

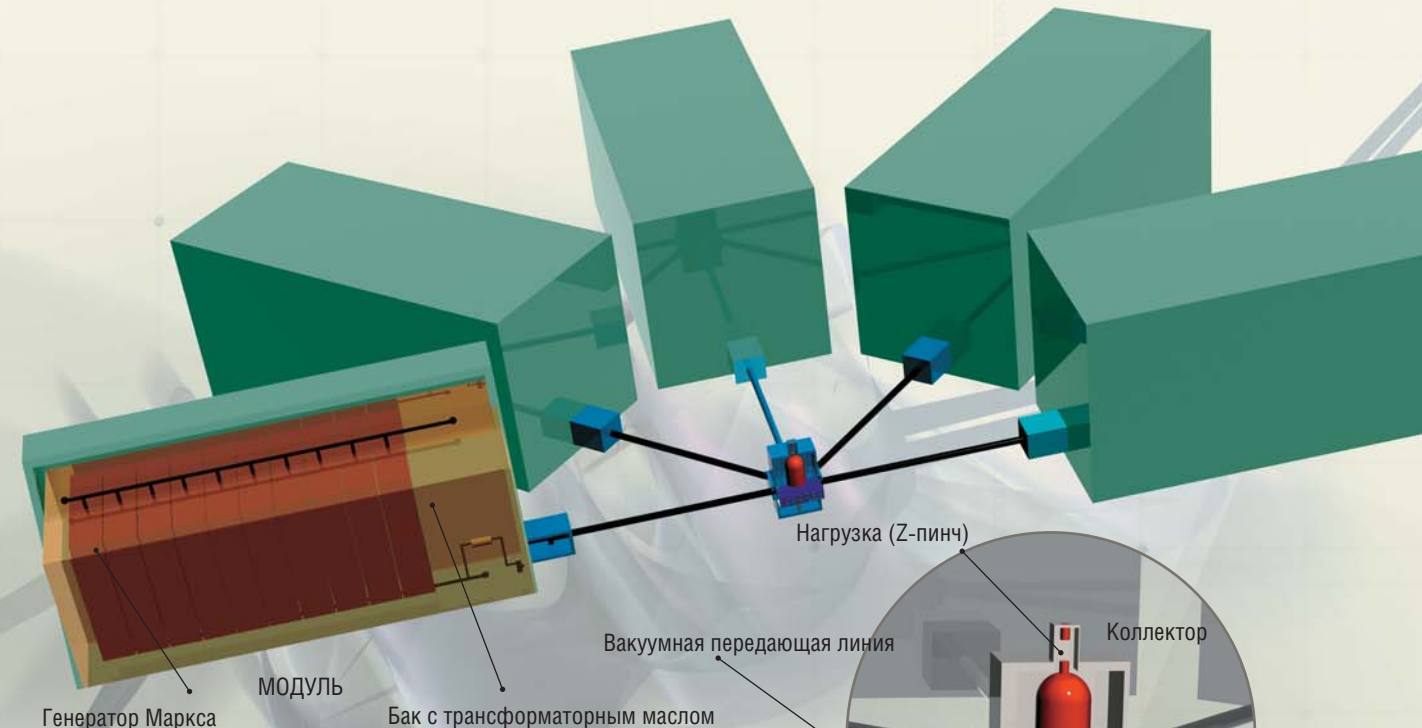
# «ЕСТЬ ТОЛЬКО МИГ...»

А.В. КОЗЫРЕВ, И.В. ПЕГЕЛЬ

Существует отрасль науки и техники, которая занимается всем, что связано с мощными электрическими импульсами. Ученые детально исследовали широкий спектр таких электрофизических процессов, научились их предсказывать и контролировать. И – получать электрические импульсы поистине колоссальной мощности. Термин «сильноточная электроника»,

Импульсная энергетика и сильноточная электроника

введенный академиком Г.А. Месяцем, вобрал в себя обширную тематику научных исследований и технических разработок в области импульсной энергетике и электроники, электрофизики и физики плазмы. Это как раз то, чем и занимаются томские ученые из организованного Г.А. Месяцем Института сильноточной электроники СО РАН (Томск)



Импульсные генераторы способны генерировать короткие энергетические импульсы сверхвысокой мощности. Сегодня они используются для фундаментальных исследований и решения прикладных задач. На фото слева – тераваттный импульсный генератор ГИТ-12, одна из крупнейших исследовательских установок такого рода в России; вверху – схема его принципиального устройства. Подробнее на с. 46

К присутствию электричества в нашей жизни мы привыкаем с детства и пользуемся им машинально. Электрическая энергия незаметно протекает по проводам, приводя в движение электродвигатели, оживляя электрические схемы, выделяется в виде тепла в электроплитах и чайниках, создает уют, вселяет в нас ощущение уверенности и стабильности.

Щелкая выключателем, мы не задумываемся, о том, что происходит в нем в этот момент, но недовольны, если выключатель искрит, а лампочка перегорает. Снимая свитер или глядя кошку, вздрагивая от треска искр, думаем: *статическое электричество*.

Однако это верно лишь наполовину. Статический – значит неподвижный, неизменный. Электрический заряд, накопившийся на свитере или кошачьей шерсти – статиче-



КОЗЫРЕВ Андрей Владимирович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией теоретической физики Института сильноточной электроники СО РАН (Томск), заведующий кафедрой Томского государственного университета



ПЕГЕЛЬ Игорь Валериевич – доктор физико-математических наук, ученый секретарь Института сильноточной электроники СО РАН (Томск)

ский. Само же потрескивание, напротив, – быстропротекающее, нестационарное явление. И маленькая вспышка при перегорании лампочки или предохранителя, и искровые разряды между электризуемыми предметами – все это процессы, имеющие форму коротких импульсов. Как правило, они приводят к переходу электрической цепи из одного состояния в другое: от отсутствия тока в цепи к его протеканию или, наоборот, от разности потенциалов к их выравниванию. Подобные явления так и называют – *переходные*. Если переходной процесс через короткое время заканчивается, то его называют импульсным.

В системах производства и потреблении электроэнергии неконтролируемые переходные и импульсные процессы вредны. Впрочем, есть немало устройств, действие которых основано на импульсном принципе. Вспомним пьезоэлектрическую зажигалку, фотовспышку, систему зажигания в автомобиле.

С мощнейшими природными импульсными процессами мы сталкиваемся во время грозы.

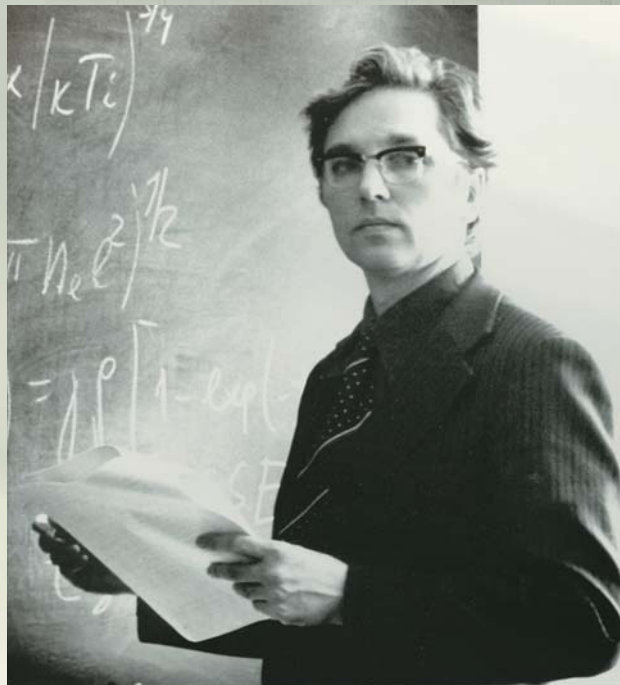
В повседневной жизни нас мало заботит, какова длительность переходного процесса при включении лампочки или какой длительности искры «генерирует» кот или шерстяной свитер. Мы едва ли задумываемся над тонкостями грозового разряда – молния уж точно у большинства людей вызывает ощущение неконтролируемой силы.

Однако существует отрасль науки и техники, предметом изучения которой является все, что связано с мощными электрическими импульсами. Ученые детально исследовали широкий спектр импульсных электрофизических процессов, научились предсказывать и контролировать их протекание. Кроме того, научились получать электрические импульсы поистине колоссальной мощности.

## Наносекунды, мегаамперы, тераватты

*Импульсная энергетика* решает задачи генерирования и преобразования коротких мощных импульсов электрической энергии. Что касается словосочетания «*сильноточная электроника*», то оно обозначает не электронику «особо точную», а электронику сильных токов. Обе дисциплины органично дополняют друг друга.

В обычной энергетике электрическая энергия вырабатывается и потребляется непрерывно. Импульсная энергетика оперирует с импульсами, длительность которых лежит в нано- или микросекундном диапазоне (миллиардные или миллионные доли секунды). Электрическая энергия сравнительно медленно запасается, а затем освобождается в виде короткого импульса с высоким напряжением и большим током. Мощность крупнейших импульсных генераторов приближается к  $10^{14}$  Вт, или 100 ТВт (1 ТВт =  $10^{12}$  Вт). Для сравне-



Бурное развитие сильноточной электроники и импульсной энергетике в России принято связывать с именем академика Г. А. Месяца – пионера этого научного направления, первого директора ИСЭ СО РАН, ныне возглавляющего ФИАН. Фото конца 1970-х гг.

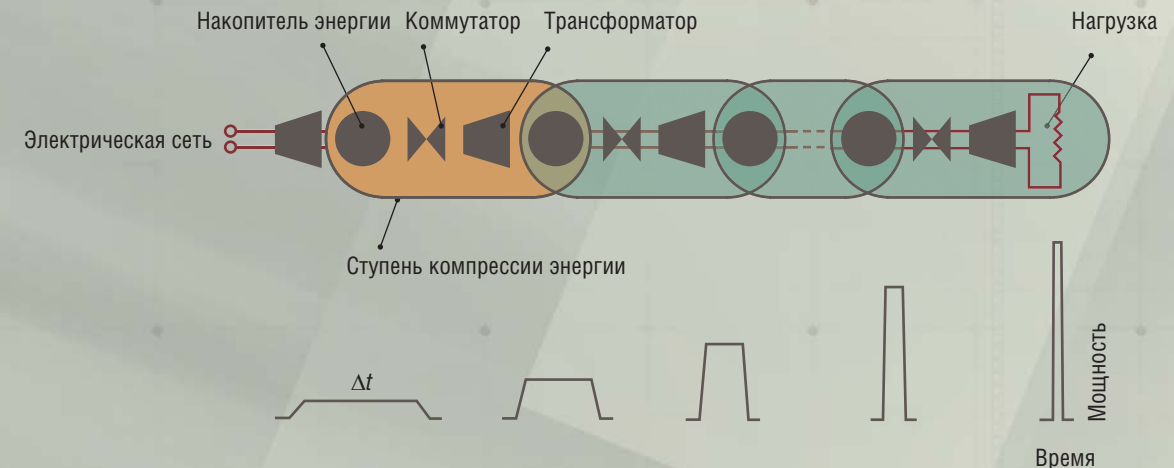
ния: суммарная мощность всех электростанций мира составляет около 2 ТВт.

Токи, создаваемые импульсными генераторами, достигают десятков миллионов ампер, напряжения – нескольких миллионов вольт. Энергия в импульсе может составлять десятки мегаджоулей (для сравнения: кинетическую энергию в 1 МДж набирает тело массой в одну тонну при падении с высоты 100 м).

Для того чтобы представить длительность импульсов, формируемых сильноточными генераторами, достаточно сказать, что за одну наносекунду свет в вакууме проходит всего 30 см, за микросекунду – 300 м. А ведь микросекундные сильноточные генераторы в этой области науки уже считаются «длинноимпульсными»!

## По ступеням компрессии энергии

В любом импульсном генераторе присутствуют следующие элементы: накопители энергии, электрические коммутаторы (устройства для включения или прерывания тока), устройства для трансформирования тока или напряжения, линии для передачи импульсов и, наконец, нагрузка.



Первоначально электрическую энергию запасают в конденсаторах. По сравнению с обычными аккумуляторами конденсаторы способны куда более быстро отдавать ее, однако проигрывают по плотности запасаемой энергии: в лучшем случае она не превышает  $100 \text{ кДж/м}^3$ . Чтобы быстро «выдать» энергию в несколько мегаджоулей, необходимо иметь уже довольно сложно устроенный конденсатор объемом в кубометры. Крупнейшие современные импульсные генераторы представляют собой установки национального уровня, а их создание требует интеллектуальных и материальных ресурсов в государственных масштабах.

Для получения высокого напряжения применяют различные способы. Можно, например, взять  $n$  конденсаторов и зарядить каждый из них до сравнительно низкого напряжения. А затем с помощью специальных коммутаторов включить все конденсаторы последовательно друг с другом. В результате напряжение также возрастет в  $n$  раз. Так работают *генераторы Маркса*. Другая возможность – использование импульсных трансформаторов.

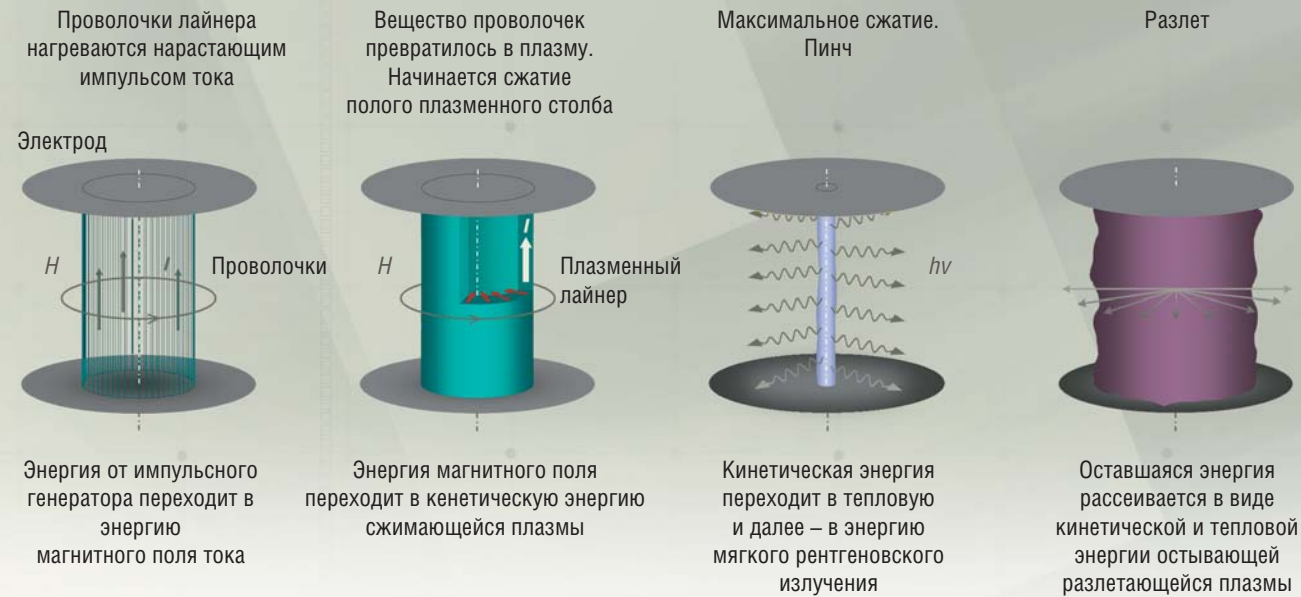
Коммутатор – это выключатель, а точнее, выключатель (в импульсной энергетике для замыкания электрической цепи и ее размыкания часто используют принципиально различные устройства). В обычном выключателе мы просто замыкаем металлические контакты. Однако так можно обеспечить, в лучшем случае, микросекундное время коммутации. За наносекунды механически сдвинуть массивные сильноточные электроды невозможно. Поэтому в мощных коммутаторах используется разряд между неподвижными электродами. Сегодня разработаны разрядники, способные надежно коммутировать мегавольтные напряжения и мегаамперные токи.

Два накопителя энергии, связанные друг с другом посредством коммутатора и трансформирующего устройства, называют *ступенью компрессии* электромагнитной энергии. На каждом шаге компрессии

Два накопителя энергии, связанные друг с другом посредством коммутатора и трансформирующего устройства, называют ступенью компрессии электромагнитной энергии. На каждом шаге компрессии энергии длительность электрического импульса уменьшается, а мощность возрастает



Под руководством академика Б. М. Ковальчука в ИСЭ СО РАН создаются импульсные генераторы сверхвысокой мощности для фундаментальных исследований и прикладных задач, разрабатывается уникальная элементная база, необходимая для их создания. Сегодня его идеи работают или ожидают своего воплощения в крупнейших импульсных установках по обе стороны Атлантики



Этапы преобразования энергии при электродинамическом сжатии вещества так называемого «плазменного лайнера», образующегося при приложении к промежутку между двумя электродами сильноточного импульса

длительность электрического импульса уменьшается, а его мощность возрастает. Различные ступени компрессии энергии в импульсном генераторе могут работать по разным физическим принципам. Например, можно, разрядив батарею конденсаторов, «разогнать» ток в цепи, обладающей определенной индуктивностью, а затем быстро разорвать эту цепь. В соответствии с законом электромагнитной индукции, в месте разрыва возникнет импульс высокого напряжения.

Как теперь доставить сформированный импульс к месту приложения – нагрузке? При сверхвысоких мощностях это превращается в проблему. Обычные провода не годятся – при малой длительности импульса они становятся источником электромагнитного излучения, потерь энергии и сильнейших помех. Для передачи мощных импульсов используют передающие линии закрытого типа. Линии должны выдерживать без пробоя импульсные напряжения до нескольких мегавольт, чтобы понять, как они устроены, можно представить себе коаксиальный телевизионный кабель, увеличенный в поперечном сечении в сотню раз.

При транспортировке короткого электрического импульса важно сохранить как его энергию, так и форму. Поэтому среда, изолирующая линию, с одной стороны, должна быть электропрочной, а с другой – не должна обладать большой дисперсией, т.е. зависимостью скорости электромагнитных волн от их частоты. Малую дисперсию в наносекундном диапазоне времен имеют жидкие диэлектрики, например трансформаторное масло. Минимальной дисперсией обладают среды с ма-

лой плотностью – газ и вакуум. Однако газ является хорошим изолятором лишь под большим давлением. А вот вакуум обладает превосходными изолирующими свойствами. Кроме того, использование вакуума в установках большого объема безопаснее и зачастую технически проще. Поэтому передающие линии с вакуумной изоляцией получили в импульсной энергетике широкое применение.

Однако и вакуум имеет свой предел электрической прочности! Выполненные к середине 1960-х гг. эксперименты по пробою вакуумных промежутков четко указывали на то, что значительную роль в этом явлении играют свойства электродов, ограничивающих промежуток. Тем не менее сам механизм вакуумного электрического пробоя долгое время оставался загадкой. Но об этом немного позже.

## В поисках «экстрима»

Сильноточный импульс – желанный инструмент для ученого, исследующего вещество в условиях экстремально высокой плотности вложенной энергии. Знания о свойствах вещества при высокоэнергетических воздействиях стали особенно нужны с развитием атомной энергетики и исследований по управляемому термоядерному синтезу в связи с созданием новых видов вооружений.

Как наиболее просто вложить энергию мощного электрического импульса в вещество? Перемкнем промежуток между двумя электродами тонкостенным

металлическим цилиндром или набором тонких проволок либо просто впрыснем газ. При приложении к промежутку сильноточного импульса протекающий ток испарит вещество, ионизует газ. Образуется так называемый *плазменный лайнер*, и далее ток будет протекать уже по нему. Сильное магнитное поле тока будет действовать на заряженные частицы, движущиеся в плазменном столбе, заставляя лайнер сжиматься к оси. На оси произойдет столкновение плазменных слоев, и их кинетическая энергия перейдет в тепловую. Явление, которое мы описали, получило название *Z-пинч* (от англ. *pinch* – сжимать; а буквой Z обычно обозначают осевое направление в цилиндрически симметричных задачах).

Если в качестве лайнера использовать не широкий пустотелый цилиндр, а узкий сплошной металлический, то при его сжатии можно получить давление в десятки миллионов атмосфер! При таких давлениях плотность вещества в 3–4 раза превышает плотность исходного твердого тела (которое, согласно школьному курсу физики, считается практически несжимаемым). Теория предсказывает для такого состояния вещества, еще не получившего названия, весьма неожиданные свойства. Добавим, что вне лаборатории единственное место, где материя существует в близком состоянии, – это внутренность ядерного взрыва и ядер некоторых звезд.

Другой областью применения Z-пинчей стала *импульсная радиография*. В момент наибольшего сжатия вещество лайнера порождает мощную вспышку излучения в мягком рентгеновском диапазоне. Использование таких рентгеновских потоков дает уникальную возможность заглянуть внутрь плотных короткоживущих физических объектов (внутри того же ядерного взрыва). Еще одно применение мощных рентгеновских импульсов – радиационные испытания различных устройств и аппаратуры.

Исследования Z-пинчей с самого начала проводились с прицелом на решение важнейшей практической задачи, стоящей перед человечеством, – получения термоядерной энергии. Известно, что осуществить управляемый (или, по крайней мере, «дозированный») «термояд» можно двумя различными способами. Первый способ предполагает нагрев и удержание дейтерий-тритиевой плазмы в течение продолжительного времени – десятки секунд. В таком режиме работает, например, *токамак* – тороидальная установка для магнитного удержания плазмы.\*

Другой подход к получению термоядерной плазмы – импульсный. В миллиметрового размера дейтерий-тритиевую мишень нужно вложить энергию за столь малое время, чтобы термоядерная реакция произошла

\* НАУКА из первых рук, № 2, 2005, Э. П. Кругляков «Звездные реакторы»

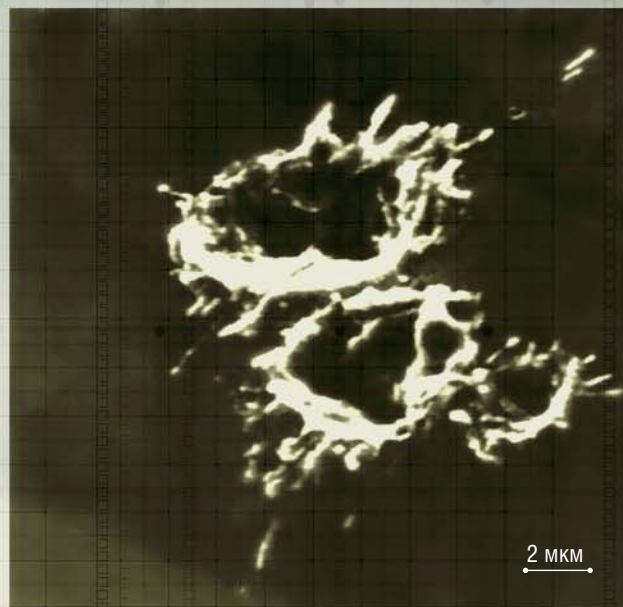
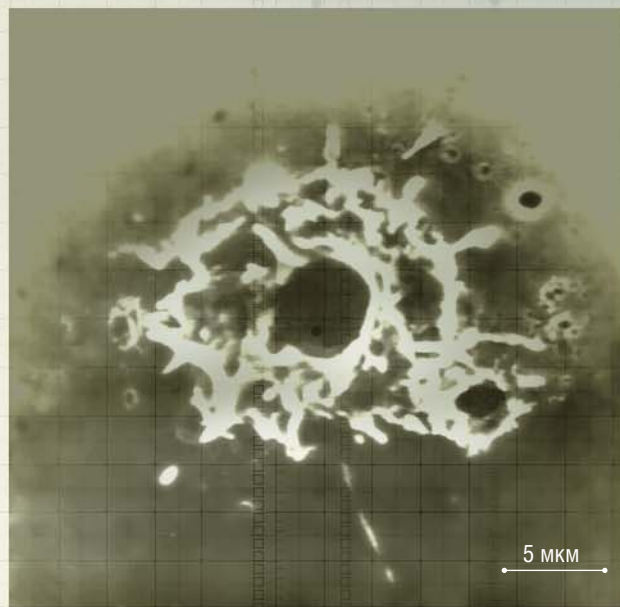


Получение сверхвысоких импульсных давлений и плотностей в веществе, его нагрев до «рентгеновских» температур, электрический взрыв, облучение материалов мощными потоками плазмы – эти и подобные физические эксперименты входят в исследование вещества при «экстремальном» энерговыделении. В ИСЭ СО РАН командой «экстремалов» руководит директор института, член-корреспондент РАН Н. А. Ратахин

прежде, чем нагретое до огромной температуры вещество разлетится. Речь идет о периоде порядка 10 нс. Чтобы выделяющаяся при реакции энергия значительно превысила вложенную, энерговыделение в мишень должно составлять несколько сотен килоджоулей. При этом ввод энергии и сжатие мишени должны быть выполнены сферически симметрично.

Лучше всего нагревать термоядерное горючее мощным импульсом рентгеновского излучения внутри специальной, также миллиметрового размера, полости. В свою очередь, для нагревания стенок полости до «рентгеновских» температур эффективны два способа.

Во-первых, можно использовать мощные лазерные импульсы с мегаджоулевой энергией. В мире создается несколько исследовательских лазерных термоядерных комплексов, из которых два наиболее мощных – это *NIF* в США (на этой установке уже ведутся пусконаладочные работы) и *LMJ* во Франции. В разработке прототипов импульсных источников питания для оптической накачки лазеров комплекса *LMJ* прини-



Застывшие микрократеры на поверхности металла – последние свидетели короткой, но бурной жизни взрывоземиссионных центров. Фото ИСЭ СО РАН

мал участие и Институт сильноточной электроники СО РАН (Томск).

Другой метод рентгеновского нагрева мишени основан на использовании Z-пинча. В этом случае мишень помещается внутрь лайнера. Этот подход по эффективности использования энергии значительно превосходит лазерный. Впрочем, для его реализации требуется создание не менее масштабной электрофизической установки. По расчетам, ток через Z-пинч должен составлять 60–70 миллионов ампер. Проект такого супергенератора разрабатывается в Национальной лаборатории Сандия (США) при активном участии Института сильноточной электроники. В ИСЭ разработаны LTD-ступени – базовые модули для линейных импульсных трансформаторов, сотни которых лягут в основу установки мощностью 1 петаватт (1 ПВт =  $10^{15}$  Вт).

## Рожденные микровзрывом

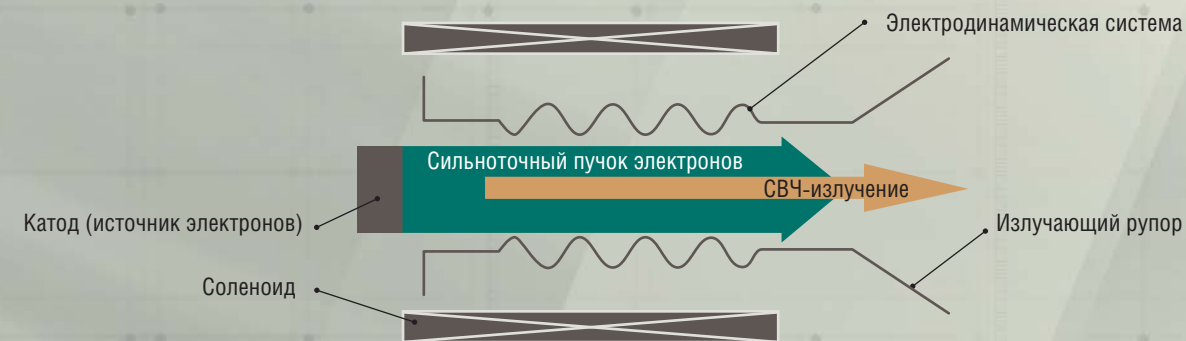
Обратимся к физическому объекту, определившему второе слово в названии «сильноточная электроника», – электрону. Сразу после создания первых мощных импульсных генераторов были предприняты попытки использовать сильноточные высоковольтные импульсы для получения электронных пучков.

Сформировать такой пучок несложно. Достаточно приложить высоковольтный импульс к вакуумному промежутку между двумя электродами, один из которых (катод) испускает электроны, чтобы получить

на аноде поток ускоренных электронов с кинетической энергией, соответствующей приложенному напряжению. Однако нетривиальной задачей стало создание эффективных источников электронов – *сильноточных эмиттеров*. Ни один из известных видов электронной эмиссии, которых немало, не обеспечивал той величины тока, которую были способны выдавать импульсные генераторы – на 4–5 порядков большие!

Способ получения мощных электронных пучков подсказала сама природа, причем там, где разработчики импульсных генераторов боролись с серьезной проблемой – пробоем вакуумной изоляции. Этот способ появился после того, как в середине 1960-х гг. группе исследователей под руководством Г. А. Месяца удалось в уникальных экспериментах однозначно доказать механизм электрического пробоя в вакууме. Обнаруженный новый механизм эмиссии электронов, получивший название *взрывной эмиссии*, был официально зарегистрирован в 1976 г. как научное открытие.

Суть явления взрывной эмиссии состоит в том, что под действием сильного электрического поля, созданного вблизи металлической поверхности в вакууме, за наносекундные времена происходит термическое взрывное разрушение микроскопических неоднородностей металла. В результате микровзрывов образуется плотная плазма, из которой под действием поля и извлекаются электроны. Плазма – самый совершенный из созданных природой эмиттер. Плотность тока взрывоземиссионных электронов может быть чрезвычайно высокой.



Заставить электронный пучок излучать микроволны можно по-разному. В генераторах черенковского типа электроны передают энергию своего продольного движения электромагнитной волне, замедленной до их скорости в несложной электродинамической системе. Магнитное поле помогает транспортировать сильноточный пучок, препятствуя его кулоновскому расталкиванию

Взрывоземиссионные катоды позволили генерировать электронные пучки с недостижимой ранее силой тока, полностью соответствующей возможностям импульсных генераторов. На основе генераторов с такими катодами были созданы мощные импульсные лазеры, рентгеновские трубки, ускорители заряженных частиц.

Сильноточные пучки ускоренных электронов можно использовать для генерации мощного жесткого рентгеновского излучения. Технически это несложно: достаточно затормозить такой пучок на мишени из плотного материала. Рождающееся при этом электромагнитное излучение называют *тормозным*. Эффективность генерации тормозного излучения тем выше, чем больше заряд ядра атомов мишени и выше энергия электронов в пучке.

На основе сильноточных генераторов со взрывоземиссионными катодами создано семейство импульсных рентгеновских источников самых разных мощностей и размеров – от переносных аппаратов до стационарных «монстров», позволяющих выполнять радиационные испытания крупных технических объектов.

Наиболее обширная область применения всех электронных пучков – генерация электромагнитных колебаний в радио- и СВЧ-диапазоне. Известно, что чем выше энергия электронов, тем более высоких частот можно достичь благодаря релятивистским эффектам. Использование сильноточных пучков в СВЧ-электронике позволило сразу на несколько порядков увеличить пиковую мощность излучения, при этом перейдя из метрового радиодиапазона в область сантиметровой и миллиметровой длин волн. Возникла новая

научная отрасль – *релятивистская высокочастотная электроника*.

Мощности современных СВЧ-генераторов достигают нескольких гигаватт. Это в миллионы раз больше, чем мощность бытовых микроволновых печей и в десятки тысяч раз больше мощности СВЧ-генераторов непрерывного действия, используемых в системах теле- и радиовещания. Впрочем, запечь курицу с помощью импульсно-периодического релятивистского генератора не так-то просто: его средняя мощность редко более киловатта.

Одним из основных применений импульсно-периодических СВЧ-генераторов стала радиолокация. Малая длительность импульса в сочетании с высокой пиковой мощностью позволила определять расстояние до цели с точностью до метра при дальности обнаружения 100–200 км, а высокая частота повторения импульсов – эффективно отделять мелкие движущиеся объекты от крупных неподвижных.

Другая сфера использования мощных СВЧ-генераторов – тестирование электронной аппаратуры. Не всякое электронное устройство способно сохранить работоспособность при облучении электромагнитной волной, вызываемой пробой воздуха!

С помощью сильноточного электронного пучка удалось разрешить еще одну проблему: в 1970-х гг. произошел прорыв в области лазерной техники – были созданы мощные лазеры на основе объемного электрического разряда в газе повышенного давления. В чем же принципиальная сложность создания таких лазеров? Для осуществления лазерной генерации необходимо

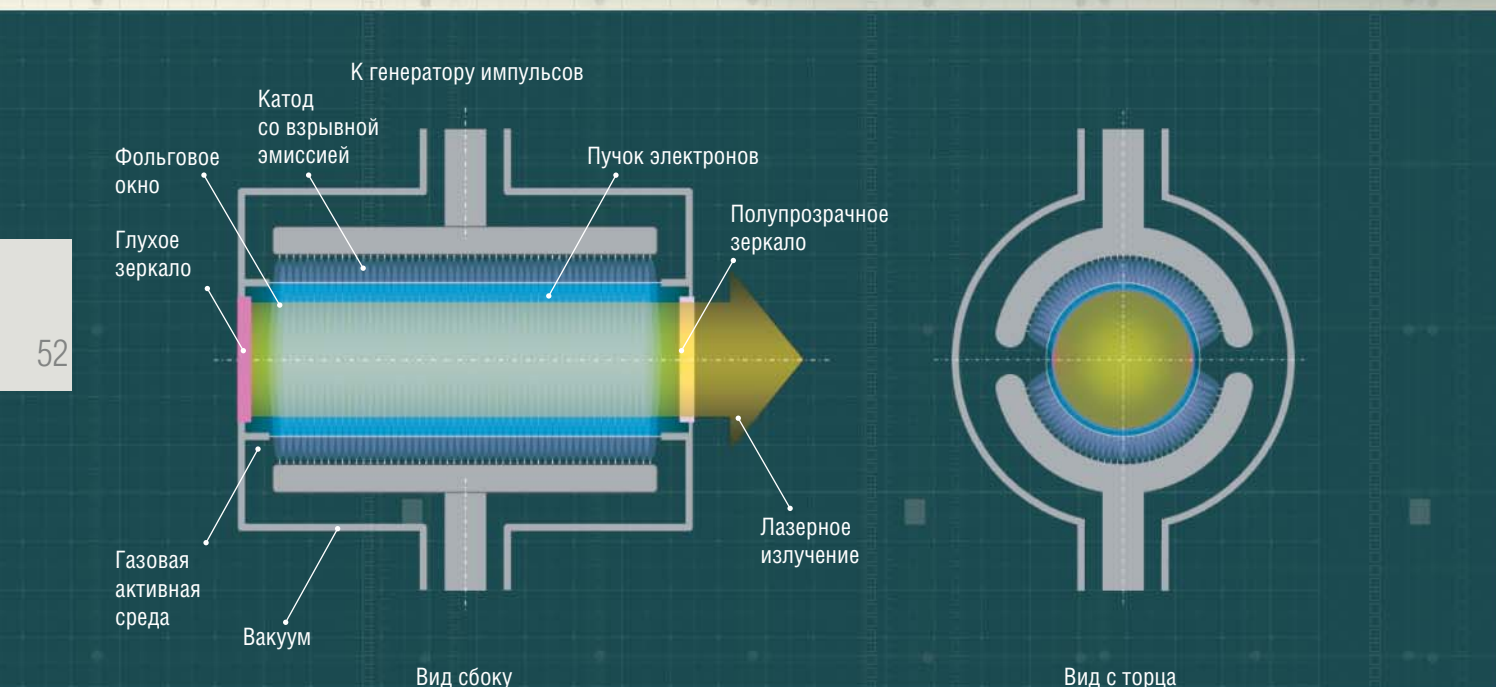


Генератор гигаваттных СВЧ-импульсов на основе сильноточного ускорителя электронов СИГУС-7. Поля излучения таких генераторов легко вызывают пробой воздуха, заставляют вспыхивать обесточенные лампы дневного света и успешно выводят из строя оставленные в лаборатории сотовые телефоны, калькуляторы, цифровые фотоаппараты

иметь неравновесную среду. Такую среду можно было бы создать, реализовав объемное протекание тока в газовом разряде. Увы, эта форма горения разряда устойчиво существовала лишь в длинных трубках при малых давлениях газа. Все попытки увеличить давление приводили к тому, что объемная форма протекания тока сменялась канальной, в которой генерация лазерного излучения невозможна.

Ускоренные электроны способны эффективно ионизовать среду, через которую они проходят, в том числе и газ высокого давления. Чем выше интенсивность электронного пучка, тем выше объемная проводимость получившейся газовой плазмы и тем большую энергию можно ввести в активную среду лазера. В результате многолетних исследований удалось построить системы с рекордными значениями энергии и мощности лазерного излучения.

Схема газового лазера, накачиваемого сильноточным пучком электронов



В заключение кратко коснемся технологических применений мощных импульсных устройств. Количество электронно-ионно-плазменных технологий, реализованных на их основе, в последние годы растет лавинообразно. Важное место среди них занимает производство наноструктурных материалов.

Значительные перспективы связаны с промышленным внедрением технологий электронно-пучковой модификации поверхности металлических изделий. Облучая металл коротким мощным пучком, можно мгновенно отполировать до зеркального блеска поверхность даже очень сложной формы – сделать это механически практически невозможно. Плаваясь под пучком и мгновенно остывая, тонкий, в несколько микрон, слой металла очищается от примесей, приобретает нанокристаллическую структуру, обладающую высокой твердостью, коррозионной и износостойкостью. Импульсному электронному пучку подвластны даже капризные в обработке, хрупкие сверхтвердые инструментальные сплавы. Комбинированными пучково-плазменными методами можно создавать поверхностные сплавы с составом и свойствами, невозможными с точки зрения традиционной металлургии.

На основе многолетних исследований газового разряда низкого давления в Институте сильноточной элект-

роники СО РАН разработаны эффективные источники плазмы как газов, так и многих металлов. С помощью таких источников можно с большой скоростью проводить модификацию поверхностного слоя металлических изделий (например, азотирование), а также наносить на поверхность тонкие покрытия с целью придания ей необходимых функциональных свойств. Более того, прочные тонкие пленки оказалось возможным наносить даже на стекло и пластмассу.

Сильноточные импульсные пучки электронов показали свою эффективность в технологических процессах отверждения и модификации лаковых покрытий и рулонных полимеров, стерилизации медицинского инструмента и порошкообразных материалов, в плазмохимии, при обезвреживании дымовых газов. По индивидуальному свечению под действием электронных пучков стало возможно идентифицировать многие поделочные и драгоценные камни. Электрический взрыв проводников позволил получать наноразмерные порошки.

Итак, мы видим, что сильноточные импульсы и электронные пучки являются не только интереснейшим научным объектом и инструментом для фундаментальных исследований, не только служат задачам обороны и мирного «термояда» отдаленного будущего, но и готовы трудиться «на благо народного хозяйства»: незримо, мощно и эффективно.

В ИСЭ СО РАН готовится к запуску лазерная система субпетаваттной мощности с длительностью импульса  $10^{-14}$  с. На снимке – выходной усилитель с газовой активной средой



#### Литература

- Бугаев С. П., Крейнделъ Ю. Е., Щанин П. М. *Электронные пучки большого сечения*. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
- Королев Ю. Д., Месяц Г. А. *Физика импульсного пробоя газов*. – М.: Наука, 1991.
- Кремнев В. В., Месяц Г. А. *Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике*. – Новосибирск: Наука. Сиб отд-ние, 1987.
- Месяц Г. А. *Импульсная энергетика и электроника*. – М.: Наука, 2004.
- Месяц Г. А. *Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга*. – М.: Наука, 2000.
- Мощные наносекундные импульсы рентгеновского излучения / Месяц Г. А., Иванов С. А., Комяк Н. И., Пеликс Е. А. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
- Mesyats G. A., Osipov V. V., Tarasenko V. F. *Pulsed Gas Lasers*. – Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1995.