

Синхронизация импульсов излучения лазеров, работающих в режиме пассивной модуляции добротности на длинах волн 1.053 и 1.064 мкм

В.Х.Багдасаров, Н.Н.Денисов, А.А.Малютин, И.А.Чигаев

Для лазеров на фосфатном стекле с неодимом и кристалле YAG: Nd, работающих в режиме пассивной модуляции добротности, продемонстрирована возможность синхронизации импульсов излучения с точностью не хуже ± 5 нс. Реализованы два режима работы: «подпороговый» (генерация гигантского импульса ведомым лазером (YAG: Nd) в отсутствие освечивания его пассивного затвора излучением ведущего лазера (стекло: Nd) не происходит) и «надпороговый» (импульс освечивания пассивного затвора опережает излучение гигантского импульса ведомым лазером).

Ключевые слова: твердотельные лазеры, пассивная модуляция добротности, синхронизация излучения лазеров.

1. Введение

При проведении многих экспериментов, построенных, например, по принципу лазерное возбуждение–зондирование (pump-probe), требуется синхронизированное по времени излучение по крайней мере двух пучков, различающихся моментом воздействия на среду и дополнительно, в зависимости от специфики выполняемых измерений, либо длиной волны, либо длительностью импульса. В некоторых экспериментах может использоваться один лазерный источник, первый пучок которого образуется непосредственно излучением лазера, а второй – его излучением, трансформированным с помощью средств нелинейной оптики (генерации гармоник, вынужденного комбинационного рассеяния [1] или параметрической генерации [2]). Нередко излучения обоих пучков должны удовлетворять определенным требованиям относительно модового состава и минимальной ширины спектра. Это достаточно просто обеспечивается при пассивной модуляции добротности (ПМД) благодаря длительному времени развития генерации [3].

Однако длительное время развития генерации в лазерах с ПМД, значительно облегчающее достижение одночастотного режима, имеет и недостаток. Так, при импульсной ламповой накачке активной среды лазера наблюдается значительный разброс времени появления гигантского импульса (ГИ) относительно начала разряда через лампу, что при непрерывной диодной накачке проявляется как непостоянство периода следования ГИ, что существенно затрудняет синхронизацию излучения лазеров с ПМД.

Имеется несколько достаточно давних и совсем новых сообщений об использованных схемах синхронизации

ГИ излучения лазеров с ПМД [4–10] без использования затравочного излучения. Причем, если авторы первых публикаций [4–6], работавшие преимущественно с лазерами на рубине, преследовали очевидную цель повышения суммарной излучаемой энергии/мощности, то последние работы ориентированы на получение одновременной генерации на различных длинах волн неодимосодержащих активных сред: 1064 и 1342 нм в [8, 9], 946 и 1064 нм в [10]. В этом смысле уникальной является работа [7], в которой при использовании различных модификаций фталоцианиновых красителей была продемонстрирована возможность синхронизации импульсов излучения рубинового и неодимового лазеров. Отметим, что работы [4–7] и [8–10] различаются подходами к способу синхронизации ГИ лазеров.

Первые эксперименты логически продолжали методику активной модуляции добротности с той лишь разницей, что затвор Керра или Покельса заменялся пассивным затвором, а управляющий электрический сигнал – лазерным импульсом [4, 6, 7]. Соответственно строилась и схема эксперимента: использовался дополнительный лазер, излучение которого служило для управления просветлением насыщающегося красителя пассивных затворов других лазеров.

Принцип синхронизации импульсов излучения в работе [8] существенно иной. Применены пассивный затвор на основе кристалла YAG: V, который обладает однородным уширением линии поглощения на длинах волн 1064 и 1342 нм, и два независимых активных лазерных элемента из YVO₄: Nd с диодной накачкой, располагавшиеся в составном резонаторе. Однако, как отмечают авторы, даже небольшое (в несколько десятков милливольт) изменение уровня накачки активных элементов приводило к потере синхронизации. В дальнейшем параметры одновременной генерации на указанных длинах волн были несколько улучшены [10]. Это было сделано, в частности, за счет использования в дополнение к кристаллу YAG: V пассивного затвора на YAG: Cr. Похожий метод применен и для синхронизации импульсов излучения на длинах волн 946 и 1064 нм при использовании для ПМД кристалла YAG: Cr, Nd [9].

Схема с двумя лазерами на рубине, один из которых

В.Х.Багдасаров, Н.Н.Денисов, А.А.Малютин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: amal@kapella.gpi.ru

И.А.Чигаев. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78

Поступила в редакцию 10 февраля 2009 г., после доработки – 12 мая 2009 г.

полностью независим (ведущий) и его излучением просветляется насыщающийся фильтр другого (ведомого), описана в [5]. Было отмечено, однако, что синхронизация импульсов излучения лазеров не была полной, так как импульсы ведомого лазера были задержаны примерно на 50 нс относительно импульсов ведущего. В настоящей работе представлены результаты исследования схемы, использованной в [5], применительно к неодимовым лазерам на фосфатном стекле и на кристалле YAG.

2. Эксперимент

В экспериментах (рис.1) использовались два лазера: ведущий (Л1) на неодимовом стекле ГЛС-23 и ведомый (Л2) на кристалле YAG:Nd. Первый, с активным элементом диаметром 5 мм и длиной 100 мм имел резонатор длиной 80 см, образованный глухим сферическим зеркалом с радиусом кривизны 3 м и выходным селектором продольных мод [11] с коэффициентом отражения в максимуме $\sim 45\%$. Для ПМД применялся кристалл YAG:Cr⁴⁺ с начальным пропусканием $T_{01} = 75\%$. Во втором лазере использовался активный элемент диаметром 6 мм и длиной 80 мм. Он имел плоскосферический резонатор длиной 45 см, образованный сферическим зеркалом с радиусом кривизны 2 м и выходным селектором продольных мод, аналогичным использовавшемуся в лазере на стекле. Для ПМД применялся затвор на основе красителя BDN (№ 1055) в полимерной матрице с пропусканием $T_{02} = 18\%$, располагавшийся непосредственно перед диафрагмой диаметром 1.5 мм. Излучение обоих лазеров имело поперечное распределение, близкое к моде TEM₀₀, и выходную энергию 6–8 мДж при длительности ГИ ~ 50 нс для Л1 и 4–6 мДж при ~ 8 нс соответственно для Л2. Характерный радиус пучка (по уровню интенсивности e^{-2}) на выходе лазера на стекле $w \approx 0.65$ мм. С учетом расстояния это обеспечивало на пассивном затворе лазера на YAG:Nd максимальное значение плотности мощности до 3 МВт/см² ($w \approx 1.7$ мм).

Для обоих лазеров эксперименты по синхронизации импульсов излучения были предварены измерениями времени задержки максимума ГИ (t_g) относительно импульса поджига ламп накачки в зависимости от превышения порога генерации E_p/E_{th} ($i = 1, 2$) (вплоть до энергии накачки, соответствующей появлению второго ГИ) (рис.2). В этих измерениях использовались фотодиоды ЛФД-2 и осциллограф Tektronix TDS5104B, осуществлявший для каждого значения накачки усреднение и вычисление дисперсии по серии из 50–100 импульсов. Из

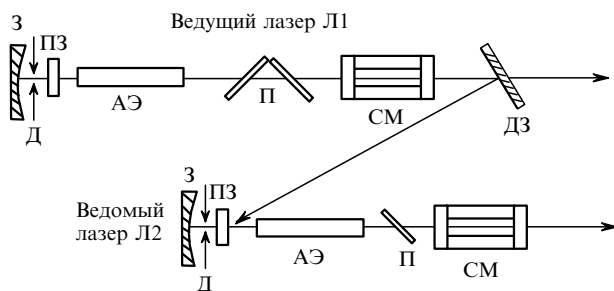


Рис.1. Схема эксперимента по синхронизации импульсов излучения лазеров:

3 – зеркала с коэффициентами отражения 100%; Д – диафрагмы; ПЗ – пассивные затворы; АЭ – активные элементы; П – поляризаторы; СМ – селекторы продольных мод; ДЗ – полупрозрачное зеркало.

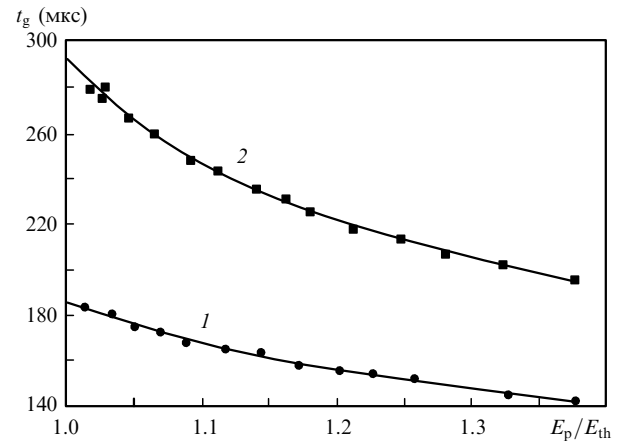


Рис.2. Зависимости задержки момента достижения максимума ГИ относительно импульса поджига ламп накачки от превышения порога генерации для лазера на стекле с неодимом (1) и лазера на кристалле YAG:Nd (2).

проведенных измерений следовало, что разброс t_g для Л1 (кривая 1) вблизи порога генерации составил 2.6%, уменьшаясь при превышении порога на $\sim 35\%$ до 0.16%. Соответствующие величины для Л2 (кривая 2) составляют 1.8% и 0.4%. Таким образом, при независимой работе лазеров в использованном диапазоне превышения порога генерации минимальное значение разброса времени появления ГИ лазеров в лучшем случае равнялось ± 1 мкс. Отметим, что в указанном диапазоне накачек генерация обоих лазеров осуществлялась на одной продольной моде при стабильности выходной энергии не хуже $\pm 5\%$.

Синхронизацию излучения лазеров по выбранной схеме, когда лазер на стекле с неодимом является ведущим и его излучение используется для освечивания пассивного затвора ведомого лазера на кристалле YAG:Nd оказалось возможным осуществить в двух режимах.

В первом («подпороговом») режиме уровень накачки ведомого Л2 поддерживался ниже порога генерации ГИ; превышение же порога генерации для Л1 поддерживалось равным 1.25. Задержка поджига лампы накачки Л2 при этом варьировалась относительно поджига лампы накачки Л1 в диапазоне $T_d = 75 - 325$ мкс, и измерялись задержка второго ГИ (ГИ2) относительно первого ГИ (ГИ1), амплитуда ГИ2 и его длительность. Результаты измерений задержки между максимумами ГИ лазеров (t_d), усредненные, как и выше, по нескольким десяткам вспышек, приведены на рис.3,а для трех значений энергии накачки Л2. Минимум задержки ГИ2 для всех кривых на рис.3,а $T_d \approx 185$ мкс, что с учетом момента появления ГИ1 относительно поджига ламп ($t_g \approx 150$ мкс) примерно соответствует максимуму инверсной населенности активной среды Л2. Разброс значений t_d при этом составил от ± 2 нс в середине диапазона изменений T_d с увеличением до ± 7 нс на его границах. Изменения амплитуды и длительности ГИ2, соответствующие уровню накачки Л2 на 1.6% ниже порога, нормированные на их значения при работе Л2 в независимом режиме, приведены на рис.3,б, а типичный вид осциллограмм – на рис.3,в. Отметим, что примерно в 10% импульсов в излучении ведомого лазера наблюдалась генерация нескольких продольных мод. Зависимости t/t_0 и U/U_0 , соответствующие уровням накачки Л2 на 9.3% и 16.4% ниже порога, не приводятся; они тоже имеют экстремум

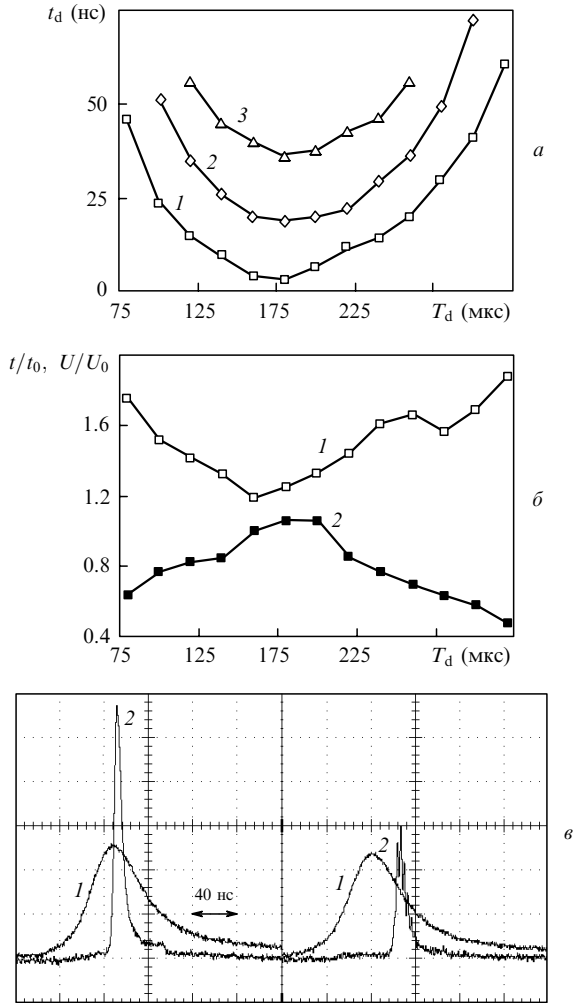


Рис.3. Задержка момента достижения максимума ГИ ведомого лазера на кристалле YAG: Nd относительно максимума ГИ ведущего лазера на стекле с неодимом при различных уровнях накачки Л2: на 1.6 % (1), на 9.3 % (2) и на 16.4 % (3) ниже порога генерации (а), относительные изменения длительности (1) и амплитуды (2) ГИ2 при уровне накачки Л2 на 1.6 % ниже порога генерации (б) (t_0 и U_0 – соответствующие значения при работе Л2 в независимом режиме), типичные виды осциллограмм ГИ1 (1) и ГИ2 (2) (в).

при $T_d \approx 185$ мкс, который, однако, менее четко выражен.

Во втором («надпороговом») режиме уровень накачки ведомого Л2 поддерживался достаточным для генерации ГИ. При этом синхронизация импульсов излучения лазеров существовала только при условии, что при работе обоих лазеров в независимом режиме ГИ1 опережал генерацию ГИ2 на время t_{d0} , превышающее 2–5 мкс. Величина задержки t_{d0} могла варьироваться либо изменением времени между моментами поджига ламп лазеров T_d при фиксированном уровне накачки Л2, либо уровнем накачки Л2 при фиксированном T_d . Результаты изменений t_{d0} и соответствующих им значений t_d , выполненных при уровне накачки Л2, равном $E_p/E_{th2} = 1.25$, приведены на рис.4,а. Заметим, что для выбранных параметров зависимость на рис.4,а близка к линейной: $t_d \approx 10^{-3}t_{d0}$. Причем, если при $t_{d0} = 50$ мкс длительность импульса ведомого лазера составляет ~ 11 нс, а его амплитуда в ~ 1.4 раза меньше соответствующих значений при независимой работе лазера на YAG: Nd, то при $t_{d0} = 2$ мкс они почти совпадают.

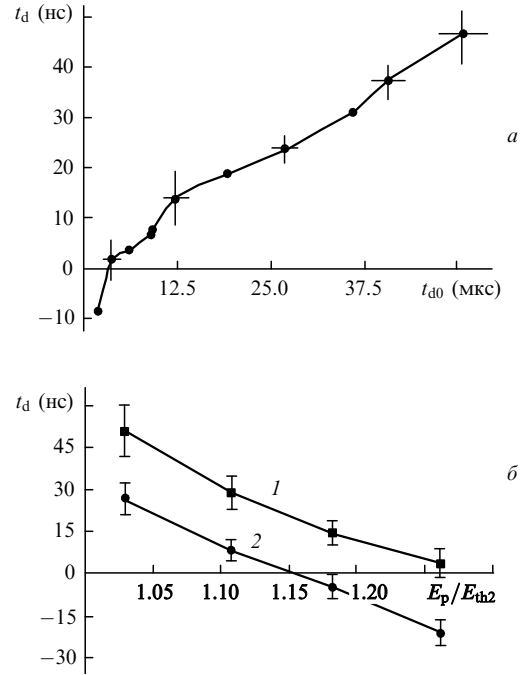


Рис.4. Зависимости задержки момента достижения максимума ГИ2 относительно максимума ГИ1 от задержки появления ГИ при работе лазеров в независимом режиме (а) и от энергии накачки Л2 при уровнях освещения пассивного затвора ~ 3 (1) и ~ 7 МВт/см² (2) (б).

Кривая 1 на рис.4,б, в отличие от рис.4,а, получена при фиксированном значении $T_d = 40$ мкс и при том же уровне освещения пассивного затвора Л2 (~ 3 МВт/см²), а кривая 2 – при уровне освещения в 2.25 раза выше (использовался дополнительный усилитель на неодимовом стекле). В результате увеличения максимальной плотности мощности на ПЗ ведомого лазера до ~ 7 МВт/см² наблюдается опережение ГИ2 относительно максимума ГИ1, достигающее ~ 20 нс.

3. Обсуждение результатов

Чтобы понять, почему в исследованной системе двух лазеров, излучение одного из которых служит для просветления пассивного затвора другого, возможно не только одновременное излучение ГИ, но и ситуация, когда ГИ ведомого лазера опережает излучение ГИ ведущего, следует учесть свойства полимерного ПЗ, используемого нами в лазере на YAG: Nd. Сечение поглощения σ для большинства подобных затворов составляет примерно 10^{-16} см² [12] и выше [13]. В этом случае существенное изменение пропускания затвора достигается при относительно низкой плотности мощности. Результаты расчета изменения пропускания затвора (начальное значение $T_0 = 18\%$) для лазерного импульса (рис.5,а) с параметрами, аналогичными использовавшимся в описанном выше эксперименте ($E = 5$ мДж, $\tau = 50$ нс), при нескольких значениях σ приведены на рис.5,б. При расчете принято, что эффективное время жизни верхнего уровня материала ПЗ значительно превышает длительность лазерного импульса. В этом случае, как следует из рис.5,б, увеличение пропускания ПЗ вдвое происходит на переднем фронте импульса даже при пессимистическом значении $\sigma = 10^{-17}$ см². Для $\sigma = 10^{-16}$ см² такое изменение происходит примерно за 60 нс до максимума импульса при суммарной дозе облучения ~ 100 мкДж (с учетом

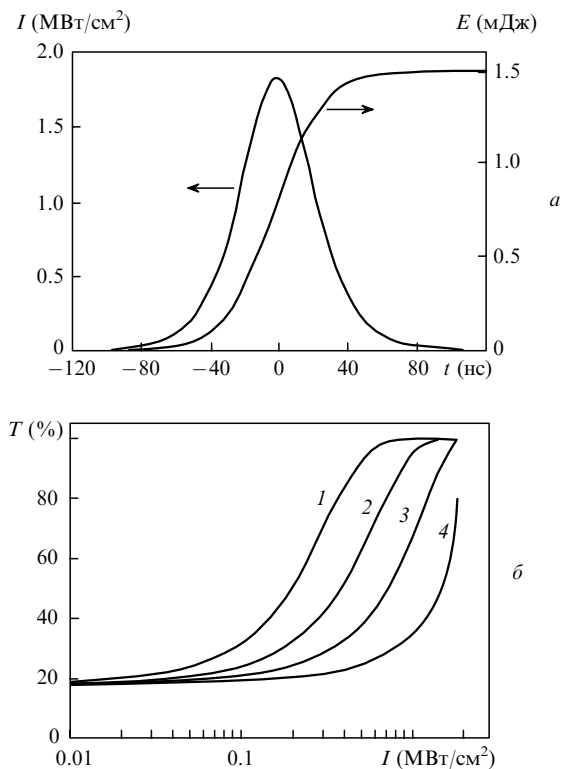


Рис.5. Временные зависимости интенсивности I и суммарной дозы освещения ПЗ ведомого лазера на $\text{YAG}:\text{Nd}$ (а) и зависимости пропускания ПЗ от I при значениях сечения поглощения 10^{-16} (1), 5×10^{-17} (2), 2.5×10^{-17} (3) и 10^{-17} (4) (б).

диаметра диафрагмы 1.5 мм). На значительное уменьшение поглощения затвора задолго до максимума ГИ ведущего лазера указывает также появление биений в излучении ведомого лазера, что однозначно свидетельствует о сокращении времени развития его генерации, которое оказывается недостаточным для селекции продольных мод.

Как в «подпороговом», так и в «надпороговом» режимах для каждого уровня освещения ПЗ (энергии излучения ведущего лазера) имеется оптимальное время момента освещения ПЗ ведомого лазера, при котором задержка его импульса минимальна, а параметры излучения оказываются практически такими же, как при независимой работе. Причем, как следует из результатов эксперимента, эти параметры достигаются при максимальной инверсной населенности: в «подпороговом» режиме вблизи порога генерации ведомым лазером первого ГИ (рис.3,а, б), а в «надпороговом» режиме вблизи порога генерации второго ГИ (рис.4,б).

Практическое применение описанного выше метода синхронизации излучения двух лазеров, несомненно, потребует оптимизации оптической схемы эксперимента (см. рис.1). Полупрозрачное зеркало ДЗ в нашем случае имело пропускание $\sim 20\%$, что было достаточно для контроля параметров ГИ1. Реальный эксперимент с исполь-

зованием излучения лазеров может потребовать либо фокусировки лазерного пучка на ПЗ ведомого лазера (для согласования размеров пучков ведущего и ведомого лазеров в плоскости ПЗ), либо использования дополнительного усилителя.

4. Заключение

Результаты настоящей работы показывают, что синхронизация импульсов излучения неодимовых лазеров, работающих в режиме пассивной модуляции добротности, без затравочного излучения возможна с точностью не хуже ± 5 нс. Во всяком случае, это справедливо для неодимовых лазеров на фосфатном стекле и кристалле YAG при длительностях импульсов ~ 50 и ~ 8 нс соответственно и использовании в ведомом лазере пассивного затвора с $\sigma \sim 10^{-16}$ см^2 . Можно надеяться, что это достижимо также и для случая, когда ведущий (или ведомый) лазер работает в режиме пассивной синхронизации мод. Обычно даже синхронизация такого лазера с лазером, использующим электрооптическую модуляцию добротности, представляет собой непростую задачу и выполняется электронными средствами [14] или при ПМД с использованием затравочного излучения [15].

Высокая пиковая мощность синхронизированных лазеров, ширина спектров их излучения и различие в частотах, составляющее ~ 100 см^{-1} , делают их перспективными для генерации монохроматического излучения с частотой ~ 2.7 ТГц.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 07-02-12109) и гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-8283.2006.2.

1. Гарнов С.В., Конов В.И., Малютин А.А. и др. *Квантовая электроника*, **33**, 758 (2003).
2. Shi W., Ding Y.J., Vodopyanov K. *Opt. Lett.*, **27**, 1454 (2002).
3. Soffer B.H. *J. Appl. Phys.*, **35**, 2551 (1965).
4. Gregg D.W., Thomas S.J. *J. Appl. Phys.*, **37**, 3750 (1966).
5. Soffer B.H., McFarland B.V. *Appl. Phys. Lett.*, **8**, 166 (1966).
6. Opower H., Kaiser W. *Phys. Lett.*, **21**, 638 (1966).
7. Грязнов Ю.М., Лебедев О.Л. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **11**, 1907 (1968).
8. Tidemand-Lichtenberg P., Janousek J., et al. *Opt. Commun.*, **241**, 487 (2004).
9. Zhang L., Wei Z., Feng B., Li D., Zhang Z. *Opt. Commun.*, **264**, 51 (2006).
10. Janousek J., Tidemand-Lichtenberg P., et al. *Opt. Commun.*, **265**, 277 (2006).
11. Егоров А.Л., Коробкин В.В., Серов Р.В. *Квантовая электроника*, **2**, 513 (1975).
12. Безродный В.И., Ищенко А.А., Карабанова Л.В., Сломинский Ю.Л. *Квантовая электроника*, **22**, 849 (1995).
13. Stultz R.D. US Patent No. 5654974, 1997.
14. Катин Е.В., Ложкарев В.В., Палашов О.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **33**, 836 (2003).
15. Басиев Т.Т., Карасик А.Я., Конюшкин В.А. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 344 (2005).