

Научная школа академика С.Н. Багаева. К юбилею основателя

Вадим Жмудь
ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск, ИЛФ СО РАН, Новосибирск

Аннотация: В статье дан взгляд автора на основные итоги развития методов лазерной научной школы академика РАН Сергея Николаевича Багаева, приводятся результаты работ под его руководством.

Ключевые слова: принцип Локализации, метод разделения движений, малый параметр

ВВЕДЕНИЕ

В этом году 9 сентября отметил свой 75-летний юбилей руководитель научной школы по лазерной физике РАН, научный руководитель Института лазерной физики СО РАН академик Сергей Николаевич Багаев [1, 2]. Многие члены редакционной коллегии, (профессор В.А. Жмудь, профессор Б.В. Поллер, профессор Б.Д. Борисов) причисляют себя к ученикам академика С.Н. Багаева и благодарны ему за научное руководство и иную помощь, продолжают научные исследования с его помощью и под его научным руководством. В этот же год исполнилось 25 лет Институту лазерной физики СО РАН. Почти вся история Института прошла под руководством С.Н. Багаева, а в нынешнем году на посту директора его сменил профессор А.В. Тайченачев, но сам С.Н. Багаев единогласно избран научным руководителем Института. Это дает все основания надеяться и в дальнейшем на его эффективную и деятельную руководящую помощь Институту в его фундаментальных и прикладных исследованиях.

Сергей Николаевич инициировал, организовал и лично выполнял многие значимые научные исследования в областях лазерной физики, квантовой электроники, нелинейно и квантовой оптики, фундаментальной метрологии, лазерной медицины, лазерной техники связи, сверхточным измерителям перемещений, лазерной резке, фемтосекундным лазерам, оптическим часам, сверхмощным фемтосекундным лазерам, твердотельным и полупроводниковым лазерам, лазерной спектроскопии, геофизическим лазерным измерениям и многим другим. Под его руководством постоянно действует диссертационный совет Д 003.024.01 по специальностям «Лазерная физика» и «Оптика». Под его научным руководством защищены многие кандидатские диссертации, также он был научным консультантом по десятку диссертациям на соискание звания ученого

докторов технических и физико-математических наук, среди его учеников профессора А.К. Дмитриев, Е.А. Титов, М.Н. Скворцов, А.М. Ражев, В.А. Орлов и многие другие. Список научных исследований Института неуклонно расширяется. Среди этих направлений – нанотехнологии, системы космической связи и космических измерений, и многие другие.



Редакционная коллегия сердечно поздравляет Сергея Николаевича с юбилеем, желает ему здоровья, творческой активности, дальнейших успехов в развитии науки, техники и технологий.

1. ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК УНИКАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТРУМЕНТ

Лазерное излучение – чрезвычайно тонкий инструмент научного исследования. Аналогов ему в природе нет. Даже без стабилизирующих отрицательных обратных связей самые простейшие лазеры генерируют свет, который по своей стабильности частоты более чем в тысячу раз превосходит большинство радиочастотных генераторов. Действительно,

самый лучший кварцевый генератор дает стабильность частоты не более восьми десятичных порядков. Это – при использовании температурных стабилизаторов и других ухищрений. А без них можно говорить лишь о шести порядках точности. Самый плохой из полупроводниковых лазеров легко дает стабильность частоты более девяти порядков. Стабильность частоты газовых лазеров намного выше. А при стабилизации с помощью специальных электронных систем, использующих оптические эталоны, точность воспроизведения частоты может достигать пятнадцати десятичных знаков, но и на этом ученые не останавливаются. Наиболее амбициозные проекты направлены на достижение точностей, измеряемых восемнадцатью и более десятичными порядками. Техника такой стабилизации чрезвычайно сложна. Используется спектроскопия отдельных атомов и даже искусственно созданных квазиатомных структур, таких как мюоний. Но других эталонов частоты, более точных, чем лазерные, в настоящее время нет, и в ближайшее время их появления не предвидится.

Поэтому столь перспективно использование лазерного излучения в качестве эталона частоты. Эти же свойства позволяют использовать лазерное излучение для измерения расстояний и их приращений, причем эти измерения осуществляются с беспрецедентными точностями. Близкородственная тематика – измерение вибраций и сверхмалых деформаций, включая деформации земной коры. Лазерные методы измерений деформаций скальных пород, например, позволяют отслеживать нарушение стабильности дрейфа тектонических плит. Если лунно-солнечные приливно-отливные колебания скальных пород приобретают в спектре своих колебаний характерные более высокочастотные всплески, это говорит о возможности землетрясения в ближайшем будущем. Выявление и детектирование таких предвестников сейсмособытий позволяет заблаговременно предсказать землетрясения или извержения вулканов, что дает надежду избежать больших жертв. Создание сети таких измерителей еще не закончено, но отдельные датчики, разработанные под руководством академика С.Н. Багаева и его учеников, работают уже более двух десятков лет, позволяют собирать статистику и осуществлять мониторинг сейсмособытий.

Лазерные системы позволяют изменять свойства веществ, а также детектировать наличие веществ в столь малых дозах, что слово «микроскопические» в данном случае не подходит. Следовало бы использовать термин «наноскопические дозы вещества», поскольку речь идет даже о возможности обнаружения единичных атомов. Это незаменимый инструмент в биомедицинских исследованиях,

по сути, оптические методы могут позволить читать гены.

2. ЛАЗЕРЫ КАК СРЕДСТВО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТЫ

Удивительные свойства оптического излучения, проявляющиеся при его взаимодействии с веществом, могут использоваться в нанотехнологиях, микротехнологиях, биомедицинских технологиях. Оптическое излучение может воздействовать на вещество очень локально, очень коротко по времени, очень избирательно. Например, можно подобрать такое излучение, которое будет разрушать нездоровую часть зуба, но не будет повреждать здоровую его часть, поскольку для нездоровой части это излучение будет непрозрачным, а для здоровой – прозрачным. Если вещество для света прозрачно, то свет не нагревает и не разрушает это вещество, если же оно непрозрачно, оно может нагреваться и разрушаться при определенной плотности мощности излучения. Таким образом, можно лечить зубы, не затрагивая здоровую часть зуба, а удаляя лишь его пораженную часть. Также можно лечить различные болезни кожи, мягких тканей и даже глаза. Лазером лечат герпес, глаукому и некоторые другие болезни, требующие длительной терапии или хирургического вмешательства.

Лазерная коррекция зрения не требует рекламы, она широко распространена, истоки этих работ также базируются на исследованиях научной школы академика С.Н. Багаева.

Лазер как скальпель, как инструмент хирурга, в настоящее время уже широко известен, но его возможности далеко не исчерпаны, в будущем можно ожидать новых прорывных технологических решений, основанных на использовании лазерного скальпеля.

Лазерная обработка поверхностей сообщает им новые невиданные свойства. Вся электроника двадцатого века основана на оптических технологиях, тесно связанных с производством микросхем высшей степени интеграции. Достижение большей степени интеграции требует уменьшения длины волны (увеличения частоты) излучения, что требует освоения высокочастотных диапазонов: дальнего ультрафиолетового излучения, рентгеновского излучения и т.д.

3. ЛАЗЕРНЫЕ СРЕДСТВА СВЯЗИ

Оптическая связь, прежде всего – лазерная, это технологии будущего. Тончайшее оптическое волокно может заменить много проводов, а оптический кабель, содержащий сотни и тысячи оптических волокон, позволяет обеспечить такую пропускную способность, которую невозможно обеспечить никакими электрическими кабелями. Оптическое волокно не подвергается воздействию электрических

помех, поэтому даже во время самых мощных грозных разрядов такая связь действует бесперебойно. Она не создает наводок, это самый безопасный вид связи во взрывоопасных помещениях. Также оптические каналы связи можно организовывать и без применения волокон, а с использованием обычной атмосферы. Даже «вредные» свойства атмосферы, такие как рассеивание света, при желании можно обратить на пользу. Эти направления также развивались и развиваются научной школой академика С.Н. Багаева.



4. ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Все лазерные установки являются сложными системами, в которых имеется множество электронных подсистем стабилизации и управления.

Это – системы стабилизации частоты лазеров по эталонам, системы частотной и фазовой привязки частоты одного лазера к другому, системы точного управления разностной частотой для спектрометрических исследований, системы стабилизации мощности излучения, стабилизации тока, стабилизации температуры и многие другие. Кроме того, к электронным системам относятся системы сбора данных, системы обработки собранных сигналов, системы частотных преобразований для преобразования оптической частоты в радиочастотную. Также к ним относятся различные формирователи сигналов сложной или идеальной гармонической формы, синтезаторы частот, компараторы, анализаторы спектра и так далее.

Первые системы были, в основном, аналоговые, но с развитием цифровой техники все больше и больше функций в электронных системах стали выполняться средствами цифровой техники.

Первые цифроаналоговые системы использо-

вали технические решения, которые можно назвать пограничными между аналоговой и цифровой техникой. Например, к таким устройствам можно отнести цифроаналоговый интегратор сигналов на основе реверсивного счетчика, синхронный детектор на основе ЦАП, программируемый усилитель на основе АЦП или на основе ЦАП, умножитель сигналов на основе ЦАП и так далее.

Впоследствии взаимодействие цифровой техники и разрядность АЦП и ЦАП стали столь большими, что в настоящее время почти все задачи электроники, которые еще 15–20 лет назад могли быть решены исключительно средствами аналоговой техники, сейчас должны решаться только методами цифровой техники, поскольку это и надежнее, и дешевле, и проще.

Все основные технические решения по этим системам ранее были испытаны и отработаны на аналоговой технике, но именно в научной школе академика С.Н. Багаева началась разработка электронных систем управления лазерным излучением нового поколения, основанная на цифровой технике.

Характерным примером является измеритель присутствия примесей в воздухе (газоанализатор), разработанный в лаборатории к.т.н. А.И. Карапузикова совместно с лабораторией «Электронных лазерных систем». Аналоговые схемотехнические решения присутствовали только в эскизных проектах. Первые практические работы делались сразу на основе цифровой электронной техники.

5. НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ЭЛЕКТРОННЫМ СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Исследования под руководством академика С.Н. Багаева были чрезвычайно плодотворны. Результаты этих исследований отражены во многих научных публикациях. Только лишь с позиции взгляда автора данной статьи эти исследования столь многочисленны и плодотворны, что в личном перечне работ им найдено более сотни публикаций по указанным тематикам.

Поскольку данная работа не может претендовать на объективное освещение всех исследований академика С.Н. Багаева, мы можем дать только свое видение на этот пласт отечественной науки и проследить его по нашим публикациям, которые составляют ничтожную долю публикаций научной школы Сергея Николаевича.

Учебное пособие о прецизионном управлении лазерным излучением [3] и учебное пособие о моделировании и оптимизации систем управления лазерным излучением [4] написаны специально для кафедры Квантовой электроники НГУ, заведующим которой в этот период был Сергей Николаевич. В этих пособиях использован опыт, полученный при

разработке, исследовании и модификации лазерных систем лично и с помощью сотрудников лаборатории «Электронных лазерных систем» Института лазерной физики СО РАН. Более поздний опыт был отражен в учебном пособии [5].

Учебное пособие в четырех частях [6–9] написано для кафедры Лазерных систем НГТУ, которая воссоздана усилиями Сергея Николаевича.

Широко известна система стабилизации частоты *He-Ne*-лазера по линиям поглощения метана. Она содержит множество подсистем автоматического управления и стабилизации. На *Рис. 1* показана система стабилизации мощности лазерного излучения. В этой схеме ответвляется часть мощности лазерного излучения, измеряется ее величина, сравнивается с предписанным значением, определяется ошибка, и через регулятор величина ошибки подается на управление мощностью генератора, питающего акустооптический модулятор. В результате, от излучения лазера отщепляется некоторая его часть таким образом, чтобы оставшаяся величина излучения была стабильна по мощности. Чтобы исключить влияние засветок и тепловых воздействия на фотодетектор, в оптическом пути имеется прерыватель, а вся система работает только по переменному сигналу от фотоприемника.

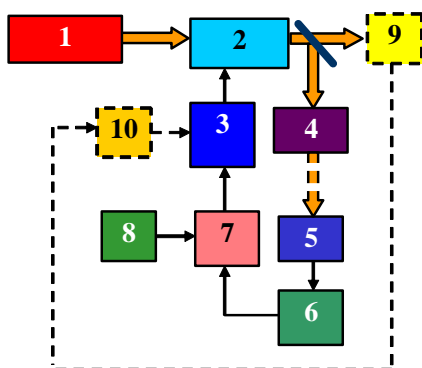


Рис. 1. Подсистема стабилизации мощности лазерного излучения: 1 – лазер; 2 – акустооптический модулятор; 3 – генератор; 4 – прерыватель света; 5 – фотодетектор; 6 – амплитудный детектор; 7 – регулятор мощности генератора; 8 – формирователь предписанной величины мощности лазерного излучения; 9 – частотный детектор (не обязательный); 10 – регулятор частоты генератора (не обязательный)

Подобные схемы ранее использовались очень широко, это эффективные подсистемы, в некоторых случаях незаменимые. Недостатком такой подсистемы является механический прерыватель, представляющий собой диск с прорезями, насаженный на вращающийся вал двигателя. В лазерных системах механические движения не желательны, так как они создают дополнительные вибрации, шумы, потоки воздуха. В последнее время стали использоваться такие лазерные системы, где стабиль-

ность мощности излучения уже не так важна, либо осуществляется иным путем, но принцип действия их приблизительно такой же. Кроме того, появились элементы, в которых прерывание луча или его отклонение может быть обеспечено без использования чисто механического прерывателя.

На *Рис. 2* показана подсистема стабилизации частоты лазерного излучения. В этой подсистеме используется оптическая эталонная ячейка, поглощение которой имеет зависимость от частоты с резко выраженным стабильным пиком. Также могут использоваться ячейки с фотолюминисценцией. Как не трудно заметить, в этой подсистеме имеется множество узлов электронной техники, которые разрабатывались с лаборатории Электронных лазерных систем.

На *Рис. 3* показана подсистема фазовой привязки частоты излучения одного лазера к частоте излучения второго лазера. Лазер с номером 1 в этом случае ведущий, а лазер с номером 2 – ведомый.

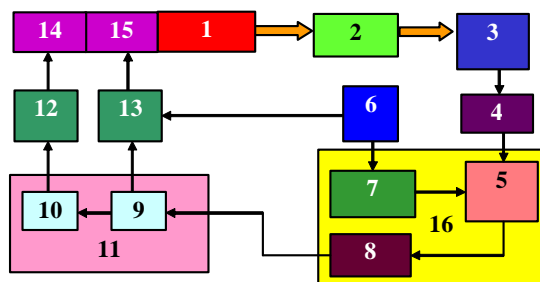


Рис. 2. Подсистема стабилизации мощности лазерного излучения: 1 – лазер; 2 – эталонная поглощающая ячейка; 3 – фотодетектор; 5 – умножитель сигналов; 6 – генератор; 7 – фазосдвигающий фильтр; 8 – фильтр низких частот; 9 и 10 – интегратор; 11 – регулятор; 12 и 13 – высоковольтные усилители; 14 и 15 – пьезоэлектрические модуляторы; 16 – синхронный детектор

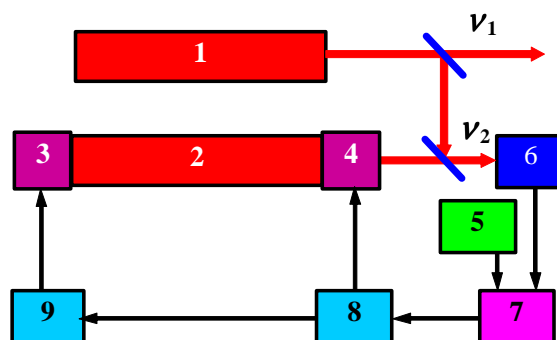


Рис. 3. Подсистема фазовой автоподстройки (привязки) частоты излучения лазера 2 к частоте излучения лазера 1: 1 – ведущий лазер; 2 – ведомый лазер; 3 и 4 – пьезоэлектрические модуляторы; 5 – генератор; 6 – фотодетектор; 7 – фазовый детектор; 8 и 9 – регуляторы (интеграторы); v_1 и v_2 – частоты лазеров 1 и 2

В этой системе также очень много электронных блоков. Электронная часть системы по *Рис. 3* настолько сложна, что ее

целесообразно показать на отдельной схеме. Эта система показана на *Рис. 4*. Эта электронная схема также разработана в лаборатории Электронных лазерных систем в составе Института лазерной физики.

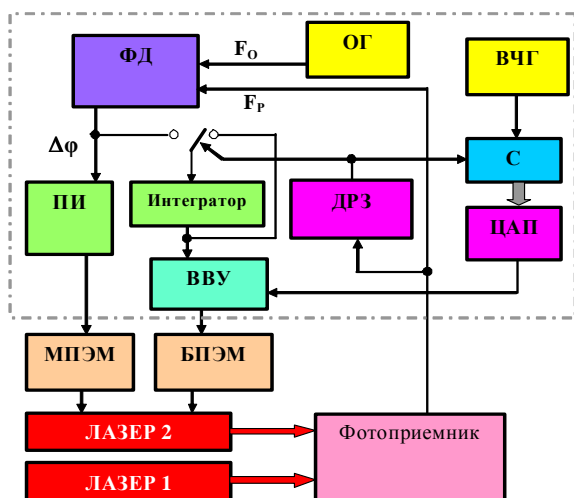


Рис. 4. Электронная часть системы фазовой автоподстройки частоты: ФД – Фазовый детектор; ОГ – опорный генератор; ВЧГ – высокочастотный генератор; С – счетчик; ДРЗ – детектор режима захвата; ПИ – пропорционально-интегральный регулятор; ВВУ – высоковольтный усилитель; БПЭМ – быстрый пьезоэлектрический модулятор; МПЭМ – медленный пьезоэлектрический модулятор

Отдельно хочется отметить статьи в соавторстве с Сергеем Николаевичем [10–16]. Безусловно, основной вклад в этих публикациях принадлежит научному руководителю. В этих публикациях описаны значимые достижения в области лазерной физики или фундаментальной метрологии, результаты получены большим коллективом, и включение исполнителей в список соавторов является признанием существенного творческого вклада в общий результат. В ряде зарубежных изданий высокого рейтинга количество соавторов ограничено, поэтому не всегда все участники исследований являются авторами статьи, описывающей это достижение. Тем ценнее те статьи, где такое соавторство имеет место.

6. СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Одно из важнейших направлений исследований под руководством академика С.Н. Багаева связано с производством и использованием полупроводниковых лазеров [17–29]. До начала этих исследований полупроводниковые лазеры производились и широко использовались в отечественной промышленности преимущественно как точечные источники оптического излучения, их стабильность частоты в большинстве их применений не использовалась, кроме идиличных довольно сложных систем,

разрабатываемых в научных институтах РАН как отдельные экспериментальные установки и стенды. Полупроводниковые лазеры уже использовались в доплеровских измерителях скорости, интерферометрических измерений приращений расстояний, но не использовались в стандартах частоты. Для разработки стандартов частоты на основе полупроводниковых лазеров потребовались кропотливые исследования этих приборов, разработка схем стабилизации тока и температуры [17–27], исследование шумов в цепи тока лазера [28] и даже разработка системы активного подавления шумов [29].

На *Рис. 5* показана обобщенная структурная схема системы стабилизации температуры и тока накачки полупроводникового лазера.

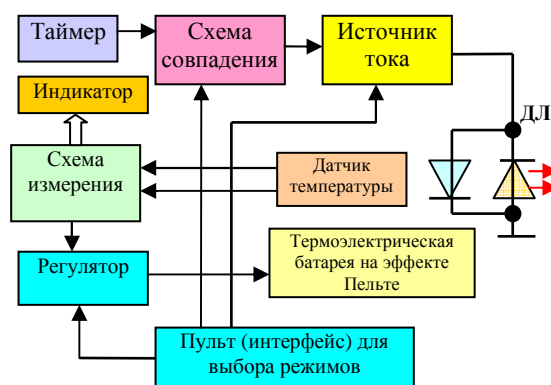


Рис. 5. Схема стабилизации температуры и тока накачки полупроводникового лазера: ДЛ – диодный (полупроводниковый) лазер

7. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТ И РАЗНОСТЕЙ ФАЗ

Применение лазерных систем для стандартов частот, в прецизионной лазерной спектроскопии, для измерений приращений расстояний и вибраций и в других областях их использования требуют высокоточного измерения частот и разностей фаз, получаемых путем смешивания излучения различных лазеров на общем фотоприемнике. Отсутствие серийных изделий, доступных для приобретения и использования в этих целях, потребовало разработки собственных устройств для этих целей. Как руководитель этих работ, Сергей Николаевич всесторонне поддерживал эти исследования, обеспечивая их финансированием, кадровыми ресурсами и организационными мероприятиями. Это способствовало разработке и созданию целой серии уникальных прецизионных частотомеров и фазометров, не имеющих аналогов в отечественном приборостроении, и даже, на момент их создания, не имеющих серийных аналогов в мире [30–49].

На *Рис. 6* показан разработанный для этих целей измеритель разности фаз двух высокочастотных сигналов.

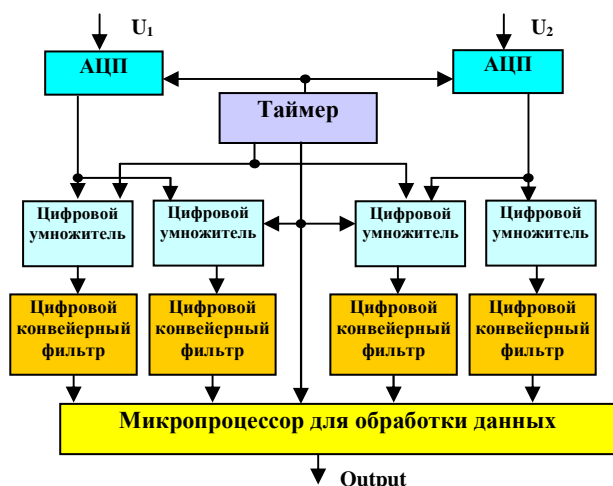


Рис. 6. Фазовый детектор на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП)

Все, что находится после АЦП в этом измерителе выполнено полностью на цифровой технике. Эта часть измерителя может быть сделана по одной из нескольких альтернативных схем, отличающихся большей или меньшей простотой, как показано на Рис. 7 и 8. Эти устройства представляют собой следующие друг за другом модификации, в которых упрощение связано с повышением надежности и сохранением или улучшением точности.

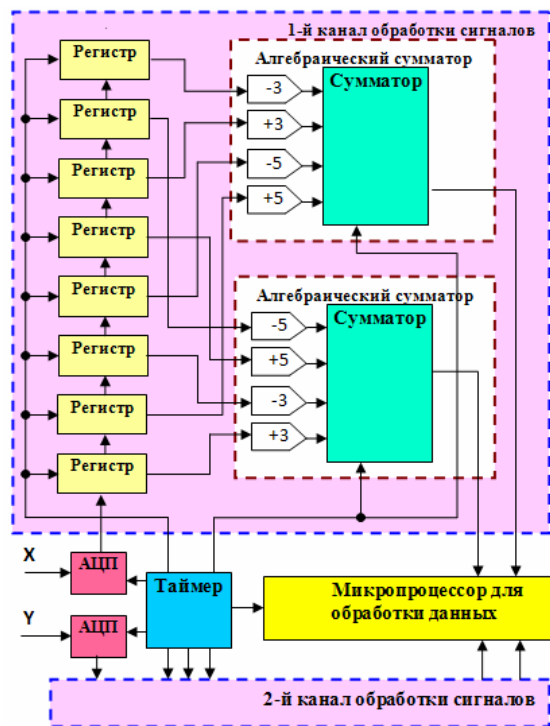


Рис. 7. Цифровая часть фазового детектора

На Рис. 9 показана схема установки для измерения разности частот излучения двух лазеров. Эта схема не позволяет изменить разность частот в области высоких частот. На Рис. 10 показана более совершенная схема, которая позволяет измерять разность частот в широкой полосе.

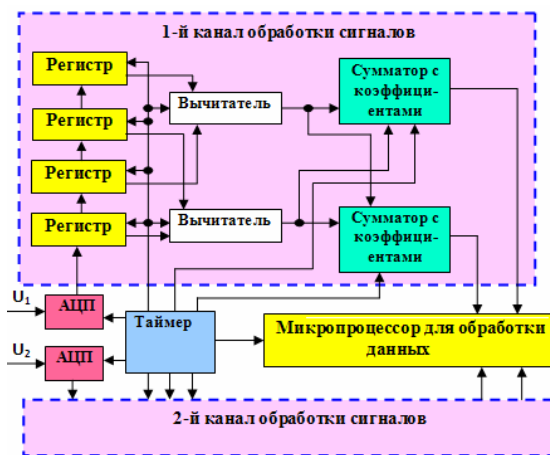


Рис. 8. Цифровая часть фазового детектора (альтернативная схема)

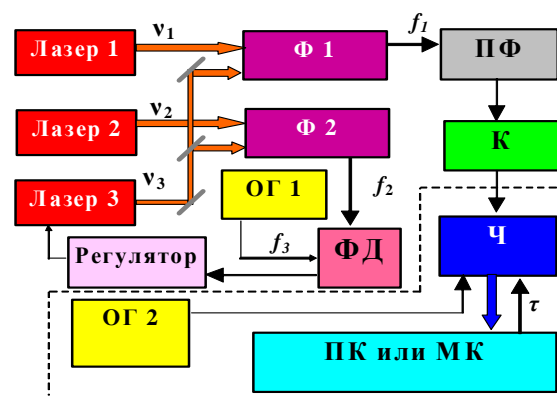


Рис. 9. Установка для измерения стабильности частоты лазерного излучения: Ф – фотодетектор, ОГ – опорный генератор, ФД – фазовый детектор, ПФ – полосовой фильтр, К – компаратор, ЧМ – частотомер, ПК или МК – персональный компьютер или микроконтроллер

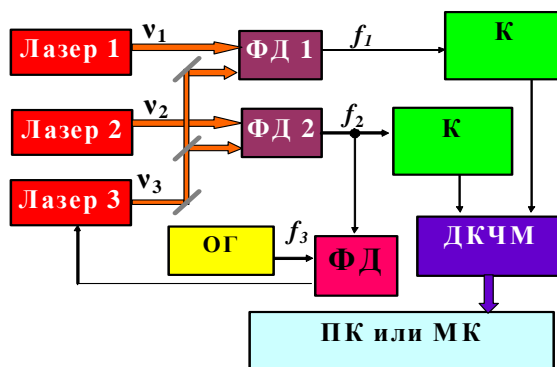


Рис. 10. Установка для измерения разности частот излучения двух лазеров в широкой полосе частот: ДАЧМ – двухканальный частотомер

8. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ВИБРАЦИЙ И ПРИРАЩЕНИЙ ДЛИН

Лазерные метрологические системы как тончайший инструмент для измерения приращений длины, а также для измерения вибраций, получили под руководством Сергея Николаевича особое развитие. Этот точнейший

инструмент позволил измерять вибрации, величина которых определяется сотыми долями от длины волны лазерного излучения, что составляет доли нанометров. Такая чувствительность по отношению к вибрациям была подтверждена экспериментально [50–54].

Возможность измерений сверхмалых расстояний позволило создать новое направление в геофизических исследованиях. Оно состоит в измерении лазерными методами лунно-солнечных приливно-отливных деформаций земной коры. Это делается с целью выявления и использования предвестников землетрясений [55–57].

Принцип действия такой лазерной системы основан на схеме интерферометра Майкельсона, как показано в упрощенном виде на *Рис. 11*. В реальной системе схема намного сложнее и использует два лазера, в данной статье она не приводится, поскольку широко публиковалась в других статьях [50–57].

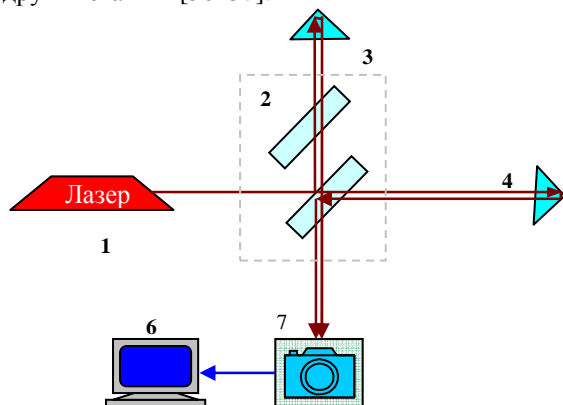


Рис. 11. Цифровая часть фазового детектора

9. ЛАЗЕРНЫЕ ПОДСИСТЕМЫ

Лазерные подсистемы являются частью более сложных лазерных систем. Это, прежде всего, системы стабилизации частоты или разности фаз с использованием отрицательной обратной связи [58–73], а также, собственно, интерферометры [74].

Для успешной разработки лазерных подсистем было также предпринято развитие методов синтеза систем с отрицательной обратной связью, то есть разработка новых методов расчета регуляторов. Даже после прекращения непосредственной разработки лазерных подсистем, методы синтеза регуляторов продолжали совершенствоваться в сотрудничестве с коллегами из Института лазерной физики СО РАН [75–81], поэтому и на данные исследования научная школа Сергея Николаевича оказала самое плодотворное влияние.

10. НОВЫЕ ИДЕИ В ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Наверное, самым любимым направлением исследования академика С.Н. Багаева является

прецизионная лазерная спектроскопия, а также стандарты частоты на основе спектрометрических систем, и оптические (лазерные) часы. Публикации на эту тему вызывают нашу особую гордость [82–92], их немного, но это веки исследований под его руководством.

На *Рис. 12–17* показаны различные оптические схемы, которые могут быть использованы для стабилизации частоты лазерного излучения с целью прецизионной лазерной спектроскопии [60].

Рассмотрим в самом упрощенном виде схему для фазовой привязки частот двух лазеров, как показано на *Рис. 12*. Теоретически такая структура могла бы быть использована для когерентного сложения света от двух лазеров. Но в ней невозможно обеспечить широкую полосу автоподстройки частоты. Это вызвано тем, что при нулевой разности фаз частот двух лазеров фотоприемник не может обеспечить достаточно точное измерение сигнала, несущего информацию о разности фаз, и сам этот сигнал не дает информации о знаке разности фаз. Для сравнения рассмотрим систему привязки частоты второго лазера к частоте первого лазера с наперед заданной разностью частот, как показано на *Рис. 13*.

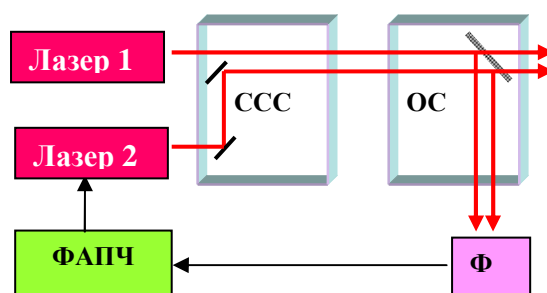


Рис. 12. Схема для фазовой автоподстройки частоты лазера 2 к частоте лазера 1: ССС – схема сложения света; ОС – ответвитель света; Ф – фотодетектор; ФАПЧ – система фазовой автоподстройки

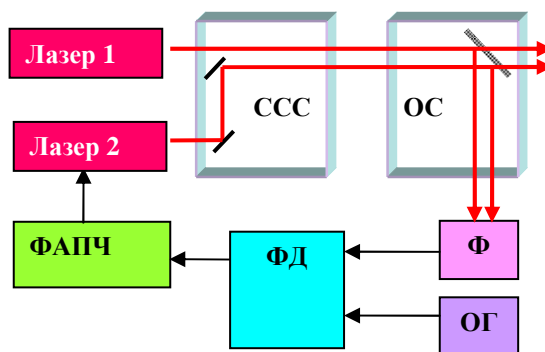


Рис. 13. Схема для фазовой автоподстройки частоты лазера 2 к частоте лазера 1 с заданной разностью частот: ОГ – опорный генератор, ФД – фазовый детектор, остальные обозначения те же, что на *Рис. 12*

В этой схеме фотоприемник работает с высокочастотным сигналом, поскольку между частотами излучения имеется разность частот, равная частоте опорного генератора.

Разность частот этих двух лазеров, как правило, составляет 1 МГц или больше. Этот сигнал может легко детектироваться фотодетектором и выделяться из шумов. Условия работы фазового детектора также позволяют обеспечить его широкую полосу частот, что позволяет достигать высокой точности и быстродействия всей системы.

Однако, если целью работы является именно когерентная привязка частот двух лазеров, то схема по Рис. 13 не подходит принципиально, а схема по Рис. 12, как видим, неработоспособна. Поэтому в работе [60] была предложена схема, показанная на Рис. 14.

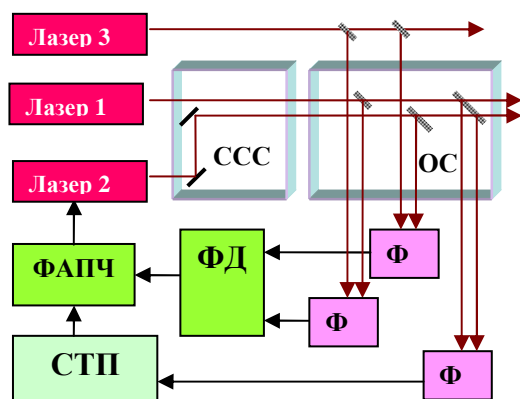


Рис. 14. Предложенная структура для когерентного сложения пучков лазера 1 и лазера 1: Лазер 3 – вспомогательный лазер, СТП – система точной подстройки

Система содержит опорный высокостабильный по частоте лазер 3 (оптический частотный стандарт). Его свет используется как гетеродинная частотная опора. Каждый из двух фотодетекторов преобразует сумму двух попадающих на него засветок в электрический сигнал. При этом каждый фотоприемник работает в гетеродинном режиме, то есть следствие суммирования света от лазера на фотоприемнике вырабатывается разностная частота. Разность фаз сигналов разностных частот измеряется фазовым детектором. Он вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный разности этих фаз. Этот сигнал используется для управления фазой Лазера 2. В результате разность фаз между излучением второго и первого лазеров сводится к минимуму. Поэтому и частоты излучения этих двух лазеров становятся равными. В системе может сохраняться ненулевая разность фаз, которая должна быть устранена дополнительной подстройкой, например, путем изменения оптической длины одного из пучков или длины одного из электрических кабелей от фотоприемника к фазометру. Но лучшим решением является системы точной подстройки. Эта система обеспечивает точную настройку фазы для обеспечения синфазности двух пучков лазерного излучения. С этой целью мощность

излучения, измеряемая дополнительным фотодетектором, настраивается на максимум.

В структуре, показанной на Рис. 15, введена дополнительная система фазовой автоподстройки частоты, которая настраивает частоту первого лазера к частоте третьего лазера с той же разностной частотой, что и между частотами второго и третьего лазеров.

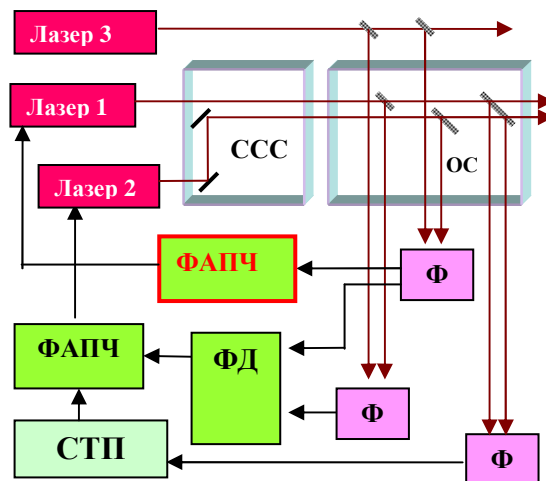


Рис. 15. Структура, развивающая идею структуры по Рис. 14: введена дополнительная фазовая автоподстройка для Лазера 1, обозначения на схеме те же, что и на Рис. 14

Структура по Рис. 15 содержит множество сложных контуров, что делает ее разработку и настройку крайне сложной задачей. На Рис. 16 показана структура, которая может с успехом использоваться для отладки системы точной подстройки.

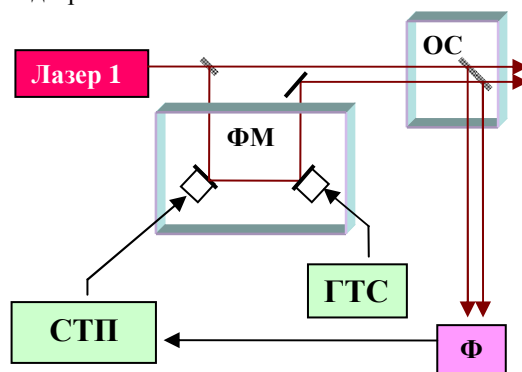


Рис. 16. Схема для разработки, отладки и тестирования системы точной подстройки: ФМ – фазовый модулятор; ГТС – генератор тестовых сигналов

Как видно из Рис. 16, в этой структуре присутствует единственный лазер. Принцип действия такой системы основан на том, что два разны пучка лазерного излучения от одного лазера в точке их разделения когерентны, их частоты совпадают, и если оптические пути каждого из лучей стационарны, то эта когерентность остается на выходе оптической схемы. Если же в один из пучков внести

фазовую модуляцию, то когерентность нарушится. Таким образом, ее можно нарушить на известную величину, которая по желанию может быть больше или меньше. Генератор тестовых сигналов может вводить такое рассогласование на известную величину по уровню и на известной и заранее выбранной частоте. Система точной автоподстройки должна устранить влияние этого рассогласования, и с этой целью другой модулятор фазы должен формировать равное по величине и обратное по знаку воздействие на фазу этого же пучка света.

Во всех рассмотренных схемах обратная связь может обеспечить высокую точность автоматической подстройки частоты в среднем, то есть в отношении разности частот (и фаз), осредненных за очень длительный интервал времени. Этого нельзя утверждать в отношении кратковременной стабильности частоты.

Нежелательный эффект в системах с активной стабилизацией частоты излучения состоит в том, что в этих системах используется частотная модуляция. Такая модуляция разрушает кратковременную стабильность используемого лазера. Действительно, как правило, в таких системах частота лазера изменяется по гармоническому закону вследствие изменения длины резонатора. Это достигается подачей гармонического сигнала на пьезоэлектрический модулятор, на котором крепится одно из зеркал лазера. Такое воздействие не только создает неустраняемые девиации частоты этого лазера, но также еще и создает акустическое возмущение во всей конструкции лазера (как правило, воздействие идет на звуковой частоте больше 500 Гц , но меньше 20 кГц). Предлагаемая структура, показанная на Рис. 17, позволяет по возможности устранить девиации частоты в основном пучке света стабилизируемого лазера. Это может способствовать дальнейшему повышению точности работы такой системы.

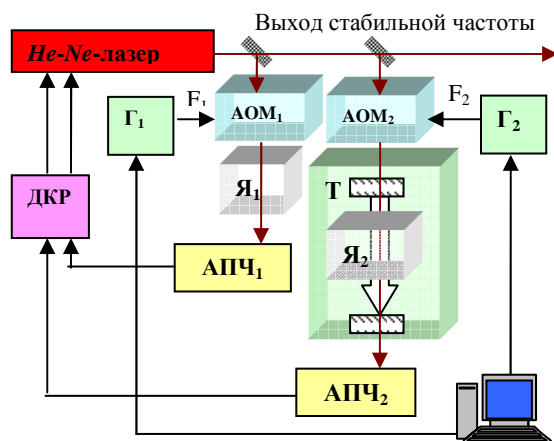


Рис. 17. Система для стабилизации частоты: АОМ – акустооптический модулятор, Г – генератор, АПЧ – система автоподстройки частоты, Я – оптическая опорная ячейка, ДКР – двухканальный регулятор, Т

– телескопический расширитель пучка

Эта система содержит два отдельных контура стабилизации частоты. Быстрая петля обеспечивает улучшение кратковременной стабильности частоты. Это необходимо для успешного функционирования медленной петли. Медленная петля более точна, чем быстрая. Без детектирования сверхтонкой структуры линий поглощения (например, метана) медленную петлю было бы невозможно реализовать. Быстрая петля недостаточно точна, поскольку она реализована без детектирования сверхтонкой структуры поглощения, для ее работы используется сигнал, который может быть получен очень просто и в широкой полосе частот. Этот сигнал от линии поглощения без разрешения сверхтонкой структуры. Медленная петля использует иной способ измерения, с учетом сверхтонкой структуры. Эта петля может использовать сигнал, накопленный за много проходов записи этих линий поглощения. Медленная петля более точна, но и более медленна. При этом используется единственный лазер, из которого при помощи светодетективных (полупрозрачных) пластин ответвляется незначительная часть основной мощности излучения.

В отличие от других подобных схем, модуляция вводится не путем воздействия на лазер, а путем воздействия непосредственно на пучок света при прохождении его через акустооптический модулятор (АОМ). Используя в каждом из пучков собственный АОМ, можно ввести в каждый пучок индивидуальный сдвиг частоты. При этом если частота питания модулятора также имеет девиации, то и полученный сдвиг частоты будет иметь частотные девиации, притом, что основное излучение, направляемое на выход всей системы, свободно от искусственно вносимых девиаций частоты.

Пусть от генераторов Γ_1 и Γ_2 на модуляторы АОМ₁ и АОМ₂ поступают частоты F_1 и F_2 , соответственно. Эти частоты в среднем можно стабилизировать и контролировать с достаточно высокой точностью. Каждая из этих частот имеет свою частотную девиацию:

$$F_1 = F_0 + \Delta F_1 \sin 2\pi f_1 t,$$

$$F_2 = F_0 + \Delta F_2 \sin 2\pi f_2 t + \delta F.$$

Например, можно выбрать следующие значения для этих частот:

$$f_1 \approx 15 \text{ кГц}, f_2 \approx 500 \text{ Гц}, F_0 \approx 80 \text{ МГц},$$

$$\Delta F \approx 20 \text{ Гц}, \Delta F_2 \approx 2 \text{ Гц}.$$

На Рис. 18 показано возможное расположение спектров преобразуемых в этой схеме оптических частот излучения лазера. Здесь ν_1 – исходная частота излучения лазера. В исходном состоянии при отключенных обратных связях эта частота может изменяться в относительно широких пределах, что показано широким спектром излучения на верхней диаграмме в

виде сигнала $\nu_1(t)$, как функции времени. Частота излучения на выходе первого АОМ отличается на величину частоты F_1 . То есть частота этого пучка света равна $\nu_2(t) = \nu_1(t) + F_1(t)$. Эта частота должна быть близка к частоте резонанса поглощения метановой ячейки.

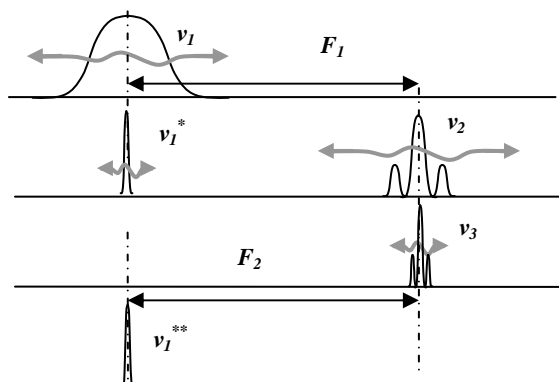


Рис. 18. Диаграммы преобразований частот в структуре по Рис. 17

Вследствие девиации частоты F_1 спектр этого пучка света имеет две боковые полосы, как показано на второй линии диаграммы. Быстрая петля обратной связи воздействует на лазер в среднем и стабилизирует его частоту по линии поглощения метана без разрешения сверхтонкой структуры. Вследствие этого частота лазера оказывается в среднем стабилизированной лучше, чем было бы, если бы обратная связь отсутствовала. Это сужает спектр исходного излучения, но в нем не возникают боковые полосы, что отражено в левой части второй линии диаграммы. Условно обозначим получаемую частоту излучения лазера символом $\nu_1^*(t)$.

С помощью второго АОМ второй луч света приобретает свой индивидуальный сдвиг частоты, в котором отсутствуют боковые полосы, имеющие место в луче на выходе первого АОМ. Но в нем присутствуют собственные боковые полосы, порождаемые модуляцией второй частоты, что показано в третьей линии диаграммы на Рис. 18. Частота на выходе второго АОМ равна $\nu_3(t) = \nu_1(t) + F_2(t)$. Эта частота должна быть близка к экстремуму поглощения второй метановой ячейки. Вследствие девиации второй частоты F_2 структура сверхтонких линий поглощения может быть зарегистрирована, и по результатам регистрации может включаться медленный контур автоподстройки. Путем сканирования среднего значения частоты F_2 с помощью дополнительного частотного сдвига δF можно достаточно точно исследовать сверхтонкую структуру поглощения второй метановой ячейки. Поскольку в подобных схемах, которые можно считать прототипом, используется телескопическое расширение пучка [13], можно

рекомендовать его использование и в данном случае. В результате такого исследования выявляется отклонение средней частоты ν_3 от экстремума сверхтонкой структуры. Для возвращения его в нужную область система автоподстройки должна воздействовать на частоту генератора G_1 . Таким образом, частота ν_3 в результате работы системы автоматической подстройки будет всегда равняться нужному значению, то есть совпадать с экстремумом поглощения в схеме с разрешением сверхтонкой структуры. Поскольку эта частота отличается от частоты излучения лазера только на величину добавки F_2 , и поскольку частота F_2 в среднем не изменяется, она задается нами, и ее значение в каждый момент времени нам точно известно, то в результате работы всей системы частота излучения оказывается стабилизированной по сверхтонкой структуре линий поглощения метана. При этом на лазер не подается никакого воздействия с целью модуляции его частоты излучения в области звуковых частот. На лазер в данной структуре подаются только сигналы медленной и быстрой автоподстройки частоты, каждый из этих сигналов содержит лишь корректирующую поправку частоты, но не содержит сигналов тестовой девиации, которые содержатся во всех аналогичных известных схемах. Поэтому окончательно спектр излучения лазера может быть представлен спектром $\nu_1^*(t)$ слева в нижней линии диаграммы Рис. 18.

Указанное техническое решение является интеллектуальной собственностью Института лазерной физики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как очень скромный человек, академик С.Н. Багаев, по-видимому, не стал бы «тратить время» на «юбилейную» статью. Он предпочитает двигаться вперед. Как талантливый организатор науки и «генератор идей», он, возможно, и сам не задумывался о том, какой мощный энергетический толчок к научным исследованиям он иногда дает тем, с кем он сотрудничает. Даже если это сотрудничество не превышает двух десятилетий, для автора этой статьи оно сопоставимо с целой жизнью.

Пожелаем ему крепкого здоровья и дальнейших успехов в его важных и крайне интересных научных исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сергей Николаевич Багаев. Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 10. С. 940. http://www.quantum-electron.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=qe&paper_id=2114
- [2] Википедия: Багаев Сергей Николаевич. https://ru.wikipedia.org/wiki/Багаев,_Сергей_Николаевич
- [3] В.А. Жмудь. Прецизионные системы управления

- лазерным излучением. Учеб. Пособие. Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2005. 152 с.
- [4] В.А. Жмудь. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. Пособие. Новосиб. гос. техн. ин-т. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. 116 с.
- [5] В. А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: специальные главы. Учебное пособие. Новосибирск. Издательство НГУ. 2010. 198 с.
- [6] В.А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. Ч.1. 63 с.
- [7] В.А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.2. 55 с.
- [8] В.А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. Ч.3. 50 с.
- [9] В.А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. Ч.4. 64с.
- [10] S.N. Bagaev, A.M.Belkin, A.S.Dychkov et al. Ultrastable, compact diode-pumped Nd:YAG-laser for precision measurements. QELS'1995, P.172–173.
- [11] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency standard at 732 nm based in iodine hyperfine transition used for high precision laser spectroscopy of Muonium. MPLP'97 - The second International symposium on Modern problem of laser physics. Novosibirsk, Russia, July 28 - August 2, 1997, pp. P111–P112.
- [12] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. Российско-Германский лазерный симпозиум - Новосибирск, 27.06 - .07.97 - Technical digest - p.P12–P13
- [13] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency standard at 732 nm based in iodine hyperfine transition used for high precision laser spectroscopy of Muonium. - MPLP'97 - Proceedings of the Second Int. Symposium on Modern Problem of Laser Physics: v.1, pp.377–386. Новосибирск, 1997.
- [14] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. Quantum Electronics. 2000. T. 30. № 7. С. 641–646.
- [15] С.Н. Багаев, А.С. Дычков, А.С. Ефимов и др. Создание абсолютного стандарта частоты для экспериментов по прецизионной спектроскопии мюония. Информационный бюллетень РФФИ. 1996. Т. 4. № 2. С. 1095.
- [16] S.N. Bagayev, S.V. Chepurov, A.S. Dychkov et al. Femtosecond optical clock for precise measurements. Technical Digest. V International Symposium 'Modern Problem of Laser Physics'- MPLP'2008 – Novosibirsk. P.61.
- [17] V. D. Gitelson, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud. A frequency-selective system for stabilizing the diode-laser radiation power without operating-point shift. Instruments and Experimental Techniques. Volume: 52. Issue: 1. P. 122–128 Published: JAN 2009.
- [18] А.С.Ефимов, В.А.Жмудь, И.В. Падюков. Прецизионный источник тока для полупроводникового лазера. Автометрия, 1997, N 3 с.111–115.
- [19] В.А. Жмудь, И.В. Падюков. Прецизионная микропроцессорная система стабилизации температуры. Автометрия. 1997, N 5, с. 115–120.
- [20] А.А. Воевода, В.А. Жмудь, А.Л. Соловьев. Цифровая система термостабилизации полупроводникового лазера: математическая модель и условия получения оптимального переходного процесса. Автометрия. N 3, 2000. С.109–121.
- [21] А.С. Ефимов, В.А. Жмудь, Д.Ю. Ивашко, И.В. Падюков. Прецизионное управление полупроводниковыми лазерами. ПТЭ, 2000г. N 4, с.105–110.
- [22] В.А. Васильев, В.А. Жмудь. Система термостабилизации диодного лазера. ПТЭ, 2000г. N 4, с.158–159.
- [23] В.А. Жмудь, А.Г. Соколов. Источник импульсного тока для инжекционных полупроводниковых лазеров. ПТЭ, 2000, N2, с.155–156
- [24] В.А. Жмудь. Автоматизированные системы управления полупроводниковыми лазерами для прецизионной спектроскопии. Гос. научно-техническая программа «Фундаментальная метрология» - Сб. отчетов за 1997 г. Новосибирск, 1998, с.173–177.
- [25] Д.О. Терешкин, В.А. Хличкин, В.А. Жмудь. Идентификация термоэлектрической батареи с датчиком температуры для термостатирования диодного лазера. Сборник научных трудов НГТУ. - 2007. - № 3(49). С.137–140.
- [26] Гительсон В.Д., Воевода А.А., Жмудь В.А. Частотно-избирательная стабилизация мощности излучения диодного лазера без смещения рабочей точки. ПТЭ. 2009. N1. с.135-141.
- [27] А.А.Воевода, В.А. Жмудь, Д.Ю. Ивашко и др. Автоматизированный стенд для снятия ватт - амперных характеристик полупроводникового лазера при различных температурах. ч.1. Сб. научн. трудов НГТУ, 1997 N 3 (8), с.91–96. ч.2. Сб. научн. трудов НГТУ, 1997, N 4 (9), с. 41–46.
- [28] В.А. Жмудь, А.Г. Соколов. Исследование помех в цепи диодного лазера. Научный вестник НГТУ, 2004, N 2(17), с.83–92.
- [29] В.Д. Гительсон, А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Активное подавление полосовых шумов полупроводникового лазера без смещения рабочей точки. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2007. 4(50). С.149–154.
- [30] В.А. Васильев, В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Цифровой частотомер. Патент РФ N 2210785 (приоритет от 13.07.01.) Оpubл.: Гос. реестр изобретений РФ. Бюлл. N23, 20.08.03. G01 R25/00, H03 D13/00
- [31] В.А. Васильев, В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Преобразователь масштаба времени. Патент РФ N 2210783 (приоритет от 20.08.01.) Оpubл.: Гос. реестр изобретений РФ. Бюлл. N23, 20.08.03. G01 R23/00
- [32] А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь. Цифровой частотомер. Патент РФ на изобретение N2278390. G01R 23/02. Оpubл. Бюлл. N17, от 20.06.06.
- [33] А.М. Гончаренко, В.А. Васильев, В.А.Жмудь. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент RU 2225012: H03D13. G01R25, G01R 21/00; G01R 29/02; H03D. Владельцы патента: Институт лазерной физики СО РАН.
- [34] В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Прецизионный частотомер для фундаментальной метрологии. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 2 (8). С. 73–80.
- [35] А.М.Гончаренко, С.В.Бугров, В.А.Жмудь. Мониторинг фазовых приращений прерывистого сигнала. Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Том 2. Выпуск 1, с. 61-64. ISSN 1818-7994.
- [36] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, В.М. Семибаламут, А.М. Гончаренко, С.В. Бугров. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент на изобретение №2470312. Заявка: 2010139880/28, 28.09.2010. Опубликовано: 20.12.2012. Патентообладатели: НГТУ, ИЛФ
- [37] А.М. Goncharenko, V.A. Zhmud', S.A. Avilov. Fast 3-Channel Precision Frequency Meter – Time Analyzer with Zero Dead Time Interval. Technical Digest of MPLP-2004 IV Int. Sympos. on Modern Problem of Laser Physics, Novosibirsk, Russia, August 22-27, 2004. P.290 – 291.
- [38] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, А.М. Гончаренко. Многоканальный прецизионный быстродействующий частотомер. Научный вестник НГТУ. 2005. N 1(19). С. 73–82.
- [39] В.А. Жмудь. Прецизионные измерения частоты для аттестации частотных стандартов. Автоматика и программная инженерия. 2014. 1(7). С. 104–119.
- [40] А.С. Ефимов, В.А. Жмудь. Синтезатор частоты со сверхмалым шагом для систем частотной и фазовой автоподстройки. Автометрия. 1996. N 2. с. 21–25.
- [41] А.С.Ефимов, В.А. Жмудь. Цифровой синхронный детектор с генератором медленного сигнала. ПТЭ, 2000, N3, с.45–48.
- [42] А.М. Гончаренко, А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Аттестация трехканального прецизионного быстродействующего частотомера // Научный вестник

- НГТУ. 2005. N 2. с. 175–178.
- [43] С.В. Бугров, А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь, А.А. Воевода. Программное обеспечение и функциональные возможности многоканального прецизионного быстродействующего частотомера. Научный вестник НГТУ. - 2006. - N 3(24). с.171–178.
- [44] А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь, А.А. Воевода, С.А. Авиллов. Микропроцессорный прецизионный трехканальный высокоскоростной частотомер без «мертвого времени». Приборы и техника эксперимента. 2007. N2. с. 78–83.
- [45] Воевода А.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. ч.1. Научный вестник НГТУ. 2009. N 4(37). С.25–32.
- [46] Воевода А.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. ч.2. Научный вестник НГТУ. 2010. N 1(38). С.35–74.
- [47] Гончаренко А.М., Жмудь В.А., Прецизионный высокочастотный фазометр для измерения нановибраций. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2009. 1(55). С. 108–117.
- [48] Гончаренко А.М., Бугров С.В., Воевода А.А., Жмудь В.А. Метрологические испытания цифрового прецизионного фазометра. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2009. 2(56). С. 109–114.
- [49] B.D. Borisov, A.M. Goncharenko, V.A. Vasiliev, V.A. Zhmud'. Precise measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 162–166.
- [50] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260–264.
- [51] С.В. Бугров, В.А. Жмудь, Е.В. Прохоренко, А.М. Гончаренко. Методы и средства нановиброметрии. Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП – 2010 в 7 тт. т.3. Новосибирск. Изд-во НГТУ. С.119–123. ISBN: 978-1-4244-8208-5
- [52] A.V.Liapidevskiy, V.A. Zhmud, D.O. Tereshkin, V.I. Gololobov. Modelling researches of the limitations for fault-tolerance measurements of ultra small displacements and vibrations. 2012. Proceedings of the 2nd IASTED Asian Conference on Modelling, Identification, and Control, Asia-MIC 2012 P.1-11, DOI: 10.2316. P.2012.769–026.
- [53] В.А. Васильев, В.А. Жмудь, Ю.Н. Ильинович, В.М. Семибаламут, Ю.Н. Фомин. Детектирование приращения текущей фазы в лазерном измерителе малых вибраций на больших базовых расстояниях. ПТЭ, 2002, N 3, с.98–100.
- [54] В.А. Жмудь. Широкополосная высокочувствительная фазометрия для лазерных виброметров. Сб. научн. трудов НГТУ 2002, Новосибирск, N 1(27), с.97–102.
- [55] Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Семибаламут В.М., Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Комплекс для измерения сверхмалых приливных деформаций скальных пород на основе He-Ne-лазера. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 3 (9). С. 54–65. НГТУ, ИЛФ, Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск, Россия).
- [56] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics. Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 176–183.
- [57] V.A. Orlov, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The essence of the laser methods and optic setup structures for the monitoring of Earth seismic dynamics. Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.67–72.
- [58] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут. Система стабилизации частоты излучения лазера. Патент на изобретение. RU 2431909 C2, МКП H01S 3/10 (2006.01). Заявка 2009137713/28 от 12.10.2009. Дата начала срока действия 12.10.2009. дата подачи заявки 12.10.2009. дата публикации заявки: 20.04.2011. Бюл. №11. Опубликовано 20.10.2011, бюл. № 29. Правообладатель: Учреждение РАН СО РАН ИЛФ.
- [59] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10–13 September, 2011, Additional volume, pp.39–42.
- [60] V. A. Zhmud. Possible ways of the development of the phase laser stabilization techniques: tasks and methods of the decision. Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.43–46.
- [61] С.В. Бармасов, В.А. Жмудь, А.А. Воевода. Фазовая стабилизация частоты биений двух идентичных лазеров для спектроскопии. Автометрия, 1999, N 2, с.78–83.
- [62] В.А. Жмудь, С.В. Бармасов, В.Д. Гительсон. Электронная система стабилизации частоты He-Ne лазера по линиям поглощения метана. ПТЭ, 1999г. N 4, с.127–133.
- [63] Бармасов С.В., Жмудь В.А. Аппаратура для фазовой автоподстройки разностной частоты двух лазеров. ПТЭ, 2000, N3, с.104–106.
- [64] В.А. Жмудь. Метод разделения движений для подавления возмущений в лазерных системах. Автометрия, 2002, N5, с.119-126.
- [65] В.А. Жмудь. Частотные измерения в прецизионных лазерных системах. Научный вестник НГТУ. - 2002. - N 2(13). с.127-136.
- [66] Гончаренко А.М., Васильев В.А., Жмудь В.А. Метод повышения чувствительности лазерных виброметров. Автометрия, 2003 (39), N 2, с.43–47.
- [67] Воевода А.А., Жмудь В.А. Системы фазовой автоподстройки частоты для лазерных спектрометров Сб. научн. трудов НГТУ, 1998 N 1 (10), с.15–24.
- [68] Бугров С.В., Жмудь В.А., Семибаламут В.М. Однополосная стабилизация лазерного излучения. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2009. 1(55). С. 86–91.
- [69] Жмудь В.А., Печурин В.А. Снижение дрейфа тракта синхронного детектора при стабилизации частоты лазера - Сб. научн. трудов НГТУ 1999, Новосибирск, N 3(16), с.141–144.
- [70] V.A. Zhmud', S. Ayoub, V. Hassuoneh. frequency Feedback laser systems. Proceedings of the IASTED International Conference Automation, Control and Information technology. June 2002. Novosibirsk, Russia, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zurich, pp.338-341.
- [71] A.A. Voevoda, A.S. Farnosov, V.A. Zhmud'. High-speed phase-locked-loop frequency control of identical lasers. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 346–351.
- [72] В.А. Воевода, В.Д. Гительсон, В.А. Жмудь. Фазовая автоподстройка частоты лазерного излучения. Сборник научных трудов НГТУ, 2004. N 4 (38). С. 21–28.
- [73] Gitelson V.D., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Phase locking of laser frequency for metrological systems. Proceedings of Second IASTED international Multi-Conference Automation, Control and Applications (ACIT-ACA). 2005. Novosibirsk. Russia. P.399–403.
- [74] В.А. Жмудь. Интерферометр. Патент № 107346. Правообладатель: ИЛФ. Заявка № 2011100243, приоритет от 11 января 2011 г., зарег. в Гос. реестре 10.08.2011 г., срок действия 11.01.2021 г. Опубликовано в бюл.е №22, 10.08.2011. МПК G01 B 9/02 (2006.01).
- [75] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для системы с обратной связью. Патент РФ RU 2368933 C1. G05B 11/14. Опубл.27.09.09. Бюл. № 27. Заявка № 2008110243, Правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [76] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для многомерного объекта. Патент РФ RU 93994 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Опубл.10.05.10. Бюл. № 27. Заявка №

- 2009138894/22 от 20.10.2009, правообладатель: ГОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет и Институт лазерной физики СО РАН.
- [77] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут. Регулятор для систем с обратной связью. Патент РФ RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Опубл. 27.09.08. Бюл. № 27. Заявка № 2008108410/22 от 04.03.2008, правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [78] Жмудь В.А., Ядрышников О.Д., Заворин А.Н., Полищук А.В. Адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин. Патент на изобретение № 2522899. МПК G05D 1/00 (2006.01). Заявка № 2012152697. Приоритет от 06.12.2012. Зарегистрировано в реестре изобретений РФ 21.05.2014. Срок действия до 06.12.2032. Правообладатель НГТУ.
- [79] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, А.А. Воевода. Адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин. Патент на изобретение RU № 2457529. Заявка № 2011100407. Зарегистрировано 27.07.2012. Правообладатель: ИЛФ.
- [80] В.А. Васильев, А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Новые подходы к разработке адаптивных цифровых ПИД-регуляторов. Сборник научных трудов НГТУ, 2006. N 3 (45). С. 11–18.
- [81] Жмудь В.А., Кирдянов И.Н. Высоковольтный операционный усилитель для пьезокерамического модулятора длины газовых и твердотельных лазеров - ПТЭ, 1998, N 1, с.150–151.
- [82] А.К. Дмитриев, В.А. Жмудь, М.В. Охупкин. Лазерная спектроскопия, свободная от квадратичного эффекта Доплера. Информационный бюллетень РФФИ. 1994. Т. 2. № 2. С. 355.
- [83] А.К. Дмитриев, Д.Г. Бабушкин, С.В. Бармасов и др. Нелинейная лазерная спектроскопия на компонентах дублета отдачи. Информационный бюллетень РФФИ. 1997. Т. 5. № 2. С. 538.
- [84] А.К. Дмитриев, Д.Г. Бабушкин, С.В. Бармасов и др. Нелинейная лазерная спектроскопия на компонентах дублета отдачи. Информационный бюллетень РФФИ. 1999. Т. 7. № 2. С. 374.
- [85] А.А. Воевода, В.А. Жмудь, С.В. Бармасов. Прецизионное управление лазерным спектрометром с помощью синтезаторов частоты, персональной ЭВМ и цифроаналогового интерфейса. - Сб. научн. трудов НГТУ 1998, Новосибирск, N 4(13), с.145–152.
- [86] В.А. Жмудь, В.А. Печурин. Прецизионное управление гетеродинами лазерным спектрометром. Четвертый сибирский конгресс по промышленной и прикладной математике (ИНПРИМ-2000). Тезисы докладов. Часть IV. Новосибирск, изд-во Института математики СО РАН, с.25.
- [87] А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Синтез управления для системы АПЧ оптимального стандарта частоты на He-Ne/CH₄-лазере. Российская научно-техническая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникации» - тез. Докл. т.2., с.26–27. Новосибирск, 1996
- [88] Б.Д. Борисов, В.А. Васильев, А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь. Методика оценки стабильности стандартов частоты. Автометрия, 2002, N 3, с.104–112.
- [89] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov et al. Absolute frequency measurements in precision laser spectroscopy of Muonium. SPIE Proceedings Vol. 3736, ICONO '98: Quantum Optics, Interference Phenomena in Atomic Systems, and High-Precision Measurements, Paper N: 3736-36, ISBN: 0-8194-3210-5, 452 pages Published 1999, Meeting Date: 06/29 - 07/03/98, Moscow, Russia pp.310–318.
- [90] А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Возможные пути повышения кратковременной стабильности лазерных стандартов частоты. Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Т.2, вып.2. Квантовая оптика, квантовая электроника. С.36–39.
- [91] В.А. Жмудь. Разработка автоматизированной системы адаптивного управления спектрометром сверхвысокого разрешения и мобильного стандарта частоты на его основе. - Гос. научно-техническая программа «Фундаментальная метрология» - Сб. отчетов за 1996 г. Новосибирск, 1996, с.158–162.
- [92] V.A. Zhmud'. Estimation of the instability of the Laser frequency Standards. Proceedings of the IASTED

International Conference Automation, Control and Information technology. June 2002. Novosibirsk, Russia, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zurich, pp. 9–13.

Scientific School of Academician S.N. Bagaev. On the Anniversary of the Founder

V.A. ZHMUD

This year, at the 9-th of September, we celebrate the 75-years Anniversary of the director of Institute of Laser Physics SB RAS, academician of Russian Academy of Sciences, Sergey Nikolayevich Bagaev.

At the same year, we celebrated the 20 years of the Institute of Laser Physics SB RAS, many years leading by Sergey Bagaev.

S.N Bagaev has initiated, organized and accomplished many important science researches on the field of laser physics, quantum electronics, non-linear and quantum optics.

Under his supervision many great projects were done. Laser basic metrology, laser medicine, laser technology and laser communication techniques, super precision micro displacements measurer and laser cutting setup, femtosecond laser, optical clocks, ultra-high power femtosecond lasers and many other various devices on the base of solid, gas and semiconductor lasers. The list of the developments of his institute, under his science supervision, becomes greater with each year.

With his great science and organizing contribution the Faculty of Physics and Techniques was reorganized. He with his science staff has organized the Department of Laser Systems in NSTU, which already has its reach history and many significant results.

He is chairperson of the Dissertation Council, which takes to defend the dissertations on the specialties “Laser Physics” and “Optics”. Under his science supervision, many scientists prepared and defended their dissertations. Many of them work in NSTU. Among them, there are Professor A.K. Dmitriev, dean of the Faculty of Physics and Techniques, professors Ye.A. Titov, M.N. Skvortsov, A.M. Razhev and many others. Total amount of them is 10 Doctors of sciences and about 30 Mastres of sciences (PhD).

Many authors of the papers published in these Proceedings consider Sergey Nikolayevich Bagaev as their science supervisor. Among they are professors V.A. Zhmud and V.A. Orlov, deputy-professor V.M. Semibalamut, Dr. Yu. N. Fomin, aspirant D.O. Tereshkin.

We all warmly congratulate academician S. N. Bagaev with the Anniversary and wish him health and successes.

REFERENCES

- [1] Sergej Nikolaevich Bagaev. Kvantovaja jelektronika. 2001. T. 31, № 10. S. 940. <http://www.quantum->

- electron.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=qe&paper_id=2114
- [2] Википедия: Bagaev Sergej Nikolaevich. https://ru.wikipedia.org/wiki/Bagaev,_Sergej_Nikolaevich
- [3] V.A. Zhmud'. Precizionnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem. Ucheb. Posobie. Novosib. gos. un-t. Novosibirsk, 2005. 152 s.
- [4] V.A. Zhmud'. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. Posobie. Novosib. gos. tehn. in-t. Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. 116 c.
- [5] V. A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: special'nye glavj. Uchebnoe posobie. Novosibirsk. Izdatel'stvo NGU. 2010. 198 s.
- [6] V.A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: Ucheb. posobie. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 1998. Ch.1. 63 s.
- [7] V.A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: Ucheb. posobie. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 1999. Ch.2. 55 s.
- [8] V.A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: Ucheb. posobie. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2000. Ch.3. 50 s.
- [9] V.A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: Ucheb. posobie. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002. Ch.4. 64s.
- [10] S.N. Bagaev, A.M.Belkin, A.S.Dychkov et al. Ultrastable, compact diode-pumped Nd:YAG-laser for precision measurements. QELS'1995, P.172–173.
- [11] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency standard at 732 nm based in iodine hyperfine transition used for high precision laser spectroscopy of Muonium. MPLP'97 - The second International symposium on Modern problem of laser physics. Novosibirsk, Russia, July 28 - August 2, 1997, pp. P111–P112.
- [12] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. Rossijsko-Germanskij lazernyj simpozium - Novosibirsk, 27.06 - .07.97 - Technical digest - p.P12–P13
- [13] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency standard at 732 nm based in iodine hyperfine transition used for high precision laser spectroscopy of Muonium. - MPLP'97 - Proceedings of the Second Int. Symposium on Modern Problem of Laser Physics: v.1, pp.377–386. Novosibirsk, 1997.
- [14] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. Quantum Electronics. 2000. T. 30. № 7. S. 641–646.
- [15] S.N. Bagaev, A.S. Dychkov, A.S. Efimov i dr. Sozdanie absoljutnogo standartu chastoty dlja jeksperimentov po precizionnoj spektroskopii mjuonija. Informacionnyj bjulleten' RFFI. 1996. T. 4. № 2. S. 1095.
- [16] S.N. Bagayev, S.V. Chepurov, A.S. Dychkov et al. Femtosecond optical clock for precise measurements. Technical Digest. V International Symposium 'Modern Problem of Laser Physics'- MPLP'2008 – Novosibirsk. P.61.
- [17] V. D. Gitelson, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud. A frequency-selective system for stabilizing the diode-laser radiation power without operating-point shift. Instruments and Experimental Techniques. Volume: 52. Issue: 1. P. 122–128 Published: JAN 2009.
- [18] A.S.Efimov, V.A.Zhmud', I.V. Padjukov. Precizionnyj istochnik toka dlja poluprovodnikovogo lazera. Avtometrija, 1997, N 3 s.111–115.
- [19] V.A. Zhmud', I.V. Padjukov. Precizionnaja mikroprocessornaja sistema stabilizacii temperatury. Avtometrija. 1997, N 5, s. 115–120.
- [20] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud', A.L. Solov'ev. Cifrovaja sistema termostabilizacii poluprovodnikovogo lazera: matematicheskaja model' i uslovija poluchenija optimal'nogo perehodnogo processa. Avtometrija. N 3, 2000. C.109–121.
- [21] A.S. Efimov, V.A. Zhmud', D.Ju. Ivashko, I.V. Padjukov. Precizionnoe upravlenie poluprovodnikovymi lazerami. PTJe, 2000g. N 4, s.105–110.
- [22] V.A. Vasil'ev, V.A. Zhmud'. Sistema termostabilizacii diodnogo lazera. PTJe, 2000g. N 4, s.158–159.
- [23] V.A. Zhmud', A.G. Sokolov. Istochnik impul'snogo toka dlja inzhekcionnyh poluprovodnikovyh lazerov. PTJe, 2000, N2, s.155–156
- [24] V.A. Zhmud'. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija poluprovodnikovymi lazerami dlja precizionnoj spektroskopii. Gos. nauchno-tehnicheskaja pro-programma «Fundamental'naja metro-logija» - Sb. otchetov za 1997 g. Novo-si-birsk, 1998, s.173–177.
- [25] D.O. Tereshkin, V.A. Hlichkin, V.A. Zhmud'. Identifikacija termoelektricheskoj batarei s datchikom temperatury dlja termostatirovanija diodnogo lazera. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. - 2007. - № 3(49). S.137–140.
- [26] Gitel'son V.D., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Chastotno-izbiratel'naja stabilizacija moshhnosti izlucheniya diodnogo lazera bez smeshhenija rabochej točki. PTJe. 2009. N1. s.135-141.
- [27] A.A.Voevoda, V.A. Zhmud', D.Ju. Ivashko i dr. Avtomatizirovannyj stend dlja snjatija vatt - ampnyh harakteristik poluprovodnikovogo lazera pri razlichnyh temperaturah. ch.1. Sb. nauchn. trudov NGTU, 1997 N 3 (8), s.91–96. ch.2. Sb. nauchn. trudov NGTU, 1997, N 4 (9), s. 41–46.
- [28] V.A. Zhmud', A.G. Sokolov. Issledovanie pomeh v cepi diodnogo lazera. Nauchnyj vestnik NGTU, 2004, N 2(17), s.83–92.
- [29] V.D. Gitel'son, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud'. Aktivnoe podavlenie polosovyh shumov poluprovodnikovogo lazera bez smeshhenija rabochej točki. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. Novosibirsk. 2007. 4(50). S.149–154.
- [30] V.A. Vasil'ev, V.A. Zhmud', A.M. Goncharenko. Cifrovaj chastotomer. Patent RF N 2210785 (prioritet ot 13.07.01.) Opubl.: Gos. reestr izobretenij RF. Bjull. N23, 20.08.03. G01 R25/00, H03 D13/00
- [31] V.A. Vasil'ev, V.A. Zhmud', A.M. Goncharenko. Preobrazovatel' masshtaba vremeni. Patent RF N 2210783 (prioritet ot 20.08.01.) Opubl.: Gos. reestr izobretenij RF. Bjull. N23, 20.08.03. G01 R23/00
- [32] A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud'. Cifrovaj chastotomer. Patent RF na izobretenie N2278390. G01R 23/02. Opubl. Bjull. N17, ot 20.06.06.
- [33] A.M. Goncharenko, V.A. Vasil'ev, V.A.Zhmud'. Fazometr s geterodinnym preobrazovanijem chastoty. Patent RU 2225012: H03D13. G01R25, G01R 21/00; G01R 29/02; H03D. Vladel'cy patenta: Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [34] V.A. Zhmud', A.M. Goncharenko. Precizionnyj chastotomer dlja fundamental'noj metrologii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2014. № 2 (8). S. 73–80.
- [35] A.M.Goncharenko, S.V.Bugrov, V.A.Zhmud'. Monitoring fazovyh prirashhenij preryvistogo signala. Vestnik NGU. Serija: Fizika. 2007. Tom 2. Vypusk 1, s. 61-64. ISSN 1818-7994.
- [36] V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, V.M. Semibalamut, A.M. Goncharenko, S.V. Bugrov. Fazometr s geterodinnym preobrazovanijem chastoty. Patent na izobretenie №2470312. Zajavka: 2010139880/28, 28.09.2010. Opublikovano: 20.12.2012. Patentoobladateli: NGTU, ILF
- [37] A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud', S.A. Avilov. Fast 3-Channel Precision Frequency Meter – Time Analyzer with Zero Dead Time Interval. Technical Digest of MPLP-2004 IV Int. Sympos. on Modern Problem of Laser Physics, Novosibirsk, Russia, August 22–27, 2004. P.290 – 291.
- [38] V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, A.M. Goncharenko. Mnogokanal'nyj precizionnyj bystrodejstvujushhij chastotomer. Nauchnyj vestnik NGTU. 2005. N 1(19). S. 73–82.
- [39] V.A. Zhmud'. Precizionnye izmereniya chastoty dlja attestacii chastotnyh standartov. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2014. 1(7). S. 104–119.
- [40] A.S. Efimov, V.A. Zhmud'. Sintezator chastoty so sverhmalym shagom dlja sistem chastotnoj i fazovoj avtopodstrojki. Avtometrija. 1996. N 2. s. 21–25.
- [41] A.S.Efimov, V.A. Zhmud'. Cifrovaj sinhronnyj detektor s generatorom medlennogo signala. PTJe, 2000, N3, s.45–48.
- [42] A.M. Goncharenko, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud'. Attestacija trehkanal'nogo precizionnogo bystrodejstvujushhego chastotomera // Nauchnyj vestnik NGTU. 2005. N 2. s. 175–178.
- [43] S.V. Bugrov, A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud', A.A.

- Voevoda. Programmnoe obespechenie i funkcional'nye vozmozhnosti mnogokanal'nogo precizionnogo vysokoskorostnoj chastotomera. Nauchnyj vestnik NGTU. - 2006. - N 3(24). s.171-178.
- [44] A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, S.A. Avilov. Mikroprocessornyj precizionnyj trehkanal'nyj vysokoskorostnoj chastotomer bez «mertvogo vremeni». Pribory i tehnika jeksperimenta. 2007. N2. s. 78-83.
- [45] Voevoda A.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Fazometry dlja radiochastotnyh i lazernyh izmeritelej peremeshhenij i vibracij. ch.1. Nauchnyj vestnik NGTU. 2009. N 4(37). S.25-32.
- [46] Voevoda A.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Fazometry dlja radiochastotnyh i lazernyh izmeritelej peremeshhenij i vibracij. ch.2. Nauchnyj vestnik NGTU. 2010. N 1(38). S.35-74.
- [47] Goncharenko A.M., Zhmud' V.A., Precizionnyj vysokochastotnyj fazometr dlja izmerenija nanovibracij. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. Novosibirsk. 2009. 1(55). S. 108-117.
- [48] Goncharenko A.M., Bugrov S.V., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Metrologicheskie ispytaniya cifrovogo precizionnogo fazometra. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. Novosibirsk. 2009. 2(56). S. 109-114.
- [49] B.D. Borisov, A.M. Goncharenko, V.A. Vasiliev, V.A. Zhmud'. Precise measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 162-166.
- [50] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260-264.
- [51] S.V. Bugrov, V.A. Zhmud', E.V. Prohorenko, A.M. Goncharenko. Metody i sredstva nanovibrometrii. Materialy X Mezhdunarodnoj konferencii «Aktual'nye problemy jelektronnogo priborostroeniya» APJeP - 2010 v 7 tt. t.3. Novosibirsk. Izd-vo NGTU. S.119-123. ISBN: 978-1-4244-8208-5
- [52] A.V.Liapidevskiy, V.A. Zhmud, D.O. Tereshkin, V.I. Gololobov. Modelling researches of the limitations for fault-tolerance measurements of ultra small displacements and vibrations. 2012. Proceedings of the 2nd IASTED Asian Conference on Modelling, Identification, and Control, Asia-MIC 2012 P.1-11, DOI: 10.2316. P.2012.769-026.
- [53] V.A. Vasil'ev, V.A. Zhmud', Ju.N. Il'janovich, V.M. Semibalamut, Ju.N. Fomin. Detektirovanie prirashhenija tekushhej fazy v lazernom izmeritele malyh vibracij na bol'shih bazovyh rasstojanijah. PTJe, 2002, N 3, s.98-100.
- [54] V.A. Zhmud'. Shirokopolosnaja vysokochuvstvitel'naja fazometrija dlja lazernyh vibrometrov. Sb. nauchn. trudov NGTU 2002, Novosibirsk, N 1(27), s.97-102.
- [55] Orlov V.A., Fomin Ju.N., Semibalamut V.M., Tereshkin D.O., Zhmud' V.A. Kompleks dlja izmerenija sverhmalyh prilivnyh deformacij skal'nyh porod na osnove He-Ne-lazera. Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2014. № 3 (9). S. 54-65. NGTU, ILF, Geofizicheskaja sluzhba SO RAN (Novosibirsk, Rossija).
- [56] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics. Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th - 12th September 2011. Novosibirsk, NGTU. pp. 176-183.
- [57] V.A. Orlov, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The essence of the laser methods and optic setup structures for the monitoring of Earth seismic dynamics. Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10 - 13 September, 2011, Additional volume, pp.67-72.
- [58] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut. Sistema stabilizacii chastoty izlucheniya lazera. Patent na izobrenie. RU 2431909 C2, MKP H01S 3/10 (2006.01). Zajavka 2009137713/28 ot 12.10.2009. Data nachala sroka dejstvija 12.10.2009. data podachi zajavki 12.10.2009. data publikacii zajavki: 20.04.2011. Bjul. №11. Opublikovano 20.10.2011, bjul. № 29. Pravoobladatel': Uchrezhdenie RAN SO RAN ILF.
- [59] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10-13 September, 2011, Additional volume, pp.39-42.
- [60] V. A. Zhmud. Possible ways of the development of the phase laser stabilization techniques: tasks and methods of the decision. Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10 - 13 September, 2011, Additional volume, pp.43-46.
- [61] S.V. Barmasov, V.A. Zhmud', A.A. Voevoda. Fazovaja stabilizacija chastoty bnenij dvuh identichnyh lazerov dlja spektrometrii. Avtometrija, 1999, N 2, s.78-83.
- [62] V.A. Zhmud', S.V. Barmasov, V.D. Gitel'son. Jelektronnaja sistema stabilizacii chastoty He-Ne lazera po linijam pogloshhenija metana. PTJe, 1999g. N 4, s.127-133.
- [63] Barmasov S.V., Zhmud' V.A. Apparatura dlja fazovoj avtopodstrojki raznostnoj chastoty dvuh lazerov. PTJe, 2000, N3, s.104-106.
- [64] V.A. Zhmud'. Metod razdelenija dvizhenij dlja podavlenija vozmushhenij v lazernyh sistemah. Avtometrija, 2002, N5, c.119-126.
- [65] V.A. Zhmud'. Chastotnye izmerenija v precizionnyh lazernyh sistemah. Nauchnyj vestnik NGTU. - 2002. - N 2(13). s.127-136.
- [66] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Metod povyshenija chuvstvitel'nosti lazernyh vibrometrov. Avtometrija, 2003 (39), N 2, s.43-47.
- [67] Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Sistemy fazovoj avtopodstrojki chastoty dlja lazernyh spektrometrov Sb. nauchn. trudov NGTU, 1998 N 1 (10), s.15-24.
- [68] Bugrov S.V., Zhmud' V.A., Semibalamut V.M. Odnopolosnaja stabilizacija lazernogo izlucheniya. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. Novosibirsk. 2009. 1(55). S. 86-91.
- [69] Zhmud' V.A., Pechurin V.A. Snizhenie drejfa trakta sinhronnogo detektora pri stabilizacii chastoty lazera - Sb. nauchn. trudov NGTU 1999, Novosibirsk, N 3(16), s.141-144.
- [70] V.A. Zhmud', S. Ayoub, V. Hassuoneh. frequency Feedback laser systems. Proceedings of the IASTED International Conference Automation, Control and Information technology. June 2002. Novosibirsk, Russia, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zurich, pp.338-341.
- [71] A.A. Voevoda, A.S. Farnosov, V.A. Zhmud'. High-speed phase-locked-loop frequency control of identical lasers. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 346-351.
- [72] A.A. Voevoda, V.D. Gitel'son, V.A. Zhmud'. Fazovaja avtopodstrojka chastoty lazernogo izlucheniya. Sbornik nauchnyh trudov NGTU, 2004. N 4 (38). S. 21-28.
- [73] Gitelson V.D., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Phase locking of laser frequency for metrological systems. Proceedings of Second IASTED international Multi-Conference Automation, Control and Applications (ACIT-ACA). 2005. Novosibirsk. Russia. P.399-403.
- [74] V.A. Zhmud'. Interferometr. Patent № 107346. Pravoobladatel': ILF. Zajavka № 2011100243, prioritet ot 11 janvarja 2011 g., zareg. v Gos. reestre 10.08.2011 g., srok dejstvija 11.012021 g. Opublikovano v bjul.e №22, 10.08.2011. MPK G01 B 9/02 (2006.01).
- [75] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut, R.Ju. Ishimcev. Reguljator dlja sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 2368933 S1. G05B 11/14. Opubl.27.09.09. Bjul. № 27. Zajavka № 2008110243, Pravoobladatel': Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [76] V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, V.M. Semibalamut, R.Ju. Ishimcev. Reguljator dlja mnogomernogo ob#ekta. Patent RF RU 93994 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.10.05.10. Bjul. № 27. Zajavka № 2009138894/22 ot 20.10.2009, pravoobladatel': GOU VPO Novosibirskij gosudarstvennyj tehnickij universitet i Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [77] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut. Reguljator dlja sistem s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.27.09.08. Bjul. № 27. Zajavka № 2008108410/22 ot 04.03.2008, pravoobladatel': Institut

- lazernoj fiziki SO RAN.
- [78] Zhmud' V.A., Jadrishnikov O.D., Zavorin A.N., Polishhuk A.V. Adaptivnaja sistema dlja regulirovanija i stabilizacii fizicheskikh velichin. Patent na izobretenie № 2522899. MPK G05D 1/00 (2006.01). Zajavka № 2012152697. Prioritet ot 06.12.2012. Zaregistrovano v reestre izobretenij RF 21.05.2014. Srok dejstvija do 06.12.2032. Pravoobladatel' NGTU.
- [79] V.A.Zhmud', V.M. Semibalamut, A.A. Voevoda. Adaptivnaja sistema dlja regulirovanija i stabilizacii fizicheskikh velichin. Patent na izobretenie RU № 2457529. Zajavka № 2011100407. Zaregistrovano 27.07.2012. Pravoobladatel': ILF.
- [80] V.A. Vasil'ev, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud'. Novye podhody k razrabotke adaptivnyh cifrovyh PID-reguljatorov. Sbornik nauchnyh trudov NGTU, 2006. N 3 (45). S. 11–18.
- [81] Zhmud' V.A., Kirdjanov I.N. Vysokovol'tnyj operacionnyj usilitel' dlja p'ezokeramicheskogo moduljatora dliny gazovyh i tverdotel'nyh lazerov - PTJe, 1998, N 1, s.150–151.
- [82] A.K.Dmitriev, V.A.Zhmud', M.V. Ohapkin. Lazernaja spektroskopija, svobodnaja ot kvadraticnogo jeffekta Doplera. Informacionnyj bjulleten' RFFI. 1994. T. 2. № 2. S. 355.
- [83] A.K. Dmitriev, D.G.Babushkin, S.V. Barmasov i dr. Nelinejnaja lazernaja spektroskopija na komponentah dubleta otдачи. Informacionnyj bjulleten' RFFI. 1997. T. 5. № 2. S. 538.
- [84] A.K. Dmitriev, D.G.Babushkin, S.V. Barmasov i dr. Nelinejnaja lazernaja spektroskopija na komponentah dubleta otдачи. Informacionnyj bjulleten' RFFI. 1999. T. 7. № 2. S. 374.
- [85] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud', S.V. Barmasov. Precizionnoe upravlenie lazernym spektrometrom s pomoshh'ju sintezatorov chastoty, personal'noj JeVM i cifroanalogovogo interfejsa. - Sb. nauchn. trudov NGTU 1998, Novosibirsk, N 4(13), s.145–152.
- [86] V.A.Zhmud', V.A. Pechurin. Precizionnoe upravlenie geterodinnym lazernym spektrometrom. Chetvertyj sibirskij kongress po industrial'noj i prikladnoj matematike (INPRIM-2000). Tezisy dokladov. Chast' IV. Novosibirsk, izd-vo Instituta matematiki SO RAN, s.25.
- [87] A.A.Voevoda, V.A. Zhmud'. Sintez upravlenija dlja sistemy APCh optimal'nogo standarta chastoty na He-Ne/CH4-lazere. Rossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Informatika i problemy telekommunikacii» -tez. Dokl. t.2., s.26–27. Novosibirsk, 1996
- [88] B.D.Borisov, V.A.Vasil'ev, A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud'. Metodika ocenki stabil'nosti standartov chastoty. Avtometrija, 2002, N 3, s.104–112.
- [89] S.N. Bagayev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov et al. Absolute frequency measurements in precision laser spectroscopy of Muonium. SPIE Proceedings Vol. 3736, ICONO '98: Quantum Optics, Interference Phenomena in Atomic Systems, and High-Precision Measurements, Paper N: 3736-36, ISBN: 0-8194-3210-5, 452 pages Published 1999, Meeting Date: 06/29 - 07/03/98, Moscow, Russia pp.310–318.
- [90] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud'. Vozmozhnye puti povyshenija kratkovremennoj stabil'nosti lazernyh standartov chastoty. Vestnik NGU. Serija: Fizika. 2007. T.2, vyp.2. Kvantovaja optika, kvantovaja jelektronika. S.36–39.
- [91] V.A. Zhmud'. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy adaptivnogo upravlenija spektrometrom sverhvsokogo razreshenija i mobil'nym standartom chastoty na ego osnove. - Gos. nauchno-tehnicheskaja programma «Fundamental'naja metrologija» - Sb. otchetov za 1996 g. Novosibirsk, 1996, s.158–162.
- [92] V.A. Zhmud'. Estimation of the instability of the Laser frequency Standards. Proceedings of the IASTED International Conference Automation, Control and Information technology. June 2002. Novosibirsk, Russia, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zurich, pp. 9–13.



Вадим Аркадьевич Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, (Новосибирск, Россия), ведущий научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН, доктор технических наук, доцент, автор более чем 300 научных работ, включая более 20 патентов, 12 учебных пособий.
E-mail: zhmud@corp.nstu.ru