УДК 621.378.325

САМОСИНХРОНИЗАЦИЯ МОД ЛАЗЕРА НА НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ ПРИ БЫСТРОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

Д. Б. Ворчик, М. В. Горбунков

Высоковольтная кремниевая структура применена в качестве управляющего элемента оптоэлектронной системы управления в лазере на неодимовом стекле для реализации режима синхронизации мод при быстрой отрицательной обратной связи без использования дополнительной модуляции добротности резонатора. Получена генерация гладких, воспроизводимых, стабилизированных по амплитуде 20-пс импульсов с числом пичков в цуге $\sim 10^4$.

В настоящее время экспериментальная физика испытывает потребность в компактных и надежных лазерных системах, позволяющих получать гладкие цуги ультракоротких световых импульсов с количеством пичков, достигающим 10^4. Как правило, такое излучение получают в результате совместного действия системы отрицательной обратной связи (ООС), осуществляющей амплитудную стабилизацию излучения, и системы синхронизации мод лазера [1 – 3].

В данной работе многокомпонентная кремниевая высоковольтная структура [4] была применена в качестве управляющего полупроводникового элемента (ПЭ) внутрирезонаторной ячейки Поккельса лазера на неодимовом стекле. Созданная твердотельная оптоэлектронная система позволила одновременно осуществлять как амплитудную стабилизацию лазерного излучения, так и самосинхронизацию мод лазера без дополнительной модуляции добротности резонатора (просветляющиеся поглотители, акустооптические модуляторы, внутрирезонаторные полупроводниковые пластины и т.д.). Подобная оптоэлектронная схема применялась нами [5] для самосинхронизации мод ИАГ неодимового

лазера . В этих экспериментах была достигнута длительность импульса $\sim 150\,пс$. Отметим, что амплитуда управляющего напряжения на ячейке Поккельса не превышала 500 $В$, что составляет 10% от полуволнового напряжения ячейки. Увеличение амплитуды ограничивалось насыщением активного элемента лазера. Переход к неодимовому стеклу дал возможность заметно повысить среднюю мощность генерации, увеличить число фотогенерируемых в ПЭ носителей и поднять управляющее напряжение до 1,5 $кВ$. В итоге были получены гладкие, с высокой степенью воспроизводимости, длинные цуги ($\sim 100\,мкс$) ультракоротких ($< 20\,пс$) световых импульсов в ближнем инфракрасном диапазоне ($\lambda = 1,054\,мкм$).

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Лазер работал в импульсном режиме с частотой повторения 1 $Гц$. Энергия накачки не регулировалась и составляла 75 $Дж$ (блок питания БПЛ 33-75У). В качестве активного элемента использовалось фосфатное стекло ГЛС-24 размерами $\oslash 5 \times 80\,мм^2$ в охлаждаемом водой квантроне К-104Г. Резонатор имел длину $L = 120\,см$, был образован двумя зеркалами с коэффициентом отражения $R = 0,98$. Зеркала, одно из которых сферическое ($r = 2,5\,м$), а второе – плоское, напылены на клиновидные подложки. Для селекции низшей поперечной моды резонатора вблизи сферического зеркала установлена диафрагма диаметром 2,5 $мм$. Был применен внутрирезонаторный затвор на основе ячейки Поккельса (ЯП), состоящий из многослойного поляризатора (П), установленного под углом Брюстера, и оптоэлектронной системы управления (ОСУ). С целью уменьшения паразитной индуктивности кристалл DKDP (размер $8 \times 8 \times 20\,мм^3$, суммарная емкость кристалла и монтажа $C_{яп} < 4\,пФ$) был установлен непосредственно на плате оптоэлектронной схемы. Полуволновое напряжение используемого кристалла – 4,8 $кВ$ при двух проходах через кристалл (продольный электрооптический эффект). Отраженное от поляризатора излучение через систему регулируемой оптической задержки (ОЗ) отводилось на полупроводниковый элемент оптоэлектронной схемы управления. Для достижения однородности засветки ПЭ применялся призменный расширитель, позволяющий формировать "строчку" излучения, соответствующую размерам полупроводникового элемента ($2,2 \times 1,1 \times 1,1\,мм^3$). Под действием излучения, отводимого в линию оптической задержки ООС, осуществлялись самомодуляция внутрирезонаторной ячейки Поккельса и амплитудная стабилизация излучения.

Электрическая схема ОСУ представлена на рис. 2. Питание схемы осуществлялось двухканальным высоковольтным источником регулируемого постоянного напряжения в пределах от 0 до $\pm 2,5\,кВ$. Емкость C_1 ($C_1 \gg C_{яп}$, C_2) служит для быстрого ($T < 2L/c$)

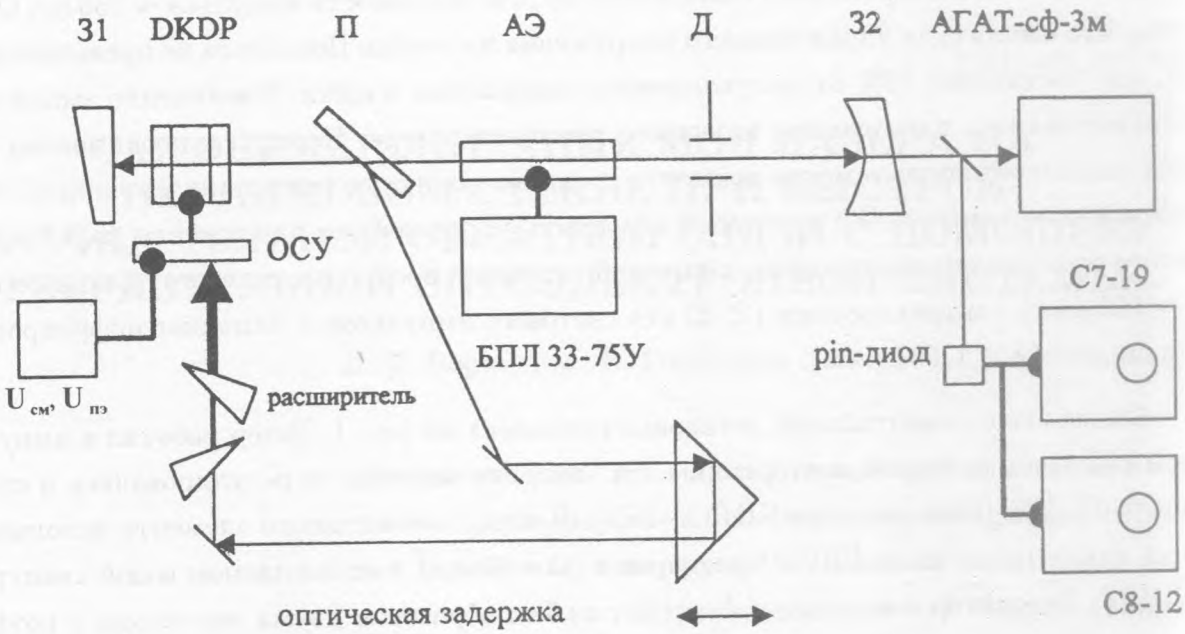

Рис. 1. *Схема экспериментальной установки.*

заряда емкости кристалла $C_{яп}$ через ПЭ. Емкость $C_2\,(C_2 \gg C_{яп})$ замыкает цепь по переменному току. Импульсное напряжение на кристалле в процессе генерации лазера измерялось при помощи высокочастотного резистивного (R_2, R_3) делителя с временем отклика $\sim 100\ нс$. Разряд $C_{яп}$ осуществляется через $R_0 \cong R_1R_2/(R_1+R_2)$ с характерным временем, примерно равным времени обхода светом резонатора T_p. Оптимизация схемы управления достигается путем изменения R_0 при варьировании R_1 в пределах $0-7\ кОм$.

Кинетические измерения проводились с помощью скоростного осциллографа С7-19 (полоса 5 $ГГц$) и запоминающего осциллографа С8-12. Тонкая временная структура излучения исследовалась электронно-оптической камерой с линейной разверткой АГАТ-СФ-3М (разрешение $\leq 2\ нс$). Синхронизация камеры с излучением лазера достигалась специальной электронной системой, обеспечивающей плавную задержку в интервале 0 – 500 $мкс$ при нестабильности срабатывания $\pm 100\ нс$.

В линейном режиме работы ПЭ самосинхронизация мод лазера при быстрой ООС [5] осуществляется следующим образом. После того как световой импульс, отведенный в линию оптической задержки ООС, попадает на ПЭ, начинается быстрый заряд емкости кристалла DKDP ячейки Поккельса фототоком ПЭ. Напряжение на кристалле ЯП резко возрастает. Затем, после заряда емкости кристалла ЯП до максимального значения

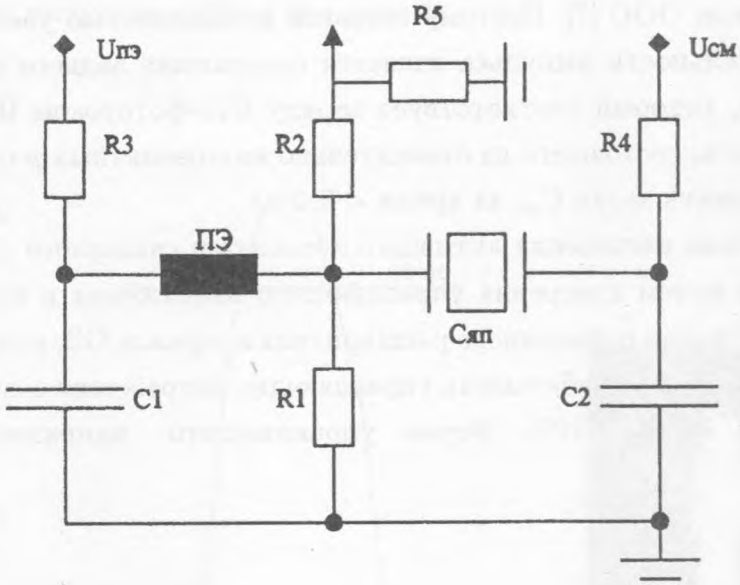

Рис. 2. *Схема оптоэлектронной системы управления.*

U_{max}, начинается ее экспоненциальный разряд через сопротивление R_0. Разряд емкости продолжается до начала следующего цикла заряда, который определяется приходом очередного светового импульса на ПЭ. Моменту начала заряда $C_{яп}$ соответствуют минимальное напряжение на кристалле U_{min} и максимальное пропускание ячейки Поккельса. Существенно, что для реализации режима самосинхронизации мод длина линии оптической задержки должна соответствовать прохождению через кристалл оптического импульса, циркулирующего в резонаторе лазера, в момент достижения максимума пропускания ячейки Поккельса. Остаточное напряжение U_{min} определяет действие ООС, которая приводит к стабилизации излучения. Длительность установившегося светового импульса τ задается формой функции пропускания ячейки $T(t)$. По аналогии с теорией активной синхронизации мод при гармонической модуляции потерь [6] в случае произвольной формы модуляции для длительности стационарного установившегося импульса можно получить $\tau \sim (T''(t_{зар}))^{-1/4}$, где $T''(t_{зар})$ – вторая производная по времени от функции пропускания модулятора в момент начала заряда $C_{яп}$. Временной ход пропускания модулятора представляет собой несимметричную "пилу" с длинным передним фронтом $\sim T_p$ и коротким задним фронтом. Скорость нарастания переднего фронта определяет отношение U_{max}/U_{min} (или, соответственно, T_{max}/T_{min}) и достаточно жестко задается требованием реализации режима генерации гладких (без самомодуля-

ции) цугов в режиме ООС [7]. Поэтому основной возможностью увеличения $T''(t_{зар})$ и уменьшения длительности импульса является сокращение заднего фронта управляющего напряжения, который соответствует заряду $C_{яп}$ фототоком ПЭ. Использование составного элемента, состоящего из относительно низковольтных p-n переходов (5 шт.) позволило реализовать заряд $C_{яп}$ за время $< 0,5\,нс$.

Контроль степени насыщения активного элемента и связанного с ним падения усиления проводился путем измерения управляющего напряжения в процессе генерации. Оптимальная настройка призменного расширителя и зеркала ОЗ, направляющего излучение на ПЭ, позволила вырабатывать управляющие напряжения амплитудой $> 1,5\,кВ$ при насыщении среды $< 10\%$. Форма управляющего напряжения представлена на рис. 3.

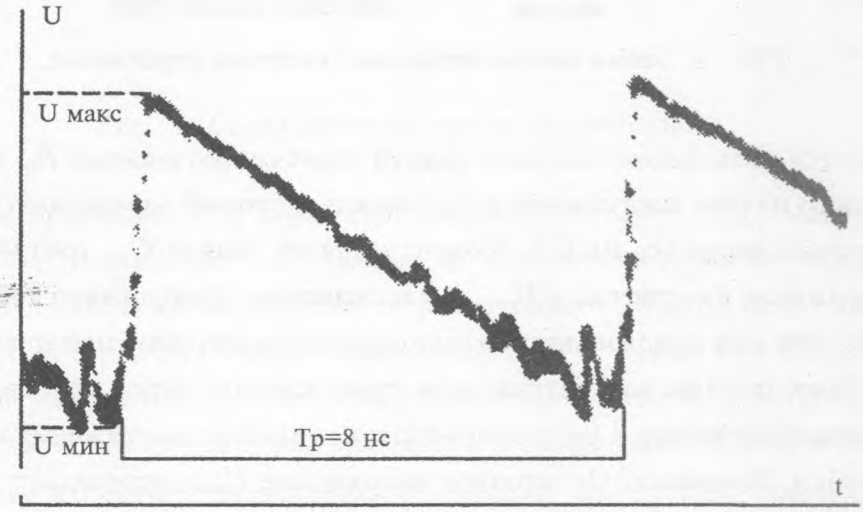

Рис. 3. *Осциллограмма управляющего напряжения.*

Оптимизация лазерной системы проводилась путем варьирования разрядного сопротивления R_0 ОСУ при $U_{пз} = 2,0\,кВ$. При этом для каждого значения R_0 выбиралась величина $U_{см}$, соответстующая генерации лазера чуть ниже порога возникновения самопульсаций [7]. Окончательно R_0 составило 3 $кОм$, в этом случае лазер генерировал гладкие цуги одиночных на аксиальном интервале импульсов. Суммарная длительность цуга $\sim 100\,мкс$, характерное время формирования одиночного импульса $\sim 10\,мкс$. Измерения, выполненные с помощью камеры АГАТ-СФ-3, показали, что длительность

установившегося импульса $< 20\,nc$ (см. рис. 4).

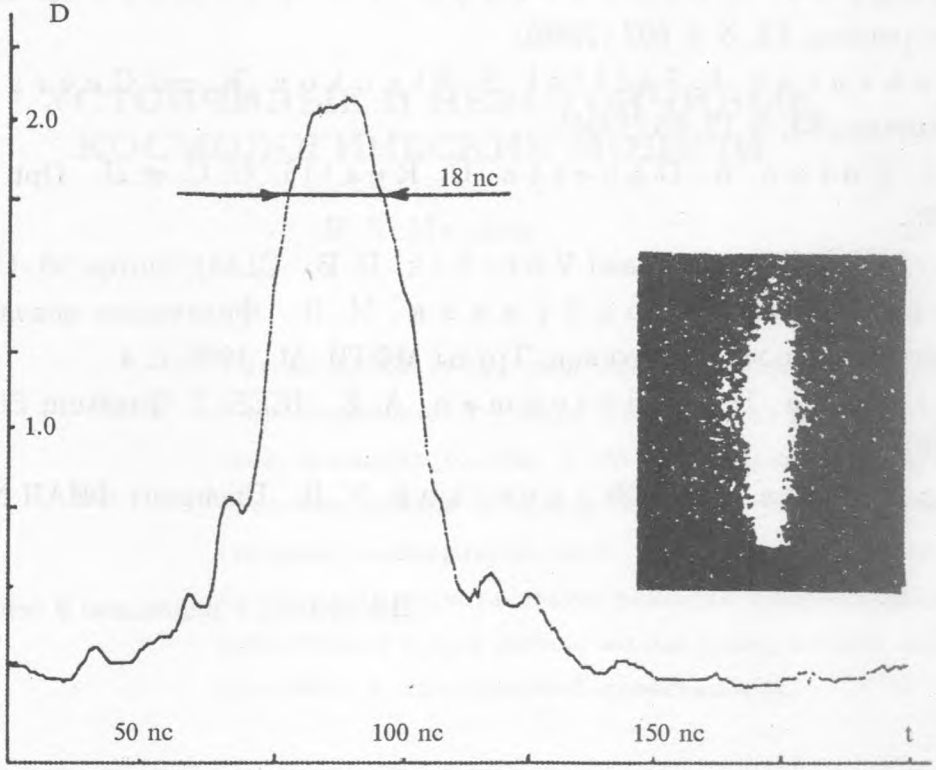

Рис. 4. *Форма лазерного импульса, зарегистрированная камерой АГАТ-СФ-3.*

Основной результат данной работы – успешное применение высоковольтной кремниевой структуры в лазере на неодимовом стекле для реализации режима синхронизации мод при быстрой ООС без использования дополнительной модуляции добротности резонатора. Применение данной структуры в качестве управляющего элемента оптоэлектронной системы позволило получить устойчивую генерацию гладких, воспроизводимых, стабилизированных по амплитуде 20-nc импульсов с числом пичков в цуге $\sim 10^4$. Необходимо отметить, что примененная внутрирезонаторная схема выполнена в полностью твердотельном варианте, проста в использовании, надежна и отличается небольшими размерами ($30 \times 50 \times 15\,мм^3$).

В заключение авторы выражают благодарность Н. А. Борисевичу и В. А. Петухову за полезные обсуждения, М. А. Семенову и П. С. Анциферову за помощь в обработке результатов. Работа поддержана РФИИ (грант N 97–02–17008).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Комаров К. П., Кучьянов А. С., Угожаев В. Д. Квантовая электроника, **13**, N 4, 802 (1986).

[2] Buchvarov I., Saltiel S., Stankov K, and Georgev D. Opt. Communs., **83**, N 12, 65 (1991).

[3] Del Corno A., Gabetta G., Realli G. C. et al. Opt. Lett., **15**, 734 (1990).

[4] Gorbunkov M. V, and Vorchik D. B. CLEO/Europe'96.-CThI61, p. 282.

[5] Ворчик Д. Б., Горбунков М. В. Физические основы в приборах электронной лазерной техники. Труды МФТИ, М., 1995, с. 4.

[6] Kuizenga D. J. and Siegman A. E. IEEE, J. Quantum Electron., **6**, 694 (1970).

[7] Горбунков М. В., Жуковский К. В. Препринт ФИАН N 19, М., 1996.

Поступила в редакцию 9 сентября 1997 г.