

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ВЕСТНИК
АКАДЕМИИ НАУК
СССР

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТВЕС)

11

МОСКВА · 1983



8



О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТИТУТА СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ СО АН СССР

На заседании Президиума Академии наук СССР рассматривалась деятельность Института сильноточной электроники (ИСЭ) СО АН СССР. Образованный в 1977 г. институт имеет уже крупные научные достижения. Здесь построены уникальные комплексы, позволившие развернуть работы по использованию интенсивных релятивистских электронных пучков в различных областях фундаментальных и прикладных исследований. В институте проводится большая работа по созданию новой техники для нужд современной технологии и ее внедрению в народное хозяйство.

На заседании с докладом о деятельности института выступил его директор член-корреспондент АН СССР Г. А. МЕСЯЦ.

Институт сильноточной электроники СО АН СССР, сказал докладчик, был сформирован из коллектива, который начал создаваться в Томском политехническом институте еще в 1958 г. В организацию института внесли крупный вклад президент Академии наук СССР академик А. П. Александров, который приезжал в Томск и горячо поддержал идею создания нового научного учреждения, академик Е. П. Велихов, возглавлявший комиссию по организации института, председатели СО АН СССР академики М. А. Лаврентьев и Г. И. Марчук, академики А. М. Прохоров, Н. Д. Деятков. Сейчас институт состоит из семи отделов, объединяющих 11 лабораторий, групп автоматизации научных исследований и криогенной техники, конструкторского отдела, учебной студенческой лаборатории, мастерской и т. д. Здесь работают также три отраслевые лаборатории, существуют аспирантура и совет по защите диссертаций. Одна из кафедр университета готовит для нас молодых специалистов. Институт регулярно организует всесоюзные конференции по сильноточной электронике и накаливаемым катодам; здесь проходила Международная конференция по электрической изоляции и разрядам в вакууме.

В ИСЭ около 100 научных сотрудников, среди них один член-корреспондент АН СССР, семь докторов и 35 кандидатов наук. Среди его сотрудников лауреаты Ленинской премии и Государственной премии СССР, а также премии Ленинского комсомола.

В институте ведутся разработки по следующим научным направлениям: эмиссия и формирование интенсивных потоков заряженных частиц,

формирование сильноточных высоковольтных импульсов, генерирование мощного электромагнитного излучения, исследование плазмы электрических разрядов, воздействие мощных импульсных потоков энергии на конденсированные среды, технологические применения сильноточной электроники.

Остановимся кратко на результатах развития каждого из этих направлений.

Эмиссия и формирование интенсивных потоков заряженных частиц

Одно из важных достижений в этом направлении — открытие явления взрывной электронной эмиссии. Это наиболее эффективный из известных в природе типов электронной эмиссии, позволяющий получать ток электронов вплоть до миллиона ампер¹. Эмиссия такого рода осуществляется при взрывном фазовом переходе металла в плазму вследствие большой концентрации энергии (выше энергии сублимации) в микрообъеме катода.

Ранее нами был установлен механизм нагрева и взрыва микроучастков катода, сказал Г. А. Месяц, исследованы свойства катодной плазмы, закономерности эрозии катода и испускания электронного тока и т. д. Все это позволило составить довольно четкое представление о явлении взрывной эмиссии электронов. Недавно был доказан циклический характер процессов в эмиссионном центре. Это означает, что эмиссия возникает, существует несколько наносекунд, затем исчезает и возникает вновь. Эффект нашел объяснение в построенной нами теоретической модели, в соответствии с которой нагрев эмиссионного центра происходит за счет джоулева тепла, а охлаждение — за счет теплопроводности, испарения, электронного охлаждения и снижения плотности тока из-за расширения зоны эмиссии.

Результаты исследования взрывной эмиссии электронов позволили разработать научные основы процессов, протекающих в диодах импульсных сильноточных ускорителей электронов. Первый в СССР сильноточный ускоритель, сообщил докладчик, был разработан нашей группой еще в 1966 г., а через год мы опубликовали наши результаты. В это же время появились первые публикации о создании подобных ускорителей в США. Сейчас импульсная мощность таких ускорителей в нашей стране и за рубежом достигает 10^{13} Вт.

В исследования по формированию мощных импульсных электронных пучков большой вклад внесли также работы Института атомной энергии

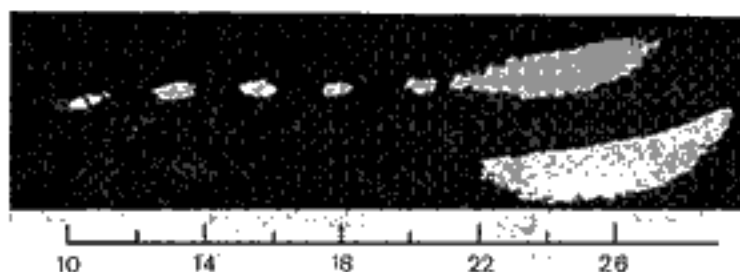


Рис. 1. Хронограмма развития процессов на катоде (вверху) и аноде (внизу) при взрывной эмиссии. Прерывистое свечение на катоде свидетельствует о циклическом характере процесса. Время указано в наносекундах

¹ См.: Месяц Г. А. Взрывная эмиссия электронов и сильноточная электроника. — Вестник АН СССР, 1975, № 6, с. 43—47.

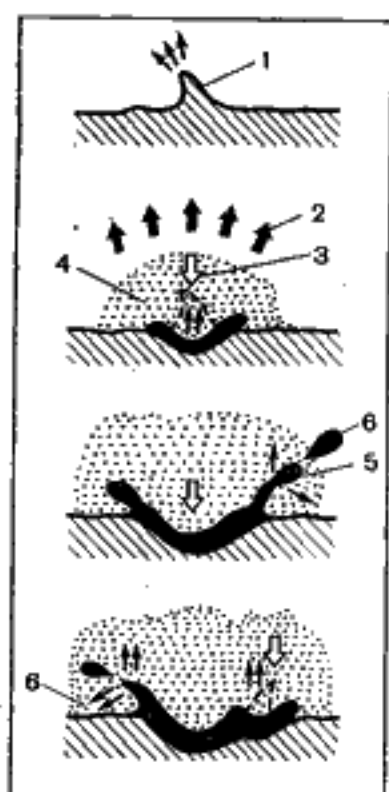


Рис. 2. Схема развития процесса в эмиссионном центре на плоском катоде за один цикл варывной эмиссии

1 — микровыступ на катоде с током автоэлектронной эмиссии, 2 — ток варывной эмиссии, 3 — давление плазмы на катод, 4 — плазма, 5 — выплеск жидкого металла, 6 — образование микрошпильки и нового микровыступа

им. И. В. Курчатова, ФИАН, Института ядерной физики СО АН СССР, НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова и др. В таких ускорителях пучки электронов бывают сфокусированными, трубчатыми и плоскими. В ИСЭ благодаря использованию взрывной эмиссии впервые были получены пучки с большой площадью поперечного сечения (до 10^4 см^2) и показана возможность увеличить их длительность до 10^{-6} — 10^{-3} с, что значительно превышает длительность полученных ранее наносекундных пучков; в институте также впервые были получены сверхкороткие — субнаносекундные — килоамперные пучки электронов (длительностью до 10^{-10} с).

Значительные результаты были достигнуты сотрудниками ИСЭ при решении проблемы формирования трубчатых пучков электронов в диодах с магнитной изоляцией. Разработан подход, позволяющий исследовать параметры электронного пучка в коаксиальном бесфольговом диоде в присутствии сильного ведущего магнитного поля. Получено точное решение задачи формирования тонкого трубчатого пучка и показано, что энергия электронов в нем может намного превышать значение, соответствующее предельному току транспортировки. Определена структура пучков в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией, в которых реализуются максимально допустимые значения тока и мощности пучка. В настоящее время в институте существует комплекс ускорителей с трубчатыми пучками, с энергией электронов 0,4–2,5 МэВ при длительности импульса 5 нс — 1 мкс и токе 10^2 — 10^5 А.

В цикле работ по формированию электронных пучков с большой площадью поперечного сечения использовались металлические, графитовые и металлодиэлектрические катоды. При соответствующем расположении эмиссионных центров на катоде можно получить широкий электронный пучок с однородной структурой. Найдено оптимальное расположение этих центров, определено их взаимное влияние друг на друга, изучено влияние свойств катодной и анодной плазмы на такие пучки и т. д.

При использовании в качестве анода тонкой металлической фольги такие пучки выводятся в атмосферу. В институте создан комплекс ускорителей с энергией электронов 200—500 кэВ, током 0,1—20 кА, длительностью импульсов от 20 нс до 100 мкс, частотой следования импульсов от одиночных до 200 Гц и площадью 10^{-2} — 1 м², которые применяются в технологии, в физических экспериментах и для накачки лазеров.

Работы, выполненные в ИСЭ, открыли новое направление в физической электронике — сильноточную эмиссионную электронику.

Формирование сильноточных высоковольтных импульсов

Коллектив ИСЭ разработал технику генерирования мощных наносекундных импульсов. Интерес к ним сильно возрос в связи с созданием импульсных лазеров, разработкой систем управления частицами в ускорителях, появлением скоростной фотографии, новых методов регистрации заряженных частиц (искровые и стримерные камеры) и т. д. Работы по генерированию мощных наносекундных импульсов способствовали развитию перечисленных направлений науки и техники².

Основные причины, обусловившие большой интерес к технике генерирования мощных наносекундных импульсов и ее быстрый прогресс³, — это, во-первых, развитие исследований быстропротекающих процессов под действием сильных электрических и магнитных полей малой длительности; во-вторых, возможность передавать энергию мощных наносекундных импульсов электронными и ионными пучками. Результатом последних исследований в этой области было создание мощных мегавольтных коммутаторов с током до миллионов ампер, напряжением более 3 МВ.

В институте предложена новая концепция построения высоковольтных генераторов Аркадьева—Маркса с энергозапасом вплоть до мегаджоульного, которая основана на принципе сборки таких генераторов из отдельных быстродействующих секций. Разработаны секции с напряжением до 3,5 МВ, энергией до 50 кДж, имеющие уникально низкие разбросы времени срабатывания — до нескольких наносекунд. Это позволило (благодаря параллельному соединению секций) создать очень мощные генераторы, по удельным характеристикам превосходящие лучшие зарубежные образцы. Один из них имеет энергозапас более 1 МДж при напряжении 3 МВ и удельном энергозапасе 10 кДж/м².

Кроме того, предложены и разработаны наносекундные импульсно-периодические генераторы с зарядкой масляной коаксиальной линии от трансформатора. Созданы генераторы со средней мощностью 20 кВт и импульсной — 10^{10} Вт.

Одна из основных проблем современной техники мощных импульсов — создание генераторов с высоким удельным энергозапасом, наподобие генераторов с индуктивным накоплением энергии. В разработку этого направления большой вклад внесли коллективы, возглавляемые академиком Е. П. Велиховым в ИАЭ им. И. В. Курчатова и членом-корреспондентом АН СССР В. А. Глухих в НИИ электрофизической аппаратуры. Одна из основных проблем в этой области — создание прерывателей тока с нужными характеристиками. В институте разработан взрывной размыкатель,

² См.: Воробьев Г. А., Месяц Г. А. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. М.: Атомиздат, 1963.

³ См.: Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974; *Он же*. Получение и применение мощных наносекундных импульсов. — Вестник АН СССР, 1979, № 2, с. 37—46.

у которого для обрыва тока используются кумулятивные струи диэлектрика. При токе 250 кА и напряжении 300 кВ время коммутации составляет 10 мкс, электрическая прочность после коммутации не ниже 40 кВ/см, что значительно превосходит параметры отечественных и зарубежных аналогичных известных приборов. Кроме того, в ИСЭ предложены и созданы быстродействующие прерыватели тока с использованием микропроводников, которые позволяют за десятки наносекунд обрывать микросекундные импульсы тока в сотни килоампер. Разработка этих прерывателей создает надежную основу для развития индуктивной энергетики.

Исследование плазмы электрических разрядов

В институте исследуются разряды в вакууме и газе, а также электрический взрыв проводников. При изучении вакуумного разряда была доказана фундаментальная роль автоэмиссионных и взрывоэмиссионных процессов на катоде⁴. Показано, что катодное пятно возникает до появления дуги и что в основе его действия лежит взрывная эмиссия электронов. Эти работы послужили основой для создания модели взрывного механизма вакуумного разряда.

При исследовании импульсного газового разряда в сильных электрических полях, когда критический размер электронных лавин много меньше длины промежутка между электродами, доказано существование нового механизма разряда в газе, отличного от таунсендовского и стримерного. Разряд носит объемный характер при значениях тока вплоть до сотен килоампер. Такие разряды названы наносекундными из-за очень малого времени их развития⁵. Существует целый класс газовых разрядов, где вторичными процессами на катоде являются автоэлектронная и взрывная эмиссии⁶.

Важным результатом работы коллектива стала реализация идеи газовых разрядов высокого давления с инжекцией в газ пучка электронов (1969 г.). Такой разряд носит объемный характер при давлениях до десятков атмосфер и может занимать пространство до кубометров; параметры плазмы в таких разрядах (электронная температура, температура газа, концентрация плазмы и т. д.) можно регулировать независимо друг от друга; в таких разрядах возможно полное управление током за счет включения и выключения пучка электронов. Разряд в газе с инжекцией электронов нашел широкое применение в мощных газовых лазерах, в плазмохимии, при коммутации токов и т. д. Нами, отметил докладчик, была выдвинута идея инжекционного тиратрона — мощного понного прибора с полным управлением тока. Эти работы положили начало новому направлению в электронике — инжекционной газовой электронике.

Исследование электрического взрыва проводников было начато в институте более 10 лет назад в связи с проблемой быстрого прерывания больших токов. На этой основе были созданы прерыватели в наносекундных генераторах с индуктивными накопителями энергии. Сейчас эти работы ведутся в связи с программой СНОП (сильноточное наносекундное обжатие

⁴ См.: Литвинов Е. А., Мезяц Г. А., Проскуровский Д. И. — Успехи физ. наук, 1983, т. 139, № 2.

⁵ См.: Мезяц Г. А., Бычков Ю. И., Кремнев В. В. — Успехи физ. наук, 1972, т. 107, № 2.

⁶ См.: Королев Ю. Д., Мезяц Г. А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982.

проводников), которая направлена на получение плотной высокотемпературной плазмы методом быстрого электромагнитного обжатия тонких электрических взрывающихся лайнеров и является частью программы «Ангара». Последние результаты были получены на установке «Сноп-2» при токе до 1 МА, времени нарастания импульсов 60 нс, напряжении до 1 МВ. При суммарной массе 23 Мкг/см взорвавшаяся система проволочек сжималась радиально оси со скоростью более 10^7 см/с. При схлопывании на оси возникал мощный импульс рентгеновского излучения длительностью 20–30 нс с полной энергией более 1 кДж.

Воздействие мощных импульсных потоков на конденсированные среды

Создание ускорителей для получения мощных электронных пучков позволило достичь новых фундаментальных результатов по радиационной физике твердого тела. Если до появления сильноточных ускорителей мощность дозы радиационного воздействия не превосходила 10^7 Вт/кг, то теперь стало возможным изучать поведение материалов при мощностях дозы до 10^{24} Вт/кг. Первые работы в этом направлении начались в институте в 1970 г. в связи с потребностью моделировать в макрообъемах процессы, происходящие в треках протонов и α -частиц в твердом теле. Обычно в сердцевине трека диаметром 30–40 Å плотность энергии возбуждения составляла 10–100 Дж/г, что легко достигается при помощи сильноточных электронных пучков. Проведенные исследования позволили обнаружить внутритрещинную плазменную люминесценцию, высокоэнергетическую проводимость, холодный хрупкий раскол твердых материалов⁷. Появилось новое направление в радиационной физике твердого тела — высокоэнергетическая электроника твердого тела⁸.

Технологические применения сильноточной электроники

В институте широко ведутся работы по созданию новых технологий. При этом используются различные эффекты (тепловые, химические, электромагнитные, радиационные и т. д.), вызываемые электронными пучками, электрическими разрядами или импульсами тока.

Предложен новый метод отверждения лаковых покрытий на твердых подложках с помощью импульсных пучков электронов. Импульсное облучение в отличие от непрерывного позволяет отверждать покрытия в атмосфере воздуха. Проведен большой цикл исследовательских работ по электронно-лучевой сварке, пайке, термообработке металлов в устройствах с плазменными катодами. Ведутся исследования по отжигу полупроводниковых структур низкоэнергетичными пучками электронов и пучками УФ-лазеров. Созданы стенды для сварки, пайки и термообработки металлов, получения мягкого рентгеновского излучения для рентгенолитографии, электронного отжига полупроводников и т. д.

⁷ См.: Вайсбург Д. И., Месля Г. А. Сильноточные импульсные электронные ускорители. Физика мощных радиационных воздействий.— Вестник АН СССР, 1983, № 1, с. 62–70.

⁸ См.: Вайсбург Д. И., Семин Б. И. и др. Высокоэнергетическая электроника твердого тела. М.: Наука, 1982.

Внедрение разработок в производство

Наиболее распространенная форма внедрения в народное хозяйство результатов научных исследований института — выполнение работ по заказам различных министерств и ведомств на основе хозяйственных договоров. В результате в ИСЭ построены установки, широко используемые в промышленности. Создан новый класс технологических электронных пушек с плазменными катодами, получивших применение в технологии сварки и пайки. Эти установки по сравнению с другими в СССР и за рубежом имеют на порядок больший срок службы, вдвое большую производительность и более низкую себестоимость. Одна из модификаций пушек сейчас выпускается серийно.

В институте был создан новый класс рентгеновских дефектоскопических приборов. Среди них аппараты «Рита-150» и «Радан-220», предназначенные для панорамной рентгенодефектоскопии сварных швов трубопроводов диаметром от 100 мм и более. НПО «Буревестник», с которым уже длительное время сотрудничает институт, разрабатывает систему контроля сварных швов трубопроводов, где будут использоваться эти приборы.

Для радиационной сушки лаковых покрытий построен импульсный ускоритель электронов «Синус-6». В настоящее время он подготовлен к серийному выпуску. Некоторые из разработанных в институте образцов азотных и CO_2 -лазеров, а также импульсных генераторов выпускаются или подготавливаются к выпуску различными предприятиями.

Важной формой сотрудничества института с предприятиями является организация отраслевых лабораторий, работающих в стенах института и под его научным руководством; сейчас действуют три такие технологические лаборатории.

Силами мастерских института создаются образцы научных приборов. Среди них наносекундные импульсные генераторы и ускорители, импульсные газовые лазеры. Более 50 различных типов наносекундных ускорителей электронов передано институтам АН СССР и различных ведомств. На этих ускорителях ведутся исследования по радиационной физике и химии, спектроскопии, оптике, физике плазмы, СВЧ-электронике и т. д. Институт изготовил и передал промышленности также более 30 различных газовых лазеров. В целом за период 1977—1982 гг. предприятиям страны переданы 93 разработки института, общий объем его хозяйственных работ составил более 12 млн. рублей.

Работы Института сильноточной электроники хорошо известны в СССР и за рубежом. Дважды совместные работы ИСЭ и других институтов удостоивались Государственной премии СССР и премии Ленинского комсомола. Созданные в институте приборы многократно демонстрировались на международных и отечественных выставках и отмечались дипломами и медалями.

По итогам юбилейного 1982 г. институт награжден переходящим Красным знаменем Президиума АН СССР и Президиума ЦК профсоюза работников просвещения, высшей школы и научных учреждений. Я приношу сердечную признательность Президиуму АН СССР за высокую оценку работы нашего коллектива, сказал в заключение Г. А. Месяц. Хотелось бы поблагодарить Президиум СО АН СССР за исключительно большое внимание, оказываемое институту. Большую помощь оказывает нам Бюро Отделения общей физики и астрономии и Секция физико-технических и математических наук АН СССР. Следует также подчеркнуть, что институт раз-

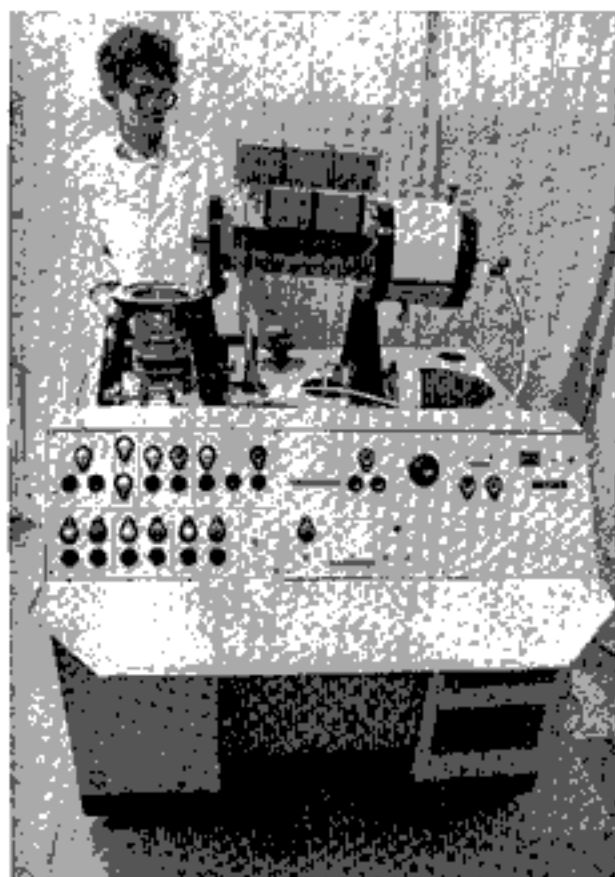


Рис. 3. Источник низкоэнергетических наносекундных электронных лучков для отжига полупроводниковых структур

вивается при исключительном внимании и поддержке со стороны Томского обкома КПСС.

Комиссию, знакомящуюся с работой института, возглавлял академик А. В. ГАПОНОВ-ГРЕХОВ. Он отметил большую научно-организационную работу, позволившую создать в системе Академии наук это новое учреждение, перспективное как по тематике и основным направлениям научных исследований, так и по стилю работы и потенциальным возможностям коллектива, который в нем сложился. В настоящее время институт стал ведущим в стране в области сильноточной электроники.

Комиссия высоко оценила научный уровень и значимость выполненных здесь исследований. Была одобрена некоторая коррекция и уточнение основных научных направлений, развиваемых в институте ранее. Создав сильноточный источник электронов — взрывной эмиттер и достигнув больших успехов в формировании мощных наносекундных импульсов, институт стал одним из основоположников сильноточной высоковольтной электроники, которая представляется новым и весьма перспективным направлением в электронике больших мощностей.

В настоящее время в этой области стоит, по существу, новая задача — научиться полностью управлять параметрами релятивистских электронных пучков. Причем речь идет не только о внешних параметрах пучков, таких как поперечное сечение, форма импульса, энергия, плотность тока и т. д., но и о внутренних функциях распределения частиц по скоростям, энергиям, поперечному сечению тока и т. д., то есть о таких параметрах, которые определяют возможности применения этих пучков для более тонких экспериментов. Институт уже достиг успехов в этом направлении, и следует ожидать, что в ближайшее время оно будет интенсивно развиваться.

Наряду с формированием релятивистских электронных пучков все большее значение приобретает их использование в решении ряда проблем электроники. Речь идет о системах накачки, в частности об их применении в релятивистских высокочастотных электронных приборах. В институте возникла идея использовать очень короткие высоковольтные импульсы в малогабаритных приборах. Благодаря малой (наносекундной) длительности импульса в таких приборах даже при напряжениях в сотни киловольт не происходит пробоя. Это открывает возможность использовать в конструкциях малогабаритных электронных приборов принципы, которые могут быть реализованы только при больших напряжениях. Это очень интересное предложение уже реализовано в рентгеновской аппаратуре. Настало время распространить его и на высокочастотную электронику. Вообще в области релятивистской СВЧ-электроники существует много возможностей для использования идей и методов, развитых в Институте сильноточной электроники.

Важная особенность коллектива института — интерес к инженерным проблемам. Из доклада Г. А. Месяца ясно, что этот интерес ярко проявляется в конкретных инженерных разработках, и Академии наук следует всемерно поддерживать это направление деятельности института.

Председатель СО АН СССР, вице-президент АН СССР академик В. А. Коптюг сообщил, что Президиум СО АН СССР высоко оценивает деятельность директора Института сильноточной электроники члена-корреспондента Г. А. Месяца по организации работы института. За пять лет там сложился хороший научный коллектив с достаточным числом докторов и кандидатов наук. С нашей точки зрения, сказал В. А. Коптюг, институт выбрал правильную стратегию развития работ: ведутся серьезные фундаментальные исследования, а затем активный поиск возможностей реализации полученных результатов в различных областях практики. Это хорошо видно на примере изучения взрывной эмиссии электронов и создания различных устройств и машин для народного хозяйства.

У института есть серьезные трудности роста. Его коллектив еще мал, если учесть объем выполняемых здесь исследовательских и прикладных (в том числе хозяйственных) работ. Президиум СО АН СССР постарается помочь в развитии опытно-конструкторской базы и ускорении внедрения разработок института в народное хозяйство.

Крупные успехи, достигнутые молодым коллективом Института сильноточной электроники за столь короткий срок и в научных исследованиях и в инженерных разработках, отметил академик-секретарь Отделения общей физики и астрономии академик А. М. Прохоров. Создаваемые здесь ускорители не требуют существенной промышленной доработки. Эти сильноточные ускорители сыграли большую роль в проведении важных фундаментальных исследований. А. М. Прохоров заверил, что отделение будет и впредь поддерживать развитие этого института.

Подчеркнув большое значение организации в Академии наук Института сильноточной электроники, имеющего хорошую инженерную базу и ведущего фундаментальные исследования на высоком научном уровне, вице-президент Академии наук СССР академик Е. П. Велихов рассказал об участии института в таких крупных программах, как программа «Ангара», связанная с задачей осуществления управляемой термоядерной реакции.

Основные направления работ института, сказал Е. П. Велихов, сейчас достаточно хорошо определены. Однако необходимо, чтобы здесь уделялось большое внимание решению проблем импульсной электроники большой мощности в стране. В целом в институте за пять лет достигнут значительный научный прогресс, он занял свое место в Академии наук, и необходимо всячески поддерживать его деятельность.

Высоко оценив доклад Г. А. Месяца, академик В. И. Попков выразил мнение о необходимости усилить работу института по исследованию элементарных процессов, происходящих в электрических разрядах.

Подводя итоги обсуждения, вице-президент Академии наук СССР академик В. А. Котельников отметил успешную работу Института сильноточной электроники Сибирского отделения АН СССР и пожелал его коллективу дальнейших успехов как в прикладных, так и в фундаментальных исследованиях.

В принятом постановлении Президиум Академии наук одобрил научную, научно-организационную и финансово-хозяйственную деятельность Института сильноточной электроники СО АН СССР и утвердил основные направления проводимых в нем научных исследований.

УДК 648

М