленого кварца, служащая для вывода излучения из резонатора. В качестве поляризатора использовались две брюстеровские пластинки из плавленого кварца.

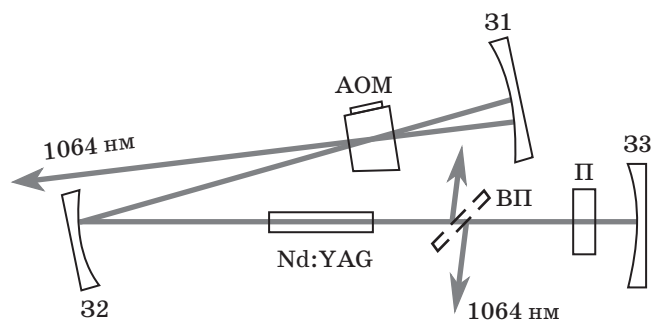


Рис. 1. Схема лазера. 31–33 — зеркала резонатора, АОМ — акустооптический модулятор, Nd:YAG — активный элемент, ВП — пластинка для вывода излучения, П — поляризатор.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показана измеренная зависимость средней выходной мощности лазера от дифракционной эффективности k_d акустооптического модулятора в случае плотного трёхзеркального резонатора (излучение выводится

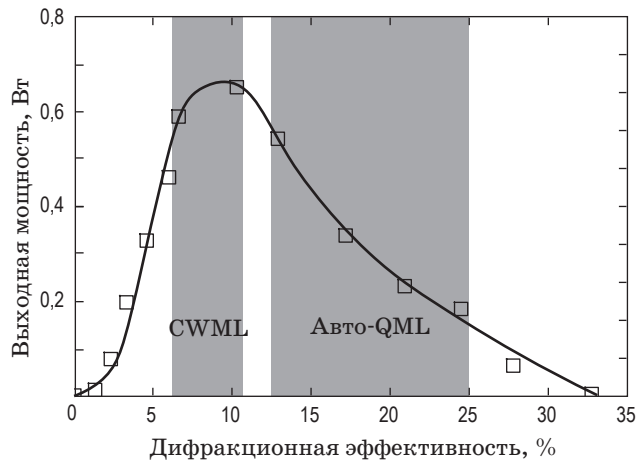


Рис. 2. Зависимость средней выходной мощности лазера от дифракционной эффективности АОМа. Серым закрашены области, в которых наблюдалась стабильная работа лазера в режимах CWML и автоQML.

из резонатора только акустооптическим модулятором). Эксперимент проводился при подаче на модулятор непрерывного питающего сигнала ультразвуковой частоты и точной настройке межмодового интервала лазера на удвоенную частоту бегущей звуковой волны модулятора. Настройка длины резонатора осуществлялась при $k_d \approx 7\%$ путём перемещения зеркала З1 с микрометрической точностью для достижения стабильной синхронизации мод в непрерывном режиме (CWML), которая наблюдалась в диапазоне отстроек длины $\Delta L < \pm 3$ мкм (см. [7]). При плавном увеличении k_d от нуля непрерывная генерация сменялась неполной синхронизацией мод. При этом в амплитуде импульсов присутствовали сильные пульсации, которые при $k_d \approx 6\%$ превращались в автоQML режим генерации (см. рис. 3а) с частотой цуга импульсов 40 кГц и длительностью цуга 5 мкс. Данный режим наблюдался в очень узком интервале k_d (менее 1%) и отличался низкой стабильностью и неполной синхронизацией мод. При увеличении k_d до 6,5% возникал CWML режим генерации, показанный на рис. 3б, 3в, который наблюдался вплоть до $k_d = 11\%$. Дальнейшее увеличение дифрак-

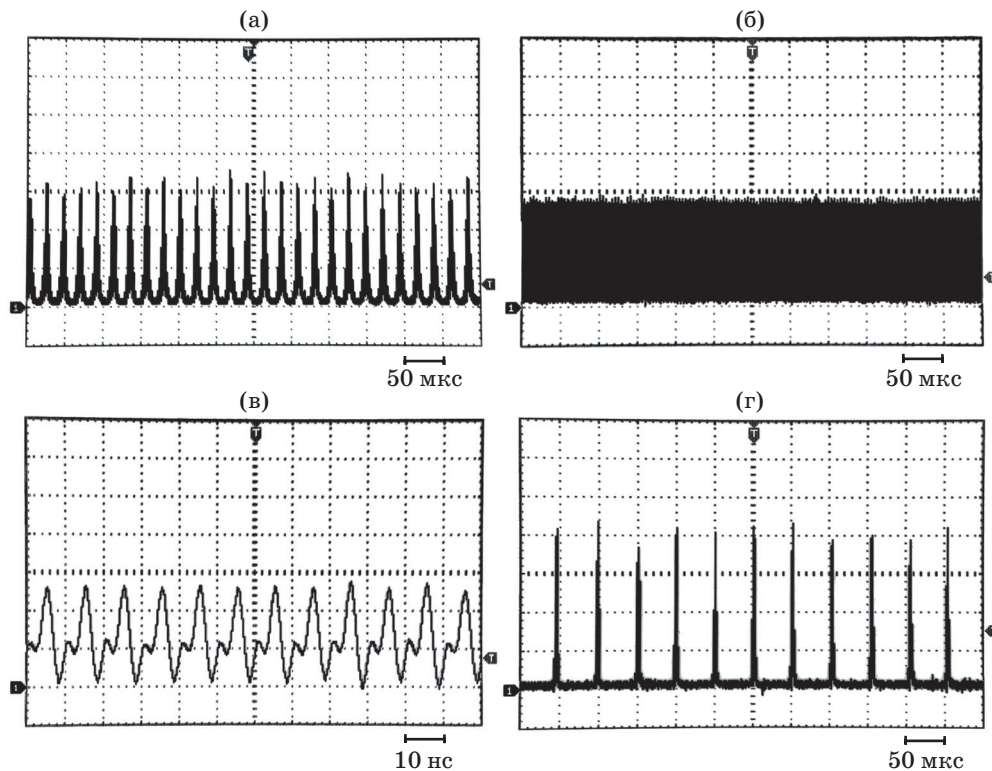


Рис. 3. Осциллограммы выходного излучения лазера при $k_d \approx 6\%$ (а), при $k_d \approx 10\%$ (б, в), при $k_d \approx 21\%$ (г).

ционной эффективности приводило к появлению пульсаций. При $k_d = 13\%$ пульсации превращались в автоQML режим генерации (рис. 3г), который сохранялся до $k_d = 25\%$. Частота цуга импульсов в этом диапазоне менялась от 30 кГц при $k_d = 13\%$ до 16 кГц при $k_d = 25\%$, длительность цуга составляла 3 мкс. Дальнейшее увеличение k_d приводило к нарушению автоQML режима, пульсации принимали нерегулярный характер. Такой режим генерации сохранялся вплоть до её исчезновения при $k_d = 33\%$. В режиме CWML максимальная выходная мощность была получена при дифракционной эффективности модулятора 8–10% и составила 650 мВт. В автоQML режиме максимальная выходная мощность составила 530 мВт при дифракционной эффективности модулятора 13%.

QML режим генерации осуществлялся при $k_d = 31\%$ включением периодической модуляции звуковой волны АОМ с частотой 2 кГц. Средняя выходная мощность лазера в дифрагировавшем луче при переходе в QML режим падала в 2 раза по сравнению с автоQML и составляла 260 мВт. Падение мощности легко объяснимо. Генерация Q-switch цуга импульсов происходит во время отключения звуковой волны в модуляторе. За время прохождения заднего фронта звуковой волны через световой пучок, благодаря методу СЗАОМ в лазере возникает синхронизация мод [4–6]. После этого дифракция в АОМе прекращается, соответственно, исчезает и выходной пучок. Таким образом, метод СЗАОМ при использовании его в такой конфигурации резонатора показал сильное падение средней выходной мощности в QML режиме. Мы полагаем, что существенно повысить выходную мощность в этом режиме можно, используя схему СЗАОМ с двухчастотным модулятором, описанную в [11].

Результаты измерения длительности импульсов τ показаны на рис. 4. Длительность импульсов выходного излучения, измеренная автокорреляционным методом, составила 107 пс для CWML режима, 70 пс для автоQML режима и 55 пс для QML режима генерации. Формы автокорреляционных функций брались такие же, как в работе [7].

В работах [4–8] излучение, выводимое из резонатора АОМом, не учитывалось при измерении выходной мощности лазера. Для определения вклада дифрагировавшего пучка в выход-

ную мощность в резонатор устанавливалась плоскопараллельная пластинка ВП из плавного кварца (рис. 1). Пластинка устанавливалась под углом Брюстера и поворачивалась в сторону увеличения угла падения, таким образом, вводились потери, аналогичные пропусканию выходного зеркала. После установки пластинки и после каждого её поворота длина резонатора подстраивалась для соблюдения условия $c/2L = 2f$. На рис. 5 показана зависимость средней выходной мощности лазера в зависимости от потерь, вносимых пластинкой в CWML ($k_d = 10\%$), автоQML ($k_d = 13\%$) и QML ($k_d = 31\%$) режимах генерации.

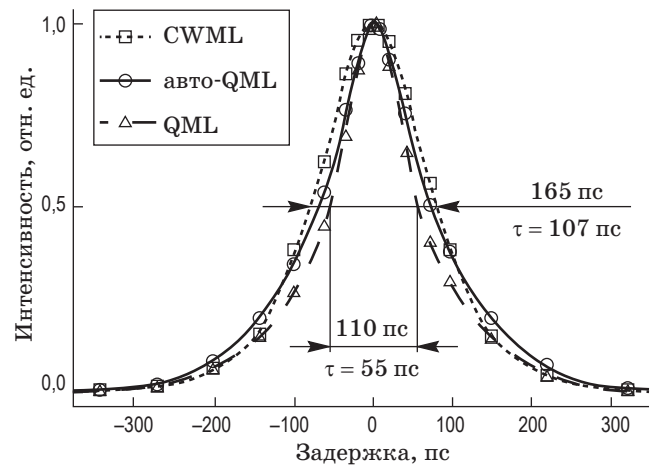


Рис. 4. Автокорреляционные функции в CWML, автоQML и QML режимах генерации.

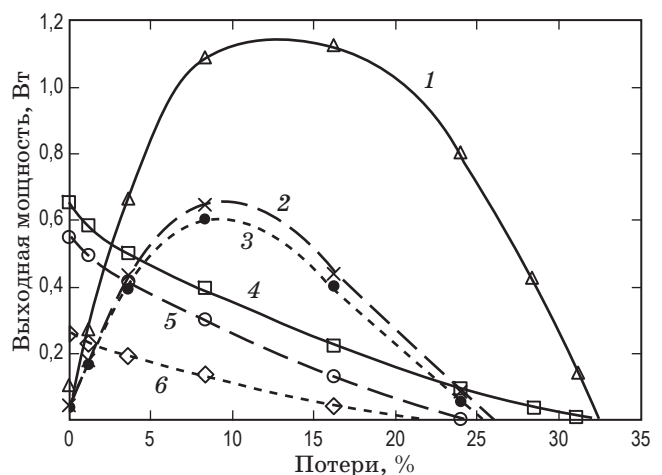


Рис. 5. Зависимость средней выходной мощности лазера от потерь, вносимых пластинкой. 1, 2 и 3 — мощность, выводимая пластинкой ВП в режимах CWML, автоQML и QML соответственно; 4, 5 и 6 — мощность, выводимая АОМом в режимах CWML, автоQML и QML соответственно.

Максимальная средняя выходная мощность лазера в режиме CWML составила 1,5 Вт, при этом около 25% мощности приходилось на дифрагировавший пучок. Нестабильность амплитуды (среднеквадратичное отклонение/среднее) генерации от импульса к импульсу была меньше $\pm 1,5\%$. В автоQML режиме максимальная средняя выходная мощность составила 940 мВт, доля выходной мощности, приходящаяся на дифрагировавший пучок, была 34%. Нестабильность амплитуды цугов импульсов составляла менее $\pm 5,5\%$. В QML режиме доля мощности, приходящаяся на дифрагировавший пучок, составила 20% при общей выходной мощности лазера 750 мВт. Нестабильность амплитуды цугов импульсов в этом случае составляла менее $\pm 3\%$. КПД по световой мощности был равен 6%, 3,8% и 3% в CWML, автоQML и QML режимах соответственно.

Для определения влияния выходящего из резонатора дифрагировавшего луча на генера-

ционные характеристики лазера в схему был введён дополнительный резонатор по дифрагировавшим лучам. Были установлены высокоотражающие зеркала 34 (радиус кривизны 1 м) и 35 (плоское), возвращающие дифрагировавший луч обратно в резонатор лазера (рис. 6). В этом случае излучение из резонатора выводилось пластинкой ВП, установленной под углом 69° , что соответствовало 15% потерям. Оптическая длина резонатора 31–34–35 составляла 150 см. Перемещением зеркала 33 изменялась длина основного лазерного резонатора, т.е. вводилась отстройка межмодового интервала лазера от частоты $2f$.

Были проведены два вида измерений. В первом изменялся коэффициент дифракции k_d при неизменной длине резонатора 31–32–33 ($\Delta L = 0$), а во втором вводилась отстройка длины резонатора 31–32–33 при постоянном k_d . В обоих случаях введение дополнительного резонатора влияло на динамику генерации лазера. При нулевой отстройке $\Delta L = 0$ наблюдался CWML режим, однако длительность импульсов выходного излучения увеличивалась и составляла 130 пс. Изменение коэффициента дифракции k_d не приводило к изменению режима генерации, и при $k_d > 11\%$ сохранялся CWML режим. Введение отстройки ($\Delta L \neq 0$) также не приводило к изменению режима генерации, но в этом случае в амплитуде выходных импульсов наблюдались редкие (раз в несколько секунд) пульсации. На рис. 7а, б показаны осциллограммы выходного излучения при $\Delta L = 120$ мкм: в отсутствии дополнительного резонатора (рис. 7а) и с дополнительным резонатором (рис. 7б).

Введение дополнительного резонатора увеличивало выходную мощность лазера (выво-

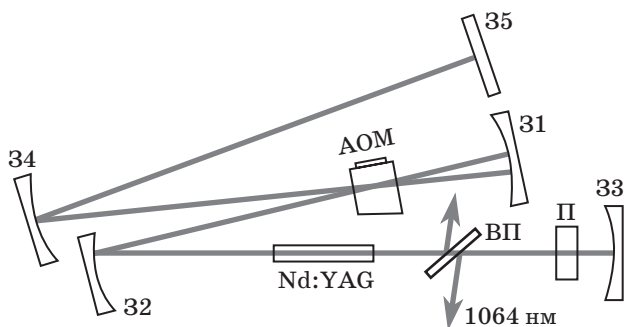


Рис. 6. Схема лазера. 31–33 — зеркала резонатора, 34 и 35 — зеркала дополнительного резонатора по дифрагировавшим лучам, АОМ — акустооптический модулятор, Nd:YAG — активный элемент, ВП — пластинка для вывода излучения, П — поляризатор.

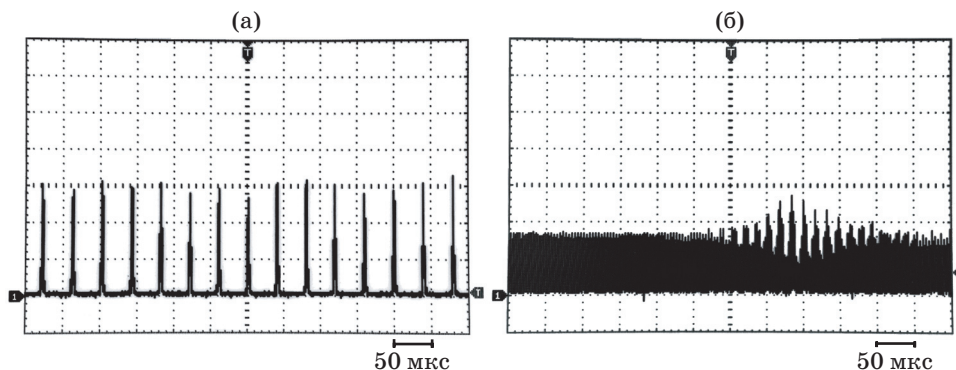


Рис. 7. Осциллограммы выходного излучения лазера при $k_d = 10\%$, $\Delta L = 120$ мкм. (а) — без дополнительного резонатора, (б) — с дополнительным резонатором по дифрагировавшим лучам.

димую пластинкой) на 10%. Указанные пульсации и увеличение длительности генерируемых импульсов могут объясняться недостаточно точной юстировкой и настройкой длины дополнительного резонатора. Следует также отметить, что режим QML в схеме с дополнительным резонатором неосуществим или крайне неэффективен ввиду отсутствия потерь, необходимых для модуляции добротности резонатора.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы характеристики излучения, возникающего в акустооптическом модуляторе за счёт дифракции на бегущей ультразвуковой волне, выходящего из резонатора лазера с синхронизацией мод методом СЗАОМ, и его влияние на режимы генерации лазера.

В случае плотного резонатора, излучение из которого выводится с помощью акустооптического модулятора, длительности импульсов выходного излучения неплохо согласуются с результатами, полученными в работе [7], однако выходная мощность лазера с плотным резонатором оказывается заметно ниже.

Это говорит о низкой эффективности такой схемы и делает её малопривлекательной для использования.

При введении в резонаторе потерь, аналогичных пропусканию выходного зеркала, мощность излучения, выводимого дифрагировавшим лучом, снижалась, однако на его долю всё равно приходилась существенная часть выходной мощности лазера (от 20 до 34% в зависимости от режима генерации). В таком резонаторе получается максимальная средняя выходная мощность, а дифрагировавший луч можно использовать, например, для проведения каких-либо дополнительных измерений или для контроля выходных характеристик лазера.

Показано, что в случае настройки дополнительного резонатора по дифрагировавшим лучам, т.е. при возврате обоих дифрагировавших лучей обратно в резонатор лазера происходит демпфирование автоQML режима и наблюдается CWML режим генерации. Это говорит о том, что дифрагировавший луч, выходящий из резонатора, играет определяющую роль в формировании режимов генерации лазера с методом СЗАОМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравцов Н.В., Магдич Л.Н., Шелаяев А.Н. и др. Синхронизация мод лазера с помощью модулятора на бегущей акустической волне // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. № 7. С. 440–443.
2. Надточеев В.Е., Наний О.Е. Использование бегущих акустических волн для синхронизации мод в лазерах // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 11. С. 2231–2234.
3. Веселовская Т.В., Клочан Е.Л., Ларионцев Е.Г. Анализ синхронизации мод в лазере с модулятором на бегущей акустической волне // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 12. С. 1568–1571.
4. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. Модуляция добротности и синхронизация мод в диодно-накачиваемом Nd:YAG лазере с удвоением частоты // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 2. С. 107–110.
5. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. Лазер с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод // Патент РФ № 2478242. 2013.
6. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. и др. Новый метод модуляции добротности резонатора с синхронизацией мод в твердотельных лазерах // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 4. С. 8–11.
7. Грибанов А.В., Донин В.И., Яковин Д.В. Режимы генерации Nd:YAG лазера с синхронизацией мод акустооптическим модулятором бегущей волны и сферическим зеркалом // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 8. С. 699–702.
8. Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В. Самоорганизация режима Q-switch с одновременной синхронизацией мод в диодно-накачиваемом Nd:YAG лазере // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101. № 12. С. 881–884.
9. Наний О.Е., Одинцов А.И., Панаков А.И. и др. Динамика QML-генерации твердотельного лазера с акустооптическим модулятором бегущей волны // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 11. С. 1000–1004.
10. Наний О.Е., Одинцов А.И., Панаков А.И. и др. Одновременная синхронизация мод и модуляция добротности в твердотельном лазере с акустооптическим модулятором бегущей волны и ретрорефлектором // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 2. С. 119–123.
11. Донин В.И., Трубецкой А.В., Яковин Д.В. и др. Лазер с модуляцией добротности резонатора и синхронизацией мод // Патент РФ № 2606348. 2017.