

Современные тенденции развития импульсных лазеров (по материалам V Международной конференции «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (AMPL'01))

V Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (V-th Atomic and Molecular Pulsed Lasers – AMPL-01) прошла с 10 по 14 сентября 2001 г. Она является традиционным научным форумом, проводимым каждые два года в Академгородке старого сибирского города Томска. Популярность конференции AMPL заметно растет, что отражает число докладов, сделанных на этих конференциях и опубликованных в восьми тематических выпусках нашего журнала (1993. Т. 6. № 3; 1995. Т. 8. № 11; 1997. Т. 10. № 11; 1999. Т. 12. № 11; 2000. Т. 13. № 3), трех тематических сборниках общества оптических инженеров США (Proc. SPIE. 1995. V. 2619; 1997. V. 3403; 1999. V. 4071), а также работ, представленных к публикации в этом выпуске журнала «Оптика атмосферы и океана».

Научная программа AMPL-01 была традиционной и включала следующие секции:

- *газовые и плазменные лазеры (секция A),*
- *лазеры на парах металлов (B),*
- *лазеры на красителях и фотопроцессы в сложных органических молекулах (C),*
- *физические процессы в газовых лазерах (D),*
- *лазерные системы и их применения (E),*
- *некогерентные источники УФ- и ВУФ-излучения и преобразование лазерного излучения (F).*

Конференция была поддержана: Российской академией наук, Сибирским отделением РАН, Российским фондом фундаментальных исследований, Министерством образования, Администрацией Томской области, Сургутским госуниверситетом.

В работе конференции приняли участие более 150 специалистов из России, США, Германии, Франции, Болгарии, Югославии, Японии, Ирана, Эстонии, Латвии. Было представлено более 70 устных и 120 стендовых докладов.

В программу **Пленарного заседания** 10 сентября были включены сообщения, посвященные актуальным проблемам развития импульсных лазеров. Оно было открыто докладом Г.К. Васильева из Института проблем химической физики РАН (г. Черноголовка) и посвящено актуальной проблеме создания мощных лазеров на цепных химических реакциях для исследования плотной релятивистской плазмы и ЛТС. Большой интерес вызвали доклады, посвященные коротковолновым лазерам. Ж.-М. Пувель из Орлеанского университета (Франция) сообщил о создании нового рентгеновского лазера на капиллярном разряде. В. Сасаки из Университета Миядзаки (Япония) сделал доклад, посвященный ВУФ-лазеру на димерах криптона, и привел данные по генерации и усилению на длине волны 146 нм. Б.В. Лажинцев из Федерального ядерного центра (г. Саров) сделал доклад «Масштабирование импульсно-периодических электроразрядных широкоапертурных лазеров». Обзор методов создания плазменных активных сред был представлен А.Е. Хилом из Техасского университета (США). С.И. Яковленко из Института общей физики РАН (г. Москва) сделал интересное сообщение о свойствах ультрахолодной плазмы, создаваемой лазерами. Механизмы повреждения проходной оптики излучением короткоимпульсных CO₂-лазеров, а также методы увеличения лучевой стойкости такой оптики были рассмотрены С.Г. Казанцевым из ГосНИИ Лазерный центр «Радуга» (г. Радужный).

Ниже дано краткое содержание наиболее интересных докладов, представленных на секционных заседаниях.

Секция «Газовые и плазменные лазеры»

Заседание секции «Газовые и плазменные лазеры» было открыто докладом Т. Гото (г. Осака, Япония), который сообщил о получении усиления на димерах аргона (длина волны 126 нм) в разряде с плазменными электродами. В.А. Бурцев в своем докладе представил расчетные данные по условиям создания эффективных ВУФ-лазеров с электронно-пучковой накачкой. Х. Томизава из Института синхронного излучения г. Хего (Япония) посвятил свой доклад свойствам лазера на смеси Ag–Xe при накачке пучком электронов и изменении температуры рабочей смеси. Исследованиям химических лазеров были посвящены доклады М.А. Азарова (РНИЦ «Прикладная химия», г. Санкт-Петербург),

К.Н. Фирсова (Институт общей физики РАН, г. Москва) и В.М. Орловского (Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск). Проблемы создания высокоэффективных AgF- и KGF-лазеров были проанализированы в докладе представителей Института лазерной физики СО РАН (г. Новосибирск). М.С. Тртица из Института ядерных исследований (г. Белград, Югославия) привел данные по разработкам малогабаритных импульсных CO₂-лазеров и их применениям. Большую активность проявили ученые Института сильноточной электроники СО РАН. Ю.И. Бычков сделал доклад, посвященный моделированию ХеСl-лазера, В.Ф. Лосев привел данные по влиянию неоднородностей активной среды на расходимость электроразрядного длинноимпульсного ХеСl-усилителя. А.Н. Панченко посвятил доклад созданию электроразрядных эксиплексных лазеров с накачкой от индуктивных накопителей энергии с полупроводниковым прерывателем тока. Всего на этой секции было представлено 50 устных и стендовых докладов, из которых можно сделать следующий вывод – исследования в области газовых и плазменных лазеров продолжаются, а в проблеме получения коротковолнового УФ- и ВУФ-излучения другие типы лазеров пока не могут конкурировать с газовыми лазерами.

Секция «Лазеры на парах металлов»

На конференции традиционно большое внимание (около 50 докладов) было уделено лазерам на парах металлов (ЛПМ) и их применениям. Большинство сообщений было посвящено лазеру на парах меди. Рассматривался широкий круг вопросов:

- масштабирование лазерных систем (Ю.И. Савченко и др., В.В. Иванов, Н.А. Юдин);
- причины ограничения частоты и средней мощности (П.А. Бохан, Г.Г. Петраш, Г.С. Евтушенко);
- влияние добавок в активную среду (Д.Н. Астаджов, Г.Г. Петраш);
- устойчивость энергонапряженных импульсно-периодических разрядов (В.М. Клишкин),
- катафорез и массоперенос в разрядах (Г.Д. Градобоев);
- совершенствование схем питания, в том числе тиристорных, транзисторных, с элементами сжатия и т.д. (В.В. Татур, О.В. Жданев, Н.А. Юдин, Л.М. Габченко и др.);
- промышленное производство активных элементов (Н.А. Лябин);
- построение схем генератор – усилитель (М.А. Казарян, А.Г. Филонов);
- управление свойствами излучения через системы питания (А.Н. Солдатов).

Сохраняется интерес к лазерам на парах свинца и висмута в связи с возможностью генерации коротковолнового излучения, к получению генерации на химически активных высокотемпературных элементах (туллий, диспрозий). В частности, в докладе А.В. Павлинского с соавторами сообщалось о создании лазера на парах бромида свинца, работающего на двух линиях (красной и голубой) одновременно без прокачки рабочей смеси, в докладе В.А. Герасимова – о реализации дискретной перестройки излучения лазера на парах туллия в ближней ИК-области спектра.

Традиционные области применения лазеров на парах меди: медицина, проекционные системы, разделение изотопов. Эти вопросы рассмотрены ниже, при обзоре докладов секции «Лазерные системы и их применения».

Наибольшую дискуссию в работе секции вызвал доклад П.А. Бохана, Д.Э. Закревского «Физико-технические условия проявления различных механизмов ограничения выходной мощности Cu-лазеров». Этот доклад был первым в работе секции, и, чтобы не затягивать заседание, было принято решение вынести вопрос ограничения частотных и энергетических параметров ЛПМ (как принципиально важный) на «круглый стол», результаты заседания которого представлены ниже.

Секция «Лазеры на красителях и фотопроцессы в сложных органических молекулах»

В последние годы интерес к исследованию фотопроцессов в сложных органических молекулах резко вырос в связи с рядом новых применений твердотельных материалов на их основе в оптоэлектронных системах: светодиодах, лимитерах оптического излучения, микролазерах, различных устройствах телекоммуникационных систем. Актуальна задача разработки и создания термически стабильных органических молекул, эффективно излучающих в твердом состоянии при оптическом возбуждении и возбуждении электрическим током. Представляют интерес сложные молекулярные системы с переносом энергии электронного возбуждения, люминесцирующие полимеры, твердые растворы органических молекул в различных матрицах. В докладах А. Пенцкофера (Регенсбургский университет, Германия) «Фотофизические и генерационные характеристики некоторых полимеров на фениленовиниленовой основе», В.И. Южакова (МГУ, г. Москва) «Фотофизика симметричных бисцианинов и их агрегатов», Т.Н. Копыловой (СФТИ при ТГУ, г. Томск) «Органические соединения в матрицах – новые материалы для оптических применений», прозвучавших на пленарном заседании конференции, представлены результаты работ, выполненных в этом актуальном направлении, а также в ряде сообщений, включенных в программу секции.

В ряде секционных сообщений продемонстрированы новые возможности в исследовании фото-процессов в сложных органических молекулах при оптическом возбуждении. В частности, в докладе Р.Т. Кузнецовой рассмотрены особенности фотостабильности лазерных красителей при мощном лазерном возбуждении (плотность мощности возбуждающего излучения достигала 300 МВт/см^2). Показано, что лазерная фотостабильность и квантовый выход фотопревращений лазерных красителей зависят от интенсивности и поляризации возбуждающего излучения.

Исследованию двухфотонно-возбужденной люминесценции в каплях органических красителей в мощных световых полях был посвящен доклад А.А. Землянова и В.А. Донченко с соавторами. Необходимо отметить интерес аудитории к этому явлению, которое, несомненно, найдет применение при решении задач, связанных с исследованиями физики атмосферы.

Большой интерес вызвал также доклад А.В. Кухто с соавторами (г. Минск, г. Чебоксары), посвященный преобразованию энергии в лазерных красителях при возбуждении электронами. Такого рода исследования необходимы для поиска органических молекул, флуоресцирующих при возбуждении электрическим током.

Чрезвычайно актуальны исследования свойств органических молекул в тонких пленках (доклад А.О. Буланова с соавторами, г. Ростов). Многочисленные разработки бессеребряных светочувствительных материалов отдают приоритет важнейшим классам органических фотохромов – спиро-пиранам и спирооксазидам. Для получения фотохромных материалов наиболее технологичными являются фотохромы, проявляющие свойства в твердой фазе. В докладе обсуждены результаты исследования фотохромных свойств индолиноспирана в полимерных матрицах и в полидисперсных пленках. Проявляющиеся фотохромные свойства в твердой фазе характеризуются высокими значениями свободной энергии активации термической реакции раскрытия цикла.

Сложные молекулярные системы типа бифлуорофоров являются перспективными для новых применений, поэтому доклады Г.В. Майера, В.Я. Артюхова и В.И. Южакова с соавторами вызвали большой интерес исследователей.

На секции были широко представлены работы, в которых исследования фото-процессов в сложных органических молекулах выполнены с использованием квантово-химических методов (доклады В.Я. Артюхова, Н.Ю. Васильевой, О.К. Базыль и др.).

Доклады по экологической тематике были связаны с исследованием фото-процессов в органических экотоксикантах. Разработан метод их оптической диагностики и разрушения (доклады И.В. Соколовой, О.Н. Чайковской, В.А. Светличного, Э.А. Соснина, Н.Б. Сультимовой и др.).

Секция «Физические процессы в газовых лазерах»

Доклад А.Н. Ткачева и С.И. Яковленко был посвящен моделированию процесса формирования плазмы в приэлектронном слое высоковольтного разряда в ксеноне при высоком давлении. Рассчитаны параметры, определяющие процесс воспроизведения ионизации и дрейфа электронов. Решен ряд уравнений, описывающих переход ионного тока в электронный вблизи катода.

В докладе В.П. Демкина, Е.В. Корюкиной, О.Г. Ревинской (г. Томск) представлены результаты исследования асимметрии контура спектральной линии атома во внешнем электрическом поле. Полученные данные позволяют проанализировать механизмы формирования контура спектральной линии атома в электрическом поле.

В докладе А.Г. Бессонова и А.Л. Магазинникова рассмотрены вопросы моделирования процесса распространения излучения в лазерной системе с активной средой, содержащей фазовые неоднородности. Исследована лазерная система с импульсным разрядом на основе смеси XeCl . Рассчитаны интенсивности пучка, фазовое поперечное распределение и поверхность волнового фронта.

В совместном докладе российских и французских ученых: Ю.И. Бычкова, С.Л. Горчакова, А.Г. Ястремского (г. Томск), Б. Лакура, С. Паскье, К. Постеля, В. Пуэша (г. Орсе, Франция) – представлены результаты исследования свойств электрических разрядов в газовых смесях на основе SF_6 . Неоднородность разряда, обусловленная появлением каналов с повышенной проводимостью, является сложной проблемой на пути достижения оптимальных выходных характеристик. Последние исследования показали, что причиной возникновения этих каналов являются «горячие пятна» на катоде. Сжатие разряда происходит в условиях, когда каналы с повышенной проводимостью развиваются из одного или нескольких горячих пятен. Изучены свойства разряда в SF_6 и смеси $\text{SF}_6\text{-C}_2\text{H}_6$ в широком диапазоне энерговкладов. Показано, что разряды в таких смесях более однородны и стабильны. Одно горячее пятно позволяет реализовать разрядный ток 2–3 кА при энергиях 1–3 Дж без нарушения однородности разряда.

Доклад В.В. Аполлонова, С.Ю. Казанцева, А.В. Сайфулина, К.Н. Фирсова, А.А. Белевцева (г. Москва) посвящен исследованию влияния ион-ионной рекомбинации на характеристики разряда

в нецепном электроразрядном HF-лазере. Оценены коэффициенты рекомбинации в разлетающейся плазме на основе SF₆ и смесей SF₆-C₂H₆ при давлениях смеси 15–90 торр.

Исследованию эффективности генерации электронного пучка в аномальном тлеющем разряде посвящены доклады Г.В. Колбычева (г. Томск, Россия). Проведены расчеты коэффициентов ионизации α «убегающими» электронами в сильном и умеренном полях. Установлена ошибочность мнения о том, что в условиях «убегания» электронов коэффициент α является постоянно изменяющейся величиной. Показано также, что эффективность формирования электронного пучка в аномальном тлеющем разряде составляет 50–70%. Для сравнения отметим, что в «открытом» разряде автором достигнуты эффективности ~ 80–90%.

В докладе А.Р. Сорокина (г. Новосибирск, Россия) рассматривается механизм развития так называемого «открытого» разряда. Экспериментально обнаружена долговременная задержка в формировании области катодного падения потенциала по отношению к разрядному току. Это указывает на чрезвычайно высокую эмиссию электронов из катода по сравнению с аномальным тлеющим разрядом. Экспериментально была показана точная корреляция между генерацией электронного пучка и индуцированного этим пучком разряда. Установлено, что эффективность генерации электронного пучка в переходной фотоэлектронной фазе достигает около 75–95%, в то время как в аномальном тлеющем разряде она составляет 20–30%.

В своем докладе Т. Гото, Т. Джитсуно, К. Накамура и др. (г. Осака, Япония) «Измерение усиления Ar₂-лазера сверхвысокого давления с плазменными электродами» сообщают о создании высокооднородного разряда в чистом аргоне при давлении 6–20 атмосфер. Ими выполнены измерения электронной плотности и коэффициента усиления с наносекундным разрешением. Электронная плотность достигала более 10¹⁶ см⁻³ при давлении 10 атм. Максимальный коэффициент усиления на $\lambda = 176$ нм наблюдался в области 20 атм и составлял 8,6%/см.

Доклад Е.Л. Латуша, О.О. Пруцакова, Г.Д. Чеботарева (г. Ростов-на-Дону, Россия) посвящен исследованию динамики катафореза в импульсно-периодическом разряде. Определены критерии аксиальной однородности распределения паров металла. Найдены временные интервалы для установления однородного распределения паров типичных импульсно-периодических разрядов ЛПМ.

В докладе А. Трещалова с соавторами (г. Тарту, Эстония) обсуждались проблемы формирования мощной накачки ArF- и F₂-лазеров в высокомономном разряде без горячих пятен на катоде и нестабильностей жгута. Лазер имеет модифицированную схему возбуждения: комбинацию скользящего разряда (автоматическая предыонизация) и объемный разряд (главная накачка). Проведена спектроскопическая диагностика разряда. Установлено, что при максимальной частоте импульсов сжатие разряда начинается с перегрева слоя газа, пограничного к поверхности катода. Скорость газообмена между смежными лазерными импульсами ниже для пограничных слоев по сравнению со всем объемом разряда.

Секция «Лазерные системы и их применения»

На секции было представлено более 50 докладов, в том числе 14 устных.

С докладом о современном статусе проблемы промышленного лазерного разделения изотопов выступил В. Штолль из Института производственных сред (г. Ханау, Германия). В докладе были кратко изложены принципы лазерного разделения изотопов, основанные на изотопическом эффекте в спектрах поглощения атомов и молекул. Это позволяет изотопически селективно переводить их в возбужденное состояние. Атом или молекула, находясь в возбужденном состоянии, могут вступить в химическую реакцию или, подвергаясь дальнейшему взаимодействию с лазерными полями, могут быть ионизованы или диссоциированы. Благодаря этому достигается высокая степень обогащения. Отмечалось, что лазерные методы разделения изотопов весьма перспективны для многих элементов и позволяют получать высокие степени обогащения.

На эту же тему были представлены доклады М.А. Казаряна и П.А. Бохана с соавторами. М.А. Казарян рассмотрел пути решения проблемы лазерного разделения изотопов кремния в атомарных парах методом селективной фотоионизации с помощью перестраиваемых узкополосных лазеров на красителях. Была предложена схема ионизации атомов в высоко лежащие состояния с последующим возбуждением автоионизационного состояния. Приведены оценки полного потока ионов и их предельной концентрации при заданной мощности излучения по каждому каналу 1 Вт, частоте повторения импульсов 10 кГц и объеме активной зоны 0,6 л. Отмечено, что современный уровень развития лазерной техники позволяет оценивать предельную производительность получения высокообогащенного изотопа кремния-28 на уровне 0,1 г/ч. Проблемам лазерного разделения изотопов свинца, цинка и рубидия был посвящен доклад П.А. Бохана с соавторами.

Интересным и важным с точки зрения перспектив медико-биологических приложений был доклад, представленный А.А. Жупиковым от группы авторов (Институт лазерной физики

СО РАН) по применению эксимерных лазеров в офтальмологии, кардиохирургии, нейрохирургии, стоматологии. В докладе были подробно проанализированы медицинские установки для целей офтальмологии. Обсуждены особенности действия коротковолнового излучения на организм с учетом возможного мутагенного воздействия коротковолнового излучения. Представлен сравнительный анализ данных исследований с результатами разработок в других группах в России, а также в некоторых фирмах за рубежом и продемонстрирована хорошая конкурентоспособность.

Много внимания в работе секции уделялось вопросам применения лазерных систем для диагностики и лечения онкологических заболеваний (А.В. Иванов с коллегами, В.А. Евтушенко и др.).

В докладе президента Лазерной ассоциации стран СНГ И.Б. Ковша были представлены данные, касающиеся общего состояния исследований в области лазерной физики и состояния дел в лазерной промышленности РФ. В этой области работают более 900 университетов, компаний, клиник и малых предприятий. Промышленность в России производит практически все типы лазеров и лазерных систем (более 2000 моделей), но внутренняя потребность в таких устройствах пока крайне мала. Кроме Москвы (сосредоточено более 50% дистрибутивных лазерных фирм) мощные лазерные фирмы имеются также в Санкт-Петербурге, Новосибирске, Нижнем Новгороде, Самаре и Томске. Число специалистов с высшим образованием, занимающихся лазерами, превышает 15 тыс. Докладчик отметил, что лидеры российских лазерных центров хорошо известны за рубежом, а возможности этих научно-технических центров высоки. Досадной ошибкой государственных чиновников является недооценка такого потенциала.

Секция «Некогерентные источники УФ- и ВУФ-излучения, преобразование лазерного излучения, оптоэлектронные устройства»

На эту секцию было представлено 47 докладов. А. Скудра из Института атомной физики и спектроскопии (г. Рига, Латвия) привел интересные данные по созданию ВЧ-безэлектродных ламп для УФ- и ВУФ-области спектра. А.А. Сенин представил доклад профессора Г. Идена из Университета Иллинойс (г. Урбана, США) «Матрицы микрозарядов как новые источники УФ-излучения», в котором приводятся характеристики источников света на основе разряда в микроотверстиях. Ю.М. Андреев (г. Томск) сделал очень подробное сообщение о свойствах новых кристаллов для преобразования частоты газовых лазеров ИК- и видимого диапазонов спектра. В докладе В.Д. Бочкова из ООО «Импульсные технологии» (г. Рязань) были приведены данные о новых разработках высоковольтных коммутаторов для лазеров и других импульсных устройств. Следует отметить цикл работ и соответственно представленных докладов из Института сильноточной электроники СО РАН, посвященных новым разработкам и применениям эксиламп. Так, в частности, в докладе М.И. Ломаева (г. Томск) сообщалось о создании КгСl-эксилампы (длина волны 222 нм) с мощностью излучения 100 Вт при накачке барьерным разрядом.

Итоги заседания «круглого стола»

В завершение работы конференции прошло заседание «круглого стола», посвященное обсуждению физических причин, ограничивающих выходные и эксплуатационные характеристики лазеров на парах металлов.

В частности, Г.Г. Петраш (г. Москва, Россия) полагает, что основной причиной ограничения выходных характеристик лазера на парах меди является эффективное (паразитное) заселение нижних рабочих состояний атома меди в процессе накачки. И связано это с тем, что скорости возбуждения электронным ударом метастабильных и резонансных состояний близки по абсолютной величине, как это следует из последних экспериментальных данных. Определенные перспективы развития ЛПМ Г.Г. Петраш видит в переходе от чистых паров металлов к их соединениям, в частности к бромиду меди. Реальный КПД этого лазера оказывается выше и достигает 4%, выше и предельные частоты следования (до 300 кГц), что связано, по мнению Г.Г. Петраша, с наличием в разряде CuBr-лазера электроотрицательных добавок (типа HBr), положительно влияющих на генерационные характеристики (через электронную компоненту).

П.А. Бохан (г. Новосибирск, Россия) отстаивал другую точку зрения, согласно которой в реальном ЛПМ основной причиной ограничения выходных параметров ЛПМ, при высоких частотах следования импульсов, является высокая предимпульсная плотность электронов, которая препятствует эффективной накачке верхних рабочих состояний и, вместе с тем, способствует «паразитному» заселению нижних рабочих состояний на переднем фронте импульса возбуждения. Давний спор этих ведущих специалистов отражен в ряде публикаций в журнале «Квантовая электроника» и других изданиях. Следует отметить наметившееся сближение их позиций в отношении физики и техники ЛПМ.

В дискуссии выступили также С.И. Яковленко (г. Москва, Россия), М.Ф. Сэм (г. Ростов-на-Дону, Россия), Г.С. Евтушенко, В.Ф. Тарасенко (г. Томск, Россия), Д. Астаджов (г. София, Болгария).

По мнению С.И. Яковленко из расчетов простой кинетической модели следует, что существует некоторое «критическое» значение предымпulseной плотности электронов, выше которой генерация в ЛПМ не реализуется.

В.Ф. Тарасенко отметил еще одну причину ограничения КПД ЛПМ – возможную «паразитную» зарядку емкости трубки при незавершенном пробое и сообщил, что КПД генерации лазера на парах меди от полезно вложенной энергии в трубке среднего размера достигает 4%.

Г.С. Евтушенко привел примеры положительного влияния малых неконтролируемых примесей на генерационные характеристики ЛПМ. Возможно, это связано с наличием остаточного водорода в разряде ЛПМ. О положительном влиянии водорода на генерационные характеристики CuVg-лазера и технической реализации отпаянного CuVg+H₂-лазера рассказал Д. Астаджов, дополнив рядом подробностей свое секционное выступление, сделанное ранее. Следует отметить, что увеличение выходной мощности лазера на парах чистой меди при добавке водорода впервые наблюдал П.А. Бохан с коллегами.

Таким образом, как отметили участники «круглого стола», потенциальные возможности ЛПМ реализованы еще в неполной мере.

Во время конференции проводились экскурсии в лаборатории Института сильноточной электроники СО РАН, Института оптики атмосферы СО РАН, Томского государственного университета и Сибирского физико-технического института.

На заключительном заседании AMPL-01 14 сентября 2001 г. российскими и зарубежными учеными были отмечены высокий научный и организационный уровень конференции, активное участие молодых ученых и аспирантов в работе конференции и высказано пожелание о проведении очередной конференции AMPL-03 в сентябре 2003 г. в Томске.

Дополнительную информацию о конференции AMPL можно найти на сайте Института оптики атмосферы СО РАН по адресу: <http://symp.iao.ru>

Г.С. Евтушенко, В.М. Климкин, Институт оптики атмосферы СО РАН;
Т.Н. Копылова, Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова при ТГУ;
А.Н. Солдатов, А.М. Янчарина, Томский государственный университет;
В.Ф. Тарасенко, Институт сильноточной электроники СО РАН