

# Пикосекундные полностью твердотельные Nd:YAG-лазеры с импульсной диодной накачкой и электрооптическим управлением генерацией

М.В.Горбунков, А.В.Коняшкин, П.В.Кострюков, В.Б.Морозов, А.Н.Оленин, В.А.Русов, Л.С.Телегин, В.Г.Тункин, Ю.В.Шабалин, Д.В.Яковлев

*Представлены результаты разработки импульсно-периодических пикосекундных Nd:YAG-лазеров с импульсной диодной накачкой и электрооптическим управлением генерацией, построенных по двум схемам. В первой используется активно-пассивная синхронизация мод с применением электрооптического управления генерацией и полупроводниковых насыщающихся поглотителей SESAM. Эта схема позволила генерировать импульсы длительностью 15–50 пс с энергией до 0.5 мДж и максимальной частотой повторения 100 Гц. Во второй схеме генерация пикосекундных импульсов достигается за счет комбинации электрооптической положительной и отрицательной обратной связи, при этом электрооптический модулятор управляется фототоком быстродействующих полупроводниковых структур. В этой схеме получены пикосекундные импульсы длительностью 30 пс.*

**Ключевые слова:** пикосекундные импульсы, диодная накачка, электрооптические модуляторы.

## 1. Введение

Необходимость создания полностью твердотельных импульсно-периодических пикосекундных лазеров с диодной накачкой диктуется широким кругом научных и технологических задач, для которых применение мощных световых импульсов пикосекундной длительности уже стало традиционным [1–3]. Появляются и новые области применения пикосекундных импульсов. В последние годы активно исследуется возможность использования генерации рентгеновского излучения при рассеянии мощных пикосекундных лазерных импульсов на релятивистских электронах для медицинской диагностики [4, 5].

Современные пикосекундные лазеры должны прийти на смену лазерам с ламповой накачкой, в которых в качестве насыщающихся поглотителей используются растворы полиметиновых красителей. Применение диодной накачки твердотельных лазеров позволяет отказаться от малоэффективной ламповой накачки в пользу систем на основе лазерных диодов, диодных линеек и матриц, обеспечивающих эффективность в десятки процентов. Кроме того, лазерам с диодной накачкой присуще высокое качество пучка, необходимое при лазерной обработке материалов, литографии, накачке параметрических генераторов и усилителей и т. д.

В настоящее время диодная накачка применяется в основном в непрерывных лазерах ультракоротких импульсов. Это обусловлено, с одной стороны, относительной

простотой реализации непрерывных лазеров, в которых используются полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглощением (semiconductor saturable absorber mirror – SESAM) [6], а с другой – стремлением получить наиболее высокое отношение средней мощности к цене. Рекордная энергия импульсов таких лазеров достигает сотен наноджоулей [7]. Существенно, что для получения миллиджоульных импульсов кроме непрерывного лазера необходимо использовать регенеративный усилитель. В итоге такие системы оказываются достаточно дорогостоящими и громоздкими.

В 1980-е гг. была разработана техника управления генерацией импульсных твердотельных лазеров с ламповой накачкой, в которых для синхронизации мод применяются растворы красителей в качестве насыщающихся поглотителей. Эта техника основана на использовании активной или пассивной отрицательной обратной связи (ООС) [8–13] и в настоящее время успешно применяется для генерации пикосекундных импульсов. Наибольшие возможности для гибкого управления генерацией предоставляет активная электрооптическая ООС, основанная на использовании внутррезонаторного электрооптического модулятора (ЭОМ). Она позволяет стабилизировать излучение импульсных твердотельных лазеров на уровне, соответствующем максимальной компрессии УКИ насыщающимся поглотителем и добиться воспроизводимости их параметров.

Используя отключение внешней электрооптической ООС синхронно с модуляцией добротности резонатора, удается добиться генерации пикосекундных импульсов с энергией  $\sim 0.1$  – 1 мДж. Кроме того, с помощью ЭОМа можно переключать излучение из одного резонатора в другой [14]. Это применяется для защиты насыщающегося поглотителя и увеличения срока его службы. Существенно, что ЭОМ позволяет управлять генерацией с субнаносекундным быстродействием. За счет электрооптического управления может быть реализована и активная синхронизация мод (АСМ). В импульсно-периодиче-

А.В.Коняшкин, П.В.Кострюков, А.Н.Оленин, В.Г.Тункин. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы  
В.Б.Морозов, В.А.Русов, Л.С.Телегин, Д.В.Яковлев. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы  
М.В.Горбунков, Ю.В.Шабалин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

ских лазерах перспективно использование низковольтных модуляторов на основе поперечного эффекта Поккельса, которые изготавливаются, как правило, по двухкристальной (двухсекционной) термокомпенсированной схеме. При приложении разных управляющих напряжений к секциям такого модулятора происходит суммирование фазовых набегов, т. е. фактически суммирование управляющих напряжений. Это позволяет использовать внутрирезонаторный модулятор для выполнения различных управляющих воздействий: АСМ, ООС, переключения добротности резонатора и реализации цепи внешней положительной обратной связи (ПОС) [15].

Системы импульсной или квазинепрерывной диодной накачки привлекательны для создания простых и компактных пикосекундных лазеров с миллиджоульной энергией, работающих с относительно невысокой частотой повторения импульсов (до сотен герц), не требуя при этом значительных усилий для отвода тепла. Однако для создания высоконадежных пикосекундных лазеров применение затворов на красителях бесперспективно, т. к. они характеризуются низкой фотостойкостью и их срок службы ограничен.

В данной работе представлены результаты разработки импульсно-периодических пикосекундных Nd:YAG-лазеров с импульсной диодной накачкой и электрооптическим управлением генерацией, позволяющим генерировать импульсы длительностью 10–50 пс с энергией до 0.5 мДж и максимальной частотой повторения 100 Гц, в схеме которых мы отказались от пассивного затвора на красителях. Для получения генерации импульсов пикосекундной длительности существуют два подхода. В первом используется активно-пассивная синхронизация мод с применением SESAM и электрооптического управления генерацией, причем АСМ и ООС реализованы с помощью одного ЭОМа. Во втором подходе режим самосинхронизации мод и генерация пикосекундных импульсов достигаются лишь за счет использования комбинации ООС и ПОС, реализуемых с помощью ЭОМа, управляемого фототоком быстродействующих полупроводниковых структур (БПС).

## 2. Лазер с ООС и активно-пассивной синхронизацией мод за счет SESAM

Функциональная схема лазера приведена на рис.1. Для получения высокостабильной импульсно-периоди-

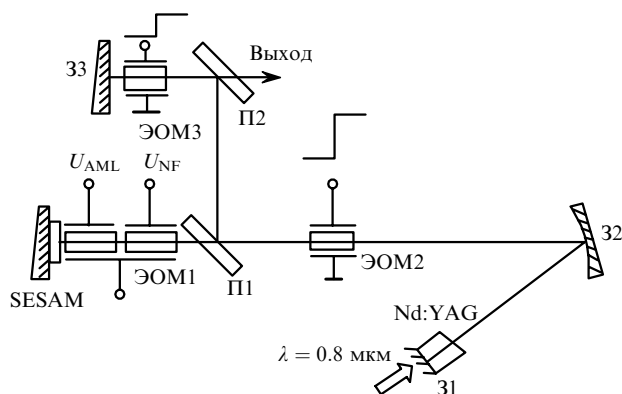


Рис.1. Функциональная схема пикосекундного Nd:YAG-лазера с ООС и активно-пассивной синхронизацией мод за счет SESAM: П1, П2 – поляризаторы; 31–33 – зеркала;  $U_{AML}$  – управляющее напряжение АСМ;  $U_{NF}$  – управляющее напряжение ООС.

ческой генерации с максимальной частотой повторения до 100 Гц использовалась конфигурация резонатора, позволившая уменьшить влияние тепловой линзы. Для этого минимизировалось изменение диаметра моды в активном элементе при варьировании средней мощности накачки. Это достигалось выбором оптимальных радиуса кривизны сферического зеркала и положения его в резонаторе. Активный элемент на основе кристалла YAG:Nd диаметром 5 мм и длиной 5 мм накачивался по продольной схеме лазерной диодной линейкой (JOLD-35-QPXF) с волоконным выходом ( $\lambda = 0.809$  мкм). Длительность импульса накачки составляла 200 мкс при пиковой мощности накачки до 30 Вт. Накачиваемая область диаметром 1.5 мм была сформирована с помощью коллиматора. На одну из поверхностей активного элемента нанесено покрытие, отражающее излучение генерации с  $\lambda = 1.064$  мкм и пропускающее излучение накачки. Эта поверхность является одним из глухих зеркал резонатора 31. Другая поверхность активного элемента скошена под углом  $3^\circ$  и просветлена для излучения на длине волны генерации. Радиус кривизны вогнутого зеркала 32 был равен 2 м. В качестве второго глухого зеркала использовался SESAM. Общая длина резонатора составляла около 1 м.

Вблизи SESAM располагался ЭОМ1, на секции которого подаются управляющие напряжения ООС и АСМ. Напряжение ООС создается высоковольтным усилителем, на вход которого поступает сигнал с быстродействующего фотодиода. На этот фотодиод через волоконно-оптическую линию задержки направляется излучение со светоделительной пластины, расположенной внутри резонатора лазера. После достижения стабилизации параметров импульсов под действием АСМ и ООС на ЭОМ2 подается перепад напряжения с длительностью фронта 2 нс и амплитудой, равной полуволновому напряжению (1400 В). Горизонтальная поляризация излучения при этом переходит в вертикальную и излучение с вертикальной поляризацией направляется в высокодобротный резонатор, образованный зеркалами 31 и 33. Поскольку благодаря напряжению смещения на ЭОМ1 не вся инверсия расходуется, после переключения резонаторов происходит увеличение энергии импульса в сотни раз. Переключение резонаторов предотвращает разрушение SESAM. Когда энергия импульса достигает максимума, на ЭОМ3 подается перепад напряжений с амплитудой, равной четвертьволновому напряжению (700 В), и излучение выводится из резонатора через поляризатор П2.

В качестве ЭОМа были опробованы низковольтные модуляторы на основе поперечного эффекта Поккельса из кристаллов RTP и LiTaO<sub>3</sub>. Эти модуляторы состоят из двух термокомпенсированных кристаллов длиной 10 мм (RTP) и 15 мм (LiTaO<sub>3</sub>) с апертурой 3 × 3 мм. Полуволновое напряжение ЭОМа составляет 1400 В (RTP) и 450 В (LiTaO<sub>3</sub>) на длине волны  $\lambda = 1.06$  мкм при использовании двух секций. В окончательной схеме лазера с активно-пассивной синхронизацией мод был применен ЭОМ из кристалла RTP, т. к. емкость секций этого модулятора составляет 2.2 пФ, в то время как емкость секций модулятора из LiTaO<sub>3</sub> равна 10 пФ, что оказалось существенным при реализации схем АСМ и ООС.

Для реализации АСМ используется гармоническое напряжение с частотой, равной половине частоты, определяемой аксиальным периодом лазера. При отсутствии

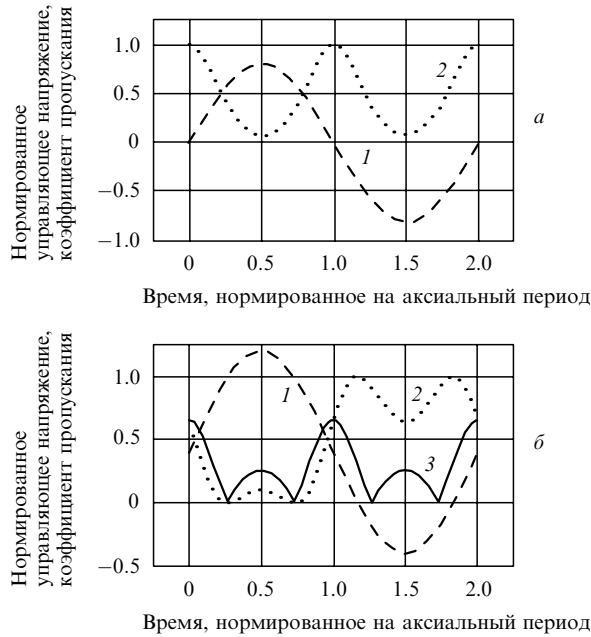


Рис.2. Временные зависимости управляющего напряжения на ЭОМе, выраженного в единицах полувольтного напряжения (1), коэффициента пропускания ЭОМа (2) и усредненного за два прохода резонатора коэффициента пропускания ЭОМа (3) при АСМ без смещения (а) и с дополнительным смещением (б).

напряжения смещения на модуляторе (рис.2,а) импульсы генерируются в моменты полной прозрачности модулятора, когда напряжение на нем проходит через нуль. Если на модулятор подаются гармоническое напряжение и напряжение смещения, создаваемое схемой ООС (рис.2,б), то функция пропускания модулятора видоизменяется: ее максимумы отстоят друг от друга не на аксиальный период. Существенно, что пропускание, усредненное за два обхода резонатора, имеет максимумы в тех же местах, что и в отсутствие напряжения смещения. Пропускание в максимуме и, следовательно, вносимые потери, определяются действием ООС.

Управляющее напряжение АСМ создается перестраиваемым генератором гармонических сигналов (стабильность частоты  $\Delta\nu/\nu = 2 \times 10^{-6}$ ) и подается на усилитель высокой частоты. Для уменьшения потребляемой мощности и мощности, рассеиваемой в секциях модулятора, усилитель высокой частоты включается только на время генерации. Включение секции модулятора в последовательный колебательный контур также позволяет уменьшить потребляемую усилителем мощность. Для усиления сигнала фотодиода в схеме ООС использовался специально разработанный высоковольтный усилитель, обеспечивающий при подаче на вход короткого импульса время задержки 1 нс при длительности фронта 5 нс. Время спада было выбрано равным трем аксиальным периодам, что явилось приемлемым компромиссом между требованиями к чувствительности и устойчивости задержанной ООС [16, 17]. Усилитель обеспечивал максимальное выходное напряжение до 120 В. В итоге схема ООС позволила стабилизировать излучение в случае как активной, так и активно-пассивной синхронизации мод. Стробирование усилителя ООС позволило уменьшить потребляемую им среднюю мощность и нагрев и разместить его непосредственно на ЭОМе.

В непрерывных лазерах для генерации УКИ, как правило, используются SESAM с небольшим уровнем пере-

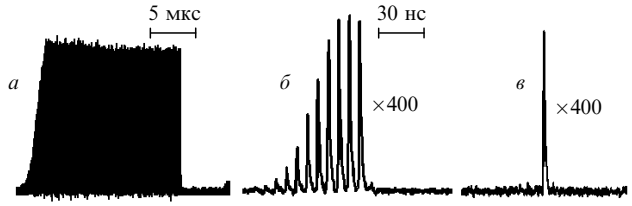


Рис.3. Динамика генерации лазера с активно-пассивной синхронизацией мод: цуг пикосекундных импульсов до переключения резонаторов (а), нарастание энергии импульса после переключения резонаторов (б) и выделенный одиночный импульс (в).

ключаемых потерь (0.5%–1%). В случае импульсно-периодического режима, для которого характерен более высокий коэффициент усиления, требуется и более высокий уровень переключаемых потерь. Однако при увеличении потерь возникает проблема, связанная с переходом лазерной генерации в режим излучения последовательности гигантских импульсов. Цепь ООС дает возможность подавить этот режим, стабилизировать мощность излучения на оптимальном с точки зрения максимального уменьшения длительности импульсов уровне. В итоге разработанная схема ООС позволила использовать SESAM с достаточно высоким уровнем переключаемых потерь (до 16%).

На рис.3 приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу лазера. На рис.3,а показан цуг пикосекундных импульсов с примерно постоянной амплитудой, сформированный под действием SESAM, АСМ и ООС. Обрыв цуга в момент времени  $t = 15$  мкс соответствует моменту переключения резонаторов, после которого происходит усиление импульса в высокодобротном резонаторе до максимальной амплитуды (рис.3,б). По достижении максимума амплитуды из резонатора выделяется одиночный пикосекундный импульс (рис.3,в). Использование только АСМ (при амплитуде гармонического напряжения 500 В) в комбинации с ООС позволяет получить импульсы длительностью  $\sim 150$  пс с энергией 0,3 мДж и максимальной частотой повторения 100 Гц. Эти импульсы, зарегистрированные фотохронографом АГАТ-СФ-3, показаны на рис.4,а. Применение SESAM позволяет заметно уменьшить длительность импульсов (рис. 4,б). Используя SESAM, начальное поглощение которого достигало  $\sim 8\%$ , удалось уменьшить длительность импульсов до 10 пс. Выбор конфигурации резонатора, сводящей к минимуму влияние тепловой линзы, обес-

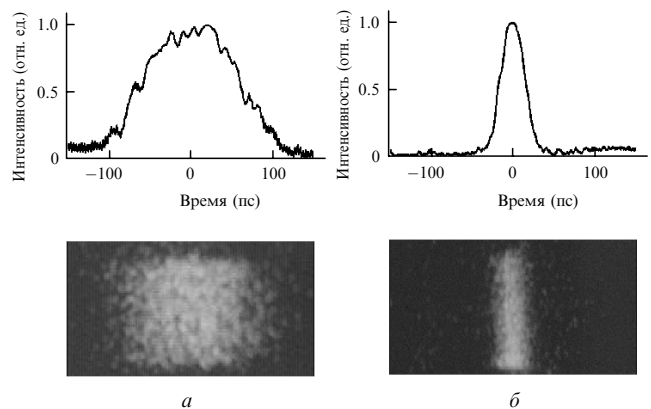


Рис.4. Денсито- и фотохронограммы импульсов лазеров в режимах АСМ (а) и активно-пассивной синхронизации мод (АСМ и SESAM) (б).

печил высокую стабильность амплитуды выделенного импульса, которая не менялась при увеличении частоты повторения от 1 до 100 Гц.

### 3. Лазер с самосинхронизацией мод на основе комбинации оптоэлектронных ПОС и ООС

Другой подход к генерации импульсов в полностью твердотельном пикосекундном лазере основан на использовании режима самосинхронизации мод за счет применения комбинации оптоэлектронных ООС и ПОС. Для генерации импульсов длительностью менее 100 пс управление внутрирезонаторным модулятором необходимо осуществлять непосредственно фототоком расположенных вне резонатора БПС [18]. Как показывают расчеты [19], двухконтурная система (ООС и ПОС) при условии выбора оптимальных относительной чувствительности, задержек и формы управляющего воздействия обеспечивает стабилизацию излучения и уменьшение длительности импульсов до нескольких десятков пикосекунд без применения насыщающихся поглотителей и других нелинейных элементов внутри резонатора.

В отличие от SESAM, которые располагаются внутри резонатора, на БПС попадает лишь небольшая часть лазерного излучения. Поэтому даже при увеличении в сотни раз энергии пикосекундных импульсов (после отключения ООС и модуляции добротности резонатора) БПС не подвержены деградации. В результате схема лазера и схема управления генерацией заметно упрощаются. Прямое использование фототока позволяет достаточно просто формировать на ЭОМе управляющее напряжение пилообразной формы с крутым субнаносекундным фронтом и экспоненциальным спадом. Время спада, которое различно для схем ООС и ПОС, выбирается из соображений оптимальной стабилизации излучения и уменьшения длительности импульсов. Для ООС оно равно  $\sim(1.5 - 2)T_r$  (где  $T_r$  – время обхода резонатора) [19]. Интересно, что в этом случае управление только с помощью схемы ООС при соответствующей задержке в оптическом тракте само по себе способно обеспечить генерацию ультракоротких импульсов Nd : YAG-лазера длительностью  $\sim 100$  пс [20]. Однако время формирования импульсов равно времени нескольких тысяч обходов по резонатору, и во многих случаях это оказывается недопустимым. Переход к комбинации ООС и ПОС устраняет этот недостаток, открывает возможность уменьшения длительности импульсов [16].

Для генерации пикосекундных импульсов во временной зависимости потерь, вносимых управляющим генерацией внутрирезонаторным модулятором, необходимо создать короткие пикочки пропускания длительностью несколько сотен пикосекунд. Импульсы напряжения, вырабатываемые в схеме ПОС, могут быть как пилообразными с крутым субнаносекундным фронтом и временем спада  $\sim(0.5 - 1.5)T_r$ , так и представлять собой импульсы, длительность которых определяется откликом фототока БПС. Вариант управления с помощью коротких импульсов был реализован в [21]: длительность импульса Nd : YAG-лазера с ламповой накачкой составила менее 50 пс. Увеличение более чем на порядок нагрузочного сопротивления БПС, включенного параллельно емкости модулятора, привело к переходу к пилообразной форме управляющих напряжений и сделало режим работы БПС в схеме ПОС более надежным. При этом выбор задержек

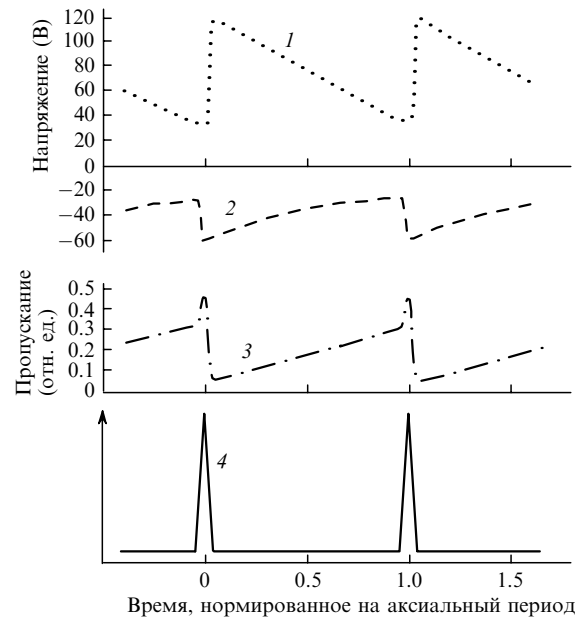


Рис.5. Формирование временного «окна» при управлении ЭОМа пилообразными напряжениями ООС и ПОС: 1 – управляющее напряжение ООС; 2 – управляющее напряжение ПОС; 3 – пропускание модулятора; 4 – оптические импульсы.

позволил реализовать достаточно короткий пикочек пропускания ЭОМа, определяемый комбинированным действием ООС и ПОС. Формирование пикосекундных импульсов в этом случае может быть представлено следующим образом (рис.5): крутой фронт сигнала ООС уменьшает пропускание модулятора, крутой фронт сигнала ПОС увеличивает его. Если задержки и чувствительности в схемах ПОС и ООС оптимизированы, формируется узкое временное «окно» в пропускании модулятора [22]. Такое «окно» при достаточно низком напряжении ПОС не мешает ООС играть роль стабилизирующего фактора. Наличие двух секций ЭОМа, объединенных только общей землей, предоставляет прекрасную возможность подключать ООС и ПОС к каждой секции отдельно [15]. Это уменьшает емкости нагрузок, паразитные индуктивности и увеличивает быстродействие ООС и ПОС.

Функциональная схема лазера представлена на рис.6. Резонатор лазера длиной 1.2 м состоит из активного элемента YAG : Nd диаметром 5 мм и длиной 15 мм, глухого зеркала 31, напыленного на плоский торец ак-

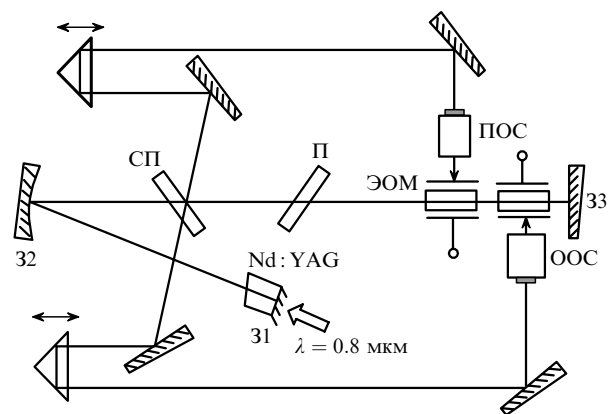


Рис.6. Функциональная схема пикосекундного Nd : YAG-лазера, управляемого комбинацией ООС и ПОС: 31 – 33 – зеркала; СП – светоделительная пластина; П – поляризатор.

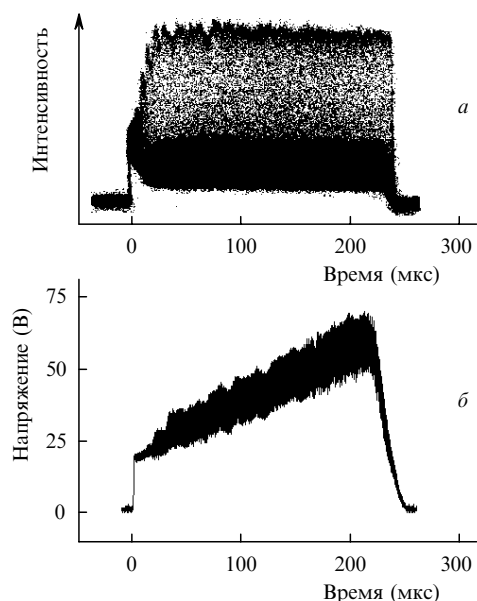


Рис.7. Временные зависимости интенсивности излучения лазера, управляемого комбинацией ООС и ПОС (а), и напряжения ООС в процессе генерации (б).

тивного элемента, двух глухих зеркал (сферического З2 с радиусом кривизны 2 м и плоского З3), низковольтного двухсекционного ЭОМа из  $\text{LiTaO}_3$ , поляризатора П и светоделительной пластины СП. Излучение, необходимое для управления генерацией, выводилось из резонатора с помощью светоделительной пластины СП. Пройдя соответствующие линии регулируемой оптической задержки, излучение направлялось на БПС в схемах ООС и ПОС. Несмотря на существенное изменение усиления активного элемента в процессе импульсной диодной накачки, эффективная стабилизация излучения позволила генерировать цуги пикосекундных импульсов с постоянной амплитудой продолжительностью более 200 мкс (рис. 7,а). Временной ход управляющего напряжения ООС показан на рис.7,б. Длительность пикосекундных импульсов, измеренная фотохронографом АГАТ-СФ-3, составила 30 пс.

#### 4. Заключение

Таким образом, разработаны и экспериментально исследованы два варианта полностью твердотельных пи-

косекундных Nd:YAG-лазеров с импульсной диодной накачкой и электрооптическим управлением генерацией. Полученные результаты позволяют утверждать, что разработанные лазеры найдут широкое применение в различных областях науки и техники.

Авторы выражают глубокую признательность А.В. Виноградову и В.А.Петухову за плодотворное обсуждение результатов и Н.А.Борисевичу за поддержку работы.

1. *Сверхкороткие световые импульсы*. Под ред. С.Шапиро (М.: Мир, 1981).
2. Херман Й., Вильгельми Б. *Лазеры сверхкоротких световых импульсов* (М.: Мир, 1986).
3. Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 95 (2001).
4. Бессонов Е.Г., Виноградов А.В., Горбунков М.В., Турьянский А.Г., Фещенко Р.М., Шабалин Ю.В. *УФН*, **173**, 899 (2003).
5. Bessonov E.G., Feschchenko R.M., Gorbunkov M.V., Vinogradov A.V., Shvedunov V.I. <http://xxx.lanl.gov/abs/physics/0405003>.
6. Keller U., Chiu T.H., Ferguson F. *Opt. Lett.*, **18**, 1077 (1993).
7. Innerhofer E., Sudmeyer T., Brunner F., et. al. *Opt. Lett.*, **28**, 367 (2003).
8. Вальшин А.Н., Гордиенко В.М., Краюшкин С.В., Платоненко В.Т., Попов В.К. *Квантовая электроника*, **13**, 1723 (1986).
9. Комаров К.П., Кучьянов А.С., Угожаев В.Д. *Квантовая электроника*, **13**, 802 (1986).
10. Андреева А.И., Ганиханов Ф.Ш., Гудилин В.Н., Морозов В.Б., Тункин В.Г. *Квантовая электроника*, **16**, 1604 (1989).
11. Heinz P., Reuther A., Laubereau A. *Opt. Commun.*, **97**, 35 (1993).
12. Бабушкин А.В., Воробьев Н.С., Прохоров А.М., Щелев М.Я. *Квантовая электроника*, **16**, 2036 (1989).
13. Buchvarov I., Saltiel S., Stankov K., Georgiev D. *Opt. Commun.*, **83**, 65 (1991).
14. EKSMА products: PL 2140 series picosecond Nd:YAG lasers.
15. Горбунков М.В., Морозов В.Б., Оленин А.Н., Телегин Л.С., Тункин В.Г., Шабалин Ю.В., Яковлев Д.В. *Патент РФ № 2240635 (приоритет от 20.08.2003)*.
16. Горбунков М.В., Шабалин Ю.В. *Патент РФ № 2163412 (приоритет от 22.07.1999)*.
17. Баянов И.М., Гордиенко В.М., Зверева М.Г., Магницкий С.А., Тарасевич А.П. *Квантовая электроника*, **16**, 1545 (1989).
18. Gorbunkov M.V., Vorchik D.V. *Book of abstracts. CLEO Europe (Hamburg, 1996, p. 282)*.
19. Gorbunkov M.V., Shabalin Yu.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4751**, 463 (2001).
20. Ворчик Д.Б., Горбунков М.В. В сб.: *Труды МФТИ. Физические основы в приборах электронной и лазерной техники* (М., 1995, с. 4).
21. Gorbunkov M.V., Morozov V.B., Shabalin Yu.V., Tunkin V.G., Yakovlev D.V. *Book of Abstracts. XII Int. Laser Phys. Workshop (Hamburg, 2003, p. 250)*.
22. Gorbunkov M.V., Morozov V.B., Shabalin Yu.V., Telegin L.S., Tunkin V.G., Yakovlev D.V. *Book of Abstracts. XIII Int. Laser Physics Workshop (Trieste, Italy, 2004, p. 230)*.