Письма в ЖЭТФ, том 91, вып. 5, с. 240 – 243

Стабилизация частоты излучения первичного источника субтерагерцового диапазона частотной гребенкой фемтосекундного лазера

М. Ю. Третьяков[1], А. П. Шкаев, А. М. Киселев, С. Б. Бодров, А. В. Андрианов, Д. С. Макаров

Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 11 января 2010 г.

Осуществлена фазовая стабилизация частоты излучения первичного источника субтерагерцового диапазона по эквидистантным компонентам широкополосного спектра, получаемым с помощью фемтосекундного лазера. Оптико-терагерцовое преобразование последовательности лазерных импульсов и ее смешение с субтерагерцовым излучением осуществлено на диоде Шоттки. Работа открывает возможность создания принципиально нового поколения синтезаторов частоты с требуемой мощностью, уровень фазовых шумов в которых в тысячи раз ниже, чем в традиционных аналогах.

Лазерные частотные гребенки, генерируемые фемтосекундными (ФС) лазерами, открыли новые горизонты точности стандартов частоты и времени. Путем нелинейной генерации суммарной и разностной частот лазерные гребенки позволяют измерить точнейшим образом любую частоту от радио- до ближнего ультрафиолетового диапазона [1]. В работах [2, 3] показано, что применение быстродействующих систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) позволяет получить собственную ширину каждой составляющей оптической гребенки на два порядка уже предела, задаваемого квантовыми шумами лазера. Абсолютная ширина спектра составляющей и стабильность ее частоты задаются соответствующими параметрами эталонного источника излучения, к которому вся гребенка привязана посредством системы ФАПЧ. В качестве такого источника может служить, например, оптический стандарт частоты [4], имеющий ширину спектра излучения ~ 0.6 Гц при усреднении за 32 с и стабильность частоты $\sim 3 \cdot 10^{-16}$ отн. ед. за 1 с.

Следует отметить, что лазерные гребенки уже применялись как для прецизионных измерений, так и для генерации непрерывного когерентного излучения в субтерагерцовом/субмиллиметровом диапазоне. В работах [5, 6] было показано, что оптическая гребенка, имеющая ширину в несколько терагерц, может быть перенесена в субмиллиметровый диапазон волн с помощью детектирования на GaAs излучения ФС лазера, и что компоненты гребенки могут быть использованы для спектроскопии высокого разрешения. В работе [7] сообщается о создании терагерцового анализатора спектра, в котором в качестве гетеродина используются компоненты частотной гребенки, генерируемой в фотопроводящей антенне излучением волоконного ФС лазера; демонстрируется возможность анализа сигналов с герцовой шириной спектра и точность измерения частоты этих сигналов определяется точностью используемого стандарта частоты и времени. В работе [8] представлен широкодиапазонный источник высококогерентного непрерывного перестраиваемого излучения субтерагерцового (0.1–1 ТГц) диапазона на основе оптической лазерной гребенки, необходимые компоненты которой отфильтровываются с помощью матричных волноводных решеток, а их разностная субтерагерцовая частота переизлучается фотопроводящей антенной; демонстрируется высокая спектральная чистота и низкий уровень фазовых шумов генерируемых сигналов. В работе [9] для синтеза частоты терагерцового излучения используется получаемая на фотопроводящей антенне разностная частота двух непрерывных диодных лазеров, частота излучения каждого из которых стабилизирована по соответствующим компонентам ФС лазерной гребенки. Из-за низкой эффективности конверсии видимого излучения в субтерагерцовое мощность генерируемого излучения в обеих установках [8, 9] составляет около микроватта в низкочастотной части диапазона и сотни нановатт вблизи терагерца. Столь низкая мощность во многих практических случаях (высокочувствительная прецизионная спектроскопия, радиолокация, активное дистанционное зондирование и др.) приведет к невозможности использования так приведет к невозможности использования такого источника.

Компоненты лазерной гребенки могут использоваться в качестве опорных сигналов для стабилизации частоты непрерывных источников излучения.

[1] e-mail: trt@appl.sci-nnov.ru

При этом высочайшая спектральная чистота и стабильность гребенки переносится на излучение непрерывного источника. В этой работе мы сообщаем о применении гребенки частот, создаваемой ФС лазером, для ФАПЧ первичного источника непрерывного излучения субтерагерцового диапазона, с достаточной для решаемой задачи мощностью. Для этого требуется перенос оптической гребенки в терагерцовый диапазон и использование одной из компонент полученной терагерцовой гребенки для стабилизации источника этого диапазона с помощью системы ФАПЧ.

Блок-схема установки, позволившая нам реализовать эту идею, представлена на рис.1. В качестве

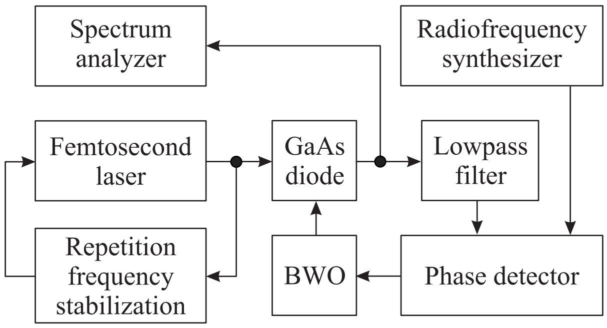

Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки.

непрерывного источника субмиллиметрового диапазона использовалась серийная лампа обратной волны (ЛОВ) типа ОВ-71 (НПП "Исток", Фрязино, Моск. обл.) с типичной мощностью около 10 мВт и частотой излучения 78–118 ГГц. Гребенка оптических частот создавалась излучением Ti:Sapphire фемтосекундного лазера (длительность импульса ~ 50 фс, средняя мощность ~ 100 мВт) со стабилизированной частотой повторения импульсов. Частота повторения (91577000.000 Гц) стабилизировалась с помощью системы ФАПЧ по сигналу микроволнового синтезатора E8257D (Agilent Technologies), синхронизованного с рубидиевым стандартом частоты и времени. Перенос лазерной гребенки в ММ/СубММ диапазон (оптико-терагерцовая конверсия) осуществлен на серийном планарном СВЧ диоде Шоттки типа А91147 (НПП "Салют", Н. Новгород), с гарантируемой производителем граничной частотой 2–5 ТГц. Излучение лазера фокусировалось на полупроводник (GaAs) в контактной области диода, приводя к возникновению субпикосекундных импульсов концентрации фотоиндуцированных носителей. Импульсы концентрации и соответственно проводимости образовывали гребенку опорных терагерцовых частот, при этом стабильность межмодового интервала оптической гребенки обеспечивала стабильность терагерцовой гребенки [6]. Диод был установлен на открытом срезе волновода широкодиапазонного субмиллиметрового смесителя – умножителя (см. обзор [10] и ссылки там). На этот же диод с обратной стороны через волновод подавалось излучение ЛОВ, при этом выводы диода работали как приемная антенна. Поскольку протекающий через диод ток пропорционален произведению проводимости и напряженности поля излучения ЛОВ, в диоде возникали биения между сигналом ЛОВ и соответствующей компонентой спектра терагерцовой гребенки [11]. Сигнал биений имел достаточную амплитуду для ФАПЧ излучения ЛОВ с помощью синхронизатора, созданного нами ранее [12] и несколько модифицированного для данного эксперимента. В частности, частота рабочих биений (промежуточная частота системы ФАПЧ) была понижена до 30 МГц, и на этой же частоте работал фазовый детектор синхронизатора. Кроме того, на входе синхронизатора был установлен фильтр низких частот (ФНЧ) с частотой отсечки 80 МГц, блокирующий попадание компонент терагерцовой гребенки на фазовый детектор. Полоса пропускания входного усилителя сигнала биений составляла около 10 МГц, что обеспечило достаточную развязку с зеркальными биениями, а также с биениями с другими компонентами терагерцовой гребенки. В качестве источника высокостабильного опорного сигнала для фазового детектора использовался радиочастотный синтезатор Ч6-66 (НПО "Кварц", Н. Новгород), синхронизованный по сигналу стандарта частоты и времени.

На рис.2 представлены записи спектра взаимных биений ЛОВ, излучающей на частоте около 100 ГГц и 1092-й компоненты терагерцовой гребенки: верхняя – с выключенной, нижняя – с работающей стабилизацией. Спектр излучения свободной ЛОВ определяется в основном качеством питающих ее напряжений и в нашем случае имеет ширину около 200 кГц (верхняя запись). При работающей системе ФАПЧ видна очень узкая центральная составляющая (ширина наблюдаемого пика в точности соответствовала минимальной 10-герцовой ширине полосы имевшегося анализатора спектра), превышающая уровень шумов более чем на 35 дБ, и характерное подчеркивание шумов на границе полосы управления (нижняя запись).

Сканирование частоты излучения ЛОВ в пределах полосы входного усилителя биений осуществлялось пошаговым изменением частоты синтезатора Ч6-66. При необходимости диапазон сканирования может быть расширен на весь рабочий диапазон ЛОВ традиционными для систем ФАПЧ методами [13]. Воз-

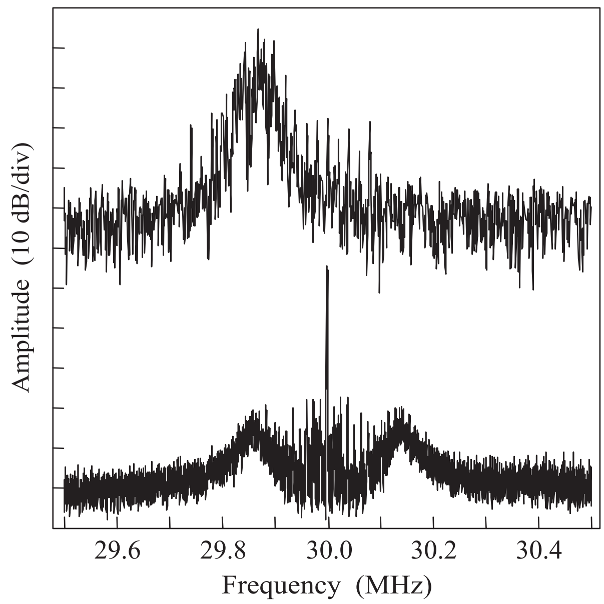

Рис.2. Спектры сигнала промежуточной частоты в кольце ФАПЧ, соответствующие спектрам взаимных биений ЛОВ, излучающей на частоте около 100 ГГц, и 1092-й компоненты терагерцовой гребенки: верхний – с выключенной, нижний – с работающей стабилизацией

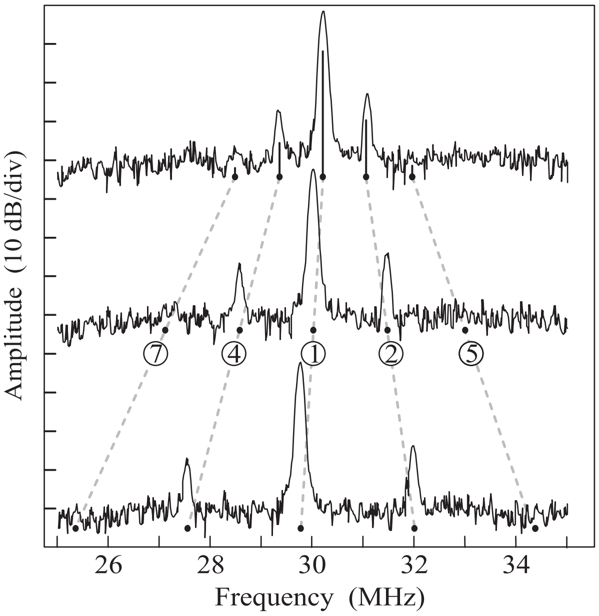

Рис.3. Спектры биений между гармониками излучения ЛОВ и компонентами терагерцовой гребенки, записанные (сверху вниз) при монотонном понижении частоты излучения ЛОВ. Расчетные положения пиков различных гармоник показаны вертикальными линиями и точками, а их смещение – пунктирными линиями. Номера гармоник указаны под вторым спектром

можна реализация сканирования с непрерывной фазой излучения при переключениях [14].

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность фазовой стабилизации частоты непрерывного излучения субтерагерцового диапазона по гребенке частот, создаваемой ФС лазером. Представляет интерес проанализировать возможности и перспективы такого метода стабилизации, а также сравнить его с традиционным подходом.

Прежде всего проследим, до каких частот в нашей установке видны компоненты гребенки опорных частот. Это можно сделать, например, с помощью гармоник частоты излучения ЛОВ, образующихся в диоде смесителя – умножителя. При выбранном в нашем эксперименте отношении частоты повторения (шага терагерцовой гребенки) к промежуточной частоте ФАПЧ ЛОВ, примерно равном 3, всегда можно найти такую частоту излучения $F_{\text{лов}}$, что частота ее биений с N-й компонентой гребенки будет примерно равна частоте биений между гармониками излучения ЛОВ ($2F_{\text{лов}}$, $4F_{\text{лов}}$, $5F_{\text{лов}}$, $7F_{\text{лов}}$ ...) и соответствующими компонентами гребенки ($2N+1$, $4N+1$, $5N+2$, $7N+2$ ...). На рис.3 представлены характерные спектры таких биений, записанные при выключенной стабилизации. Центральный пик соответствует биениям фундаментальной частоты излучения ЛОВ с 1092-й компонентой гребенки, правый и левый пики являются соответственно результатом биений второй и четвертой гармоник частоты ЛОВ с 2185-й и 4369-й компонентами гребенки. Биения, соответствующие 5-й и 7-й гармоникам ЛОВ, по амплитуде сравнимы с уровнем шумов и видны не так явно, как остальные, поскольку мощность гармоник с ростом N быстро уменьшается и чувствительности приемной схемы становится недостаточно. Относительные амплитуды пиков и, главное, их относительные положения на оси частот исключают ошибочную идентификацию. При изменении частоты ЛОВ все пики смещаются в точном соответствии с расчетом. Эксперимент демонстрирует, что в смесительном диоде присутствуют компоненты гребенки, как минимум, до 400 ГГц. Аналогичные спектры биений наблюдались при перестройке частоты излучения ЛОВ во всем рабочем диапазоне от 78 до 118 ГГц.

Проанализируем теперь вопрос спектральной чистоты излучения ЛОВ, стабилизированного таким образом. Известно, что спектр излучения источника в режиме ФАПЧ при оптимальном выборе параметров системы стабилизации практически полностью соответствует спектру опорного сигнала. Для ЛОВ это подтверждается, например, в [15]. Однако при традиционном способе синтеза частоты излучения субтерагерцового диапазона [12, 15, 16] опорным сигналом является гармоника сигнала микроволнового синтезатора. При умножении частоты сигнала на N во столько же раз увеличивается и амплитуда его нестабильностей, а их мощность возрастет в N^2 раз. То есть фазовые шумы умноженного сигнала возрастают на $20\mathrm{Log}(N)$. Это обстоятельство приводит к тому, что даже очень высокостабильные сигналы субтерагерцового [12, 15, 16] и терагерцового [17] диапазонов, полученные традиционным способом, при котором коэффициент умножения составляет десятки раз (до 43 в [16] и до 72 в [17]), могут иметь лишь ограниченные применения. В предлагаемом нами методе синтеза опорными сигналами являются компоненты гребенки, создаваемой излучением ФС лазера. При формировании высокостабильной гребенки в нашем методе, как и в [2, 3, 5–9], требуется микроволновый или радиочастотный синтезатор, но его частота не умножается и, следовательно, спектральная чистота каждой из компонент гребенки будет примерно (с точностью до несовершенства используемой ФАПЧ) такая же, как у сигнала синтезатора [8]. Необходимый для работы фазового детектора в кольце ФАПЧ ЛОВ высокостабильный радиочастотный сигнал также не умножается и имеет достаточную спектральную чистоту. То есть мощность фазовых шумов источника терагерцового излучения, стабилизированного предлагаемым методом, будет в тысячи раз меньше, чем при традиционном подходе.

Выше упоминалось, что мощность субтерагерцовых синтезаторов на основе ФС лазерных гребенок не превышает микроватт [8, 9]. При традиционном методе синтеза частоты с использованием первичных источников излучения получаемая мощность может быть от десятков тысяч (диоды Ганна, ЛОВ, клистроны и др.) до сотен миллионов (гиротроны) раз больше. Предложенный нами метод позволяет объединить главные достоинства обоих подходов, а именно высочайшую спектральную чистоту, присущую компонентам лазерных гребенок с высокой выходной мощностью традиционных субтерагерцовых синтезаторов с первичными источниками излучения.

Таким образом, представленная работа открывает возможность создания нового поколения синтезаторов частоты с низким уровнем фазовых шумов и с требуемой для решаемой задачи мощностью.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований.

---

1. Р. Дж. Глаубер, Д. Л. Холл, Т. В. Хэнш, УФН **176**, 1341 (2006).
2. T. R. Schibli, I. Hartl, D. C. Yost et al., Nature Photonics **2**, 355 (2008).
3. M. J. Martin, S. M. Foreman, T. R. Schibli, and J. Ye, Opt. Express **17**, 558 (2009).
4. B. C. Young, F. C. Cruz, W. M. Itano, and J. C. Bergquist, Phys. Rev. Lett. **82**, 3799 (1999).
5. T. M. Goyette, W. Guo, F. C. De Lucia et al., Appl. Phys. Lett. **67**, 3810 (1995).
6. T. Yasui, Y. Kabetani, E. Saneyoshi et al., Appl. Phys. Lett. **88**, 241104 (2006).
7. T. Yasui, R. Nakamura, K. Kawamoto et al., Opt. Express **17**, 17034 (2009).
8. H.-J. Song, N. Shimizu, T. Furuta et al., J. Lightwave Technol. **26**, 2521 (2008).
9. G. Mouret, F. Hindle, A. Cuisset et al., Opt. Express, **17**, 22031 (2009).
10. A. F. Krupnov, Spectrochim. Acta A **52**, 967 (1996).
11. S. Yokoyama, R. Nakamura, M. Nose et al., Opt. Express **16**, 13052 (2008).
12. A. F. Krupnov, Int. J. of IR and MM Waves **22**, 1 (2001).
13. T. R. Schibli, K. Minoshima, F.-L. Hong et al., Opt. Lett. **30**, 2323 (2005).
14. M. Yu. Tretyakov, V. V. Parshin, M. A. Koshelev et al., J. Mol. Spectrosc. **238**, 91 (2006).
15. M.Schäfer, M. Andrist, H. Schmutz et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **39**, 831 (2006).
16. В. Л. Вакс, Ю. И. Кошуринов, Д. Г. Павельев, А. Н. Панин, Изв. ВУЗов Радиофизика **48**, 933 (2005).
17. S. Schiller, B. Roth, F. Lewen et al., Appl. Phys. B **95**, 55 (2009).