

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Юридический адрес: 117303, г. Москва,
ул. Керченская, дом 1А, корпус 1
Почтовый адрес: 141700, Московская обл.,
г. Долгопрудный, Институтский переулок, дом 9
Тел.: +7 (495) 408-42-54, факс: +7 (495) 408-68-69
info@mipt.ru

30.05.2023 № 26-05/3938

на № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Баган Виталий
Анатольевич

2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Балакина Александра Алексеевича** «Интерфейсы на основе трековых мембран в масс-спектральных исследованиях полевого испарения ионов из полярных растворов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация Балакина Александра Алексеевича «Интерфейсы на основе трековых мембран в масс-спектральных исследованиях полевого испарения ионов из полярных растворов» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук.

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа Балакина Александра Алексеевича посвящена изучению возможностей использования трековых мембран для неразрушающего извлечения ионов из растворов. Развитие новых методов и подходов получения газофазных ионов особенно нелетучих соединений является одной из важнейших задач современной масс-спектрометрии, в частности её применения в органической химии, биохимии, медицины и экологии. В работе продемонстрировано, как используя мембранный интерфейс можно создавать ионные источники для прямого ввода ионов из растворов, находящихся при атмосферном давлении, в вакуумную камеру масс-спектрометра. Минимальные потери ионов при таком вводе обеспечивают высокую чувствительность анализа при незначительном расходе пробы, нарабатываемой часто в малых количествах. Применение интерфейса на основе трековых мембран с каналами диаметром в несколько десятков нанометров позволяет проводить также экспериментальные исследования фундаментальных аспектов самого явления полевого испарения ионов из жидкостей, что необходимо для понимания принципов и особенностей работы полевых источников ионов.

Научная новизна. В работе разработан новый метод полевой экстракции ионов из полярных растворов, в котором стабилизация поверхности жидкости в сильном электрическом поле обеспечивается локализацией раствора в каналах полимерной мембраны. Впервые продемонстрирована возможность получать прямые экспериментальные данные о полевом испарении ионов из полярных растворов в условиях стабильной границы раздела фаз. Изучены механизмы формирования сильного локального электрического поля у поверхности раствора. Для ионов различной природы получены прямые данные о составе выходящих из раствора ионных кластеров, выявлены особенности формирования кластерных оболочек. Впервые на основе теоретического анализа модели и экспериментальными исследованиями продемонстрирована возможность создания низковольтного импульсного интерфейса для экстракции ионов из полярных растворов с использованием поверхностно модифицированных трековых мембран. Впервые показана возможность получения газофазных ионов сложных биоорганических соединений ионов в атмосферных условиях путем их экстракции из водных растворов.

Содержание работы. Диссертация Балакина А.А. состоит из введения восьми глав и заключения, в котором сформулированы основные результаты и выводы. **Во введении** изложены в общем виде основные идеи, заложенные при разработке метода полевого испарения ионов из полярных растворов, в котором использование полимерных трековых мембран позволяет стабилизировать поверхность жидкости в сильном электрическом поле, обеспечивая возможность проведения прямых экспериментов по изучению фундаментальных аспектов перехода ионов из жидкости в вакуум. Показаны актуальность исследований, степень разработанности темы, сформулированы цели работы и задачи, возникающие для их достижения. Также показана научная новизна работы, а также теоретическая и практическая её значимость. Изложена методология работы, а также конкретные методы, использовавшиеся при её проведении. Рассмотрены также аспекты, относящиеся к достоверности полученных результатов и их апробацией.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору методов получения газофазных ионов, основанных на их извлечении из растворов. В частности, для извлечения ионов, образующихся за счет электролитической диссоциации при растворении исследуемого вещества, используют электрическое поля высокой напряженности. Явление стимулированного электрическим полем выхода ионов из конденсированной фазы в газовую, получившее название полевого испарения ионов, не является методом ионизации, поскольку генерация газофазных ионов происходит путем эмиссии из раствора ионов исследуемых веществ, уже созданных в полярном растворителе. В таком процессе сохраняется структура иона, а также частично его сольватная оболочка из полярных молекул растворителя, поэтому формально этот способ создания газофазных ионов анализируемых веществ относится к так называемым методам мягкой ионизации.

Рассмотрены основные теоретические концепции, используемые для описания полевого испарения ионов из жидкости. Проведен их анализ и показано, что исследование полевого испарения ионов из диэлектрических жидкостей представляет собой сложную задачу, не только для проведения прямых экспериментов, но и с точки зрения теории.

В настоящее время широкое развитие получил метод экстракции ионов из растворов, основанный на их разбрызгивании в электрическом поле при атмосферном давлении. Электрораспыление применяется в масс-спектрометрии для химического анализа растворов, а также для определения структуры больших биоорганических молекул. Показаны важнейшие результаты, полученные при исследовании механизмов генерации ионов анализируемых веществ в ионных источниках с электрораспылением.

Другим методом неразрушающей атмосферной экстракции ионов из конденсированных сред, получившим широкое распространение в настоящее время в масс-спектрометрии, является метод матрично-активированной лазерной десорбции-ионизации. Этот метод вызывает особый интерес в связи с возможностью создания масс-спектрального образа, особенно для выяснения локализации различных веществ в биологических объектах. При этом механизм генерации ионов пока является предметом обсуждения.

Основная проблема исследования полевого испарения ионов из жидких диэлектриков состоит в том, что в сильных электрических полях, в которых возможно наблюдение процесса экспериментальными методами, поверхность жидкости нестабильна. Данные о полевым испарении ионов, полученные до начала выполнения диссертационной работы, относились к исследованию выхода ионов из нестабильных пульсирующих центров, которые образуются на поверхности жидкости в сильном электрическом поле. Образование ионов в таком процессе получило название электрогидродинамической ионизации. Показано, что дальнейший прогресс в изучении полевого испарения ионов из растворов напрямую связан с поисками возможностей стабилизации поверхности жидкости в сильных электрических полях. Одним из подходов к решению этой задачи является использование материалов с наноразмерной поверхностной структурой, в частности, в качестве таких структур могут использоваться полимерные мембраны с наноразмерными каналами.

Вторая глава посвящена изложению физических принципов использования мембранного интерфейса для извлечения ионов из растворов. Анализ известных условий стабильности заряженных капель привел к выводу, что для обеспечения устойчивости поверхности жидкости в сильном электрическом поле, способном обеспечить эффективную эмиссию ионов, необходимо сформировать поверхность с радиусом кривизны в несколько десятков нанометров. В работе изложено оригинальное решение проблемы, основанное на том, что поверхность жидкости можно стабилизировать, помещая её в тонкие каналы полимерной трековой мембраны.

Приведена схема использования полимерной мембраны с каналами в качестве интерфейса для транспорта ионов из раствора в вакуум. Важнейшими характеристиками трековой мембраны, определяющими возможность её использования в интерфейсе, являются диаметр каналов, их поверхностная плотность, а также краевой угол смачивания жидкостью материала мембраны. Получен критерий устойчивости жидкости, заполняющей каналы мембраны, в котором максимально возможная напряженность электрического поля у поверхности жидкости, связана с диаметром канала, коэффициентом поверхностного натяжения жидкости, краевым углом между жидкостью и материалом мембраны, а также атмосферным давлением. Показано, что для мембран из лавсана с каналами диаметром меньше ста нанометров, заполненными глицерином, поверхность жидкости будет стабильной в электрических полях напряженностью до десяти мегавольт на сантиметр, способных обеспечить эффективный выход ионов из жидкости. Сформулированы другие требования к материалу мембраны, плотности каналов и свойствам используемой жидкости.

Рассмотрены также и механизмы формирования сильных электрических полей, обеспечивающих эффективное полевого испарения ионов. Такое поле может быть сформировано благодаря эффекту усиления поля на конце канала, заполненного проводящей жидкостью, подобно тому, как это происходит на конце тонкой металлической иглы, а также благодаря специфическому механизму, связанному с зарядкой поверхности мембраны вторичными ионами, которые образуются при бомбардировке экстрагирующего электрода первичными ионами, выходящими из жидкости.

В **третьей главе** изложены основные результаты измерения тока ионов, выходящих из мембранного интерфейса. Были разработаны схемы измерения тока, а также конструкция ионного источника, позволяющего получать пучки ионов, выходящих из исследуемых растворов. Представлены зависимости тока ионов от приложенного к интерфейсу напряжения в различных режимах формирования экстрагирующего электрического поля. Обнаружено, что вольтамперные характеристики сильно отличаются как по величине тока, так и по диапазону напряжений, в котором изменение тока существенно, а также по реакции тока на изменение напряжения. Исследования кинетики тока и проведенные оценки показывают, что заряд на поверхности мембраны влияет на локальную напряженность электрического поля у поверхности жидкости в каналах мембраны, а кинетика его изменения зависит от тока зарядки и поверхностной проводимости полимера.

Изучено влияние различных добавок на величину ионного тока. Обнаружено увеличение тока при введении добавок, образующих в растворе однозарядные ионы и резкое уменьшение тока при введении добавок, образующих двухзарядные ионы.

Проведено изучение энергетического распределения ионов, выходящих из мембранного ионного источника. Показано, что вид распределения определяется процессами распада ионных кластеров в электрическом поле

вблизи поверхности мембраны. Широкое распределение по энергии ионов, генерируемых в мембранном источнике, является особенностью метода прямого полевого испарения ионов, которую следует принимать во внимание при использовании мембранного интерфейса в масс-спектральных приборах.

Феноменологическая модель работы мембранного интерфейса рассмотрена в **четвертой** главе. Представленная модель объясняет существование двух режимов работы интерфейса: переходного с малым током и стационарного с большим током при меньшем напряжении, замедленную реакцию тока на изменение экстрагирующего напряжения и концентрации ионов в жидкости в стационарном режиме, а также уменьшение времени установления тока с увеличением тока. Экспериментальные наблюдения указывают на то, что поверхностный заряд на вакуумной поверхности диэлектрической мембраны играет существенную роль в формировании электрического поля, стимулирующего выход ионов из жидкости. Поведение тока в системе жидкость-мембрана-вакуум можно описать при использовании некоторых достаточно обоснованных предположений. Экспериментальные наблюдения согласуются качественно с результатами моделирования.

Рассмотрена связь скорости полевого испарения ионов из раствора, заполняющего канал мембраны с транспортом ионов вдоль канала. Близкая к корневой зависимость тока от концентрации ионогенных добавок, а также сильная зависимость тока от приложенного напряжения, позволяют заключить, что в условиях проводившихся экспериментов поток ионов, проходивший через мембранный интерфейс, ограничивался скоростью полевого испарения.

Пятая глава посвящена определению напряженности электрического поля, стимулирующего выход ионов из жидкости. В стационарном режиме эмиссии ионов заряд на поверхности диэлектрической мембраны играет существенную роль в формировании электрического поля у поверхности жидкости. Для определения напряженности поля, стимулирующего выход ионов, в рамках феноменологической модели работы мембранного интерфейса было определено распределение электрического потенциала на поверхности мембраны вблизи выделенного канала, а затем получена связь напряженности электрического поля у поверхности раствора в канале мембраны и среднего потенциала поверхности мембраны. Проведенное моделирование позволило провести сопоставление с результатами экспериментов.

Принимая во внимание особенности геометрии каналов мембраны, а также электрические свойства полимера и раствора, рассмотрен другой путь формирования сильного электрического поля у поверхности жидкости, в основе которого лежит «эффект острия», который известен в электростатике как явление усиления напряженности электрического поля на острых краях проводников. Показано, что такой режим формирования сильного электрического поля можно реализовать в случае использования нестационарных полей. Для этого случая проведено компьютерное моделирование, которое позволило также установить связь прикладываемого

напряжения с напряженностью электрического поля у поверхности раствора.

Таким образом, применение трековых мембран в качестве интерфейса между раствором, находящимся в атмосферных условиях, и вакуумом может обеспечить у поверхности раствора в каналах мембраны сильное электрическое поле с напряженностью порядка десятка мегавольт на сантиметр. Извлечение ионов из раствора может осуществляться, как в стационарном режиме, так и в короткодействующих (импульсных) электрических полях.

В шестой главе представлены результаты масс-спектральных исследований полевого испарения ионов из полярных растворов с применением мембранного интерфейса. Для этих исследований был разработан ионный источник, который подсоединялся к масс-спектрометру, который представлял собой времяпролётный рефлектрон с ортогональным вводом ионов.

В экспериментах использовались вещества, при растворении которых в полярных растворителях в результате электролитической диссоциации или присоединения протонов образуются ионы. В частности, это были простые соли, органические кислоты, более сложные органические и биоорганические соединения. Наблюдаемые масс-спектры представляли собой систему пиков, соответствующих массам кластерных ионов, в состав которых входило несколько молекул полярного растворителя. Используемый метод генерации газофазных ионов не только обеспечивает отсутствие их фрагментации даже для сложных органических молекул, но и не разрушает сольватную оболочку из полярных молекул растворителя, которая частично остается с ионом после перехода в газовую фазу. Было показано, что в состав кластерной оболочки достаточно небольших ионов входит в среднем около трёх–четырёх молекул растворителя. Если центральный ион имеет более сложное распределение заряда, в состав оболочки может входить значительно большее число молекул растворителя, например, около 10 для остатков аминокислот.

Отдельно рассмотрен вопрос об ионизации молекул растворителя при полевым испарении ионов. Наблюдаемая аномально высокая интенсивность пиков депротонированных молекул растворителя свидетельствует о том, что степень их в приповерхностном слое жидкости в условиях эффективного полевого испарения ионов на несколько порядков выше, чем в объеме раствора.

На основании исследования масс-спектров ионов, экстрагированных из растворов сульфата натрия в водно-глицериновой смеси, изучены вопросы, связанные с особенностями полевого испарения двухзарядных ионов. Показано, что величина заряда иона, являясь одной из важных характеристик полевого испарения ионов из полярной жидкости, не может рассматриваться в качестве определяющего параметра при определении скорости выхода ионов из жидкости. На скорость полевого испарения большое влияние имеет распределение заряда – при различной локализации заряда скорости выхода ионов из жидкости могут отличаться на несколько порядков.

Седьмая глава посвящена результатам экспериментов, проводившихся с целью демонстрации возможности прямой экстракции ионов из полярных

растворов импульсами электрического поля высокой напряженности при использовании в качестве интерфейса между жидким раствором и вакуумом трековой мембраны с каналами наноразмерного диаметра. Основным преимуществом импульсного режима извлечения ионов является быстрая реакция на изменение напряжения и возможность расширения диапазона напряженностей поля, стимулирующего выход ионов из раствора, без риска протекания раствора на вакуумную сторону мембраны. При этом обеспечивается высокая стабильность работы ионного источника и увеличивается время его непрерывной работы.

Для реализации импульсного режима разработана специальная методика с регистрацией времяпролетных спектров ионов. Изучено влияние параметров используемых импульсов напряжения на интенсивность наблюдаемых ионных пиков. Было обнаружено большое число пиков заведомо не связанных с ионами в растворе, а их присутствие в спектре затрудняет выделение целевых пиков.

Главной причиной появления большого количества пиков посторонних ионов является использование импульсов напряжения с амплитудой свыше пяти киловольт. Это приводит к генерации большого количества побочных ионов в процессе вторичной ион-ионной эмиссии при бомбардировке экстрагирующей сетки и полимерной основы мембраны, в частности отрицательных ионов водорода. Для подавления генерации вторичных ионов необходимо снижать импульсное напряжение в источнике при сохранении той же напряженности электрического поля, стимулирующего выход ионов. Поскольку в интерфейсе с экстрагирующим сетчатым электродом это сделать невозможно, была предложена новая конструкция интерфейса, в которой экстрагирующий электрод переносится на вакуумную поверхность мембраны.

Основным преимуществом рассматриваемого модифицированного интерфейса по сравнению с конструкцией, использующей металлическую сетку, является подавление вторичных процессов, отсутствие эффектов, связанных с зарядкой вакуумной поверхности диэлектрической мембраны. В модифицированном интерфейсе все каналы находятся в практически эквивалентных условиях. Эти выводы подтверждены экспериментально полученными дрейф-спектрами отрицательно заряженных ионов.

Восьмая глава посвящена развитию метод полевого экстракции ионов из растворов при атмосферном давлении, в котором в качестве структуры, обеспечивающей формирование сильного экстрагирующего электрического поля, а также для стабилизации поверхности жидкости в электрическом поле высокой напряженности используются полимерные трековые мембраны с наноразмерными каналами. Этот метод позволяет получать ионы сложных молекул, включая ионы биоорганических молекул, без разрушения их структуры непосредственно в лабораторных условиях. Возможности метода демонстрируются на примере масс-спектральных приложений, в которых использовались различные анализаторы ионных масс, для чего были разработаны различные варианты использования мембранного интерфейса.

В отличие от экстракции ионов непосредственно в вакуум, выход ионов из раствора стимулируется импульсами электрического пробоя в газовом промежутке между мембраной и экстрагирующим электродом, находящимся вблизи поверхности мембраны. Ионы выводятся из зоны экстракции воздушным потоком, который для анализа направляется в масс-спектральный прибор. С помощью атмосферного мембранного интерфейса были получены масс-спектры ионов таких веществ как ангиотензин II, грамицидин С, цитохром С, инсулин, убиквитин, а также фрагментов брадикинина и других пептидов, важных для биологии и биохимии. Рассмотрены также возможные механизмы выхода ионов из жидкости в газовую фазу.

В заключении диссертации содержатся выводы, в конце приведен список используемой литературы.

В диссертации были получены следующие результаты:

1. Установлено, что интерфейс на основе полимерной трековой мембраны с наноразмерными каналами способен обеспечить эффективный транспорт ионов из раствора, находящегося при атмосферных условиях, в вакуум для их идентификации масс-спектральными методами без разбрызгивания раствора в электрических полях высокой напряженности.
2. Показано, что под действием электрического поля в паровую фазу переходят кластерные ионы, в состав которых входят несколько молекул растворителя; размер и строение кластерной оболочки зависят от размера центрального иона и локализации заряда на центральном ионе. При этом поток ионов зависит от стимулирующего напряжения и концентрации ионов в растворе.
3. Обнаружено, что концентрация ионов растворителя на границе раздела фаз возрастает в сильном электрическом поле, стимулирующем эффективную эмиссию ионов из водно-глицериновых смесей, на несколько порядков по сравнению с концентрацией, поддерживаемой за счет автопротолиза в отсутствие электрического поля, что может влиять на зарядовое состояние сложных биоорганических ионов аналита, регистрируемое масс-спектрометриальным прибором.
4. Установлено, что в мембранном интерфейсе эффективный транспорт ионов из полярного раствора в паровую фазу обеспечивается наличием у поверхности раствора сильного электрического поля, которое в стационарных условиях создается, главным образом, за счет зарядки полимерной поверхности мембраны вторичными ионами, а в нестационарных условиях – из-за эффекта острия.
5. Показано, что для улучшения управления ионным источником с интерфейсом на основе трековой мембраны может быть использован импульсный режим извлечения ионов из растворов.
6. Разработан интерфейс на основе поверхностно модифицированной трековой мембраны с проводящим слоем на вакуумной стороне. Его использование в импульсном ионном источнике позволяет существенно снизить напряжение, стимулирующее переход ионов из полярной жидкости в газовую фазу,

подавить образование посторонних ионов во вторичных процессах и упростить управление потоком выходящих из раствора ионов.

7. Установлено, что применение мембранного интерфейса в атмосферных условиях позволяет генерировать газофазные ионы, включая ионы биоорганических молекул, путем их полевой экстракции из полярного раствора с последующей их регистрацией масс-спектральным прибором, использующим атмосферную ионизацию.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации заключается в том, что появились прямые экспериментальные данные, полученные в условиях стабильной границы раздела фаз при заданных параметрах процесса, дающие основу для построения более надежных теоретических моделей полевого испарения ионов. Эти данные включают информацию об энергетическом распределении экстрагированных из раствора ионов, влиянии природы ионов на скорость их перехода в паровую фазу, включая заряд и его локализацию на ионе. Практическую значимость работы определяет возможность создания электромембранных ионных источников, которые отличаются от существующих простотой конструкции и управления, использованием малых объемов анализируемого материала, а также низкими потерями ионов при проведении анализа методами масс-спектрометрии. Мембранный интерфейс можно также использовать в тандемных приборах с масс-спектральной идентификацией.

Достоверность основных положений и полученных результатов не вызывает сомнений. Они имеют экспериментальное подтверждение с привлечением надежных математических моделей. Результаты диссертации прошли опробацию на престижных Всероссийских и Международных конференциях. Статьи по теме диссертации прошли экспертизу при публикации в признанных научным сообществом реферируемых отечественных и зарубежных изданиях. Правомерность использования предлагаемых методов и результаты исследований подтверждены также независимыми исследованиями.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в работе, получены при непосредственном личном участии автора. Вклад автора был основным при постановке задач исследований и выборе методик, в проведении экспериментов, при анализе и интерпретации их результатов, а также в постановке модельных расчетов и их сопоставлении с данными экспериментов. Разработка и реализация экспериментальных установок и узлов, а также проведение экспериментов осуществлялась автором с соавторами из числа сотрудников ФИНЭПХФ РАН, Филиала ФИЦ химической физики РАН и членов команд зарубежных ученых при проведении совместных исследований.

Полнота опубликования результатов. Основные результаты, изложенные в диссертации, представлены в 18 печатных работах. Это 17 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в ведущие международные базы данных и рекомендованных ВАК, а также один патент Российской Федерации.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации. Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Замечания. По диссертации можно отметить следующие замечания:

1) В диссертации показаны многочисленные преимущества применения ионных источников с интерфейсом на основе полимерных трековых мембран, однако не отмечено широкого использования разработанной технологии в коммерческих масс-спектрометрах или другими авторами в их исследованиях.

2) В диссертации отсутствуют прямые указания на результаты сравнения характеристик используемого в работе метода получения газофазных ионов с другими широко используемыми методами.

3) Обнаруженное в экспериментах по полевому испарению ионов увеличение степени ионизации растворителя можно было обсудить более подробно с точки зрения влияния этого эффекта на зарядовое состояние ионов получаемых полевыми методами.

4) В тексте диссертации имеются опечатки.

Сделанные замечания не ставят под сомнение основные положения и результаты диссертации и не снижают их научной значимости.

Заключение. По результатам обсуждения было принято решение: диссертация Балакина Александра Алексеевича, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработан новый метод генерации газофазных ионов, способный обеспечить существенный прогресс в масс-спектральных исследованиях слаболетучих веществ, включая органические и биорганические соединения, а также получены важные результаты в области полевого испарения ионов из растворов, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Диссертационная работа на тему «Интерфейсы на основе трековых мембран в масс-спектральных исследованиях полевого испарения ионов из полярных растворов» соответствует требованиям п. 24 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (с изменениями от 28 августа 2017 г.), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Балакин Александр Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв ведущей организации на диссертацию обсуждён и одобрен на межлабораторном семинаре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-

технический институт (национальный исследовательский университет)» 24 мая 2023 года, протокол № 1.

доктор физ.-мат. наук,
профессор, чл.-корр. РАН




В.Ф. Разумов

кандидат физ.-мат. наук,
доцент

И.А. Попов

Разумов Владимир Федорович

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9

Телефон: 8 (495) 408-59-55

Адрес электронной почты: gazumov.vf@mipt.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», лаборатория Фотоника квантово-размерных структур

Должность: главный научный сотрудник - заведующий лабораторией

Web-сайт организации: <https://mipt.ru>

Попов Игорь Алексеевич

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9

Телефон: 8 (498) 713-91-35

Адрес электронной почты: popov.ia@mipt.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», лаборатория молекулярной медицинской диагностики

Должность: ведущий научный сотрудник - заведующий лабораторией

Web-сайт организации: <https://mipt.ru>