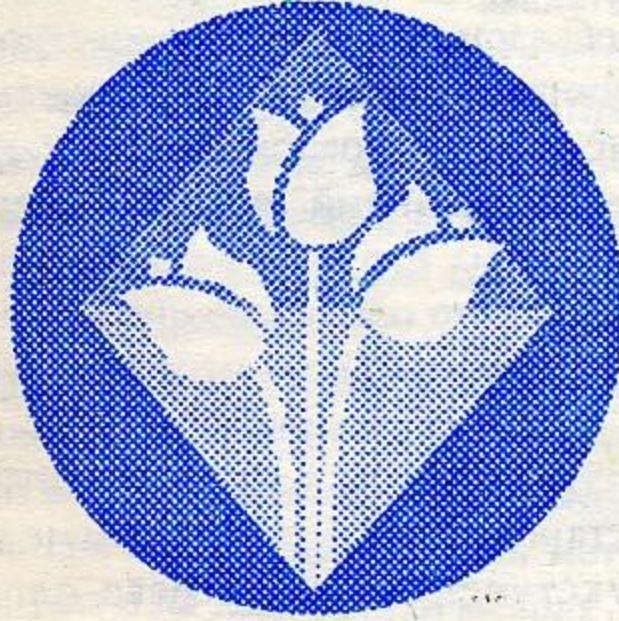


ЭНЕРГИЯ



Государственный
научный центр
Институт ядерной физики
им. Г.И.Будкера
№3-4, март, 1996г.

С праздником,
милые
женщины!



— Василий Семенович, расскажите, пожалуйста, о том, как создавалась ваша лаборатория?

— В начале 70-х годов было принято решение начать в недавно образованной лаборатории Д.Д.Рютова работы по исследованию взаимодействия мощных релятивистских электронных пучков с плазмой. В мире, в том числе и в нашем институте, к тому времени появились генераторы таких пучков. В середине 1971 года Д.Д.Рютов предложил мне заняться этой работой, и начала формироваться наша группа. Тогда же мы начали строить установку ИНАР, специально предназначенную для физических экспериментов по исследованию коллективного взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с плазмой в сильном магнитном поле. В то время для нас это была установка довольно сложная, тем не менее построили ее мы достаточно быстро — за полгода. Она оказалась удачной и была одной из "долгожительниц" в нашем институте, и в плазменном сообществе Советского Союза. На ней велись эксперименты в течение пятнадцати лет, до 1986 года. Вокруг этой установки и формировалась наша группа,росла количественно и качественно. К этой работе подключились несколько студентов и молодых специалистов. К примеру могу сказать, что в 1971 году пришли в нашу группу студент НГУ А.В.Аржанников, который сейчас доктор наук, из НЭТИ А.В.Бурдаков, ныне он кандидат наук, высококвалифицированный и авторитетный научный сотрудник, и др.

На установке ИНАР в ходе экспериментов было получено много интересных физических результатов. Впервые было достигнуто очень эффективное коллективное торможение релятивистского элект-

Былины

В подразделениях ИЯФ

В сегодняшнем номере, уважаемые читатели, Вы узнаете о том, как живет и работает одна из "плазменных" лабораторий нашего института — десятая.

О том, какие идут сейчас эксперименты на одной из крупнейших ияфовских установок ГОЛ-3, какие проблемы решает коллектив лаборатории нашему корреспонденту рассказали: Василий Семенович Койдан — заведующий лабораторией, руководители групп — Андрей Васильевич Аржанников, Александр Владимирович Бурдаков, Валерий Васильевич Конюхов, Константин Иванович Меклер.

В. Койдан

"Установка работает, мы — тоже"

ронного пучка в плазме с высокой плотностью. Было обнаружено сильное влияние углового разброса пучка на эффективность взаимодействия с плазмой. Установлено также сильное влияние внешнего магнитного поля на эффект нагрева плазмы.

Эти результаты стимулировали начало работ по разработке нового генератора электронного пучка микросекундной длительности, а также в значительной мере способствовали принятию решения о сооружении нового здания комплекса ДОЛ. Действительно, в конце 70-х годов было принято постановление Правительства о дальнейшем развитии термоядерных работ в Советском Союзе, в том числе и в нашем институте. Были выделены значительные финансовые и материальные ресурсы по линии Министерства среднего машиностроения (ныне Минатом). В результате за 5-6 лет ИЯФ получил подарок — здание ДОЛ. В основном, это было сделано благодаря усилиям плазменного сообщества института, и в первую очередь Д.Д.Рютова, в то время заместителя директора и руководителя термоядерной программы ИЯФ. Не стоит забывать, что не только плазменщики, но и другие службы получили новые помещения в этом здании, например, ВЦ, здравпункт и др.

Экспериментаторы-плазменщики же получили уникальное здание, позволяющее построить новые крупные установки следующего поколения и проводить исследования на существенно новом уровне.

Важным этапом в деятельности и дальнейшем формировании нашей группы в конце семидесятых-начале восьмидесятых

годов стала работа по созданию мощного генератора релятивистского электронного пучка с длительностью в несколько микросекунд. Речь шла о создании генератора с двумя новыми параметрами: нужно было увеличить длительность генерации пучка почти на два порядка — от 50-100 нс до нескольких микросекунд — и существенно увеличить полную энергию пучка в импульсе — подняться как минимум на порядок или даже два.

Этой работой часть сотрудников нашей группы занималась с начала 80-х годов и результатом явилось создание мощного генератора микросекундного пучка У-1.

Следует отметить, что ведущее место в этой работе принадлежало Михаилу Алексеевичу Щеглову. Генератор У-1 уже где-то к 1984 году имел рекордные параметры пучка, энергозапас стал выше 100 КДж. Мы получили, таким образом, новый физический инструмент.

К тому времени также существенно расширился наш опыт создания сильных магнитных полей на больших длинах, мощных конденсаторных батарей, систем питания, управления и контроля — и это явилось основой для того, чтобы в 1985 году (только что было завершено строительство здания ДОЛ) приступить к созданию установки ГОЛ-3. Мы целиком сосредоточились на этой работе, понимая, что установку нужно было построить быстро. Здесь были сконцентрированы почти все усилия нашей группы. Созданием установки занималась вся группа, все научные сотрудники и инженеры вместе с конструкторами КБ Валентина Сергеевича Николаева. Я убежден, что при создании крупной установки, физики, которые будут проводить на ней эксперименты, должны играть

Окончание на стр. 2

Окончание. Начало на стр.1

ведущую роль, в значительной мере определять, что и как нужно делать. Не нужно считать, что кто-то для тебя, без тебя сдеает хорошую установку, а ты потом только будешь ставить на ней интересные эксперименты.

В 1984 году было принято также решение о создании нового генератора микросекундного пучка с ленточным сечением и новыми параметрами. Речь идет о генераторе пучка У-2, которым занялся Андрей Васильевич Аржанников со своей группой.

Установку ГОЛ-3 (первую очередь) мы построили за три года. Запуск произошел в октябре 1988 года, когда был сделан первый выстрел микросекундным электронным пучком с генератора У-3 в плазменную установку длиною семь метров с магнитным полем 6 Тесла. Начался новый этап в наших экспериментах. На этой установке мы вели эксперименты около шести лет до середины 1995 года. Был получен ряд интересных результатов. Одним из первых и важных результатов было то, что сильноточный электронный пучок микросекундной длительности можно проптранспортировать на длину в семь метров. Что здесь необычного? Известно, что имеется неустойчивость тока в плазме Шафранова-Крускала. Если пучок (ток) проходит в достаточно длинной плазменной камере и в продольном магнитном поле, то из-за влияния собственного магнитного поля пучка при не очень высоком продольном магнитном поле может развиваться макроскопическая неустойчивость, которая приводит к тому, что пучок может выбрасываться на стенки. Нужно было проверить, можем ли мы на такой длине (семь метров) при наших токах уйти от этого опасного явления. К счастью, это удалось, потому что ток пучка в плазме частично компенсируется. Когда пучок проходит через достаточно плотную плазму, то эффективный (полный) ток его уменьшается (!) и можно находиться под порогом этой неустойчивости. С первым же выстрелом было показано, что пучок с

В. Койдан

“Установка работает, мы — тоже”

длительностью в сто раз большей, чем мы работали раньше, транспортируется на сантиметровую длину и с ним можно работать.

Второй важный результат — было достигнуто высокоэффективное взаимодействие пучка с плотной плазмой. Это тоже не тривиальный результат. Дело в том, что микросекундный пучок, чтобы иметь такую же плотность тока, как в наносекундных пучках, сначала формируется в диоде, а затем сходящимся магнитным полем сжимается, при этом его угловые характеристики ухудшаются. Это должно было снижать эффективность его взаимодействия с плазмой. И здесь нужно было исследовать и понять — возможно ли получение сильного эффекта взаимодействия микросекундного пучка с плазмой при тех же ее плотностях, которые были достигнуты с наносекундными пучками. В конечном итоге были найдены условия, когда и микросекундный пучок эффективно взаимодействует с плазмой при плотности порядка 10^{15} см^{-3} . К.п.д. взаимодействия был получен на уровне 25-30% — это близко к тому, что было достигнуто с пучками, имеющими значительно меньший энергозапас и наносекундную длительность. Получается это потому, что первая порция пучка подогревает предварительно плазму. А особенность коллективного взаимодействия пучка с плазмой заключается в том, что чем плазма горячее при прочих равных условиях, тем легче возбуждаются в ней коллективные колебания, и на этих колебаниях пучок эффективно тормозится. Таким образом, на установке ГОЛ-3 было показано, что и микросекундный пучок может эффективно тормозиться в плотной плазме. При этом плазма была нагрета до температуры около 1 кэВ (10^6 миллионов градусов).

Третий важный результат, полученный на ГОЛ-3, заключается в том, что в

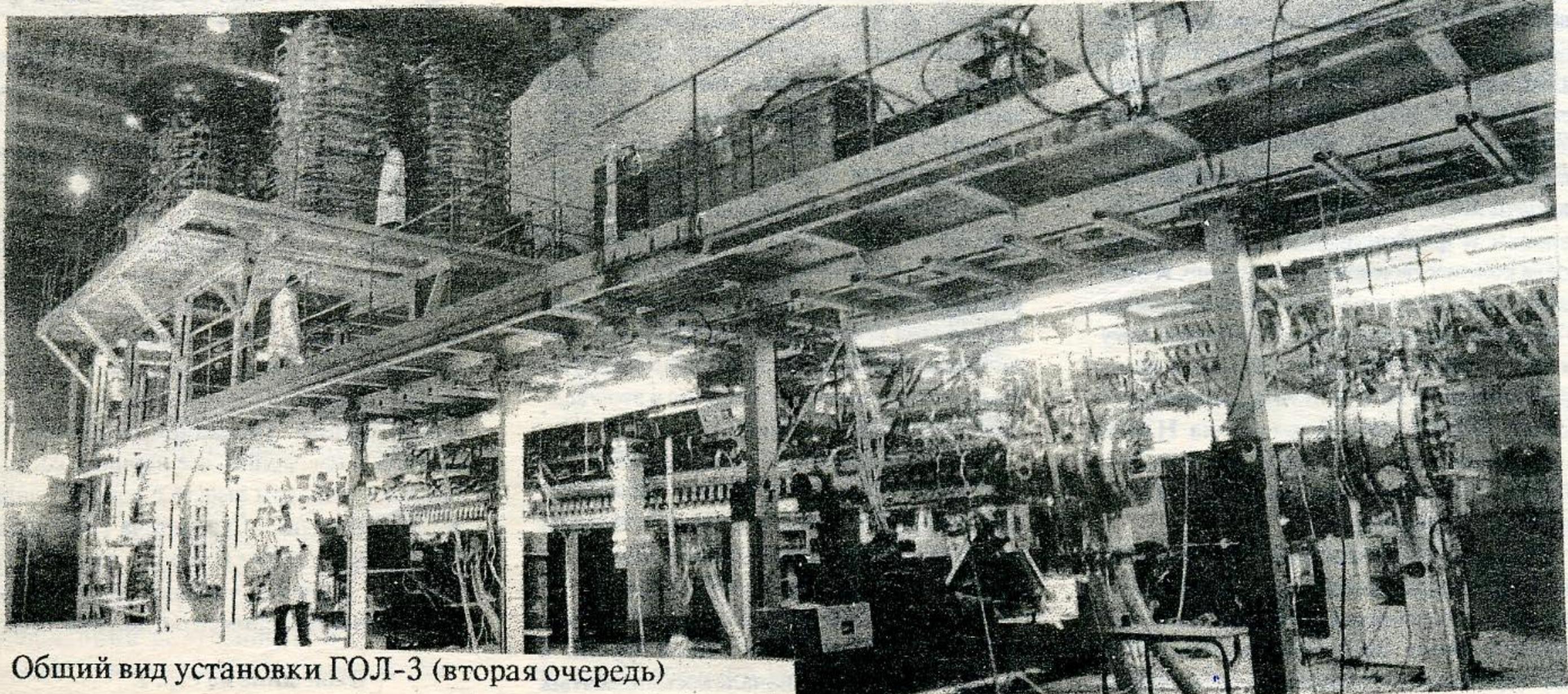
экспериментах и при анализе их результатов было явно и четко установлено наличие явления аномальной проводимости (электро- и теплопроводности) плазмы с высоким уровнем турбулентности, которая возбуждается при прохождении электронного пучка. При этом возбуждаются интенсивные плазменные колебания, возникает сильная ленгмюровская турбулентность. Тогда свойства плазмы меняются таким образом, что ее теплопроводность и электропроводность сильно снижаются. Для нас это, в основном, благоприятный фактор, означающий, что тепло медленнее уходит из плазмы. Результативно получается, что плазму можно нагреть до достаточно высокой температуры — порядка 1 кэВ, как уже упоминалось.

Следующий цикл экспериментов на этой установке был — исследование метода двухступенчатого нагрева плотной ($10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$) плазмы. Не вдаваясь в подробности концепции этого метода, скажу только, что было проведено много экспериментов в разных вариантах, в результате мы показали, что такой способ нагрева осуществим и имеет хорошие перспективы.

В это же время параллельно с экспериментами на ГОЛ-3 велись работы на генераторе ленточного пучка У-2. На сегодня этот генератор создает пучок с совершенно уникальными параметрами: энергозапас ленточного пучка достиг уровня 0,4 МДж, а в сжатом пучке, пригодном для инъекции в плазму — 0,3 МДж — это лучшие в мире параметры.

В последнее время на установке ГОЛ-3 мы проводили также “прикладные” эксперименты — эксперименты по взаимодействию потока горячей плазмы с твердой поверхностью. Это связано с проблемой стойкости материала дивертора ИТЭРа.

Наработка физической информации, с одной стороны, создание генератора пучка



Общий вид установки ГОЛ-3 (вторая очередь)

У-2 с энергозапасом в три-четыре раза большим, чем прежде, позволили приступить к созданию второй очереди установки ГОЛ-3. Было решено увеличить длину плазменной части установки до двенадцати метров, для чего потребовалось изготавливать дополнительно элементы вакуумной камеры, новую серию магнитных катушек для возросшего по длине соленоида, существенно увеличить запас конденсаторной батареи. Кстати, это один из существенных и уникальных элементов установки — многомегаджоульная (сегодня 15 МДж) конденсаторная батарея для питания соленоида магнитного поля. Создание этой конденсаторной батареи — заслуга Константина Ивановича Меклера и его группы. Первая часть батареи (10 МДж) проработала успешно. Сейчас для второй очереди установки она увеличена в полтора раза и ее энергоемкость теперь составляет 15 МДж — это уникальное сооружение.

Группа Александра Владимировича Бурдакова великолепно справилась с проблемой создания плазмы в металлической камере сначала на длине семь метров, а теперь уже и на двенадцати метрах, а также с развитием и созданием многочисленных плазменных диагностик.

В сентябре 1995 года мы остановили эксперименты на первой очереди ГОЛ-3, чтобы существенно модернизировать нашу установку. К концу 1995 года нам удалось увеличить ее до двенадцатиметровой длины, сохранив при этом прежнее (по величине) магнитное поле. Для этого потребовалось значительно переделать всю инфраструктуру на экспериментальной площадке, в зале, соединить магнито-плазменную часть с новым генератором пучка У-2, который также был подготовлен уже для предстоящих экспериментов по инъекции пучка в плазму двенадцатиметровой длины. В конце декабря прошлого года нам удалось все это заставить работать.

— Какие перспективы открываются но-

— Андрей Васильевич, с чего бы вы хотели начать наш разговор?

— Начиная наш разговор, я хотел бы сказать, что в основу исследований, которые проводятся в лаборатории N10, главным образом положены идеи, высказанные еще двадцать лет назад Д.Д.Рютовым. В этом отношении деятельность, связанная с ленточными пучками, чем я непосредственно занимаюсь последние десять лет, также в значительной мере инициирована Дмитрием Дмитриевичем. Образование, которое получил основной состав нашей группы, определяется школой, которая была заложена в нашем институте в те времена, когда он только создавал кафедру физики плазмы в НГУ, еще не будучи академиком. Хотя последние несколько лет он уже не работает с нами, но внимание, которое он проявляет к нашим делам, по-прежнему способствует поддержке этих работ не только в нашей стране, но и за рубежом, поскольку и там его авторитет очень высок. Значительную роль в становлении работ в нашей исследовательской группе, которая проводит эксперименты

вые параметры установки?

— Мы имеем пучок с существенно более высокими параметрами (с большей длительностью, с большим током, с большим энергозапасом). Первый вопрос — сможем ли мы воспользоваться этим пучком в полной мере, сможем ли мы его заинжектировать в плазму, сможет ли пучок пройти через такую большую длину, не возникнут ли какие-то препятствия, в том числе и в виде макроскопической неустойчивости, которая не позволит нам в полной мере воспользоваться уникальным импульсным источником энергии для нагрева плотной плазмы.

Второе — если нам удастся реализовать полностью параметры пучка, то мы можем надеяться на получение плазмы с более высокими физическими параметрами по температуре, по плотности и по времени удержания.

Далее представляются весьма интересными новые эксперименты по двухступенчатому нагреву; по получению сгустка электронно-и ионно-горячей плазмы; по генерации "вспышки" излучения в мягком рентгеновском диапазоне, в ультрафиолетовом диапазоне, может быть, даже в специальных условиях "вспышке" нейтронного излучения. Есть еще ряд и других интересных экспериментов, которые можно провести на новой установке. Словом, работы на ближайшие пять-десять лет хватят, кризис идей и отсутствие интересных физических экспериментов нам не грозят.

— Чтобы обеспечить надежную работу такой сложной установки, нужны высококлассные специалисты...

— У нас действительно работают очень много высококвалифицированных сотрудников. Я уже упоминал А.В.Аржанникова, А.В.Бурдакова, К.И.Меклера, М.А.Щеглова. Хотел бы отметить также группу Валерия Васильевича Конюкова, обеспечивающую разработку и создание специальных

систем электропитания, систему зарядки конденсаторных батарей, компьютеризации, автоматизации. В этой группе работают очень опытные инженеры: А.Г.Макаров, С.С.Перин. В лаборатории работают талантливые научные сотрудники, достаточно молодые, кандидаты наук, такие как В.В.Поступаев, С.Л.Синицкий, П.И.Мельников. Совсем недавно в лабораторию пришла талантливая молодежь — А.Ровенских, В.Филиппов, А.Тарасов, К.Цигуткин, М.Агафонов, М.Чагин. Есть хорошие студенты-магистранты — Р.Разилов, С.Вдовин, С.Полосаткин и др.

В лаборатории есть и прекрасные, опытные механики-лаборанты: Б.Заев, В.Расторопов, С.Туркин, А.Кутовенко, С.Гарифов, В.Синичкин, А.Муллин, О.Комаренко и др. Все эти сотрудники — наш "золотой фонд".

— Без контактов с другими подразделениями такую громадину, как ГОЛ-3, не осилить...

— Это, конечно, так. И наша лаборатория тесно связана с другими коллективами. Хорошо нам помогает группа электроников из девятой лаборатории (А.Д.Хильченко), шестая лаборатория (Э.А.Купер, А.М.Батраков). Я уже говорил об очень тесном контакте с КБ (Николаев В.С.), где высококвалифицированные конструкторы Е.Семенов, Р.Зоткин, Ю.Деулин, В.Бобылев и др. принимали активное участие в проектировании установки. Все "железо" сделано — и с очень хорошим качеством — ияловским экспериментальным производством. С ними мы работаем активно и плодотворно: "нерушимый" союз научных сотрудников, инженеров, конструкторов, работников экспериментального производства и других подразделений института сделал и делает свое дело. Установка работает, и мы тоже. И с удовольствием.

А. Аржанников

Эксперименты продолжаются

на сильноточном генераторе электронного пучка У-2, сыграла также поддержка их со стороны заведующего лабораторией доктора физ.-мат.наук В.С.Койдана.

— Что представляет собой генератор У-2 и какова его роль в работе установки ГОЛ-3?

— Идея создания генератора пучка У-2 была высказана в середине 80-х годов. Этот генератор выгодно отличается от других сильноточных ускорителей тем, что в нем энергозапас электронного пучка, используемого для нагрева плазмы, может быть доведен до уровня одного мегаджоуля. Особенность нашего подхода заключается в том, что пучок в генераторе имеет сечение не круглое, как это было раньше, а в виде ленточки. Такая ситуация позволяет иметь пучок с предельно большим энергозапасом при хороших угловых характеристиках

электронов (имеется в виду угловая разброс пучка). Форма поперечного сечения такого пучка позволяет обеспечить последовательную во времени инъекцию в плазму нескольких пучков, что дает возможность дополнительного подъема энергетики в пучково-плазменном эксперименте.

В связи с этими положительными особенностями ленточных пучков в середине восьмидесятых было решение, что первой сооружаемой установкой в строящемся тогда комплексе ДОЛ должен стать генератор ленточного пучка. Таким образом, первыми поселенцами в комплексе ДОЛ были люди, которые сооружали этот ускоритель. В 1985-86 годах в ходе сооружения ускорителя они создали основные системы, обеспечивающие подвод энергии в ДОЛ и радиационную безопасность работ в экспериментальном зале. Значительный вклад в работу по запуску ускорителя У-2 в комплексе ДОЛ внесли инженеры В.А.Капитонов и А.П.Авроров, а также ла-

Окончание. Начало на стр. 3

боранты А.П.Ткачук и Г.Н.Дементьев. Большую роль сыграла служба главного энергетика, которую в то время возглавлял Виктор Маркович Ураев.

Конструкторские работы по освоению комплекса ДОЛ и сооружению генератора пучка У-2 были проведены КБ В.С.Николаева. Значительный вклад в эти работы внесли А.В.Смирнов, Р.П.Зоткин, В.К.Шарапов, а в последующие годы В.Б.Бобылев. Здесь уместно отметить роль к.т.н. В.С.Николаева не только как умелого руководителя КБ, но и как высококвалифицированного инженера-конструктора.

Подход к получению сильноточного пучка был достаточно оригинален: по этой причине пришлось сначала вести теоретические исследования и эксперимент на довольно скромных масштабах. Мы вначале получали пучки с энергозапасом порядка нескольких десятков килоджоулей и на них изучали возможность создания полномасштабной установки. Таким образом во время сооружения установки по ходу дела малыми фрагментами проверялись идеи, которые затем закладывали в большую машину. Это позволило в начале 90-х годов запустить генератор пучка У-2 уже в полномасштабном эксперименте. При этом уже осуществлялась генерация пучка с энергозапасом около 0,4 МДж. Собственно такой энергозапас в пучке и ожидался в рамках данной программы.

Чтобы использовать ленточный пучок (его поперечное сечение имеет размеры по одной координате 4 см, а по другой 1,5 метра) для нагрева плазмы, его необходимо преобразовать в пучок с круглым сечением. Была построена модельная система, на которой мы в экспериментах отработали возможность преобразования ленточных пучков в круглые пучки. В этих модельных экспериментах были использованы пучки с исходным сечением 1 см на 20 см, а затем на этой основе был построен преобразователь, который преобразует пучок с толщиной в 4 см шириной в 1,5 метра в пучок круглого сечения диаметром 6 см. Получающийся в итоге пучок оказывается вполне приемлемым для нагрева плазмы. В прошедшем году удалось присоединить к генератору У-2 соленоид установки ГОЛ-3 и осуществить первые опыты по инжекции преобразованного пучка в плазму.

Энергозапас пучка в плазме уже сейчас значительно превышает тот уровень, который был в исследованиях, проводившихся в предшествующие годы на первой очереди ГОЛ-3. Таким образом, использование генератора У-2 для инжекции пучка в соленоид установки ГОЛ-3 открывает перспективы для исследований, проводимых на ней.

Следует отметить, что ленточные пучки имеют определенные преимущества перед круглыми, поскольку разброс электронов по продольной скорости может быть сделан в них предельно маленьким при большой плотности тока пучка. Учитывая малую

А. Аржаников Эксперименты продолжаются

толщину ленточных пучков, можно их использовать для генерации электромагнитных волн в миллиметровой и даже субмиллиметровой области длин волн. При этом мощности таких генераторов в перспективе могут быть выведены на уровень в десятки гигаватт, если ориентироваться на использование полномасштабных пучков с токами порядка 50-100 килоампер. В течение последних пяти лет мы ведем исследования, направленные на создание генераторов такого типа. И в этих исследованиях на первом этапе мы опять проверяем все физические идеи и технические решения на пучках с относительно скромными параметрами. Сейчас в наших опытах используется пучок с толщиной в несколько миллиметров и шириной в 10 см. Но и в этих опытах получена генерация 4-миллиметрового излучения на уровне сотни джоулей в импульсе микросекундной длительности — это уровень мировых достижений. Особенностью наших исследований является то, что для получения одномодового режима генерации нами закладывается двумерно распределенная обратная связь, чего в практике экспериментов также не было. Теоретические и экспериментальные исследования позволяют прогнозировать на данном этапе создание генераторов миллиметрового излучения с одномодовым режимом генерации при электронном токе масштаба 50 килоампер и длительностью около десяти микросекунд.

— Без специалистов высокого класса исследования подобного рода нельзя провести...

— Безусловно, да. И такие специалисты есть. Весь долгий путь создания установки У-2 прошел С.Л.Синицкий, который включился в работу по сильноточным пучкам еще в студенческие годы. Сейчас он является одним из ведущих специалистов в области электронных пучков большой мощности, он — кандидат физико-математических наук. Следует отметить и молодых людей, которые активно включились в работу по установке У-2: выпускник НГУ, младший научный сотрудник Александр Тарасов, выпускник НГТУ, ныне аспирант Михаил Агафонов. Они принимали непосредственное участие в отработке узлов ускорителя для генерации полномасштабного пучка и осуществлению экспериментов по инжекции его в плазму. Значительную роль они сыграли также в подготовке и проведении экспериментов по генерации миллиметрового излучения. Из лаборантского состава я бы отметил А.В.Кутовенко, который в последние годы вошел в состав нашего коллектива. Он очень напористо и квалифицированно выполняет порученные ему работы. Будущее развитие наших работ мы, конечно, связываем с выпускниками университета и НГТУ.

— Значит в кадровом отношении у вашей установки хорошие перспективы?

— Это сложный вопрос. За то время,

пока шло строительство и мы вели эксперименты на первом этапе, у нас приходили и уходили молодые люди, количество которых нужно удвоить по сравнению с тем числом, которое сейчас есть. Минимум четверо ребят выросли у нас из студентов в научные сотрудники, но, к сожалению, ушли. Были очень квалифицированные инженеры, такие как А.П.Авроров, с которым мы вместе начинали строительство, но в силу сложившихся обстоятельств он тоже ушел от нас. Такой же пример — инженер М.П.Лямзин, который в свое время был у меня дипломником и отработал у нас достаточно время. В связи с низкой зарплатой и отсутствием реальной перспективы получить квартиру он ушел в так называемый "бизнес". Те молодые люди, которые сейчас работают у нас, вынуждены подрабатывать на стороне, чтобы прокормить семью. Это, конечно, мешает нашей работе, и, самое страшное, может привести в будущем к тому, что и они уйдут от нас.

— А перспективы самой установки?

— Что касается непосредственно инжекции пучка в плазму, то здесь есть возможность перехода к энергетике масштаба 300 килоджоулей в пучке. Это дает основания прогнозировать возможность получения достаточно горячей плазмы, включая нагретые ионы. Это позволило бы перейти к экспериментам по получению плазмы с большим бета, и перспективе перейти к исследованиям по стеченному удержанию горячей плотной плазмы. Для этого есть все основания, тем более, что ускоритель У-2 допускает дальнейшее наращивание энергозапаса в пучке.

Что касается использования ленточных пучков для генерации излучения миллиметрового диапазона, то у нас была поддержка со стороны Российского Фонда фундаментальных исследований, Фонда Сорос, причем, по Российскому Фонду было два гранта. Кроме того, наши работы включены в программу России по физике микроволн. Еще надеемся получить поддержку этому направлению со стороны Международного научно-технологического центра. Этот центр ведет финансирование исследований российских ученых под конкретные задачи. Программа этого центра конверсионная, финансируется западными странами. Распределение грантов по проектам со стороны России курируется руководителями Арзамаса-16 и Челябинска-70. Наш проект получил все разрешения и одобрен со стороны российского руководства. Сейчас уже есть рекомендательное письмо в поддержку этого проекта со стороны Германии. Европейское сообщество с большой долей вероятности поддержит нашу работу. Есть возможность получить поддержку и от США. Это позволило бы нам проводить именно те исследования, которые для нас интересны.

— Что представляет собой группа плазменной части ГОЛ-3?

— Это неформальный коллектив, часть десятой лаборатории, который занимается плазменной частью установки ГОЛ-3. Исторически сложилось так, что ядро нынешней десятой лаборатории сформировалось в группе В.С.Койдана на установках ИНАР и У-1. Затем лаборатория занялась проектированием и сооружением крупной установки ГОЛ-3 и впоследствии вокруг "стариков", которые начинали строительство установки и отвечали за определенные участки работ, стали формироваться группы по тематикам. Одной из них является "плазменная" группа. Ее задачей является приготовление плазменного шнура в разрядной камере, измерение параметров плазмы, анализ полученных экспериментальных данных, расчет и планирование очередных шагов в эксперименте и, конечно, повседневное обслуживание установки. Кроме того, значительная доля усилий идет на задачи, связанные с работами по различным контрактам и грантам. С другой стороны следует заметить, что эксперимент на такой большой установке, как ГОЛ-3, является коллективным творчеством. Я бы не стал

резко разделять — та группа делает то, эта — это. Только в результате совместной дружной и общей работы возможно достижение хороших результатов.

— Есть ли в мире установки, подобные ГОЛ-3?

— Наша установка в какой-то мере уникальна, не имеет прямых аналогов. Среди исследовательских установок она находится в классе открытых ловушек и по своим параметрам сравнивается с крупнейшими установками в мире.

Что касается вообще установок по управляемому термоядерному синтезу, то ГОЛ-3, конечно, меньше, чем крупнейшие токамаки или чем установки для инерциального синтеза. В последнее время на этих машинах была продемонстрирована принципиальная возможность получения энергии в реакциях синтеза. Так что с физической точки зрения проблема термоядерной электростанции решена. Но возможно ли построение коммерческой электростанции на основе существующих токамаков или других систем — вот в чем вопрос!

Мы развиваем направление исследований, которое, по нашему мнению, обладает потенциальным преимуществом по сравнению с этими двумя наиболее развитыми. Это — нагрев и удержание плазмы в прямых открытых ловушках. В ИЯФе со временем А.М.Будкера, предложившего принцип открытой ловушки, это направление развивается, совершенствуется. Сейчас в институте исследуются несколько типов открытых ловушек: амбиполярная ловушка, газодинамическая и многопробочная. Мы занимаемся нагревом плазмы релятивист-

ским пучком электронов и удержанием ее в многопробочной ловушке. Проблема сложная, содержит несколько задач. Первая — нагреть плотную плазму в ловушке. Для этого нужны большие мощности. Единственным источником, который обладает адекватной мощностью, является пучок электронов. Пучок, пролетая сквозь плазму, взаимодействует с ней способом, типичным только для плазмы. Он раскачивает в ней волны (как ветер на воде), кото-

стикой плазмы, глубоко разбирается в сути эксперимента.

Приходит талантливая молодежь, ребята хорошо работают, на них вся надежда. Андрей Ровенских — три года назад закончил университет, сейчас уже в состоянии управлять плазменной частью установки самостоятельно, и с научной точки зрения у него есть замечательные успехи. Два раза он занимал призовые места в конкурсе молодых ученых. Костя Цигуткин, пришедший вместе с Андреем, тоже успешно работает и тоже является победителем ИЯФовских конкурсов. Лариса Юшкина проявила себя еще в студенческие годы как незаурядный специалист.

Кроме научных сотрудников есть высококвалифицированные лаборанты. Борис Петрович Заев — специалист высшей квалификации, он относится к установке как к родной и она у него всегда в полном порядке. Виталий Алексеевич Растропов работает как инженер, у которого хорошая голова и плюс золотые руки. Ему достаточно поставить задачу, — он все делает сам, выдавая готовый продукт. Аркадий Павлович Муллин — незаменимый, ответственный человек, мастер на все руки.

Конечно, с кадрами проблема есть, есть "утечка мозгов". Кто за границу уехал, кто в бизнес подался. Есть проблемы не только с научными сотрудниками, но и с инженерами и лаборантами. Но в целом какого-то катастрофического ущерба пока нет.

— Что можно сказать о перспективах установки ГОЛ-3?

— Сейчас запущена вторая очередь установки ГОЛ-3, фактически новая установка, получившая название ГОЛ-3-II. Она имеет не только более высокие параметры, но и обладает многими потенциальными возможностями, качественно новыми по сравнению с теми, которые были заложены в первой очереди. Это касается экспериментов по удержанию плазмы, как вдоль направления установки, так и по перечному удержанию стенками камеры. Это — эксперименты по получению синтезированной высокотемпературной плазмы, по созданию мощного ультрафиолетового лазера, по воздействию горячей плазмы на поверхность и т.д. Словом, установка открывает очень богатые новые возможности.

Я считаю, что перспективы есть и у нашей установки, и у всего института в целом. При условии успешной работы можно решить многие, в том числе финансовые проблемы. Но если мы будем подрывать ИЯФ изнутри, сознательно желая ему гибели, что открыто заявляют некоторые из наших коллег, тогда нас никто не спасет.

А. Бурдаков

"И у нашей установки, и у всего института перспективы есть"

*Но если мы будем подрывать ИЯФ изнутри,
сознательно желая ему гибели, что открыто
заявляют некоторые из наших коллег, тогда нас
никто не спасет.*

рые потом передают свою энергию частичкам, нагревая плазму. Самым значительным результатом на первой очереди установки ГОЛ-3 было то, что с помощью пучка удалось нагреть плазму до десяти миллионов градусов. В определенном смысле этот факт не был предсказан теоретически. Причем, это одна из немногих приятных неожиданностей в плазменных экспериментах, в основном неожиданности почему-то чаще печальные.

Другая задача — удержание этой горячей и плотной плазмы в магнитной ловушке в течение какого-то длительного времени. Как раз на второй очереди установки ГОЛ-3 нам предстоит решать эту задачу.

— Недавно была увеличена длина установки с семи до двенадцати метров. Когда начнутся новые эксперименты?

— Эксперименты уже идут. И мы довольно быстро вышли на высокие параметры установки, правда, еще не проектные. Пока серьезных неожиданностей не обнаружено. Получены первые обнадеживающие результаты.

— Для успешной работы очень важно, чтобы люди хорошо понимали друг друга...

— В коллективе можно результативно работать тогда, когда тебя окружают хорошие люди. К счастью, у нас много сотрудников, обладающих высокой квалификацией. Например, Владимир Поступаев не только ведет бестяще эксперимент, но и обладает обширными знаниями: у нас важно осмысливать происходящее и предлагать что-то новое. Петр Мельников сделал интересные эксперименты, связанные с лазерным рассеянием, оптической диагно-

— Какую часть работы на установке ГОЛ-3 выполняет группа систем питания и управления?

— К моменту, когда сформировался проект установки и началось строительство здания, уже было понимание, что все устройства для питания и управления установок прежних поколений не пригодны для ГОЛ-3. Уровень надежности и отсутствие автоматизации этих устройств при соответствующем увеличении их количества не позволили бы сделать ни одного выстрела на новой установке.

Необходим был качественно новый уровень.

Для плазменных установок характерно большое разнообразие потребителей питания. На ГОЛ-3 имеются очень энергоемкие системы: это емкостные накопители для создания ведущего магнитного поля,

ГИНЫ ускорителей электронов, а также системы средней мощности: система создания плазмы, согласующие магнитные катушки и диагностические системы, которые имеют небольшую потребляемую мощность, но дополняют набор разнообразных требований, которые предъявляются к источникам питания. Этот набор очень велик и невозможно разрабатывать и производить источники для каждого конкретного случая.

В 80-х годах наша группа стала искать решение, которое позволило бы унифицировать системы питания. На начальном этапе разработки нам очень помогли консультации и опыт С.П.Петрова (лаб.6), который предоставил нам преобразовательную технику для проведения первых модельных испытаний. В результате этих поисков была разработана многоканальная система питания, каждый канал которой работает в режиме генерации тока прямоугольной формы и повышенной частоты (1 КГц). Это позволяет свести индивидуальные особенности нагрузки к единственному элементу в системе - согласующему трансформатору. Устройство, которое генерирует ток, названо РИТ (регулируемый источник тока). Имеется два конструктива РИТ различной мощности (вставки "ВИШНЯ" 200 и 80 мм.). Они имеют одну и ту же схему и одинаковые блоки управления (40 мм.). Отличие состоит только в типах применяемых тиристоров и размерах радиаторов. Эти два варианта в сочетании с дроссельными вставками позволяют перекрыть диапазон мощностей для отдельного канала от 0.5 КВт до 100 КВт. Вариант канала, скомплектованного на мощность 50 КВт, занимает два каркаса в стойке "ВИШНЯ". На ГОЛ-3 установлено около 35 каналов различной мощности. Для связи блока управления РИТ с ЭВМ разработан интерфейсный модуль в стандарте КАМАК (А.Д.Хильченко). Все устройства РИТ питаются от вторичной сети повышенной частоты, которую создают на установке разработанные

нами специальные тиристорные инверторы. Каждый инвертор имеет мощность 100 КВт, размеры: 1.2 x 0.6 м и высоту 1.7 м. Для ГОЛ-3 окончательно требуется одиннадцать инверторов. Сейчас их установлено девять.

В настоящее время данная структура питания, можно сказать, полностью сложилась и обеспечивает практически весь комплекс ГОЛ-3. Разумеется, создание такой большой системы потребовало участия многих людей, значительных ресурс-

ется около 45 крейтов (для управления и регистрации). Ранее в качестве крейт-контроллеров использовались только контроллеры К606 (лаб. 6). Сейчас значительную часть их заменили контроллеры типа "МИЛЕНOK", в который встроена микроЭВМ. Эти контроллеры используют моноканальную систему связи по протоколу MIL-STD-1553В. Эта же система применяется в качестве межмашинной связи узловых мини-ЭВМ типа МС-1212.

Необходимость разработки новой системы связи была обусловлена несколькими причинами. Пожалуй, главной из них является то обстоятельство, что так называемые "без протокольные" линии связи не имеют системы повторных передач при возникновении ошибок. Ошибки

линий передачи редко, но все-таки происходят. Это приводит к фатальным зависаниям при общении удаленных программ-партнеров и исправить эту ситуацию программным образом невозможно. В результате сложилась довольно тяжелая ситуация, когда ненадежно работали как старые программные продукты (на базе ПО АЛИСА), так и новая система RCS, которая позволяет поднять общение между абонентами с уровня элементарных акций в крейте (NAF-ов) до уровня вызова удаленных процедур. Особенно остро эта проблема касалась систем управления. Все системные блоки, которые обеспечивают работу моноканальной связи, а также контроллер "МИЛЕНOK" были разработаны в лаб. 9 (А.Д.Хильченко, А.Н.Квашнин). Я участвовал в этой работе как программист. Объем работы, связанный как с разработкой блоков, так и программного обеспечения, был очень большой. Для того, чтобы довести все до безупречного уровня, потребовалось несколько лет. Мы также благодарны за поддержку этой работы со стороны Э.П.Круглякова. Сейчас на комплексе ГОЛ-3 установлено 4 моноканала, каждый из них обслуживает большую подсистему. Все моноканалы связаны между собой и образуют локальную вычислительную сеть. Главным программным интерфейсом в эту сеть является RCS. Сегодня это единственная в институте (и по-видимому, в стране) аппаратно-программная среда, позволяющая инженеру и физику создавать алгоритмы, в которых могут участвовать много параллельно работающих ЭВМ, не обращаясь к помощи системных программистов.

В заключение нужно сказать, что на ГОЛ-3 используется много приборов, разработанных в других лабораториях ИЯФ. Особенно широкий парк приборов, которые разработаны и изготовлены в лаб. 6.

В.Конюхов

Достигнут необходимый уровень надежности систем питания и управления

сов ЭП и относительно длительного времени для доведения элементов системы до необходимого уровня надежности. Здесь я хотел бы отметить терпение и доверие руководства лаборатории к нашей многолетней деятельности.

Через все этапы разработки и усовершенствования системы прошли А.Г.Макаров и С.С.Перин, которые проявили много инициативы, настойчивости и трудолюбия. Особо нужно отметить вклад А.Г.Макарова. Организатором производства компонентов системы особенно в ЭП, был В.А.Капitonov, здесь большую роль сыграли его энтузиазм и энергия. Кроме того, он разработал весь необходимый набор согласующих трансформаторов (с различной мощностью и выходным напряжением). Конструкторские разработки проводили сотрудники НКО-9: Е.П.Семенов, В.К.Шарапов, В.С.Николаев, В.Г.Мошонкин. Особенno большой объем работ был выполнен Е.П.Семеновым.

— Расскажите, пожалуйста о системе автоматизации.

— Система питания, о которой я говорил выше, в ранних версиях предусматривала ручное управление. Но потом оказалось, что это очень дорого, а главное не нужно. Сейчас правильное поведение всех подсистем установки и их взаимодействие зависит, в основном, от качества прикладных программ. Процесс совершенствования программ еще не завершился.

Система регистрации на ГОЛ-3 тоже существенно отличается от установок прежних поколений. Хорошо известные экранированные комнаты заменены на небольшие металлические боксы, которые вмещают по два КАМАК-крейта. Экран-боксы распределены по установке. При этом каждый из них обслуживает определенную диагностику. Это позволило существенно уменьшить уравнительные токи в условиях сильных помех, а также резко сократить длину аналоговых трасс. Регистрирующие приборы размещены в крейтах бокса. В основном это осциллографические АЦП. Всего на установке использу-

К. Меклер

Конденсаторная батарея должна быть очень надежной системой

— Ваша группа занимается 15-мегаджоульной конденсаторной батареей. Как формировался коллектив?

— К тому времени, когда было принято решение о строительстве комплекса ГОЛ-3, в нашей лаборатории стали проводиться традиционные совещания, инициатором которых был Д.Д.Рютов. На них постепенно вырисовывались контуры будущей установки и отдельные части работы, которые необходимо было сделать. Так возникали небольшие объединения, группы для решения конкретных задач.

Конденсаторная батарея, которая создана нашей группой, входит в комплекс ОЛ-3, и эту довольно большую научно-техническую инженерную работу поручили в свое время мне как научному руководителю. Основное требование к этой конденсаторной батарее — она должна быть очень надежной системой. Кроме меня в группе было сначала четыре лаборанта: И.В.Дорошин, А.П.Чурсинов, С.С.Гарифов и В.Г.Козлов, сейчас остались только двое последних; студенты: Е.Э.Пята и М.Н.Чагин, в разное время защитившие дипломы и оставшиеся работать в институте; конструкторы во главе с В.С.Николаевым: В.Б.Бобылев, Р.П.Зоткин, В.К.Шарапов. Большое участие в работе принимали В.А.Капитонов, А.В.Киселев, А.Г.Макаров, С.С.Перин. При создании батареи использовался как опыт нашей лаборатории, так и опыт всего института. Консультации были с М.А.Щегловым, В.В.Конюховым, с людьми, строившими установки СВИПП, ПСП, ГДЛ и ГОЛ-1. Проектиро-

ванием электросхем занималось КБ ОГЭ, в монтаже и наладке участвовали МСУ-78 и МСУ-70. В обеспечении батареи необходимой электронной аппаратурой большое участие приняли Э.А.Купер и А.М.Батраков, из девятой лаборатории — группа, возглавляемая А.Д.Хильченко.

— Что представляет собой конденсаторная батарея, о которой идет речь?

— Сама конденсаторная батарея — это секционированное питание для соленоида, который входит в состав комплекса ГОЛ-3. Общая энергоемкость 15 МДж при максимальном напряжении 6 Кв, батарея разбита на 60 секций. Каждая секция состоит из 100 конденсаторов ИКБ-150, ток одной секции запитывает две катушки соленоида. Величина этого тока в максимуме порядка 8 килоампер, форма тока — полупериод синуса. В качестве коммутирующих ключей используются тиристорные сборки. Сейчас батарея расположена в шести специальных помещениях, каждое из которых имеет размеры 9×6 метров и высотой 9 метров. В институте это самая большая конденсаторная батарея, и вряд ли в ближайшее время этот рекорд будет побит.

Особенностью конденсаторной батареи является то, что она целиком автоматизирована. Если все предыдущие батареи были сделаны по-старому, без использования компьютеров для управления, то здесь все, начиная от зарядки батареи и кончая измерением и контролем, полностью автоматизировано и управление осуществляется через ЭВМ. В качестве ЭВМ используются специально разработанные в девятой лабо-

ратории (здесь большую идеологическую роль сыграл В.В.Конюхов, он вдохновитель и организатор этой работы) компьютеры "Миленок". Это позволяет нам осуществлять работу со всеми шестидесятью секциями конденсаторной батареи в реальном масштабе времени. Мы видим все, что происходит, начиная от величины напряжения всех секций и кончая состоянием блокировок во всех конденсаторных отсеках (до какого напряжения будет идти зарядка, активно ли каждое из зарядных устройств, закрыты ли двери, висят ли штанги и т.п.).

— Установка ГОЛ-3 была недавно существенно реконструирована. Это сказалось как-то на вашем участке работы?

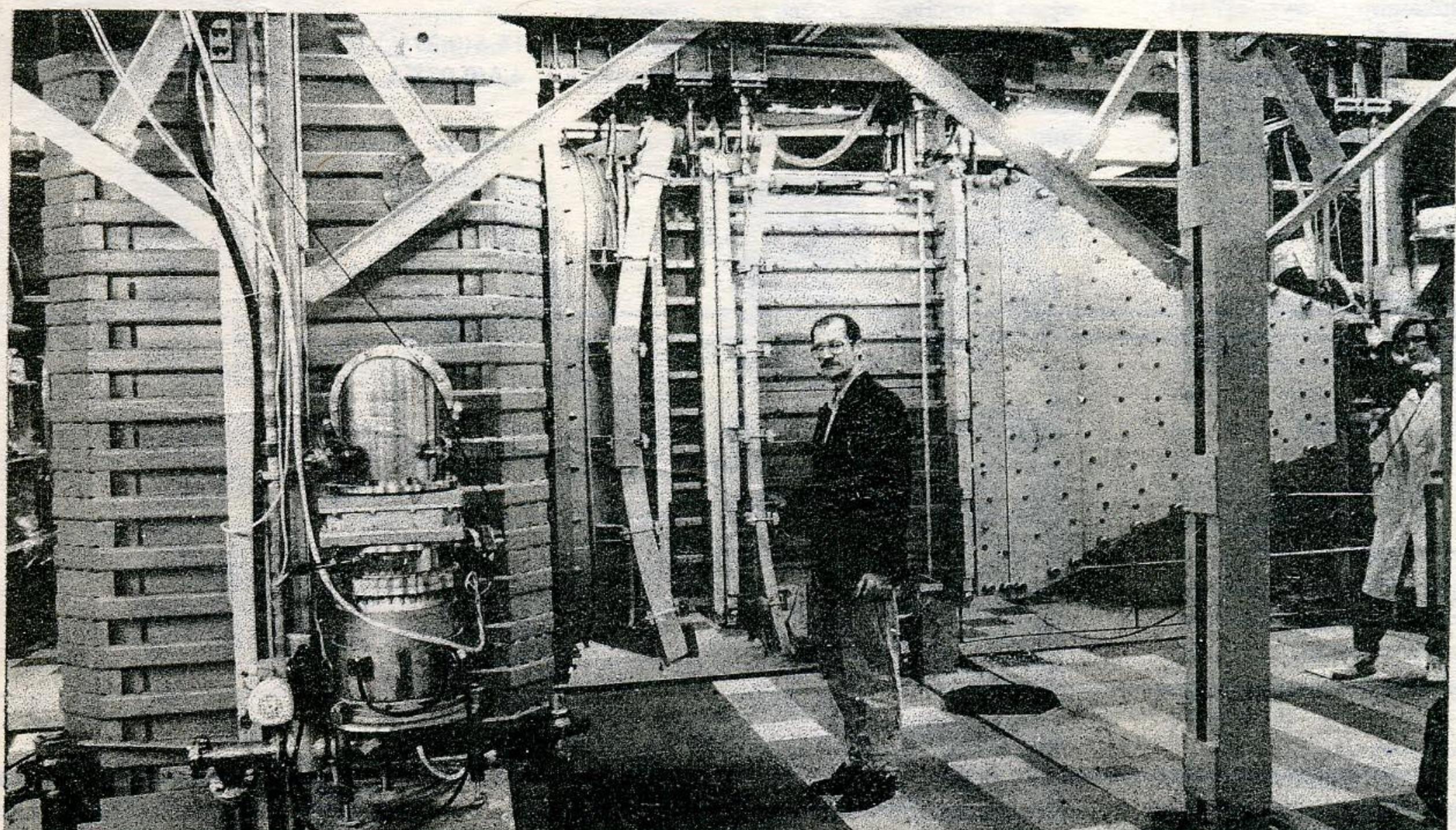
— В первую очередь комплекса ГОЛ-3 входило четыре отсека конденсаторной батареи с энергозапасом 10 МДж. В связи с тем, что существенно увеличился размер установки и соленоида, мы добавили еще два новых конденсаторных отсека. Качественно ничего не изменилось, а количественно — в полтора раза. Резерва у нас нет, все секции батареи работают на соленоид. Сейчас мы занимаемся строительством еще двух отсеков, многое уже сделано.

— С какими проблемами сейчас сталкивается ваша группа?

— Проблемы в основном связаны с отсутствием необходимых материалов, которые требуются для создания следующих стадий конденсаторной батареи. А это препятствует нормальному продвижению заказов в цехе.

— Людей достаточно в вашей группе?

— Пока обходимся собственными силами, но когда поджимает, мы мобилизуем сотрудников нашей лаборатории. Так, когда, например, запускалась вторая очередь батареи, помогали многие.



На снимке старший научный сотрудник С.Л.Синицкий. Система преобразования ленточного пучка в круглый ускорителя У-2

С.Мишин

Финансирование науки в США и России

В журнале "Вестник РФФИ" №3 (окт. 1995 г.) опубликован совместный доклад Президента США У.Клинтона и Вице-президента А.Горя под названием "Наука в национальных интересах", представленный средствам массовой информации в Белом Доме 3 августа 1994 года. В этом докладе содержатся интересные сведения о финансировании исследований и научно-технических разработок в США в 1993 году.

Основные данные представлены в таблице 1; затраты даны в миллиардах долларов США и в процентах от валового внутреннего продукта (ВВП), который является наиболее общим показателем экономической силы государства.

ВВП США в 1993 году составлял 6172 млрд. долларов.

В цифры этой таблицы включены расходы как на гражданские, так и на военные исследования и разработки. Раздельно расходы на военные исследования составляют 41,5 млрд. \$ (0,67% от ВВП), включая 1,3 млрд. долларов, передаваемые из этой суммы на фундаментальные исследования. Как можно понять из доклада, все военные расходы идут из федерального бюджета.

Полные расходы на гражданские исследования и разработки составляют 119,3 млрд. \$ (1,93% от ВВП).

В таблице 2 сравниваются расходы США на научно-технические исследования с расходами других стран.

Долговременная цель США — повысить инвестиции на науку с 2,6% до 3% от ВВП.

Цифры, отмеченные(*), взяты не из доклада Клинтона, а из других источников. Данные по России взяты из

проекта бюджета на 1996 год (по другим сведениям ВВП России за 1995 год равен 330 млрд.\$). Предполагаемый ВВП за 1996 год должен составить 2100 трлн. рублей, что при курсе 5500 рублей за доллар равно 382 млрд. долларов (примерно в 16-18 раз меньше, чем в США). Расходная часть бюджета — 411 трлн. рублей (20 процентов от ВВП), научные исследования и разработки финансируются по статье "Фундаментальные исследования и научно-технический прогресс" в количестве 9,6 трлн. рублей (0,46% от ВВП). Вряд ли есть другие существенные источники финансирования науки, т.к. раньше в Советском Союзе основная работа проводилась в академических и отраслевых НИИ и ОКБ, финансировавшихся из госбюджета.

Таблица 1

Источники финансирования	Опытно-констр. разработки	Прикладные исследования	Фундамент. исследования	Всего
Федер. правит.	36,1(0,58%)	15,5(0,25%)	16,5(0,27%)	68,0(1,10%)
Промышленность	57,8(0,94%)	21,1(0,34%)	4,6(0,07%)	83,6(1,35%)
Университеты и др. некоммерч. организации	0,90,015%)	3,1(0,05%)	5,1(0,08%)	9,2(0,15%)
Всего	94,9(1,54%)	39,7(0,64%)	26,2(0,42%)	160,8(2,60%)

Таблица 2

Страна	ВВП млрд.\$	Затраты на науку	Всего
		Гражданские	Военные
США (1993г.)	6172	119,3(1,9%)	41,5(0,7%)
ФРГ (1988г.)	1490*	37,2*(2,5%)	?????
Япония (1988г.)	3500*	105,0*(3,0%)	?????
Россия (1996г.)	382*	?????	1,74(0,46%)*

\mathcal{E}, \vec{p} - SCIENCE

В. Пиндюрин

Рентгеновская литография в ИЯФ

Продолжение.
Начало в N12 за 1995г. и N1 за 1996 г.

Какие лягушки квакают в нашем болоте

Учитывая нарастающий мировой интерес к LIGA-технологии, в 1991 году ИЯФ также начал работы в этой области, когда ВОСТОК изготовил первые тестовые образцы рентгеношаблонов с толстым поглощающим слоем. Тогда же были изготовлены первые тестовые образцы микроструктур из оргстекла и меди с поперечными размерами элементов до 10 мкм и с глубиной до 150-300 мкм. Образцы были получены, что называется "на коленке", и ясно, что "от коленки" до нормального производства микроизделий - дистанция огромного размера. Тем не менее, было продемонстрировано, что, используя многолетний задел в области рентгенолитографии и существующий потенциал, вполне можно решать и задачи LIGA-технологии.

Дальнейшее сокращение финансирования государственных организаций привело к нескольким эффектам (кроме очевидных и общих для всех). Организации, которые раньше были плотно завязаны на тематику рентгенолитографии для микрэлектроники и которые еще хотели и могли что-то делать в этой области, потеряли задачи и целевые ориентиры и начали "выпадать" на ИЯФ. Влияние ИЯФа на эти работы и раньше было не слабым, особенно в научной разработке вопросов, в определении целей и способов их достижения, но оно опосредовалось через бывшее министерство электронной промышленности (МЭП; сейчас оно называется по-другому, но сути дела это не меняет), которое в основном и финансировало работы. Когда же МЭП фактически свернул эту программу, так куда же еще могли "выпадать" указанные организации?

При таком "выпадении" от ИЯФа явно или не явно ожидалось, что будут определены направления и цели работ в изменившейся ситуации и, кроме того, как-то решится вопрос с финансированием. И, если в первой части вопрос кажется вполне

решаемым, как-никак работа для ИЯФа привычная, то вопрос с финансированием остается острым до сих пор - ИЯФ не имеет какого-либо целевого государственного финансирования под эти работы (если не считать грантов и финансирования по программе "Синхротронное излучение, лучевые технологии"). Здесь вполне закономерен и вопрос: "А почему ИЯФ вообще должен заниматься этими делами?", но также естественен и контр-вопрос: "Если не ИЯФ, то кто сейчас в России это может делать?".

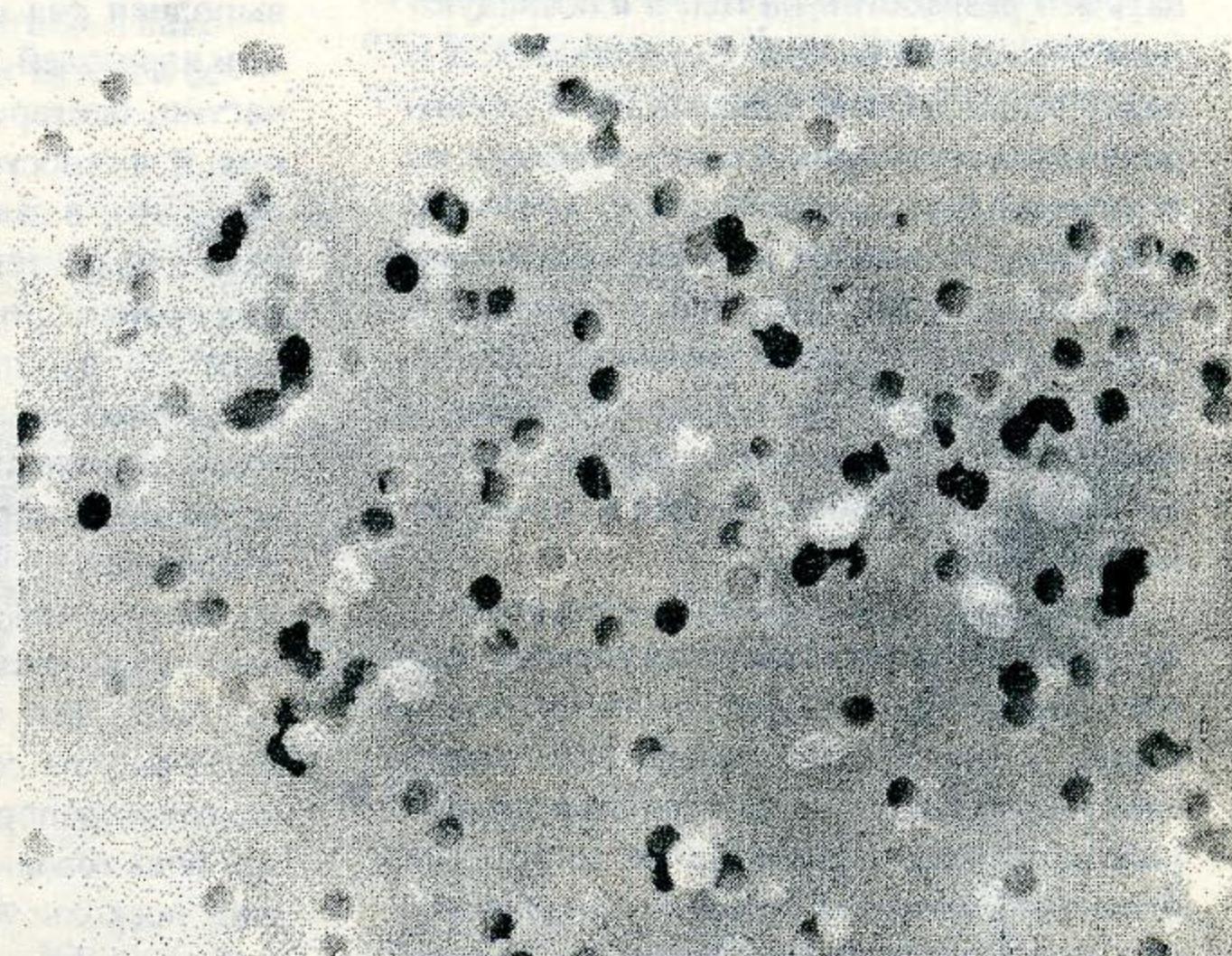
Вдобавок, ИЯФ пока по-прежнему остается единственной в России организацией, где постоянно действуют накопители и ведутся работы на СИ. Поэтому вполне естественно и закономерно, что организации, заинтересованные либо в разработке LIGA-технологии, либо в изделиях, производимых с помощью этой технологии, так или иначе выходят на ИЯФ. И, по-видимому, такая ситуация сохранится и в ближайшие годы - таков объективный базис.

Обозначенные эффекты по мере их осознания сначала ошарашили, потом озадачили. И не сразу были нащупаны направления и цели работ в сложившихся условиях (ясно ведь, что соревноваться с немцами в их борьбе за вертикальность стенок на уровне 0.06 мкм при высоте микроструктур в 400 мкм - заведомо проигрышное дело!). И, говоря сейчас о рентгенолитографии в ИЯФ, правильнее было бы говорить о рентгенолитографии в Сибирском международном центре СИ, действующем на базе ИЯФ, поскольку в этих работах в той или иной степени задействовано более десятка российских и зарубежных организаций.

Исторически первой "пошла" задача по разработке технологии изготовления и исследованию свойств регулярных мик-

ропористых мембран. Это полимерные пленки толщиной от 3 до 10 мкм, которые пронизаны регулярным массивом микропор с диаметром 0.35-0.5 мкм и с расстоянием между порами 1 мкм. При этом аспектное отношение составляет порядка десяти и больше, что и позволяет отнести эти мембранны к "глубоким" микроструктурам. Аналоги таких мембран не известны до сих пор, но их ближайшими родственниками являются трековые мембранны, которые производятся бомбардировкой полимерных пленок либо тяжелыми ионами достаточно высокой энергии, либо осколками деления ядер. Последующая химическая обработка облученных материалов приводит к образованию в пленке субмикронных пор как раз в местах прохождения частиц (в области треков).

Время изготовления первых образцов регулярных мембран совпало с периодом, когда при все уменьшающемся государственном финансировании по институтам стали активно "крутиться" представители частных, полугосударственных и полуподпольных коммерческих структур (по-ви-



10 μm 15.0 kV 7.70E3 1253/00

Рис. 1а

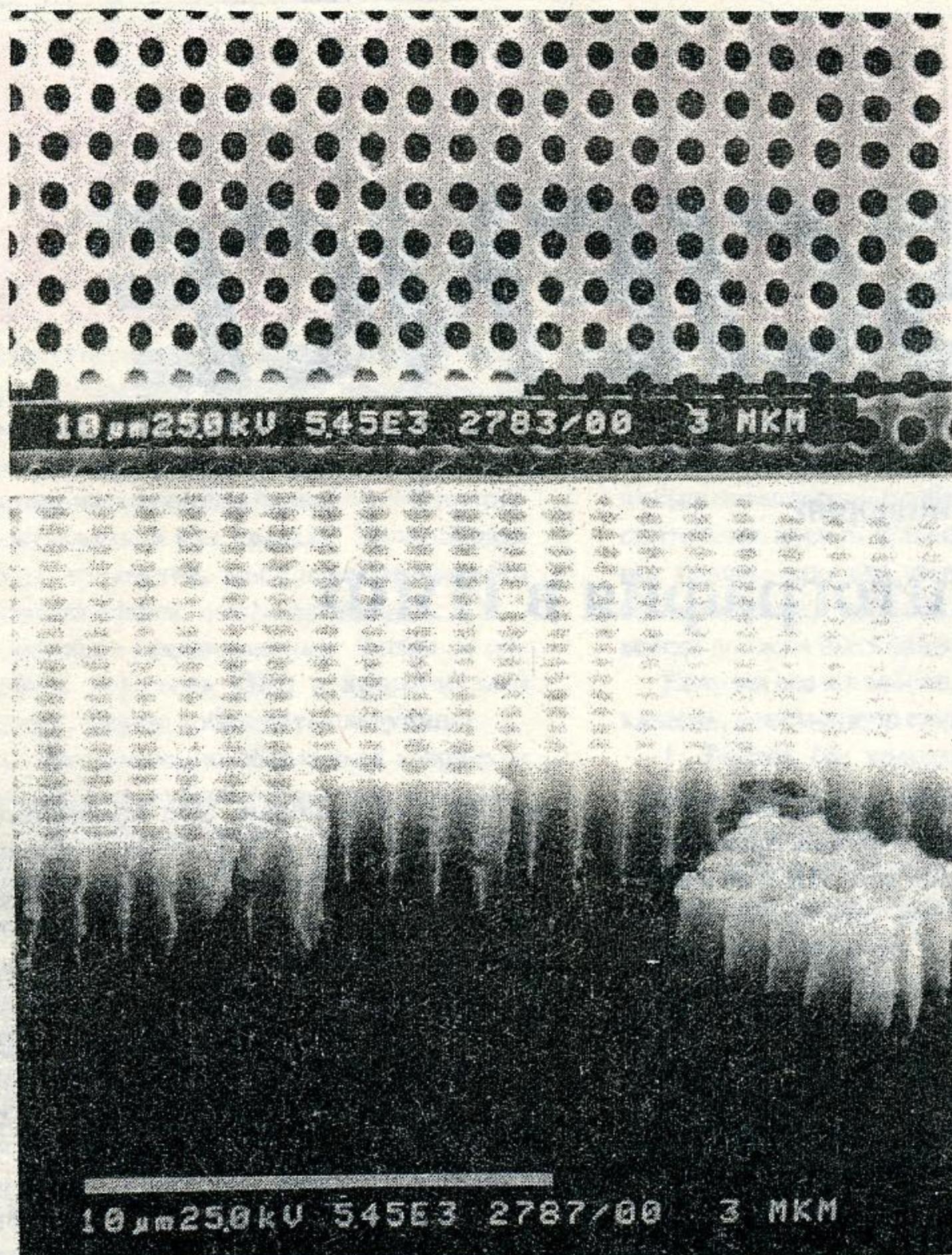


Рис. 1в

димому, "новые русские"), выискивая имеющиеся ценные разработки и утверждая, что, вот теперь, пресытившись куплей-продажей, своими инвестициями они-то и поднимут науку и передовые технологии на новый уровень. Одним из объектов их пристального внимания стали и регулярные микропористые мембранны. Более того, в нарушение их общего принципа финансирования максимум на 3-6 месяцев с последующим получением прибыли, находились и такие, кто был готов финансировать эти разработки на год, а в последующем и на два, и на три. Некоторые ведь и какой-то маркетинг проводили, и деньги по тем временам предлагались немалые, но и условия были грабительские (это-то и оказалось основным камнем преткновения). Вроде, у них было все, кроме одного - понимания, что, если, например, компьютер еще можно собрать в сарае из готовых компонент, то изготовить сами эти компоненты на современном уровне в сарае уже невозможно.

Такое внимание к, казалось бы, довольно простым на вид микроструктурам вызвало и обратный интерес, а почему, собственно, коммерсанты готовы вкладывать свои или государственные деньги в эти разработки? Нельзя сказать, что до этого не было идей по использованию таких мембран, но несомненно и то, что коммерсанты стимулировали интерес в этом направлении и заставили более серьезно отнестись к этим вопросам.

Ясно просматриваются, по крайней мере, два потенциальных преимущества ре-

гулярных микропористых мембран по сравнению с обычными, коммерчески доступными, трековыми мембранными. Это возможность иметь очень однородный размер пор (нет эффектов слияния отверстий из-за случайности их расположения) при одновременной высокой, до 50 % и более, прозрачности мембран (прозрачность обычных трековых мембран редко превышает 10 %; она, конечно, может быть сделана и больше, но при этом бессмысленно говорить

о каком-то одном размере пор). Эти преимущества делают регулярные мембранны весьма привлекательными для аттестации с их помощью различных микрочастиц и других фильтров, для холодной стерилизации различных препаратов, для определенных применений в медицине, физике, экологии и т.д..

К настоящему времени наработано более сотни образцов мембран с рабочей площадью от 0.5 до 2.8 кв.см и с прозрачностью 10-25 %. С использованием мембран выполнен ряд исследований по фильтрации аэрозолей, водных растворов, микрочастиц, бактерий и вирусов, УФ-излучения. В частности, для бактерий было показано, что, в зависимости от соотношения размеров бактерий и микропор, фильтрация происходит по принципу "все или ничего". В процессе подготовки находятся эксперименты по исследованию мембран для медицинских целей и для изготовления регулярных массивов металлических микропроволок.

Полученные результаты подтверждают начальные ожидания, и это фактически означает, что с помощью рентгеновской литографии создан совершенно новый класс микропористых фильтров. Правильнее пока говорить - микропористых мембранных, поскольку, по утверждению специалистов по фильтрам, слово "фильтр" подразумевает, что мембрана прошла метрологическую аттестацию. Для реальных применений мембран в медицине и биотехнологиях, кстати, также требуется соответствующая сертификация, что пока не сде-

лано.

Уже сейчас ясно, что дальнейшее продвижение в этих работах напрямую связано с изготовлением рентгеновских шаблонов с улучшенными параметрами. В первую очередь, это касается повышения однородности размеров пор и увеличения рабочей площади. Интересно повысить и прозрачность мембран. Полезно также иметь семейство мембран с размерами пор от 0.4 до 1.0 мкм с дискретностью по размеру 0.2 мкм, что соответствовало бы ряду средних размеров пор коммерческих трековых мембран. Ничто не ограничивает и возможность иметь другие формы пор (щелевые, крестообразные и т.д.), хотя сейчас и не ясно, даст ли это какие-то дополнительные преимущества.

И, если говорить о действительно рабочих рентгеношаблонах для регулярных мембран, то каких-либо реальных альтернатив ВОСТОКовским шаблонам не просматривается. Можно только предполагать, судя по уровню работ, что, например, фирма IBM или некоторые японские фирмы также способны создавать похожие шаблоны.

Пока все работы в этом направлении имеют исследовательский характер, но, по-видимому, рано или поздно встанет вопрос о массовом тиражировании мембран и, соответственно, об их стоимости. Весьма привлекательным кажется вариант, когда с помощью рентгенолитографии изготавливается лишь некая форма, которая в дальнейшем используется для массового тиражирования собственно мембран. То есть речь идет о выполнении полного цикла LIGA-технологии в применении к данной задаче. И здесь пока останавливается единственный момент, что никто в мире еще не научился изготавливать LIGА-структуры с субмикронными размерами. Хотя никто и не сказал, что это невозможно. Так что это открытое поле для дальнейших исследований.

Вполне рассматриваемы и другие варианты, например, использование для этой цели электронных пучков или использование специализированных источников СИ, типа зеленоградского ТНК, но это уже выходит за рамки настоящей темы. Так что ситуация с "массовостью" и стоимостью мембран не кажется безнадежной. Во всяком случае, видно несколько вполне рабочих вариантов, хотя так же понятно, что любой из этих вариантов потребует дополнительных усилий, времени и финансирования.

Другой довольно обширный класс задач связан с изготовлением изделий микрооптики. Речь идет о создании дифракционных или комбинированных рефракционно-дифракционных элементов микрооптики с глубоким профилем (глубоким по сравнению с длиной волны используемого света) и с качественно новыми свойствами. И здесь роль наших соседей, ИАиЭ СО РАН, особенно в части постановки задач и осмысливания результатов является определяющей.

Для этого класса задач четко просматривается, по крайней мере, два явных пре-

имущества использования рентгеновской литографии. Во-первых, это возможность создания требуемого микрорельефа нужной глубины и формы на оптических поверхностях с кривизной, например, на поверхности выпуклой или вогнутой рефракционной линзы. Такая комбинация рефракционных и дифракционных структур дает путь к созданию простых синглетных элементов с высокими оптическими параметрами (за счет исправления аберраций соответствующей дифракционной структурой), либо элементов с новыми свойствами, например, многофокусных линз. По такому принципу, в частности, были изготовлены прототипы двух- и трехфокусных искусственных хрусталиков глаза. При этом, в качестве основы использовалась стандартная полимерная микролинза искусственного хрусталика, а требуемый микрорельеф на поверхности линзы создавался рентгеновской литографией.

Второе преимущество рентгенолитографии заключается в возможности создания действительно глубоких, до десятков и сотен мкм, профилей микроструктур. Столь глубокие профили, да еще в сочетании с правильной формой их дна (структуры с "блеском" или киноформные), означают, что такие структуры способны с высокой эффективностью работать на высоких порядках дифракции. А это уже путь к устранению основного недостатка чисто дифракционной оптики - хроматической аберрации. Таким образом, появляется возможность создавать полностью дифракционные, например, плоские, апохроматические оптические элементы. Уже изготовлен ряд прототипов полностью дифракционных апохроматических линз и решеток с глубиной профиля до 10 мкм, и результаты их исследований близки к ожидаемым.

Нужно сказать, что область дифракционной оптики с глубоким профилем фактически развивается за пару последних лет, и развивается очень быстро. Несмотря на то, что некий прообраз таких оптических элементов на макроуровне - эшелон Майкельсона, был изобретен последним еще в 1907 году, переносу принципа его работы на микроуровень в течение многих лет препятствовало отсутствие подходящих технологий. И теперь, когда видно, что такие технологии появились, можно ожидать появления целого ряда новых оптических элементов, работающих на высоких порядках дифракции.

К разряду оптических элементов с необычными свойствами, привлекающих большое внимание в последние годы, можно отнести и, так называемые, решетки "нулевого порядка", то есть структуры, характерный размер которых меньше полдлины волны света. Похоже, что, используя технику глубокой рентгенолитографии, можно теперь подойти к разработке и этой задачи.

Уже полученные результаты весьма обнадеживают, и на первое место начинают выходить вопросы качества, например, уменьшение доли диффузно рассеянного света. Становится актуальным и вопрос

микрогальваники и микроформовки. Значит, нужно либо с кем-то кооперироваться, либо развивать эту технику у себя, либо сочетать то и другое. Просматривается и круг оптических микроизделий, которые было бы интересно разрабатывать и которые могли бы найти массовое применение.

Из других задач, находящихся в стадии разработки, можно отметить еще две. Одна из них связана с изготовлением регулярных магнитооптических сверхрешеток на кристаллических подложках. Работа ведется в сотрудничестве с ИХТТИМС СО РАН и в сотрудничестве с англичанами, которые в значительной степени и стимулируют ее. Хотя сейчас идет речь только о стадии исследований, понятна и направленность работы - разработка элементов памяти с оптической плотностью записи и возможностью перезаписи.

Вторая задача, решаемая совместно опять же с ИХТТИМС СО РАН, нацелена на повышение пространственного разрешения рентгеночувствительных материалов при одновременном сохранении высокой эффективности регистрации. Удастся ли здесь получить обнадеживающие результаты - покажет будущее.

Есть и ряд задач, решение которых практически еще и не началось. Например, ИМ СО РАН инициирует работы по изготовлению электростатических микродвигателей и микроподвижек, томичи же подвигают на создание готовых приборов на основе регулярных мембран. Есть и задачи, которые и интересны, и, по-видимому, полезны и для самого ИЯФа, и деньги за них, вроде бы, "светят", но которые заставляют сильно задуматься: "А по зубам ли? И не надорваться бы?". И вообще, стоило лишь сделать шаг в сторону от "чистой" микроэлектроники, как число задач начало разрастаться и вширь и вглубь.

Как и во всякой работе, всегда есть много рутинных работ, и как и везде, есть и масса проблем.

До настоящего времени все работы на пучках СИ по глубокой рентгенолитографии выполнялись и выполняются на накопителе ВЭПП-3, где для этих целей в основном используются две станции:

рентгеновской литографии и рентгеновской топографии. И по спектру излучения ВЭПП-3 идеально подходит для этих работ, перекрывая весь диапазон необходимых толщин экспонирования от микронов до миллиметра. Почти законченный канал рентгенолитографии (без "хвостовой" части) на ВЭПП-

2М "заморожен" в таком состоянии из-за грядущей модернизации ВЭПП-2М, при которой необходимости в змейке, вроде бы, и нет. Спектр же излучения из поворотных магнитов еще подходит для задач микроэлектроники, но уже не подходит для задач LIGA-технологии. В связи с предстоящим перебазированием СИшных работ с ВЭПП-3 на накопитель ВЭПП-4М непонятен пока вопрос о будущем месте размещения рентгенолитографических станций.

Не только в глубь, но и в ширь

Обрисованный выше круг задач и проблем, связанных с рентгенолитографией в настоящее время, достаточно широк и разнообразен. А ведь это только малая часть того, что здесь вообще может быть! И понятно, что абсолютно невозможно и полностью бессмысленно пытаться тянуть эту телегу задач и проблем без тесного сотрудничества со множеством организаций. ИЯФ на данном этапе, скорее, является неким центром, вокруг которого группируются еще не потерявшие потенции организации.

Как-то еще "дышат", хотя и на критически низком уровне, и поддерживают связи с ИЯФ предприятия бывшего МЭПа: ВОСТОК и НИИПП (Томск). Остались и поддерживаются связи с организациями, занимающимися ретушью рентгеношаблонов: ИНХ СО РАН и СГГА (бывший НИИГАиК). Появилось и много новых организаций, уже работающих по каким-то проблемам или стремящихся работать. Уже упоминались ИАиЭ СО РАН (микрооптика), ИХТТИМС СО РАН (магнитные сверхрешетки и рентгеновские детекторы), ИМ СО РАН (микродвигатели и микроподвижки). В части исследования и использования регулярных мембран сотрудничают ИХКиГ СО РАН, НИИЯФ при ТПУ (Томск), ИК РАН и ФИ РАН (Москва). Устанавливаются связи и с местными лечебными учреждениями. К сожалению, отсутствует какое-либо деловое сотрудничество с бывшим лидером рентгенолитог-

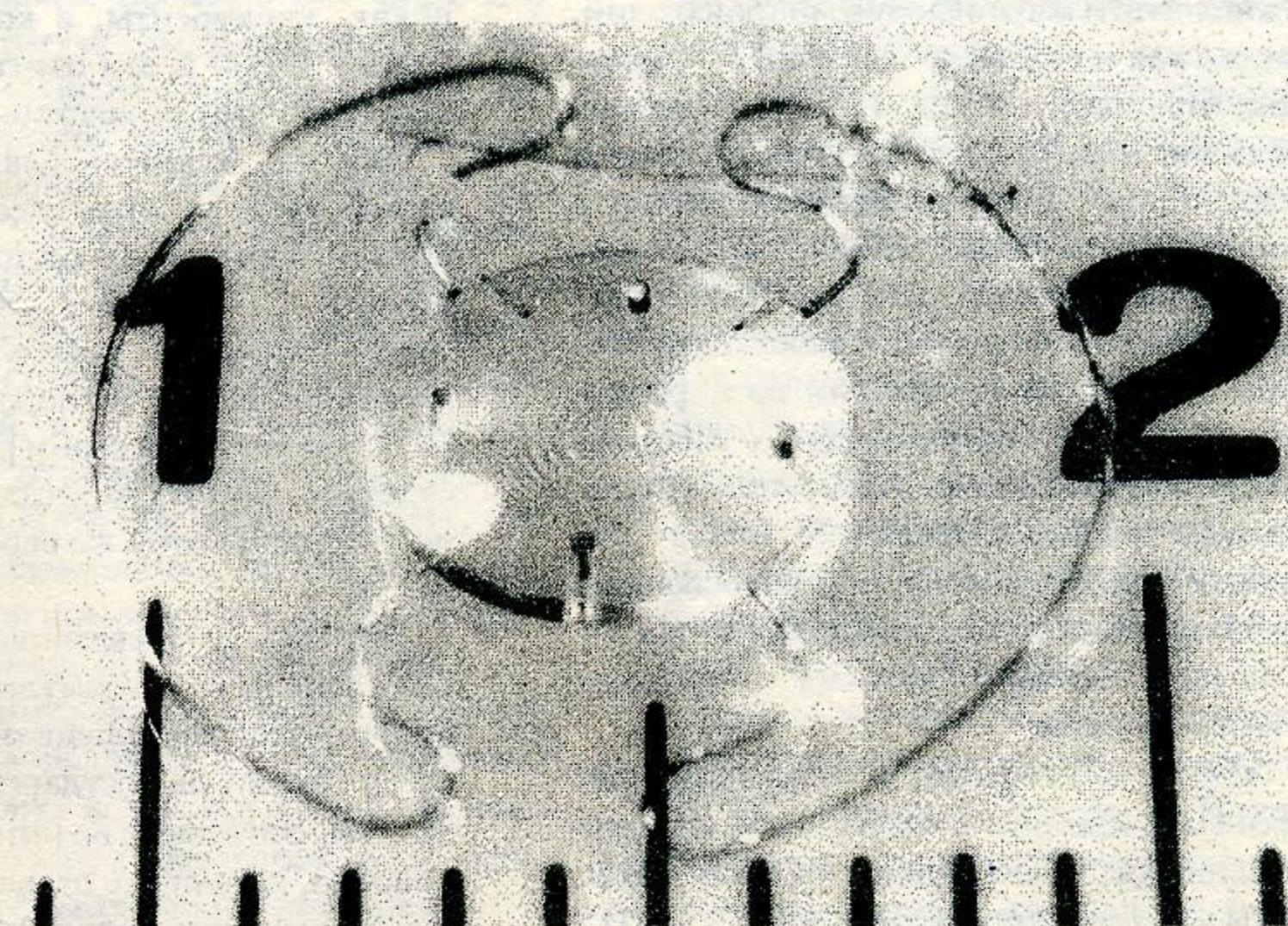


Рис. 2

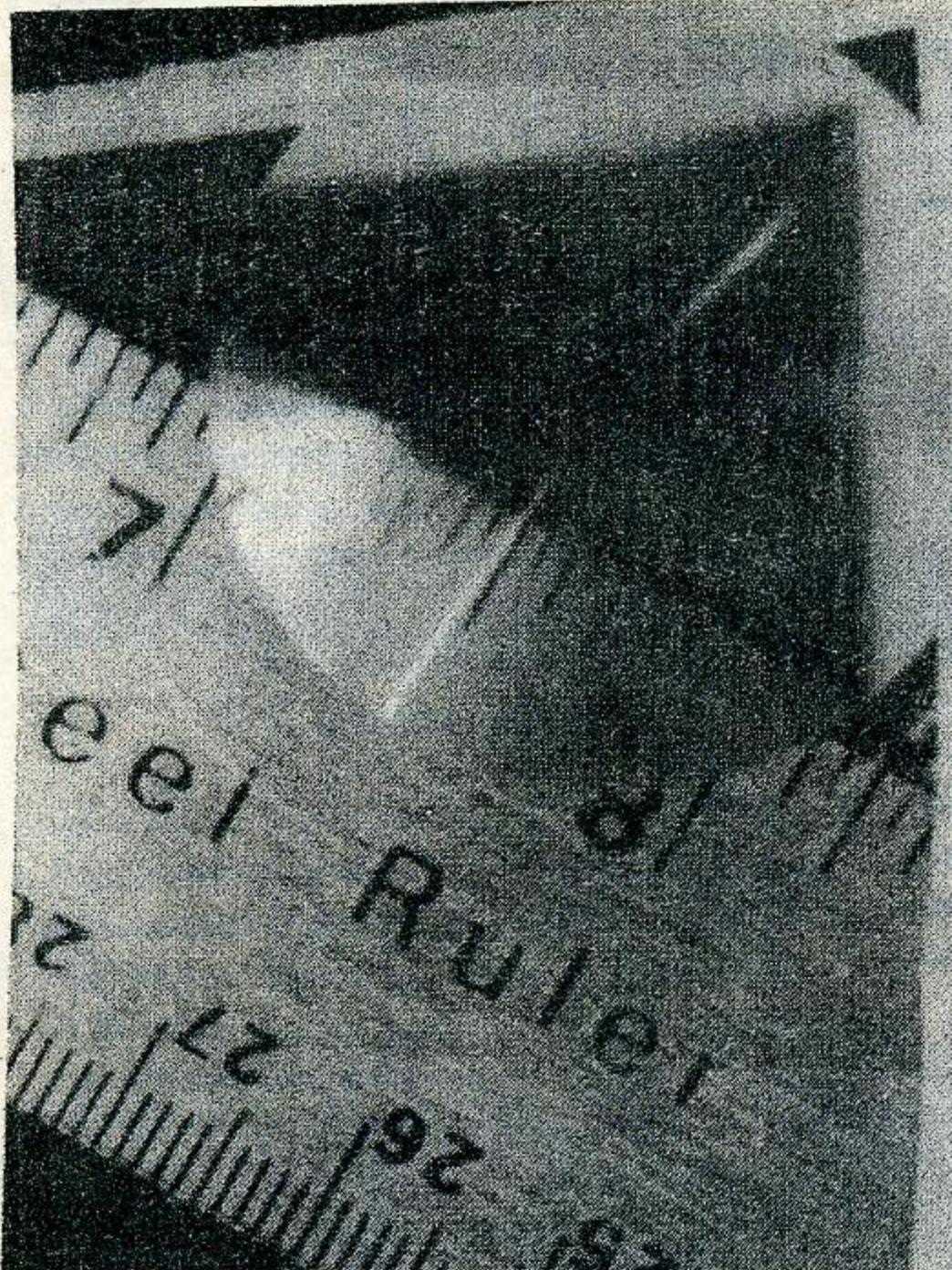


Рис. 3

рафии - зеленоградским НИИФП: на контакты особо не идут и сами ничего не предлагаю.

Существенно изменилась ситуация с зарубежными странами. Хотя до сих пор нет каких-либо официальных соглашений, тем не менее, идет работа с лабораторией L2M (Франция) по изготовлению рентгеношаблонов регулярных мембран с минимально возможным размером пор. Активно стимулируется совместная работа по магнитным сверхрешеткам Бристольским университетом (Англия). Определенный задел по сотрудничеству положен и совместной работой по микрооптике с Центром рентгеновской литографии университета Висконсина-Мэдисона (США).

С 1993 года в Европе действует сетевая программа "Изготовление микроизделий с помощью СИ", финансируемая комиссией ЕЭС и координируемая Институтом микротехники Майнца. Членами сетевой программы являлись 12 европейских центров, специализирующихся в области LIGA-технологии и изготовления микроизделий, так же как и в области работ с СИ (Германия, Франция, Англия, Италия, Швеция, Бельгия, Швейцария, Австрия, Греция и Португалия). Цели программы состоят в установлении связей между партнерами сети, в определении целей и формировании совместных программ работ, в распространении LIGA-технологии по Европе и способствовании ее становлению у партнеров, не владеющих ею. В значительной степени все это делается для того, чтобы обеспечить должную конкурентоспособность Европы в области микроизделий перед лицом нарастающего натиска со стороны США и Японии.

С апреля 1995 года в число партнеров сети было принято 4 новых члена из стран бывшей восточной Европы и СССР: ИЯФ, РНЦ "Курчатовский институт", ХГПУ (лаборатория рентгеновской оптики, Харьков, Украина) и Институт микротех-

нологии (Бухарест, Румыния).

Используя новые сетевые возможности, удалось поучаствовать в регулярных сетевых совещаниях и как-то познакомиться с членами этого клуба и с их работами, почувствовать их возможности. С удивлением, но не без приятности, было узнать, что люди, казалось бы, совсем из другой области, знают про ИЯФ и имеют о нем весьма высокое мнение по другим работам, в частности, по изготовленным ИЯФом магнитам для BESSY-II. И это, конечно, создает благоприятный фон для внедрения в европейское сообщество и в области рентгенолитографии. Да и за наши работы в области рентгенолитографии чувства стыда как-то не возникает (возможно, это объясняется толстокожестью автора), но нельзя нас сравнивать и с лидерами, с Карлсруэ и с Майнцем - это просто другой масштаб и другой уровень. Да и сравнивать трудно - полностью аналогичных работ в Европе не видно.

В июле командой удалось участвовать в очень интересной конференции по микроструктурам с высоким аспектным отношением HARMST'95, которую организовал Институт микроструктурной техники Карлсруэ. Это была первая такая конференция. Неожиданно мощное представительство со всего мира и масса интересных докладов обеспечили ей, к удивлению организаторов, действительный успех, так что решено было проводить такие конференции и в дальнейшем.

Используя сетевые возможности, удалось также осуществить и более долговременный визит наших коллег из ИАиЭ в Институт Пауля Шерера (Швейцария) для выполнения совместных работ по микрооптике с глубоким профилем, для более близкого знакомства друг с другом (как никак, конкуренты, а конкурентов надо знать в лицо!) и для поиска путей к дальнейшему сотрудничеству.

Все это, конечно, благоприятствует и способствует работам здесь, дает свежайшую информацию о состоянии дел в этой области в Европе и в мире, и позволяет трезво оценивать уровень и состояние наших работ. Но все это хорошо как дополнение. Дополнение к своим работам здесь. Не будет интересных работ здесь, и мы станем не интересны тому же европейскому сообществу.

И в связи с этим возникает ряд вопросов. Если Европа явно стимулирует и втягивает в орбиту этой деятельности, то так же явно, что в России на государственном уровне, похоже, это никого не интересует. Можно, конечно, выполнять отдельные и интересные работы, используя возможности грантов и существующую материальную базу. Но так же ясно, что для дальнейшего дви-

жения вперед и соответствующего развития этой базы никаких грантов не хватит. И уж тем более нельзя ожидать, что кто-нибудь из-за рубежа начнет вкладывать миллионы долларов в развитие нашей базы (разве они похожи на сумасшедших? - ведь это не завод по сырьевым ресурсам, а передний край новейших технологий). Спасение утопающих, как известно, дело рук только самих утопающих. А что может дать правильная государственная поддержка - ясно показывает пример Германии.

Так это конец или начало?

Это не научная статья и не обзор по рентгенолитографии, скорее, это размышления (где-то наивные и глупые, а где-то, может быть, и не очень) о нашем месте в этой области в слегка изменившихся внешних условиях. И вряд ли здесь можно найти ответы на все возникающие вопросы. Более того, основные вопросы продолжают "глодать" и автора.

Так все-таки, что же сейчас происходит с рентгенолитографией в ИЯФ? Это ее конец, естественное продолжение или начало какого-то нового этапа? И к чему мы в конечном итоге стремимся в этой области? И кому же, все-таки, кроме ИЯФа, нужны в России рентгеновские шаблоны?

Автор не хочет делать каких-либо обобщающих заключений или выводов по данным вопросам. Читатели, которым хватило терпения дойти до этих строчек, смогут сделать выводы сами, и, наверное, они будут разными у разных читателей. Ну, а выводы пусть делают те, кому их положено делать. Мысли же вслух ... что ж, сейчас демократия.

Рис. 1а. Коммерческая трековая мембрана: толщина - 8.5 мкм; средний размер пор - 0.4 мкм.

Рис. 1б. Регулярная микропористая мембрана: толщина - 3 мкм; диаметр пор - 0.5 мкм; расстояние между порами - 1 мкм. (Коллaborация: ИЯФ, ВОСТОК, ИНХ НИИГАИК)

Рис. 2. Двухфокусный искусственный хрусталик глаза: диаметр - 5 мм. (Коллaborация: ИАиЭ, ИЯФ, ИФП) / Фото: Ю.Бирюков, В.Крюков /

Рис. 3. Плоская апохроматическая дифракционная линза: F = - 200 мм; диаметр - 30 мм; глубина профиля с "блеском" - 10 мкм. (Коллaborация: ИАиЭ, ИЯФ, ЦРЛ, Унив. Висконсин-Мэдисон, США).