

## Становление и развитие квантовой радиофизики и квантовой электроники СВЧ диапазона в Украине

И. И. Еру, В. М. Шульга

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: eru@rian.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 20 мая 2005 г.*

В статье изложена история возникновения и развития в Украине новых научных направлений – квантовой радиофизики и квантовой электроники СВЧ диапазона. Рассмотрены главные проблемы, стоявшие перед исследователями, и основные этапы исследований и разработок в этих областях. Показан высокий уровень достигнутых результатов, многие из которых и сегодня остаются на рекордно высоком, непревзойденном уровне.

Квантовая радиофизика как совершенно самостоятельная новая область науки, исследующая на квантовом уровне механизмы взаимодействия высокочастотного электромагнитного поля с веществом, начала формироваться в 50-е гг. прошлого века. И именно она стала фундаментом всей будущей квантовой электроники.

Квантовая радиофизика стала интенсивно развиваться после открытия Е. К. Завойским в 1944 г. электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), Ф. Блохом и Е. М. Парселлом в 1946 г. ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и Г. Демельтом и Г. Крюгером в 1950 г. ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР).

Следующий, основополагающий, вклад в развитие квантовой радиофизики и зарождение квантовой электроники был сделан в 1945-1955 гг. впоследствии лауреатами Нобелевской премии Н. Г. Басовым, А. М. Прохоровым (СССР) и Дж. Гордоном, Г. Цайгером, Ч. Таунсом (США), независимо друг от друга предложившими идею построения первого квантового устройства СВЧ – квантового СВЧ генератора

на пучке нейтральных молекул аммиака. В дальнейшем на этой основе были созданы стандарты частоты и времени с фантастическими по тем временам уровнями долговременной стабильности и воспроизводимости частоты. Затем на этой базе была создана система всемирного координированного времени, в основу которой был положен “атомный масштаб времени”.

В 1955 г. Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в СССР и в 1956 г. Н. Бломбергенем в США была предложена трехуровневая и четырехуровневая схемы создания в парамагнетиках инверсии населенностей на одном из квантовых переходов. Революционность этих идей заключалась в том, что впервые была показана принципиальная возможность селективного нарушения распределения Больцмана для населенностей отдельных энергетических уровней квантовой системы. Более того, при этом оказалось возможным создавать превышение населенности уровня по отношению к населенности уровня, расположенного более низко. Это явление получило название “инверсии” населенностей. Тем самым была

заложена основа для создания в квантовых системах совершенно необычных и ранее неизвестных инвертированных состояний, использование которых легло в основу метода квантового усиления, обеспечивающего рекордно низкий уровень собственных шумов, близкий к своему квантовому пределу.

И, наконец, в 1958 г. А. Шавлов и Ч. Таунс и, независимо от них, Н. Г. Басов и А. М. Прохоров предложили структуру квантового генератора оптического диапазона. В 1960 г. был создан первый импульсный, а в 1961 г. и первый непрерывный оптические квантовые генераторы. Это означало, что появился качественно новый источник оптического излучения, важнейшее отличие которого от всех предшественников заключалось в необычайно высокой степени когерентности его излучения.

В Украине исследования в области квантовой радиофизики и квантовой электроники СВЧ диапазона впервые были начаты во второй половине 50-х гг. в Институте радиофизики и электроники (ИРЭ) АН УССР. Инициатором развития этого нового научного направления стал сотрудник одного из отделов института Песковацкий Стефан Анатольевич, впоследствии д. ф.-м. н., профессор, лауреат Государственной премии УССР, заведующий отделом ИРЭ, а затем – отделом в организованном в 1985 г. Радиоастрономическом институте НАН Украины. Он же был первым заведующим созданной им кафедры квантовой радиофизики на радиофизическом факультете Харьковского государственного университета и, соответственно, основоположником научной школы нового направления.

Именно С. А. Песковацкий первый на Украине и один из немногих тогда в мире начал систематические и детальные исследования в области динамики спиновых систем парамагнитных кристаллов, являющейся основой всей физики квантового усиления на СВЧ. Затем к исследованиям присоединилась группа сотрудников ИРЭ – Шамфаров Я. Л., Чернец А. Н., Еру И. И., Ганапольский Е. М., Шульга В. М., Смир-

нова Т. А., Черпак Н. Т., Королев В. Д., Блинов А. К., Мышенко В. В., Лавринович А. А., Стеценко А. И., Кондрашин С. К., Пархоменко М. В., Князьков Л. Б. Многие из них впоследствии стали сотрудниками Радиоастрономического института.

Эти люди за 25-30 лет успешно выполнили огромный объем научных исследований и технических разработок в области квантовой радиофизики и квантовой электроники СВЧ диапазона. В результате была сформирована база знаний и представлений, явившаяся основой для успешного развития в Украине этого нового научного направления. Впоследствии на этой базе были созданы первые в СССР (а некоторые – в мире) высокоэффективные квантовые усилители различного типа сантиметрового и миллиметрового диапазонов с уникальными, непревзойденными параметрами, и сегодня недостижимыми для других типов малошумящих приемных систем СВЧ.

Что предстояло сделать тогда этой группе сотрудников, с чего они начинали и что удалось в итоге выполнить?

Работа всех квантовых устройств базируется на использовании неравновесных состояний, создаваемых тем или иным способом в системе энергетических уровней того или иного атома, иона или молекулы. Условия и возможности возникновения таких состояний полностью определяются динамическими характеристиками данной квантовой системы.

В приложении к квантовым парамагнитным усилителям такой квантовой системой явилась спиновая система магнитных центров в парамагнитном кристалле. В связи с этим прежде всего необходимо было вернуть систематическое и детальное изучение динамики таких спиновых систем и механизмов спин-решеточной релаксации в различных парамагнитных кристаллах, представлявших интерес для квантовой СВЧ электроники. Иными словами, предметом самого тщательного изучения должны были стать механизмы спин-спиновых и спин-фононных взаимодействий в парамагнетиках.

Далее, для выяснения возможности создания квантового усилителя на данном кристалле и оценки его параметров необходимо было исследовать условия создания в спиновой системе парамагнетика неравновесного состояния с инвертированной разностью населенностей на одном из квантовых переходов. При этом очень важной задачей была оценка уровней требуемых для этого мощности накачки и криогенного охлаждения. Последнее позволяло ослабить спин-фононное взаимодействие спин-системы с кристаллической решеткой, облегчив тем самым перевод ее в инвертированное состояние, и таким образом снизить требования к уровню необходимой мощности накачки.

Ответы на все эти вопросы были связаны главным образом с изучением релаксационных процессов в спиновой системе парамагнитного кристалла, т. е. ее динамических характеристик. И для исследования этих механизмов необходимо было научиться идентифицировать их, установив основные свойства каждого в отдельности. Кроме того, необходимо было определить связь инверсионных характеристик с каждым из этих релаксационных механизмов и затем выяснить условия, при которых они в совокупности обеспечивали бы возможность достижения максимально высокого уровня инверсии населенностей спиновых уровней на данном квантовом переходе.

Для получения ответов на эти вопросы потребовалось разработать целый ряд новых специальных, нетрадиционных, а подчас уникальных методов экспериментального исследования всех подлежащих изучению явлений и создать соответствующую аппаратуру для их применения.

Напряженный, настойчивый труд группы сотрудников в течение нескольких лет позволил успешно решить перечисленные задачи [1-5].

Уникальный, впервые созданный аппаратный комплекс дал возможность приступить к изучению и решению очень сложных и нетрадиционных задач, прежде всего к исследованию особенностей динамичес-

ких характеристик спиновых систем парамагнетиков.

Был получен ряд фундаментальных физических результатов [6-13].

Прежде всего была исследована форма линии ЭПР и детально изучены процессы и механизмы передачи энергии между различными ее участками (кросс-релаксация). При этом было обнаружено наличие у линии ЭПР протяженных “крыльев”, играющих, как оказалось, важную роль в процессах спин-решеточной релаксации и негативно, как было установлено, влияющих на инверсионные характеристики парамагнитного кристалла. Удалось также обнаружить совершенно новый механизм релаксации – через дальнее “крыло” линии ЭПР. В этом механизме ЭПР поглощение было обусловлено в основном парами ионов, оказавшихся в силу случайного распределения их по парамагнитному кристаллу на расстоянии друг от друга, много меньшем среднего расстояния, определяемого их концентрацией в кристалле. Сильное взаимодействие между такими близко расположенными ионами расширяло полосу частот спин-фононного взаимодействия и тем самым увеличивало скорость релаксации этой группы ионов. Удалось также найти ряд новых закономерностей и аномалий в частотной зависимости скорости спин-решеточной релаксации.

Впервые была подробно изучена температурная зависимость скорости спин-решеточной релаксации в очень широком интервале температур, включая сверхнизкие ( $<1$  К), что позволило провести надежное разделение вкладов различных релаксационных механизмов, действующих в разных температурных интервалах.

Важным оказался впервые исследованный и успешно решенный вопрос о природе взаимодействий между магнитными центрами в парамагнитном кристалле и влиянии их на динамику спиновой системы в таких кристаллах. Иными словами, впервые удалось исследовать влияние концентрации магнитных центров в парамагнитном кристалле на динамику спин-решеточ-

ных взаимодействий в нем. Дело в том, что в рамках существовавших до этого представлений о диполь-дипольном взаимодействии между магнитными центрами невозможно было объяснить полученную в экспериментах форму концентрационной зависимости скорости спин-решеточной релаксации. В связи с этим был предложен новый механизм взаимодействия между этими центрами – квадруполь-квадрупольный (а затем более общий – мультиполь-мультипольный), позволивший объяснить очень многие экспериментально наблюдаемые результаты. Одновременно удалось выяснить роль классических механизмов такого взаимодействия: диполь-дипольного и обменного.

Продуктивными оказались исследования спин-фононных взаимодействий при сверхнизких температурах, которые дали возможность определить степень влияния на релаксационные процессы в парамагнетиках обменного взаимодействия. При этом удалось объяснить “загадку узкого фононного горла”, предложенную к рассмотрению Ван Флеком еще в 1939-1941 гг. и не нашедшую своего экспериментального подтверждения вплоть до начала работ харьковской группы исследователей.

Очень серьезным моментом при решении вопроса о принципиальной пригодности и потенциальных возможностях того или иного парамагнитного кристалла для квантового усиления на СВЧ являлось выяснение степени влияния взаимодействия между магнитными центрами кристалла на его инверсионные характеристики. Проведенные здесь исследования и анализ полученных результатов позволили полностью ответить и на этот вопрос.

В целом полученные за этот период результаты позволили установить связь между характеристиками всех основных изученных к этому времени активных кристаллов квантовой СВЧ электроники (рубина, сапфира, изумруда и рутила) и параметрами квантовых усилителей на их основе. Таким образом, впервые появилась возможность

не только решать вопрос о принципиальной пригодности того или иного парамагнитного кристалла для квантового усиления, но и устанавливать оптимальные значения всех тех параметров кристалла, которые необходимы для эффективной работы такого усилителя в данном частотном диапазоне. В частности, была показана возможность определения оптимального уровня концентрации магнитной примеси в кристалле, при котором еще не начинает сказываться ее негативное влияние на инверсию и на параметры квантового усилителя.

Весь объем полученной информации позволил исследователям впервые перейти к осознанному (а не методом проб и ошибок, как это было до сих пор) выбору активных кристаллов для высокоэффективного квантового усиления в заданном диапазоне частот и созданию на их основе самих усилителей.

Теперь, прежде чем двигаться дальше, необходимо было решить вопрос о диапазоне частот, в котором предполагалась реализация квантового усиления, а затем переходить к поиску наиболее пригодного для этой цели парамагнитного кристалла и выбору типа электродинамической системы для усилителя.

На этом этапе интересы разработчиков разделились. Одна группа – Песковацкой С. А., Чернец А. Н., Еру И. И., Шульга В. М., Мышенко В. М., Королев В. Д., Блинов А. К., Князьков Л. Б. – решила сосредоточить свои усилия на изучении возможностей максимального продвижения квантового усиления в миллиметровый диапазон вплоть до его самой коротковолновой части. Вторая – Шамфаров Я. Л., Смирнова Т. А., Черпак Н. Т., Стеценко В. И., Лавринович А. А., Кондрашин С. К., Пархоменко М. В. – решила ограничить свои работы в области квантового СВЧ усиления длинноволновой частью миллиметрового диапазона, но направить усилия на изучение возможностей и особенностей широкополосного квантового усиления в режиме бегущей волны, что также не-

сомненно представляло большой научный и практический интерес.

Первая группа начала свои исследования с поиска активного кристалла, потенциально пригодного для решения поставленной задачи. Внимание ее привлек совершенно новый, тогда практически неизученный кристалл из группы алюмосиликатов – андалузит с примесью трехвалентного железа. В то время о нем были получены самые первые, предварительные сведения, касающиеся его спектра ЭПР. Основным аргументом в пользу такого выбора стало следующее обстоятельство. При всех прочих равных условиях рабочие частоты квантового СВЧ усилителя удастся продвинуть тем дальше в сторону высоких частот, чем больше у спектра ЭПР его активного кристалла величина начального расщепления спиновых уровней энергии в нулевом магнитном поле. Как показали первые ЭПР измерения, у андалузита этот параметр оказался на порядок больше, чем у ставшего тогда почти классическим материалом квантовой СВЧ электроники дециметрового и сантиметрового диапазонов рубина (корунда с трехвалентным хромом). Обнаруженный, изученный и предложенный в Харькове к использованию в квантовой электронике миллиметрового диапазона кристалл – андалузит – и сегодня остается лучшим среди всех известных активных кристаллов для квантовых усилителей.

Как уже отмечалось, качество любого квантового усилителя, уровень его параметров в большой степени определяются релаксационными и инверсионными характеристиками активного кристалла. Поэтому необходимо было исследовать эти характеристики андалузита и выяснить условия и возможности создания неравновесных инвертированных состояний в его спиновой системе прежде всего в миллиметровом диапазоне длин волн и учесть специфику этого диапазона. Дело в том, что на столь высоких частотах резко возрастает вклад механизма неоднородного уширения в ширину линии ЭПР в парамагнитных кристаллах. Это, в свою очередь, при-

водит к необходимости учета негативного влияния такого уширения на величину магнитного декремента активного кристалла, в значительной мере определяющего многие параметры квантового усилителя. Поэтому наряду с релаксационными и инверсионными характеристиками активного кристалла в этом диапазоне частот требовалось детально изучить форму и ширину линии ЭПР с целью выяснения механизмов ее уширения.

Необходимо отметить, что все исследования андалузита были осложнены тем, что их приходилось выполнять в отсутствие технологии искусственного синтеза этого кристалла. Поэтому пришлось отбирать наиболее совершенные кристаллы естественного происхождения, предварительно тестируя их на степень монокристалличности и тщательно определяя уровень примеси ионов трехвалентного железа.

Для получения ответов на эти вопросы была развернута обширная программа исследований характеристик андалузита в широких диапазонах частот, магнитных полей, температур и концентраций магнитных центров, что потребовало очень больших затрат сил и времени. Результаты ее кратко сводятся к следующему [14-20].

Естественные образцы андалузита всегда содержат некоторое количество примеси окиси железа. Исследование и анализ спектра ЭПР ионов трехвалентного железа в андалузите показали, что они образуют два магнитных комплекса, оси  $Z$  которых (оси аксиальной симметрии диамагнитного окружения парамагнитного иона) лежат в плоскости, перпендикулярной оптической оси кристалла, и образуют друг с другом угол  $57.9^\circ$ .

Шесть уровней энергии спектра ЭПР ионов трехвалентного железа в андалузите и большое начальное расщепление (115.5 и 234 ГГц) этого спектра открывали широкие возможности для построения различных схем создания в спиновой системе этого кристалла стационарных неравновесных состояний с инвертированной разностью населенностей, пригодных для осуществления квантового усиления в миллиметровом

диапазоне. При этом, как показал проведенный анализ, наличие двух магнитных комплексов ионов железа в этом кристалле давало некоторые дополнительные возможности для улучшения характеристик квантового усилителя на его основе. Следует отметить, что к числу особенностей андалузита, ценных для использования в устройствах миллиметрового диапазона, относится то, что, как показали специальные исследования, диэлектрические потери в нем на этих частотах ничтожно малы, а диэлектрическая проницаемость имеет вполне умеренную величину – 8.

Как уже отмечалось, релаксационные характеристики парамагнитных кристаллов полностью определяют возможности создания в их спиновой системе инвертированных состояний. И поэтому уже предварительный анализ характеристик позволял получить однозначный ответ на вопрос о принципиальной пригодности кристалла для квантового усиления в данном частотном диапазоне.

Исследования релаксационных, а затем и инверсионных характеристик андалузита были проведены на естественных образцах с концентрацией железа в них  $0.06 \div 0.08 \%$  на частотах 9, 36 и 72 ГГц. Инверсия осуществлялась на самом нижнем внутридублетном переходе при перпендикулярной ориентации кристалла во внешнем магнитном поле с трехуровневой схемой накачки. При этой ориентации, когда магнитное поле направлено вдоль оптической оси кристалла, оба магнитных комплекса ионов железа в андалузите становятся магнитно-эквивалентными. Поэтому такая ориентация кристалла андалузита в магнитном поле устраняет эффекты, связанные с процессами кросс-релаксации, и упрощает тем самым анализ и толкование получаемых экспериментальных данных.

Анализ проведенных релаксационных исследований позволил, прежде всего, идентифицировать механизмы релаксации, действующие в андалузите. Оказалось, что в изученных интервалах температур ( $1.4 \div 10$  К) и частот (до 150 ГГц) об-

мен энергией между нижним дублетом и кристаллической решеткой осуществляется через два верхних дублета посредством хорошо известного механизма релаксации Аминова–Орбаха. А прямой обмен энергией нижнего дублета с решеткой на этих частотах практически отсутствует. Полученные в экспериментах результаты позволили установить форму частотной и температурной зависимостей скорости решеточной релаксации нижнего дублета, а затем определить скорости релаксации для дублетных переходов. Что касается влияния концентрации магнитной примеси на скорость спин-решеточной релаксации в андалузите, то оно было обнаружено лишь при концентрациях выше 0.1 % и было обусловлено, как уже отмечалось, механизмом квадруполь-квадрупольного взаимодействия между магнитными ионами. Таким образом, в этих экспериментах удалось установить все основные качественные и количественные особенности процесса спин-решеточной релаксации в спин-системе ионов трехвалентного железа в кристаллической решетке андалузита и создать законченную картину этого процесса.

Существенным для определения пригодности парамагнитного кристалла для квантового усиления является также вопрос о ширине линии ЭПР и степени однородности ее уширения. Здесь, правда, следует отметить, что некоторое уширение линии в активном кристалле квантового усилителя может быть даже желательным для повышения широкополосности усилителя. Однако такое уширение необходимо осуществлять только контролируемым образом. Уширение линии, вызванное случайными причинами, не только затрудняет решение задачи о расширении полосы усиления квантового усилителя, но и существенно затрудняет создание самого инвертированного состояния в активном кристалле. В связи с этим при предварительном анализе пригодности парамагнитного кристалла для квантового усиления всегда требуется очень тщательное исследование ширины и формы линии ЭПР

в данном интервале частот, а также механизмов ее уширения. Это тем более необходимо в случае кристаллов естественного происхождения, какими являлись кристаллы андалузита.

Для андалузита такие исследования были проведены на разных переходах в диапазоне частот  $9 \div 200$  ГГц и в магнитных полях  $0.1 \div 1.2$  Тл в широком интервале концентраций ионов трехвалентного железа. Удалось определить ширину линии ЭПР для разных переходов и рассчитать ее зависимость от магнитного поля для трех ориентаций кристалла в этом поле ( $30^\circ$ ,  $44^\circ$ , и  $90^\circ$ ). Результаты расчетов хорошо совпали с экспериментальными данными. Что касается степени однородности уширения линий ЭПР в андалузите, то она оказалась достаточно высокой. Скорость распространения возмущения в пределах ширины линии, даже в слабоконцентрированных кристаллах (с концентрацией не более 0.1 %), была минимум на  $2 \div 3$  порядка выше скорости спин-решеточной релаксации.

Все результаты этих исследований надежно подтвердили реальную возможность создания в спиновой системе ионов трехвалентного железа андалузита инвертированных состояний в миллиметровом диапазоне. Тем самым была доказана его принципиальная пригодность для квантового усиления в этом диапазоне длин волн. Теперь требовалось найти реально достижимый уровень инверсии населенностей в спиновой системе этого кристалла – главный параметр, определяющий практически все характеристики квантового усилителя.

Шесть уровней энергии в спектре ЭПР ионов железа в андалузите открывали очень широкие возможности для построения самых различных схем инверсии в спиновой системе этого кристалла как с одночастотной, так и с многочастотными схемами накачки. Каждая из этих схем имела свои достоинства и недостатки и характеризовалась предельно достижимым уровнем инверсии. В целом все они позволяли создавать стационарные неравновесные состояния практически

во всем СВЧ диапазоне вплоть до самой коротковолновой части его миллиметрового интервала. При этом оказалось, что среди этих схем инверсии в андалузите всегда можно найти такую, которая обеспечивала бы, даже в слабоконцентрированных кристаллах, величины инвертированного магнитного декремента заметно более высокие, чем у всех других, уже используемых в квантовых усилителях, активных кристаллов. Как показал анализ, в андалузите наиболее перспективными оказались две одночастотные схемы инверсии – трехуровневая схема с  $90^\circ$ -градусной и четырехуровневая симметричная схема с  $44^\circ$ -градусной ориентацией кристалла в магнитном поле. Теоретический анализ и подробные экспериментальные исследования этих двух схем создания стационарных инвертированных состояний в андалузите позволили установить следующее [21-34].

При  $90^\circ$ -градусной ориентации оказалось возможным значительно ослабить влияние на ширину линии ЭПР разброса по направлениям кристаллографических осей кристалла. Это очень важно в ситуации, когда речь идет о несовершенных кристаллах естественного происхождения, как в случае андалузита. Кроме того, в этой ориентации очень легко использовать одновременно оба магнитных комплекса ионов железа для осуществления квантового усиления. К тому же большая величина  $g$ -фактора (параметр, определяющий крутизну зависимости расщепления нижнего дублета от магнитного поля) нижнего перехода (1–2), используемого в этой схеме в качестве сигнального, позволяла во время работы в сравнительно небольших магнитных полях перестраивать в широких пределах частоту усиливаемого сигнала при совсем незначительном изменении частоты накачки.

Расчеты и экспериментальные исследования инверсионных характеристик андалузита в такой схеме инверсии показали, что основная характеристика инвертированного состояния – коэффициент инвер-

сии – изменяется в этой схеме от 8 на частоте 10 ГГц до 1 на частотах около 44 ГГц и далее постепенно снижается до 0 (т. е. инверсия исчезает совсем) на частотах около 80 ГГц. И все это имеет место в магнитных полях не более 1.2 Тл.

Далее было установлено, что в этой же ориентации с трехуровневой схемой накачки можно осуществить инверсию на более высоких частотах. Однако здесь уже необходимо использовать в качестве сигнального не внутридублетный (1 – 2), а междублетный переход (2 – 3). При этом требуются большие магнитные поля (более 1.5 Тл). Кроме того, в такой схеме использование другого, более высоко расположенного, сигнального перехода (2 – 3 вместо 1 – 2) неизбежно приводит к соответствующему падению равновесной разности населенностей на этом переходе, что неминуемо ведет к снижению величины инвертированного магнитного декремента. А это должно негативно сказываться на всех параметрах квантового усилителя, работающего с такой схемой инверсии.

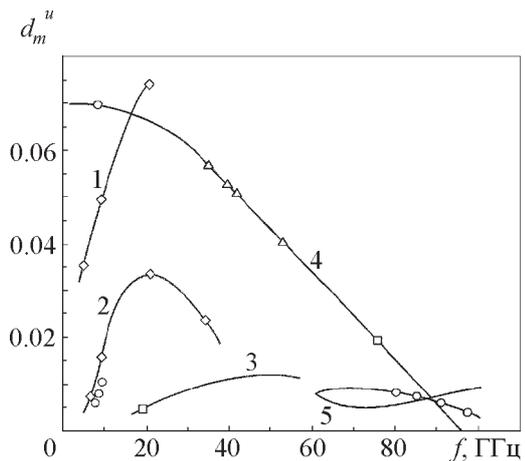
В четырехуровневой симметричной 44-градусной схеме инверсии поле накачки используется одновременно на двух совпадающих переходах (1 – 3 и 2 – 4), что делает такую схему накачки полностью эквивалентной случаю двухчастотной накачки. Это обстоятельство существенно повышает эффективность накачки и открывает возможности для получения более высоких значений коэффициента инверсии в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

В этой схеме также просматриваются два возможных варианта – низкочастотный и высокочастотный. Низкочастотный вариант реализуется в относительно слабых магнитных полях (не выше 1.0 ÷ 1.2 Тл) и с частотой накачки не выше 130 ÷ 150 ГГц. Интервал рабочих частот в этом варианте составляет от 70 до 105 ГГц. Высокочастотный вариант требует значительно более сильных магнитных полей (до нескольких Тл) и более высокочастотной накачки (до 200 ГГц), что существенно осложняет его практичес-

кую реализацию. Но он может позволить продвинуться в область еще более высоких рабочих частот и повысить при этом значения коэффициента инверсии и инвертированного магнитного декремента.

Результаты всех проведенных исследований показали несомненные преимущества андалузита перед всеми другими кристаллами, которые предполагалось использовать в квантовых усилителях (рис. 1). Анализ этих результатов, в частности, позволяет понять, почему и в чем выбранные шведскими исследователями кристаллы рутила (с хромом и железом) уступали кристаллам андалузита. На рутиле так и не удалось создать лазеры в коротковолновой части миллиметрового диапазона с необходимыми для практического использования характеристиками.

До сих пор речь шла только о слабоконцентрированных кристаллах андалузита. И подавляющее число экспериментов также было выполнено именно на них. В то же время несомненный интерес представляло выяснение возможностей использования в квантовых усилителях кристаллов андалузита с повышенным содержанием ионов железа.



**Рис. 1.** Частотная зависимость инвертированного магнитного декремента активных веществ квантовых усилителей: 1 – рубин,  $\theta = 90^\circ$ ; 2 – рубин,  $\theta = 54.7^\circ$ ; 3 – изумруд; 4 – андалузит,  $\theta = 90^\circ$ ; 5 – андалузит,  $\theta = 43.3^\circ$

Физической основой для этого стало полное определение всех механизмов спин-фононного взаимодействия в парамагнитных мазерных кристаллах. Оказалось, что концентрационнозависящие механизмы в них очень слабо зависят или практически совсем не зависят от частоты, а их относительное влияние на величину предельно достижимого значения коэффициента инверсии с ростом частоты непрерывно уменьшается. Поэтому с повышением частоты можно использовать все более высокие концентрации магнитных центров в активном кристалле. А коэффициенты инверсии, которые определяются здесь только механизмом взаимодействия Ван Флека, практически совпадают с коэффициентами слабоконцентрированных кристаллов андалузита.

Но при этом следовало иметь в виду, что увеличение концентрации магнитной примеси в парамагнитном кристалле неизбежно будет сопровождаться общим уширением линий ЭПР, которое может ограничивать рост магнитного декремента с ростом концентрации. Тем не менее анализ показал, что на частотах выше 100 ГГц увеличение концентрации железа в андалузите приводит к росту магнитного декремента.

Использование в квантовых усилителях концентрированных кристаллов андалузита должно будет сопровождаться увеличением необходимой мощности накачки. Но мощность накачки с ростом концентрации будет увеличиваться медленнее, чем сама концентрация. К тому же при практической реализации этот эффект можно будет компенсировать использованием более эффективной электродинамической системы, обеспечивающей хорошее взаимодействие поля накачки с активным кристаллом.

Экспериментальная проверка всех этих соображений на четырехуровневой симметричной схеме накачки при концентрации железа в кристалле 0.08 и 0.23 % показала, что при повышении концентрации почти втрое мощность накачки возрастает лишь в полтора раза. Зато при этом величина инвертированного магнитного декремента увеличивается в 2.5 раза, и его произведе-

ние на ширину линии ЭПР – не менее, чем в 2.5 раза. Оба этих обстоятельства очень важны по следующей причине. При создании квантового усилителя резонаторного типа первостепенное значение при выборе активного кристалла имеет именно величина его инвертированного магнитного декремента. В случае же квантового усиления в режиме бегущей волны таким определяющим параметром является величина произведения инвертированного магнитного декремента на ширину линии ЭПР.

Использование для квантового усиления концентрированных кристаллов андалузита позволяет рассмотреть вопрос о возможности повышения рабочих температур квантового усилителя [24-26]. Дело в том, что повышение рабочих температур усилителя до значений выше гелиевых приводит к тому, что при этом неизбежно происходит падение магнитной восприимчивости активного кристалла и коэффициента инверсии. Правда, такое уменьшение магнитной восприимчивости можно частично компенсировать увеличением концентрации магнитной примеси в кристалле.

Одной из причин падения восприимчивости и инверсии при повышенных температурах в парамагнетике является усиление роли двухфононных процессов, по сравнению с однофононными, в механизме обмена энергии между спин-системой и решеткой. Для ослабления влияния этого эффекта представлялось целесообразным использовать в таких “теплых” квантовых усилителях активные кристаллы с дебаевской температурой порядка рабочих температур самих этих усилителей и кристаллы с большими характерными квантами в спиновой системе. Всеми этими качествами мог обладать андалузит, у которого дебаевская температура, судя по его механическим свойствам, должна была быть заметно ниже, а характерные кванты на порядок больше, чем у рубина.

Эксперименты по инверсии спиновых населенностей в андалузите, проведенные в 3-см диапазоне в интервале температур

2 ÷ 60 К, показали, что в нем даже при температуре жидкого азота еще отсутствует заметное влияние двухфононных процессов релаксации, и поэтому коэффициент инверсии не падает ниже 2.0 ÷ 2.2. Эти значения (более чем вдвое) выше, чем в рубине при этих же условиях. Численные оценки показали, что такой “теплый” квантовый усилитель на андалузите даже при температуре жидкого азота должен иметь шумовую температуру не выше 40 ÷ 50 К в 3-см диапазоне и 20 ÷ 25 К в 10-см диапазоне длин волн.

Таким образом, анализ возможностей андалузита как активного кристалла квантовой СВЧ электроники позволил сделать однозначное заключение о перспективности его использования для квантового усиления. Он показал, что на основе этого кристалла при достаточно невысоких значениях магнитного поля (до 3 Тл) можно создавать высокоэффективные квантовые усилители, работающие на всех частотах вплоть до 150 ГГц. Для подтверждения этого вывода было решено разработать образцы таких устройств.

В последующие годы, опираясь на результаты фундаментальных исследований мазерных характеристик андалузита и выполнив ряд специальных технических разработок, группа разработчиков создала резонаторные варианты квантовых усилителей на андалузите для 7-мм и 3-мм диапазонов [35-51]. Первый из них при мощности накачки не более 100 ÷ 200 мВт обеспечивал мгновенную полосу усиления до 30 МГц при усилении 20 дБ и полосе перестройки 5 ГГц. Второй квантовый усилитель обеспечивал те же параметры в 3-мм диапазоне при мощности накачки менее 100 мВт. При этом была продемонстрирована реальная возможность дальнейшего снижения уровня накачки и расширения мгновенной полосы частот этих усилителей до 80 ÷ 100 МГц, что уже было близко к ширине полосы квантовых усилителей бегущей волны. Что касается главного параметра этих усилителей – уровня их собственных шумов, – то он не превышал 25 ÷ 30 К. Это было тогда и осталось

сегодня абсолютным рекордом для режима однополосного приема в коротковолновой части миллиметрового диапазона. При этом необходимо подчеркнуть, что разработанный в Харькове квантовый усилитель 3-мм диапазона на андалузите до сих пор не имеет аналогов в мире. Этот усилитель (рис. 2) был успешно испытан и применен на радиотелескопе РТ-25×2 (г. Нижний Новгород, Россия) и на радиотелескопе РТ-22 (пос. Симеиз, Украина).

Теперь о втором направлении исследований в квантовой СВЧ электронике, развиваемом в те годы в ИРЭ.

На самой начальной стадии этих исследований основное внимание было направлено на изучение релаксационных, инверси-



**Рис. 2.** Квантовый усилитель 3-мм диапазона на андалузите

онных и усилительных характеристик облученного нейтронами кварца [52-55]. Очень простая двухуровневая система спиновых уровней и легкость, с которой можно варьировать концентрацию магнитных центров в этом парамагнетике путем изменения дозы облучения, давали возможность изучать с его помощью саму физику квантового усиления на СВЧ. Однако следует отметить, что двухуровневая схема инверсии позволяет, принципиально, осуществлять квантовое усиление только в импульсном режиме.

Полученный опыт дал возможность приступить к изучению вопросов, связанных с осуществлением непрерывного широкополосного квантового усиления в режиме бегущей волны на кристаллах с трехуровневой и четырехуровневой схемами накачки. Этот режим по уровню мощности накачки и, соответственно, по скорости испарения гелия уступал резонаторному варианту, но зато он открывал путь к более широкополосному квантовому усилению с несомненно более высоким уровнем стабильности этого усиления.

Вначале было решено опробовать методику такого усиления в коротковолновой части сантиметрового диапазона, используя для этого наиболее полно тогда уже изученный кристалл рубина [56-71]. В итоге были созданы три рубиновых квантовых усилителя бегущей волны: усилитель 4-см диапазона с усилением 46 дБ и мгновенной полосой 18 МГц, усилитель 4-см диапазона с усилением 33 дБ и мгновенной полосой 30 МГц и усилитель 3-см диапазона с усилением 40 дБ и мгновенной полосой 16 МГц. Уровень шумов всех этих усилителей не превышал  $13 \div 15$  К, что соответствовало уровню самых лучших тогда мировых результатов.

Затем начались разработки квантовых усилителей бегущей волны в длинноволновой части миллиметрового диапазона, где предпочтение при выборе активного кристалла было отдано, естественно, андалузиту.

На этом этапе заново был проанализирован вопрос о выборе и разработке типа

электродинамической замедляющей системы с требуемыми параметрами, обеспечивающей в миллиметровом диапазоне эффективное взаимодействие полей сигнала и накачки с активным кристаллом в режиме бегущей волны [72-77]. При этом удалось создать надежный узел широкополосного согласования системы с волноводами сигнала и накачки. Была установлена частотная зависимость потерь в ней, что было очень важным для выяснения возможностей использования этой системы в средневолновом, а затем в коротковолновом участке миллиметрового диапазона. Был, наконец, (на основе текстурированных гексаферритов) успешно решен вопрос о невязимном элементе, обеспечивающем однонаправленность квантового усиления в режиме бегущей волны в полосе перестройки до 20 % [78-82].

В качестве источников накачки для создаваемых усилителей были выбраны генераторы дифракционного излучения, также разрабатывавшиеся тогда в ИРЭ и обладавшие требуемым уровнем мощности (до нескольких ватт) и высокой стабильностью рабочей частоты [92-94].

Затем, с использованием результатов всех описанных выше исследований андалузита как активного кристалла для квантового усиления в миллиметровом диапазоне был проведен анализ возможностей реализации на его основе квантового усилителя бегущей волны.

Весь комплекс предварительных исследований и анализ полученных результатов позволили, создать к началу 80-х гг. высокоэффективные квантовые усилители бегущей волны на андалузите для работы в длинноволновой части миллиметрового диапазона [83-100].

Эти усилители предназначались для работы в 7-мм диапазоне длин волн. При рабочей температуре  $1.7 \div 2.0$  К и мощности накачки порядка 1 Вт на длине активного кристалла 20 мм в замедляющей системе с групповым замедлением 20 было получено усиление  $20 \div 30$  дБ в полосе частот  $150 \div 100$  МГц. Перестройка частоты при

этом составляла 500 МГц при фиксированной частоте накачки и 5 ГГц при ее перестройке.

Далее были исследованы возможности увеличения эффективности накачки и широкополосности этих усилителей. В результате путем повышения группового замедления в электродинамической системе до 40 и путем использования дополнительной распределенной магнитной расстройки активного кристалла, обусловленной влиянием ферритового невзаимного элемента и некоторой разориентацией магнитных комплексов железа в андалузите, удалось расширить мгновенную полосу усиления до 300 МГц при усилении 20 дБ и снизить при этом мощность накачки до 350 ÷ 500 мВт. Уровень собственных шумов этих квантовых усилителей не превышал 25 ÷ 30 К. Эти цифры совершенно однозначно свидетельствовали о рекордно высоких значениях параметров созданных квантовых усилителей бегущей волны миллиметрового диапазона на андалузите.

Подводя общий итог всей деятельности за период 50-80 гг., направленной на становление и успешное развитие в Украине квантовой радиофизики и квантовой электроники СВЧ диапазона, можно без сомнения утверждать следующее. Целенаправленный поиск харьковской группы радиофизиков и последующий обширный комплекс проведенных ими фундаментальных исследований позволили впервые детально изучить и успешно решить практически все вопросы, касающиеся физики и техники высокоэффективного квантового усиления на СВЧ, и в частности, в миллиметровом диапазоне. Все эти успехи были достигнуты благодаря глубокому подходу к проблеме квантового усиления в СВЧ диапазоне, который объединял выбор квантовой системы (активного кристалла усилителя), полное изучение ее релаксационных и инверсионных характеристик, способов и условий получения в ней инверсии и, наконец, практическое воплощение всех полученных фундаментальных научных результатов в разработках высокоэффективных квантовых усилителей.

За успешное выполнение обширной программы научных исследований и технических разработок несколькими сотрудниками РИ НАНУ в 1989 г. была присуждена Государственная премия УССР в области науки и техники.

В 90-е гг. в рассмотренном интервале частот (10 ÷ 100 ГГц) в малошумящих приемных системах все более широкое применение стали находить транзисторные усилители. Хотя они несколько уступали квантовым усилителям по уровню шумов, зато обладали рядом заметных преимуществ и удобств в области практической реализации.

В то же время по уровню чувствительности они оказались вполне пригодными для решения многих практических задач, требующих высокочувствительного приема. Поэтому сейчас область применения квантовых усилителей сузилась и ограничивается научными задачами, где крайне необходим предельно низкий уровень шумов используемых приемных систем. Это главным образом исследования в области радиоастрономии.

И тем не менее сегодня безусловно нужно отдать должное квантовым усилителям СВЧ, этим совершенным устройствам и, конечно, людям, в свое время создавшим их. Благодаря рекордно низкому, так и непревзойденному даже спустя 30-35 лет, уровню собственных шумов, эти усилители дали возможность совершить революционный прорыв в области повышения чувствительности приемных систем СВЧ, увеличив ее сразу на несколько порядков и приблизив непосредственно к своему квантовому пределу. Таким образом, эти усилители открыли возможность для проведения совершенно уникальных, ранее абсолютно недоступных исследований в новейших тогда областях науки и техники, таких как радиоастрономия и сверхдальняя космическая связь.

В заключение мы просим прощения у коллег, если случайно не упомянули о какой-либо их публикации по рассматриваемому вопросу.

## Литература

1. Песковацкий С. А. Аппаратура для измерения времени спин-решеточной релаксации // ПТЭ. – 1966. – №4. – С. 226-227.
2. Установка для исследования твердых тел на СВЧ при температурах ниже 1К: А.с. 448376 СССР. Песковацкий С. А., Шульга В. М. Опубл. 1974, Бюл. №40.
3. Песковацкий С. А., Полуяненко А. П., Шульга В. М. Установка для исследования твердых тел на сверхвысоких частотах при сверхнизких температурах // УФЖ. – 1972. – Т. 17, №2. – С. 218-221.
4. Шамфаров Я. Л. Высокочувствительный парамагнитный спектрометр на частоту 9000 МГц // ПТЭ. – 1959. – №6. – С. 57-60.
5. Шамфаров Я. Л. Установка для исследования электронной спин-решеточной релаксации при низких температурах на частоте 9 ГГц // ПТЭ. – 1963. – №5. – С. 134-138.
6. Песковацкий С. А., Чернец А. Н. Концентрационная зависимость времени спин-решеточной релаксации // ФТТ. – 1962. – Т. 4, №3. – С. 655-657.
7. Песковацкий С. А., Чернец А. Н., Шеина Т. Г. Спин-решеточная релаксация в этил-сульфате гадолиния // ФТТ. – 1962. – Т. 4, №3. – С. 657-660.
8. Schulga V. M. "Some features of SLR in crystals with enhanced concentrations of paramagnetic centers", in *Magnetic resonance and related phenomena*, Ed. by E. Kundle. Berlin: Springer Verb., 1979, P. 287.
9. Песковацкий С. А., Шульга В. М. Спин-решеточная релаксация в рубине при низких температурах // ФТТ. – 1971. – Т. 13, №12. – С. 3608-3615.
10. Песковацкий С. А. Влияние взаимодействия между магнитными центрами на скорость их продольной релаксации: Препр. / ИРЭ АН УССР; №239. – Харьков: 1984. – 31 с.
11. Peskovatskii S. A. Electromultipole interaction and paramagnetic relaxation in ruby (pt. II Shielding of the ion multipoles in the crystals lattice) // Phys. Status Solidi. – 1970. – Vol. 40, No. 1. – P. 359-364.
12. Peskovatskii S. A. Electromultipole interaction and paramagnetic relaxation in ruby (pt. III Distant wing shape of EPR lines). // Phys. Status Solidi. – 1972. – Vol. 44, No. 2. – P. 543-550.
13. Peskovatskii S. A. Electromultipole interaction and paramagnetic relaxation in ruby (pt. IV Spin – lattice relaxation) // Phys. Status Solidi. – 1972. – Vol. 44, No. 2. – P. 551-563.
14. Еру И. И., Песковацкий С. А., Чернец А. Н. Спин-решеточная релаксация иона  $Fe^{3+}$  в естественном андалузите при низких температурах // ФТТ. – 1965. – Т. 7, №2. – С. 363-366.
15. Еру И. И., Песковацкий С. А., Чернец А. Н. Спин-решеточная релаксация в андалузите в см и мм диапазонах радиоволн. / В кн. "Радиоспектроскопия" / – М.: Атомиздат, 1967. – С. 23-28.
16. Еру И. И. Диэлектрические свойства некоторых кристаллов в миллиметровом диапазоне длин волн // ЖТФ. – 1966. – Т. 36, №7. – С. 1315-1316.
17. Korolev V. D., Peskovatskii S. A., Schulga V. M. Spin – lattice relaxation in  $Fe^{3+}$  doped andalusite crystals (pt. I Relaxation mechanism) // Phys. Status Solidi B. – 1977. – Vol. 82, No 1. – P. 251-255.
18. Korolev V. D., Peskovatskii S. A., Schulga V. M. Spin-lattice relaxation in  $Fe^{3+}$  doped andalusite crystals (pt. II The effect of lattice oscillator heating) // Phys. Status Solidi B. – 1977. – Vol. 84, No. 2. – P. 443-447.
19. Королев В. Д., Песковацкий С. А., Шахпарян В. П., Шульга В. М. Спин-решеточная релаксация в андалузите при гелиевых температурах // ФТТ. – 1975. – Т. 17, №1. – С. 150-153.
20. Королев В. Д., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Концентрационная и температурная зависимости скорости релаксации иона  $Fe^{3+}$  в андалузите при сверхнизких температурах // ФТТ. – 1975. – Т. 17, №10. – С. 3090-3091.
21. Eru I. I., Peskovatskii S. A., Chernets A. N. Andalusite-maser crystal // 1968 Int. Quant. Electron. Conf., May 14-17. – Miami Beach, Fla., (USA). – 1968. – P. 10.
22. Eru I. I., Peskovatskii S. A., Chernets A. N. Trivalent-iron-doped andalusite as crystal for microwave maser // IEEE Trans. – 1968. – Vol. QE-4, No. 11. – P. 723-728.
23. Еру И. И., Королев В. Д., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Андалузит с примесью трехвалентного железа – активный кристалл для квантовых парамагнитных усилителей: Препр. // ИРЭ АН УССР; № 46. – Харьков: 1975. – 45 с.
24. Еру И. И., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Инверсия спиновых населенностей в андалузите при повышенных температурах и концентрациях // ФТТ. – 1971. – Т. 18, №10. – С. 3142-3143.
25. Еру И. И., Песковацкий С. А. Об использовании андалузита в теплых парамагнитных усилителях // Радиофизика. – 1972. – Т. 15, №1. – С. 38-42.

26. Еру И. И., Мышенко В. В., Песковацкий С. А. Оптимальная концентрация ионов  $Fe^{3+}$  в андалузите для теплого парамагнитного усилителя // Радиофизика. – 1975. – Т. 18, №6. – С. 901-905.
27. Еру И. И., Мышенко В. В., Песковацкий С. А. Андалузит – активный кристалл для теплых квантовых усилителей // Тез. докл. 2-ой Всесоюзной конф. по радиоприемным устройствам СВЧ. – Ереван. – 1974. – С. 37-38.
28. Мышенко В. В., Просвирнин С. Л., Черпак Н. Т. Спектр ЭПР, элементы матрицы вероятностей переходов и некоторые схемы накачки в андалузите с ионами трехвалентного железа: Препр. / ИРЭ АН УССР; №40. – Харьков: 1977. – 29 с.
29. Еру И. И., Песковацкий С. А., Чернец А. Н. Неравновесные состояния в спин-системе ионов  $Fe^{3+}$  в андалузите // ФТТ. – 1967. – Т. 8, №5. – С. 1329-1331.
30. Cherpak N. T., Mischenko V. V., Smirnova T. A. Inversion ratio in andalusite crystals in the 6-mm wave – band // Phys. Status Solidi A. – 1976. – Vol. 37, No. 6. – P. k37-k38.
31. Mischenko V. V., Cherpak N. T. Inversion ratio in trivalent – iron doped andalusite in the Q- and V – bands // J. Physique Lett. – 1981. – Vol. 42, No. 6. – P. L145-L146.
32. Копылов А. А., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Мазерные характеристики андалузита с трехвалентным железом на частотах 75-115 ГГц // УФЖ. – 1985. – Т. 30, №6. – С. 856-858.
33. Шульга В. М., Мышенко В. В. О мазерных характеристиках андалузита на частотах выше 100 ГГц // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, №10. – С. 2053-2055.
34. Блинов А. К., Князьков П. Б., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Мазерные характеристики андалузита в коротковолновой части миллиметрового диапазона: Препр / РИ АН УССР; №32. – Харьков: 1989. – 42 с.
35. Еру И. И., Песковацкий С. А., Чернец А. Н. Парамагнитное усиление в миллиметровом диапазоне / В кн. “Квантовая электроника” / – Киев: Наукова Думка, 1969. – Вып. 3.
36. Активный кристалл для квантового парамагнитного усилителя: А.с. 240132 СССР. И. И. Еру, С. А. Песковацкий, А. Н. Чернец, С. А. Альтшулер, М. М. Зарипов, Л. Я. Шекун. Оpubл. 1969, Бюл. №12.
37. Еру И. И., Песковацкий С. А., Чернец А. Н. Трехуровневый парамагнитный усилитель трехсантиметрового диапазона на андалузите // Радиотехника и электроника. – 1968. – Т. 13, №6. – С. 1045-1048.
38. Еру И. И., Песковацкий С. А., Чернец А. Н. Четырехуровневый парамагнитный усилитель трехмиллиметрового диапазона на андалузите // Радиотехника и электроника. – 1968. – Т. 13, №6. – С. 1049-1054.
39. Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Квантовый усилитель 3-мм диапазона длин волн // Тез. докл. XIV Всесоюзной радиоастроном. конф. – Ереван. – 1982. – С. 99-100.
40. Королев В. Д., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Квантовый парамагнитный усилитель средней части миллиметрового диапазона // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, №9. – С. 1844-1846.
41. Князьков Л. Б., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Квантовый парамагнитный усилитель миллиметрового диапазона с низкой мощностью накачки // Тез. докл. XVII Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1985. – С. 155-156.
42. Блинов А. К., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Квантовый парамагнитный усилитель с расширенной полосой пропускания // Тез. докл. XVII Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1985. – С. 120-121.
43. Князьков Л. Б., Королев В. Д., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Подьячий В. И., Шульга В. М. Квантовый усилитель в радиометре 6-мм диапазона // Тез. докл. XXI Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1989. – С. 130-131.
44. Князьков Л. Б., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Квантовый усилитель 3-мм диапазона длин волн // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37, №7. – С. 1306-1310.
45. Еру И. И., Королев В. Д., Песковацкий С. А., Подьячий В. И., Шульга В. М. Радиометр диапазона 40-45 ГГц с квантовым усилителем // Тез. докл. XIV Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1982. – С. 98.
46. Eru I. I., Peskovatskii S. A., Podjachi V. I. Low – noise millimeter receiver with 7 – millimeter maser amplifier // Did. Techn. Pap. Ninth Inert. Conf. on Infrared and Millim. Waves. – Taca-rusa (Japan). – 1984. – P. 474.
47. Еру И. И., Королев В. Д., Песковацкий С. А., Подьячий В. И. Малошумящее входное устройство радиоастрономического приемника 3-мм диапазона // Тез. докл. XVII Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1985. – С. 141-142.

48. Королев В. Д., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Малошумящий квантовый усилитель для диапазона частот 35-45 ГГц.: Препр. / ИРЭ АН УССР; №144. – Харьков: 1980. – 30 с.
49. Блинов А. К., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Шульга В. М. Широкополосный резонаторный квантовый усилитель с низким уровнем накачки на диапазон частот 40-45 ГГц // Радиофизика. – 1988. – Т. 31, №8. – С. 898-902.
50. Еру И. И., Мышенко В. В., Песковацкий С. А. Расширение полосы частот квантовых парамагнитных усилителей // Радиофизика. – 1983. – Т. 26, №12. – С. 1003-1005.
51. Квантовый усилитель бегущей волны: А.с. 1195871 СССР. В. В. Мышенко, С. А. Песковацкий, В. М. Шульга. – Опубл. 1985.
52. Шамфаров Я. Л., Смирнова Т. А. Исследование частотной зависимости времени СРР в облученном нейтронами кварце // УФЖ. – 1971. – Т. 16, №4. – С. 600-602.
53. Смирнова Т. А., Шамфаров Я. Л. Природа аномальной зависимости скорости спин-решеточной релаксации от магнитного поля в облученном нейтронами кварце // УФЖ. – 1972. – Т. 17, №2. – С. 298-302.
54. Шамфаров Я. Л. Двухуровневый квантовый генератор и усилитель 8-мм диапазона на твердом теле с повышенной частотой инверсии // Радиотехника и электроника. – 1966. – Т. 11, №11. – С. 2044-2052.
55. Шамфаров Я. Л. Метод сокращения “мертвого” времени двухуровневых квантовых усилителей // Радиотехника и электроника. – 1963. – Т. 8, №9. – С. 1573-1576.
56. Песковацкий С. А., Шульга В. М. Спин-решеточная релаксация в рубине при низких температурах // ФТТ. – 1971. – Т. 13, №12. – С. 3608-3615.
57. Блинов А. К., Песковацкий С. А. Инверсионные характеристики рубина в средней части миллиметрового диапазона // Радиофизика. – 1987. – Т. 30, №6. – С. 784-787.
58. Стеценко А. И., Шамфаров Я. Л. Теоритическое исследование несимметрично расположенной в волноводе накачки штыревой замедляющей системы для квантового усилителя бегущей волны: Препр. / ИРЭ АН УССР; №41. – Харьков: 1974. – 33 с.
59. Стеценко А. И., Шамфаров Я. Л., Кондрашин С. К. Уточненный расчет дисперсионных характеристик замедляющих структур, несимметрично нагруженных активным кристаллом // Радиофизика. – 1975. – Т. 18, №11. – С. 1667-1677.
60. Пархоменко М. В., Кондрашин С. К., Шамфаров Я. Л. К вопросу о вычислении эффективной диэлектрической проницаемости замедляющей системы квантового парамагнитного усилителя бегущей волны // Радиотехника. – 1981. – Т. 36, №3. – С. 16-21.
61. Шамфаров Я. Л., Стеценко А. И., Поткин Л. И., Асеев Г. Г. Формирование дисперсионной характеристики мазера бегущей волны при помощи анизотропной диэлектрической пластинки // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, №4. – С. 781-786.
62. Стеценко А. И., Черпак Н. Т. Мазерное усиление в рубине в сильных магнитных полях // Письма в ЖЭТФ. – 1981. – Т. 7, №2. – С. 105-108.
63. Черпак Н. Т., Шамфаров Я. Л. Экспериментальное исследование переходных процессов в рубиновом КПУ // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. 14, №9. – С. 1656-1660.
64. Черпак Н. Т., Шамфаров Я. Л. Аномальное возрастание коэффициента инверсии в рубине при понижении температуры // ФТТ. – 1974. – №5. – С. 587-588.
65. Смирнова Т. А., Черпак Н. Т., Шамфаров Я. Л. Специальный случай СВЧ квантового усиления в рубине // Радиофизика. – 1972. – Т. 15, №12. – С. 1583-1584.
66. Шамфаров Я. Л., Стеценко А. И. Мазер бегущей волны для радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой // Тез. докл. XI Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1978. – С. 124.
67. Шамфаров Я. Л., Стеценко А. И. “Мазер бегущей волны для радиоастрономических исследований” Тез. докл. XI Всесоюзной конф. по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1978. – С. 125.
68. Шамфаров Я. Л., Черпак Н. Т., Тридуб А. В. Экспериментальное исследование амплитудной и фазовой стабильности квантовых парамагнитных усилителей // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20, №8. – С. 1673-1678.
69. Шамфаров Я. Л., Стеценко А. И., Кондрашин С. К. Мазер бегущей волны 4-см диапазона с высокой амплитудной и фазовой стабильностью // ПТЭ. – 1982. – № 5. – С. 104-107.
70. Шамфаров Я. Л. “Мазер бегущей волны для астрономического радиоспектрометра” // Тез. докл. XVIII Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1985. – С. 288-289.
71. Смирнова Т. А., Черпак Н. Т., Шамфаров Я. Л. Квантовый парамагнитный усилитель 4-см диапазона на рубине // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т. 18, №2. – С. 361-364.

72. Черпак Н. Т. Эффект насыщения в квантовых парамагнитных усилителях с учетом потерь в электродинамических системах // Радиофизика. – 1976. – Т. 19, №2. – С. 361-364.
73. Черпак Н. Т. Усиление и поглощение электромагнитных волн в замедляющей структуре с парамагнитным кристаллом // Радиофизика. – 1979. – Т. 22, №7. – С. 819-825.
74. Черпак Н. Т., Шамфаров Я. Л. Влияние распределения поля накачки в активном веществе на характеристики квантового парамагнитного усилителя // Радиоэлектроника. – 1978. – Т. 16, №3. – С. 53-56.
75. Черпак Н. Т., Лавринович А. А., Мышенко В. В., Смирнова Т. А. Исследование замедляющих структур типа штыревой гребенки для квантовых усилителей мм диапазона // Радиоэлектроника. – 1981. – Т. 24, №12. – С. 9-14.
76. Стеценко А. И., Шамфаров Я. Л. Дисперсионная характеристика штыревой гребенки, несимметрично нагруженной активным кристаллом, для квантового парамагнитного усилителя бегущей волны / В кн. “Квантовая электроника.” / – Киев: Наукова думка, 1974. – Т. 8. – С. 1583-1584.
77. N. T. Cherpak, A. A. Lavrinovich, T. A. Smirnova. Maser comb-structure for the frequency range 35 to 115 GHz // *Did. Tech. Pap. Proc. of the 9-th Int. Conf. on IR and MM waves.* – Osaka (Japan). – 1984. – P. 475-476.
78. Черпак Н. Т., Смирнова Т. А., Лавринович А. А., Оверкина Т. А. Гиромагнитное возмущение замедляющей структуры, частично заполненной диэлектриком: Препр. / ИРЭ АН УССР; №188. – Харьков: 1982. – 35 с.
79. Черпак Н. Т. Амплитудно-частотная характеристика квантового парамагнитного усилителя бегущей волны миллиметрового диапазона // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, №4. – С. 776-780.
80. Смирнова Т. А., Черпак Н. Т. Невзаимный элемент на основе текстурированных гексаферритов для квантовых усилителей бегущей волны мм диапазона // Радиофизика. – 1983. – Т. 26, №1. – С. 120-125.
81. Смирнова Т. А., Черпак Н. Т. Гиромагнитное возмущение замедляющей структуры в квантовых усилителях мм диапазона // Радиотехника и электроника. – 1985. – Т. 30, №7. – С. 1384-1390.
82. Ворсуль К. В., Смирнова Т. А., Черпак Н. Т. Андалузит, как активное вещество для квантовых усилителей бегущей волны в 3-мм диапазоне // Радиофизика. – 1986. – Т. 29, №7. – С. 838-844.
83. Черпак Н. Т., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Смирнова Т. А. Квантовый парамагнитный усилитель бегущей волны на андалузите в мм диапазоне длин волн // ДАН УССР. сер. А. – 1980. – №2. – С. 69-71.
84. Квантовый парамагнитный усилитель бегущей волны: А.с. 1616465 СССР. А. А. Лавринович, Т. А. Смирнова, Н. Т. Черпак. – Оpubл. 1988.
85. Черпак Н. Т., Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Лавринович А. А. Квантовое усиление на частотах 40 – 60 ГГц в замедляющей системе с андалузитом // Радиотехника и электроника. – 1979. – Т. 24, №9. – С. 2154-2159.
86. Lavrinovich A. A., Smirnova T. A., Cherpak N. T. 7 – mm traveling - wave maser with gain bandwidth exceeding 200 MHz // *Did. Tech. Pap. Proc. Int. Conf. On Mm and Infrared Technol.* – Beijing. – 1980. – P. 552.
87. Cherpak N. T., Smirnova T. A. A broad - band traveling – wave maser for range 40 – 46 GHz” // *IEEE Trans.* – 1983. – MTT-31, No. 3. – P. 306-309.
88. Лавринович А. А. Квантовый усилитель бегущей волны миллиметрового диапазона с полосой усиления 300 МГц // Труды конф. 6-ой Международной школы по микроволновой физике и технике. – Варна. – 1989. – С. 161.
89. Лавринович А. А., Смирнова Т. А., Черпак Н. Т., Шестопалов В. П. Мазерное усиление в средневолновой части миллиметрового диапазона с расширенной мгновенной полосой // ДАН СССР. – 1987. – Т. 297, №4. – С. 357-359.
90. Лавринович А. А., Черпак Н. Т. Предельное значение мгновенной полосы усиления при поперечной расстройке магнитного поля в квантовом усилителе // Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30, №1. – С. 76-77.
91. Квантовый парамагнитный усилитель бегущей волны: А.с. 1277851 СССР. А. А. Лавринович, Т. А. Смирнова, Н. Т. Черпак. – Оpubл. 1985.
92. Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Ревин А. Д., Скрынник Б. К., Черпак Н. Т., Шестопалов В. П. Применение генераторов дифракционного излучения в качестве источников накачки в квантовых усилителях миллиметрового диапазона // Тез. докл. II Всесоюз. семинара по мм и субмм волнам. – Харьков. – 1978. – С. 119.
93. Курин В. Г., Ревин А. Д., Скрынник Б. К., Стеценко А. И., Черпак Н. Т., Шестопалов В. П. Генератор дифракционного излучения как источник накачки в квантовой радиофизике миллиметрового диапазона // Тез. докл. III Всесоюзного семинара по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. – Горький. – 1980. – С. 105.

94. Ревин А. Д., Скрынник Б. К., Черпак Н. Т., Шестопалов В. П. Генераторы дифракционного излучения в квантовой радиофизике миллиметрового диапазона: Препр. / ИРЭ АН УССР; № 267. – Харьков: 1985. – 40 с.
95. Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Смирнова Т. А., Черпак Н. Т. Квантовые парамагнитные усилители бегущей волны в миллиметровом диапазоне // Тез. докл. XI Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1978. – С. 121-122.
96. Мышенко В. В., Песковацкий С. А., Смирнова Т. А., Черпак Н. Т. Создание квантового парамагнитного усилителя бегущей волны в средней части миллиметрового диапазона // Тез. докл. II Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. – Харьков. – 1978. – С. 117-118.
97. Лавринвич А. А., Черпак Н. Т. Широкополосные квантовые парамагнитные усилители мм диапазона с перестраиваемой мгновенной полосой // Тез. докл. XVII Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1985. – С. 160-161.
98. Лавринович А. А., Смирнова Т. А., Черпак Н. Т. Широкополосный квантовый усилитель бегущей волны 7-мм с монохроматической накачкой // Тез. докл. XXI Всесоюзной конференции по радиоастрономической аппаратуре. – Ереван. – 1989. – С. 147-148.
99. Черпак Н. Т. Квантовое усиление в миллиметровом диапазоне // Радиофизика. – 1984. – Т. 27, №7. – С. 815-857.
100. Черпак Н. Т. Квантовые усилители распределенного типа в миллиметровом диапазоне длин волн. – Киев: Наукова думка, 1996. – 220 с.

## **Становлення та розвиток квантової радіофізики та квантової електроніки НВЧ діапазону в Україні**

**I. I. Eru, V. M. Schulga**

У статті надається історія виникнення та розвитку в Україні нових наукових напрямків – квантової радіофізики та квантової електроніки НВЧ діапазону. Розглянуто головні проблеми, що постали перед дослідниками, та основні етапи досліджень та розробок у цих галузях. Показано високий рівень досягнутих результатів, багато з яких і наразі все ще посідають рекордно високий, неперевершений рівень.

## **Formation and Development of Microwave Quantum Radio Physics and Quantum Electronics in Ukraine**

**I. I. Eru and V. M. Schulga**

The history of a new investigation line of formation and development of the microwave quantum radio physics and quantum electronics in Ukraine is described. The principal problems which faced the researchers and main stages of the studies and developments in these fields are considered. The substantial achievements, many of which still remain record-breaking and all-time high, are shown.