

Фемтосекундные оптические часы

С.Н.Багаев, В.И.Денисов, В.Ф.Захарьяш, А.В.Каширский,
В.М.Клементьев, С.А.Кузнецов, И.И.Корель, В.С.Пивцов

Рассмотрены новые достижения в области синтеза оптических частот и в создании на этой основе нового поколения оптических часов. Применение в системах синтеза фемтосекундных лазеров с синхронизацией мод и волоконных расширителей спектра излучения позволяет синтезировать любые частоты (от радио- до УФ диапазона) и кардинально упрощать структуру оптических часов. Приведены схемы фемтосекундных оптических часов, описаны особенности применения в них оптических волокон с перетяжкой.

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, синтез частот, оптические волокна, нелинейная оптика, суперконтинуум.

1. Введение

Одним из фундаментальных достижений лазерной физики явилось создание оптических квантовых стандартов частоты, превосходящих по частотным характеристикам квантовые стандарты СВЧ диапазона. Следует отметить важные результаты, полученные при разработке оптических стандартов частоты (ОСЧ) на основе ставших традиционными методов насыщенного поглощения [1] и двухфотонного поглощения без доплеровского уширения [2]. В последнее время впечатляющие результаты достигнуты в создании новых оптических реперов с использованием лазерного охлаждения и пленения частиц [3]. Прежде всего это реперы на основе нейтральных атомов кальция, серебра, стронция и др. в магнитной ловушке [3, 4]. Получили также распространение реперы на основе ионов в радиочастотных квадрупольных ловушках и ловушках Пеннинга [5]. К ним относятся реперы на ионах ртути, индия, иттербия, стронция, бария и кальция [3, 5]. В ловушках обоих типов достигаются температуры на уровне нескольких милликельвинов, что обеспечивает практическое отсутствие доплеровского уширения. Упомянутые выше реперы служат основой для новых стандартов частоты с уникальными частотными характеристиками.

Разработка оптических стандартов с долговременной стабильностью частоты не хуже, чем у СВЧ стандартов, а по кратковременной стабильности существенно их превышающих, сделала возможным решение целого ряда проблем, в том числе проблемы создания стандартов частоты и времени – оптических часов (ОЧ), в которых в качестве шкалы времени используется период высокостабильных оптических колебаний. В результате единица шкалы времени секунда определяется непосредственно по числу периодов оптических колебаний.

С.Н.Багаев, В.И.Денисов, В.Ф.Захарьяш, А.В.Каширский, В.М.Клементьев, С.А.Кузнецов, И.И.Корель, В.С.Пивцов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: clock@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 10 июня 2004 г.

После создания радиооптического моста [6] и первых ОЧ [7] произошли радикальные изменения. Благодаря успехам, достигнутым в разработке малогабаритных стандартов частоты и новых систем передачи частотных характеристик стандартов в радиодиапазон с помощью фемтосекундных лазеров, появилась возможность создания малогабаритных ОЧ, заменяющих громоздкие и сложнейшие системы. Фемтосекундные оптические часы (ФОЧ) позволяют осуществлять синтез и измерение частот от радио- до УФ диапазона с точностью, определяемой частотными характеристиками оптического стандарта.

В настоящей работе описываются результаты экспериментальных и теоретических исследований по созданию ФОЧ и синтезаторов, проведенных в Институте лазерной физики СО РАН.

2. Принцип построения ОЧ

При построении ОЧ главным наряду с созданием оптического стандарта является передача его частотных характеристик в радио- и другие диапазоны без потери точности. Принцип построения ОЧ в простейшем виде показан на рис. 1. Оптические часы состоят из шести основных блоков: ОСЧ, системы передачи частотных характеристик (СПЧХ) в радиодиапазон, низкочастотного синтезатора (НСЧ), измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) и кलिстрона (К).

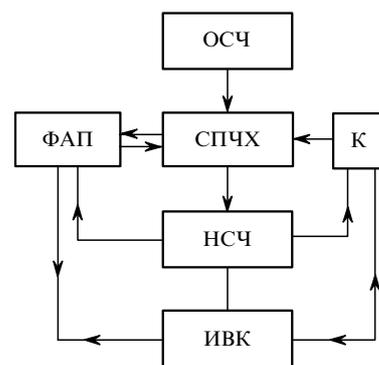


Рис. 1. Блок-схема ОЧ (К – клистрон, ИВК – измерительно-вычислительный комплекс).

затора частоты (НСЧ) для выработки сигналов на стандартных и опорных частотах, блока быстродействующих фазовых автоподстроек (ФАП) для синхронизации частот лазеров, используемых в СПЧХ, и нелинейных элементов. В первых ОЧ передача частотных характеристик ОСЧ в радиодиапазон достигалась путем деления частоты оптического He–Ne/CH₄-стандарта до радиодиапазона через систему более низкочастотных лазеров, связанных между собой с помощью гармоник и синхронизованных по фазе с частотой стандарта [7]. Цепочку устройств, составляющих СПЧХ в оптических часах, можно представить в виде

He–Ne/CH₄-лазер → He–Ne-лазер → CO₂-лазер (первый) → CO₂-лазер (второй) → CH₃OH-лазер → HCOOH-лазер → клистрон → НСЧ.

Формула синтеза частоты ОЧ для одного звена СПЧХ имеет вид

$$\nu = n\nu_{\text{las}} \pm mf_{\text{УНФ}} \pm f_{\text{if}}, \quad (1)$$

где m, n – целые числа; ν_{las} – частота лазера; $f_{\text{УНФ}}$ – частота СВЧ генератора (обычно несколько десятков гигагерц); f_{if} – промежуточная частота.

В качестве быстродействующих нелинейных элементов для преобразования частот лазеров и генерации гармоник высокого порядка применялись точечные диоды типа металл–изолятор–металл и диоды Шоттки. Созданные радиооптические мосты [6, 8] и ОЧ [7] позволили осуществить абсолютные измерения частоты He–Ne/CH₄-лазера с точностью ~ 0.05 кГц. Однако эти устройства не нашли широкого распространения из-за их сложности и ненадежности.

Поиск новых путей синтеза частот привел, как известно, к использованию для этих целей фемтосекундных лазеров, что стало возможным благодаря особенности их спектра генерации – наличию гребенки большого числа эквидистантных мод. Эквидистантность мод задается самим процессом синхронизации мод с точностью не хуже 10^{-16} [9]. Первые же результаты исследований по стабилизации межмодовой частоты He–Ne/CH₄-лазера с самосинхронизацией мод по частоте Н-стандарта показали, что частотные характеристики стандарта передаются с высокой степенью точности на весь спектр мод [10]. Дальнейшие исследования были распространены на твердотельные лазеры, в которых оказалось возможным стабилизировать тысячи самосинхронизованных мод с той же высокой точностью [11, 12]. Впервые межмодовая частота Ti:сапфирового лазера применялась для синтеза частот в работе [12]. Нами также проводились работы по созданию ФОЧ [13]. Как и в первых часах [7], в ФОЧ в качестве ОСЧ использовался He–Ne/CH₄-лазер, а для переноса его частотных характеристик в радиодиапазон – Ti:сапфировый лазер с самосинхронизацией мод, обладающий наиболее широкой линией усиления (более 100 ТГц). В этом случае процесс синтеза частот принципиально иной, чем в работах [6–8]. Частотные характеристики стандарта передаются с помощью фазовой привязки на гигантский интервал частот, содержащий большое число межмодовых эквидистантных интервалов, а формула синтеза приобретает простейший вид:

$$\nu_{\text{OFS}} = N\Delta\nu \pm f_{\text{if}}, \quad (2)$$

где N – число мод, входящих в интервал частот ν_{OFS} ; $\Delta\nu$ – межмодовая частота.

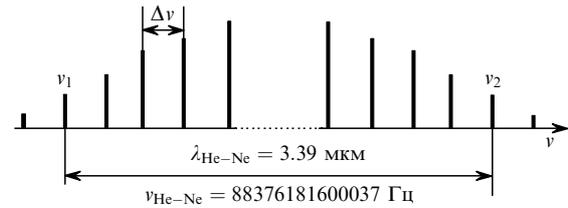


Рис.2. Физический принцип построения ФОЧ.

Физический принцип построения ФОЧ на основе He–Ne/CH₄-лазера показан на рис.2. Пусть ширина спектра мод фемтосекундного лазера больше частоты He–Ne-лазера. Тогда согласно (2) можно получить равенство $\nu_1 - \nu_2 - \nu_{\text{He-Ne}} = 0$ и с помощью фазовой синхронизации осуществить стабилизацию всей системы (гребенки) мод по частоте оптического стандарта. В результате разностная частота $\nu_1 - \nu_2$, т. е. частота $N\Delta\nu$, а следовательно и межмодовая частота $\Delta\nu$, приобретают частотные характеристики ОСЧ. В итоге характеристики частоты He–Ne/CH₄-стандарта передаются из оптической области в радиодиапазон. В рассматриваемом случае (при использовании He–Ne-лазера) ширина спектра Ti:сапфирового лазера должна составлять ~ 200 нм. Следует заметить, что в общем случае вместо He–Ne/CH₄-стандарта или Ti:сапфирового лазера в зависимости от решаемой задачи может быть использован другой ОСЧ или фемтосекундный лазер.

3. Устройство ФОЧ

На рис.3 представлена блок-схема ФОЧ, основанная на описанном выше принципе. Оптический стандарт частоты (He–Ne/CH₄-лазер) обладает следующими основ-

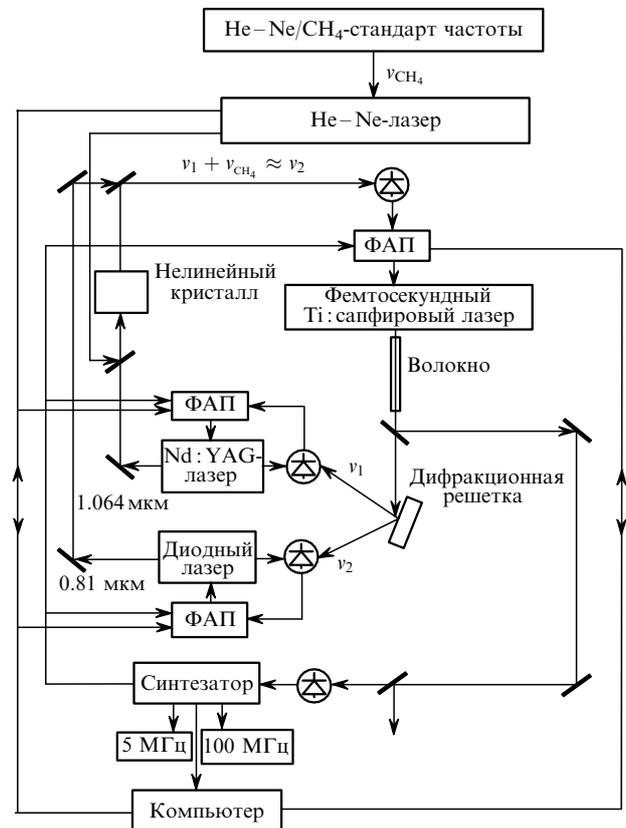


Рис.3. Схема ФОЧ на основе He–Ne/CH₄-стандарта частоты.

ными характеристиками: долговременной стабильностью $\sim 10^{-15}$ за 100 с, кратковременной стабильностью 3×10^{-14} за 1 с, выходной мощностью ~ 1 мВт. Мощность излучения этого лазера недостаточна для реализации фазовой привязки разностной частоты $\nu_1 - \nu_2 = N\Delta\nu$ гребенки мод Ti:сапфирового лазера к частоте ОСЧ. Для увеличения мощности используется дополнительный He-Ne-лазер с мощностью излучения 15 мВт, частота которого привязана по фазе к частоте He-Ne/CH₄-стандарта. Параметры применявшегося в экспериментах фемтосекундного Ti:сапфирового лазера были следующими: выходная мощность ~ 500 мВт, длительность импульса 40 фс, ширина спектра ~ 20 нм (~ 10 ТГц), частота повторения импульсов (межмодовый интервал) 100 МГц.

Особое место в исследованиях заняла проблема получения достаточно широкого спектра мод для синтеза частоты оптического стандарта. Эта проблема была решена с помощью оптического волокна с перетяжкой [14–16] или дырчатого волокна [17, 18], что позволило уширить спектр мод на октаву. Оптические волокна с перетяжкой были изготовлены в Университете г. Бат (Великобритания) и Новосибирском государственном университете из стандартного телекоммуникационного волокна Corning SMF-28 с диаметром сердцевины ~ 9 мкм. Длина волны отсечки волокна составляла 1.25 мкм. Уширенный волоконный спектр излучения должен охватывать диапазон 1.064 – 0.81 мкм. Ширина спектра, намного превышающая этот диапазон, нежелательна, потому что тогда мощность спектральных компонент уменьшается. Поэтому мы использовали волокно с диаметром перетяжки 2.5 мкм. Дырчатые волокна были изготовлены в Университете г. Бат. В уширенном спектре мощность каждой моды равнялась $\sim 10^{-7}$ Вт. Практически невозможно использовать такие мощности для суммирования или вычитания частот. Проблема усиления мощности мод с частотами ν_1 и ν_2 была решена путем фазовой привязки частоты Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1.064$ мкм, выходная мощность $P \sim 100$ мВт) и диодного лазера ($\lambda = 0.81$ мкм, $P \sim 10$ мВт) к частотам соответствующих мод Ti:сапфирового лазера. Одночастотные перестраиваемые Nd:YAG- и диодный лазеры были созданы в Институте лазерной физики СО РАН. Диапазон перестройки Nd:YAG-лазера с диодной накачкой составлял до 300 ГГц, а диодного лазера – до 150 ГГц (30 нм).

Частоты Nd:YAG- и He-Ne-лазеров суммировались в нелинейном кристалле AgGaS₂. Получена мощность излучения на суммарной частоте ~ 1 мкВт. Сигнал биеений между суммарной частотой и частотой диодного лазера подавался на блок ФАП, а сигнал ошибки с этого блока – на пьезокерамику Ti:сапфирового лазера для управления межмодовым интервалом. В результате межмодовый интервал Ti:сапфирового лазера был стабилизирован по частоте He-Ne/CH₄-стандарта. Таким образом, характеристики частоты He-Ne/CH₄-стандарта передавались из оптической области в радиодиапазон одним каскадом. Следует отметить, что используемая схема является автономной, т. е. не требует подачи опорных частот извне.

Поскольку межмодовая частота находится в радиодиапазоне, она может быть измерена с точностью 10^{-14} – 10^{-15} относительно другого радиочастотного стандарта (например, H-мазера). Заметим, что в схеме, описанной выше, стабилизирован только межмодовый интервал фемтосекундного лазера. Когда часы используются для

абсолютных измерений частоты, абсолютная частота компонент спектра излучения фемтосекундного лазера должна быть также стабилизирована с помощью фазовой автоподстройки по ОСЧ.

Таким образом, созданы ОЧ нового поколения, т. е. ФОЧ. В отличие от подобных систем предыдущего поколения с многокаскадным делением частоты, которые представляли собой сложные стационарные установки, новая система может быть разработана как транспортируемый вариант.

Система ОЧ исследовалась поэтапно. Принципиально важными были исследования возможности стабилизации всей системы мод (гребенки) по межмодовой частоте. С этой целью была осуществлена фазовая привязка межмодовой частоты (100 МГц) к частоте водородного стандарта. Эксперименты показали, что частотные характеристики H-стандарта с высокой степенью точности передаются на всю гребенку частот и, следовательно, Ti:сапфировый лазер в этом случае генерирует высокостабильные фемтосекундные импульсы [11].

На следующем этапе были проведены успешные исследования возможности фазовой привязки частот полупроводниковых лазеров к частотам мод с целью усиления мощности последних [19]. Кроме того, был разработан измерительно-вычислительный комплекс, предназначенный для контроля состояния ФАП и проведения абсолютных частотных измерений, в том числе частоты оптического стандарта.

Значительные усилия были направлены на разработку физических основ уширения спектра мод в оптоволоконных системах, большое внимание уделялось исследованию природы нелинейности волокон, определяющей эффект уширения спектра, и характеристик прошедшего через волокно излучения. Важнейшим является вопрос о том, сохраняется ли стабильность межмодовой частоты после прохождения высокостабильного фемтосекундного импульса через оптоволоконную систему. Другой интересующий нас вопрос: каковы амплитудно-частотные характеристики выходного излучения, или, иначе говоря, каковы закономерности распределения интенсивности спектра между компонентами преобразованного излучения?

Был разработан и создан прецизионный измерительный блок для экспериментальных исследований влияния волокна с перетяжкой на стабильность межмодовой частоты при прохождении через него непрерывной последовательности фемтосекундных импульсов Ti:сапфирового лазера и проведены эти исследования [20]. Методика эксперимента по исследованию стабильности межмодовой частоты состояла в следующем. Проводились тщательные измерения стабильности (относительно H-стандарта) межмодовой частоты (~ 100 МГц) на входе волокна и затем на его выходе. Установлено, что при времени усреднения 1 с волокно ухудшает стабильность в два раза, а при усреднении в течение 1000 с стабильность практически не ухудшается. Можно предполагать, что процессы преобразования излучения в длинноволновую и коротковолновую области различаются. Для исследования такой возможности спектр выходного излучения делится на две области с помощью фильтров и затем осуществляются измерения. Результаты измерений для времени усреднения 100 с приведены в табл. 1. Из нее следует, что в процессе преобразования частот происходит возрастание шумов и что они возрастают несимметрично: в

Табл.1.

Условия измерений	Число измерений	Среднеквадратичное отклонение частоты от среднего значения (10^{-5} Гц)
До волокна	98	5.738
После волокна ($\lambda = 0.7 - 1.1$ мкм)	83	8.458
После волокна ($\lambda = 0.4 - 0.65$ мкм)	92	6.940

длинноволновой области шумы больше, чем в коротковолновой. Таким образом, показано, что оптические волокна с перетяжкой существенно не ухудшают стабильности межмодовых частот и по этому параметру могут использоваться в ФОЧ и синтезаторах.

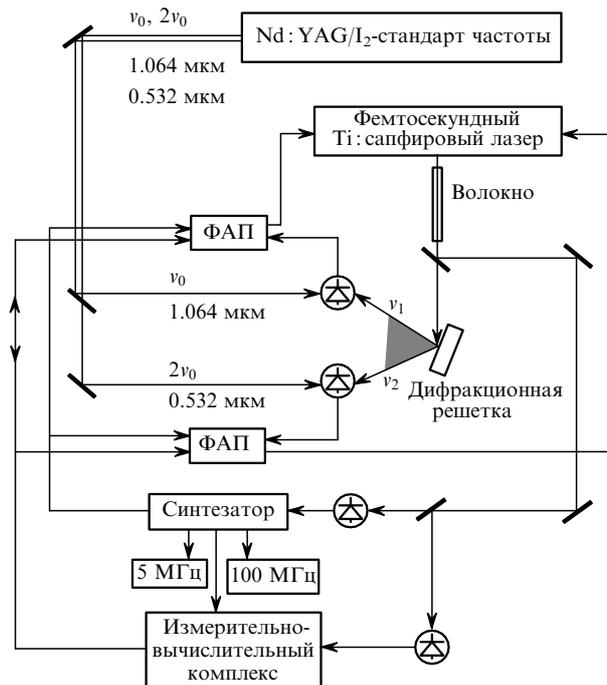
Экспериментально и теоретически была исследована эволюция спектра последовательности фемтосекундных импульсов в оптических волокнах с перетяжкой диаметром 2, 2.5 и 3 мкм и длиной 90 мм. Лазер на Ti:сапфире имел упомянутые выше параметры. В волокно вводилось $\sim 30\%$ падающей мощности излучения. По оценке, длительность импульса перед перетяжкой составляла 160 фс, т.е. импульс был сильно chirпирован из-за прохождения излучения через оптические элементы и начальный (не суженный) участок волокна. Задача формирования спектра последовательности УКИ, прошедших через волновод, может быть рассмотрена как в импульсном (временном), так и в частотном представлении. Для теоретического описания уширения экспериментального спектра был выбран первый подход. Подробное изложение результатов исследований приведено в нашей работе [20]. Показано, что теоретические и экспериментальные результаты качественно совпадают.

Была исследована низкочастотная (1–10 Гц) неустойчивость огибающей уширенного спектра. Показано, что угловые флуктуации входящего излучения служат причиной неустойчивости огибающей спектра, если начальная часть волокна является многомодовой. Эта нестабильность препятствует применению волокон с перетяжкой в ФОЧ и синтезаторах, поэтому нами используются микроструктурные дырчатые волокна. В настоящее время ведется работа по устранению указанной нестабильности, поскольку технология производства волокон с перетяжкой довольно проста, а их стоимость меньше, чем микроструктурных волокон.

4. ФОЧ на основе других оптических стандартов и лазеров

Рассмотренные выше ФОЧ основаны на использовании ИК оптического стандарта (He–Ne/CH₄-лазер, $\lambda = 3.39$ мкм). Эта система имеет существенные недостатки, один из которых обусловлен сложностью стабилизации ФОЧ по оптической частоте. Стабилизированы лишь межмодовые частоты, абсолютные частоты мод остаются нестабильными. Другой недостаток ФОЧ связан с большими размерами ОСЧ, из-за чего невозможно создание малогабаритных ФОЧ. Размеры транспортируемого He–Ne/CH₄-лазера, описанного в [21], доведены до минимальных, однако лазер остается достаточно громоздким.

В значительной степени эти проблемы решены в разработанных нами ФОЧ, основанных на использовании Nd:YAG/I₂-стандарта. Блок-схема такого ФОЧ приве-

Рис.4. Схема ФОЧ на основе Nd:YAG/I₂-стандарта частоты.

дена на рис.4. Принцип работы системы существенно отличается от описанного выше (рис.2) и определяется особенностями работы Nd:YAG/I₂-лазера. Суть его состоит в том, что используемая для стабилизации частоты реперная линия I₂ лежит в видимом диапазоне в области $\lambda = 0.532$ мкм, т.е. соответствует 2-й гармонике Nd:YAG-лазера. Был создан Nd:YAG/I₂-стандарт [22], работающий на двух длинах волн ($\lambda = 1.064$ и 0.532 мкм), со следующими основными характеристиками: стабильностью частоты 10^{-14} за 200 с, воспроизводимостью частоты 3.3×10^{-13} , мощностью излучения ~ 100 мВт на $\lambda = 1.06$ мкм и $20-40$ мВт на $\lambda = 0.532$ мкм.

Из рис.4 следует, что в описанных ФОЧ стабилизация частоты Ti:сапфирного лазера осуществляется посредством фазовой привязки к оптическим частотам v_0 и $2v_0$ Nd:YAG/I₂-лазера соответствующих частот уширенного волокном спектра. В данной системе нет дополнительных лазеров, которые служат для увеличения мощности на этих частотах благодаря достаточно высоким мощностям на частотах v_0 и $2v_0$ Nd:YAG/I₂-стандарта. Поэтому излучение на частотах v_1 и v_2 Ti:сапфирного лазера и v_0 и $2v_0$ Nd:YAG/I₂-стандарта подается непосредственно на фотодетектор, с которых после смешения сигналы с промежуточными частотами направляются на блок ФАП и далее на управляющие пьезоэлементы Ti:сапфирного лазера. В результате стабилизируются абсолютные и межмодовые частоты, а структура ФОЧ значительно упрощается.

В настоящее время нами разрабатываются малогабаритные ФОЧ с использованием Yb:YAG/I₂-стандарта и фемтосекундного Yb:KWG-лазера с диодной накачкой вместо Ti:сапфирного лазера. Структура ФОЧ остается аналогичной приведенной на рис.4.

5. Заключение

Рассмотрены новые достижения в области синтеза оптических частот и в создании на этой основе нового по-

колениа ОЧ. Применение в системах синтеза фемтосекундных лазеров с синхронизацией мод и расширителей спектра мод в виде волокна с перетяжкой или дырчатого волокна позволяет синтезировать любые частоты (от радио- до УФ диапазона) и кардинально упрощать структуру ФОЧ. В перспективе, как показывают исследования [23], точность абсолютных измерений частот с помощью ФОЧ может быть доведена до $\sim 10^{-19}$ и будет определяться степенью стабильности оптического стандарта, используемого в ФОЧ. Важной особенностью ФОЧ является высокая стабильность оптических и межмодовых частот излучения после расширителя спектра. По-видимому, в дальнейшем на основе ФОЧ будут созданы уникальные синтезаторы частоты, позволяющие проводить высокоточные частотные измерения в самых различных диапазонах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке INTAS (№ 03-51-5288) и РФФИ (грант № 04-02-17679а).

- Багаев С.Н., Чеботаев В.П. *УФН*, **148**, 143 (1986).
- Летохов В.С., Чеботаев В.П. *Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения* (М.: Наука, 1990).
- Бакланов Е.В., Покасов П.В. *Квантовая электроника*, **33**, 383 (2003).
- Prichard D.E., Raab E.L., Bagnato V., Wieman C.T., Watts R.N. *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 310 (1986).
- Dehmelt H.G. *Bull. Am. Phys.*, **20**, 60 (1975).
- Evenson K.M., Day G.V., Wells J.S., Mullen L.O. *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 133 (1972).
- Гольдорт В.Г., Захарьяш В.Ф., Клементьев В.М., Никитин М.В., Тимченко Б.А., Чеботаев В.П. *Письма в ЖТФ*, **8**, 157 (1982).
- Домнин Ю.С., Кошеляевский Н.Б., Татаренков В.М., Шумяцкий П.В. *Письма в ЖЭТФ*, **34**, 157 (1981).
- Udem Th., Reichert J., Holzwarth R., Hansch T.W. *Opt. Lett.*, **24**, 991 (1999).
- Захарьяш В.Ф., Клементьев В.М., Пыльцын О.И., Чеботаев В.П. *Квантовая электроника*, **19**, 604 (1992).
- Багаев С.Н., Захарьяш В.Ф., Клементьев В.М., Пивцов В.С., Чепуров С.В. *Квантовая электроника*, **24**, 327 (1997).
- Udem T., Reihert J., Holzwarth R., Hänsch T.W. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 3568 (1999).
- Bagaev S.N., Chepurov S.V., Klementyev V.M., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Pokasov V.V., Zakhariasch V.F. *Appl. Phys. B*, **70**, 375 (2000).
- Birks N.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **25**, 1415 (2000).
- Дианов Е.М., Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 877 (2001).
- Кобцев С.М., Кукарин С.В., Фатеев Н.В. *Квантовая электроника*, **32**, 11 (2002).
- Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. *Opt. Lett.*, **21**, 1547 (1996).
- Желтиков А.М. *УФН*, **170**, 1203 (2000).
- Багаев С.Н., Захарьяш В.Ф., Клементьев В.М., Колкер Д.Б., Кузнецов С.А., Матюгин Ю.А., Пивцов В.С., Скворцов М.Н., Чепуров С.В. *Квантовая электроника*, **31**, 383 (2001).
- Багаев С.Н., Денисов В.И., Захарьяш В.Ф., Клементьев В.М., Корель И.И., Кузнецов С.А., Пивцов В.С., Чепуров С.В. *Квантовая электроника*, **33**, 883 (2003).
- Bagaev S.N., Dmitriev A.K., Pokasov P.V. *Laser Phys.*, **7**, 989 (1997).
- Okhapkin M.V., Skvortsov M.N., Belkin A.M., Kvashnin N.L., Bagayev S.N. *Opt. Commun.*, **203**, 359 (2002).
- Ma L.-Sh., Bi Z., Bartels A., Robertson L., Zucco M., Windeler R.S., Wilpers G., Oates Ch., Hollberg L., Diddams S.A. *Science*, **303**, 1843 (2004).