ОПТИКА И ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 621.373.8; 517.977.5

ГЕНЕРАТОР СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ С МУЛЬТИГИГАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ И ХАОТИЧЕСКИМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ АМПЛИТУДЫ

М. В. Горбунков[1], Ю. Я. Маслова[1], В. С. Ермаков[2], Ю. А. Синичкина[1]

Рассмотрены различные реализации синхронизированного с внешним сигналом хаотического генератора световых импульсов на основе твердотельного лазера. Показано, что оптоэлектронное управление позволяет за счет выбора задержки комбинации обратных связей обеспечивать не только генерацию мультигигагерцовых последовательностей световых импульсов постоянной амплитуды, но и реализовать режимы с хаотическим поведением различной сложности, в том числе по сценарию логистического отображения.

Ключевые слова: оптоэлектронные обратные связи, твердотельный лазер, детерминированный хаос, модулятор Маха–Цендера.

Введение. Системы с управляемой хаотической динамикой находят все большее применение в различных областях науки и техники. Хаотические сигналы могут использоваться в системах передачи данных для повышения безопасности и устойчивости к перехвату информации, например, в схемах хаотической маскировки, где информация передается с помощью хаотических несущих сигналов [1]. Новые методы, разрабатываемые для широкополосных систем связи, ставят задачу создания быстрых, простых и надежных генераторов хаотических последовательностей импульсов света [2–5]. Интерес к хаотическим генераторам света возникает и в различных задачах биологии, фундаментальной и практической медицины [6].

[1] ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: sinichkina_y@mail.ru.

[2] МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005 Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.

В работе [7] показано, что лазер, генерирующий ультракороткие импульсы в режиме синхронизации мод и управляемый цепью безынерционной отрицательной обратной связи, должен демонстрировать хаотическую динамику выходного излучения, которая соответствует логистическому отображению [8, 9]. Оно задается выражением:

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n), \tag{1}$$

где x_n – энергия циркулирующего в резонаторе короткого импульса (нормированная на чувствительность обратной связи) на проходе n, r – усиление, нормированное на пороговое значение, а выражение в скобках отражает действие отрицательной обратной связи. Отметим, что термин безынерционная отрицательная обратная связь в контексте [7] означает зависимость энергии импульса от его энергии только лишь на одном предыдущем проходе. Механизм синхронизации мод, который должен приводить к генерации коротких импульсов, в [7] не обсуждается.

Детальный анализ показывает, что применение оптоэлектронной инерционной обратной связи позволяет реализовать режим самосинхронизации мод (без использования дополнительных элементов). Применение фотодиодов с временем отклика 500 пс в оптоэлектронной отрицательной обратной связи обеспечивает в твердотельных лазерах на основе Nd^{3+} длительность на уровне 100–200 пс [10, 11], а переход к комбинации отрицательной и положительной обратных связей позволяет сократить длительность до десятков пикосекунд [12, 13].

В статье [14] было показано, как сочетание отрицательной и положительной обратной связи (в режиме стирания памяти) может привести к созданию простой лазерной системы, которой свойственно поведение, близкое к динамике логистического отображения. Эта система демонстрирует каскад удвоений периода, окна устойчивости периодических режимов, перемежаемость и детерминированный хаос на временных интервалах, равных времени полного обхода светом резонатора. Характерная частота повторения импульсов лежит в диапазоне десятков-сотен МГц. В работах [15, 16] экспериментально и теоретически показано, что гармоническая синхронизация мод, осуществленная за счет действия задержанной оптоэлектронной отрицательной обратной связи, позволяет генерировать за один обход светом резонатора заданное задержкой число равноудаленных импульсов и обеспечивать ГГц частоту следования.

Настоящая работа посвящена методу, который объединяет режим стирания памяти и гармоническую синхронизацию мод: с помощью численного моделирования исследуется возможность создания синхронизированного с внешним сигналом генератора

световых импульсов с хаотическим изменением амплитуды на основе твердотельного лазера с мультигигагерцовой частотой следования.

Стирание памяти в режиме гармонической синхронизации мод. Для осуществления режима генерации, при котором в резонаторе циркулирует m равноудаленных импульсов (гармоническая синхронизация мод), достаточно только действия инерционной отрицательной обратной связи. Для этого задержка должна быть равна [16]:

$$T_d = \left(1 - \frac{1}{m}\right) T_r + \frac{\tau_F}{2\sqrt{\ln 2}} \sqrt{\ln\left(\frac{2\sqrt{\ln 2} RC}{\tau_F} \frac{\left(\exp\left(\frac{T_r}{mRC}\right) - 1\right)}{\sqrt{n}}\right)}. \qquad (2)$$

Здесь T_r – время обхода светом резонатора, RC – постоянная времени, характеризующая инерционность действия модулятора, τ_F – время отклика фототока.

В этом режиме к моменту прохождения светового импульса управляющий сигнал складывается из затухающих сигналов от всех ранее подействовавших импульсов. Убрать (стереть) вклад части импульсов можно путем использования второго управляемого плеча обратной связи, на фотодиод которого подается дополнительно задержанная часть излучения. Чтобы исключить влияние всех соседей, относительная задержка выбирается равной T_r/m, а относительная чувствительность $\alpha = \exp(-T_r/mRC)$ (см. рис. 1). При этом для устойчивой самосинхронизации мод в области больших усилений целесообразно выбирать $RC \geq 2T_r/m$.

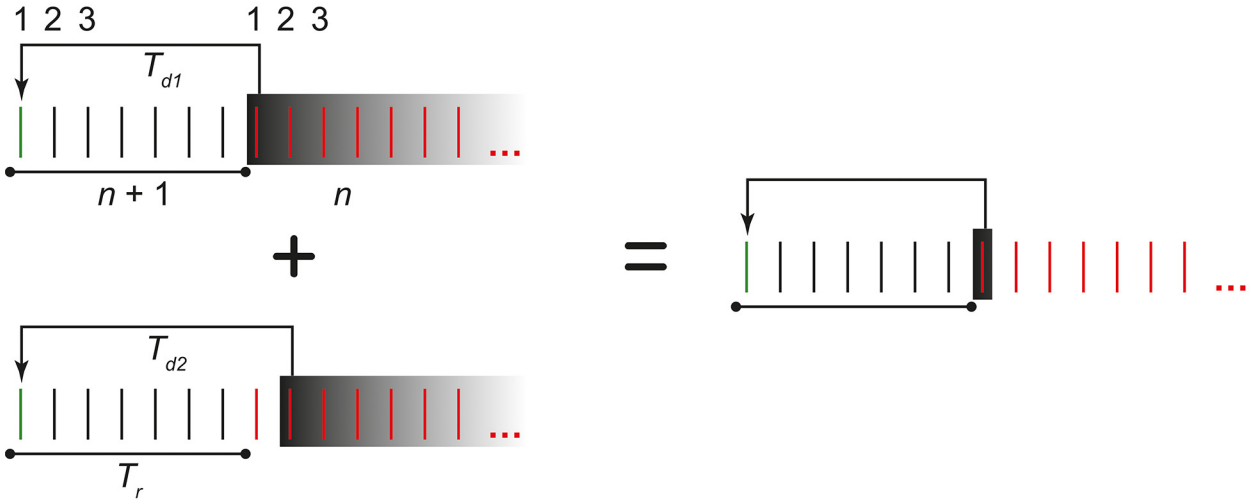


Рис. 1: *Схема лазера: $M1, M2$ – зеркала резонатора, $R1, R2$ – сопротивления, задающие инерционность обратной связи.*

В условиях, сделанных по аналогии с [7] допущений для нормированной энергии светового импульса лазера с инерционной обратной связью, справедливо рекуррентное соотношение – точечное нелинейное отображение с бесконечной затухающей суммой в управляющем множителе:

$$x_{n+1} = rx_{n-(m-1)} \left(1 - \sum_{i=0} x_{n-(m-1)-i} \cdot \gamma^i + \alpha \sum_{i=p} x_{n-(m-1)-i} \cdot \gamma^{i-p} \right). \quad (3)$$

Стирание остаточного сигнала соответствует сокращению оставшихся членов бесконечной суммы при правильном выборе коэффициента перед второй бесконечной суммой. Если $\alpha = \gamma$, то

$$x_{n+1} = rx_{n-(m-1)}(1 - x_{n-(m-1)}), \quad (4)$$

что соответствует системе из m независимых логистических отображений. Таким образом, энергия каждого из m лазерных импульсов при повышении усиления будет следовать сценарию логистического отображения.

Численный эксперимент. Для обоснования возможностей предложенного метода были проведены численные расчеты с помощью комплекса программ, разработанного в лаборатории фотоники молекул ОКРФ ФИАН [16]. Исследована нелинейная динамика генерации твердотельного лазера, управляемого комбинацией положительной и отрицательной оптоэлектронной обратной связи. Помимо активной среды, резонатор лазера содержит электрооптический модулятор для синхронизации (работает на второй гармонике частоты следования импульсов) и систему из двух обратных связей (см. рис. 2).

Существенным достоинством предлагаемого генератора является возможность синхронизации с внешним сигналом. Кроме того, частота внешней модуляции определяет длительность световых импульсов. При расчётах предельная частота их следования определялась по сбою синхронизации в хаотическом режиме генерации. Моделирование проходило в двух направлениях. В первом случае частота составила 2 ГГц и была ограничена выбранным временем отклика фотодиода 500 пс. Такие фотодиоды оптимальны для управления двухсекционными модуляторами с полуволновым напряжением на секцию $U_{\lambda/4}$ до 2 кВ, использующими поперечный электрооптический эффект. Габариты устройства позволяют при расчетах описывать двойное прохождение модулятора формулой, связывающей пропускание модулятора с мгновенным значением управляющего напряжения. Моделирование для второго случая – применения сверхнизковольтных модуляторов и, соответственно, более длинных кристаллов в сочетании с быстродействующими низковольтными фотодиодами – требует более подробного рассмотрения.

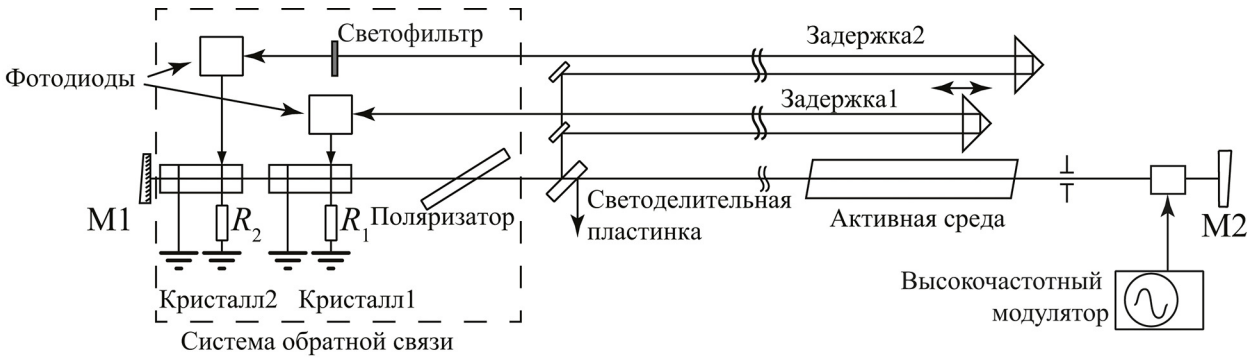


Рис. 2: *Принцип стирания памяти: совместное применение отрицательной и положительной обратной связи с относительной задержкой, равной межимпульсному интервалу, позволяет ограничить действие одним импульсом.* T_r *– время обхода светом резонатора;* T_{d1}, T_{d2} *– задержки отрицательной и положительной обратных связей;* $n, n+1$ *– номер обхода светом резонатора;* $1, 2, 3$ *– нумерация импульсов внутри одного обхода.*

При корректном описании управления в этом случае необходимо учитывать распространение электрического поля в кристаллах модулятора конечных размеров, а также расстояние между ними и до зеркала резонатора.

Для существенного повышения частоты целесообразен переход к волноводному распространению управляющего напряжения по кристаллу модулятора. В этом случае управляющий сигнал формируется при заряде формирующей емкости и последующем ее разряде на линию (кабель), волновое сопротивление которой совпадает с волновым сопротивлением модулятора. Синхронное распространение управляющей электрической и оптической волн обеспечивает широкополосность модуляции. Волноводные модуляторы типа Маха–Цендера обладают уникально широким частотным диапазоном. Отметим, что при использовании двойного модулятора Маха–Цендера управление осуществляется однополярными сигналами, в отличие от случая двухсекционного электрооптического модулятора, в котором стирание памяти реализуется за счет подачи на кристаллы разнополярного напряжения. Синхронность управления позволяет обоснованно использовать в моделировании электрооптического управления модель RC-релаксатора, в котором C_Φ – формирующая емкость, R – волновое сопротивление модулятора, а при установке задержек необходимо учитывать длину соединительного кабеля. В расчетах, выполненных для использования модулятора Маха–Цендера, в качестве времени отклика фотодиода мы использовали значение 50 пс, достаточное

для устойчивой генерации синхронизированных с внешним генератором хаотической последовательности световых импульсов, следующих с периодом 100 пс, величина RC составила 300 пс.

Расчет динамики лазера основан на последовательном преобразовании интенсивности лазерного излучения с учетом действия активной среды и электрооптического модулятора [16]:

$$A_{K+1}(t) = (1-S)\sqrt{P(t)}\frac{e^g}{2\sqrt{\pi}\tau_\alpha\sqrt{g}}\times$$

$$\times\int\limits_{-\infty}^{\infty} A_K(t')\exp\left[-\left(\frac{t-t'-\tau_\alpha g}{2\tau_\alpha\sqrt{g}}\right)^2\right]dt' + N_K(t). \quad (5)$$

Таблица 1

Параметры численной модели

Параметр	Обозначение	Значение
Время обхода резонатора	T_r	10 нс
Постоянная модулятора	RC	300 пс
Ширина линии спектра	$\Delta\nu$	0.24 ТГц
Коэффициент отражения светоделительной пластинки	S	0.5
Время отклика фотодиода	τ_F	50 пс
Напряжение смещения модулятора	$U_0/U_{\lambda/4}$	0.5
Усиление	G	1–7.5
Задержка отрицательной обратной связи	T_d	9935 пс
Относительная задержка положительной обратной связи	ΔTd	100 пс
Относительная чувствительность положительной обратной связи	α	0.71653

Здесь $A_K(t)$ – интенсивность излучения на обходе с номером K, S – коэффициент отражения светоделительной пластинки, $P(t)$ – пропускание модулятора с учетом комбинированного действия системы обратных связей и модулятора синхронизации, g – коэффициент усиления активной среды, $\tau_a = 1/\pi\Delta\nu$ – время дефазировки верхнего уровня, $\Delta\nu$ – ширина линии усиления активной среды, N_K – амплитуда шума. Значения параметров исследуемого лазера указаны в табл. 1, далее используются значения

полного усиления G за один обход в единицах порогового усиления G_0. Ранее такой подход применялся для моделирования динамики ряда лазеров, охваченных комбинацией обратных связей, полный набор параметров лазерной системы, формулы для расчета и аналитические оценки представлены в [16].

На рис. 3 представлено поведение энергии излучения за один обход резонатора в зависимости от номера обхода светом резонатора при линейном росте усиления от 1 до $7.6G_0$ за $5 \cdot 10^4$ обходов светом резонатора.

Весь комплекс обнаруженных особенностей проявления нелинейной динамики, таких как каскад удвоений периода, область детерминированного хаоса, четко выделяющиеся окна периодического поведения, включая период 3, свидетельствуют о сходстве динамики предлагаемого хаотического генератора с динамикой логистического отображения.

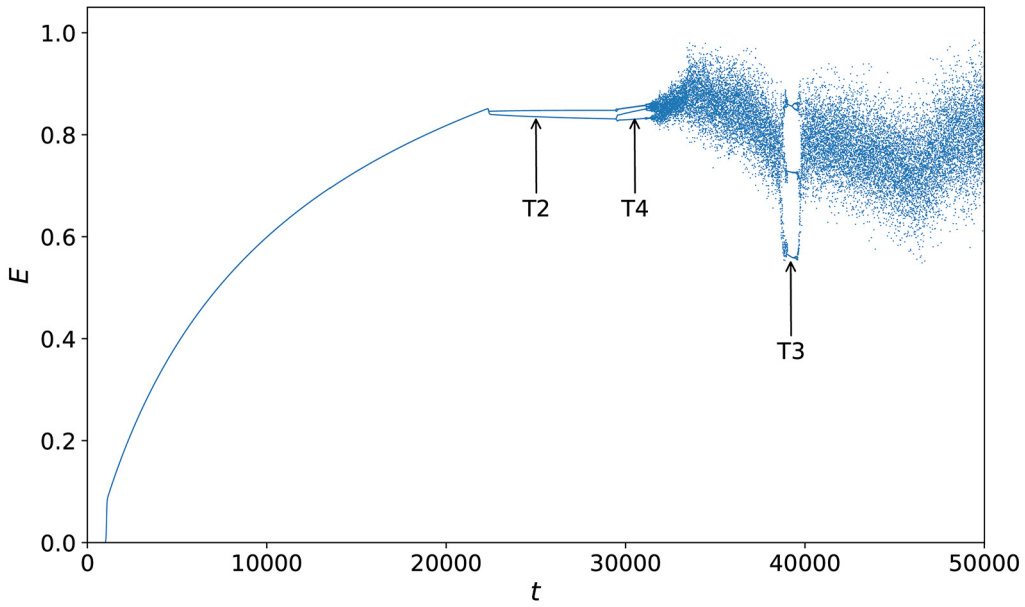


Рис. 3: *Фазопараметрическая диаграмма* 10 *ГГц хаотического генератора.* $T2$ *– режим удвоения периода (амплитуды импульсов принимают два дискретных значения);* $T4$ *– период* 4 *(четыре дискретных значения);* $T3$ *– период* 3 *(три дискретных значения).*

Как и рассмотренная в работе [16] лазерная система с одной отрицательной обратной связью и гармонической модуляцией потерь, предлагаемый хаотический генератор обладает коротким временем установления значения энергии импульсов в диапазоне 100–200 времен обхода светом резонатора, что для рассмотренного твердотельного лазера составляет 1–2 мкс. На основании расчетов можно было проследить за поведением

каждого из импульсов. Энергия отдельного импульса показана на рис. 4. Каскад удвоений периода и детерминированный хаос наблюдаются при усилениях от $3.8G_0$.

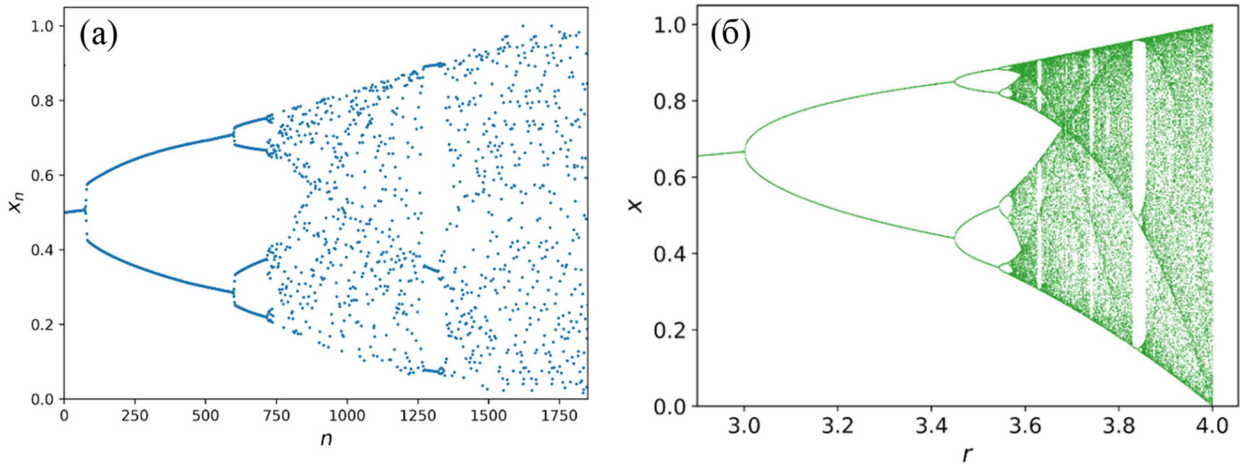


Рис. 4: *(а) фазопараметрическая диаграмма* 10 *ГГц хаотического лазерного генератора, амплитуда одного импульса при линейном росте усиления от* $3.83G_0$ *до* $7.0G_0$*, показана амплитуда импульсов каждые* 20 *обходов; (б) фазопараметрическая диаграмма логистического отображения.*

На рис. 5 показана динамика лазера в режимах удвоения, утроения периода и хаотическом при постоянном усилении и внешней модуляции потерь с частотой 10 ГГц и глубиной 100%. Показаны 4 обхода светом резонатора.

С целью демонстрации возможностей предложенного способа управления для выбранной частоты следования коротких лазерных импульсов были проведены расчеты их длительности для ряда распространенных лазерных сред (см. табл. 2). Рассмотрены два основных способа, которые используют: 1) двухсекционный электрооптический модулятор с полуволновым напряжением на секцию $U_{\lambda/4} = 1.5$ кВ на основе кристаллов $LiTaO_3$, напрямую управляемые высоковольтными фотодиодами с максимальным смещением >1.2 кВ [10] и временем отклика 500 пс, который поддерживает частоту до 2 ГГц и 2) волноводный модулятор типа Маха–Цендера [17] с $U_{\lambda/2} = 5$ В с волновым сопротивлением 50 Ом, управляемый формирователем на основе диода со временем отклика 50 пс и емкости $C_\text{ф} = 300$ пс, обеспечивающий работу на частоте 10 ГГц. На основании расчетов можно утверждать, что переход к волноводным технологиям с присущими им методами высокочастотной модуляции света (до 250 ГГц) и применение сверхбыстрых *pin*-фотодиодов с предельной частотой порядка нескольких десятков ГГц позволяет создать устройство с рабочей частотой более 10 ГГц.

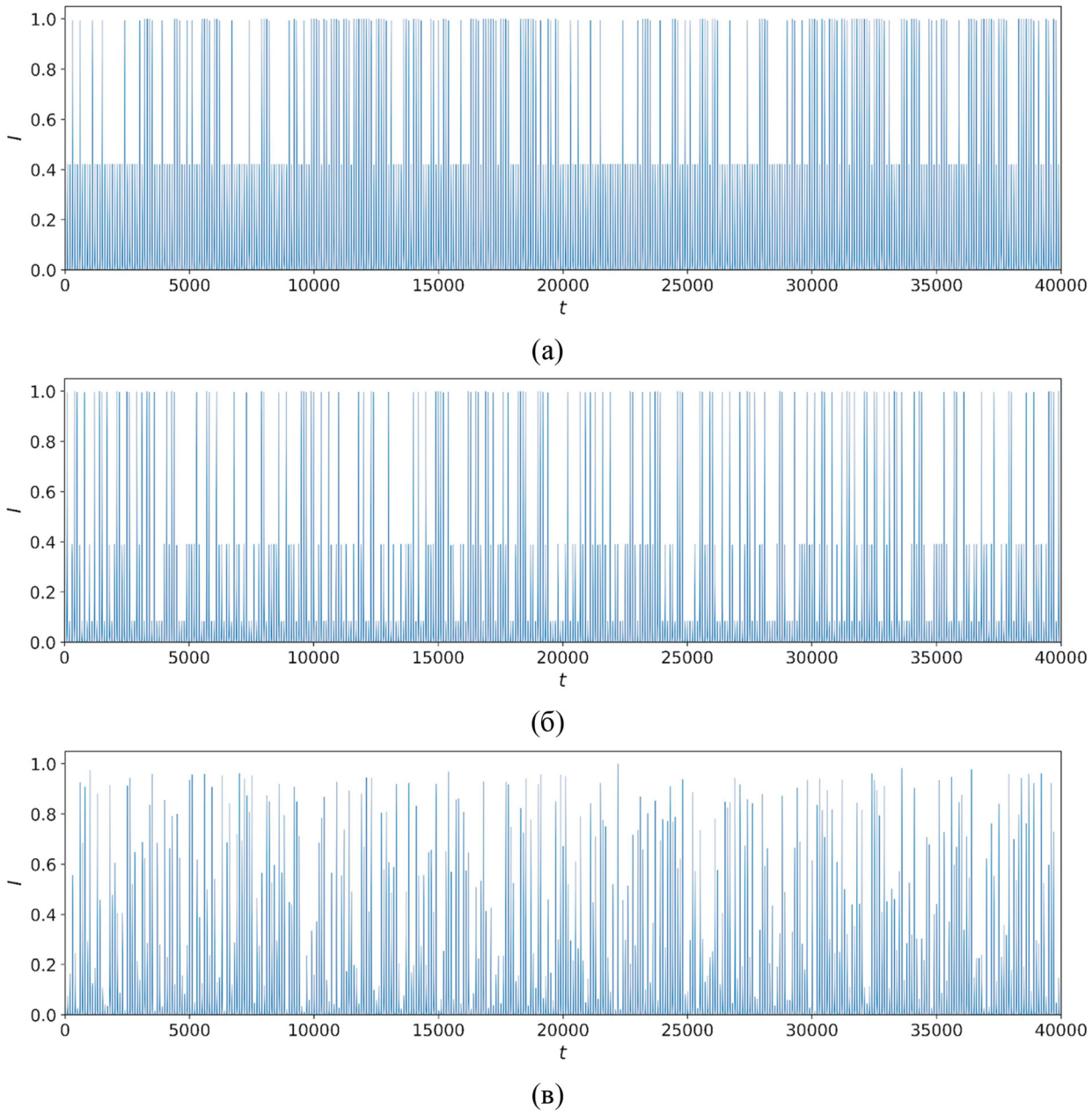


Рис. 5: *Динамика лазерного генератора: интенсивность выходного излучения* $I(t)$ *в режиме удвоения периода при постоянном усилении* $4.8G_0$ *(а), в режиме утроения периода при постоянном усилении* $6.18G_0$ *(б), и в хаотическом режиме при усилении* $7.6G_0$ *(в). Время* t *указано в пикосекундах. Количество лазерных импульсов на одном обходе равно* $m = 100$.

Таблица 2

Расчетная длительность коротких импульсов в режиме хаотической генерации в зависимости от способа оптоэлектронного управления и активной среды лазера

Активная среда	Nd:YAG	Nd:YLF		Nd^{3+} стекло
Способ оптоэлектронного управления	Двухсекц. электроопт., $U_{\lambda/4} = 1.5$ кВ, $\tau_F = 500$ пс	Двухсекц. электроопт., $U_{\lambda/4} = 1.5$ кВ, $\tau_F = 500$ пс	Модулятор Маха–Цендера, $U_{\lambda/4} = 5$ В, $\tau_F = 50$ пс	Модулятор Маха–Цендера, $U_{\lambda/4} = 5$ В, $\tau_F = 50$ пс
Ширина линии, ТГц	0.12	0.42		4
Длительность импульса, пс	41 ± 1	23 ± 1	10 ± 1	2.6 ± 0.1
Частота следования импульсов, ГГц	2	2	10	10

Выводы. Результаты моделирования показывают, что генератор мультигигагерцовой последовательности равноудаленных импульсов с хаотическим распределением амплитуды по сценарию логистического отображения может быть создан с оптоэлектронным управлением. Требуемый режим реализуется за счет выбора задержек и относительной чувствительности положительной и отрицательной обратных связей.

Ожидаемая частота следования мощных импульсов составляет единицы ГГц для двухсекционных модуляторов (до 2 кВ на секцию) в комбинации с высоковольтным фотодиодом с откликом 500 пс. Переход к волоконным технологиям с присущими им методами модуляции света (низковольтные модуляторы Маха–Цендера) позволяет предложить устройство с рабочей частотой более 10 ГГц.

Авторы выражают благодарность Ю. В. Шабалину за помощь в проведении вычислений, В. А. Петухову и В. Г. Тункину за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

[1] А. С. Дмитриев, А. И. Панас, С. О. Старков и др., Патент РФ № RU2185032C2, 2000 г.

[2] P. Colet, R. Roy, Opt. Lett. **19**, 2056 (1994). DOI: 10.1364/OL.19.002056.

[3] L. Larger, J.-P. Goedgebuer, Comptes Rendus Physique **5**, 609 (2004). DOI: 10.1016/j.crhy.2004.05.004.

[4] M. Suneel, Sadhanā **31**, 69 (2006). DOI: 10.1007/bf02703801.
[5] N. K. Pareek, V. Patidar, K. K. Sud, Phys. Lett. A **309**, 75 (2003). DOI: 10.1016/S0375-9601(03)00122-1.
[6] C. M. Kacher, H. Klima, K. W. Kratky, International Journal of Modelling, Identification and Control **5**(3), 214 (2008). DOI: 10.1504/IJMIC.2008.023124.
[7] И. М. Баянов, В. М. Гордиенко, С. А. Магнитский и др., КЭ **16**, 1545 (1989).
[8] М. Фейгенбаум, УФН **141**, 343 (1983).
[9] Г. Шустер, *Детерминированный хаос* (М., Мир, 1988).
[10] M. V. Gorbunkov et al., Applied Optics **48**(12), 2267 (2009). DOI: 10.1364/AO.48.002267.
[11] M. V. Gorbunkov, Yu. Ya. Maslova, A. V. Vinogradov, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **608**, S32 (2009). DOI: 10.1016/j.nima.2009.05.034.
[12] M. V. Gorbunkov, Yu. V. Shabalin, Proc. SPIE **4751**, 463 (2002). DOI: 10.1117/12.475948.
[13] M. V. Gorbunkov, Yu. Ya. Maslova, Yu. V. Shabalin, V. G. Tunkin, Journal of Physics: Conference Series **692**(1), 012009 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/692/1/012009.
[14] М. В. Горбунков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **36**(5), 39 (2009). DOI: 10.3103/S1068335609050054.
[15] М. В. Горбунков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **43**(7), 14 (2016). DOI: 10.3103/S1068335616070022.
[16] M. V. Gorbunkov et al., IEEE Journal of Quantum Electronics **57**(6), 1 (2021). DOI: 10.1109/JQE.2021.3107860.
[17] J. Hu et al., Applied Sciences **10**(21), 7914 (2020). DOI: 10.3390/app10217914.

Поступила в редакцию 8 ноября 2024 г.
После доработки 17 февраля 2025 г.
Принята к публикации 20 февраля 2025 г.