

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 535.8

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-2-121-132

Селектор импульсов для получения фемтосекундного излучения с управляемой фазой несущей относительно огибающей*

Н.Н. ГОЛОВИН^а, А.К. ДМИТРИЕВ^б

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный техни-
ческий университет

^а n.golovin@corp.nstu.ru ^б alexander_dmitriev@ngs.ru

В нелинейных оптических процессах, таких как получение аттосекундных импульсов, чрезвычайно важно контролировать фазу несущей относительно огибающей. Для этого могут создаваться различные периодические последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с управляемой фазой. Кроме того, поскольку сдвиг гребенки частот в таких последовательностях отсутствует, существенно упрощается процесс измерения оптических частот.

Разработан селектор импульсов для получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с контролируемой фазой несущей относительно огибающей. Селектор позволяет получить на выходе модулятора «чистую» последовательность идентичных фемтосекундных импульсов (когда из исходной последовательности с частотой следования 250 МГц выделяется каждый 125-й импульс) в достаточно широком диапазоне перестройки фазы управляющего сигнала. Этот диапазон составляет 1,3 градуса. Перестройка фазы селектора импульсов обеспечивает возможность получения ста двадцати пяти таких последовательностей с дискретностью перестройки фазы $2\pi/125$. Самый простой способ уменьшения дискретности – увеличение отношения частоты следования импульсов фемтосекундного лазера к смещению его частотной гребенки. Фазовая характеристика селектора импульсов была получена при регистрации временных зависимости синтезированной последовательности с шагом перестройки фазы селектора 0,1 градуса.

Были измерены спектры последовательностей при различных фазах селектора импульсов, а также спектр излучения задающего лазера при минимальном пропускании модулятора в отсутствие модуляции. Спектр с максимальной амплитудой соответствовал случаю, когда из исходной последовательности выделялись идентичные импульсы с наибольшей амплитудой. Разница этих спектров позволила выделить спектр чистой последовательности идентичных фемтосекундных импульсов без учета «подкладки», возникающей из-за того, что модулятор имеет конечное ослабление, равное –20 дБ.

* Статья получена 11 ноября 2021 г.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSUN-2020-0007.

Ключевые слова: фаза несущей относительно огибающей, фемтосекундная гребенка, сдвиг несущей относительно огибающей, селектор импульсов, электрооптический модулятор, фемтосекундные импульсы, оптический спектр, фемтосекундный лазер

ВВЕДЕНИЕ

Ультракороткие световые импульсы, длительность которых составляет величину порядка длины волны, нашли широкое применение в нелинейных оптических процессах [1–4]. Например, при генерации аттосекундных импульсов важно контролировать фазу несущей относительно огибающей импульса (carrier-envelope phase, CEP), поскольку даже небольшое отклонение CEP импульса накачки от нуля приводит к существенному уменьшению амплитуды генерируемого импульса. Кроме того, в последовательности идентичных импульсов (когда CEP постоянна для каждого импульса) отсутствует сдвиг частотной гребенки, что важно для метрологических приложений. Такое излучение может использоваться при измерении больших длин интерферометрическими методами [5], когда в качестве метки выступает максимум огибающей интерференционной картины, поскольку отсутствие сдвига частотной гребенки обеспечивает более точное определение экстремума интерференционной картины. Кроме того, отсутствие частотного сдвига упрощает процесс измерения точного значения частоты лазерного излучения [6], поскольку необходимо определять только частоту следования импульсов.

Первоначально для устранения сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазера использовался гетеродинный лазер [6]. Однако для реализации такой схемы необходимо выполнение двух условий. Во-первых, частота лазера-гетеродина должна находиться в низкочастотной области спектра излучения фемтосекундных импульсов. Во-вторых, вторая гармоника излучения гетеродина должна приходиться на высокочастотную часть спектра фемтосекундного лазера. Кроме того, в такой схеме нельзя управлять CEP.

В исследованиях, посвященных управлению и стабилизации CEP [7–14], было показано, что когда отношение частоты следования импульсов f к сдвигу частотной гребенки Δ равно целому числу k , каждый k -й импульс будет иметь одинаковую фазу между несущей и огибающей, так что существуют k различных последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с дискретностью CEP, равной $2\pi/k$. Таким образом, для получения таких последовательностей необходимо выполнение следующих условий:

$$\Phi k = 2\pi q \quad \text{и} \quad k/q = f/\Delta,$$

где Φk – разность фаз между огибающей и несущей для $(i + k)$ -го и i -го импульсов, k и q – целые числа.

Таким образом, если из фемтосекундного лазерного излучения выделить каждый k -й импульс при соблюдении вышеуказанных условий, то получим периодическую последовательность идентичных импульсов с частотой повторения $F = f/k$, $\Delta = 0$.

В первых экспериментах [8–10] по управлению CEP сама фаза несущей относительно огибающей не измерялась. Измерялось скольжение фазы в одном импульсе относительно фазы другого, выбранного в качестве опорного из той же последовательности. Измерения проводились либо с помощью автокор-

реляторов [8, 9], либо с помощью внешнего f - $2f$ -интерферометра [10]. Фаза несущей относительно огибающей была измерена с помощью f - $2f$ -интерферометра после калибровки независимым внешним экспериментом [10], когда результаты численного моделирования генерации гармоник высокого порядка в ионизирующей среде с помощью ультракоротких импульсов с различными СЕР сравнивались с экспериментальными результатами при одновременном измерении скачка фазы. В последнее время появились коммерчески доступные измерители СЕР, реализующие данный метод [12–14]. Была достигнута точность измерения СЕР, равная 360 мрад [12]. Последовательность идентичных импульсов выделялась с помощью селектора импульсов на основе акустооптического модулятора (АОМ), работавшего в поперечной конфигурации и изменявшего частоту проходящего через него излучения за счет эффекта Доплера. Такое изменение частоты напрямую влияет на частоту сдвига частотной гребенки (carrier-envelope offset, CEO). Для того чтобы обойти этот эффект, в схему управления АОМ вводилась дополнительная цепочка, смещающая гребенку на значение, кратное частоте повторения импульсов, сохраняя, таким образом, исходную частоту CEO.

Настоящая работа посвящена генерации последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов при управлении фазой несущей относительно огибающей с малой величиной дискретности. Получены временные и спектральные характеристики синтезированных последовательностей, а также фазовая характеристика селектора импульсов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема селекции излучения с управляемой СЕР, показанная на рис. 1, подробно описана в [11]. С ее помощью ранее была синтезирована последовательность идентичных фемтосекундных импульсов с частотой следования 50 МГц и дискретностью установки СЕР 72° [15]. По сравнению с [15] в схеме заменен генератор, управляемый напряжением, на новый, работающий в более широком диапазоне частот. Это позволило уменьшить дискретность установки СЕР путем увеличения целого числа q без уменьшения частоты сдвига гребенки фемтосекундного лазера. Уменьшать сдвиг до сколь угодно малых величин нельзя, так как невозможно стабилизировать CEO вблизи значений $\Delta = nf/2$, где n – любое целое число. На практике при $f = 250$ МГц проблемы со стабилизацией CEO возникают при уменьшении ее величины до 10 МГц и ниже. При $\Delta \approx 10$ МГц стабильность CEO ухудшается на порядок. Кроме того, интервал времени, в течение которого Δ и f остаются стабильными, значительно короче, чем при более высоких значениях CEO (десятки минут против десятков часов).

Эксперименты проводились на модифицированном фемтосекундном волоконном синтезаторе MenloSystems FC1500-250WG (обведен на рисунке пунктирной линией), в котором стабилизировались частота следования импульсов и сдвиг частотной гребенки, которые были равны 250 МГц и 48 МГц соответственно. Синтезатор частоты повторения синтезированной последовательности импульсов (F synthesizer), фазовращатель, формирователь импульсов и электрооптический модулятор были объединены в формирователе импульсов.

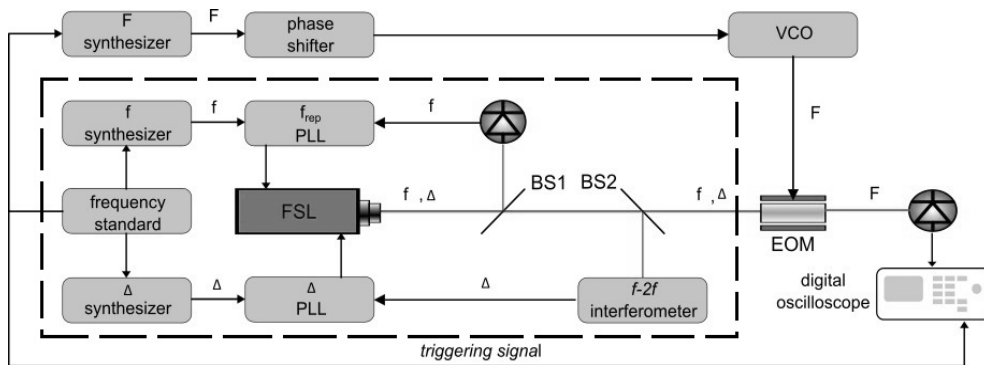


Рис. 1. Схема генерации излучения с управляемой CEP:

FSL – фемтосекундный лазер; PLL – фазовая автоподстройка частоты; VCO – генератор, управляемый напряжением; BS – светоделители; EOM – электрооптический модулятор Маха – Цендера

Fig. 1. Scheme for generating radiation with a controlled CEP:

FSL is a femtosecond laser, PLL is a phase locked loop, VCO is a voltage controlled oscillator, BS is beam splitters, EOM is a Mach – Zehnder electro-optical modulator

Сигнал на частоте F подавался на генератор, управляемый напряжением (ГУН), управляющий модулятором интенсивности, на выходе которого синтезировалась последовательность идентичных фемтосекундных импульсов с частотой следования F .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены примеры синтезированных последовательностей фемтосекундных импульсов, записанных при перестройке фазы селектора импульсов с шагом $0,1^\circ$. Эти записи использовались для получения фазовой характеристики селектора (зависимости пропускания от фазы). При ее построении фиксировалась амплитуда импульсом, соответствующим определенной временной отсечке (-62 нс на рис. 3). Фаза и шаг, показанные на рисунке, выбраны, чтобы показать, в каком диапазоне перестройки фазы селектора будет синтезирована одна и та же последовательность. Из этого рисунка также видно, что диапазон точной перестройки фазы, когда всё еще имеет место «чистая» последовательность импульсов, составляет $1,3$ градуса, что соответствует длительности управляющего импульса порядка 2 нс. Это перекрывает 45% от полного диапазона перестройки в $2,88$ градуса, когда происходит «перескок» к последовательности с CEP, отличающейся на $2\pi / 125$.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента пропускания селектора импульсов, состоящего из синтезатора опорной частоты повторения синтезированной последовательности импульсов, фазовращателя, генератора, управляемого напряжением, и модулятора интенсивности, от фазы, установленной фазовращателем. Зависимость нормирована на максимальное пропускание. Видно, что фазовая характеристика является практически П-образной, что определяет резкую границу выделения соседних последовательностей импульсов.

Как упоминалось выше, селектор импульсов позволяет получить на выходе модулятора «чистую» последовательность идентичных фемтосекундных импульсов (когда из исходной последовательности селектируется каждый

125-й импульс) в достаточно широком диапазоне перестройки фазы управляющего сигнала. Этот диапазон составляет $1,3^\circ$ (45 % от возможных $2,88^\circ$).

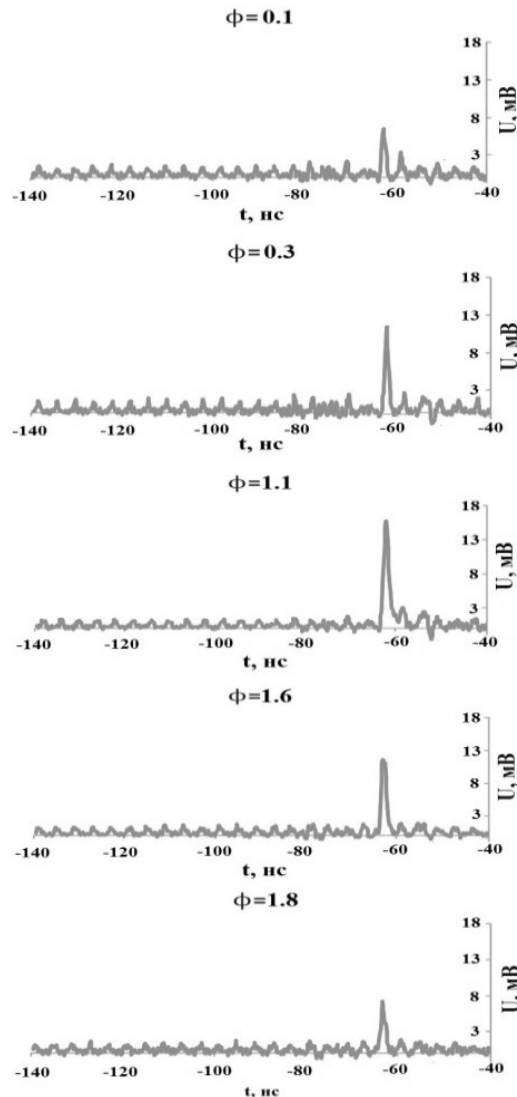


Рис. 2. Синтезированные последовательности импульсов

Fig. 2. Synthesized femtosecond pulse sequences

Отношение частот исходной и синтезированной последовательностей импульсов равно 125. Это дает возможность синтезировать 125 различных последовательностей с шагом перестройки фазы несущей относительно огибающей $2,88^\circ$. На рис. 4 приведены примеры таких последовательностей. Также наблюдаются «следы» импульсов исходной последовательности с интервалом между ними, равным 4 нс. Их наличие объясняется типом временной характеристики ГУН, управляющего модулятором, а также тем, что модулятор имеет конечное ослабление порядка 20 дБ.

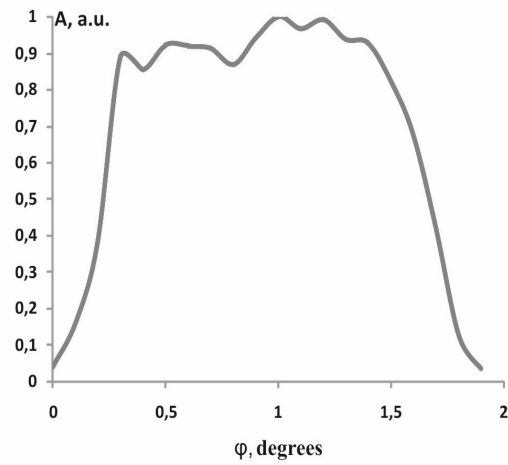


Рис. 3. Нормированная фазовая характеристика генератора импульсов

Fig. 3. Normalized phase response of the pulse generator

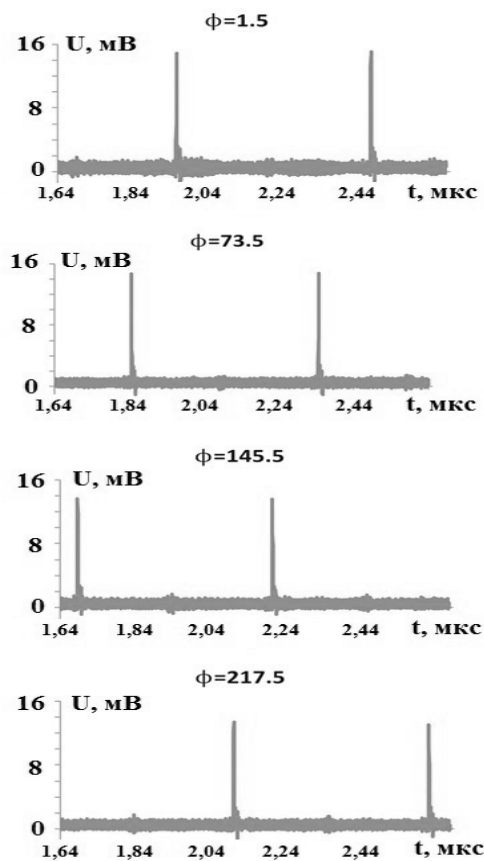


Рис. 4. Синтезированные последовательности идентичных импульсов

Fig. 4. Synthesized identical pulse sequences

На рис. 5 приведены спектры последовательностей при различных фазах селектора импульсов. Фаза 1.1° соответствует максимуму фазовой характеристики (рис. 3), когда синтезируется «чистая» последовательность, а фаза, равная 0.1° – минимуму фазовой характеристики, когда управляющий сигнал отсутствует, а модулятор выставлен на минимальное пропускание. Видно, что относительная разница между этими спектрами составляет всего 12.5 %. Это объясняется тем, что хотя амплитуда «промежуточных» импульсов (рис. 4), соответствующих закрытому модулятору, составляет всего 10 % от амплитуды основных импульсов, количество этих импульсов в 125 раз больше. Вследствие этого их суммарный спектр будет иметь достаточно большую интенсивность.

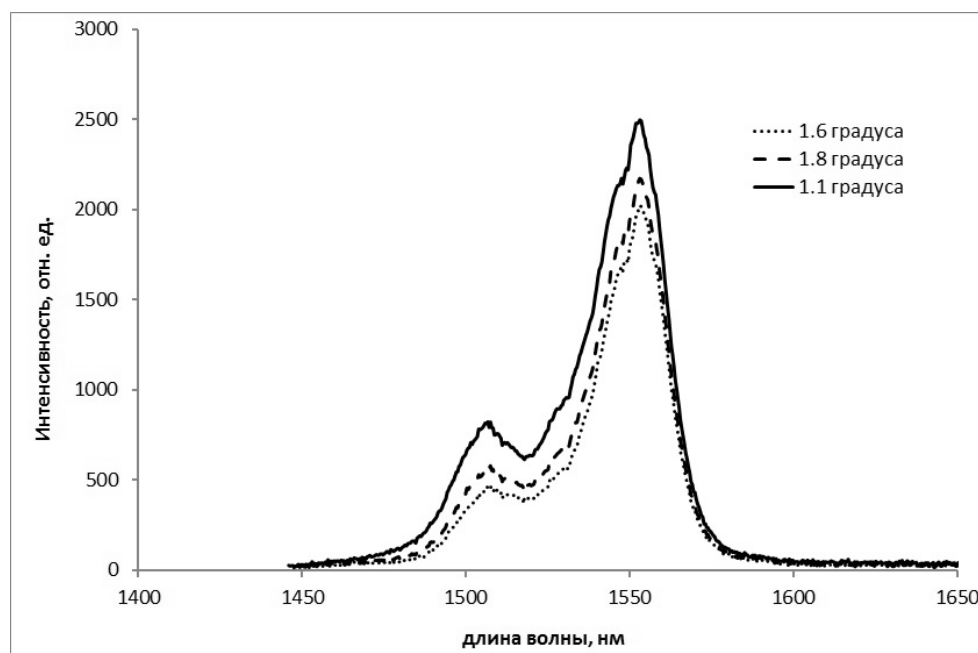


Рис. 5. Спектры синтезируемых последовательностей при различных фазах селектора импульсов

Fig. 5. Spectra of synthesized sequences at different phases of the pulse selector

В случае «идеального» модулятора, который бы полностью подавлял «промежуточные» импульсы, спектры выглядели бы, как на рис. 6, где показаны разностные спектры, когда из спектров синтезированных последовательностей вычитался спектр прошедшего через выключенный модулятор излучения. Также видно, что разностные спектры отличаются друг от друга. Так, при отстройке фазы селектора от максимума пропускания, максимумы спектров смещаются в длинноволновую область спектра (пунктирные линии на рис. 6). Кроме того, снижается амплитуда длинноволновых максимумов обеих полос, а также изменяется отношение экстремумов спектров (рис. 7). Такая деформация спектров объясняется тем, что при отстройке селектируемые импульсы попадают на границы фазовой характеристики, которые имеют резкий спад, и деформируются. Несимметричность графиков отношений на рис. 7 обусловлена несимметричностью фазовой характеристики селектора.

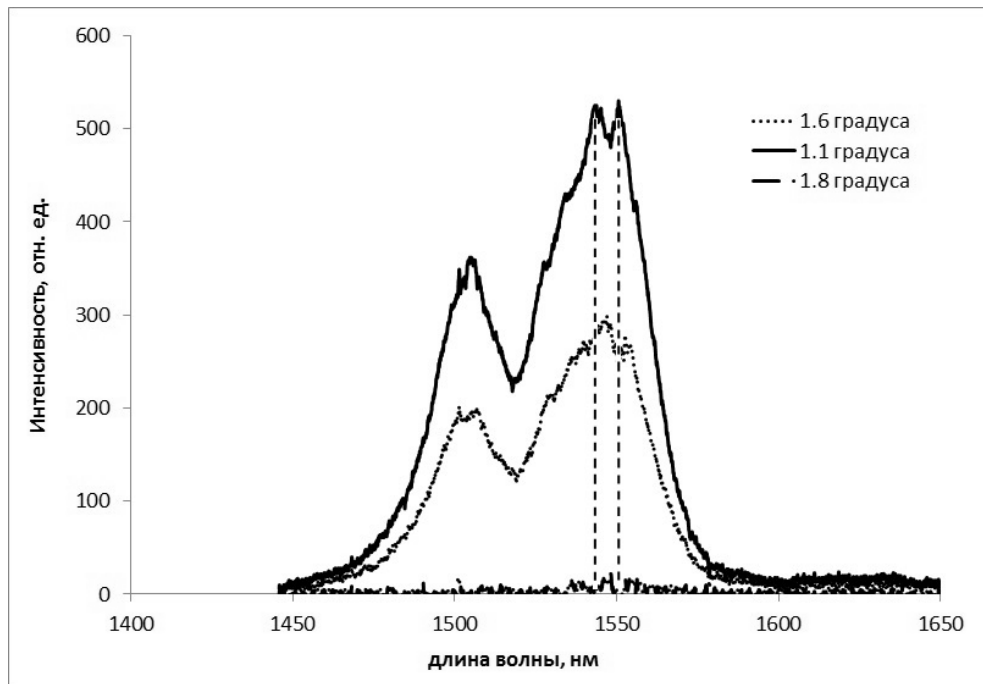


Рис. 6. Разностные спектры синтезированных последовательностей

Fig. 6. Difference spectra of synthesized sequences

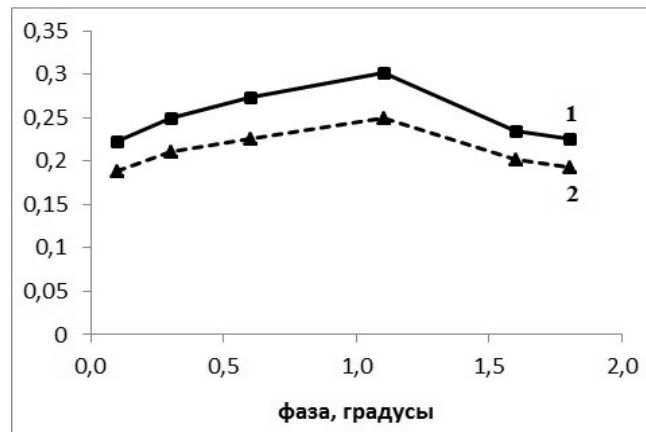


Рис. 7. Отношения экстремумов разностных спектров:

1 – отношение коротковолнового максимума (1500 нм) к длинноволновому (1550 нм), 2 – отношение промежуточного минимума (1520 нм) к длинноволновому максимуму

Fig. 7. Ratios of difference spectra extreme values:

1 is the short-wavelength maximum (1500 nm) to the long-wavelength maximum (1550 nm) ratio, 2 is the ratio of intermediate minimum (1520 nm) to the long-wavelength maximum

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована возможность получения последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с управляемой фазой несущей относительно огибающей. Перестройка фазы селектора импульсов обеспечивает возможность получения 125 таких последовательностей с дискретностью перестройки фазы $2\pi / 125$.

Были измерены спектры последовательностей при различных фазах селектора импульсов, а также спектр излучения задающего лазера при минимальном пропускании модулятора в отсутствие модуляции. Показано, что при отстройке фазы селектора от максимума пропускания спектры последовательностей деформируются. Это обусловлено деформацией импульсов, попадающих на границы фазовой характеристики, которые имеют резкий спад.

Характеристики разработанного селектора импульсов позволили снизить требования к точности установки фазы селектора относительно фазы исходной импульсной последовательности. Селектор импульсов позволяет получить на выходе модулятора «чистую» последовательность фемтосекундных импульсов в достаточно широком диапазоне перестройки фазы управляющего сигнала (45 % от всего возможного диапазона перестройки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Phase-dependent harmonic emission with ultrashort laser pulses / A.D. Bohan, P. Antoine, D.B. Milosevic, B. Piraux // *Physical Review Letters*. – 1998. – Vol. 81, iss. 9. – P. 1837–1840. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.1837.
2. Routes to control of intense-field atomic polarizability / M. Ivanov, P.B. Corcum, T. Zuo, A. Bandrauk // *Physical Review Letters*. – 1995. – Vol. 74, iss. 15. – P. 2933–2936. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.2933.
3. Christov I.P., Murnane M.M., Kapteyn H.C. High-harmonic generation of attosecond pulses in the “Single-Cycle” regime // *Physical Review Letters*. – 1997. – Vol. 78, iss. 7. – P. 1251–1254. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.1251.
4. Ким А.В., Рябикин М.Ю., Сергеев А.М. От фемтосекундных к аттосекундным импульсам // *Успехи физических наук*. – 1999. – Т. 169, № 1. – С. 58–66. – DOI: 10.3367/UFNr.0169.199901h.0058.
5. Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 81, iss. 10. – P. 1837–1840. – DOI: 10.1364/OL.29.001153.
6. Absolute optical frequency measurement of the Cesium D1 line with a mode-locked laser / Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, T.W. Hänsch // *Physical Review Letters*. – 2000. – Vol. 82, iss. 18. – P. 3568–3571. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.3568.
7. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis / D.J. Jones, S.A. Diddams, J.K. Ranka, A. Stentz, R.S. Windeler, J.L. Hall, S.T. Cundiff // *Science*. – 2000. – Vol. 288, iss. 5466. – P. 635–639. – DOI: 10.1126/science.288.5466.635.
8. Route to phase control of ultrashort light pulses / L. Xu, Ch. Spielmann, A. Poppe, T. Brabec, F. Krausz, T.W. Hänsch // *Optics Letters*. – 1996. – Vol. 21, iss. 24. – P. 2008–2010. – DOI: 10.1364/OL.21.002008.
9. Controlling the phase evolution of few-cycle light pulses / A. Apolonski, A. Poppe, G. Tempea, Ch. Spielmann, Th. Udem, R. Holzwarth, T.W. Hänsch, F. Krausz // *Physical Review Letters*. – 2000. – Vol. 85, iss. 4. – P. 740–743. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.740.
10. Phase-controlled amplification of few-cycle laser pulse / A. Baltuška, M. Uiberacker, E. Goulielmakis, R. Kienberger, V.S. Yakovlev, Th. Udem, Th.W. Hänsch, F. Krausz // *IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2003. – Vol. 9, iss. 4. – P. 972–989. – DOI: 10.1109/JSTQE.2003.819107.

11. Периодическая последовательность фемтосекундных импульсов с селективируемой разностью фаз между огибающей и несущей / Н.Н. Головин, Н.И. Дмитриева, Е.А. Горохов, А.К. Дмитриев // Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т. 127, № 9. – С. 449–452. – DOI: 10.21883/OS.2019.09.48200.74-19.
12. CEP-stable few-cycle pulses with more than 190 μJ of energy at 100 kHz from a noncollinear optical parametric amplifier / F.J. Furch, T. Witting, A. Giree, C. Luan, F. Schell, G. Arisholm, C.P. Schulz, M.J.J. Vrakking // Optics Letters. – 2017. – Vol. 42, iss. 13. – P. 2495–2498. – DOI: 10.1364/OL.42.002495.
13. CEP-stable high-energy ytterbium-doped fiber amplifier / M. Natile, A. Golinelli, L. Lavenu, F. Guichard, M. Hanna, Y. Zaouter, R. Chiche, X. Chen, J.F. Hergott, W. Boutu, H. Merdji, P. Georges // Optics Letters. – 2019. – Vol. 44, iss. 16. – P. 3909–3912. – DOI: 10.1364/OL.44.003909.
14. High-power ytterbium-doped fiber laser delivering few-cycle, carrier-envelope phase-stable 100 μJ pulses at 100 kHz / E. Shestakov, D. Hoff, A.M. Saylor, A. Klenke, S. Hädrich, F. Just, T. Eidam, P. Jójárt, Z. Várallyay, K. Osvay, G.G. Paulus, A. Tünnermann, J. Limpert // Optics Letters. – 2020. – Vol. 45, iss. 1. – P. 97–100. – DOI: 10.1364/OL.45.000097.
15. Generation of identical femtosecond pulses with adjustable carrier-envelope phase / N. Golovin, N. Dmitrieva, E. Gorohov, A. Dmitriev // 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). – Munich, Germany, 2019. – DOI: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8873319.

Головин Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры лазерных систем, младший научный сотрудник лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, спектроскопия, фемтосекундные лазеры. Имеет более 35 печатных работ. E-mail: n.golovin@corp.nstu.ru

Дмитриев Александр Капитонович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерных систем, главный научный сотрудник лаборатории квантовой криогенной электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – лазерная физика, спектроскопия, фемтосекундные лазеры. Имеет более 150 печатных работ. E-mail: krupenev@isem.irk.ru

Golovin Nikolai N., senior lecturer at the Department of Laser Systems, junior researcher in the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on laser physics, spectroscopy, and femtosecond lasers. He has more than 35 publications. E-mail: n.golovin@corp.nstu.ru

Dmitriev Alexander K., Doctor of Physical and mathematical sciences, professor at the Department of Laser Systems, chief researcher in the Laboratory of Quantum Cryogenic Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on laser physics, spectroscopy, and femtosecond lasers. He has more than 150 publications. E-mail: alexander_dmitriev@ngs.ru

Pulse selector for obtaining femtosecond radiation with a controlled carrier-envelope phase*N.N. GOLOVIN^a, A.K. DMITRIEV^b

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 664033, Russian Federation

^an.golovin@corp.nstu.ru ^balexander_dmitriev@ngs.ru**Abstract**

In non-linear optical processes, such as obtaining attosecond pulses, it is extremely important to control the carrier envelope phase. To do this, various periodic trains of identical femtosecond pulses with a controlled phase can be created. In addition, since there is no frequency comb offset in such sequences, the process of measuring optical frequencies is greatly simplified.

The pulse selector has been developed to obtain a sequence of identical femtosecond pulses with a controlled carrier – envelope phase. The selector makes it possible to obtain a “pure” sequence of identical femtosecond pulses at the modulator output (when every 125th pulse is selected from the original sequence with a repetition rate of 250 MHz) in a fairly wide range of control signal phase tuning. This range is 1.3 degrees. The phase tuning of the pulse selector provides the possibility of obtaining one hundred twenty-five such sequences with a phase tuning discreteness of $2\pi/125$. The simplest way to reduce discreteness is to increase the ratio of the pulse repetition rate of a femtosecond laser to the shift of its frequency comb. The phase characteristic of the pulse selector was obtained by registering the time dependence of the synthesized sequence with a selector phase tuning step of 0.1 degrees.

We measured the spectra of the sequences at different phases of the pulse selector, as well as the emission spectrum of the master laser at the minimum transmission of the modulator in the absence of modulation. The spectrum with the maximum amplitude corresponded to the case when identical pulses with the highest amplitude were selected from the original sequence. The difference between these spectra made it possible to isolate the spectrum of a pure sequence of identical femtosecond pulses without taking into account the “background” that occurs due to the modulator has a finite attenuation of –20 dB.

Keywords: carrier-envelope phase, femtosecond comb, carrier-envelope offset, pulse selector, electro-optical modulator, femtosecond pulses, optical spectrum, femtosecond laser

REFERENCES

1. Bohan A.D., Antoine P., Milosevic D.B., Piraux B., Phase-dependent harmonic emission with ultrashort laser pulses. *Physical Review Letters*, 1998, vol. 81, iss. 9, pp. 1837–1840. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.1837.
2. Ivanov M., Corcum P.B., Zuo T., Bandrauk A. Routes to control of intense-field atomic polarizability. *Physical Review Letters*, 1995, vol. 74, iss. 15, pp. 2933–2936. DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.2933.
3. Christov I.P., Murnane M.M., Kapteyn H.C. High-harmonic generation of attosecond pulses in the “Single-Cycle” regime. *Physical Review Letters*, 1997, vol. 78, iss. 7, pp. 1251–1254. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.1251.
4. Kim A.V., Ryabikin M.Yu., Sergeev A.M. From femtosecond to attosecond pulses. *Physics-Usppekhi*, 1999, vol. 42, pp. 54–61. DOI: 10.1070/PU1999v042n01ABEH000448. Translated from *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1999, vol. 169, no. 1, pp. 58–66. DOI: 10.3367/UFNr.0169.199901h.0058.

* Received 11 November 2021.

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FSUN-2020-0007).

5. Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe. *Optics Letters*, 2004, vol. 81, iss. 10, pp. 1837–1840. DOI: 10.1364/OL.29.001153.
6. Udem Th., Reichert J., Holzwarth R., Hänsch T.W. Absolute optical frequency measurement of the Cesium D1 line with a mode-locked laser. *Physical Review Letters*, 2000, vol. 82, iss. 18, pp. 3568–3571. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.3568.
7. Jones D.J., Diddams S.A., Ranka J.K., Stentz A., Windeler R.S., Hall J.L., Cundiff S.T. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis. *Science*, 2000, vol. 288, iss. 5466, pp. 635–639. DOI: 10.1126/science.288.5466.635.
8. Xu L., Spielmann Ch., Poppe A., Brabec T., Krausz F., Hänsch T.W. Route to phase control of ultrashort light pulses. *Optics Letters*, 1996, vol. 21, iss. 24, pp. 2008–2010. DOI: 10.1364/OL.21.002008.
9. Apolonski A., Poppe A., Tempea G., Spielmann Ch., Udem Th., Holzwarth R., Hänsch T.W., Krausz F. Controlling the phase evolution of few-cycle light pulses. *Physical Review Letters*, 2000, vol. 85, iss. 4, pp. 740–743. DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.740.
10. Baltuška A., Uiberacker M., Goulielmakis E., Kienberger R., Yakovlev V.S., Udem Th., Hänsch Th.W., Krausz F. Phase-controlled amplification of few-cycle laser pulse. *IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, vol. 9, iss. 4, pp. 972–989. DOI: 10.1109/JSTQE.2003.819107.
11. Golovin N.N., Dmitrieva N.I., Gorokhov E.A., Dmitriev A.K. A femtosecond pulse train with a selectable carrier-envelope offset phase. *Optics and Spectroscopy*, 2019, vol. 127, pp. 483–486. DOI: 10.1134/S0030400X19090121. Translated from *Optika i spektroskopiya*, 2019, vol. 127, no. 9, pp. 449–452. DOI: 10.21883/OS.2019.09.48200.74-19.
12. Furch F.J., Witting T., Giree A., Luan C., Schell F., Arisholm G., Schulz C.P., Vrakking M.J.J. CEP-stable few-cycle pulses with more than 190 μJ of energy at 100 kHz from a noncollinear optical parametric amplifier. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, iss. 13, pp. 2495–2498. DOI: 10.1364/OL.42.002495.
13. Natile M., Golinelli A., Lavenu L., Guichard F., Hanna M., Zaouter Y., Chiche R., Chen X., Hergott J.F., Boutu W., Merdji H., Georges P. CEP-stable high-energy ytterbium-doped fiber amplifier. *Optics Letters*, 2019, vol. 44, iss. 16, pp. 3909–3912. DOI: 10.1364/OL.44.003909.
14. Shestaev E., Hoff D., Sayler A.M., Klenke A., Hadrich S., Just F., Eidam T., Jojart P., Varallyay Z., Osvay K., Paulus G.G., Tunnermann A., Limpert J. High-power ytterbium-doped fiber laser delivering few-cycle, carrier-envelope phase-stable 100 μJ pulses at 100 kHz. *Optics Letters*, 2020, vol. 45, iss. 1, pp. 97–100. DOI: 10.1364/OL.45.000097.
15. Golovin N.N., Dmitrieva N.I., Gorokhov E.A., Dmitriev A.K. Generation of identical femtosecond pulses with adjustable carrier-envelope phase. *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, Munich, Germany, 2019. DOI: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8873319.

Для цитирования:

Головин Н.Н., Дмитриев А.К. Селектор импульсов для получения фемтосекундного излучения с управляемой фазой несущей относительно огибающей // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 2 (86). – С. 121–132. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-2-121-132.

For citation:

Golovin N.N., Dmitriev A.K. Selektor impul'sov dlya polucheniya femtosekundnogo izlucheniya s upravlyаемой fazoi nesushchei otnositel'no ogibayushchei [Pulse selector for obtaining femtosecond radiation with a controlled carrier-envelope phase]. *Sistemy analiza i obrabotki dannyykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 2 (86), pp. 121–132. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-2-121-132.