

# ИССЛЕДОВАНИЯ В РАМКАХ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН, ВЫПОЛНЕННЫХ НА КАФЕДРЕ РАДИОФИЗИКИ

В.А. Свич, С.Ф. Дюбко, В.М. Кузьмичев, В.М. Шульга\*  
*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина*

*\*Институт радиоастрономии НАН Украины(Харьков)*

Поступила в редакцию 15.02.2004

Обобщены результаты комплексных исследований кафедры квантовой радиофизики Харьковского национального университета имени В.Н.Каразина за 50 лет с момента ее открытия. В частности, речь идет о разработках, созданиях и испытаниях измерителей мощности и энергии, создании и исследовании квантовых генераторов субмиллиметрового диапазона, спектроскопии высокого разрешения атомов и молекул в диапазоне ММ и субММ длин волн, ЭПР-спектроскопии.

## ЛАЗЕРЫ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

1. Газоразрядные молекулярные лазеры субММ диапазона длин волн.

Проблема генерирования электромагнитных колебаний в диапазоне субММ волн, решение которой определяет прогресс в освоении этого диапазона, оказалась одной из самых трудных проблем радиофизики. Только в 60-е годы удалось создать первые субММ лампы обратной волны (ЛОВ), а несколько лет спустя – первые газо-разрядные лазеры. Граничная частота субММ ЛОВ до сих пор фактически не превышает 1 ТГц, т.е. источники этого типа перекрывают лишь треть часть субММ диапазона длин волн, его длинноволновую часть. Однако, потребность в освоении всего субММ диапазона длин волн назрела давно и появление в 60-х годах генераторов нового типа – лазеров вселяло надежду на возможность проведения этих источников излучения в дальнюю инфракрасную область и субмиллиметровый диапазон. Действительно, уже в 1964 году появилось первое сообщение (Гобби, Матиус, Кронер) [1А] о запуске молекулярных лазеров на молекулах  $H_2O$  ( $\lambda = 78$  мкм, 118 мкм) и  $HCN$  ( $\lambda = 337$  мкм и  $\lambda = 311$  мкм). Лазеры развивали в непрерывном режиме мощность в единицы мВт и давали превосходное когерентное излучение. Появление этих лазеров рассматривалось в свое время как крупное достижение квантовой радиофизики.

Испытания разрабатываемой на кафедре измерительной аппаратуры (волномеры, частотомеры, детекторы излучения) были возможны только в длинноволновой области диапазона вблизи 300 ГГц, где работали имеющиеся в СССР ЛОВ. Это ограничение побудило к созданию источников излучения без коротковолновой гра-

ницы. Такими источниками представлялись молекулярные газоразрядные лазеры. По собственной инициативе доц. С. Дюбко и аспирант В. Свич в 1967 году воспроизводят опыт американцев и запускают лазеры на молекулах  $H_2O$ ,  $D_2O$  и  $HCN$ , причем быстро достигают мощностей генерации на порядок выше опубликованных значений [1, 2, 4].

Поиск новых активных сред, способных обеспечить генерацию новых волн, завершился успехом. Была обнаружена возможность получения лазерного эффекта в субММ диапазоне ( $\lambda = 141$  мкм и  $\lambda = 190$  мкм) при разряде в парах двуокиси серы –  $SO_2$ . Так на кафедре в 1968 г. был открыт новый субММ лазер. Его характеристики были тщательно измерены и опубликованы [3]. За цикл работ, посвященных исследованием субММ генераторных лазеров и в частности, за открытие  $SO_2$ -лазера С. Дюбко и В. Свич в 1971 г. присуждена премия ЛКСМУ им. Н. Островского за достижения в области науки и техники. Эти же исследования легли в основу кандидатской диссертации В. Свича. Обстоятельные исследования газоразрядных  $HCN$ -лазеров были выполнены в период 1973 – 1983 г.г. А.Н. Топковым (в соавторстве с С. Дюбко, В. Свич и др.) [5 – 8]. В частности ими получено следующее:

1. Впервые предложено применить высококачественный разряд для возбуждения  $HCN$ -лазеров.
2. Установлено, что добавления в рабочую смесь в определенной пропорции окиси углерода или ксенона улучшает энергетические характеристики лазеров на молекуле синильной кислоты. Дано качественное объяснение этому эффекту.
3. Предложен и обоснован метод измерения концентрации электронов в низкотемпературной плазме газоразрядных лазеров и впервые

исследованы характеристики продольного емкостного ВЧ разряда в органических соединениях.

4. Впервые проведено детальное исследование частотных характеристик лазеров на молекуле синильной кислоты.
5. Предложена и реализована схема включения на проход двухзеркальных резонаторов, одно из зеркал которых глухое, второе равномерно полупрозрачно и разработана методика исследования их типов колебаний.
6. Установлены соотношения подобия для волноводных НСН-лазеров с ВЧ разрядом.
7. Разработан, построен и исследован эффективный НСН-лазер с рекордными характеристиками для гетеродинного субММ интерферометра.
8. Созданы образцы субмиллиметровых газоразрядных НСН-лазеров с ВЧ возбуждением, обладающие следующими основными характеристиками:

Рабочая длина волны – 337 мкм;

Выходная мощность при длине разряда

- А) 0,9 м – 40 мВт;
- Б) 1,3 м – 60 мВт;
- В) 2,0 м – 100 мВт;
- Г) 3,2 м – 180 мВт;

Стабильность уровня выходной мощности – 3 % за час;

Стабильность частоты не хуже  $10^{-8}$  в течение часа;

Поляризация излучения – линейная.

В кандидатской диссертации Маслова В.А. развит метод и реализован численный алгоритм расчета характеристик волноводных резонаторов газоразрядных субмиллиметровых лазеров с отражателями на торцах, содержащими фазовые aberrации:

1. Показано, что для волноводных резонаторов с искривленными внутренними отражателями потери энергии низших типов колебаний каждого класса резонаторных мод имеют минимальную величину при плоскопараллельной конфигурации отражателей.

2. Установлено, что в случае сферических зеркал имеются три характерные области геометрий резонаторов: устойчивая волноводная (характеристики мод близких к характеристикам плоскопараллельной системы), устойчивая квазиоптическая (характеристики мод близких к характеристикам открытых резонаторов), неустойчивая (свойства мод неустойчивы по отношению к малым изменениям геометрических параметров резонансных систем).

Разработанные лазеры применялись в интерферометрах для диагностики плазмы в ИВТ АН СССР, ХФТИ, МРТИ, ИОФАН, СФТИ.

2. Молекулярные лазеры субММ диапазона длин волн с оптической накачкой.

Газоразрядные лазеры на молекулах НСН, Н<sub>2</sub>О и др. в непрерывном режиме способны обеспечить генерацию с приемлемым уровнем мощности (десятки мВт) только на небольшом числе фиксированных волн. Многократно предпринимавшиеся попытки расширить возможности ЛОВ и газоразрядных лазеров в субММ диапазоне оказались малоуспешными и выход из положения здесь представляется в поиске и реализации новых идей, новых подходов к решению этой проблемы.

Одной из наиболее плодотворных оказалась идея создания молекулярных лазеров на вращательных переходах с прицельной оптической накачкой, высказанная советскими физиками (Н.Г. Басов, В.С. Летохов) и впервые реализованная американцами Чангом и Бриджесом в 1970 г.

В СССР впервые лазеры этого типа были созданы в ХГУ им. А.М. Горького в 1971 – 1972 гг. и впервые получена генерация на множестве новых активных сред [9 – 18].

Результаты уже первых экспериментов убедительно свидетельствовали о перспективности нового метода генерирования волн субММ диапазона. Главное достоинство лазеров с оптической накачкой (ЛОН) состоит в том, что позволяет получить генерацию на множестве длин волн в диапазоне от единиц миллиметров до десятков микрометров, если в качестве источника накачки использован СО<sub>2</sub>-лазер, допускающий перестройку по многим линиям в диапазоне 9 – 11 мкм, где имеются сильные полосы поглощения многих молекул на вращательных переходах. Инверсия достигается обычно на вращательных переходах в возбужденных колебательных состояниях. Если молекула имеет дополнительный момент, то на частотах инвертированных вращательных переходов возможно усиление и генерация.

Принцип действия ЛОН вселял надежду на возможность существенного улучшения КПД и уровня генерируемой мощности в непрерывном и в особенности – в импульсном режимах. Отсутствие электрического разряда в газе позволяет создать “отпаянные” приборы.

Реализация потенциальных возможностей нового метода генерирования излучения в диапазоне субММ длин волн потребовала углубленного, комплексного изучения сложных физических процессов, лежащих в основе лазерного эффекта на вращательных переходах многоатомных моле-

кул, возбуждаемых излучением мощного ИК-лазера. Возникла необходимость в проведении целого комплекса физических исследований, связанных с выбором подходящих молекул, детальным изучением их спектров вынужденного излучения, изучением вращательных и вращательно-колебательных спектров поглощения, идентификацией рабочих переходов лазеров, изучением общих закономерностей свойств активной среды, изучением энергетических и частотных характеристик лазеров, выработкой рекомендаций по оптимальному конструированию генераторов, разработкой и созданием действующих образцов приборов.

Решению перечисленных задач и был посвящен цикл работ, проведенных на кафедре квантовой радиофизики в период с 1971 г. по 1990 г. [19 – 39].

Основные научные результаты этого направления работ сотрудников кафедры сводятся к следующему.

1. Впервые получена генерация субММ волн на 36-ти различных молекулах, возбуждаемых излучением  $\text{CO}_2$ -лазера. Общее число обнаруженных линий генерации в диапазоне длин волн 2600 – 50 мкм превышает  $10^3$ , что составляет около 50 % от общего числа линий, открытых совместными усилиями исследователей во всем мире к концу 1990 г.

Для каждой линии генерации измерены длина волны, интенсивность и поляризация. Для 320 линий с точностью до  $10^{-6}$  проведены измерения частоты (60 % от общего числа линий с известной частотой).

2. Идентифицированы рабочие переходы лазеров на молекулах  $\text{HCOOH}$ ,  $\text{HCOOD}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$ ,  $\text{CD}_3\text{I}$ ,  $\text{CH}_3\text{I}$ ,  $\text{CH}_3\text{B}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{PH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{D}$ . Число идентифицированных переходов различных молекул превышает 80, что составляет около 40 % общего числа идентификации переходов ЛОН к концу 1990 г.

3. Впервые в импульсном режиме получена высокоэффективная генерация излучения ЛОН с накачкой ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера на молекуле  $\text{D}_2^{18}\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $\text{CHCl}_3$  с общим числом линий генерации на этих молекулах более 150.

4. Продемонстрирована возможность получения эффективной амплитудной модуляции выходным излучением ЛОН с двухфотонной накачкой (ИК+ММ), а также за счет эффекта Штарка.

5. Показана возможность перестройки частоты непрерывного действующего ЛОН в пределах нескольких сотен мегагерц с применением эф-

фекта Штарка, либо гиперрамановского режима генерации ЛОН.

6. С привлечением формализма матрицы плотности решены задачи расчета усиления активной среды ЛОН при возбуждении ее двумя однонаправленными волнами с близкими частотами, показана возможность увеличения эффективности накачки сигналом; теоретически исследованы важные случаи трехволнового взаимодействия, двухквантовой люминесценции и двухфотонной накачки.

7. Теоретически и экспериментально изучен Штарк-эффект в ЛОН:

- с его использованием получено 18 новых линий генерации ЛОН на молекулах  $\text{NH}_2\text{D}$ ;
- доказана возможность эффективной перестройки частоты ЛОН (на примере  $\text{NH}_2\text{D}$  и  $\text{PH}_3$ -лазеров);
- экспериментально показан эффект снижения насыщения, и как итог – увеличение выходной мощности ЛОН за счет воздействия на его активную среду переменным электрическим полем требуемой частоты и амплитуды.

8. Выявлены (теоретически и экспериментально) основные закономерности свойств активных сред ЛОН, получены аналитические выражения для расчетов усиления среды, выходной мощности, КПД генераторов.

9. Предложен специальный резонатор для ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера для накачки импульсных ЛОН с повышением селективности типов колебаний, обеспечивающий повышение КПД ЛОН.

10. Проведено сравнительное исследование мод волноводных и открытых резонаторов ЛОН с центральными отверстиями в рефлекторах.

11. Предложена новая конструкция складного металловолноводного резонатора, на основе которой создан малогабаритный субММ ЛОН, работающий в диапазоне длин волн от 0,07 до 1 мм. Предложена и реализована новая конструкция волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера с высокочастотным рядом.

12. Найдены значения более 50 молекулярных и уточнены значения более 200 молекулярных констант, описывающих субММ вращательный спектр молекул, применяемых в ЛОН. Таков главный итог экспериментального и теоретического исследования вращательных спектров молекул, проведенных в труднодоступной области частот вплоть до 800 ГГц, в основном и возбужденных колебательных состояниях.

13. Впервые проведен высокочастотный (на радиоспектроскопическом уровне точности) анализ вращательно-колебательных инфракрасных

спектров молекул НСООН (полосы  $\nu_6$  и  $\nu_8$ ), а также молекул  $\text{CH}_3\text{B}_2^{81}$  (полоса  $\nu_6$ ). Эти исследования выполнены методом “сшивания” предварительно измеренных вращательных спектров в основном и возбужденном состояниях.

14. Созданы первые отечественные образцы многочастотных субММ ЛОН непрерывного действия, как универсальные так и специализированные.

15. Созданы мощные импульсные лазеры субММ диапазона длин волн с оптической накачкой ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазерами для целей диагностики плазмы.

Ценность настоящего цикла работ заключается в том, что полученные результаты уже широко используются в работах других исследователей, о чем свидетельствует множество (более 100) ссылок на работы авторов в статьях зарубежных ученых. Сведения о спектрах лазерного излучения впервые предложены авторами активных сред субММ ЛОН – один из главных результатов, имеет первостепенное значение в решении проблем создания источников нового типа в субММ диапазоне длин волн. Авторами изданы таблицы линий генерации ЛОН, где систематизированы данные о более чем 1500 линиях генерации ЛОН, являются настольным пособием экспериментаторов, использующих ЛОН и теоретиков, работающих в данной области.

Результаты исследования вращательных спектров молекул в диапазоне субММ волн представляют интерес не только узкоспециализированный (проблема ЛОН), но и весьма ценны и для дальнейшего прогресса в развитии ДИК и ИК спектроскопии высокого разрешения, для радиоастрономии в целях химического и изотопного анализа, для метрологии и решения экологических проблем.

Экспериментальные и теоретические исследования завершились выработкой рекомендаций по разработке источников излучения непрерывного действия, обладающих высокой монохроматичностью, работающих на более чем 103 линиях в диапазоне длин волн 2600 – 500 мкм с мощностью генерации на отдельных линиях 0,1 – 100 мВт. Созданы также образцы мощных импульсных лазеров с выходной мощностью вплоть до 500 кВт и энергией импульса 50 мДж, предназначенных для исследования плазмы методом томсоновского рассеяния.

Субмиллиметровые лазеры, созданные в ходе настоящего цикла работ использовались в установках для диагностики высокотемпературной плазмы в ИВТ АН СССР, Сухумском ФТИ,

ХФТИ АН УССР, МРТИ, ФИ АН СССР, ИАЭ им. И.А. Курчатова и др. Они применялись также в установках для исследования магнитных резонансов во ФТИНТЕ АН УССР (г. Харьков) и полупроводников в ИП АН УССР (г. Киев).

Потенциальные возможности практического применения субММ ЛОН далеко не исчерпываются уже реализованными.

Так следует еще раз упомянуть о новых возможностях для газовой молекулярной радиоспектроскопии в ранее недоступном диапазоне длин волн, в частности, для исследования возбужденных состояний молекул, применяемых в ЛОН (а их более 50), для спектроскопии поглощения в сжатых неполярных газах, в Штарк – спектроскопии, двухфотонной спектроскопии с применением мощных импульсных ЛОН, в ЛМР – спектроскопии радикалов.

Исследования в области физики твердого тела и жидкостей.

Возможны следующие исследования: наблюдение циклотронного резонанса в полупроводниках при относительно высоких температурах, изучение температурной зависимости спектров фотопроводимости и экситонного поглощения, исследования температурной зависимости частоты и добротности резонанса в антиферромагнитах, исследование температурной зависимости решеточного поглощения в полярных кристаллах и сегнетоэлектриках, исследование сверхпроводимости, в т.ч. – высокотемпературной, исследование поглощения в жидкостях и полимерах.

Результаты, получены в ходе выполнения упомянутого цикла работ опубликованы и докладывались неоднократно на международных симпозиумах и вошли в известные международные справочники по лазерам дальней инфракрасной области. Они получили международное признание. По результатам этого цикла работ написаны и защищены две докторские диссертации (С. Дюбко, В. Свич) и 7 кандидатских диссертаций (В. Герасимов, В. Ефремов, Л. Фесенко, Н. Покормяхо, В. Маслов, В. Ткаченко, О. Манита).

За этот цикл работ главным исполнителем (С. Дюбко, В. Свич, Л. Фесенко, М. Ефименко, В. Герасимов, В. Ефремов, Н. Покормяхо, А. Топков). в 1994 году присуждена Государственная премия Украины в области науки и техники.

## СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ В ДИАПАЗОНЕ ММ И СУБММ ДЛИН ВОЛН

1. Молекулярная спектроскопия в субММ диапазоне длин волн.

Субмиллиметровый (субММ) диапазон является одним из ключевых диапазонов для молекулярной спектроскопии. В нем сосредоточены вращательные линии многоатомных молекул, соответствующие переходам с большими квантовыми числами. Молекулярные состояния, вовлеченные в эти переходы, подвержены сильным центробежным и резонансным эффектам, что обуславливает повышенную информативность субММ спектров по сравнению с более низкокачественными и микроволновыми и позволяет получить новые, более детальные сведения о строении молекул.

Однако, субММ спектры представляют интерес не только как источник информации о молекулярной структуре, но и сами по себе в чистом виде. В настоящее время, такие области науки и техники как радиоастрономия, химический анализ, физика земной атмосферы и др., в которых наблюдение молекулярных линий используются в качестве чувствительного метода регистрации молекул данного типа, проявляют повышенный интерес к субММ спектрам.

Существующие же возможности в удовлетворении спроса на субММ спектральную информацию весьма ограничены. Данных микроволновой спектроскопии оказывается недостаточно для надежного предсказания субММ спектров, а спектроскопических работ в субММ диапазоне проведено крайне мало. Так на период до 1981 г. по молекулярной спектроскопии опубликовано более 4000 работ, из которых лишь три десятка посвящены субММ спектрам.

Ясно, что проблема изучения субММ спектров стояла очень остро и представляла собой актуальную задачу квантовой радиофизики. Вместе с тем, в диапазоне субММ длин волн до 80-х годов не проводились широкие исследования спектров молекул. Развитие спектроскопии в этом диапазоне сдерживалось значительными техническими созданиями широкодиапазонных монохроматических источников излучения и самостоятельной проблемой разработки систем и методов наиболее точного измерения частот спектральных линий.

Зарубежными исследователями спектры поглощения газов изучались лишь в отдельных точках субММ диапазона с применением генераторов гармоник.

В Советском Союзе в 60-х годах появилась возможность систематического изучения вращения спектров поглощения в субММ диапазоне волн благодаря разработке высокочувствительных приемников и серии ламп обратной волны и криогенных детекторов излучения.

Сотрудники кафедры С. Дюбко и М. Москиенко, опираясь на опыт работы в субММ диапазоне длин волн, приобретенный в ходе разработки измерительной техники для этого диапазона (волномеры, частотомеры, резонаторы и др.), в 1975г. разрабатывают и создают на кафедре радиоспектрометр с хорошими на то время параметрами:

А) чувствительность по коэффициенту поглощения газа –  $4,3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$  /при полосе пропускания приемника – 30 кГц;

Б) предельное разрешение  $1 \cdot 10^{-6}$ , что соответствует доплеровской ширине спектральных линий;

В) точность измерения частот линий поглощения –  $\pm 200$  кГц.

Эта величина соответствует относительной погрешности измерений от  $1,2 \cdot 10^{-6}$  до  $2,5 \cdot 10^{-7}$  в рабочем диапазоне частот спектра от 160 до 800 ГГц.

В течении 1975 – 1980 г.г. при помощи этого спектрометра интенсивно проводились исследования спектров ряда молекул в диапазоне частот вплоть до 800 ГГц, что по тем временам было выдающимся достижением. Основные результаты этих исследований таковы:

1. Измерены частоты и идентифицированы переходы 2768 линий поглощения вращательных спектров 16 изотопических модификаций молекул ацетонитрила и метилбромид [40, 41].

2. Создан комплекс алгоритма и вычислительных программ для обработки вращательных и колебательно-вращательных спектров молекул с симметрией  $C_3$  и для расчета ширины линий в соответствии с теорией Мефи и Боггса.

3. Обнаружено возмущение вращательного спектра молекулы ацетонитрила  $^{12}\text{CH}_3^{12}\text{C}^{14}\text{N}$  в колебательном состоянии  $\nu_4$  и молекул метилбромид  $^{12}\text{CD}_3^{79}\text{Br}$  и  $^{12}\text{CD}_3^{81}\text{Br}$  в колебательном состоянии  $2\nu_3$ .

4. Впервые получены значения 188 и уточнены величины 46 молекулярных постоянных.

5. Найдены молекулярные постоянные позволили получить таблицы вращательных спектров 16 модификаций молекул ацетонитрила и метил бромид в общем числе колебательных состояний – тридцати одним. Диапазон частот таблиц – от самых низких, соответствующих переходам с  $\Delta l \rightarrow 1$ , до значений порядка 800 ГГц. Точность расчета не хуже  $\pm 200$  кГц.

Эти результаты составили основу кандидатской диссертации М. Москиенко. Параллельно на этой же установке проводил экспериментальные исследования О. Баскаков (в соавторстве с

С. Дюбко и М. Москиенко). Им получено следующее:

1. Исследованы субмиллиметровые спектры основного колебательного состояния некоторых молекул типа асимметричного волчка, а именно, четыре изотопозамещенных разновидности муравьиной кислоты, молекулы 1,1 – дифторэтилена и озона. Для молекулы озона изучено также колебательное состояние  $\nu_2$ . Для всех молекул найдены параметры гамильтониана Уотсона, которые описывают измеренные частоты линий поглощения в пределах экспериментальных ошибок. Многие параметры найдены впервые. Одно из следствий изучения субММ вращательных спектров – отнесение линии поглощения 1,1 – дифторэтилена, совпадающей по частоте с изучением НСН-лазера.

2. Изучен субММ вращательный спектр молекулы типа симметричного волчка  $\text{CD}_3\text{I}$  в колебательных состояниях G.S.,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$ ,  $2\nu_3$  и  $\nu_6$ . Найдены параметры соответствующих состояний. Идентифицирован ряд лазерных линий. Детально проанализировано взаимодействие между колебательными состояниями  $\nu_2$  и  $2\nu_3$  и выделены эффекты, ответственные за аномальную величину постоянной  $D_{jk}$  в этих состояниях. Впервые выделены и идентифицированы линии молекул  $^{13}\text{CD}_3\text{I}$  и определен ряд параметров ее основного состояния.

3. На основе гамильтониана Уотсона путем совместной обработки частот как чисто вращательных, так и колебательно-вращательных переходов, получены самосогласованные параметры трех колебательных состояний муравьиной кислоты – основного  $\nu_6$  и  $\nu_8$ .

4. Идентифицирован ряд лазерных линий молекул  $\text{НСООН}$ ,  $\text{НСООД}$  и  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$ . Часть линий идентифицирована методом двойного ИК-субММ резонанса, применение которого позволяет избежать изучения вращательных спектров возбужденных колебательных состояний.

5. Изучен субММ вращательный спектр молекулы  $\text{NO}_2$ .

По результатам этих исследований в 1981 г. О. Баскаковым была защищена кандидатская диссертация. В этом же году параметры спектрометра были улучшены за счет устранения некоторых методических погрешностей в определении резонансных частот и доведены до значения +40 кГц. Выполнена частичная автоматизация процессов измерения частот с применением микро ЭВМ. На этом спектрометре в период 1995 – 1998 г.г. проведены обширные экспериментальные исследования вращательных

спектров молекул  $\text{CF}_3\text{H}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{OD}$ ,  $\text{CD}_3\text{OD}$ ,  $\text{CD}_3\text{OH}$ , (Пашаев М., Баскаков О., Дюбко С.) [42]. Основные научные результаты сформулированы в кандидатской диссертации М. Пашаева таковы:

1. Исследованы субММ спектры основного и возбужденных колебательных состояний  $\nu_3 = 1$  и  $\nu_6 = 1$  молекул  $\text{CHF}_3$  и  $^{13}\text{CHF}_3$ . Для всех состояний найдены параметры эффективного гамильтониана, которые описывают измерение частот линий поглощения в пределах экспериментальных ошибок.

2. Получен приведенный эффективный торсионно-вращательный гамильтониан, который впервые позволил решить проблему отнесения частот наблюдаемых переходов.

3. Получены выражения для матричных элементов дипольного момента молекулы метанола, с помощью которых можно вычислить интенсивности различных переходов. Расчеты интенсивностей по этим выражениям позволили впервые в спектре молекул  $\text{CD}_3\text{OH}$  идентифицировать переходы с правилами отбора  $K = 0 \rightarrow K = 3$ .

4. Получен ММ и субММ спектр молекулы метанола в основном и колебательно-вращательном состоянии для различных изотопических разновидностей. Впервые для молекул  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{OD}$ ,  $\text{CD}_3\text{OH}$ ,  $\text{CD}_3\text{OD}$  найден набор вращательных постоянных эффективного гамильтониана, с помощью которого расчет измеренных частот переходов можно произвести с точностью, сравнимой с точностью эксперимента [43].

5. Измерены и идентифицированы более 400 новых переходов для различных изотопических разновидностей метилового спирта. Отнесены некоторые переходы, наблюдавшиеся ранее в лабораторных условиях.

6. С помощью полученных результатов были отнесены частоты нескольких неидентифицированных переходов, наблюдавшиеся другими авторами в космическом пространстве (Орион А и Стрелец В2).

В 1985 г. была построена высокотемпературная поглощающая кювета для спектрометра и с ее использованием исследовались поглощения воды в возбужденных колебательных состояниях (В. Алексеев, С. Дюбко, О. Баскаков Новые субММ вращательные линии воды и ее изотопов [42], Оптика и спектроскопия – 1987 г., Т. 63, вып. 4, – С. 1016-1018.), а также интенсивно изучался спектр поглощения двуокиси селена. Впервые измерены частоты поглощения пяти изотопических разновидностей  $\text{SO}_2$  по селену ( $^{76}\text{SeO}_2$ ,  $^{77}\text{SeO}_2$ ,  $^{78}\text{SeO}_2$ ,  $^{80}\text{SeO}_2$ ,  $^{82}\text{SeO}_2$ ) в основном и возбужденных колебательных состояниях  $\nu_2 = 1$  и

$\nu_2 = 2$ . Эти результаты вошли в кандидатскую диссертацию Е. Алексеева (1998). Кроме того, этот спектр успешно использовался для записей линий поглощения молекул  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$  [44].

В 1995 г. последовала новая радикальная модернизация спектрометра. Субмиллиметровая ЛОВ, ранее работающая в режиме сканирования частоты, в новом варианте была охвачена системой ФАПЧ с привязкой ее частоты к  $n^{\text{й}}$  ( $n = 3 - 10$ ) гармония синтезатора частоты, работающего в диапазоне 56 – 80 ГГц. По сути дела был создан (авторы – Дюбко С., Поднос С., Алексеев Е.) новый эффективный спектрометр субмиллиметрового диапазона длин волн. Его характеристики и возможности представлены ниже.

Радиоспектрометр субмиллиметрового диапазона длин волн.

#### 1. Назначение прибора.

Прибор позволяет быстро, в полуавтоматическом режиме осуществлять запись спектров поглощения полярных молекул (вращательные спектры) в диапазоне частоты 200 – 360 ГГц с высокой чувствительностью и разрешающей способностью.

#### 2. Области применения:

##### а) Научные исследования:

проблемы молекулярной спектроскопии и физики молекул (измерение резонансных частот и интенсивности поглощения вращательного спектра молекул, исследование сверхтонкой структуры спектров, исследование межмолекулярных и внутримолекулярных взаимодействий молекул, в частности – заторможенного вращения, измерение дипольных моментов молекул, исследование структуры молекул, воссоздание силового поля и др.);

##### б) Применение для целей химического анализа газов:

качественный анализ многокомпонентной (более 300) смеси газов (однозначная идентификация молекул в газе).

- количественный анализ, то есть концентрации молекул в смеси газов;
- определение и измерение концентрации малых вредных примесей в газах на уровне 10 – 100 ppb.

Возможные области применения газоанализаторов на базе радиоспектрометра:

- химическая промышленность,
- фармацевтическое производство,
- производство пищевых продуктов,
- контроль чистоты исходных газов при производстве эпитаксиальных слоев полупроводниковых подложках для интегральных микросхем,

- контроль уровня загрязнения воздуха в помещениях и атмосферы в городах,
- медицина ( контроль газовых примесей в выдыхаемом воздухе и др.).

##### в) Применение в учебном процессе при подготовке студентов, специалистов в области спектроскопии:

- изучение устройств микроволнового радиоспектрометра;
- приобретение навыков работы с приборами;
- записи спектров, решение прямой и обратной задач спектроскопии.

#### 2. Параметры спектрометра и его описание.

1. Диапазон рабочих частот 200 – 360 ГГц.
2. Чувствительность – не хуже  $10^{-8} \text{ см}^{-1}$ .
3. Разрешение – доплеровское.
4. Точность измеренных резонансных частот линий поглощения – не хуже  $3 \cdot 10^{-8}$ .

Прибор построен по классической схеме (источник излучения – поглощающая ячейка-детектор). Источник излучения – лампа обратной волны, частота которой системой ФАПЧ привязана к синтезатору частоты ММ диапазона и управляется ЭВМ по заданной программе. Сбор информации о спектре осуществляется автоматически. Возможно машинное накопление с целью улучшения соотношения сигнал/шум. Образцы записей спектров показаны ниже.

На этом новом спектре проведены в период 1996 – 2002 г.г. исследования спектров фреонов:  $\text{CH}_3\text{CF}_3$  [xoh],  $\text{CF}^{35}\text{C1}_3$ ,  $\text{CF}^{37}\text{C1}_3$ ,  $\text{CF}^{35}\text{C1}_2^{37}\text{C1}$  [45 – 49].

Результаты этих исследований опубликованы в журнале IMS и “Радиофизика и радиоастрономия” (Герасимов В.Г., Дюбко С.Ф., Ефремов В.А., Ефименко М.Н. Катрич А.А., 1999, т. 4, № 2, С. 178 - 183, 2000, т. 5, № 4, С. 429 – 439, 2002, т. 7, № 2, С. 151– 159, Wang S.X., Dybko S.F., Pyu-shyn V.V., IMS, 2001, vol. 205, P. 146 - 163).

#### 2. Спектроскопия атомов в ридберговских состояниях.

Эксперименты с высоковозбужденными ( $n > 10$ ) или т.н. ридберговскими атомами произвели в последние два десятилетия настоящий переворот в квантовой физике благодаря уникальным свойствам этих объектов – громадным размерам, гигантской поляризуемости, большим временам жизни, возможности селективного (по состояниям) разрушения в относительно слабых полях.

Взрывной интерес физиков и инженеров к этим необычным состояниям атомов стимулировался

появлением узкополосных достаточно мощных перестраиваемых по частоте лазеров УФ, оптического ИК диапазонов длин волн. Именно использование таких лазеров для каскадного (последовательного) возбуждения атомов позволяет по желанию экспериментатора заселять требуемые ридберговские состояния.

На Украине исследование ридберговских атомов велось методами радиоастрономии (наблюдение рекомбинированного излучения) в РИ АН Украины, а в 1992 г. первая лабораторная установка для получения и исследования ридберговских атомов создана в ХГУ на кафедре квантовой радиофизики РФФ. За рубежом лабораторные исследования ридберговских атомов ведутся во все нарастающем темпе в США, ФРГ, Франция и др. странах.

Целью первой работы, выполненной на кафедре в 1991 г., было проведение высокочастотных измерений частот переходов типа  $nD - nP$  и  $nS - nP$  атомов Na в высоковозбужденных состояниях с целью уточнения энергетической диаграммы Na в преионизационном состоянии, уточнении значений квантового дефекта для  $P$ - и  $D$ -термов и интервалов тонкой структуры этих состояний.

Измерения выполнены для  $nD - nP$  и  $nS - nP$  переходов в диапазоне частот 50 – 350 ГГц и квантовых чисел  $n = 22 - 32$  с точностью 50 кГц и меньше с использованием разработанного атомно-лучевого радиоспектрометра.

Получены наиболее точные значения квантового дефекта для  $S$ -,  $P$ -,  $D$ - термов атома Na, таблицы значений энергии и частот переходов. Результаты этой работы (авторы – Дюбко С.Ф., Ефремов В.А., Поднос С.В., Ефименко М.Н., Герасимов В.Г., Подоба В.Б., Резник А.В.) [79] опубликованы в журнале “Квантовая электроника”, 1991, т. 18, № 4, С. 410 - 413.

Дальнейшее развитие этих работ вылились в разработку радиоспектрометра ридберговских атомов с повышенной чувствительностью и разрешающей способностью, теоретическое и экспериментальное исследование высоковозбуждаемых атомов Na в  $nS$ ,  $nP$  и  $nD$  – состояниях. В том числе был создан атомно-лучевой, автоматизированный на базе ЭВМ, радиоспектрометр, допускающий глубокое охлаждение области взаимодействия ридберговских атомов с микроволновым излучением. Другой новацией здесь было создание и применение в спектре синтезатора частоты ММ диапазона длин волн с шириной спектра 2кГц с управлением частоты от ЭВМ.

Получены таблицы частот линий поглощения Na  $nS \rightarrow n'P$  и  $nP \rightarrow n'D$ ,  $nS \rightarrow (n + t)3$ .

Эта работа выполнена в 1994 г. была опубликована в Phys Rev F. – 1995, vol. 52, P. 514 - 517 и получила высокую оценку физиков, работающих в русле данной проблемы. Константы, вычисленные на базе проведенных измерений, для нахождения квантового дефекта NaI в  $S$ ,  $P$  и  $D$  – состояниях были признаны наиболее достоверными.

Еще одна работа, посвященная интерпретации полученных экспериментальных данных, относящихся и проблеме нахождения значений квантового дефекта, была выполнена авторами совместно с известным американским физиком-атомщиком К. Макадамом (I. Phys. D., 1977, vol. 30, № 10, p/2345-2349) [50].

Кроме того, на основании анализа поляризуемости атомного остова NaI с использованием экспериментальных данных автором упомянутых работ, а также других исследователей, найдены новые значения дипольной и квадрупольной составляющих поляризуемости атомного состава Na:  $\alpha'_d = 1,1145(14)$  ат. ед.;  $\alpha'_q = 0,340(2)$  ат. ед.

После длительного перерыва в 2002 г. работы в области спектроскопии ридберговских атомов на кафедре квантовой радиофизики возобновлены в связи с получением доцентом кафедры Ефремовым В.А., гранда CRDF на проведение исследований под названием “Высокочастотная микроволновая спектроскопия квантовых дефектов Au и Al в ридберговских состояниях”.

В результате выполнения проекта CRDF были измерены и идентифицированы 1239 микроволновых одно и двухфотонных переходов в  $S$ ,  $P$ ,  $D$ ,  $F$ ,  $G$  ридберговских состояниях AlI в диапазоне значений главного квантового числа  $n = 22\% - 43$  и частот 4 – 423 ГГц. Найдены константы тонкого расщепления  $P$ ,  $D$  – состояний. Проведен глобальный анализ всех полученных как группой ХНУ (микроволновые измерения) так и другими авторами (оптические измерения) результатов, итогом которого является набор констант для расчетов квантового дефекта атомов AlI в  $S$ ,  $P$ ,  $D$ ,  $F$  и  $G$  – состояниях с наивысшей на сегодняшний день точностью. Результаты совместно с американской стороной исследования AlI опубликованы [51 – 53]

Исследования ридберговских атомов имеют явно выраженный академический интерес, т.к. впервые изучается взаимодействие нового для физиков объекта – ридберговского атома с электромагнитными полями и при столкновениях с нейтральными и заряженными частицами. Здесь обнаруживаются ряд новых интересных эффектов, свидетельствующих о возможности реализа-



ции ранее не мыслимых ситуаций взаимодействия поля с веществом (например, экзотические режимы работы лазера на одном атоме или единичных фотонах с малым числом атомов и др.).

Уже становятся очевидны перспективные области практического использования ридберговских атомов для приборов, позволяющих реализовать предельные чувствительности при измерениях определенных величин (детектор одиночных фотонов, одиночных атомов, мазер, лазер с перестройкой частоты в субмиллиметровом диапазоне, измерители сверхслабых полей и др.).

Работы в области атомной и молекулярной спектроскопии на кафедре квантовой радиофизики изначально возглавляет профессор Дюбко С.Ф. Им же организован филиал лаборатории микроволновой спектроскопии в Радиоастрономическом институте НАНУ. Там работали и работают выпускники кафедры, ныне кандидаты наук Алексеев Е., Илюшин В.Ю. Пашаев М., а также – Воробьева. В лаборатории ведутся фундаментальные исследования микроволновых спектров молекул, представляющих интерес для астрофизики, молекулярной физики, радиоастрономии, физики атмосферы. Результаты этой работы регулярно докладываются на международных научных конференциях и публикуются в авторских научных журналах *JMS, Phys., Rev.* и др.

Работы сотрудников кафедры в области микроволновой и атомной спектроскопии поддерживаются грандами:

- грант Американского физического общества (1995, PI-S. Dyubko);
- грант Америки физического общества (1995, P1-V.Gerasimov);
- ISF грант Сороса (долгосрочный) NVABOOO 1994 – 1995 PI-S. Dyubko;
- грант INTAS– VA95-0187, PI-S. Dyubko, O. Baskakov;
- грант STV, №#2132 (2002-2003), PI-S. Dyubko;
- грант CRDF, VPI – 2422–KN– 02, PI –V. Efremov.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДИОИЗМЕРЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ММ И СУБММ ДЛИН ВОЛН. ИЗМЕРИТЕЛИ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ

Первые исследования пондеромоторного действия электромагнитных волн на высоких частотах с целью создания средств измерения мощности были выполнены проф. Р. А. Валитовым, который показал преимущества пондеромоторного метода измерения: возможность самокалибровки, сводящейся к измерениям массы, длины и времени,

возможности измерения проходящей мощности, малая потребляемая мощность, высокая точность. На кафедре под его научным руководством эти исследования в волноводных трактах продолжали В.Д. Кукуш и В.Г. Орлов. Они получили выражение средней за период колебаний СВЧ силы, действующей на подвижный элемент произвольной формы в волноводе с одной степенью свободы и обосновали абсолютную калибровку волноводных пондеромоторных ваттметров [54]. Обоснован метод синтеза многоэлементного пондеромоторного ваттметра как на основе неэквидистантного расположения пластин, так и на основе эквидистантного расположения пластин разных параметров. В многоэлементном пондеромоторном ваттметре вращающий момент равен сумме вращающих моментов, действующих на отдельные пластины. В созданных пондеромоторных ваттметрах использованы две пластины, расположенные вдоль волновода на расстоянии примерно  $\lambda/4$  [55]. Этим достигается уменьшение собственного коэффициента отражения и погрешности рассогласования по сравнению со случаем одной пластины. Основная погрешность созданных пондеромоторных ваттметров при коэффициенте стоячей волны нагрузки равном или менее 1,1 на частоте калибровки на уровне мощности выше 1 Вт в волноводных трактах  $35 \times 15, 23 \times 10; 7, 2 \times 3, 4$  мм составляет  $1,0 \pm 1,5\%$  [56]. Благодаря высокой точности и возможности проведения абсолютной калибровки пондеромоторные ваттметры применяются как образцовые приборы для проверки градуировки рабочих ваттметров.

Проведенные на кафедре исследования позволили создать Кокодию Н.Г. невакуумные пондеромоторные измерители мощности и энергии мощного излучения. Для этого приемный элемент изготавливался из материала с малым поглощением излучения. Отражающее покрытие было диэлектрическим. Камера измерительного преобразователя изготавливалась из материала с большой теплоемкостью и теплопроводностью [57]. В качестве датчиков давления излучения кроме традиционных крутильных весов использовались механотроны. Их применение позволило создать простые в изготовлении и удобные в работе приборы [58]. Были разработаны различные конструкции измерительных преобразователей, уменьшающие ошибку зонной чувствительности. Исследования показали, что с помощью пондеромоторного метода можно измерять также диаметр пучка излучения, положение его энергетического центра, параметры по-

ляризации, длительность импульса и пиковую мощность в импульсе.

В 1960 – 1961 годах Кукушем В.Д., Кузьмичевым В.М. и Половниковым Г.Г. были разработаны, экспериментально исследованы и созданы калориметрические волноводные (сечение волновода 7,2×3,4 мм, 3,6×1,8 мм и 2,4×1,2) измерители непрерывной мощности малых уровней [59]. Один из этих калориметров награжден медалью ВДНХ СССР.

Кузьмичевым В.М. и Говоруном Е.Я. был создан квазиоптический измеритель малых уровней непрерывной мощности миллиметрового диапазона [60], в котором приемным элементом являлся конус с однослойной намоткой двумя медными изолированными проводами диаметром 20 мкм. Один провод использовался для болометрической индикации, а второй – для калибровки мощностью постоянного тока.

Уменьшение постоянной времени прибора достигалось расположением болометрического конуса в медном конусе с небольшим воздушным зазором, что увеличивало коэффициент теплообмена.

Ими же был создан малоинерционный измеритель мощности коротковолновой части миллиметрового диапазона [61], в котором в волноводе 3,2×1,4 мм на слюдяную пластинку наносилась поглощающая металлическая пленка, а на ней равномерно по длине размещались три последовательно соединенных термистора. Режим работы термистора выбран таким, чтобы обеспечить максимальную чувствительность измерителя. Такая нагрузка обеспечивала хорошее поглощение многомодового излучения до минимальной длины волны в несколько десятых мм.

С появлением лазеров большое внимание было уделено созданию калориметров оптического диапазона. Детальные теоретические и экспериментальные исследования провел Кузьмичев В.М. В качестве поглощающей нагрузки было обосновано брать конусную модель абсолютно черного тела. Для конусной нагрузки был разработан алгоритм вычисления ее поглощающей способности для диффузного коэффициента поглощения внутренней поверхности [62]. Была вычислена поглощающая способность такой оптической нагрузки в зависимости от коэффициента поглощения внутренней поверхности конуса, его угла раскрытия, диаметра оптического пучка соосного конуса и узкого оптического пучка, перемещаемого по диаметру раскрытия конуса. Созданный калориметр КОД-3 был внедрен в промышленное про-

изводство с выпуском приборов ИМО-1 [63], способных измерять малые и средние уровни непрерывной мощности и энергии импульсов излучения лазеров.

Дальнейшие исследования были направлены на повышение уровней измеряемых энергий импульсов лазеров. Обоснованы конусные нагрузки с отношением высоты конуса к его диаметру основания больше пяти. Конус выполнялся из меди, чтобы обеспечить лучшее усреднение температуры по его толщине и длине, а внутренняя поверхность покрывалась никелем, чтобы обеспечить лучшее поглощение излучения. Оптимизирован профиль толщины стенки конуса по его длине для измерения энергии импульса и непрерывной мощности излучения при распределении термодатчиков [64]. Для конуса с зеркальным отражением внутренней поверхности и известным комплексным показателем преломления Говоруном Е.Я. и Кузьмичевым В.М. был разработан алгоритм расчета поглощаемой способности нагрузки в зависимости от диаметра оптического пучка, его места попадания по входной апертуре и направлению линейной поляризации излучения [65].

Обеспечение необходимого поглощения и более равномерного распределения поглощенной интенсивности излучения по длине конусной нагрузки достигалось тем, что начальная часть внутренней поверхности конуса имела зеркальный коэффициент отражения, а остальная – диффузионный [66].

Калориметр КОД-21, созданный Кузьмичевым В.М. и Зинченко Н.И., является измерителем средних и больших уровней энергии импульсов излучения лазера. В нем использована обоснованная система регистрации выходного сигнала с 10 секций термобатарей, равномерно размещенных по длине конусной нагрузки, что позволит исключить систематическую погрешность метода замещения электрической энергией, рассеиваемой равномерно по длине конуса в подогревателе калибровки, размещенном на внешней поверхности конуса [67]. Такая методика калибровки и регистрации выходного сигнала позволяет исключить неидентичность термобатарей секций и механическую неточность выполнения конусной нагрузки. Данный калориметр имеет следующие технические характеристики: 1) спектральный диапазон – 0,4 – 1,1 мкм; 2) динамический диапазон измеряемых энергий – 1,0 – 3000 Дж; 3) время измерения – ~ 5 с.; 4) основная погрешность – 5 %. Данный калориметр лег в основу создаваемого эталона больших уровней Украины.

Кокодием Н.Г. и Ефимовым В.Ф. были созданы ножевые градиентные калориметры [68] на большие уровни энергии импульсов лазера с размерами входной апертуры 150×150 мм, в которых использовался набор заостренных пластин, создающих клиновидную модель черного тела, а выходной сигнал дифференцировался, чтобы существенно снизить время измерения.

Кузьмичевым В.М. совместно с Закуренко О.Е. были созданы калориметры постоянной температуры. Один из них [69] работал при температуре 0° С, в котором под действием энергии оптического импульса регистрировалось явление изменения объема агрегатного состояния лед-вода. Оптическая энергия поглощалась набором клиновидных цилиндров. В другой конструкции [70] приемный элемент охлаждался элементом Пельтье при измерении непрерывной мощности до температуры окружающей среды, при которой находился приемный элемент до подачи оптической мощности. Достоинством калориметров постоянной температуры является отсутствие систематической погрешности метода замещения электрической энергией.

Валитовым Р.А., Дюбко С.Ф., Свичем В.А. и Кузьмичевым В. М. был предложен измеритель малых уровней мощности электромагнитного излучения с использованием пироэлектрического индикатора повышения температуры приемного элемента [71].

Для малых уровней измерений непрерывной мощности в миллиметровом и оптическом диапазонах Кузьмичевым В.М. и Сафроновым Б.В. были созданы приборы с использованием для индикации пироэлектрического эффекта [72].

На пироэлектрическую пластину через изолирующий слой наносился пленочный подогреватель, который покрывался поглощающим слоем для соответствующего диапазона волн. Измеряемое излучение направлялось непосредственно на приемный элемент или фокусировалось линзой или усеченным зеркальным конусом.

Впервые Кузьмичевым В.М. и Гужвой В.Г. был предложен, обоснован и экспериментально исследован пироэлектрический приемник с торцевыми электродами [73], в котором регистрируемое излучение взаимодействует с пироэлектрическим материалом. Такой приемник позволяет измерять формы оптических импульсов длительностью в несколько наносекунд.

Впервые Кузьмичевым В.М., Ю.М. Латыниным и Колтком Ю. В. были предложены, обоснованы и созданы пиромагнитные приемники импульсного излучения лазеров [74], которые по-

зволяют регистрировать форму коротких по длительности импульсов.

Кузьмичевым В. М. и Латыниным Ю.М. были впервые предложены [75], обоснованы и созданы решеточные болометрические измерители энергетических параметров лазерного излучения [76], способные работать в широком спектральном диапазоне, выдерживающие высокие плотности интенсивности излучения, довольно малоинерционные и не имеющие ограничений на максимальный размер площади выходной апертуры. В приближении геометрической оптики были получены выражения и проведены вычисления коэффициентов поглощения металлических и эллиптических цилиндров с известным комплексным показателем преломления при произвольном падении плоской электромагнитной волны с произвольным направлением линейной поляризации излучения [77]. Объяснены полученные зависимости.

По известным выражениям для факторов эффективности взаимодействия плоской электромагнитной волны с поглощающим металлическим цилиндром были вычислены зависимости фактора эффективности поглощения для длины волны около 10 мкм никелевого цилиндра, имеющего довольно большие показатели преломления и поглощения, от угла падения и направления линейной поляризации излучения, а также от отношения диаметра цилиндра к длине волны [78]. Изучены свойства рассеянного поля при дифракции излучения на поглощающем цилиндре, когда отношение его диаметра к длине волны меньше единицы.

В создании решеточных болометрических измерителей энергии импульсов лазерного излучения принимал участие Латынин Ю.М., в создании решеточных болометрических измерителей непрерывной и квазинепрерывной мощности принимали участие Перепечай М.П., Золотайкин А.В., Катрич А.Б., Балкашин В.П..

Так как фактор эффективности поглощения зависит от состояния поляризации падающего на него излучения, то был обоснован метод измерения состояния поляризации при использовании трех болометрических решеток [79]. Данный метод перспективен для интенсивного и широкоапертурного излучения инфракрасного диапазона.

Получая профильное распределение интенсивности в нескольких угловых направлениях в сечении оптического пучка, снимая сигналы с каждого болометрического элемента, обоснованы методы определения распределения плот-

ности интенсивности излучения (Катрич А.Б.) [80] и фазы (Худошин А.В.) [81] в данном сечении пучка.

При существенных плотностях интенсивности лазерного излучения болометрические элементы значительно повышают свою температуру и появляется нелинейность их характеристики преобразования, вызываемая температурными зависимостями их основных физических параметров и усиливающаяся непрерывным распределением падающей оптической энергии по длине болометров [82]. Получено выражение для нормированного коэффициента преобразования болометра и при аппроксимации его полиномом второй степени показано, что он зависит от произведения коэффициента неравномерности распределения падающей интенсивности излучения по длине болометра на среднюю удельную погонную падающую энергию в случае измерения энергии импульса излучения или на среднюю погонную падающую мощность в случае измерения непрерывной мощности.

Нелинейность характеристики преобразования болометра приводит к существенным систематическим погрешностям измеряемых им параметров лазерного излучения. Показано, как в профильном двухрешеточном болометрическом измерителе коэффициент неравномерности распределения падающей интенсивности излучения по площади входной апертуры измерителя исключается систематическая погрешность нелинейности характеристик преобразований при измерении непрерывной мощности или энергии импульса лазерного излучения [83].

Тонкопроволочный болометр имеет высокое пространственное разрешение по координате, что было использовано Кузьмичевым В.М. и Погореловым С.В. для обоснования метода измерения как диаметра сфокусированного лазерного излучения, так и его энергетических и поляризационных параметров [84].

Обоснована методика определения температурной зависимости фактора эффективности поглощения платинового болометра на излучении с длиной волны 10,6 мкм, который вносит доминирующий вклад в нелинейность характеристики преобразования болометра.

В настоящее время проводятся исследования по обоснованию абсолютной калибровки тонкопроволочных болометрических измерителей энергетических параметров лазерного излучения.

## ЛАЗЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КРИСТАЛЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ. ЭПР – СПЕКТРОСКОПИЯ

С разработкой надежной модели азотного лазера ( $P_{\text{имп}} \sim 1$  МВт,  $\tau \sim 5$  нс, частота исследования импульсов 1 – 50 Гц) [85] разворачиваются работы по изучению люминесцентных и генерационных характеристик новых органических красителей, синтезированных на химическом факультете ХНУ, при накачке излучением азотного лазера. Впервые получена высокоэффективная генерация в сине-зеленой области спектра [86, 87].

Наличие интенсивных лазерных источников в диапазоне длин волн от 0,34 до 11 мкм позволило далее широким фронтом развернуть работы по исследованию методов повышения радиационной и лучевой стойкости и качества кристаллов, применяемых в квантовой электронике. Проводятся систематические исследования и определяются устойчивости электрооптических и нелинейных элементов из KDP, DKDP и  $\text{LiIO}_3$  к многократному лазерному воздействию. Впервые обнаружен эффект лазерного упрочнения в монокристаллах йода лития. В монокристаллах фосфатной группы обнаружена люминесценция, возбуждаемая азотным лазером и эффект ее гашения. Установлено, что гашение люминесценции ведет к повышению лазерной прочности KDP и DKDP. Исследована спектральная зависимость эффекта лазерного излучения. Показано, что эффективность процесса упрочнения увеличивается с укорочением длины волны [88 – 93].

С целью неразрушающего анализа лазерной прочности кристаллов разработан новый способ контроля коэффициента оптического поглощения прозрачных пластин [94]. На его основе создан импульсный абсорбционный калориметр поглощения с высокой экспрессностью и малой погрешностью измерений. В ходе исследования характеристик поглощения щелочно-галоидных кристаллов (ЩГК), используемых в качестве оптических элементов  $\text{CO}_2$ -лазеров (КС1, NaС1) установлено влияние анионных и катионных примесей на лазерную и радиационную (при гамма-облучении) прочность ЩГК [95, 96]. Выявлено, что одним из возможных путей компенсации радиационно-наведенной полосы поглощения и снижения лазерной прочности КС1 на  $\lambda=10,6$  мкм является легирование примесью КВг в количестве единиц процентов.

Необходимость повышения лазерной и радиационной стойкости потребовала проведения ис-

следований дефектов структуры кристаллов. В связи с этим с 80-х годов на кафедре проводится изучение типов дефектов, влияющих на устойчивость кристаллов к действию излучений различной природы. Эффективным средством для этого является метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Он позволяет на молекулярном уровне изучать структуру дефектов и определять их количество.

С помощью ЭПР были определены типы радиационных парамагнитных центров, образующихся в KDP и DKDP при ультрафиолетовом и гамма облучениях, а также при воздействии на кристаллы ускоренными до высоких энергий частицами (электронами, нейтронами, протонами) [97, 98].

Впервые в кристаллах типа KDP обнаружены и исследованы радиационные и термоиндуцированные процессы многоступенчатой трансформации свободных радикалов. Сочетание методов оптической и ЭПР спектроскопии позволило установить влияние трансформационных процессов на оптическое поглощение и радиационную стойкость KDP и DKDP. Установлено, что трансформация ведет к эффекту просветления кристаллов, облученных сравнительно небольшими дозами [99 – 105]. Использование феномена многоступенчатой трансформации позволило получить способ повышения радиационной стойкости монокристаллов KDP [106]. Исследованы возможности термического, лазерного и радиационного способов обработки для улучшения качества кристаллов [107].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзорной статье дан обобщающий материал по разработке и исследованию лазеров субмиллиметрового диапазона. Так молекулярные газовые лазеры впервые созданы в СССР, а в последствии разработаны и созданы лазеры субмиллиметрового диапазона с оптической накачкой. Особый интерес представляют исследования по разработке и созданию импульсных субмиллиметровых лазеров с оптической накачкой TEA-CO<sub>2</sub> лазером. Многие результаты в этой области получены впервые в мире. Особый интерес вызывает спектроскопия атомов и анализ в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. Большое количество полученных результатов в области разработки лазеров было достигнуто еще и потому, что разработчики использовали большой накопленный опыт по исследованию и созданию открытых резонаторов специальной конструкции,

измерителей мощности и энергии, приемников в этом диапазоне, волномеров и частотомеров.

Проведенные исследования и полученные результаты далеко не ограничивают дальнейших исследований, наоборот, подсказывают целый ряд задач на будущее. Это прежде всего разработка и создание малогабаритных, мощных лазеров субмиллиметрового диапазона для создания уникальной аппаратуры по диагностике плазмы и исследованию загрязнения окружающей среды.

К числу главных следует отнести исследование: наблюдение циклотронного резонанса в полупроводниках при относительно высоких температурах, изучение температурной зависимости спектров фотопроводимости и экситонного поглощения, исследование температурной зависимости и добротности резонанса в антиферромагнитах, исследование температурной зависимости решеточного поглощения в полярных кристаллах и сегнетоэлектриках, исследование сверхпроводимости, в то числе – высокотемпературной, исследование поглощения в жидкостях и полимерах.

В настоящее время становятся очевидны перспективные области практического использования ридберговских атомов для разработки приборов, позволяющих реализовать предельные чувствительности при измерениях определенных величин (детекторов одиночных фотонов, одиночных атомов, мазеров, лазеров с перестройкой частоты в субмиллиметровом диапазоне, измерители сверхвысоких частот и др.) .

И, наконец, в области радиоизмерений провести исследования по обоснованию абсолютной калибровки тонкопроволочных болометрических измерителей энергетических параметров лазерного излучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Crocer A.A., Gebbie H.A., Kimmitt M.F. and Mathias L.E.S. Stimulated in the far infrared//Nature.– 1964. – vol. 201. – P. 250-251.
2. Дюбко С.Ф., Валитов Р.А., Свич В.А. Субмиллиметровый газовый лазер непрерывного действия //Письма в ЖЭТФ. – 1967 – Т. 6, Вып.3. – С. 567.
3. Дюбко С.Ф., Валитов Р.А., Свич В.А. Субмиллиметровый лазер на SO<sub>2</sub>, генерирующий на волнах 0,141 и 0,193. Письма в ЖТФ.– 1968. – Т. 7, Вып. 11. – С. 408.
4. Дюбко С.Ф., Валитов Р.А., Свич В.А. Субмиллиметровый лазер непрерывного действия, работающий на парах H<sub>2</sub>O и HCN // ЖТФ, 1969. – Т. 39, № 12. – С. 1135.
5. Шмидт В.В., Дюбко С.Ф., Топков А.Н., Свич В.А., Валитов Р.А. Измерение частоты газового лазера с длиной волны 0,337 и 0,311 мм// Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. 14, № 9. – С.1708.

6. Дюбко С.Ф., Валитов Р.А., Свич В.А. Субмиллиметровый лазер на  $D_2O$ , работающий в непрерывном режиме // ЖТФ. – 1970. – Т. 40. – С. 1566.
7. Дюбко С.Ф., Свич В.А. Измерение коэффициента усиления квантового усилителя на длинах волн 311 и 337 мкм // ЖТФ. – 1971. – Т. 41, вып. 5. – С. 1034.
8. Свич В.А., Топков А.Н., Покормяхо Н.Г. Стабилизированный HCN лазер с высокочастотной накачкой // ПТЭ. – 1980. – № 6. – С. 151.
9. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Фесенко Л.Д. Газовые лазеры субмиллиметрового диапазона с накачкой излучением  $CO_2$ -лазера // Письма в ЖТЭФ. – 1972. – Т. 16, Вып. 11. – С. 592.
10. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Фесенко Л.Д. Субмиллиметровые лазеры с оптической накачкой на молекулах  $CH_3OH$  и  $CH_3OD$  // ЖТФ. – 1973. – Т. 43. – С. 1772.
11. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Фесенко Л.Д. Субмиллиметровый лазер на парах муравьиной кислоты с накачкой излучением  $CO_2$ -лазера // Квантовая электроника. – 1973. – Т. 5, Вып. 17. – С. 127.
12. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Фесенко Л.Д. Стимулированное излучение субмиллиметровых волн молекулами гидразина, возбужденными излучением  $CO_2$ -лазера // ЖПС. – 1974. – Т. 20, Вып. 4. – С. 718.
13. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Фесенко Л.Д. Субмиллиметровое лазерное излучение молекул  $CH_3OH$ , возбуждаемых излучением  $CO_2$ -лазера // Оптика и спектроскопия. – 1974. – Т. 37, Вып. 1. – С. 718.
14. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Фесенко Л.Д. Использование молекулы  $CD_3OH$ ,  $CH_3OH$  и  $CD_3C1$  // ЖПС. – 1975. – Т. 23, Вып. 2. – С. 317.
15. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Фесенко Л.Д. Экспериментальное исследование спектра излучения субмиллиметрового лазера на молекулах  $CD_3OH$  // Известия вузов “Радиофизика”. – 1975. – Т. 21, Вып. 2. – С. 115.
16. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Фесенко Л.Д. Чувствительный к магнитному полю субмиллиметровый лазер на парамагнитных молекулах  $ClO_2$  // Письма в ЖТФ. – 1975. – Т. 1, Вып. 9. – С. 409.
17. Дюбко С.Ф., Свич В.А., Фесенко Л.Д. Стимулированное излучение при оптической накачке молекул винилбромида // Квантовая электроника. – 1976. – Т. 3, № 5. – С. 1121.
18. Свич В.А., Топков А.Н., Покормяхо Н.Г. Субмиллиметровый лазер с оптической накачкой на молекуле  $D_2O$  // Письма в ЖТФ. – 1980. – Т. 6, Вып. 21. – С. 1281.
19. Епишин В.А., Покормяхо Н.Г., Свич В.А., Топков А.Н., Уринсон А.С., Юндев Д.Н. Волноводный субмиллиметровый лазерный интерферометр для диагностики плазмы // ПТЭ. – 1981. – № 1. – С. 149.
20. Свич В.А., Топков А.Н., Покормяхо Н.Г., Аникеев А.Я. Импульсный квантовый генератор субмиллиметрового диапазона на молекулах метилбромида // ЖПС. – 1982. – Т. 37. – С. 663.
21. Васильева И.В., Епишин В.А., Покормяхо Н.Г., Свич В.А., Толчинский Л.Н., Топков А.Н., Уринсон А.С., Юндев Д.Н. Измерение конденсации и эффективной частоты столкновений электронов в опытно-промышленных установках // Теплофизика высоких температур. – 1981. – Т. 19, № 14. – С. 832.
22. Бережной В.Л., Епишин В.А., Кононенко В.Л., Павличенко О.С., Свич В.А., Топков А.Н., Маслов В.А. Субмиллиметровый гетеродинный лазерный интерферометр // Препринт АН УССР ХФТИ. – 1982. – № 82 - 48. – 57 с.
23. Свич В.А., Топков А.Н., Епишин В.А., Покормяхо Н.Г., Федотов А.Б. О возможности использования HCN лазера в гетеродинном интерферометре // Сборник научных трудов “Голографические методы и аппаратура, применяемые в физических исследованиях” – М.: – 1982. – С. 59.
24. Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. Исследование перестраиваемого  $CO_2$ -лазера, возбуждаемого поперечным высокочастотным разрядом // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11, № 18. – С. 1651.
25. Епишин В.А., Маслов В.А., Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. Распространение субмиллиметрового лазерного излучения в широких полых диэлектрических волноводах // “Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн”. – К.: – 1986. – С. 143.
26. Покормяхо Н.Г., Свич В.А., Дрыга О.В. Экспериментальное исследование температурного режима работы импульсных субмиллиметровых лазеров с оптической накачкой излучением ТЕА  $CO_2$ -лазера // Вестник ХГУ, “Радиофизика и электроника”. – 1987. – № 307. – С. 7.
27. Бережной В.Л., Кононенко В.И., Павличенко О.С., Свич В.А., Топков А.Н. и др. Аппаратура для субмиллиметровой лазерной диагностики высокотемпературной плазмы // ХФТИ 87-37, ЦНИИатоминформ., 1987. – С. 34.
28. Донченко И.В., Покормяхо Н.Г., Свич В.А. К вопросу оптимизации параметров импульсного  $D_2O$ -лазера с оптической накачкой // Вестник ХГУ, “Радиофизика и электроника”. – 1988. – № 318. – С. 3.
29. Бережной В.Л., Кононенко В.И., Епишин В.А., Маслов В.А., Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. Волноводные линии передачи для субмиллиметровых лазерных интерферометров // ХФТИ 88-18, ЦНИИатоминформ., 1988. – С. 36.
30. Епишин В.А., Маслов В.А., Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. Неискаженная передача пучка излучения по волноводу типа “канал в диэлектрике” // Радиотехника и электроника. – 1988. – № 4. – Т. 33. – С. 700.
31. Епишин В.А., Маслов В.А., Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. Фокусирующий волновод вида “канал в диэлектрике” // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14. – С. 1335.
32. Епишин В.А., Маслов В.А., Покормяхо Н.Г., Свич В.А. Оптимизация выходной мощности импульсного волноводного  $D_2O$ -лазера с селективной накачкой // Оптико-механическая промышленность. – 1989. – № 7. – С. 24.
33. Епишин В.А., Маслов В.А., Покормяхо Н.Г., Свич В.А. Исследование типов колебаний и оптимизация выходной мощности волноводных субмиллиметровых лазеров с оптической накачкой // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16, № 8. – С. 1566.
34. Епишин В.А., Маслов В.А., Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. Фокусировка лазерных пучков при помощи волновода вида “канал в диэлектрике” // Оптика и спектроскопия. – 1989. – Т. 66, Вып. 3. – С. 688.
35. Гуринов О.В., Маслов В.А., Свич В.А., Ткаченко В.М., Топков А.Н., Лазерный субмиллиметровый магнитополяриметр // Сб. научн. трудов НАН Украины “Применение радиоволн миллимет-

- рового и субмиллиметрового диапазона”, ИРЭ, Харьков. – 1995. – С. 142 - 147.
36. Ткаченко В.М., Топков А.Н., Свич В.А. Волноводный коаксиальный CO<sub>2</sub>-лазер, возбуждаемый ВЧ разрядом// Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 6. – С. 690 - 693.
  37. Бережной В.Л., Кононенко В.И., Епишин В.А., Павличенко О.С., Свич В.А., Анисеев А.Я., Маслов В.А. и др. Многоканальный гетеродинный интерферометр на длине волны 337 мкм для диагностики плазмы// Приборы и техника эксперимента. – 1990. – № 5. – С. 178.
  38. Епишин В.А., Маслов В.А., Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. Передача субмиллиметровых лазерных пучков по волноводам вида “канал в диэлектрике”// Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 4. – С. 480 - 484.
  39. Диденко В.Н., Ткаченко В.М., Свич В.А., Топков А.Н. Кольцевой CH<sub>3</sub>OH-лазер с двунаправленной оптической накачкой// Квантовая электроника. – 1991. – Т. 18, № 7. – С. 809 - 811.
  40. Баскаков О.И., Дюбко С.Ф., Москиенко М.В. Субмиллиметровый вращательный спектр дважды выраженного колебательного состояния  $v_8$  молекулы ацетонитрила// Оптика и спектроскопия. – 1982. – Т. 52, Вып. 1. – С. 173 - 175.
  41. Баскаков О.И., Дюбко С.Ф., Москиенко М.В. Субмиллиметровый вращательный спектр окиси азота NO<sub>2</sub> // Оптика и спектроскопия. – 1982. – Т. 52, Вып. 3. – С. 457 - 461.
  42. Алексеев Е.А., Баскаков О.И., Дюбко С.Ф., Полевой Б.И. Субмиллиметровый вращательный спектр молекул SeO<sub>2</sub>// Труды VII Всесоюзного симпозиума по молекулярной спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения. Часть III. Томск. – 1986. – С. 80 - 83.
  43. Баскаков О.И., Дюбко С.Ф., Шевырев А.С., Пашаев М.А., Эффективный торсионно-вращательный гамльтониан молекул CH<sub>3</sub>OH// Труды VII Всесоюзного симпозиума по молекулярной спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения. Часть III. Томск. – 1986. – С. 75 - 80.
  44. Герасимов В.Г., Дюбко С.Ф., Ефремов В.А., Ефименко М.Н. Катрич А.А.// “Радиофизика и радиоспектроскопия”. – 1999. – Т. 4, № 2. – С. 178 - 183.
  45. Герасимов В.Г., Дюбко С.Ф., Ефремов В.А., Ефименко М.Н., Катрич А.А.// “Радиофизика и электроника”. – 2000. – Т. 5, № 4. – С. 429 - 439.
  46. Герасимов В.Г., Дюбко С.Ф., Ефремов В.А., Ефименко М.Н., Катрич А.А.// “Радиофизика и электроника”. – 2002. – Т. 7, № 2. – С. 151 - 159.
  47. Wfng S.X., Dyubko S.F., Kynshyn V.V. // IVS. – 2001, Vol. 205. – P. 146 - 163.
  48. Герасимов В.Г., Дюбко С.Ф., Ефремов В.А., Ефименко М.Н., Поднос С.В., Подоба В.Б., Резник А.В. // Квантовая электроника. – 1991. – Т. 18, № 4. – С. 410 - 413.
  49. Баскаков О.И., Дюбко С.Ф., Сирота С.В. Вращательный спектр молекул H<sup>13</sup>COOD, D<sup>13</sup>COOH, D<sup>13</sup>COOD в ММ диапазоне длин волн// ЖПС, Минск. – 1991. – Т. 54, № 5. – С. 725 - 728.
  50. Mactagem // J Phys. B. – 1997. – Vol. 30, № 10. – P. 2345 - 2349.
  51. Dyubko S.F., Efremov V.A., Gerasimov V.G. and MakAdam K.B. Microwave spectroscopy of Al I Rydberg states; F terms, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 36,(2003), 3797-3804.
  52. S.F.Dyubko, V.A.Efremov, V.G.Gerasimov and MakAdam K.B. Microwave spectroscopy of Al I atoms in Rydberg states; D and G terms// Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2003. – Vol. 36. – P. 4827 - 4836.
  53. Dyubko S.F., Efremov V.A., Gerasimov V.G. and MakAdam K.B. Microwave spectroscopy of Al I atoms in  $l = 0$  to 4 Rydberg states; Comprehensive quantum defect analysis// Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2004. – Vol. 37.
  54. Орлов В.Г., Кукуш В.Д. О пондеромоторных силах, действующих на тело в волноводе// Труды радиофизического факультета ХГУ. – 1962. – Т. 7, Вып. 2. – С. 433.
  55. Кукуш В.Д. Повышение чувствительности пондеромоторных ваттметров// Труды радиофизического факультета ХГУ. – 1959. – Т. 4. – С. 87 - 91.
  56. Кукуш В.Д., Орлов В.Г. Повышение точности электрической калибровки пондеромоторных измерителей мощности на СВЧ // Измерительная техника. – 1960. – № 2. – С. 76 - 78.
  57. Валитов Р.А., Кокодий Н.Г., Стародубцев Г.П. Безвакуумные пондеромоторные измерители мощности и энергии ОКГ // Радиотехника. – 1979. – Т. 34, № 11. – С. 45 - 49.
  58. Кокодий Н.Г., Ефимов В.Ф., Тимошенко В.Н., Берлин Г.С. Пондеромоторный измеритель энергии ОКГ. – А.С. № 596047. 1977 г.
  59. Кузьмичев В.М., Половников Г.Г., Овчинников И.К., Кукуш В.Д. Балансные статистические калориметры миллиметровых и субмиллиметровых волн // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия VI. Радиоизмерительная техника. – 1964. – Вып. 2 – С. 75 - 82.
  60. А.С. 352229 СССР, G01z 21/00. Квазиоптический измеритель мощности субмиллиметрового диапазона/ В.М.Кузьмичев, Е.Я.Говорун (СССР) . – № 1491597/26-9: Заявлено 13.11.70; опубликовано 26.10.72, Бюл. 28. – С. 140.
  61. Говорун Е.Я., Кузьмичев В.М. Малоинерционный измеритель мощности субмиллиметровых волн// Радиотехника. – 1979. – № 49. – С. 76-78.
  62. Валитов Р.А., Кокодий Н.Г., Кубарев А.В., Кузьмичев В.М. и др. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов. – М.: Стандарт. – 1969. – 184 с.
  63. Калориметрический измеритель мощности и энергии излучения оптических квантовых генераторов типа ИМО-1. (Информационное сообщение)// Труды метрологических институтов СССР. Исследование в области квантовой радиофизики. – 1967. – Вып. 90(150). – С. 23 - 267.
  64. Кузьмичев В.М., Зинченко Н.И. Калориметр средних уровней энергии импульсных ОКГ // Радиотехника. – 1972. – Вып. 23. – С. 114 - 119.
  65. Говорун Е.Я., Кузьмичев В.М. Зеркальная коническая полость как модель черного тела // Радиотехника. – 1976. – Вып. 36. – С. 125 - 138.

66. Кузьмичев В.М., Зинченко Н.И., Сафронов Б.В. Отражательные характеристики зеркально-диффузного конуса // Вестник Харьковского университета. – 1984. – № 255. – С. 62 - 64.
67. Соловьев В.С., Тимофеев Е.П., Кузьмичев В.М., Зинченко Н.И. Снижение погрешности замещения калориметрических измерительных приемников // Украинський метрологічний журнал. – 1997. – № 2. – С. 19 - 21.
68. Кокодий Н.Г. Градиентные калориметры // Украинський метрологічний журнал. – 1977. – Вып. 2. – С. 24-26.
69. Валитов Р.А., Кузьмичев В.М., Закурченко О.Е. Калориметр постоянной температуры для измерения энергии излучения ОКГ // Импульсная фотометрия. – Л.: Машиностроение. – 1969. – С. 52 - 56.
70. Валитов Р.А., Кузьмичев В.М., Закурченко О.Е., Арзуманов А.С. Компенсационный измеритель мощности непрерывного излучения ОКГ // Измерительная техника. – 1971. – №1. – С. 21 - 22.
71. А.С.218250 СССР. МПК G01r 21a<sup>4</sup>, 71 Измеритель малых уровней мощности электромагнитного излучения // Валитов Р.А., Дюбка С.Ф., Свич В.А., Кузьмичев В.М. (СССР). – №1121783/26-10; Заявлено 26.12.66. Оpubл. 17.05.68, Бюл. № 17.
72. Валитов Р.А., Кузьмичев В.М., Сафронов Б.В. Пирозлектрический измеритель мощности ОКГ // Антенно-фидерные и измерительные устройства сверхвысоких частот. – ХГУ. – 1971. – С. 120 - 124.
73. Кузьмичев В.М., Гужва В.Г., Голоденко Н.Н. Воспроизведение импульса ОКГ пирозлектрическим детектором // Импульсная фотометрия. – Л.: Машиностроение. – 1975. – Вып. 4. – С. 90 - 94.
74. Латынин Ю.М., Колток Ю.В., Кузьмичев В.М. Пиромангнитные детекторы излучения // Квантовая электроника. – 1980. – Вып. 19. – С. 88-98.
75. А.С. 411561 СССР. М Кл. H01s 3/00. Измеритель излучения ОКГ / Кузьмичев В.М., Латынин Ю.М. – №1641432/25-26; Заявл. 30.03.71; Оpubл. 15.01.74, Бюл. №2.
76. Кузьмичев В.М., Перепечай М.П. Малоинерционный измеритель мощности лазера на двуокиси углерода // Квантовая электроника. – 1974. – № 11. – С. 2407 - 2410.
77. Кузьмичев В.М., Латынин Ю.М. Поглощение электромагнитных волн металлическим цилиндром // Оптика и спектроскопия. – 1974. – Т. 37. – Вып. 3. – С. 564 - 568.
78. Комолов В.М., Кузьмичев В.М., Латынин Ю.М. Интегральные энергетические характеристики взаимодействия плоской электромагнитной волны с проводником цилиндрического сечения при наклонном падении // Оптика и спектроскопия. – 1977. – Т. 43. – Вып. 2. – С. 280 - 282.
79. Катрич А.Б., Кузьмичев В.М. Измерение направления поляризации электромагнитного излучения // Импульсная фотометрия. – Л.: Машиностроение. – 1978. – Вып. 5. – С. 129-131.
80. А.С. 1152353 СССР. Устройство для измерения распределения плотности мощности // Катрич А.Б., Кузьмичев В.М., Худошин А.В., Готов Е.П., Сажина Н.Н. (СССР). – № 3605827; Заявл. 03.05.84; Зарег. 22.12.84.
81. А.С. 1333009 СССР. Измеритель кривизны фазового фронта пучка излучения // Катрич А.Б., Кузьмичев В.М., Фоменко В.Н., Худошин А.В. (СССР). – №3979239; Заявл. 18.11.85. Зарег. 22.04.87.
82. Кузьмичев В.М., Золотайкин А.В. Исследование нелинейности характеристик преобразования тонкопроволочных болометрических измерителей мощности и энергии лазерного излучения // Измерительная техника. – 1990. – № 12. – С. 20 - 21.
83. Кузьмичев В.М., Соловьев В.А., Лапко А.В. Измерение энергетических параметров интенсивного лазерного излучения профильным тонкопроволочным болометром // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, № 3 – С. 287 - 296.
84. Кузьмичев В.М., Сафронов Б.В., Погорелов С.В., Балкашин В.П. Измерение микрометровых диаметров сфокусированного лазерного излучения тонкопроволочным болометром // Измерительная техника. – 2002. – № 3. – С. 28 - 30.
85. Богданова Т.И., Дзюбенко М.И., Солдатенко С.Е., Шульга В.М. Экспериментальное исследование импульсного ОКГ на молекулярном азоте // Вестн. Харьк. ун-та. – 1991. – Вып. 8, № 180: Радиофизика и электроника. – С. 94 - 98.
86. А.с.965287 СССР / Поликов В.К., Шкумат А.П., Рябухин А.Р., Дзюбенко М.И., Цукерман С.В., Шульга В.М.; заявл. 23.02.81.
87. А.с. 104146 СССР. 1-(5-R-2 тненил)-3-(4-диметиламниофеннл)-пропен 1-оны, в качестве красителя для лазеров с диапазоном плавной перестройки длины волны излучения 515 - 760 нм / Поляков В.А., Шкумат А.П., Рябухин А.Р., Богданова Т.И., Цукерман С.В.; ХГУ (СССР); – № 3402670/25-05; заявл. 26.02.82.
88. Азаров В.В., Богданова Т.И., Рябухин А.Р., Шульга В.М. Характер разрушения монокристаллов иодата лития и АДР излучением азотного лазера // Физика и химия монокристаллов и сцинтилляторов: Сб. научн. трудов ВНИИ монокристаллов. – 1981. – № 7. – С. 216 - 218.
89. Богданова Т.И., Островская Е.М., Рябухин А.Р., Шульга В.М. О накоплении лазерных повреждений в кристаллах LiIO<sub>3</sub> // Монокристаллы, их получение свойства: сб. научн. тр. – 1982. – № 8. – С. 171 - 173.
90. Азаров В.В., Алчаитян С.В., Атрощенко Л.В., Богданова Т.И., Ходеева Н.В., Щербина Е.В. Выращивание и исследование свойств монокристаллов LiIO<sub>3</sub> легированных РЗЭ // Изв. АН СССР. Сер. Неорган. Матер. – 1984. – Т. 20, № 9. – С. 1564-1566.
91. Азаров В.В., Алчаитян С.В., Атрощенко Л.В., Богданова Т.И., Ходеева Н.В. Влияние ионов РЗЭ на свойства монокристаллов LiIO<sub>3</sub> // Физика и химия твердого тела: Сб. научн. тр. ВНИИ монокристаллов Харьков. – 1983. – №10. – С. 121-122.
92. Демочко Ю.А., Богданова Т.И., Азаров В.В., Усольцев И.Ф. О кинетике накопления лазерных повреждений в прозрачных диэлектриках // Квант. электроника. – 1983. – Т. 10, №5. – С. 1041-1042.



93. Богданова Т.И., Азаров В.В., Демочко Ю.А. Об особенностях эффекта накопления лазерных повреждений в водорастворимых кристаллах // Изв. АН СССР. Сер. Физическая. – 1985. – Т. 49, № 4. – С. 791-794.
94. Богданова Т.И., Азаров В.В., Демочко Ю.А. Лазерное упрочнение монокристаллов LiIO<sub>3</sub>// Физика и химия оптических и сцинтилляционных материалов: Сб. научн. тр., ВНИИ монокристаллов. – 1985. – № 14. – С. 41-44.
95. Богданова Т.И., Захаркин Б.И., Демочко Ю.А., Николаев В.Н. Влияние поглощающих центров на кинетику накопления лазерных повреждений в кристаллах иодата и ниобата лития // Квант. Электроника. – 1988. – Т. 15. – № 3. – С. 635 - 637.
96. Перепечай М.П. и др. А.с. № 1484049 от 01. 02. 1989. “Способ контроля коэффициента оптического поглощения прозрачных пластин”.
97. Гектин А.В., Перепечай М.П., Ширан Н.В. Лазерная спектроскопия гамма-облученных кристаллов в области 10-10,8 мкм // Журн. Прикл. Спектроскопия. – 1988. – Т. 48, № 5. – С. 815 - 817.
98. Гектин А.В., Перепечай М.П., Ширан Н.В. Порог оптического пробоя гамма-облученных кристаллов КС1 на длине волны излучения СО<sub>2</sub>-лазера// Выращивание, исследование и применение монокристаллов: Сб. научн. тр. ВНИИ монокристаллов. – Харьков, 1985. – №15. – С.18-21.
99. Островская Е.М., Левченко А.Н., Шульга В.М. Исследование ЭПР облученных монокристаллов КДР// Физика и химия твердого тела: Сб. научн. тр. ВНИИ монокристаллов. –1983. – № 10. – С. 123-125.
100. Шульга В.М., Левченко А.Н., Кобычча Т.А. Парамагнитные радиационные центры в промышленных кристаллах КН<sub>2</sub>РО<sub>4</sub>// Применение магнитного резонанса в народном хозяйстве: Тез. докл. Всесоюзн. конф. Казань (Россия). –1988.– Ч.2. – С.120.
101. Левченко А.Н., Шульга В.М. Просветление кристаллов дигидрофосфата калия при дозах γ-облучения // Журн. Прикл. Спектроскопия. – 1990. – Т. 52, № 5. – С. 857-859.
102. Левченко А.Н., Шульга В.М., Дорошенко А.О. Примесная природа спектров оптического поглощения и люминесценции облученных кристаллов КН<sub>2</sub>РО<sub>4</sub>//Физика твердого тела. –1990. – Т. 32, № 8.– С. 2468 - 2470.
103. Шульга В.М., Левченко О.М. Трансформація домішкових радіаційних дефектів у кристалах дигідрофосфату калію //Укр.фіз.журнал. – 1992 – Т. 37, № 7.– С. 1067 - 1070.
104. Левченко А.Н., Шульга В.М. Исследование ростовых парамагнитных детекторов в монокристаллах КН<sub>2</sub>РО<sub>4</sub>//Вестн. Харьк. ун-та. – 1991. – № 355: Радиофизика и электроника. – С. 11 - 12.
105. Левченко А.Н., Шульга В.М. Влияние парамагнитных детекторов на проводимость монокристаллов дигидрофосфата калия // Вестн. Харьк. ун-та.– 1992.- №371: Радиофизика и электроника.– С. 11 - 14.
106. Левченко А.Н., Шульга В.М., Дорошенко А.О., Щербина Е.В., Островская Е.М. Парамагнитные центры и оптический коэффициент поглощения в облученных кристаллах КН<sub>2</sub>РО<sub>4</sub>. Применение магнитного резонанса в народном хозяйстве // Тез. докл. Всесоюзн. Конф. – Казань (Россия). – 1988. –Ч.2. – С. 121 - 122.
107. А.с. 1609210 А1 СССР, МКИ С 30 В 33/00, 29/14. Способ обработки кристаллов дигидрофосфата калия//В.М.Шульга; РИ НАН, А.Н. Левченко; ХГУ(СССР).-№4655900/31-26; Заявл. 27.02.89. – Оpubл. 22.06.90.-2с.
108. Levchenko A.N., Shulga V.M., Pritula L.M., Velikhov Y.N., Kostyuk V.V., Application of thermal, laser and ionizing radiation conditioning for improvement of KDP and DKDP crystals // Proceeding of 4 th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. Kharkov (Ukraine).– 2002. – P. 31-33.

**ДОСЛІДЖЕННЯ У РАМКАХ ПРОБЛЕМ  
ОСВОЄННЯ МІЛІМЕТРОВОГО ТА  
СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНІВ ДОВЖИН  
ХВИЛЬ ВИКОНАНИХ НА КАФЕДРІ  
КВАНТОВОЇ РАДІОФІЗИКИ**

**В.А. Свiч, С.П. Дюбко,  
В.М. Кузьмичев, В.М. Шульга**

Узагальнені результати комплексних досліджень кафедри квантової радіофізики Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна за 50 років з моменту її заснування.

Зокрема, річ іде про розробки, створення та випробування вимірювачів потужності та енергії, створення та дослідження квантових генераторів субміліметрового діапазону, спектроскопія високого розв'язування атомів і молекул в діапазоні ММ і субММ довжин хвиль ЕПР-спектроскопія.

**RESERCH WITHIN THE HROBLEM OF  
ASSIMILATION OF MILLIMETRE AND  
SUBMILLIMETER DIANASONS OF THE WAVE  
LENGTHS, CARRIED OUT AT THE CHAIR OF  
QUANTUM RADIOPHYSICS**

**V.A. Svich, S.F. Dyubko,  
V.M. Kuzmitchov, V.M. Shulga**

The results of complex research obtained by the chair of quantum radiophysics of Vasil Karazin National University of Kharkiv have been generalized for 50 years since the moment of its opening.

In particular, the question is that the chair have elaborated, created and tested measuring instruments of power and energy, found and investigated of submilimetre diapason, spectroscopy of high delivery of atoms and molecules in the diapason and subMM wave lengths, as well as EPR spectroscopy.