

**К 40-ЛЕТИЮ НАЧАЛА ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ  
ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ  
НА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ФАКУЛЬТЕТЕ  
ХАРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Из воспоминаний В. И. Фареника

Весной 1974 года лаборатория коллективных процессов в плазме (руководитель Алим Михайлович Рожков) кафедры физики плазмы Харьковского университета получила предложение от кафедры технологии радиоэлектронной аппаратуры Минского радиотехнического института (руководитель лаборатории Достанко Анатолий Павлович) об участии в выполнении разработок по нанесению металлических пленок с высокой адгезией на гибкие носители. Инициатором такого несколько неожиданного по тематике предложения был выпускник кафедры физики плазмы 1968 года Пикуль Михаил Иванович, работавший в то время в МРТИ научным сотрудником.

В Минск командировали старшего научного сотрудника Фареника Владимира Ивановича, несколькими месяцами ранее защитившего кандидатскую диссертацию, посвященную исследованию устойчивости плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях, в том числе, и влиянию коллективных эффектов на энергетику продольного пучка ионов из разряда Пеннинга. На месте оказалось, что Михаил Пикуль внимательно ознакомился с авторефератом упомянутой диссертации, что и натолкнуло его на мысль о совместных разработках.

Плодом дискуссий, знакомства с типовым оборудованием, цехами производственного объединения «Интеграл» (одного из крупнейших электронных предприятий тех времен) было скромное устройство, эскиз которого приведен на рис. 1 в стиле, близком к изображенному на салфетке институтской столовой сорок с лишним лет назад в день отъезда в Харьков.

Главное требование Заказчика — монтаж устройства не должен повлечь за собой существенных конструктивных изменений заводской установки термического напыления — было выполнено. Между стандартным испарителем (6) и подложкодержателем (2), выполнявшими роль отражательных электродов ячейки Пеннинга, располагались анод-паропровод (4) и охлаждаемый вакуумный контейнер с катушкой для создания магнитного поля (5).

Давление в вакуумной камере должно было регулироваться стандартным натекателем. Блок питания анода — до 5–6 киловольт при токе 200–300 миллиампер, напряженность магнитного поля до 500–600 эрстед. Упругость пара металла, создаваемого нагревателем, пока оставалась неведомой для получения устойчивого разряда.

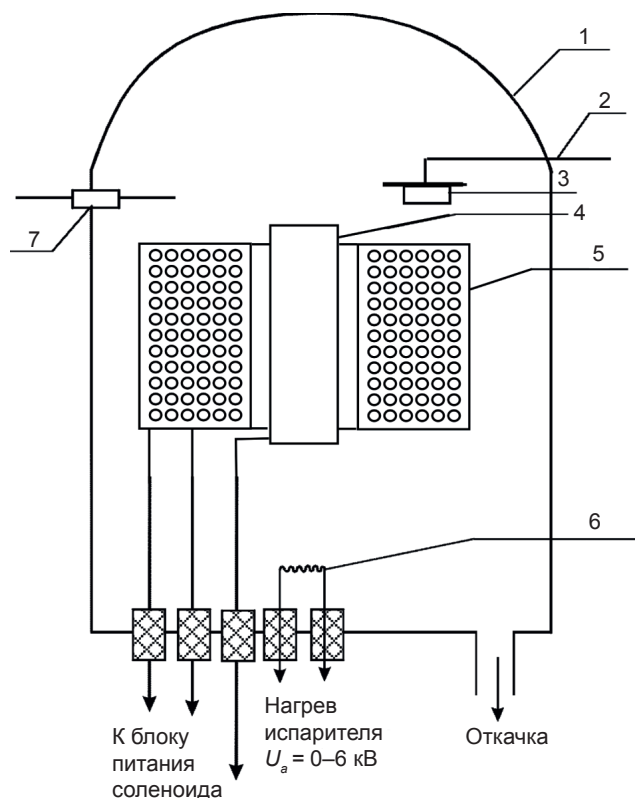


Рис. 1. Схема подколпачного устройства установки для напыления из плазменной фазы металлических пленок: 1 — вакуумная камера, 2 — подложкодержатель, 3 — подложка, 4 — анод-паропровод, 5 — вакуумный контейнер с соленоидом магнитного поля, 6 — испаритель, 7 — заслонка подложки. Подложкодержатель и заслонка без нарушения вакуума могут размещаться на нужные позиции

Расстались мы с минскими коллегами с легким чувством неудовлетворенности. Так хотелось быстрого результата от совета со стороны заезжего консультанта. Вспоминается культовый фильм тех времен по культовой же книге Даниила Гранина «Ию на грозу», где один из персонажей (в фильме — артист В. Лановой) мимолетным замечанием изменил методику многолетних экспериментов. Как оказалось, это было только первое разочарование. Один Михаил Пикуль демонстрировал оптимизм. Как оказалось, это сыграло решающую роль в дальнейших событиях.

Через пару месяцев М. Пикуль сообщил о готовности всех элементов устройства и пригласил на запуск установки. С понятным чувством здоровой злости в Минск выехали автор этих заметок и научный сотрудник Сосипатров Михаил Васильевич.

Необходимо отметить великолепное качество работ по изготовлению подколпачного устройства. Одно удовольствие было его монтировать.

В режиме газонапуска модифицированная ячейка Пеннинга работала исправно. Отладили и разряд в парах металлов. Приступили к нанесению пленок из разряда в парах металлов на кремниевые подложки. Для справки: поверхность кремниевой пластины — зеркальная, соответствует 14 классу полировки. Нанесенная пленка толщиной 1 микрон не должна менять топографию поверхности!!!

Наши пленки были черными!?

Быстротекущие дни командировки не позволили найти нужные решения. А. П. Достанко успокаивал молодежь. Мы же с М. Сосипатровым уезжали, мягко говоря..., недовольные собой. Это было следующее жесточайшее разочарование.

В Минск был направлен совсем еще молодой сотрудник, вчерашний дипломник Редванский Виктор Михайлович. Разочарование постигло и его молодежный энтузиазм.

Но... в Харькове нас всех ожидала серьезная задача, поставленная А. М. Рожковым после консультаций с великолепным Валентином Глебовичем Падалкой: исследование и разработка метода пространственного разделения во вращающейся плазме близких по массе ионов, монтаж модуля для реализации метода с условным названием «Большой Пеннинг» (метрового диаметра камера, громадные многотонные катушки магнитного поля).

Масштаб А. М. Рожкова.

Вся лаборатория коллективных процессов поглощена этими вопросами.

Однако... В августе семьдесят четвертого мы получаем требовательную депешу из Минска («Интеграл» рядом!, «Интеграл» требует!) с новой информацией. Настойчивый Михаил Пикуль отдал наши «черные» пленки в соответствующую лабораторию диагностики поверхности НПО «Интеграл», где зафиксировали оглушительный результат — адгезия наших пленок оказалась на уровне прочности подложки.

Необходимо получить зеркальные пленки!

В Минск А. М. Рожковым спешно отсылается бригада В. Фареник — М. Сосипатров с настоятельной «просьбой» возвращаться с результатом. Надо сказать, еще в самолете и по пути в институт, у нас с Михаилом Сосипатровым — прямо скажем, не специалистов в области физики твердого тела — возникли соображения общезначимого характера.

Имеет аномальную адгезию как результат некоего низкотемпературного спекания, «спровоцированного» бомбардировкой энергетичным ионным пучком. Если переходной слой представляет собой поверхностный слой подложки со вбитыми гвоздиками-ионами, то процесс нанесения из разряда надо останавливать после его формирования, а далее — доращивать пленку термонанесением, так как ионный пучок после формирования слоя продолжает свое воздействие и реализуется эффект «запекания» уже всего объема формируемой пленки. Что и делает её «горелой», черной.

По приезде в институт мы изложили результаты своих сентенций коллегам, были снисходительно выслушаны и, более того, провели несколько процессов нанесения «по ранее утвержденному плану».

Экспериментировали со временем экспозиции нанесения для получения уверенного адгезионного переходного слоя. Пленки были зеркальными, как и должно быть при стандартном термонанесении и, как показала диагностика этих пленок, их микроструктура практически не отличалась от характеристик термопленок. Адгезия была отменной.

Но не было радости, как говорится, в глазах наших друзей-заказчиков. А. П. Достанко не дал и нам с Михаилом Сосипатровым поликовать, а высказал просьбу — бомбардировку ионами в процессе формирования пленки необходимо сохранить?! Специалисты с «Интеграла» не ограничились эксклюзивной адгезией, а прошлись по целому ряду эксплуатационных характеристик наших черных пленок: зернистость, упорядоченность структуры, плотность дефектов. Анатолий Павлович засыпал нас терминами-параметрами, которые отличали наши пленки в лучшую и крайне необходимую для «Интеграла» сторону.

А виновницей всего этого чуда специалистами была признана ионная бомбардировка.

Вот теперь мы с М. Сосипатровым продемонстрировали, как в экстремальных условиях умеют работать ребята Алима Рожкова. Несколько суток установка не выключалась. Лаборатория была заставлена маркированными кассетами с пластинами. Курьеры между институтом и диагностами «Интеграла» шли непрерывной чередой в обоих направлениях: туда — с пластинами, обратно — с результатами. А. П. Достанко с мозговым центром лаборатории осуществлял постоянную корректировку экспериментов: их параметры пленок — наши режимы работы разряда.

А. М. Рожков позволил продлить командировку.

Мы с Михаилом Сосипатровым заглянули во все потаенные уголки сознания в поисках забытых эпизодов общения с ячейкой Пеннинга, прозванной, в свое время, Алимом Михайловичем «неисчерпаемой, как атом». Десятки кривых зажигания разряда в предпробойном режиме (как следствие, «сожженные» и тут же починенные блоки анодного питания), установлен «в тени» нагревателя многосеточный зонд, переделаны на скорую руку подложкодержатель и заслонка, что позволило в одной загрузке обрабатывать несколько пластин. По разрядному току приближенно протабулирована упругость пара металлов — алюминий и медь. Но самый главный контроль — по выходу годных подложек. Гора экспериментального материала, таблицы, графики, толстенный бортовой журнал. Пылить, пылить, пылить.

И, блестящий — во всех смыслах, результат был получен.

Пленки были зеркальными. Высокая адгезия. Низкая плотность дефектов. Равнозернистость и упорядоченность структуры. Подложки из различных материалов: стекло, ситал, кремний, керамика (и, даже, бумага). Нет необходимости химической очистки и прогрева подложки. К тому же, обнаружилось, что удельное сопротивление наших пленок было ниже, чем у массивных образцов наносимых металлов.

Была составлена библиотека процессов очистки и нанесения для различных пар покрытие-подложка.

Положительный, т. е. искомый, прикладной результат был получен. Методом «тыка», по наитию, путем нелогичных, казалось бы, решений. Но!... с определенным объемом знаний и опыта, а — главное — с неумным желанием решить задачу.

Далее пошел рутинный процесс набора статистики, обработки результатов. Внедрение. Обнародование.

Пробный камень в среду научной общественности запустил Михаил Пикуль в конце 1974 года [1]. Со свойственной нашим сябрам основательностью, материал был встречен одобрительно, но без «чепчиков».

Доклад в Киеве весной 1975 года на 4 Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы, аннотация которого приведена ниже, был первой апробацией полученных результатов на достаточно высоком уровне.

Достанко А. П., Ермолаев А. С., Пикуль М. И., Рожков А. М.,  
Сосипатров М. В., Фареник В. И.

## ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РАЗРЯДЕ ПЕННИНГА

Использовалась ячейка Пеннинга с цилиндрическим анодом и полыми отражательными электродами, В передней плоскости одного из электродов располагался подогреватель; многосеточный зонд помещался за электродом и регистрировал ионный пучок, уходящий из разряда вдоль магнитного поля.

В зависимости от скорости испарения алюминия установлено существование двух мод разряда, различающихся по виду вольтамперных характеристик, по величинам падения напряжения на разряде и разрядного тока. Энергия пучка ионов в режиме «малого» разрядного тока ( $I_p \leq 100$  мА) в два-три раза выше энергии пучка во втором режиме ( $I_p > 350$  мА), а интенсивность пучка, соответственно, меньше.

Основные закономерности связи между характерными колебаниями в плазме и полушириной спектра энергий и интенсивностью пучка ионов, установленные в работе [1], сохраняются и в данных экспериментах.

1. В. И. Фареник, В. В. Власов, А. М. Рожков, А. А. Кожарин,  
М. Г. Кривонос. ЖТФ, 44, № 9, 1974.

*В те времена не приняты были «немые» постерные сообщения. Мы с Михаилом Пикулем докладывали последовательно, по степени знания предмета — разрядную и пленочную части — с громадной сцены, кажется, ДК завода «Большевик» перед залом человек на 500. Доклад, при отведенных 15 минутах, занял около сорока, в основном, стараниями двух весьма сурового вида слушателей из первых рядов. Не оставили они нас вниманием и в перерыве конференции. Это были — запоем эти фамилии — Белевский Владимир Петрович, главный технолог киевского НПО «Кристалл» (самого крупного в Украине электронного предприятия) и Ивановский Геннадий Фомич, начальник отдела 41 московского НИИ Вакуумной техники, главный конструктор новой техники при МЭП СССР.*

*В последний день работы конференции мы побывали на «Кристалле», получили приглашение в Москву. Надо признать, для нас, молодых ребят, это было серьезное одобрение нашей работы. Но мы не могли предположить, насколько знаковыми оказались эти встречи.*

*Совместные работы продолжались.*

*Ниже приведен список [2–9] совместных с минскими коллегами публикаций за последующие годы. Следует заметить, что, вплоть до 1991 года, материалы, посвященные отечественным технологиям и оборудованию микроэлектроники, в открытой печати не публиковались. По этой причине мы описывали физические эффекты, а специалисты трансформировали их для своих интересов. В учебниках и обзорах использовались, в основном, иностранные источники.*

*Все эти годы (1974–1978) в лаборатории коллективных процессов (рук. Рожков А. М.) кафедры физики плазмы продолжались исследования неустойчивых состояний вращающейся плазмы, разделения ионов с близкими массами, параметрических эффектов в ВЧ плазме и плазме в Е/Н полях, результаты которых опубликованы в следующих изданиях: ЖТФ, 43, вып. 10, 822, 1974; УФЖ, 19, вып. 5, 822, 1974; Czech. J. of Physics B. 24, B. 6, 632, 1974; ЖТФ, 44, вып. 8, 1788, 1974; ЖТФ, 44, вып. 9, 2023, 1974; ЖТФ, 45, вып. 5, 986, 1975; Физика плазмы, вып. 2, № 4, 1976; УФЖ, Письма в редакцию, № 9, 1976; Письма в ЖЭТФ, 27, вып. 5, 264–267, 1977; Авторское свидетельство № 714997, 1978, при участии В. Т. Толока, К. Н. Степанова, И. И. Залюбовского и, на ранних стадиях исследований, В. А. Супруненко. В лаборатории А. М. Рожкова выполнялись также хозяйственные работы по изучению побочных колебаний в магнетронах (ХИРЭ, организация МЭП СССР, г. Москва), мощных импульсных разрядов (организация МСМ СССР, г. Обнинск).*

В 1976 году М. И. Пикуль представил диссертацию на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 01.04.08 «физика и химия плазмы» в специализированный совет Харьковского университета, который функционировал при физико-техническом факультете. Защита прошла успешно, тематика оказалась интересной для физиков-плазмистов, термоядерщиков. В недрах УФТИ уже оформлялось направление плазменной технологии «Булат», получившей в скором времени мировое признание. Среди отзывов на автореферат, пришедших в адрес совета, был и весьма положительный от Белевского В. П. А первым оппонентом (доктор наук) у нашего претендента на ученую степень был... да, вы не ошиблись: Ивановский Г. Ф.

Одной из целей приезда в Харьков Геннадий Фомич назвал знакомство с лабораторией А. М. Рожкова. Было повторено приглашение посетить НИИ Вакуумной техники.

В Москву, в скором времени, был командирован В. И. Фареник.

В течение 1976–1977 г. г. были неоднократные визиты в НИИ ВТ, знакомство с тематикой и ведущими сотрудниками отдела № 41, материальной базой (особенно интересно) — ионные источники для травления и нанесения покрытий на основе систем со скрещенными ЕН полями, ионно-химическое травление. Знакомые аббревиатуры — УАС, УЗД, фамилии классиков — Жаринов Аскольд Владимирович, Ковальский Георгий Александрович. Маишев Юрий Петрович — собственной персоной в качестве начальника лаборатории отдела 41, автор (с Ковальским Г. А.) легендарного «Радикала».

1977 год, зима. Организован и проведен семинар в НИИ ВТ (г. Москва) «Физические принципы плазменных технологий в микроэлектронике». Докладчики — ученые ХГУ: Н. Т. Гладких, А. Г. Коваль, Н. И. Пелихатый, В. В. Власов, Н. Н. Юнаков, В. И. Фареник.

1977 год, осень, г. Харьков. Состоялась I Всесоюзная школа-конференция молодых ученых «Современные методы нагрева и диагностики плазмы». Впервые работает секция «Плазменные технологии», руководитель Г. Ф. Ивановский.

Заключены первые хозяйственные договора с организациями МЭП СССР.

1978 год, весна. Решение с А. М. Рожковым вопроса о разработке двух самостоятельных направлений на основе лаборатории коллективных процессов: сепарация ионов в плазменной фазе — научный руководитель А. М. Рожков и физические основы плазменных технологий в микроэлектронике — научный руководитель В. И. Фареник.

Разработан спецкурс «Физические основы плазменных технологий в микроэлектронике».

Группе В. И. Фареника выделена аудитория № 201.

Инициативная группа в составе: В. В. Власов., Н. Н. Юнаков, А. А. Бизюков, А. П. Покроев, Ю. П. Крячко, С. И. Карпунин, И. В. Ясин (рук. В. И. Фареник) проводит работы по созданию в комнате № 201 необходимой лабораторной инфраструктуры, формированию парка научно-исследовательских установок, производственных площадей. Определялась научно-техническая тематика.

Но это уже другая история.

С хронологией дальнейших событий после 1978 года интересующийся читатель сможет познакомиться на сайте

<http://www.scpt.org.ua/new/ru/kft.pdf>

(см. презентацию, посвященную двадцатилетию кафедры физических технологий), а также в книге [10].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пикуль М. И. Нанесение тонких плёнок из плазмы металлов // Материалы юбилейной научно-технической конференции сотрудников Минского радиотехнического института. Минск, 1974 г.
2. Достанко А. П., Пикуль М. И., Ермолаев А. И., Рожков А. М., Сосипатров М. В., Фареник В. И. Изучение энергетических спектров ионов алюминия, образующихся в разряде Пеннинга // Сб. аннотаций IV Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы, т. 1, стр. 133, Киев, 1975.

3. Пикуль М. И., Достанко А. П., Дудко С. М., Сосипатров М. В., Фареник В. И. Применение разряда Пеннинга в парах металлов для осаждения пленок в вакууме // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям, 14–16 мая, 1976, Минск.
4. Пикуль М. И., Ермолаев А. С., Холенков В. Ф., Рожков А. М., Фареник В. И. Плазменная очистка подложек интегральных схем // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям, 14–16 мая, 1976, Минск.
5. Пикуль М. И., Ермолаев А. И., Фареник В. И. Экспериментальное исследование параметров плазмы в парах металлов в условиях формирования пленок // Республиканская научно-техническая конференция, февраль 1976, Минск.
6. Достанко А. П., Пикуль М. И., Рожков А. М., Фареник В. И. Использование электрических разрядов в парах металлов для осаждения пленок // Тезисы Всесоюзного совещания «Новые методы нанесения покрытий напылением», октябрь 1976, Ворошиловград.
7. Пикуль М. И., Рожков А. М., Красницкий В. И., Фареник В. И. Выбор оптимальных параметров плазмы в парах металлов при осаждении металлизации полупроводниковых ИС // Тезисы докладов республ. НТК «Комплексная миниатюризация и повышение качества РЭА», 1976, Минск.
8. Достанко А. П., Пикуль М. И., Рожков А. М., Сосипатров М. В., Фареник В. И. О возможности использования плазмы металлов в процессе осаждения тонких пленок // ЖТФ, № 2, 1977.
9. Достанко А. П., Красницкий В. И., Пикуль М. И., Рожков А. М., Фареник В. И. Модель разряда в скрещенных полях // Доклады АН БССР, т. XXI, № 8, 695, 1977.
10. «Харьковскому физтеху 50» // В. В. Власов, И. А. Гирка, Н. А. Азаренков, В. Д. Ходусов. — Х. : ООО «Издательство Майдан», 2012. — 188 с.

*Р. С. В настоящее время на физико-техническом факультете сформировано крупное фундаментальное направление «Газовый разряд в комбинированных электрическом и магнитном полях», включающее широкомасштабные исследования физики различного типа разрядов; физики формирования и транспортировки ионных пучков, потоков плазмы и активированных частиц и процессов взаимодействия их с поверхностями твердых тел различной электрофизической природы; разработку экспериментально-технологических устройств, в том числе малоэнергоемких, получения плазмы и пучков частиц для микро- и нанoeлектроники, медицины, машиностроения; методов и средств диагностики и контроля плазменных технологических процессов и явлений на поверхностях объектов обработки. Реализуются госбюджетная и хоздоговорная тематики силами сотрудников кафедры материалов реакторостроения и физических технологий, кафедры прикладной физики и физики плазмы под общим научным руководством академика НАН Украины Н. А. Азаренкова.*

## СОКРАЩЕНИЯ

МРТИ	Минский радиотехнический институт, сейчас Белорусский государственный университет информатики;
МСМ	Министерство среднего машиностроения СССР;
МЭП	Министерство электронной промышленности СССР;
УАС	ускоритель с анодным слоем;
УЗД	ускоритель с замкнутым дрейфом электронов;
УФТИ	Украинский физико-технический институт, сейчас Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»;
ХГУ	Харьковский государственный университет имени А. М. Горького, сейчас Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина;
ХИРЭ	Харьковский институт радиоэлектроники, сейчас Харьковский национальный университет радиоэлектроники.