

УДК 621.378.325

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ПО ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ГРЕБЕНКЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК

А. В. Акимов, А. Н. Матвеев, А. В. Соколов,
С. И. Канорский, Н. Н. Колачевский, В. Н. Сорокин

Представлены первые экспериментальные результаты исследования диодного лазера с внешним резонатором, привязанного по фазе к одной из продольных мод фемтосекундного лазера. Перестройка частоты источника в пределах межмодового расстояния осуществлялась с помощью двухпроходного акустооптического модулятора. Сделаны выводы о спектральных характеристиках источника, обсуждается возможность его использования для различных задач прецизионной спектроскопии.

Ключевые слова: диодный лазер, фемтосекундный лазер, фазовая привязка, когерентность.

Значительный прогресс, достигнутый в последние годы в области измерения абсолютных частот оптического диапазона, открывает новые перспективы высокоточной и фазово-когерентной спектроскопии нелинейных оптических резонансов. Использование уникальных свойств гребенки фемтосекундного лазера [1] для измерения ряда абсолютных частот оптических переходов (Ca [2, 3], Yt^+ [4], H [5] и др.), наглядно продемонстрировало эффективность новой методики фазово-когерентного преобразования сигналов из радиочастотного диапазона частот в оптический.

В различных задачах прецизионной спектроскопии часто значительную роль играют степень монохроматичности лазерного пучка и его фазовые характеристики. Так, нелинейные резонансы когерентного пленения населенности (КПН) высокочувствительны к относительной фазе световых полей [6 – 8]. Высокие требования к монохроматичности возникают, в частности, при исследовании однородного контура линии запрещенных

переходов (в частности, лазерных переходов) методами субдоплеровской спектроскопии.

В данной работе исследуется возможность использования спектральных свойств фемтосекундной гребенки частот для создания перестраиваемого источника излучения с высокими когерентными свойствами. Использование такого источника открывает возможность регистрации высокодобротных резонансов КПН со значительным расщеплением нижних уровней [6, 9]. Процессы синхронизации продольных мод в резонаторе фемтосекундного лазера приводят к установлению жестких фазовых соотношений между этими модами. Используя методы фазовой привязки, можно привязать лазерные источники к различным модам фемтосекундного лазера, тем самым зафиксировав разностную фазу и частоту этих лазеров и установив жесткие фазовые соотношения между ними. Методы расширения спектра лазера в оптическом волокне позволяют перекрыть фазово-когерентными модами лазера весь диапазон оптических частот [1].

Идея использования спектральных характеристик излучения импульсно-периодических лазеров возникла более 20-ти лет назад, когда было предложено использовать пикосекундный лазер на красителе для возбуждения двухфотонных переходов в газовых ячейках [10] и измерения частотных интервалов в Na [11].

Предположим, что импульсный лазер излучает поле, меняющееся во времени как:

$$E(t) = A e^{-i\omega_0 t} \sum_{m=0}^N e^{-(t-mT)^2/4\tau^2},$$

где ω_0 – несущая частота, T – временной интервал между импульсами, τ – их длительность, а N – число импульсов. Огибающая одиночного импульса выбрана гауссовой лишь для простоты Фурье-преобразования.

Фурье-образ $E(t)$ легко вычисляется и записывается в виде:

$$S(\omega') = A' e^{-(\omega-\omega_0)^2 \tau^2} \frac{1 - e^{iN(\omega-\omega_0)T}}{1 - e^{i(\omega-\omega_0)T}}.$$

Спектр сигнала представляет собой набор узких линий, мод, шириной $2\pi/NT$, разделенных интервалами $2\pi/T$. Линии находятся под плавной гауссовой огибающей шириной $1/2\tau$, определяющей длительностью импульса (рис. 1).

При уменьшении длительности τ спектр перекрывает все больший частотный интервал, вплоть до нескольких десятков терагерц для лазеров с длительностью импульса порядка 100 фс. Межмодовое расстояние задается частотой повторения $f_{rep} = 1/T$ или

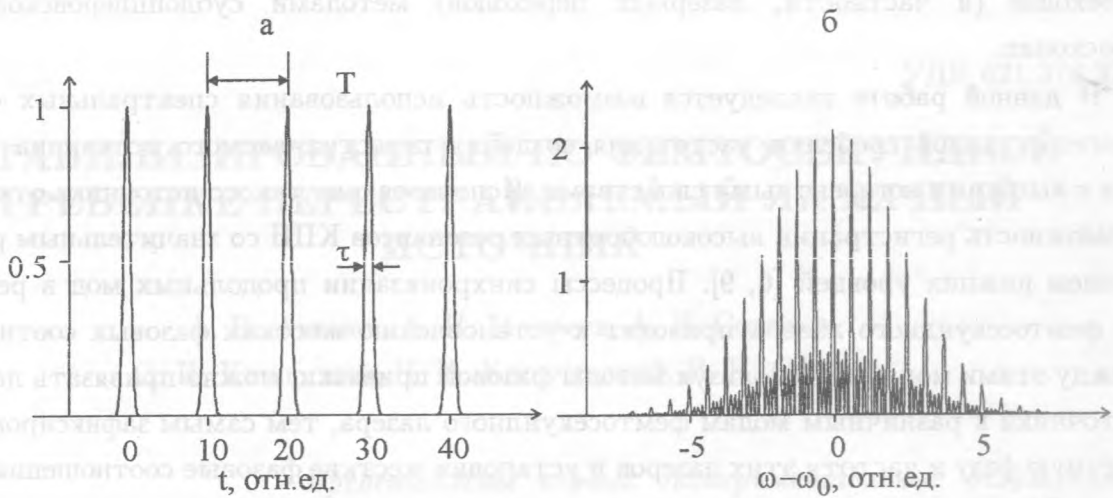


Рис. 1. Фурье-преобразование последовательности импульсов. Представлен Фурье-образ (б) временной последовательности из 5-ти импульсов вида (а) (несущая частота не отображена). При расчете использовались следующие параметры: $T = 10$, $\tau = 0.3$, $a = 1$.

длиной резонатора лазера. При $N \rightarrow \infty$ спектр излучения лазера представляет собой набор бесконечно узких синхронизованных эквидистантных мод.

Частота монохроматической моды излучения f_n может быть записана как:

$$f_n = f_0 + n f_{\text{rep}}, \quad f_0 < f_{\text{rep}} \quad (1)$$

n – целое число. В общем случае $f_0 \neq 0$, поскольку частота ω_0 необязательно кратна $2\pi/T$. Соотношение (1) связывает две радиочастоты f_0 и f_{rep} с оптической частотой f_n , при этом n является большим числом порядка 10^7 . Возникновение смещения f_0 связано с различием групповой и фазовой скоростей в лазерном резонаторе и соответствующим набегом фазы $\Delta\varphi$ между огибающей и несущей в последовательных импульсах лазера, $f_0 = \Delta\varphi/2\pi$ [11].

Частота f_{rep} обладает высокой стабильностью и легко контролируется по частоте сигнала биения мод лазера. Частота f_0 также может быть стабилизирована путем привязки одной из мод фемтосекундного лазера к оптическому стандарту частоты. В случае использования фемтосекундной гребенки, перекрывающей целую октаву, стабилизация частоты f_0 может осуществляться также и без использования дополнительного стандарта частоты [1]. Удвоенная частота какой-либо из мод гребенки имеет вид:

$$2f_n = 2f_0 + 2nf_{rep}. \quad (2)$$

Если сбить удвоенную частоту какой-либо моды из низкочастотной части спектра гребенки с соответствующей модой из высокочастотной части спектра, то, согласно (1) и (2), частота сигнала биений составит:

$$\Delta f = 2f_n - f_{2n} = 2f_0 + 2nf_{rep} - f_0 - 2nf_{rep} = f_0.$$

Используя Δf как сигнал ошибки, удастся стабилизировать частоту f_0 [1].

Метод фазовой привязки может быть надежно реализован при использовании диодных лазеров с петлей быстрой обратной связи по току [12]. Мы использовали диодный лазер с внешним резонатором, работающий в окрестности длины волны 780 нм и фемтосекундную лазерную систему "Verdi-V8" + "MIRA-900F¹". Фемтосекундный лазер на кристалле сапфира, активированном титаном, накачивается второй гармоникой Nd:YAG лазера в непрерывном режиме. Фемтосекундный режим обуславливается керровской линзой, возникающей в кристалле сапфира и приводящей к пассивной синхронизации продольных мод. Частота повторения импульсов излучения лазера составляет 75.4 МГц при длительности импульса 120 фс.

На рисунке 2 представлена блок-схема экспериментальной установки. Для генерации сигнала биения излучение фемтосекундного лазера совмещалось на поляризационном кубике с излучением диодного лазера, а затем с помощью дифракционной решетки выделялась небольшая часть спектра, лежащая вблизи частоты диодного лазера (~ 100 мод). Сигнал биений детектировался с помощью быстрого фотодиода, при этом отфильтровывался сигнал в полосе 0 – 35 МГц. Спектр сигнала биения непривязанных лазеров изображен на рис. 4а. Ширина спектра на уровне -3 dB (FWHM) в этом случае составляет около 2 МГц и определяется, в основном, шириной спектра диодного лазера.

Система фазовой стабилизации представляет собой цифровую схему, непрерывно выравнивающую количество циклов сигнала биения с количеством циклов стабильного генератора, настроенного на фиксированную частоту 15 МГц (рис. 3). Сигнал ошибки, пропорциональный разности этих значений, уменьшает показания счетчика "–" (рис. 3), а сигнал с опорного генератора увеличивает показания счетчика "+". Показания счетчиков суммируются и направляются на вход цифроаналогового преобразователя. Выходной сигнал ЦАП делится на "медленный" и "быстрый" каналы.

¹Производитель – фирма "Coherent Inc".

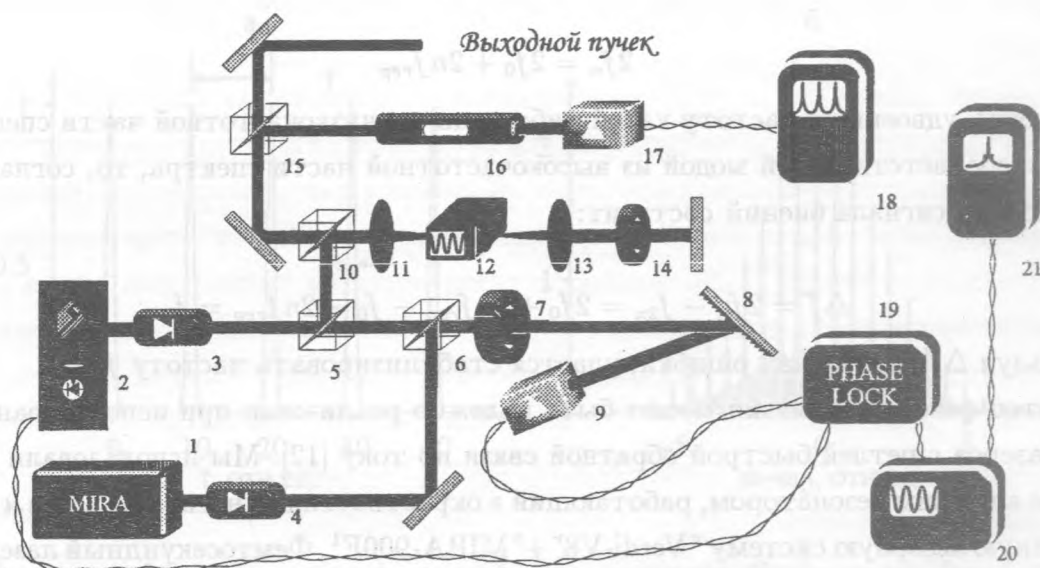


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. 1 – фемтосекундный лазер; 2 – диодный лазер с внешним резонатором; 3, 4 – оптические изоляторы; 5, 6, 10, 15 – поляризационные кубики; 7 – поляризаторы; 8 – дифракционная решетка; 9, 17 – фотодиоды; 11, 13 – линзы; 12 – АОМ; 14 – пластинка $\lambda/4$; 16 – сканирующий интерферометр; 18 – осциллограф; 19 – блок привязки; 20 – локальный осциллятор; 21 – спектроанализатор.

Медленный канал содержит интегратор и управляет пьезокерамикой полупроводникового лазера, осуществляя подстройку средней частоты генерации лазерного диода. Быстрый канал через согласующий блок управляет непосредственно током лазерного диода, полностью замыкая цепь привязки.

По сравнению со схемами фазовой привязки на аналоговых фазовых детекторах, реализованная цифровая схема оказывается существенно надежнее, хотя и обладает меньшей чувствительностью к флуктуациям разностной фазы вблизи нулевого значения [12]. После замыкания петли обратной связи спектр биений существенно сужается, приобретая вид, изображенный на рис. 46. Измеренная ширина центрального пика составила 15 кГц , и определяется разрешением спектроанализатора. При времени измерения порядка одной секунды можно ожидать относительной неопределенности частоты привязанного лазера на уровне $5 \cdot 10^{-14}$.

Для плавной перестройки частоты выходного пучка используется широкополосный акустооптический модулятор (АОМ) с центральной частотой 200 МГц , работающий

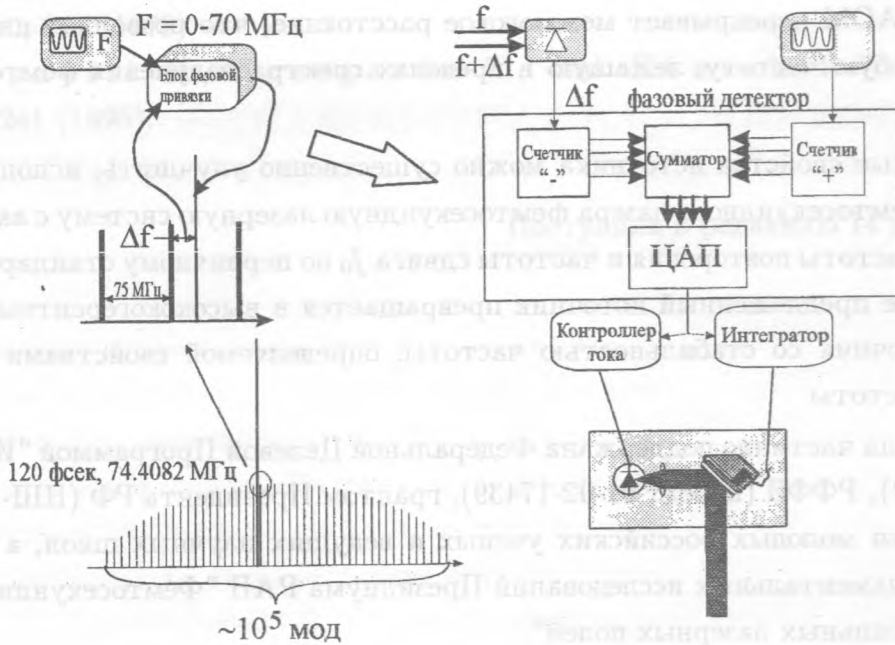


Рис. 3. Принципиальная схема фазовой привязки. f – частота моды фемтосекундного лазера, $f + \Delta f$ – частота полупроводникового лазера, F – частота опорного генератора.

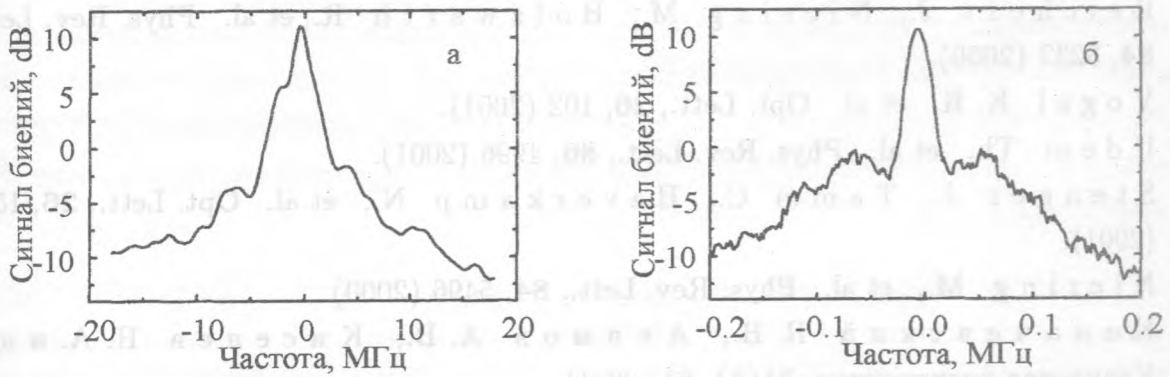


Рис. 4. Сигналы биений моды фемтосекундного лазера и непривязанного диодного лазера (а). То же для диодного лазера, привязанного по фазе (б). По вертикали – логарифмический масштаб.

по двухпроходной схеме для расширения диапазона сканирования и минимизации угловых уходов пучка. Грубая перестройка частоты осуществляется путем перепривязки

частоты излучения лазерного диода к соседней моде фемтосекундного лазера. Ширина перестройки АОМ перекрывает межмодовое расстояние, что позволяет настроить источник на любую частоту, лежащую в пределах спектра излучения фемтосекундного лазера.

Когерентные свойства источника можно существенно улучшить, используя вместо пассивного фемтосекундного лазера фемтосекундную лазерную систему с активной стабилизацией частоты повторения и частоты сдвига f_0 по первичному стандарту частоты. В этом случае предложенный источник превращается в высококогерентный перестраиваемый источник со стабильностью частоты, определяемой свойствами первичного стандарта частоты.

Работа была частично поддержана Федеральной Целевой Программой "Интеграция" (грант Б-0049), РФФИ (проект 01-02-17439), грантом Президента РФ (НШ-1254.2003.2) для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ, а также программой фундаментальных исследований Президиума РАН "Фемтосекундная оптика и физика сверхсильных лазерных полей".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Reichert J., Niering M., Holzwarth R., et al. Phys. Rev. Lett., **84**, 3232 (2000).
- [2] Vogel K. R. et al. Opt. Lett., **26**, 102 (2001).
- [3] Udem Th. et al. Phys. Rev. Lett., **86**, 4996 (2001).
- [4] Stenger J., Tamm C., Haverkamp N., et al. Opt. Lett., **26**, 1589 (2001).
- [5] Niering M., et al. Phys. Rev. Lett., **84**, 5496 (2000).
- [6] Колачевский Н. Н., Акимов А. В., Киселев Н. А. и др. Квантовая электроника, **31(1)**, 61 (2001).
- [7] Arimondo E. Progress in Optics, **XXXV**, ed. by E. Wolf, Elsevier, 257 (1996).
- [8] Wynads R. and Nagel A. Appl. Phys., **B68**, 1 (1999).
- [9] Akimov A. V., Sokolov A. V., Kolachevsky N. N., et al. Russian Laser Res., **24**, 129 (2003).
- [10] Бакланов Е. В., Чеботаев В. П. Квантовая электроника, **4**, 2189 (1977).

- [11] Eckstein J. N., Ferguson A. I., and Hänsch T. W. Phys. Rev. Lett., **40**, 847 (1978).
- [12] Pervedelli M., Freegarde T., and Hänsch T. W. Appl. Phys., **B60**, S241 (1995).

Поступила в редакцию 14 ноября 2003 г.