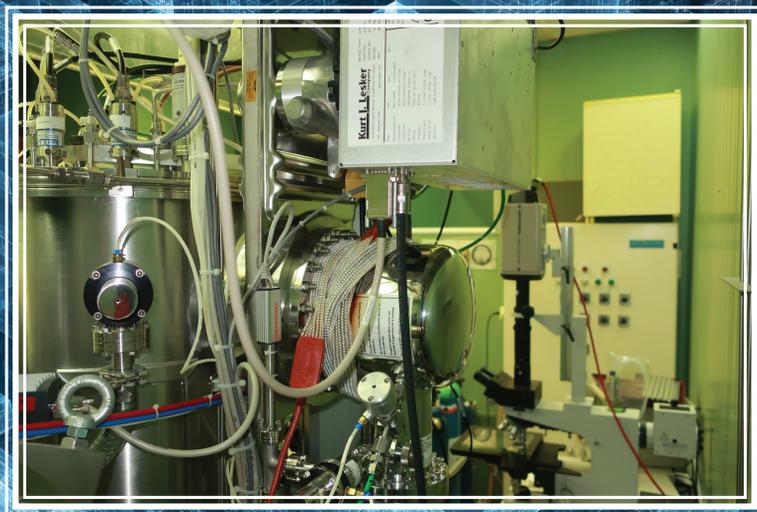


**Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН**

**Лаборатория сверхпроводниковых устройств для приема
и обработки информации**

**Лаборатория физических основ функциональной тонкопленочной
оксидной электроники**



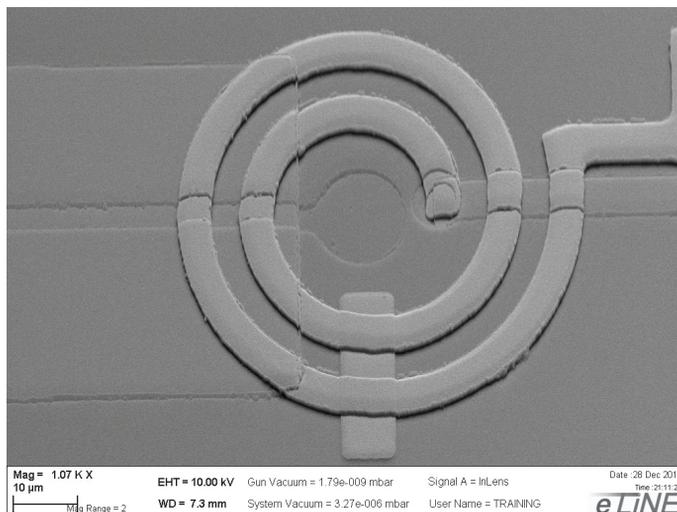
**Уникальная научная установка
«КРИОИНТЕГРАЛ»**

**Технологический и измерительный
комплекс для создания
сверхпроводниковых наносистем
на основе новых материалов**

ОГЛАВЛЕНИЕ

УНУ «Криоинтеграл»	1
Направления деятельности с использованием УНУ	2
Создание элементной базы сверхпроводниковой электроники	3
Разработка и апробация новых технологических методов и режимов	4
Научно-техническое сотрудничество в рамках российских и международных проектов	5 – 6
Подготовка специалистов и кадров высшей квалификации	7
Оборудование	8
Системы очистки воды	9
Электронная литография	10
Технология создания сверхпроводниковых наноструктур	11
Измерительное оборудование	12 – 13
Соответствие УНУ мировому уровню	14 – 15

УНУ «Криоинтеграл»



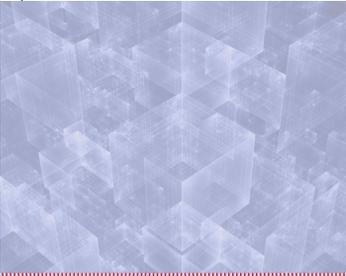
УНУ «Криоинтеграл» представляет собой комплекс приборов и оборудования полного цикла, позволяющий разрабатывать, изготавливать и проводить измерения интегральных наноструктур с рабочими линейными размерами порядка 50 нанометров. УНУ «Криоинтеграл» используется в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники для исследования, разработки и создания новых поколений систем, приборов, устройств и их компонентов на базе технологий нано- и микросистемной техники, в частности: разработка новых интегральных наноструктур для работы в терагерцовом диапазоне; разработка, изготовление и исследование микросхемы интегрального приемника; разработка технологии создания эпитаксиальных тонких оксидных пленок и гетероструктур.

[1]

Уникальная научная установка (УНУ) – особый тип научной инфраструктуры, функционирующий как единое целое, созданный в единичном варианте с техническими характеристиками, не имеющими аналогов в Российской Федерации, и позволяющий получать значимые научные результаты мирового уровня, которые невозможно достичь на серийно выпускаемых научных приборах и оборудовании.

Подробнее об УНУ на портале Минобрнауки России

<https://ckp-rf.ru/>



Направления деятельности с использованием УНУ

I

Создание элементной базы
сверхпроводниковой электроники

II

Разработка и апробация новых
технологических методов
и режимов

III

Научно-техническое
сотрудничество в рамках
российских и международных
проектов

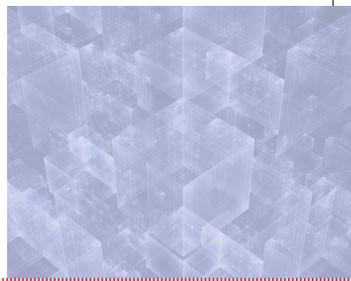
IV

Подготовка специалистов и кадров
высшей квалификации

Создание элементной базы сверхпроводниковой электроники

Лаборатория сверхпроводниковых устройств для приема и обработки информации, на базе которой создана и успешно функционирует **УНУ «Криоинтеграл»**, является одним из ведущих исследовательских коллективов в области сверхпроводниковой электроники в России. Мы занимаемся разработкой новых типов многоэлементных сверхпроводниковых структур субмикронных размеров; изготовлением отдельных элементов и интегральных структур сверхпроводниковой электроники. Качество полученных фундаментальных и прикладных результатов соответствует стандартам ведущих научных центров за рубежом. Некоторые разработки, например, создание сверхпроводникового интегрального приемника ТГц диапазона, отмечены как уникальные.

Высокий уровень цитирования отражает актуальность и высокое качество исследований. Технологический комплекс по изготовлению интегральных сверхпроводниковых структур включает в себя чистые комнаты класса 1000 с рабочими зонами класса 100. Помещения оборудованы системами вентиляции, очистки и кондиционирования воздуха, системой вытяжной вентиляции и системами очистки воды.



Уровень публикаций сотрудников лаборатории соответствует мировым стандартам:

<https://nanolith.ru/publications.html>

Разработка и апробация новых технологических методов и режимов

Дооснащение и модернизация УНУ “Криоинтеграл” (Министерство науки и высшего образования РФ, грант 075-15-2021-667) по ряду параметров улучшит предельные характеристики оборудования до значений лучших существующих в мире установок. Для повышения технологических возможностей модернизированной УНУ проводится разработка целого ряда новых процессов с учётом современных требований микро- и нанoeлектроники, а также специфики нового технологического оборудования.

Дооснащённая УНУ, с отработанными на новом современном оборудовании методиками, создаст условия для реализации устройств с параметрами лучше мировых аналогов (подробно на стр. 14).



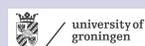
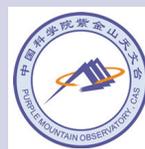
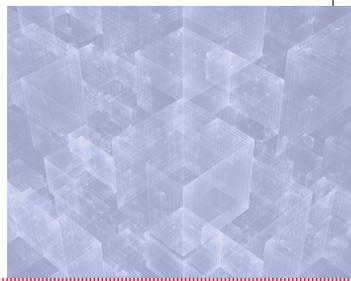
Сотрудники лаборатории, выполняющие цикл работ на УНУ по совершенствованию методик, обладают высокой квалификацией и богатым опытом научно-технологической деятельности:

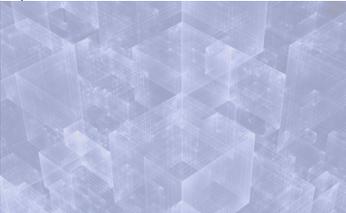
<https://nanolith.ru/staff.html>

Научно-техническое сотрудничество в рамках российских и международных проектов

Наши разработки с использованием УНУ «Криоинтеграл» востребованы как в России – создаются приёмные устройства для наземных радиоастрономических телескопов и будущих космических миссий, включая проект РКА «Миллиметрон», так и за рубежом – ведутся проекты совместно с Институтом космических исследований Нидерландов, Немецким аэрокосмическим центром, Университетом Тюбингена (Германия), Нанкинским университетом (Китай), Обсерваторией Пурпурной горы (Китай), Чалмерским университетом (Швеция), Стеленбосским университетом (ЮАР), Институтом астрофизики и геофизики в Сан-Пауло (Бразилия), и другими. С использованием оборудования УНУ проводятся технологические и экспериментальные работы в интенсивном научном сотрудничестве с такими российскими организациями, как:

- ⊙ Московский государственный университет (МГУ);
- ⊙ Московский педагогический государственный университет (МПГУ);
- ⊙ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН);
- ⊙ Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (ИФП);
- ⊙ Институт прикладной физики РАН (ИПФ);
- ⊙ Институт физики микроструктур РАН (ИФМ);
- ⊙ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ МИСиС);



- 
- ⊙ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ);
 - ⊙ ООО «Сверхпроводниковые нанотехнологии» (СКОНТЕЛ);
 - ⊙ ООО «Терагерцовая и инфракрасная фотоника» (ТИНФотоника);
 - ⊙ Московский физико-технический институт (МФТИ)
 - ⊙ Специальная астрофизическая обсерватория РАН (САО)
 - ⊙ Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна РАН (ИФТТ);
 - ⊙ Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН (ФТИАН РАН);
 - ⊙ Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В.Н. Ореховича (ИБМХ);
 - ⊙ и другие

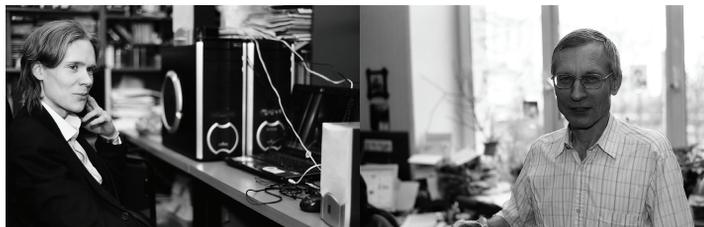
Уникальным для России является комплекс для изготовления и исследования сверхпроводниковых структур на основе туннельных контактов Nb-AlO_x-Nb и Nb-AlN-NbN

Сверхпроводниковые структуры, изготовленные на оборудовании УНУ, широко используются для фундаментальных исследований в рамках совместных проектов РФФИ, РФФИ с институтами и университетами Европы и стран БРИКС (Университет Тюбингена, Нанкинский университет, Обсерватория Пурпурной горы, Стеленбосский университет, Университет Сан-Пауло). Разрабатываются приемные структуры для ряда наземных радиотелескопов, в том числе для китайской терагерцовой обсерватории в Антарктиде (Dome A) и для приемника Champ II+ (обсерватория APEX, Атакама, Чили) с рабочими частотами до 950 ГГц. С российскими и зарубежными организациями заключено за последние 5 лет более 20 меморандумов и соглашений об участии в совместных исследованиях с использованием УНУ

Подготовка специалистов и кадров высшей квалификации

Лаборатория проводит подготовку специалистов и кадров высшей квалификации – студентов и аспирантов – на базе современного научного оборудования. В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и его филиалах ведется обширная исследовательская и учебно-педагогическая деятельность (МФТИ, МГУ, МПГУ, РТУ МИРЭА, Сколтех, НИТУ «МИСиС», НИУ ВШЭ, СарГУ, УлГУ и др.). Наличие УНУ позволяет расширять круг научных задач и привлекать студентов и аспирантов для активного участия в научно-исследовательских работах и экспериментальной деятельности. Обучение студентов и аспирантов позволяет пополнять кадровый состав организации и расширяет доступность оборудования за счет наличия квалифицированного персонала.

Основная цель – обучение студентов старших курсов, аспирантов и молодых ученых навыкам научной экспериментальной работы на современном научном оборудовании, а также умение представить полученные научные результаты на высоком уровне на отечественных и международных конференциях и симпозиумах. Подготовка ведется на основе тесной связи учебного процесса и научных исследований, что позволяет выпускать специалистов, сочетающих профессиональные знания и способность самостоятельно решать задачи в фундаментальной и прикладной науке.



Оборудование

К оборудованию, входящему в состав УНУ «Криоинтеграл», предъявляются особые требования к контролю различных параметров окружающей среды, включая концентрацию и размеры взвешенных в воздухе частиц, влажность и температуру, уровень вибрации, освещения, электромагнитные поля. Чистые помещения обеспечивают проведение научных исследований и производство современной высокоинтегрированной микроэлектроники. Прецизионный кондиционер (Tespair LV, Италия) предназначен специально для кондиционирования технологических помещений, где предъявляются особые требования к параметрам и чистоте воздуха. УНУ «Криоинтеграл» включает в себя две чистые комнаты класса 1000 с рабочими зонами класса 100; на данный момент (декабрь 2021 года) идут работы по созданию и комплектации современным научно-технологическим оборудованием нового чистого помещения



Ламинарные боксы с системой HEPA-фильтров и сушильные печи с принудительной циркуляцией воздуха.

Системы очистки воды

Сверхчистая вода необходима для обработки образцов и фотомасок, является неотъемлемым шагом многих технологических процессов изготовления интегральных микросхем.

Содержащиеся в водопроводной воде загрязнения сопоставимы с размерами изготавливаемых структур, и отсутствие фильтрации водопроводной воды приведет к низкому уровню выхода рабочих микросхем и нестабильности технологического процесса. Для очистки воды для технологических нужд используются системы дистилляции и обратного осмоса. Очищенная вода используется в большинстве технологических циклов, в том числе приготовление растворов, отмывка образцов, финишное ополаскивание лабораторной посуды.

Дистилляторы Fistream производят дистиллированную воду высокой чистоты (рН 5,6-6,0), проводимость 1 мкСм/см и используются только с системой предварительной очистки воды из-за высокой чувствительности стеклянных компонентов аппарата к солям, содержащимся в воде.

Система сверхочистки воды Millipore, предназначена для получения воды I-го типа, сопротивление которой составляет 18.2 МОм·см (0.055 мкСм/см). Используется для приготовления реагентов и отмывке при производстве микросхем.



Электронная литография

Система электронной литографии e_Line объединяет в себе сканирующий электронный микроскоп и систему электронной литографии производства Raith (лазерная интерферометрическая платформа и цифро-аналоговый преобразователь для управления отклонением электронного луча). Размер электронного пучка составляет 2 нм для ускоряющего напряжения 20 кВ. Минимальный размер структуры для резиста с ультравысоким разрешением HSQ составляет 20 нм. Система электронной литографии может использоваться как для исследования топографии и электронных свойств микро- и нанообъектов, так и для создания объектов с предельными размерами ~20 нм в режиме прямой литографии и в режиме создания фотошаблонов.

Параметры установки ЭМ Raith e_Line

*размер электронного пучка:
4 нм (1 кВ; апертура 30 мкм);*

ток катода: 5 пА – 20 нА;

*ускоряющее напряжение:
100 В - 30 кВ;*

*максимальный размер
экспонируемой области: 100 x 100 мм.*



Технология создания сверхпроводниковых наноструктур

Чистые помещения для технологических процессов изготовления интегральных микросхем укомплектованы всем необходимым оборудованием для формирования резистивного рисунка, нанесения тонких пленок материалов, травления и последующей обработки пластин. Каждый технологический этап может при необходимости контролироваться с помощью электронной микроскопии. Ниже приведены примеры технологического оборудования для разных этапов производства.

Установка вакуумного магнетронного напыления Kurt J. Lesker позволяет осуществлять магнетронное осаждение тонкопленочных покрытий в вакууме на образцы диаметром до 76,2 мм при давлении в камере не хуже $5 \cdot 10^{-8}$ мбар.

Оптические микроскопы для визуальных исследований и контроля образцов в отраженном и проходящем свете; укомплектованы набором инструментов контрастирования изображения и цифровой камерой.

Плазмохимическое травления по маске резиста проводится с использованием двух различных установок плазмохимического травления: Secon XPE II (SF_6); March Jupiter II (CF_4). В ближайшее время будет установлена новая современная система травления.



Измерительное оборудование

Для низкотемпературных измерений используются гелиевые криостаты – как заливные производства фирмы Infrared Lab (США), так и замкнутого цикла на основе криорефрижератора Cryomech Inc (США). Все криостаты оснащены окнами для проведения оптических измерений при температурах в диапазоне 4,2 – 325 К и стабильности $\pm 0,01$ градуса.

Для прямой регистрации мощности в диапазоне 150 ГГц-200 ТГц используется болометрическая система Infrared Lab. Имеется лабораторный Фурье-спектрометр до 30 ТГц на основе интерферометра с шаговым двигателем на оптическом столе. Высоковакуумные откачные посты Pfeiffer Vacuum (Германия) серии HiCube 80 на основе турбомолекулярных насосов позволяют получать глубокий вакуум в вакуумных камерах и газовых ячейках различного объема.

Для быстрых тестовых измерений в жидком гелии используются криогенные зонд-вставки, спроектированные под различные задачи.

Оборудование для проведения низкотемпературных измерений.



Для высокоточных прецизионных измерений используются: векторный 4-портовый анализатор цепей Rohde&Schwarz ZNB20 (Германия) до 20 ГГц; несколько анализаторов спектра Keysight (США) и Rohde&Schwarz до 26,5 ГГц, генераторы СВЧ-сигналов до 40 ГГц; несколько источников-измерителей Keithley (США) и цифровых мультиметров Agilent.

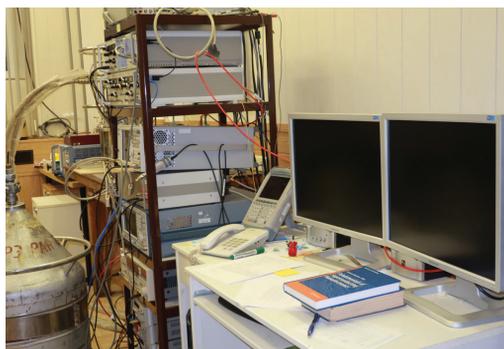
Также в распоряжении исследователей имеется набор специализированных батарейных источников тока с низким уровнем шума, часть из которых были спроектированы и собраны в электронных мастерских Института космических исследований Нидерландов.

При проведении исследований используется специально разработанная в лаборатории автоматизированная система измерений IRTECON на основе измерительных плат National Instruments (США), позволяющая проводить циклы сложных измерений с управлением одновременно большим количеством устройств и внешних приборов.

Комплекс оборудования УНУ позволяет проводить уникальные эксперименты при криогенных температурах.

Актуальный список оборудования доступен на странице УНУ:

<https://nanolith.ru/unu.html>



Соответствие мировому уровню

Характеристика УНУ	Действующее значение	Целевое значение	Лучший мировой аналог
Точность формирования рисунка при плазмохимическом травлении пленок ниобия	100 нм	50 нм	50 нм ⁽¹⁾
Минимальный достижимый размер элемента при контактной литографии	1 мкм	0,6 мкм	0,6 мкм ⁽²⁾
Минимальный достижимый размер элемента при лазерной литографии	1 мкм	0,6 мкм	0,6 мкм ⁽³⁾
Разрешение по толщине пленок (высоте профиля) измеряемых структур	20 нм	2 нм	1-2 нм ⁽⁴⁾
Разброс параметров (отклонение от заданного значения) при изготовлении сверхпроводниковых интегральных структур ТГц диапазона	10 %	5 %	Неизв ⁽⁵⁾
Минимальная воспроизводимая площадь туннельных структур ТГц диапазона с отклонением не более 5 %	0,8 мкм ²	0,5 мкм ²	0,5 мкм ² ⁽⁶⁾
Плотность туннельного тока сверхпроводниковых туннельных структур ТГц диапазона	20 кА/см ²	50 кА/см ²	50 кА/см ² ⁽⁷⁾
Наименьшая шумовая температура чувствительных элементов для приемных систем в диапазоне 211-275 ГГц	75 К	20 К	30 К ⁽⁸⁾
Наименьшая шумовая температура чувствительных элементов для приемных систем в диапазоне 800-930 ГГц	400 К	~180-200 К	200 К ⁽⁹⁾

⁽¹⁾ Для изготовления сверхпроводниковых туннельных структур на основе пленок ниобия;

⁽²⁾ Для контактной литографии на длине волны 405 нм;

⁽³⁾ Для изготовления сверхпроводниковых туннельных структур;

⁽⁴⁾ Для измерений толщины (высоты) при помощи профилометра;

⁽⁵⁾ Производители сверхпроводниковых структур не указывают данный технологический параметр в открытых источниках;

⁽⁶⁾ Для сверхпроводниковых туннельных структур ТГц диапазона с высокой плотностью тока (выше 20 кА/см²);

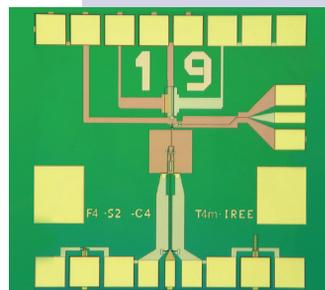
⁽⁷⁾ Для структур, изготавливаемых в целях использования в высокочувствительных приемных устройствах;

⁽⁸⁾ На международном радиотелескопе ALMA в Чили, band 6;

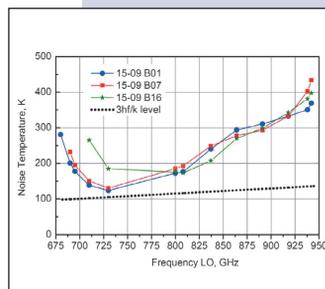
⁽⁹⁾ На международном радиотелескопе ALMA в Чили, band 10.

Наш опыт включает реализацию ряда **проектов мирового уровня**, а наше многолетнее сотрудничество с ведущими зарубежными и российскими научными коллективами обеспечивает доступ к широкому спектру эффективных технологий.

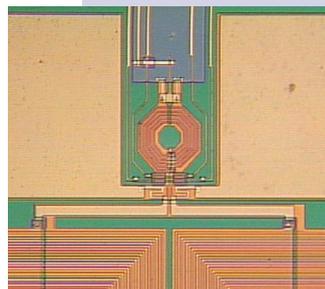
Фото микросхемы интегрального приемника, разработанного и изготовленного в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН на основе структуры Nb-AlN-NbN.



Зависимость шумовой температуры смесителей от частоты для трех различных структур из одной серии; шумовая температура приемника на частоте 725 ГГц составила 120 К, что лишь в 3 раза превышает квантовый предел hf/kB .



Сверхпроводниковый квантовый интерферометр (СКВИД), изготовленный в ИРЭ им В.А. Котельникова РАН; на фото – центральная часть СКВИД-магнитометра.



ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН



Инициаторами образования института, а также руководителями первых научных подразделений были выдающиеся ученые в области радиофизики, радиотехники и электроники – академики А.И. Берг, Б.А. Введенский, Н.Д. Девятков, В.А. Котельников, Ю.Б. Кобзарев, В.В. Мигулин, чл-корр. АН СССР Д.В. Зёрнов.

Теорема Котельникова — основа цифровой обработки сигналов (она же теорема Найквиста — Шеннона, или теорема отсчётов): любую функцию $F(t)$, состоящую из частот от 0 до f , можно непрерывно передавать с любой точностью при помощи чисел, следующих друг за другом менее чем через $1/2f$



Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) Российской академии наук создан в 1953 году. В 1955 году была образована новая часть института в г. Фрязино Московской области, а затем два филиала – в Саратове и Ульяновске.

Основная задача института – фундаментальные исследования в области радиофизики, радиотехники, физической и квантовой электроники, информатики. В институте ведутся прикладные исследования в области развития высоких технологий и создания новых научных приборов.

УНУ «Криоинтеграл» создан с целью интеграции и расширения функциональных возможностей использования научно-технического потенциала технологического и измерительного оборудования ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

© Сокращенное наименование УНУ: «Криоинтеграл»

Базовая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии
наук

Ведомственная принадлежность: Минобрнауки России

Классификационная группа УНУ: Стенды для электро-, теплофизических
и механических испытаний

Год создания УНУ: 2005

*Для образцов, изготовленных или исследованных с использованием УНУ, просьба
вставлять в статьи благодарность.*

Связаться с нами

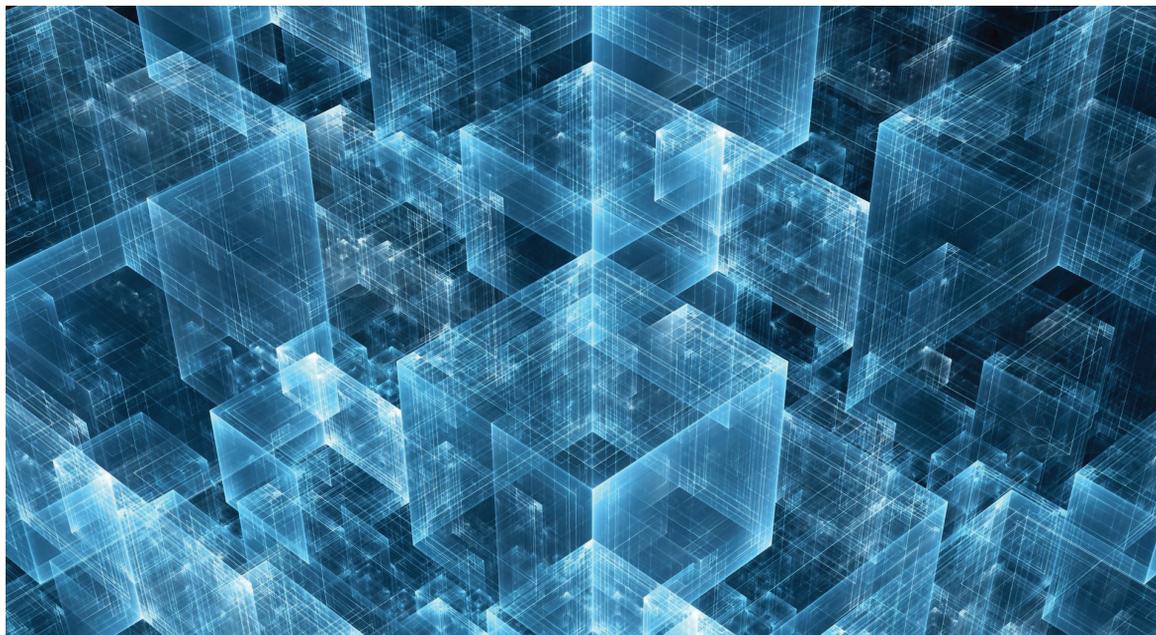
125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7

Телефон: +7 495 629-34-18

Электронная почта: nanolith@yandex.ru

Веб-сайт: <https://nanolith.ru/>

Каталог УНУ: <https://ckp-rf.ru/usu/352529/>



О нас

УНУ «Криоинтеграл» создана в 2005 году и успешно функционирует на базе лаборатории сверхпроводниковых устройств для приема и обработки информации и лаборатории физических основ функциональной тонкопленочной оксидной электроники ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

В состав УНУ «Криоинтеграл» входит полный комплекс оборудования для изготовления и исследования высококачественных сверхпроводниковых структур на основе туннельных переходов с высокой плотностью тока и интегральных схем средней степени интеграции.

Руководитель комплекса: д.ф.-м.н., проф. Кошелев В.П.