

УДК 621.38

© А. С. Кайгородов

УНИКАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ УСТАНОВКИ ИНСТИТУТА ЭЛЕКТРОФИЗИКИ УРО РАН

В работе приводятся перспективные разработки ИЭФ УрО РАН в области создания мощного импульсного оборудования, способного генерировать пикосекундные потоки заряженных частиц, напряжение с пиковой мощностью 6 ГВт при длительности импульса 7 нс, а также рентгеновское излучение со значительно сниженной дозой облучения. С помощью созданного оборудования реализованы такие методы синтеза порошков, как электрический взрыв проволоки и лазерное испарение, а также магнитно-импульсное прессование таких порошков.

Кл. сл.: мощная импульсная техника, наноматериалы, физические процессы

ВВЕДЕНИЕ

Основными научными направлениями Института электрофизики УрО РАН (ИЭФ УрО РАН) являются: физика и техника высоких плотностей энергии, получение и применение пучков заряженных частиц, источники когерентного излучения и нанотехнологии. Для проведения в первую очередь фундаментальных исследований в ИЭФ УрО РАН разрабатывается уникальное научное оборудование для изучения физических процессов и создания/модификации материалов. Отличительной особенностью такого оборудования является импульсный режим его работы, что позволяет существенно расширить его эксплуатационные характеристики и в ряде случаев использовать нестандартные подходы к проведению эксперимента.

ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В части исследования электрофизических процессов в ИЭФ УрО РАН созданы приборы, работающие в нано- и пикосекундных временных диапазонах. В зависимости от момента возникновения эмиссии убегающих электронов (УЭ) на нарастающем фронте ускоряющего напряжения энергия частиц за анодом может составлять от десятков до сотен килоэлектронвольт. Типичная длительность импульсов ускоренных частиц с током до десятков ампер лежит в диапазоне вплоть до 40 пс при фронте нарастания 20–30 пс. Такие ультракороткие потоки заряженных частиц, создаваемые источником УЭ серии РАДАН (рис. 1), являются уникальным инструментом для инициирования разрядных процессов в газовых электродных промежутках и изучения пробоев с участием лавин УЭ [1].

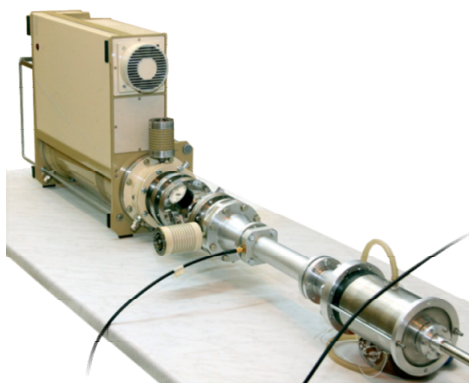


Рис. 1. Источник убегающих электронов РАДАН-303 с энергией УЭ ~500 кэВ



Рис. 2. Внешний вид узлов наносекундного твердотельного генератора S-500. Выходной узел генератора S-500 (а); узел SOS-диода (б); SOS-диод (в) и элементарный SOS-диод внутри сборки (г)

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В практическом плане представляют интерес исследования процессов возбуждения катодолюминесценции диэлектриков (в частности, минералов) и полупроводниковых лазерных мишеней, а короткие вспышки тормозного рентгеновского или оптического излучений являются важным инструментом для калибровочных измерений временного отклика сцинтилляторов и люминофоров. Для этого необходима генерация импульсов напряжения с определенными характеристиками.

Очевидным преимуществом полностью твердотельных генераторов является возможность стабильной работы с высокой частотой следования импульсов, их нечувствительность к нагрузкам и практически неограниченный ресурс. Наносекундный твердотельный генератор S-500 (рис. 2, а) с полупроводниковым прерывателем тока (SOS) (рис. 2, б–г) обеспечивает на нагрузках 40–100 Ом амплитуду импульса напряжения от 500 до 750 кВ с пиковой мощностью 6 ГВт при длительности импульса 7 нс и частоте следования импульсов в режиме пачки до 1 кГц [2]. В генераторе предложена

и реализована новая схема накачки SOS на основе двойной формирующей линии. Такая схема обеспечивает ввод в SOS обратного тока амплитудой 14 кА за время ~ 12 нс, затем SOS обрывает ток за ~ 2 нс. Фронт выходного импульса напряжения в передающей линии дополнительно укорачивается ферритовым обострителем до ~ 1 нс, затем полупроводниковым обострителем до ~ 0.5 нс. Генератор разработан для применения в области мощной СВЧ-электроники.

В случае дополнения наносекундного импульсного генератора малогабаритной отпаянной рентгеновской трубкой с холодным катодом и устройством визуализации, использующим рентгенолюминофоры, появляется возможность создания импульсных рентгеновских аппаратов различного типа, которые в настоящее время все шире применяются в медицинской диагностике, дефектоскопии и досмотровых системах. Преимуществом таких комплексов является значительное, в 10–20 раз, снижение необходимой дозы облучения в сравнении с аналогичными комплексами на основе источников непрерывного рентгеновского излучения [3] при сохранении контрастности снимка (рис. 3, а).

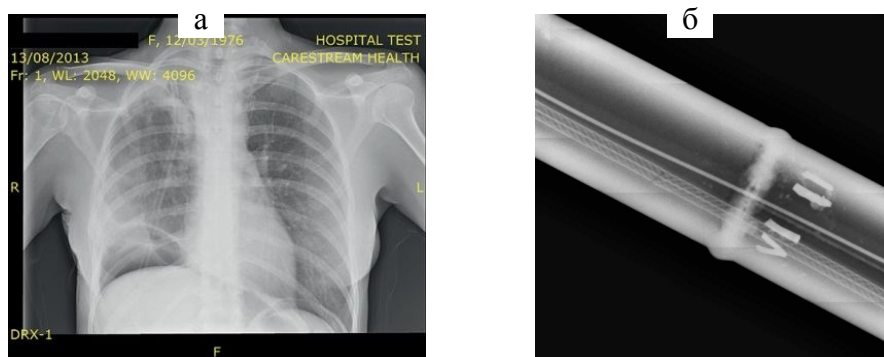


Рис. 3. Рентгеновский снимок грудной клетки (а) и повреждения экранированного кабеля, уложенного в стальную трубу толщиной 5 мм (б)

В ИЭФ УрО РАН разработана серия отпаянных взрывоэмиссионных рентгеновских трубок и компактных высоковольтных наносекундных импульсных генераторов с полностью твердотельной системой коммутации с выходным напряжением от 65 до 350 кВ, работающих в килогерцовом диапазоне частот. Такое решение значительно повысило срок службы, скорость и стабильность работы, например, мобильных дефектоскопов, позволяющих в полевых условиях проанализировать состояние скрытой детали (рис. 3, б).

УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ

В части материаловедения в ИЭФ УрО РАН разработаны и успешно применяются комплекс установок для получения нанопорошков и их эффективного уплотнения. Для получения нанопорошков металлов сплавов и их химических соединений в институте используется метод электрического взрыва проволоки (ЭВП). При протекании через проволоку импульса тока плотностью 10^8 А/см² за единицы микросекунд происходит нагрев металла, а затем его взрывное диспергирование. В зависимости от условий взрыва после конденсации паров металла образуются частицы с характерным размером от десятков микрометров до нескольких нанометров. При ЭВП в атмосфере нейтрального газа отработано получение металлических нанопорошков Al, Cu, Fe, Ni, Ti, W, Mo, Al-Mg, Ni-Fe и др. с характерным размером частиц в области 50–100 нм. В кислородсодержащей среде получены порошки ряда оксидов: AlO, CuO,

NiO, ZrO, FeO, ZnO, TiO, (MgAl)O и др. с размерами частиц в области 15–100 нм. Порошки слабо агрегированы, имеют форму частиц, близкую к сферической, высокую чистоту и высокую химическую активность. Установка ЭВП (рис. 4, а) автоматизирована и обладает производительностью по порошку в диапазоне 50–400 г/ч, в зависимости от типа материала. При этом процесс является экологически чистым и позволяет производить порошки с варьированием характеристик путем изменения исходных условий [4].

Параллельно с ЭВП в Институте электрофизики УрО РАН интенсивно развивается и исследуется лазерный метод получения слабоагрегированных нанопорошков сложных составов, который заключается в испарении твердой мишени излучением импульсно-периодического иттербиевого или CO₂-лазера "ЛАЭРТ" и последующей конденсации паров в потоке буферного газа. Для этого был создан лазерный комплекс по получению нанопорошков в газах различного давления (рис. 4, б). С его помощью были получены нанопорошки простых и сложных оксидов: Al₂O₃, Fe_xO_y, Yb₂O₃, ScSZ, Nd:Y₂O₃, Nd:Lu_xY_{1-x}O₃, Nd:YAG и др. В ходе эксплуатации оборудования было обнаружено, что средний размер наночастиц, полученных в воздухе атмосферного давления, не зависит от сорта материала мишени и лежит в диапазоне 11–16 нм. В то же время за счет изменения давления и сорта буферного газа средний размер наночастиц можно изменять в пределах 7–40 нм. В свою очередь производительность получения наночастиц зависит от свойств материала и составляет 20–80 г/ч при энергозатратах лазерного излучения 8–30 кВт·ч/кг [5].



Рис. 4. Внешний вид установок для синтеза нанопорошков методами электрического взрыва проволоки (а) и лазерного испарения мишени (б)

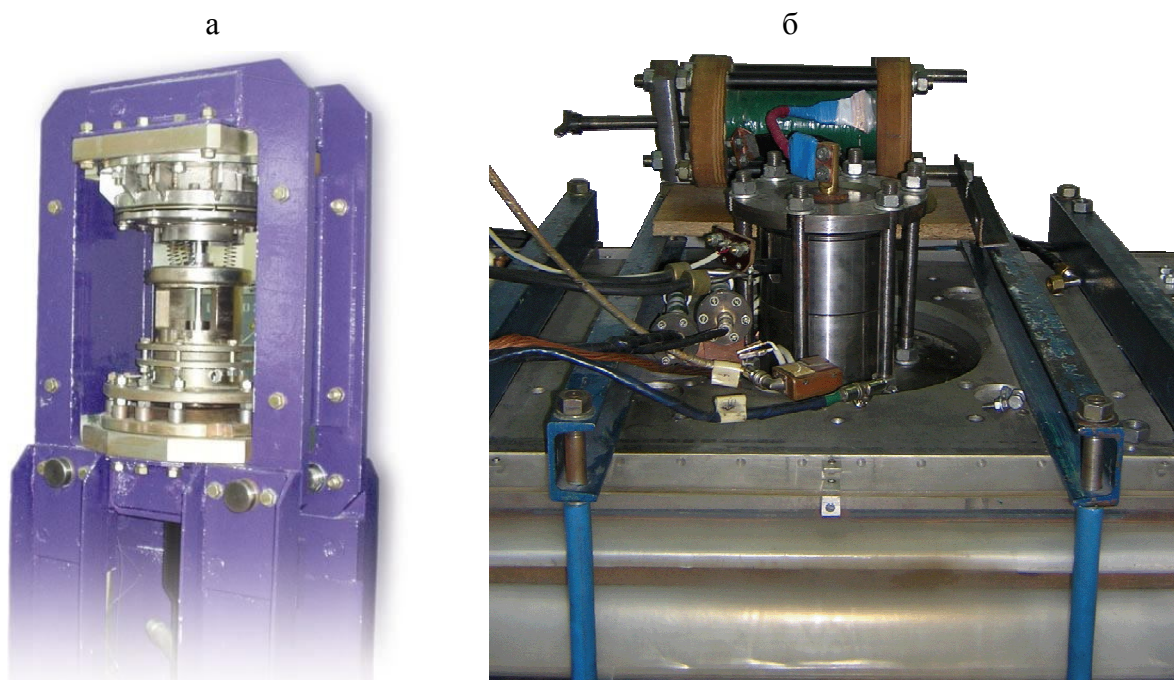


Рис. 5. Внешний вид установок для одноосного (а) и радиального магнитно-импульсного прессования порошков (б)

Проводимые в ИЭФ УрО РАН исследования по магнитно-импульсному прессованию (МИП) показали эффективность метода для компактирования широкого спектра порошковых материалов, особенно в нанометровой области размеров частиц. Применение МИП в сочетании с термообработкой перспективно для формирования из нанопорошков новых типов объемных наноструктурных материалов для различных конструкционных и функциональных назначений. Прессование характеризуется мягкой импульсной волной сжатия в порошке с амплитудой до 2 ГПа при длительности 10–1000 мкс и скоростями перемещения материала 10–100 м/с. Эти условия в сочетании с адиабатическим разогревом благоприятны для эффективного преодоления сильного межчастичного взаимодействия в нанопорошках, что обеспечивает получение состояний спрессованных порошков с повышенной плотностью, способствует разрушению агломератов частиц и генерации структурных превращений (микроискажений решетки, дефектов, фазовых переходов) [6]. Для магнитно-импульсного прессования нанопорошков различных материалов в ИЭФ УрО РАН создано оборудование двух типов с использованием плоских (рис. 5, а) и радиально сходящихся волн сжатия (рис. 5, б).

ВЫВОДЫ

Показаны разработки Института электрофизики УрО РАН, представляющие интерес для дальнейшего их продвижения в технологические и производственные процессы.

Созданные приборы, использующие сильные электрические и магнитные поля, мощные электронные и ионные пучки, чрезвычайно короткие импульсные процессы, в первую очередь являются уникальными инструментами для фундаментальных научных исследований.

В то же время накопленный годами опыт научной работы, технических достижений и кооперации с другими организациями позволяет предлагать внедрение наших разработок в высокотехнологичные отрасли промышленности, сельского хозяйства и медицину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mesyats G.A., Yalandin M.I., Reutova A.G., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A. Picosecond runaway electron beams in air // Plasma Phys. Rep. 2012. Vol. 38, no 1. P. 29–45. Doi: 10.1134/S1063780X11110055.
2. Gusev A.I., Pedos M.S., Rukin S.N., Timoshenkov S.P., Tsyranov S.N. A 6 GW nanosecond solid-state generator based on semiconductor opening switch // Review of

- Scientific Instruments. 2015. Vol. 86, no. 11. 114706. Doi: 10.1063/1.4936295.
3. Бессонова В.А., Гаврилов П.В., Корженевский С.Р., Чепусов А.С., Комарский А.А. Снижение дозовой нагрузки на пациента при проведении диагностики с помощью цифровых импульсных наносекундных рентгеновских комплексов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. № 2. С. 53–57.
 4. Kotov Yu.A. Electric explosion of wires as a method for preparation of nanopowders // Journal of Nanoparticle Research. 2003. Vol. 5, № 5-6. P. 539–550. Doi: 10.1023/B:NANO.0000006069.45073.0b.
 5. Осипов В.В., Котов Ю.А., Иванов М.Г., Саматов О.М., Смирнов П.Б. Применение мощного импульсно-периодического СО₂-лазера с высоким КПД для получения наноразмерных порошков // Известия академии наук. Серия физическая. 1999. Т. 63, № 10. С. 1968–1971.
 6. Ivanov V.V., Kaygorodov A.S., Khrustov V.R., Paragin S.N. Fine Grained Alumina-Based Ceramics Produced Using Magnetic Pulsed Compaction // Ceramic Materials — Progress in Modern Ceramics. Croatia: InTech, 2012. 228 p.
- Институт электрофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург**
- Контакты: Кайгородов Антон Сергеевич,
kaigor@iep.uran.ru
- Материал поступил в редакцию 26.06.2018

UNIQUE SCIENTIFIC EQUIPMENT OF THE INSTITUTE OF ELECTROPHYSICS UB RAS

A. S. Kaygorodov

Institute of Electrophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia

IEP's perspective developments in the field of the creation of pulsed power equipment capable of generating picosecond fluxes of charged particles, a voltage with a peak power of 6 GW at a pulse duration of 7 ns, as well as X-ray radiation with a significantly reduced radiation dose are shown. With the help of the created equipment, such methods of powder synthesis as electrical explosion of the wires and laser evaporation, and also magnetic-pulsed pressing of such powders are realized.

Keywords: pulsed power equipment, nanomaterials, physical processes

REFERENCES

1. Mesyats G.A., Yalandin M.I., Reutova A.G., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A. Picosecond runaway electron beams in air. *Plasma Phys. Rep.* 2012. Vol. 38, no 1, pp. 29–45. Doi: 10.1134/S1063780X11110055.
2. Gusev A.I., Pedos M.S., Rukin S.N., Timoshenkov S.P., Tsyranov S.N. A 6 GW nanosecond solid-state generator based on semiconductor opening switch. *Review of Scientific Instruments*, 2015, vol. 86, no. 11, 114706. Doi: 10.1063/1.4936295.
3. Bessonova V.A., Gavrilov P.V., Komarskiy A.A., Korzhenevskiy S.R., Chepusov A.S. [Reduction of patient radiation dose during diagnostics with the digital pulsed nanosecond X-ray systems]. *Meditsinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost'* [Medical radiology and radiation safety], 2016, no. 2, pp. 53–57. (In Russ.).
4. Kotov Yu.A. Electric explosion of wires as a method for preparation of nanopowders. *Journal of Nanoparticle Research*. 2003. Vol. 5, № 5-6, pp. 539-550. Doi: 10.1023/B:NANO.0000006069.45073.0b.
5. Osipov V.V., Kotov Yu.A., Ivanov M.G., Samatov O.M., Smirnov P.B. [Use of the powerful pulse and periodic CO₂ laser with high efficiency for receiving nano-dimensional powders]. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics], 1999, vol. 63, no. 10, pp. 1968–1971. (In Russ.).
6. Ivanov V.V., Kaygorodov A.S., Khrustov V.R., Paragin S.N. Fine Grained Alumina-Based Ceramics Produced Using Magnetic Pulsed Compaction. *Ceramic Materials — Progress in Modern Ceramics*. Croatia: InTech, 2012. 228 p.

Contacts: *Kaigorodov Anton Sergeevitch*,
kaigor@iep.uran.ru

Article received in edition 26.06.2018