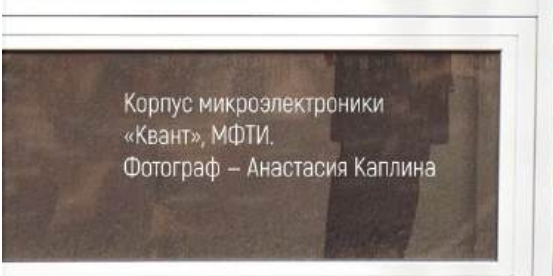


ПОСЛЕ КРЕМНИЯ





Корпус микроэлектроники
«Квант», МФТИ.
Фотограф – Анастасия Каплина

ОТ РЕДАКЦИИ

Дорогие друзья!

Вы держите в руках уникальный выпуск журнала «За науку» — он первый за долгое время (с 2021 года), который редакция решила напечатать на бумаге. Из этого можно заключить, что дела идут на лад; но главное, что об этом свидетельствует, — статьи в этом номере журнала. Откроем вам небольшой секрет: нигде, ни на одной полосе, мы не стали писать, что это не регулярный выпуск «За науку», а спецвыпуск, посвященный микроэлектронике. Между тем это так и есть. В нынешнем году в России были отобраны 10 научных центров мирового уровня, которые будут ежегодно получать гранты на сумму более 300 миллионов рублей для обеспечения долгосрочных прорывных исследований. Одним из них стал Центр перспективной микроэлектроники МФТИ. И потому редакция «ЗН» решила поговорить с учеными (а через их посредство и с вами, читатели) о том, что собой представляет закон Мура 60 лет спустя (с. 22), на что похож «мир кремния» (с. 16) и на что он будет похож без кремния (весь раздел «В фокусе»), чем занимаются сейчас исследователи в самых передовых отраслях российской микроэлектроники на самых разных уровнях от президента РАН (с. 34) до самых начинающих (с. 66). И даже фантастический рассказ в конце журнала (это в первый раз, но не в последний!) — тоже на ту же тему. Вам понравится!

СОДЕРЖАНИЕ



КРУПНЫМ ПЛАНОМ

- 4 **Реактор атомно-слоевого осаждения**
Фото Станислав Любаuskас / пресс-служба РФ

ОТКРЫТО

- 6 **Физика**
Ловушка для света
- 7 **Химия**
Метод прогнозирования
- 8 **Биофизика**
На МКС напечатали кристаллы белка
- 9 **Технологии**
Чип для экспресс-тестов
- 10 **Климатология**
Нагревается ли Баренцево море?
- 11 **История**
Конокрадство в дореволюционной России

МАТЕМАТИКА

- 12 **Премия Абеля – 2025**
Михаил Цфасман о Масаки Касиваре

КАРТИНА МИРА

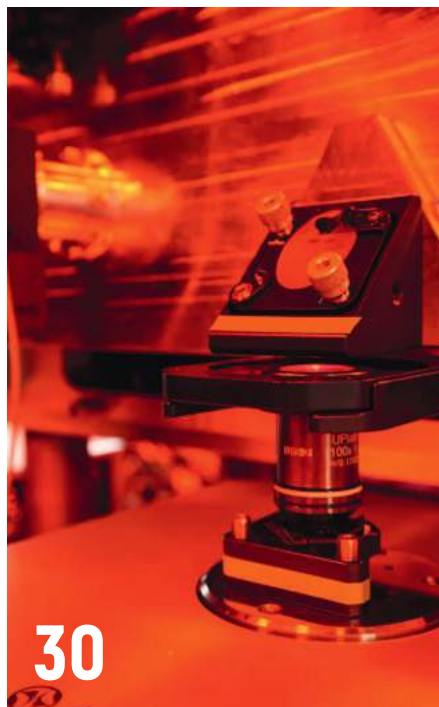
- 16 **Мир кремния**
- 22 **Закон Мура 60 лет спустя**
Рассказывает Юрий Аммосов
- 26 **Бутылочное горлышко прогресса**
Как ASML стала богом микроэлектроники
- 30 **Репортаж из конструкторского бюро оптической литографии**

ИНТЕРВЬЮ

- 34 **«Независимость нашей страны тесно связана с наличием собственной микроэлектронной и научной базы»**
Интервью с Геннадием Красниковым

В ФОКУСЕ

- 39 **Прыжок в квантовый поезд**
Колонка Василия Столярова
- 40 **Задачи на плоскости**
- 44 **Быстрая, энергоэффективная и энергонезависимая радиационно-стойкая память**





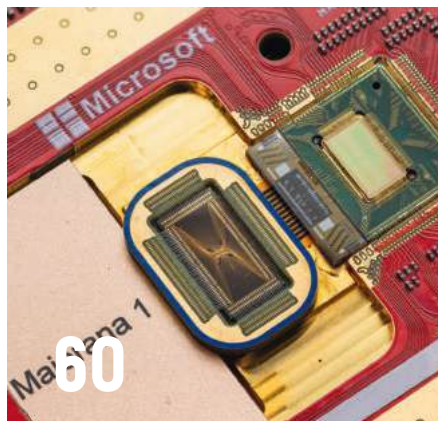
50 **Наша память на FeFET**
Колонка Анастасии Чуприк

52 **Смотреть и видеть**
Какие умные сенсоры приходят на смену камерам наблюдения

58 **Строго квантованием**

ИСТОРИЯ

60 **Этторе Майорана и его уравнение**
Рассказывает Алексей Левин



КАРЬЕРА

66 **На что может рассчитывать молодой ученый в науке и на производстве**

ПРАВИЛА ЖИЗНИ

70 **«Критерий успеха – решение, которое сам придумал и разработал», правила жизни Владимира Трещикова, генерального директора компании «Т8»**

COMMUNITY

76 **Железное сердце Элизона**



№1 (1968) 2025 ГОД

Издатель

Центр научной коммуникации МФТИ

Главный редактор

Иван Шунин

Визуальное представление

Анатолий Лапушко, Николай Лисов,
Эмма Бурляева

Фотографы

Анастасия Каплина, Наталья Арефьева

Авторские материалы ученых

Юрий Аммосов, Михаил Цфасман,
Алексей Левин

Колонки

Василий Столяров, Анастасия Чуприк

Корреспонденты

Варвара Кравцова, Татьяна Небольсина,
Игорь Воронцов, Анастасия Медведева,
Елена Иканина, Андрей Санников,
Евгения Щербина, Василий Парфенов

Корректор

Ирина Степачева-Бохенек

Ректор МФТИ

Дмитрий Ливанов

Проректор по научной работе

Виталий Баган

Директор Центра научной коммуникации

Егор Быковский

е-mail, ТГ и сайт редакции:

zn@phystech.edu

<https://t.me/zanauku>

zanauku.mipt.ru

Подписано в печать

01.09.2025

Тираж 1400 экз.

Отпечатано в типографии

ООО «Андоба пресс», 105005

г. Москва, Аптекарский пер., 4, стр. 2

Корпоративное издание. Перепечатка материалов невозможна без письменного разрешения редакции журнала.

Мнения и высказывания, опубликованные в материалах журнала «За науку», могут не совпадать с позицией редакции





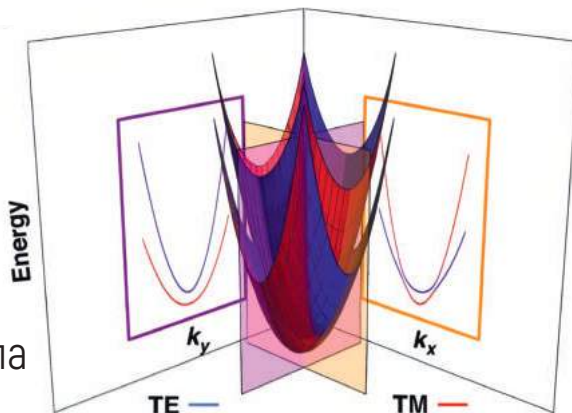
Андрей Маркеев
(главный научный
сотрудник Центра
коллективного
пользования уни-
кальным научным
оборудованием
в области нанотех-
нологий) и реактор
атомно-слоевого
осаждения
(подробнее
на стр. 41).
Фото Станислав
Любаускас /
пресс-служба РНФ

ЛОВУШКА ДЛЯ СВЕТА

Асимметрия в кристалле закрутила свет в топологический вихрь

Игорь Воронцов

В мире электроники ученые давно научились управлять потоком электронов с помощью магнитных полей, используя не только их заряд, но и собственное вращение — спин. Физики мечтают достичь подобного контроля и над частицами света, фотонами, чтобы создать сверхбыстрые и энергоэффективные оптические компьютеры. Однако главная трудность заключается в том, что фотоны не имеют электрического заряда и почти не взаимодействуют с обычными магнитными полями. Решение этой задачи лежит в плоскости создания «синтетических» магнитных полей — особых условий в материале, которые заставляют фотоны вести себя так, будто на них действует настоящее магнитное поле. Это взаимодействие может порождать так называемые топологические состояния — особые устойчивые к рассеянию конфигурации, защищенные фундаментальными законами физики. Однако создание таких систем, работающих при комнатной температуре и не требующих сложнейших производственных процессов, оставалось трудноразрешимой задачей. Именно этот вызов и приняли авторы нового исследования — международный коллектив ученых из Греции, Китая, МФТИ и СПбГУ. Их целью было создать простую и эффективную платформу для генерации топологических фотонных состояний. Ключевым компонентом они выбрали гибридные двумерные перовскиты. Эти кристаллы обладают особым свойством — сильной оптической анизотропией, что означает, что свет разных поляри-



Расчетное взаимодействие двух мод с разной поляризацией и противоположной четностью.
© Light: Science & Applications



**Алексей Кавокин,
директор
Международного
центра теоретической
физики
имени А. А. Абрикосова
МФТИ:**

“ ”

В результате сочетания эффектов оптической анизотропии и спин-орбитального взаимодействия световых мод удалось, в частности, реализовать поларитонные состояния с отрицательной эффективной массой. Такая «антигравитация» квазичастиц в кристаллах может позволить реализовать новую, сверхтвердую, фазу поларитонной светоматерии. Наша работа подготовила почву для новых открытий, которые могут обогатить нас сверхчувствительными оптическими приборами или, например, мантией-невидимкой.

заций движется сквозь них с разной скоростью. Для эксперимента ученые помещали каплю горячего раствора с прекурсорами перовскита между двумя зеркалами, образующими оптический микрорезонатор. По мере остывания раствора внутри резонатора самопроизвольно

вырастали тончайшие кристаллы перовскита, свободно ориентируясь в пространстве, что избавило от необходимости применять дорогую нанолитографию.

Когда свет попадает в такой «сэндвич», начинается сложный физический процесс. С одной стороны, сам резонатор расщепляет свет на две поляризации, что уже создает базовое синтетическое поле. С другой — анизотропный кристалл перовскита вносит дополнительное, гораздо более сильное расщепление, зависящее от его ориентации. Сочетание этих двух эффектов порождает сильное спин-орбитальное взаимодействие для фотонов. Это взаимодействие заставляет световые моды с разной поляризацией и разной пространственной структурой «чувствовать» друг друга и гибридизироваться. В результате в энергетическом спектре системы появляются так называемые антипересечения — верный признак сильного взаимодействия. Более того, их взаимодействие со светом сильно зависит от ориентации плоскости поляризации. Эта анизотропия, или двулучепреломление, означает, что свет с разной поляризацией «видит» разный показатель преломления, проходя через кристалл.

Ученые показали, что созданное ими эффективное магнитное поле имеет сложную структуру. В этом пространстве существуют особые «диаболитические точки», где эффективное поле полностью исчезает, а энергетические уровни фотонов соприкасаются. Эти точки являются топологическими сингулярностями.



МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

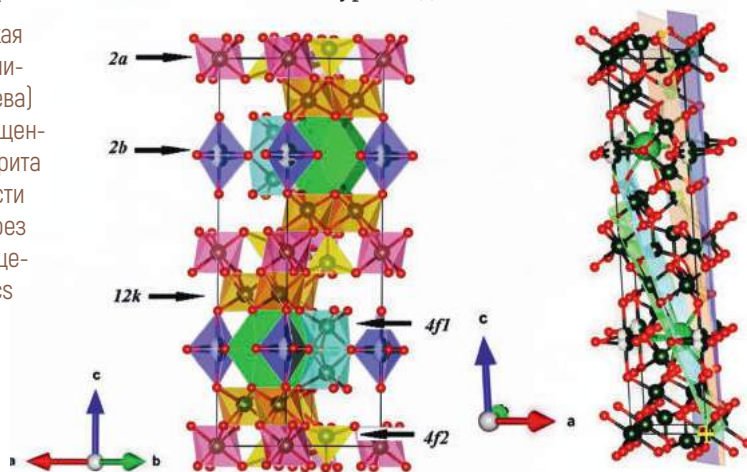
Елена Иканина

Ученые разработали методику получения магнитов с заданными рабочими характеристиками

Для усовершенствования электроники необходимы новые функциональные материалы, в первую очередь магниты. Уникальными магнитными свойствами обладают ферриты — сложные оксиды трехвалентного железа и других металлов. Внедрение в структуру ферритов различных элементов, так называемое допирование, — перспективный способ повышения их эксплуатационных характеристик. Химики из лаборатории полупроводниковых оксидных материалов МФТИ с коллегами разработали метод получения и прогнозирования эксплуатационных характеристик галлий-замещенного гексаферрита бария $\text{BaFe}_{11}\text{GaO}_{19}$. Сначала ученые тонко измельчили смесь карбоната бария и оксиды трехвалентного железа и галлия в ступке и спрессовали в таблетки. Затем их постепенно нагрели до 1400 °С. Синтез проводили в течение 5 часов. После чего образцы охладили в печи до комнатной температуры. Преимущество этого твердофазного синтеза — в легком внедрении в производство и масштабировании.

Для исследования структуры полученных образцов ученые применили дифракционный структурный анализ, нейтронографию и мессбауэровскую спектроскопию. Рельеф поверхности образцов изучили методом сканирующей электронной микроскопии, а магнитные свойства оценили на магнитометре. Температура Кюри исходного гексаферрита бария составляет 457 °С. Следовательно, ниже этого значения фазовое состояние и магнитные свойства соединения изменяться не будут, и датчик тоже не сработает. Модифицируя ферриты, ученые добивались снижения температуры Кюри до комнатной. Наибольший эффект был достигнут, когда в качестве допантов использовали р-элементы с большим ионным радиусом, в частности галлий. Эти элементы занимают определенное положение в кристаллической решетке, не изменяя ее, но оказывая влияние на магнитные свойства ферритов. Результаты работы будут полезны для производства датчиков, работающих в широком температурном диапазоне.

Кристаллическая решетка недопированного (слева) и галлий-замещенного гексаферрита бария. Плоскости проведены через позиции замещения. © Ceramics International



Светлана Гудкова,
заместитель
заведующего
лабораторией
полупроводниковых
оксидных материалов
МФТИ:

“ ”

Замещение железа галлием в структуре гексаферрита бария почти в 20 раз снижает температуру Кюри. Благодаря этому синтезированный нашей командой материал можно использовать при изготовлении датчиков, устанавливаемых даже в живых системах.



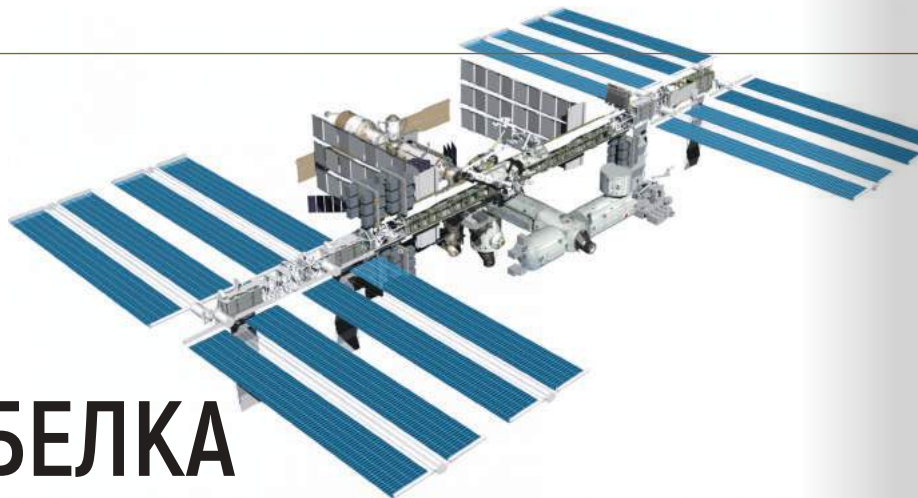
Денис Винник,
заведующий
лабораторией
полупроводниковых
оксидных материалов
МФТИ:

“ ”

Нашей научной группой накоплены результаты исследований в области синтеза и изучения ферритов, использование которых позволяет целенаправленно выбирать составы под требования конкретных приложений, в частности можно выбрать феррит с определенным интервалом рабочих температур.



На МКС НАПЕЧАТАЛИ КРИСТАЛЛЫ БЕЛКА



Анастасия Медведева

Прибор «Орган.Авт» предназначен для печати тканей из живых клеток, но ученые смогли адаптировать его под новую задачу и получить высокоупорядоченные кристаллы

Получение высококачественных кристаллов белка — важная задача, потому что с их помощью можно выявить трехмерную структуру белка и подобраться к разгадке его свойств. Когда рентгеновские лучи проходят сквозь кристаллы, они отражаются от отдельных атомов, создавая уникальные узоры — карты дифракции. Именно благодаря этим картам ученые получают точную информацию о взаимном расположении всех атомов в структуре белка. Кристаллы более высокого качества дают более четкие и точные дифракционные изображения, предоставляя исследователям более подробную информацию. В погоне за совершенством кристаллов исследователи вышли за пределы земного притяжения — в условиях микрогравитации росту кристаллов не мешают конвекционные потоки, а сами кристаллы в ходе роста не оседают на дно кюветы. Эти эксперименты начались еще на станции «Мир», но и на сегодняшний день поиск надежных методов кристаллизации белков в космосе, позволяющих точно контролировать все этапы процесса, продолжается. Новый подход, предложенный коллективом специалистов из МФТИ с коллегами, заключался в использовании уже расположенного на МКС прибора — магнит-

ного биопринтера «Орган.Авт». Его основная задача — формировать органы и ткани из живых клеток. Отсутствие гравитации позволяет перемещать частицы с помощью магнитного поля, «подталкивая» их парамагнитными молекулами солей гадолиния. «Первопроходцем» был выбран лизоцим из куриных яиц — хорошо изученный белок, формирующий крупные



**Кристофер Маккарти,
научный сотрудник
Центра молекулярных
механизмов старения
и возрастных
заболеваний МФТИ:**

“ ”

Используя уникальную среду космоса, мы можем раскрывать подробные структуры белков, что дает нам ценную информацию, которая может помочь в разработке новых методов лечения и новых лекарств.

кристаллы. Старый знакомый не подвел, и на Землю вернулись кристаллы, размером до 1 мм, хорошо различимые даже невооруженным глазом. Их качество позволяет определить положение каждого атома в трехмерной макромолекуле белка. Новый метод сочетает преимущества микрогравитации — она препятствует процессам осаждения и конвекции, с возможностью точно контролировать условия формирования кристаллов и непосредственно наблюдать за их ростом.

К великому огорчению экспериментаторов, на самых крупных кристаллах были обнаружены трещины, скорее всего, возникшие при спуске образцов вследствие перепадов температуры. Однако экземпляры поменьше оказались неповрежденными, их характеристики вполне сравнимы с лучшими земными образцами. По некоторым характеристикам, например мозаичности (показывает, насколько отдельные микроблоки кристалла смещены друг относительно друга), космический образец оказался лучше, несмотря на свой непростой «жизненный путь». Кроме того, ученые отметили положительный эффект от присутствия солей гадолиния: хотя магнитное поле не влияло на процесс кристаллизации напрямую, молекулы белка включали эти ионы в свою кристаллическую решетку, стабилизируя ее структуру. Также Gd^{3+} хорошо заметен на дифракционной картине, что облегчает создание высококачественных карт электронной плотности при определении структуры белка.



Схема строения
ПЦР-чипа и графическое
представление
фототермического эффекта
© Laser Photonics
Reviews

ЧИП для экспресс-тестов

Анастасия Медведева

Новая платформа для проведения ПЦР позволяет уменьшить время, необходимое для достижения достаточной для анализа концентрации ДНК, с одного-двух часов до нескольких минут

Открытие метода ПЦР (полимеразной цепной реакции) произвело революцию в медицине, науке и повседневной жизни человечества. Благодаря ему можно выяснить, присутствуют ли в образце искомые последовательности ДНК, что можно использовать для генноинженерных манипуляций, диагностики заболеваний и в расследовании преступлений. Однако для проведения классической ПЦР необходимо довольно много времени (порядка двух часов) и громоздкое лабораторное оборудование. ДНК в образце нужно амплифицировать, то есть увеличить число копий нужного фрагмента. Для этого нужно сперва «расплести» двойную спираль, нагрев образец до 94–98 °С, а затем охладить до температуры, при которой полимеразы достроят каждую из двух полцепочек ДНК до целой. Чтобы достичь необходимой для обнаружения концентрации, циклы нагрева-охлаждения необходимо провести более 30 раз.

Фотонная ПЦР является модификацией классического метода — в ней используют фототермический эффект, то есть способность некоторых материалов преобразовывать энергию светового излучения в тепловую. Таким образом, нагреть образец можно, осветив светодиодами, а охладить — с помощью простого обдува вентилятором. Но для проведения фотонной ПЦР нужны подложки, которые сложно изготавливать, и цена изделия получается высокой. Чтобы преодолеть эти недостатки, ученые из Южной Кореи и Центра фотоники и двумерных материалов МФТИ создали многослойную подложку, используя исключительно методы нанесения растворов. Помимо золотых наночастиц исследователи применили двумерный материал карбид-титановый максен. Максены, подобно графену и золоту, обладают фототермическим эффектом и, кроме того, хорошо растворяются в воде. Это дает возможность наносить их на



**Александр Барулин,
ведущий научный
сотрудник
лаборатории
контролируемых
оптических
наноструктур МФТИ:**

“ ”

Синергия максенов с золотыми наночастицами позволила создать практически идеальный поглотитель света в виде МИМ-структур с сильным фототермическим эффектом. Их применение позволит ускорить определение ДНК патогенов ввиду эффективного и быстрого нагрева для проведения этапов денатурации во время ПЦР.

поверхность, как краску из распылителя. Кроме того, в двумерном материале свет внутри многократно отражается, что увеличивает эффективность поглощения излучения.

В ходе экспериментов ученые смогли увеличить концентрацию ДНК в образце, нанесенном на чип, всего за десять циклов нагрева-охлаждения, что заняло около пяти минут. В качестве источника света использовали ИК-светодиод.

Недорогие и простые в применении чипы могут найти применение в качестве экспресс-тестов на инфекции в каждой поликлинике.



НАГРЕВАЕТСЯ ЛИ БАРЕНЦЕВО МОРЕ?

Андрей Санников

Исследование российских ученых поможет прогнозировать ледовые условия и перспективы рыбного промысла в Арктике

В последние десятилетия Арктика все более привлекает внимание ученых, поскольку этот регион переживает стремительные климатические изменения. Они выражаются в сокращении ледяного покрова и высоких темпах увеличения среднегодовой температуры воздуха.

Один из вопросов, который интересует исследователей: распространится ли влияние теплой Баренцевоморской ветви Атлантических вод (продолжение атлантической системы течений Гольфстрим) на восток — в северные сибирские моря. От этого во многом зависит рыбный промысел в этих акваториях и ледовая проходимость Севморпути. Ученые из МФТИ, Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН и Арктического и антарктического научно-исследовательского института провели комплексный анализ материалов ежегодных морских экспедиций за полвека (с 1977 по 2024 год) и нашли ответ на вопрос,

как охлаждаются Атлантические воды на востоке Баренцева моря и далее в желобе Святой Анны (на севере Карского моря). Раньше Атлантические воды охлаждались в западной части Баренцева моря в результате теплообмена с холодным воздухом. Однако, распространяясь дальше на восток, они перекрывались более пресными водами в восточной части Баренцева моря и теряли контакт с атмосферой. В последние десятилетия же Атлантические воды стали теплее и уже не успевают охладиться до низких температур в западной части Баренцева моря. Значит ли это, что теперь более теплые воды достигнут и глубоко-водной арктической акватории? Оказалось, что в дело вступил еще один механизм охлаждения, на этот раз действующий на уже опустившиеся на глубину Атлантические воды. Дело в том, что при образовании льда из морской толщи изымается большое количество

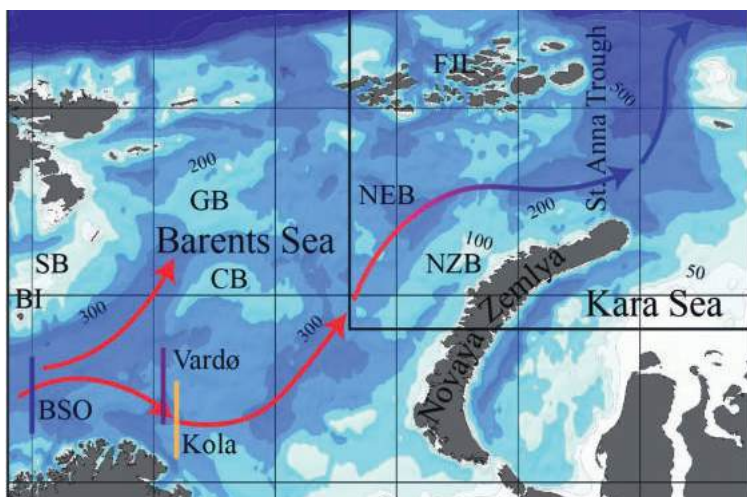


Александр Осадчиев,
заведующий
лабораторией
арктической
океанологии МФТИ:

“ ”

Там, где в большом количестве формируется молодой лед, образуются вертикальные потоки холодных вод, которые смешиваются с теплыми Атлантическими водами и охлаждают их. До 2000-х годов это происходило в центральной части Баренцева моря, теперь зона смешения холодных и плотных вод с Атлантическими водами сместилась в северо-восточную часть Баренцева моря и в желоб Святой Анны. Этот механизм замедляет и ограничивает распространение тепла, поступающего из Атлантики в восточные области Арктики.

пресной воды, а оставшиеся массы становятся более солеными, плотными и тяжелыми. Эти холодные воды образуются в большом количестве и опускаются, тем самым охлаждая глубинные слои. Так, охлаждение холодным воздухом поверхности моря может проникать достаточно глубоко и достигать Атлантических вод, которые уже потеряли контакт с атмосферой. Поэтому в ближайшие годы значительное увеличение промысловой продуктивности в северной части Карского моря маловероятно. Что же будет через 10 и 20 лет, достоверно предсказать сейчас, по-видимому, невозможно. Слишком сложные зависимости и обратные связи регулируют потоки тепла из Северной Атлантики в Арктику.



Карта Баренцева моря и желоба Святой Анны, с общей схемой циркуляции притока атлантических вод
© Frontiers in Marine Science



КОНОКРАДСТВО В ДОРЕВОЛЮЦИОННОЙ РОССИИ

Евгения Щербина

Особенности этого явления, включающие жестокие уголовные наказания, крестьянский самосуд и межэтнические конфликты, были выявлены в ходе исследования юридических источников

Николай Пимоненко.
«Поимка конокрада»
Харьковский художе-
ственный музей



Конокрадство считалось серьезным преступлением в дореволюционной России.

Для анализа проблемы истории Оксана Егорова из МФТИ и Любовь Щанкина из РЭУ им. Г. В. Плеханова изучили широкий круг исторических источников, преимущественно юридических. Среди них — Полное собрание законов Российской Империи; Материалы для истории крепостного права в России: извлечения из секретных отчетов Министерства внутренних дел за 1836–1856 годы; Сборник циркуляров и инструкций Министерства внутренних дел за 1878 год; а также сообщения в прессе. Конокрадство считалось тяжким уголовным преступлением. Уложение о наказаниях 1845 года предусматривало за названные действия ссылку в Томскую или Тобольскую губернии. В отношении виновных могли быть применены телесные наказания в виде розог; также их могли направить в исправительные арестантские роты гражданского ведомства на срок от года до четырех лет.

Однако для осуществления правосудия необходимо было поймать вора, что было крайне сложно, так как конокрады действовали быстро. «Украденная лошадь через

несколько часов, иногда прежде чем хозяин заметит пропажу, передана вором в другие руки за 20, 30... верст за 200 и более, где легко сбывается на ярмарках и базарах», — писали в полицейских отчетах 1836–1856 годов. Кроме того, полицейских в сельской местности не хватало, так что крестьяне зачастую сами ловили похитителей



**Оксана Егорова,
профессор Учебно-
научного центра
гуманитарных и соци-
альных наук МФТИ:**

“ ”

В крестьянском хозяйстве лошадь занимала особое место среди домашних животных. Число лошадей в хозяйстве напрямую определяло благосостояние семьи. Отсутствие лошади свидетельствовало о бедности.

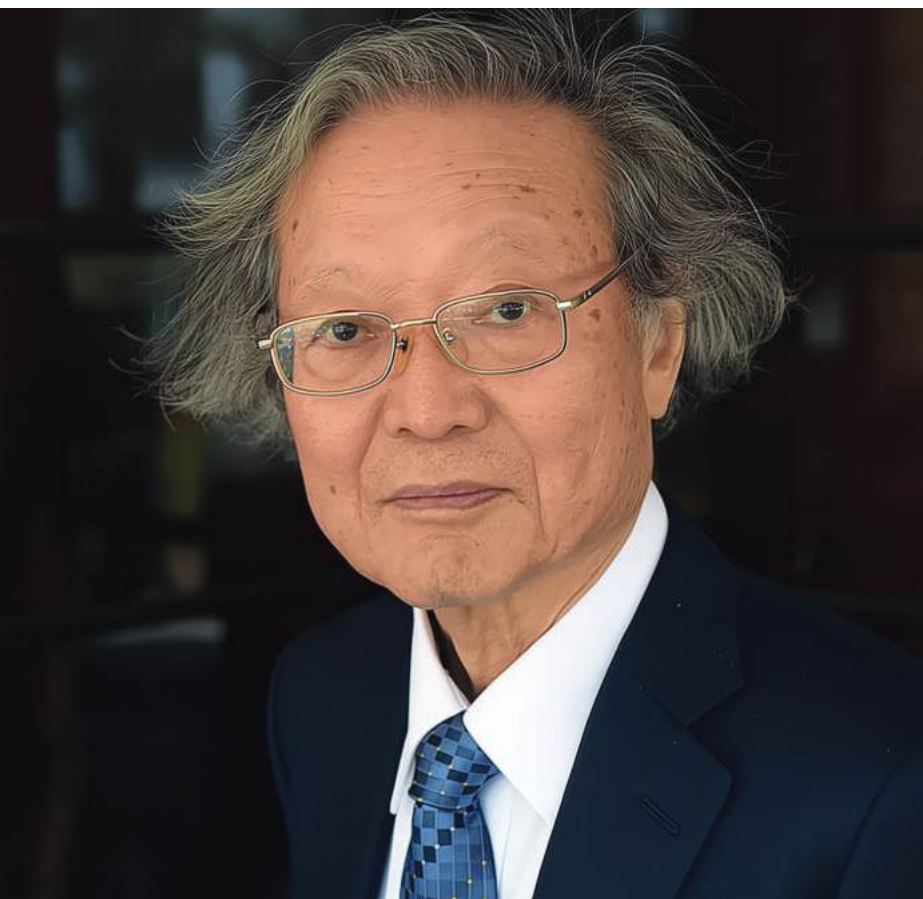
и устраивали над ними жестокие расправы.

Жестокость объяснялась тем, что конь был кормильцем семьи и единственным транспортным средством. Лишиться коня зачастую означало для крестьянской семьи разорение или даже смерть. Несмотря на суровые наказания лошадей воровали часто. За три года, в 1864–1866 годах, в 21 губернии России было украдено 13 856 лошадей. Продавать краденых лошадей было очень прибыльно. Как одни крестьяне не боялись потерять своего главного кормильца, так другие, в другом регионе, были рады приобрести его у скупщиков за меньшую цену. Иногда банды конокрадов тиранили целые деревни или переходили от краж к рэкету: предлагали защищать крестьянские табуны от других конокрадов за плату. В то же время некоторые помещики нанимали бывших конокрадов пастухами своих стад, и те были весьма эффективны в этой роли, так как знали все приемы и методы своих товарищей. Если у такого пастуха крали коня, то его можно было разыскать и вернуть через воровскую сеть контактов.



Михаил Цфасман

КТО ТАКОЙ МАСАКИ КАСИВАРА?



В марте был объявлен
новый лауреат
Абелевской премии
[ее еще называют
«Нобелевской премией
по математике»] —
им стал японец
Масаки Касивара.

О том, чем именно он известен,
мы попросили рассказать
Михаила Цфасмана,
вице-президента
Независимого московского
университета и научного
руководителя Высшей школы
современной математики МФТИ

Касивару я привык называть Кашиварой потому что мы, естественно, читали его статьи по-английски, а он там пишется через sh (Masaki Kashiwara). Он старше меня лет на семь, а его наиболее значимые работы появились, когда я еще был студентом мехмата. Ну какие-то появились и до, но его имя я впервые услышал году, наверное, в 1973–74-м. Для меня эти работы очень тесно связаны с работами другого Абелевского лауреата Пьера Делиня, а также с работами людей, которых я очень хорошо знаю лично: Иосифа Бернштейна и Александра Бейлинсона.

Касивара мне больше всего известен тем, что он один из авторов концепции **D-модуля**. Что такое D-модуль? В сознании многих людей существуют две совершенно далекие друг от друга области математики. Первая — дифференциальные уравнения в частных производных. Это вещь, которая очень нам нужна для физики, для разных других наук, ну и с точки зрения самой математики тоже очень интересная. Мы привыкли, что это часть науки о непрерывных функциях, о производных и других таких вещах — в широком смысле математического анализа. Того, чему нас начинают учить на первом курсе университета и даже

немножко в старших классах математических школ. И совершенно отдельно от этого в массовом сознании стоят алгебра и геометрия, из которых родилась алгебраическая геометрия, которую я очень люблю и с которой, собственно, связано мое базовое математическое образование.

А смысл D-модулей в том, чтобы две упомянутые области объединить: научиться решать задачи, связанные с дифференциальными уравнениями в частных производных в терминах и техниках, которые более свойственны алгебраической геометрии. Как это достигается? Дальше я буду сознательно огрублять, чтобы было

понятнее, поэтому если среди аудитории есть математики, то пусть они ко мне не сильно придираться.

Одним из основных инструментов и объектов математики являются многочлены. Что такое многочлен, мы знаем еще по школе. Это сумма каких-то коэффициентов, умноженных на произведения неизвестных. То есть сумма мономов. Из математического анализа мы знаем, что есть такой оператор, как дифференциал. И если переменных много, то мы можем дифференцировать по одной переменной, по другой переменной, и так далее. А если символы этих дифференциалов мы будем — чисто формально — считать другими переменными, то есть у нас появляются многочлены не только от переменных, но и от дифференцирования по этим переменным. И с этим математическим объектом можно работать. После этого оказывается, что — в очень грубом смысле — дифференциальное уравнение является некоей структурой, которая называется модулем над кольцом дифференциальных операторов. То есть чем-то, на чем действуют вот эти многочлены.

Это исходное понятие D-модуля. Когда Касивара их придумывал, то он очень сильно опирался на работы своего учителя Микио Сато (основатель алгебраического анализа. — «ЗН») и на работы Иосифа Бернштейна, которые были перед этим. Бернштейн, грубо говоря, его ровесник. Но для меня самое замечательное не это.

Самое замечательное для меня вот что. Что такое алгебраическая геометрия? Нас в школе учили, что окружность радиусом единица с центром в нуле можно задать уравнением $x^2 + y^2 = 1$. И вот все то, что можно задать системой уравнений от нескольких переменных (где каждое из этих уравнений — многочлен, равный нулю) — это то, что называется алгебраическим многообразием.

И изучать эти алгебраические многообразия можно как геометрическими методами, например

какую-нибудь касательную провести, или что-нибудь еще, так и алгебраическими. То есть можно рассматривать какие-то функции на этих кривых поверхностях, которые тоже задаются многочленами, и здесь возникает вот такая наука. В этой науке неким прорывом стало применение методов, которые родились в другой области математики, алгебраической топологии. Тогда возникли такие понятия, как понятие групп гомологий, групп когомологий, а потом и несколько более общее понятие — пучок.

Что такое пучок, я объяснять не буду, потому что нематематику я это не объясню. Но, опять же, это некая надстройка над алгебраическим многообразием. И вот эти D-модули, которые открыл Касивара, они очень похожи на эти пучки, хотя и не совсем. А в начале 1980-х годов Пьер Делинь, Иосиф Бернштейн и Александр Бейлинсон сделали замечательную работу, в которой появилось понятие **извращенного пучка**.

Иногда его еще называют перверсным. По-английски *perverse sheaf*, самый первый термин был французский — *faisceaux pervers*. Что в нем такого извращенного? То, что извращенный пучок пучком не

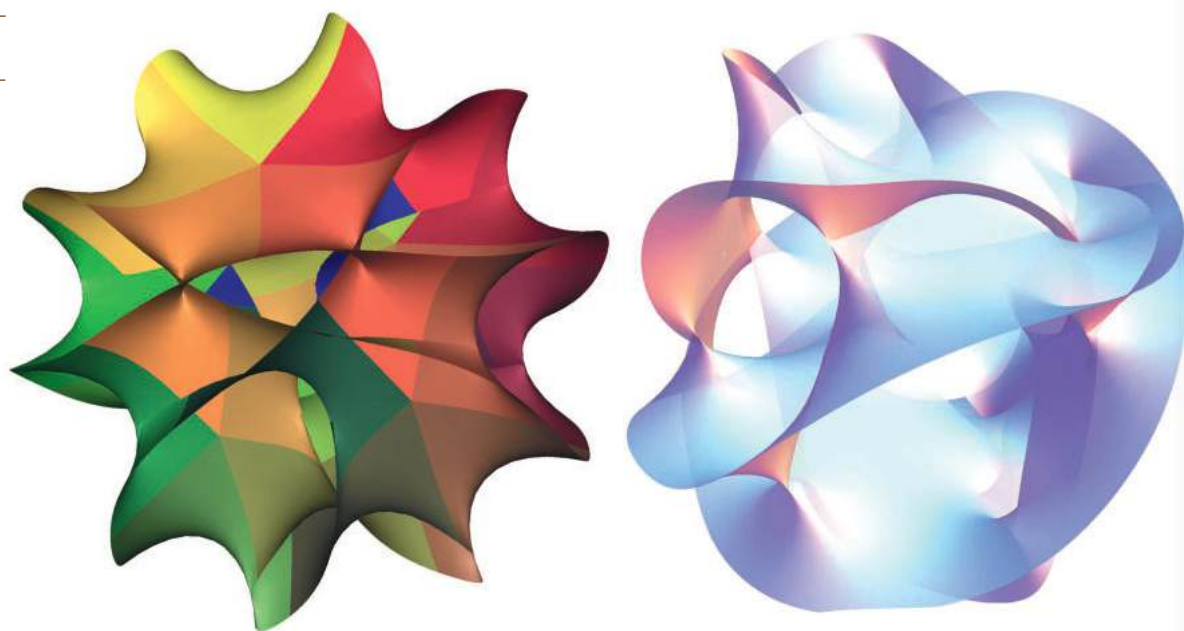
является. Он является их комбинацией, комплексом пучков. И вот оказалось, что D-модули связаны с этой наукой. Это очень хорошо с тех пор развивалось, как самим Касиварой, так и массой народа по всему миру, и сегодня применяется в очень разных областях математики.

Это лишь одно из его больших достижений. Другое достижение — то, что называется **микрлокальным анализом**. Есть у вас функция. Вы на эту функцию можете смотреть целиком. Для простоты представьте себе просто какой-нибудь многочлен от одной переменной над вещественными числами. И вы на нее можете смотреть глобально, скажем как на весь график сразу, а можете взять и посмотреть, что происходит рядом с точкой. Понятие производной, например, это локальное понятие, потому что оно относится не ко всему графику, а ровно к той точке, в которой вы проводите касательную. А дальше вам уже надо представлять не кривую, а хотя бы поверхность. Представьте поверхность, точку на ней и касательную плоскость в этой точке. И после этого давайте смотреть не только на маленькую-маленькую окрестность этой точки, но и возьмем в этой касательной плоскости какую-нибудь касательную прямую и посмотрим на окрестность этой касательной прямой. Когда мы смотрим и на то, и на другое, то это уже называется не локальный анализ, а микрлокальный анализ. Здесь я, опять же, сильно огрубил, потому что надо брать не касательное пространство, а касательное расслоение, но мы в такие детали углубляться не будем. Важно тут то, что мы изучаем еще более локально, чем просто в точке. Вот эта штука тоже оказалась очень полезна для дифференциальных уравнений, и у Касивары есть красивые работы на эту тему. Ну и многое-многое другое. Он работал с обобщенными функциями. Обобщенные функции — это такая тоже замечательная наука, существует многотомник Израила Гельфанда, который так и назы-



**Михаил Цфасман,
вице-президент
Независимого московского
университета,
научный руководитель
Высшей школы современной
математики
МФТИ**

Двумерные проекции пятимерного (слева) и трехмерного пространств Калаби – Яу



вается «Обобщенные функции». И даже я, занимаясь в основном теорией чисел и алгебраической геометрией, в своих работах эти обобщенные функции использую, они теперь вообще везде. Он занимался этим и другими похожими на это вещами.

Что еще можно сказать? Касивара являет собой редкий случай японского математика очень высокого уровня, который в основном работал в Японии, потому что всякие знаменитые японские математики, как Кодайра и Мори, лауреаты Филдсовских премий, — они значимую часть своей жизни провели все-таки в Америке. Почему Касивара так решил, я не знаю, я с ним лично не знаком. Но его карьера складывалась, в общем, довольно удачно. После Токийского университета, где он сделал свои D-модули (они появились уже в его магистерском дипломе), он учился в аспирантуре в Киото, и там же, в Киото, и остался. В Киото есть пара научно-исследовательских институтов, в одном из них я когда-то провел месяц — там множество иностранцев и очень стимулирующая атмосфера. Да и кроме того Япония все-таки одна из основных математических держав. И поэтому остаться в Японии — это не остаться в одиночестве. По-моему, год или два Касивара провел в Принстоне, довольно

много ездил во Францию, потому что был там живёт замечательный специалист по микролокальному анализу Пьер Шапира. И у него с ним есть работы (в первую очередь «Пучки на многообразиях». — «ЗН») и с Бернаром Мальгранжем. Еще можно сказать, что D-модули применяются в физике. Правда, в такой, которую многие физики физикой не считают — в теории струн. Мы привыкли к тому, что наше пространство, сколько бы у него, по нашему мнению, ни было измерений, — что оно гладкое. В том смысле, что там нет шипов, нет самопересечений и прочих вещей, которые мы называем **особенностями** (или сингулярностями). А многообразия Калаби — Яу, связанные с теми или иными физическими задачами, бывают особыми в этом смысле. И, грубо говоря, решать дифференциальные уравнения на этих многообразиях становится намного труднее. А можно сказать, что изучать их геометрию становится много труднее.

Двумерные проекции пятимерного (слева) и трехмерного (справа) пространств Калаби — Яу это конечномерное многообразие, но если там поверхность с особенностью, то там уже не одна касательная плоскость, их много. И возникают всякие проблемы. Тут как раз на помощь

приходят D-модули, особенно извращенные пучки. Это одна вещь. Вторая вещь заключается в том, что все это тесно связано с теорией представлений групп, которой у нас занимался уже упоминавшийся Израиль Моисеевич Гельфанд и очень много других людей. И сейчас есть такая очень модная область, называется программа Ленглендса. Ее основатель Роберт Ленглендс за нее получил Абелевскую премию в 2018 году. И вот есть арифметическая теория Ленглендса, и есть геометрическая. Геометрическую сейчас развивают в Чикагском университете как раз Бейлинсон и другой наш филдсовский лауреат Владимир Дринфельд. Они этим много занимаются. И там у них тоже необходимы эти извращенные пучки.

В заключение я бы сказал так: если бы меня спросили, кому надо давать Абелевскую премию, то имя Касивары пришло бы мне на ум не первым. Отчасти это связано с тем, что все-таки эта область не совсем моя. Но при этом его имя вполне на слуху. Но! Что с Филдсовской медалью, что с Абелевской премией — иногда бывает, что достойный человек их не получает. Но я почти не знаю или вовсе не знаю случаев, когда их получил кто-то недостойный. А Масаки Касивара — замечательный математик. И за это ему и дали премию Абеля.

An aerial, high-angle view of a city where the urban landscape is replaced by a complex network of green circuit boards, microchips, and intricate wiring. The city is interspersed with lush green trees and patches of grass, suggesting a harmonious blend of nature and technology. Large, fluffy white clouds drift across the sky, partially obscuring the city below. The overall scene conveys a sense of a highly advanced, interconnected world.

КАРТИНА МИРА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА



МИР ИЗ КРЕМНИЯ

Иван Шунин

Первыми, кто стал активно пользоваться в своей работе компьютерами, были астрономы XVII века. Их исследования — крайне востребованные на рынке, поскольку астрономические карты были нужны для навигации, — во многом были связаны с вычислениями, и наблюдатели неба нанимали для этого помощников. В середине XIX века в Гринвичской обсерватории был оборудован специальный

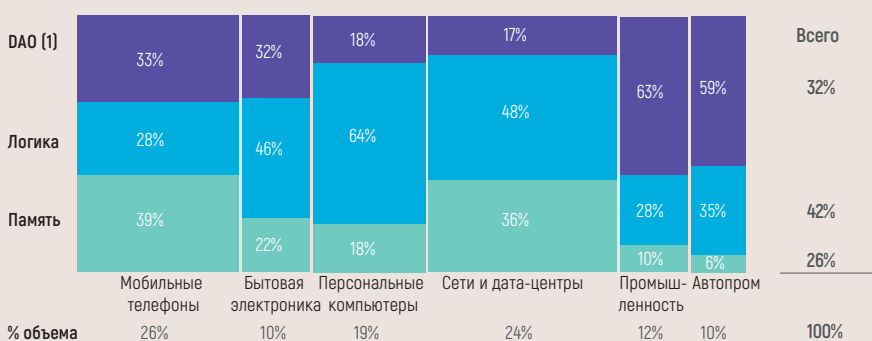
кабинет для работы компьютеров — нанятые для этого молодые люди обрабатывали базу астрономических данных.

Спрос на вычисления — не только астрономические — рос вместе с развитием торговли, и человеческий ресурс, даже усиленный механическими счетными машинами, довольно быстро перестал справляться с его удовлетворением. К концу первой половины XX века

инженеры догадались заменить механические шестеренки электрическими разрядами — появились машины на вакуумных лампах. Для них, собственно, была создана принципиальная схема, известная сегодня как «архитектура фон Неймана» (хотя приписывать ее изобретение целиком и полностью Джону фон Нейману не стоит). Вскоре Уильям Шокли придумал транзистор и основал компанию, чтобы заработать на своем изобретении. Офис *Shockley Semiconductor* открылся в 1955 году недалеко от Пало-Алто в штате Калифорния: там жила мать Шокли, и изобретатель в виду ее преклонного возраста хотел быть к ней поближе. Через год Шокли получил Нобелевскую премию по физике. Через два — восемь молодых инженеров уволились из компании Шокли, чтобы основать свою: *Fairchild Semiconductor*. Последним к группе недовольных сотрудников под предводительством Гордона Мура присоединился Роберт Нойс. Вскоре он придумал элегантный способ объединения электронных элементов на плоском

Каких сколько

Глобальный рынок чипов, 2019 год



(1) Аналоговые чипы, оптоэлектроника, сенсоры и прочее. Источник: SIA WSTS, Gartner

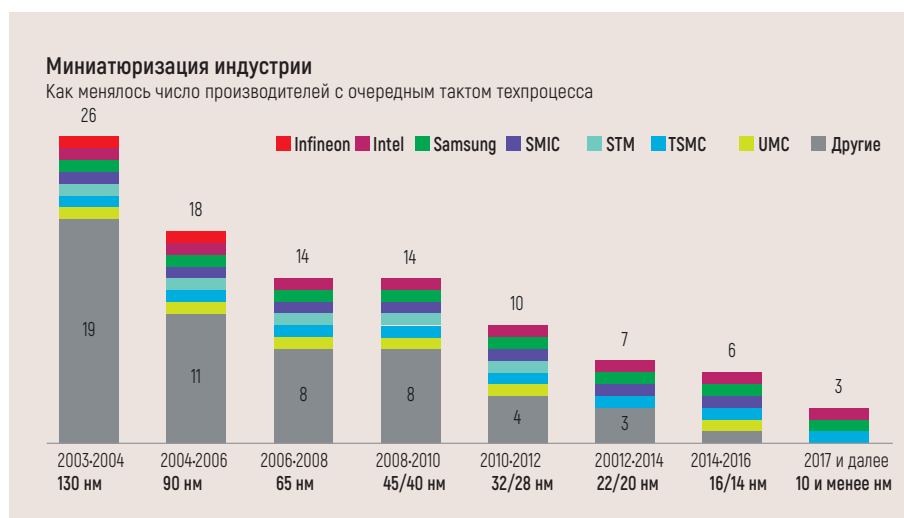
Вероломная восьмёрка



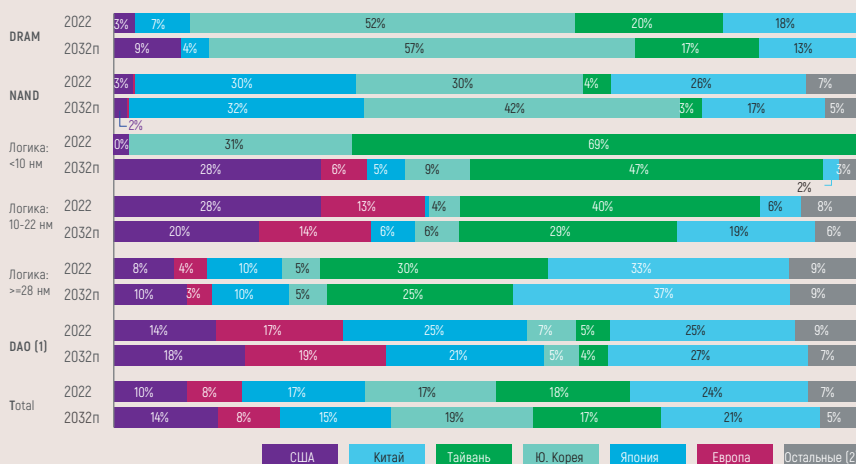
полупроводниковом кристалле, похожий на тот, что незадолго до него запатентовал Джек Килби из *Texas Instruments*. Так появились планарные интегральные схемы, которые можно печатать на кремниевых пластинах, и эра полупроводниковых транзисторов началась всерьез. Свой первый крупный заказ *Fairchild* получил от NASA. Агентство только что проиграло первый этап космической гонки, получило огромный чек от государства и начало тратить деньги. Им нужна была компактная и устойчивая электроника для оснастки космических кораблей. Так стартап «вероломных» инженеров и их технология стали популярны, а их продукция востребованной: если она работает в космосе, то уж точно прекрасно подойдет для любых земных предприятий. К середине 1960-х чипы *Fairchild*, когда-то шедшие по 20 долларов за штуку, стоили уже 2, и его основатели не скрывали, что хотя и разбогатели на госконтрактах, дальше развиваться хотят на потребительском рынке. К тому моменту, как «Аполлон 11» с электроникой *Fairchild* на борту отправился в свой исторический полет, большую часть денег компания зарабатывала уже на корпоративных клиентах: большой бизнес пользовался компьютерами все больше и был готов за них платить.

Во времена Великой депрессии в Калифорнию переселилось огромное число людей, бежавших от голода в центральных штатах. Чтобы прокормить семьи, мигранты соглашались на любую работу. Так на сбор урожая стали массово нанимать женщин: им можно было меньше платить. Во Вторую мировую их стали нанимать на местные фабрики, и они не особенно стремились организовываться в профсоюзы. Поэтому когда здесь появились предприимчивые инженеры, они обратились к тому же источнику дешевого ручного труда, нужного на последнем этапе сборки и тестирования интегральных схем. Но когда спрос на интегральные схемы взлетел,

этого ресурса им хватать перестало. И глаза менеджеров *Fairchild* обратились к главному источнику женских рабочих рук в Калифорнии. В 60-е годы им была Юго-Восточной Азия. Фабрика в Гонконге за первый год работы произвела 120 миллионов устройств превосходного качества: местным можно было платить в несколько раз меньше, чем американцам, причем не только рабочим, но и инженерам. Вскоре примеру компании Нойса и Мура последовали остальные. Местные правительства были только рады: присутствие на их земле американского бизнеса давало хоть какие-то гарантии безопасности перед лицом набирающего силу Китая.



Доли в производстве плат 2022 и 2032 (прогноз)



1. Аналоговые чипы, оптоэлектроника, сенсоры и др. 2. Малайзия, Сингапур Индия и др. страны Источник: SEMI; BCG Analysis

Особенно заинтересованы в этом были в Тайване, который сегодня по праву считается главной фабрикой микроэлектроники в мире.

К концу 60-х основатели *Fairchild* снова уволились и создали новую компанию, которую назвали *Intel*. Их первым продуктом стала память (DRAM). Прежде компьютерные данные хранились не на полупроводниковых устройствах, а на металлических, миниатюризация которых параллельно с кремниевыми платами шла не так бойко. Идея *Intel* была очень проста: рынок микроэлектроники растет, и если предложить ему гораздо более эффективное и при этом универсальное устройство, его точно будут покупать. Для того чтобы просто хранить состояния битовых строк, не нужны никакие логические вентили. Делайте свои процессоры под свои задачи, а масштабированием ресурса ваших конечных устройств займется *Intel*. Следом пришла и следующая самоочевидная мысль. В то время как все остальные проектируют и производят специализированные схемы для разных устройств, создать универсальный процессор. А как его применять, рынок сам разберется. Покупайте наши микропроцессоры и *программируйте* их под ваши задачи.

Десять лет спустя Лин Конвей и Карвер Мид опубликовали книгу «Введение в СБИС системы»

(Introduction to VLSI Systems), которая совершила еще одну революцию в области микроэлектроники, причем в этот раз не совсем технологическую, а скорее техническую (или даже эпистемическую). Конвей и Мид описали базовые правила, следуя которым, можно спроектировать эффективную интегральную схему. Чем снизили порог входа для тех, кто хотел заниматься проектированием «железа». Раньше он был очень высок: требовал экспертизы и в физике, и в электрической инженерии, и в информатике. Помимо этого общие принципы проектирования позволили распараллелить процессы дизайна, сделав его намного более масштабируемым. В конце концов революция Конвея и Мида позволила окончательно разделить

Fairchild F74LS181PC — 4-битный процессор первого поколения интегральных схем на транзисторно-транзисторной логике (ТТЛ)



проектирование и производство. Это привело к появлению бесфабричного подхода (fab[rication]less) к созданию микроэлектроники — именно его иллюстрирует подпись *Designed in California, assembled in China*, которую *Apple* помещает на корпуса своих устройств.

Так из нескольких превосходных идей и ряда ключевых изобретений возникла Кремниевая долина — и за полвека создала мир, который существует постольку, поскольку миллиарды миллиардов крошечных транзисторов на кремниевых платах совершают свою работу на околосветовых скоростях.

УСТРОЙСТВО МИРА

Их проектируют на Западе, производят на Востоке, а ресурсы, необходимые для этой индустрии, добывают по всему миру. Обрыв связи между элементами глобального конвейера, обеспечивающего индустрию микроэлектроники, чувствует практически каждая современная отрасль — пандемия ковида здесь служит прекрасным примером. При этом среди узловых точек на этой карте есть незаменимые как, например, нидерландская компания *ASML*, которой принадлежат 100% всего рынка EUV-литографии — технологии, без которой невозможно создать современный чип.

Спрос человечества на «компьютер» — вычислительные ресурсы — только растет. Пожалуй, главный товар 2020-х годов — специализированные вычисли-

тельные устройства, первоначально созданные для работы с графикой. Компания NVIDIA стала дороже триллиона долларов на пять лет позже Apple и Amazon — но 4 июля 2025 года первой пробил потолок 4 трлн. И не потому, что мы внезапно увлеклись видеоиграми. В 2020-х годах эффект от «ренессанса искусственного интеллекта», начавшегося в конце 90-х годов прошлого века, заметили уже все. Ключевым событием стало, пожалуй, появление больших языковых моделей (large language models): цифровых систем, без особенных проблем проходящих тесты Тьюринга — беседуя с ними, не каждый человек догадается, что говорит с машиной. Оставим здесь в скобках гуманитарное значение этого события, укажем лишь, что экономический потенциал на одном только рынке услуг подобных агентов очевиден. Все крупные ИИ-компании, за исключением Google, сейчас используют графические процессоры NVIDIA. А остальные — спешно ищут технологические платформы, чтобы включиться в эту гонку. Дело далеко не только, конечно, в заговоривших машинах. Обучаемые автономные системы — базовый элемент любого рода деятельности. А следовательно, область возможного применения технологии в буквальном, строгом смысле ограничивается только человеческим воображением. И ресурсной базой, которой для машинного обучения служит глобальный «компьютер», работающий на кремниевых МОП-транзисторах в интегральных схемах. При этом рецепт успеха в машинном обучении довольно прост: давайте добавим еще больше вычислительных мощностей и увеличим объем данных для обучения. И нынешних результатов он добился в первую очередь благодаря техническому прогрессу на стороне производителей микроэлектроники, которые полвека двигались в темпе закона Мура — эпоха глубокого обучения, несомненно, связана с появлением соответствующих алгоритмов, но само развитие

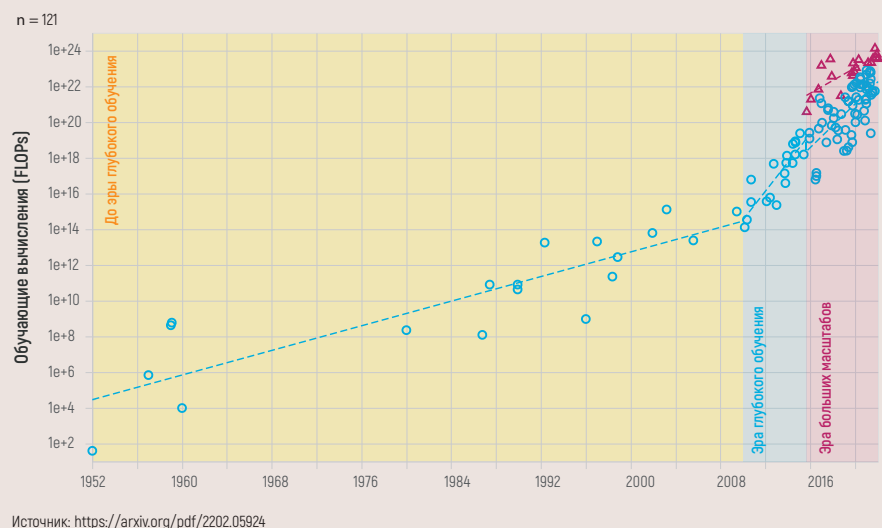


Сооснователи Intel:
Эндрю Гроув,
Роберт Нойс
и Гордон Мур

области напрямую связано с тем, насколько уменьшилась к этому моменту стоимость вычислений. При этом чем дальше шла миниатюризация, тем уже становился рынок. Смену технологий в индустрии принято выражать через плотность «упаковки» транзисторов на чипе, хотя вот уже четверть века официальное «название» перестало соответствовать реаль-

ным физическим характеристикам процессоров. Когда вершиной технологии был техпроцесс «130 нм», в начале нулевых годов, число производителей, освоивших этот процесс, измерялось все еще десятками. Чипы последнего поколения умеют делать строго три компании: американский Intel, тайваньский TSMC, корейский Samsung. Причем зачастую — в сотрудничестве.

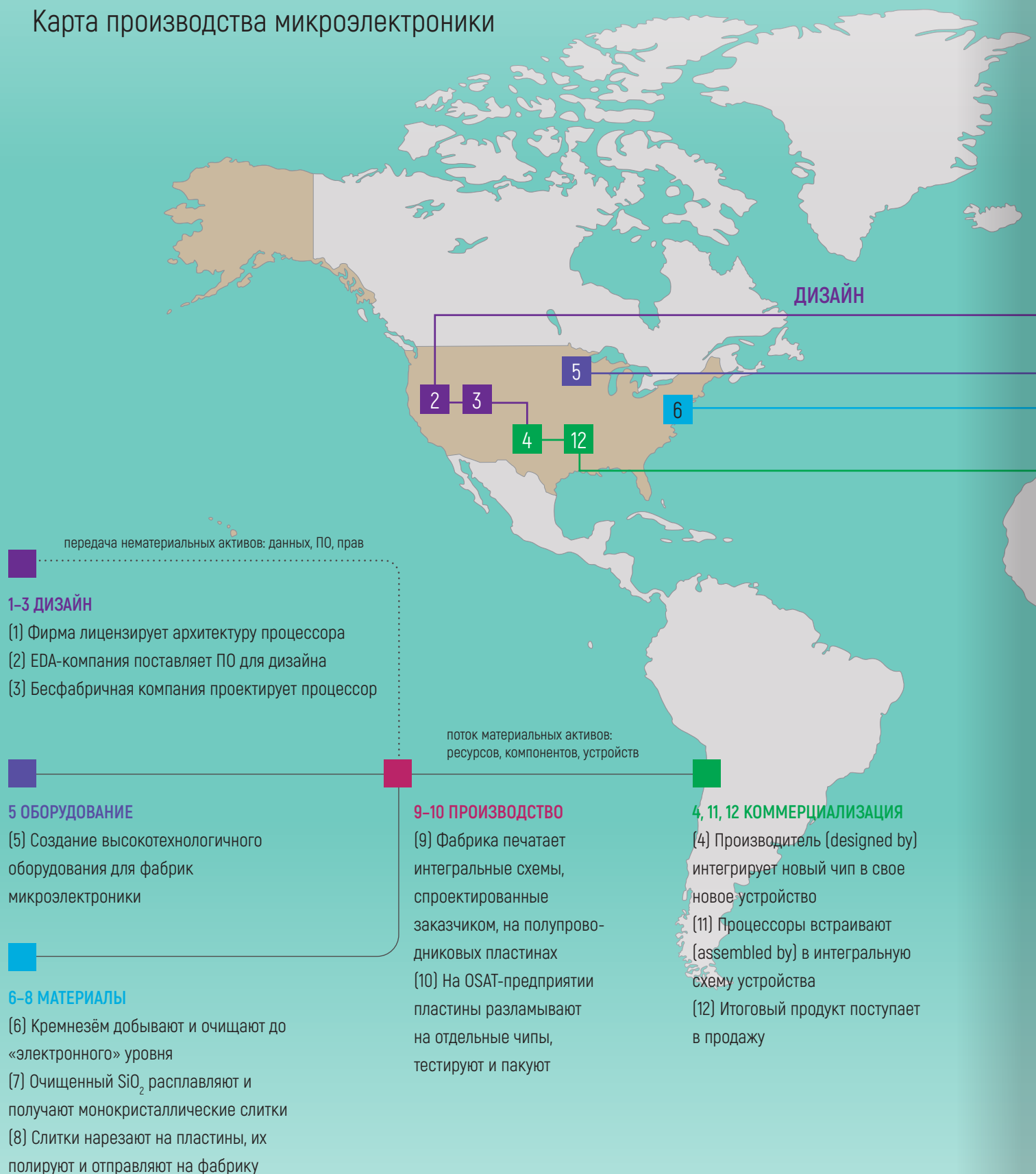
Как менялась вычислительная мощность моделей машинного обучения между 1952 и 2022 годами

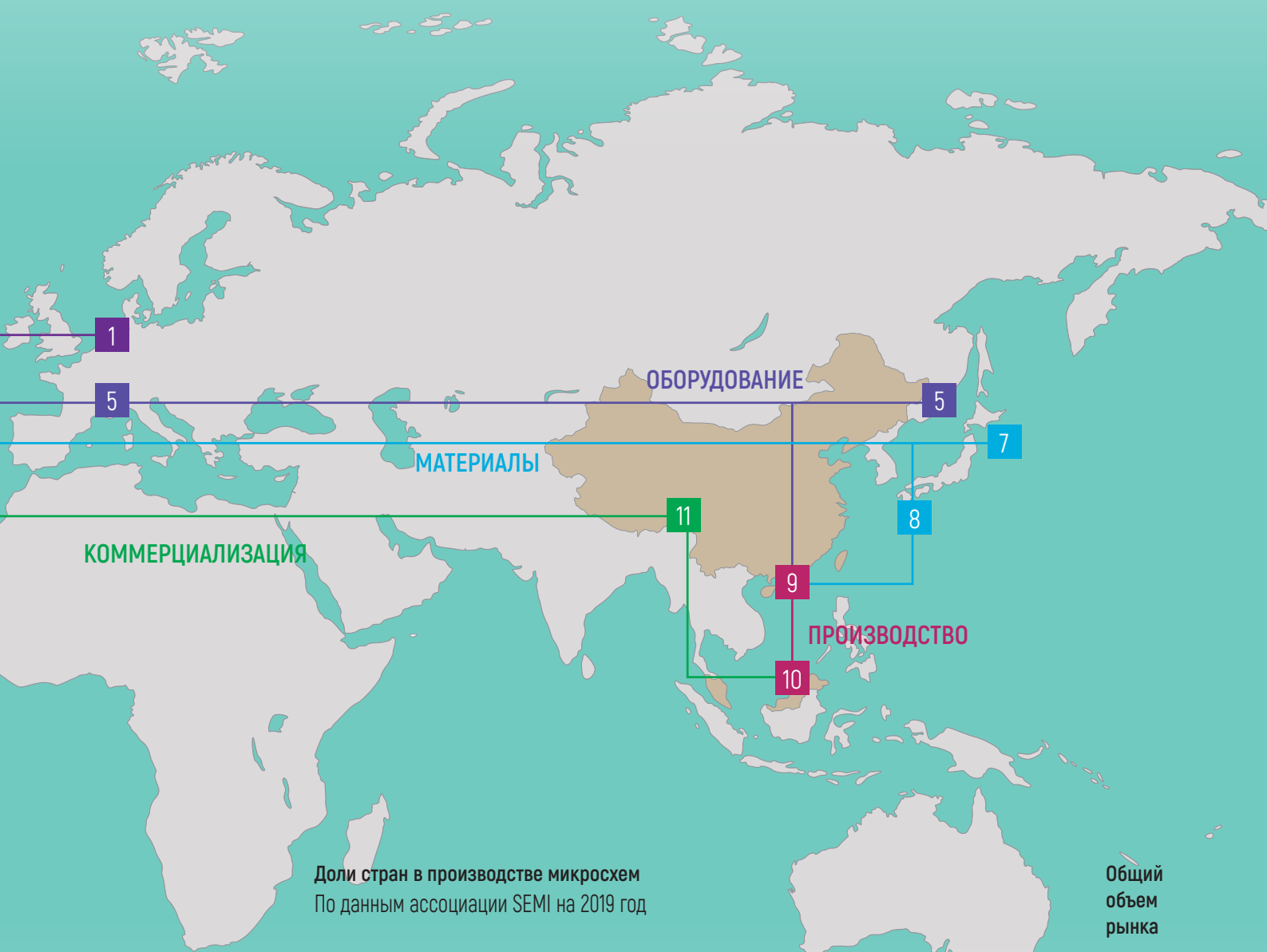


Источник: <https://arxiv.org/pdf/2202.05924>

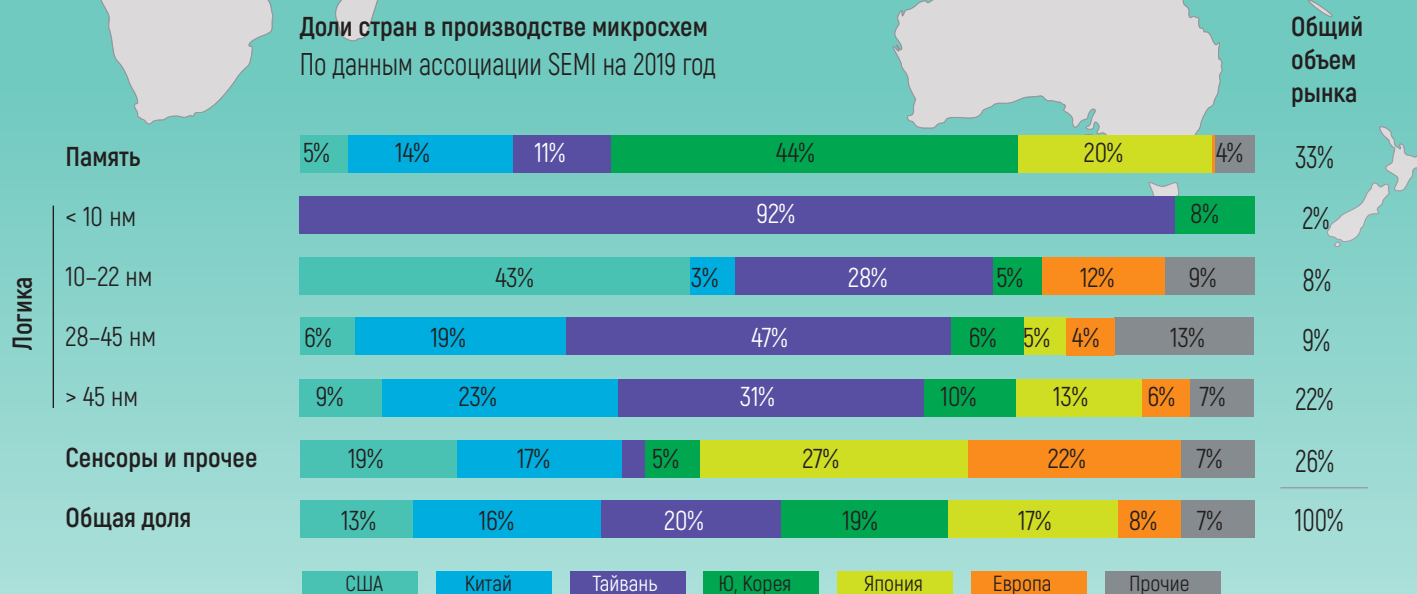
ГЛОБАЛЬНЫЙ КОНВЕЙЕР

Карта производства микроэлектроники





Доли стран в производстве микросхем
По данным ассоциации SEMI на 2019 год



ЗАКОН МУРА

60 ЛЕТ СПУСТЯ

Самая популярная формулировка закона Мура выглядит так: «Количество транзисторов на чипе удваивается каждые 18 месяцев». Но при этом закон Мура – не закон и не Мура. О том, что в прогнозе Говарда Мура осталось законного, рассуждает Юрий Аммосов, преподаватель МФТИ (ФРКТ).



Говард Мур в 1965 году продемонстрировал фактическую зависимость себестоимости производства чипов от числа компонентов на нем [С]

ЗАКОН ДРУГОГО

Древнейшее из известных доказательств теоремы Пифагора приводится в «Началах» Эвклида, хотя о существовании соотношения между сторонами прямоугольного треугольника упоминают уже шумерские и древнеегипетские тексты. Законы Кеплера сформулировал Готфрид Лейбниц. Три закона Ньютона сэр Исаак взял у Декарта, Гюйгенса и Гука соответственно. Мюррей Гелл-Манн утверждал, что диаграммы Фейнмана на самом деле

должны называться диаграммами Штюкельберга, потому как Эрнст Штюкельберг начал применять такой метод записи за несколько лет до Ричарда Фейнмана. Тот факт, что редкий эпоним в науке в действительности носит имя своего первооткрывателя, называется законом Стиглера, в честь историка Стивена Стиглера. Стиглер при этом обратил внимание на сей факт, изучая работы социолога Роберта Мёртона, так что закон Стиглера верен и по отношению к самому себе (в России,

кстати, он известен под именем закона Арнольда).

Точно так же дело обстоит и с законом Говарда Мура, одного из основателей Fairchild Semiconductor и корпорации Intel. Имя закону придумал Карвер Мид, профессор Калтеха и специалист по физике твердого тела. Когда именно это произошло, точно установить не удастся, но, по-видимому, после выступления Мура на конференции IEEE по электронике в 1975 году. Мур и Мид сотрудничали много лет. Мур был директором по исследованиям Fairchild Semiconductor, Мид профессорствовал в Калтехе и брал у Мура забракованные по внешнему виду микросхемы для лаб своих студентов (тогда еще не совсем «микро», а скорее «мини», в терминологии того времени «малая интегральная схема»). В 1959 году Мид спросил Мура: не упрется ли когда-нибудь миниатюризация в пределы туннельных эффектов? Хотя, по идее, это Мур должен был задавать Миду такие вопросы — поскольку именно разработки Мида в будущем привели к созданию полевого транзистора на основе арсенида галлия, на котором стоит вся современная микроэлектроника.

Стивен Стиглер заметил, что редкий эпоним в науке носит имя своего первооткрывателя [С]



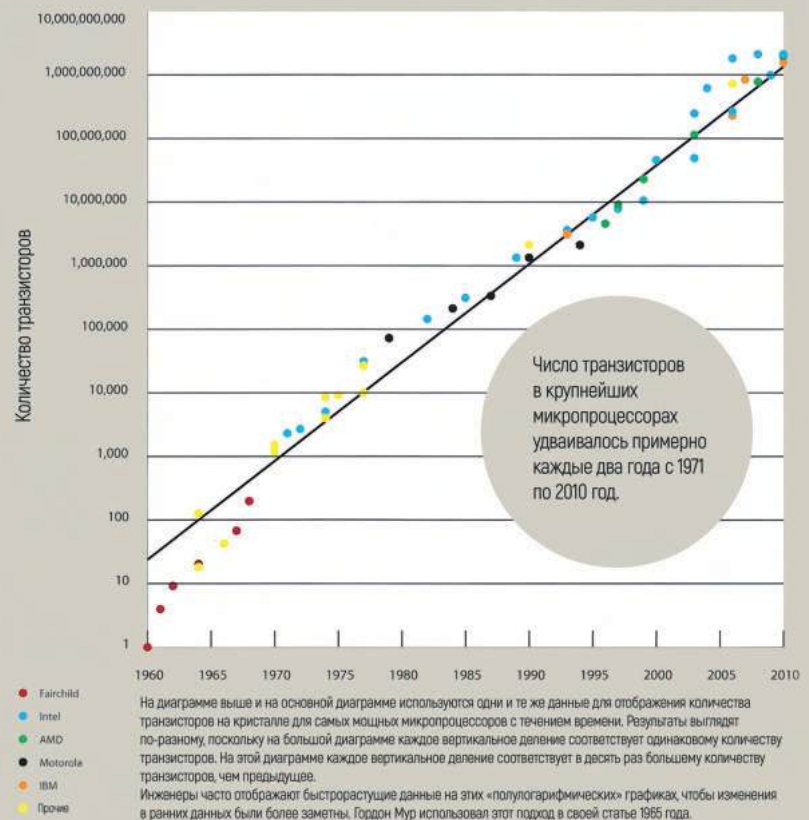
Мид не ограничился постановкой проблемы и взялся за ее исследование, привлекая к этому своих студентов. «Интегрированным микросхемам» в ту пору не было и двух лет, примерно столько же существовала технология фотолитографии посредством ультрафиолета, а планарная технология насчитывала всего несколько месяцев. На одном чипе, тогда еще германиевом, размещался ровно один транзистор, а чипы на кремниевых «вафлях» только перебирались из лабораторий в производство. Возможно, поэтому расчеты Мида не привели к публикациям. Но именно прикидки Мида заложили базу, с опорой на которую Мур спрогнозировал экспоненциальный рост плотности транзисторов. Помешали ли в итоге туннельные эффекты миниатюризации микросхем? И да, и нет. С 2002 года появилось несколько, пока лабораторных, вариантов одноатомных транзисторов. Абсолютный нижний предел, ниже которого двигаться некуда, и все же вполне функционирующий. Конечно, туннельные

эффекты возникают, но, умеючи, справиться с ними, можно.

НЕЗАКОННЫЙ ЗАКОН

Можно ли называть законом эмпирическое наблюдение и интерполяцию? Физический или технический закон, по уму, должен иметь теоретическое обоснование, показывающее, из чего «закон» вытекает.

Закон Мура



Сначала закон Мура был выражен даже не в физических или инженерных, а денежных единицах. В 1965 году Мур продемонстрировал две кривые фактических зависимостей себестоимости производства чипов Fairchild от числа компонентов на чипе за 1962 и 1965 год. Самый плотный чип 1962 года насчитывал 100 транзисторов. Из них Мур вывел такую же кривую для 1970 года. Нет оснований не доверять данным Мура: он в те годы был человеком на самом острие прогресса. Но первый же вопрос о том, сколько наблюдений включено в график и какова дисперсия этой выборки (а учитывая объем производства, как бы и не генеральной совокупности) сразу бы показал, что надежность прогноза очень условна. В 1975 году Мур рассматривал проблему миниатюризации уже под другим, техническим углом. Его статья показывает разбивку эффекта на миниатюризацию литографического процесса, сокращение размера кристалла (прямоугольных

Карвер Мид придумал имя закону Мура [С]

фрагментов, на которые нарезаются «вафли») и то, что он назвал «продуманными схемами» (circuit cleverness). Будущее показало правоту Мура — прогресс в области микросхем опирался на подход «где силой взять нельзя, там на добна ухватка».

Из «умных» инноваций в области микроэлектроники следует выделить две. Первая — МОП-транзисторы (металл-оксид-полупроводник). В 1974 году Роберт Деннард из IBM обнаружил, что энергопотребление кристалла как целого не изменяется, когда на нем наращивается число транзисторов. А отсюда следовал вывод, что можно наращивать производительность микросхемы, уменьшая ее. Это тот же закон Мура, но на языке физики твердого тела.

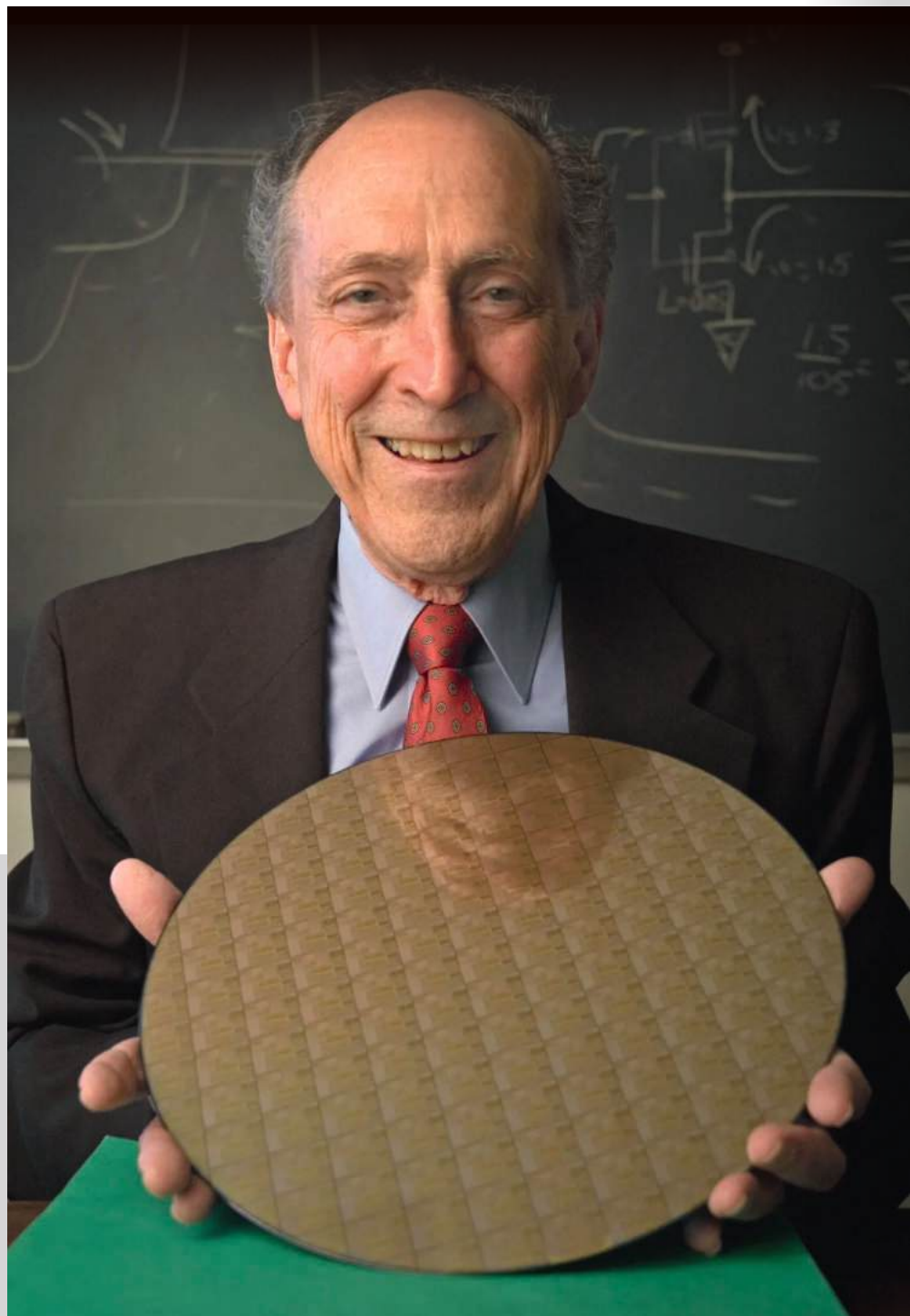
18-месячный интервал выполняется именно в том случае, если к закону Мура прилагается масштабирование Деннарда. Сам Мур оценивал время удвоения так: «коэффициент функции может аппроксимировать удвоение примерно за два года вместо одного года на протяжении десятилетия», то есть до 1980–1985 года. «Масштабирование Деннарда» же встретило первое серьезное препятствие в начале 2000-х, когда стала заметна доля паразитных утечек тока (*power wall*). Важнейшая роль МОП-транзисторов — переход от специализированных архитектур, способных выполнять только заданный набор команд, к универсальным логическим схемам, и далее к системам-на-чипах (SOC). Сначала внутри вычислительного устройства переместилась буферная память (*cache*), затем вычисления

с плавающей точкой. Так, шаг за шагом и стали возможны SOC — устройства, выполненные на одной плате, к которой подключаются устройства ввода-вывода и накопители.

Вторая «умная» инновация 1970–1980-х годов — EDA (*electronics design automation*, автоматизация проектирования электроники). Первые микросхемы инженеры рисовали на полотнах миллиметровки и выкладывали дорожки из цветного картона. Программные решения резко ускорили этот процесс: самые первые графические редакторы 1970-х, где схемы рисовались еще псевдографикой, уже позволяли

сделать за день недельную работу. В начале 1980-х годов появились возможности использовать для проектирования векторную графику. А на рубеже 1990-х годов был достигнут следующий уровень абстракции в виде языков Verilog и VHDL, которыми логика схем описывалась прямо. Софт создавал по этому коду многоуровневые раскладки схем, алгоритмически их оптимизировал и выполнял над ними автоматические тесты. Одна строка такого кода — эквивалент недель работы электронных КБ 1965 года. За исполнением «закона Мура», таким образом, стояли не слепые силы природы и математические

Роберт Деннард обнаружил эффект, из которого следовало, что можно наращивать производительность микросхемы, уменьшая ее [С]



Кремниевая пластина
с процессорами Pentium 4
и автографом Гордона Мура
в честь 40-летия закона Мура
(С)

закономерности, а работа Мура и несчетного числа его коллег, которые искали и нашли много качественных технологических скачков, которые и вызвали результаты, спрогнозированные Муром.

НА КОНУ ЗАКОНА

Закон Мура хоронили несчетное число раз (автор насчитал не менее пяти). Последний раз это сделал в 2022 году глава NVidia Дженсен Хуан.

«12-дюймовая [кремниевая] пластина сегодня стоит намного дороже, чем вчера, и не немного, а в разы дороже... Закон Мура мертв. Способность [индустрии] каждые полтора года обеспечивать вдвое большую производительность при той же стоимости или ту же производительность, но вдвое дешевле, исчезла. Закон Мура утратил силу, и поэтому идея, что кристалл со временем дешевеет, к сожалению, осталась в прошлом... Вычислительная техника — это проблема не чипа, а программного обеспечения и чипа».

С той же регулярностью закон Мура и воскрешали. В 2023 году, например, о его реанимации заявил глава Intel Пэт Гелсинджер, предположив, что тот просто вдвое замедлился, и теперь его период составляет три года. В 2019 году в его защиту высказывался топ-менеджер крупнейшего производителя микроэлектроники TSMC Годфри Чен. Живым закон Мура считает и ASML, крупнейший производитель оборудования для изготовления чипов.

Расстановка сил такова: если вы в бизнесе изготовления микросхем, то закон Мура жив, если вы со стороны софта — мертв. Самое интересное в этом споре то, что сам Гордон Мур еще в 2005 году похоронил свой закон. По мнению Мура,

его прогноз направил не столько работы в области процессоров, сколько в области твердотельной оперативной памяти (DRAM), изобретенной в 1968 году Деннардом: «Поначалу оно не оказало большого влияния, я впервые ощутил его, когда японцы вышли на рынок памяти. Прежде казалось, что отрасль в целом движется в произвольном направлении, но как только они занялись производством памяти, у них появился план, и они заняли лидирующие позиции в этой области. В этом отношении все было бы иначе, если бы мы не заметили эту тенденцию. Мне повезло, поскольку я, работая в Fairchild, мог смотреть дальше, чем большинство людей в авангарде технологической индустрии».

По данным австралийского историка науки Джона Маккаллума цена килобайта «оперативки» упала с 1970-го по 1980-й на два порядка, и еще на два порядка — с 1980 по 1990 год. Это расширило возможности компьютерной техники ничуть не меньше, чем рост вычислительной мощности.

Но актуальность закона Мура уже далеко не та, как в 1965-м или в 1975 году. «Умный» подход, который обеспечил компьютерную революцию, свернул в сторону от «больше, больше, больше» к «иначе». Первой приметой, пожалуй, стоит считать маневр Intel, которая стала добавлять к «процессорам» x86 «сопроцессор» x87, спроекти-

рованный специально для вычислений с плавающей точкой. А ключевым переломом можно назвать появление на рубеже тысячелетий мультиядерных архитектур, когда вычислительные процессы стали распределять на 4, 8, 16 менее мощных по отдельности ядер. У этого подхода тоже есть тонкости, в частности «закон Амдала», согласно которому скорость вычисления — это скорость самого узкого «бутылочного горлышка» алгоритма. Но с вычислительной мощностью это уже не связано.

Так что закон Мура жив как цель и желание выжать как можно больше логических операций — из киловатта энергии, сантиметра чипа, грамма кремния, полупроводника и металла. И мертв: он не полагает препятствий развитию вычислительной техники. С умом — можно двигаться так же быстро, а то и быстрее, если надо.

Константой остается только одно, и только в этом смысле закон Мура — закон. Как бы быстро, эффективно, дешево ни было — роду человеческому всегда хочется еще быстрее, эффективнее и дешевле. Это закон, но не природы, а природы человека.

Автор благодарит выпускника МФТИ 1991 года **Юрия Панчула**, ведущего инженера-разработчика GPU Samsung Advanced Computing Lab за консультации и ценные советы.





БУТЫЛОЧНОЕ ГОРЛЫШКО ПРОГРЕССА

Василий Парфенов

Три года назад 22-летний Сэм Зелуф в гараже родительского дома создал микросхему, состоящую из 1200 транзисторов. Он повторил научно-техническое достижение конца 1960-х годов доступными каждому умеренно мотивированному студенту (или студентке) средствами. Основные принципы фотолитографического процесса за полвека практически не изменились, только проектные нормы уменьшились на четыре порядка. И это масштабирование обошлось во всех смыслах дорогой ценой — чтобы производить самые современные чипы, нужно брать ипотеку под залог целого города и вставать в очередь к дверям единственной фирмы в мире.

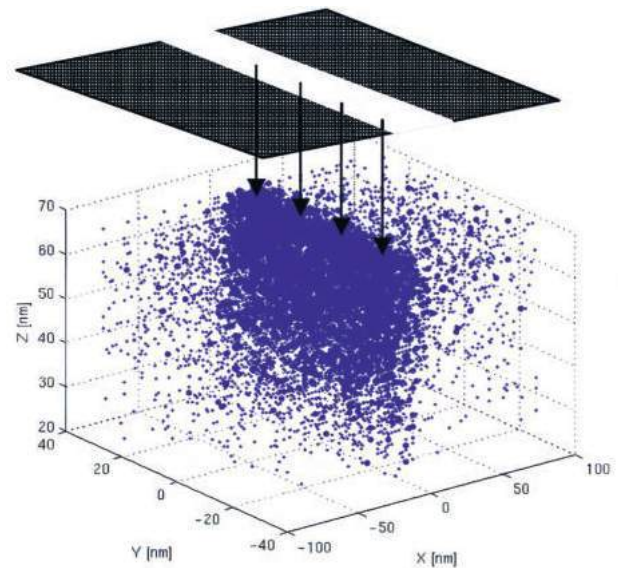
Полупроводниковая промышленность с появлением каждого нового технологического процесса напоминает игру «горячие стулья». Число производителей как самих чипов, так и оборудования для их выпуска постоянно уменьшается. В начале 1990-х степперы — фотолитографические установки — разрабатывали и продавали больше десяти компаний. Сегодня их осталось три: Canon, Nikon, ASML. Но как получилось, что лишь последняя может обеспечить наиболее современные техпроцессы, необходимые, например, для потребительской электроники и вычислительных центров? Виной всему запредельная сложность технологий, которые требуются всей отрасли для соответствия пресловутому Закону Мура хоть в какой-то его трактовке.

ТРИ ЗАВЕТНЫЕ БУКВЫ — EUV

Чем тоньше технологический процесс, тем совершеннее чипы. Выглядит логично, названия техпроцессов, которые указаны в характеристиках микросхем, тоже подтверждают эту мысль. Но что такое 3–5–12 нанометров (нм)? Во-первых, точно не размер наименьшего элемента, все эти числа в последние 30 лет — чистый маркетинг. В действительности затвор транзистора при техпроцессе «3 нм» имеет зазор в 40–50, а минимальное расстояние между элементами на таком чипе — порядка 25 нм.

Это не то чтобы совсем обман, просто прогресс в числе транзисторов и энергоэффективности чипов достигался не столько уменьшением элементов, сколько развитием методов их «упаковки» на интегральной схеме и совершенствованием технологий производства. А все их указывать — та еще головная боль и для фабрики, и для покупателя, поэтому остановились на неких аморфных нанометрах. А реальные масштабы элементов чипа определяются проектной нормой. Она в значительной степени зависит от длины волны электромагнитного излучения, с помощью

Модель распределения поглощенных EUV-фотонов с энергией 11 мДж/см² фоторезистентным слоем с щелью шириной 27 нм (с) W. Gao et al., Proc. SPIE 8322, 83221D (2012).



которого на кристалле формируется рисунок будущих элементов интегральной схемы. С начала 2000-х передовая фотолитография перешла на 193 нм, дальнюю часть ультрафиолетового диапазона. Ее называют «глубоким ультрафиолетом» (DUV), но это больше коммерческий термин. При помощи самых разных

технологических ухищрений — заполнения воздушного промежутка водой (иммерсии), оптических и химических трюков, — используя такой лазер, можно получить элементы шириной порядка 40 нм. Но это предел. Чтобы прогресс двигался дальше, нужны более коротковолновые источники излучения. Для уменьшения проектных норм еще на порядок нужен экстремальный ультрафиолет EUV — излучение практически на условной границе с рентгеновским. С его генерацией беда, надежно и предсказуемо испускать поток фотонов с длиной волны десятков-другой нанометров очень непросто. Можно, конечно, использовать синхротрон, но это подойдет только для экспериментов. Поиски подходящего для коммерциализации источника излучения заняли почти три десятилетия. Теоретическую возможность фотолитографического техпроцесса, в котором используется длина волны 13,8 нм, ученые из Bell Labs продемонстрировали в 1991 году. Первый прототип степпера-сканера, использующего такой источник излучения компания ASML собрала в 2006 году. А его коммерческая версия появилась только спустя еще 15 лет.

В промежутке между этими вехами над проблемой работали три крупнейших лаборатории Министерства энергетики США и все ключевые игроки на рынке фотолитографии —

«Гребни» FinFET-транзисторов, изготовленных по техпроцессам «16 нм» и «14 нм», в ширину имеют всего 8 нм! При этом зазор транзистора (мера, по которой назывались первые техпроцессы в микроэлектронике) у них — 70 и более нанометров, а минимальное расстояние между дорожками — в районе 60 нм. В общем, ни одного элемента, который бы совпадал с названием технологического процесса.

ческой техники. Экстремальный ультрафиолет может испускать сильно ионизированная среда — плазма. После десятилетий проб и ошибок наиболее подходящим вариантом оказались испарение лазером капли олова.

Но это лишь одна проблема. Направлять и сфокусировать такое излучение на мишени — тоже задача, в процессе решения которой рождаются десятки научных работ. Оптика в EUV-степперах ASML представляет собой систему зеркал, отполированных ионным пучком для устранения неровностей размером с атом. Еще один пласт трудностей впечатляет неподготовленного человека меньше и его реже указывают в рекламных буклетах: химия, мехатроника и методы изготовления маски. Если судить о важности каждого из компонентов EUV-технологии только по числу посвященных ей научных публикаций, то химия (фоторезисты, проявители, прочие материалы) лидирует с большим отрывом.

Взять для примера составы, полимеризующиеся под действием излучения, фоторезисты. Фотоны EUV несут в себе столько энергии, что при их попадании в любое вещество возникает фотоэлектрический эффект. «Выбитые» электроны взаимодействуют внутри слоя фоторезиста за пределами засвеченной области и провоцируют нежелательные химические реакции. В том числе с подложкой. А позиционирование кремниевых

пластин во время экспонирования должно осуществляться с нанометровой точностью. Столь аккуратные механизмы — целая отдельная сфера инженерного искусства.

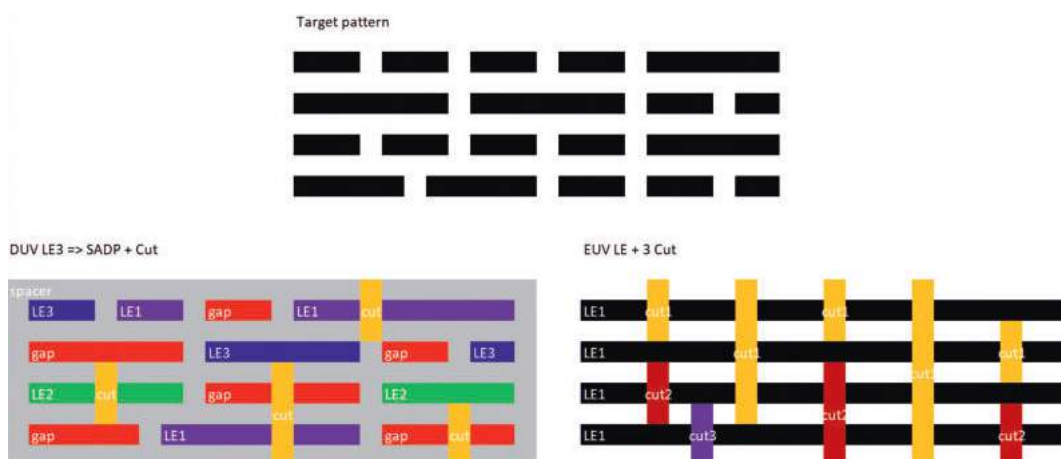
ПРИЧИН МНОГО, А РЕЗУЛЬТАТ ОДИН

Чтобы стать всемирно известным (пусть и в узких кругах), Сэму Зелуфу потребовался некоторый инженерный талант, много терпения и усидчивости, а также «сэконоленные на завтраках» средства и помощь сочувствующих. Ни один из этих факторов не был решающим, кроме, разве что, появления в его голове самой идеи сделать это и того факта, что кроме Сэма мало кто догадался проверить подобное (и подробно задокументировать в интернете). С тех пор создание собственных условно домашних производственных линий для полупроводниковых изделий превратилось в особый жанр среди блогеров, рассказывающих о технологиях. Безусловно Зелуф и его последователи проявляют смекалку и решают множество задач. Но без сотен исследований и экспериментов, которые выполнили тысячи ученых полвека назад, у энтузиастов ничего не получилось бы. Как тогда, в 1970-х, так и сейчас. Аналогичная ситуация скрывается за успехом ASML на рынке производственных решений для микроэлектронной промышленности. Чтобы укрепить свои позиции в нулевых с DUV-степперами, компании

были необходимы два десятилетия работы исследователей. Как своих сотрудников, так и сотрудников конкурентов, а также не занятых в отрасли ученых, занимающихся фундаментальными проблемами. Путь экстремального ультрафиолета от идеи до коммерчески применимой технологии занял еще больше времени. И если предыдущие техпроцессы вместе с ASML смогли освоить многие другие компании, то на EUV ресурсов, терпения и везения хватило только у голландцев. Трудно определить одну конкретную причину этого успеха, кроме банального «они просто вложили больше всего усилий в нужное время и сотрудничали с нужными людьми, что позволило объединить наибольшее количество удачных решений воедино».

Кто-то скажет, что без поддержки американского правительства, то есть грамотной политики, у ASML ничего не получилось бы. И будет прав, США потратили колоссальные средства на исследования EUV-технологии, поэтому имели полное право определять, кто получит их результаты, а кто нет.

Также часто вспоминают принцип «открытых инноваций», который исповедует ASML. Это парадигма исследовательской деятельности, в рамках которой новые идеи берутся не только внутри организации, но и снаружи. Наконец, деньги. Официально компания потратила на доведение EUV более 6 млрд евро только собственных средств. Не факт, что больше всех,



Один и тот же рисунок в DUV-литографии требует больше масок и экспозиций, чем в EUV той же проектной нормы
(c) J. Van Schoot et al., Proc. SPIE 11147, 1114710 (2019)

Сэм Зелуф в 17 лет.
Сейчас он вместе
с Джимом Келлером
(архитектор AMD K8)
выпускает чипы
на заказ
(с) Szeloof / CC BY-SA 4.0



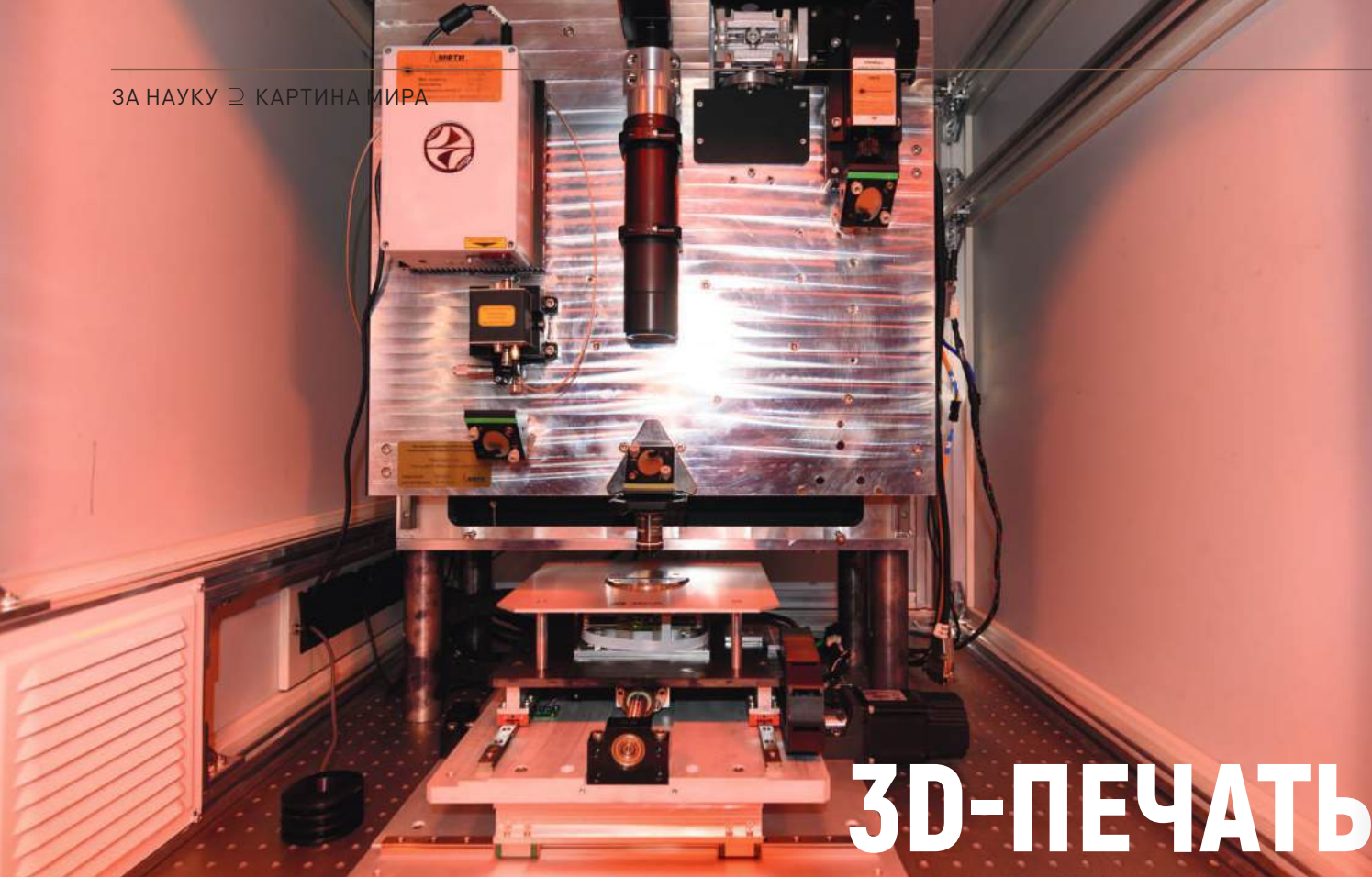
но все равно очень много. Эта сумма включает не только исследования, но и приобретение других компаний, достигших значительного прогресса в разработке ключевых компонентов технологии. Нельзя списывать со счетов и банальное везение. Многие конкуренты старались не меньше, но просто выбрали менее оптимальные направления работы. Это не помешало им сфокусироваться на других технологических процессах. Так, Canon и Nikon прочно обосновались в сегменте степперов для изготовления микросхем с проектными нормами порядка 100–320 нм. Производителям полупроводниковых изделий нужны разные установки для разных задач, поэтому монополия ASML — кажущаяся, нидерландская компания просто занимает самый «хайповый» сегмент.

А ЧТО ДАЛЬШЕ?

Даже в светлом будущем, где миром правят интеллектуальные системы, работающие на квантовых компьютерах, от «классической» кремниевой электроники никуда не деться. А значит, нужны будут и средства ее производства. Если сравнивать путь EUV с историей DUV, то можно предположить, что эта технология все еще

На просторах высокотехнологичных и наукоемких индустрий очень много «тихих» монополий, о существовании которых редко знают за пределами отрасли. Для многих этапов технологического процесса производства полупроводниковых изделий фактически не существует замены реагентам и оснасткам, выпускаемым компанией Applied Materials (в особенности для вакуумного напыления материалов). А за наиболее качественными фоторезистами и составами для проявки некуда идти, кроме как в Tokyo Electron.

находится на ранних этапах своей эволюции. В ближайшие десятилетия она будет постоянно плавно совершенствоваться. Но, по скучным физическим причинам, еще укорачивать длину волны, скорее всего, нецелесообразно. Проектные нормы меньше 40 нм уже страдают от дефектов, связанных с вероятностной природой микромира. Какими будут технологические процессы будущего, определяется сейчас во множестве лабораторий мира. Некоторые разработки направлены не на самые тонкие проектные нормы, а на решение различных нишевых задач. Например, формирование трехмерных, а не планарных структур на кристалле — такая установка создана в МФТИ в Конструкторское бюро оптической литографии. Она может пригодиться для экспериментов с оптическими системами на кремниевых чипах. Технологические вызовы, подобные проблеме EUV, будут всегда, потому что прогресс неостановим. Краткий ответ на вопрос, как ASML превратилась в «бога» микроэлектроники, прозаичен, он лежит в области экономики. Гораздо интереснее и актуальнее, какие можно из этой истории извлечь уроки. Но это уже индивидуальная задача «со звездочкой».



3D-ПЕЧАТЬ ДЛЯ МИКРОСТРУКТУР

Варвара Кравцова

Фотограф Наталья Арефьева

Конструкторское бюро оптической литографии, созданное на Физтехе в 2022 году, уже разработало уникальный прибор – литограф для печати 3D-объектов с размерами элементов 150 нм и разрешением 350 нм. Микроструктуры с такими характеристиками широко применяются в медицине и фотонике, в частности при создании элементов интегральных схем или мембранных биоструктур

ЛИТОГРАФ 3D-МИКРОПЕЧАТИ

Первые шаги, связанные с исследованием физических принципов предшественника этого устройства — двухфотонного фотоиллюминатора, были сделаны в отделе люминесценции имени Вавилова ФИАН. Над проектом работала группа Алексея Григорьевича Витухновского. В 2014 году под его руководством, в рамках проекта Минобрнауки 5-100, была открыта

лаборатория технологий 3D-печати функциональных микроструктур уже на Физтехе. В лаборатории продолжились исследования подходов к улучшению двухфотонной литографии и микроструктур, полученных этим методом литографии. В 2022 году в рамках федерального проекта «Развитие отечественного приборостроения гражданского назначения для научных исследований» прошел конкурс Минобрнауки на опытно-конструкторскую разработку научных приборов. По

ее итогам Физтех получил госзадание на однолучевой оптический литограф с превышением дифракционного предела, который работает на принципе двухфотонной полимеризации. «Для конструирования фотоиллюминатора и других оптических приборов было создано конструкторское бюро в МФТИ. Благодаря техническому заделу и блестящей команде фотоиллюминатора был успешно создан, а характеристики и работоспособность

решений подтверждена с помощью опытного образца», — рассказал руководитель конструкторского бюро Данила Колымагин.

Сейчас в Конструкторском бюро работают 15 специалистов, в том числе три магистранта, аспирант, два доктора наук и пять кандидатов наук. Сотрудники Конструкторского бюро участвуют в конкурсах РНФ, получают президентские стипендии.

Литограф КБ МФТИ дешевле иностранных и не имеет коммерческих аналогов в России. Обычно для работы литографа используют ультрафиолетовые импульсы. В приборе МФТИ используется излучение ближнего инфракрасного диапазона, что позволяет применять более дешевые оптические компоненты. Это гораздо выгоднее экономически для экспериментальных предприятий, которые выполняют небольшие наукоемкие проекты и не могут окупить дорогостоящее оборудование за счет масштабного производства. В качестве материала используются прозрачные фотополимеры, которые также созданы в России — Нижегородским институтом металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН.

«Наш прибор позволяет реализовывать не просто литографию — рисунок в микромасштабе, он также умеет делать трехмерные формы. По сути, это 3D-принтер, печатающий не в сантиметрах, а в объем-

Данила Колымагин — главный конструктор, руководитель конструкторского бюро оптической литографии МФТИ



ных микронах, толщиной в волос и меньше. Подобные формы востребованы в медицинских разработках: создании каркасных структур для выращивания тканей, микрофильтров для фильтрации клеток. Также присутствует ряд физических задач, связанных с фотоникой: создание микроархитектуры элементов.

Приведу самый простой пример: мы можем сделать на матрице камеры микролинзы, что повысит ее светочувствительность. Это позволяет усовершенствовать оптические приборы, а для нашей повседневной жизни — повысить качество ночных снимков, не увеличивая время выдержки», — прокомментировал Данила Колымагин.

Подобные приборы затруднительно закупить в других странах, и их создание напрямую поддерживает технологический суверенитет России. Литограф прошел приемочные испытания и передается в производство, готова рабочая конструктор-

торская документация. Планируется создать совместное производство с промышленными партнерами ООО «Промислаб» и НПП «Лазеры и аппаратура» в особой экономической зоне «Долина Физтеха». Основными заказчиками станут научные центры и наукоемкие компании.

Сейчас в КБ МФТИ реализуются два проекта Российского научного фонда. А также ведется опытно-конструкторская работа в рамках федерального проекта «Развитие отечественного приборостроения гражданского назначения для научных исследований» по заказу Министерства образования и науки на создание лазерного анализатора размера частиц. Это важное оборудование для медицины, которое применяется в исследованиях: в фармакологии, в аддитивных технологиях, то есть там, где необходимо четко определить размер порошков и частиц.



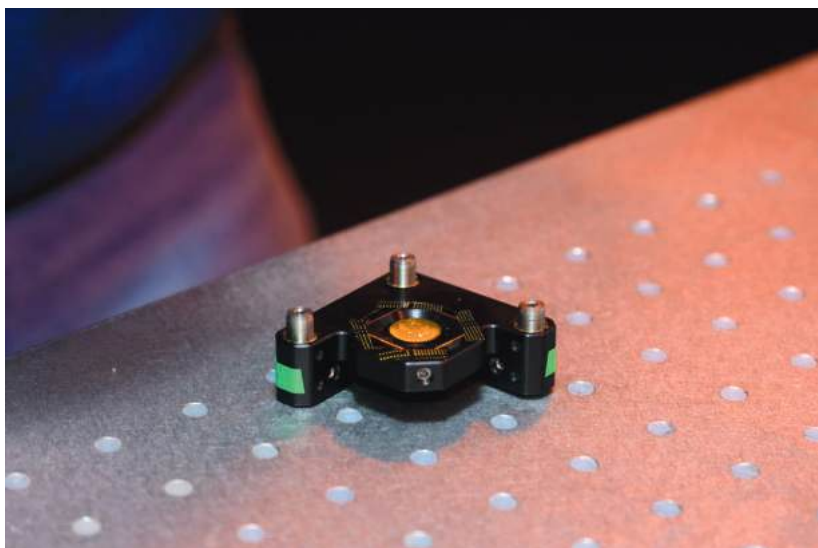
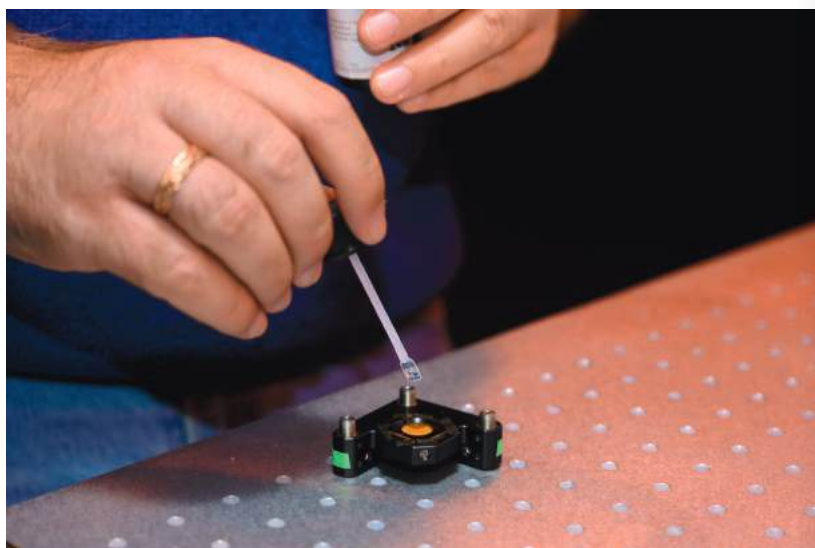
Коллектив КБ оптической литографии ИКТ МФТИ

РАССМОТРИМ ПОЭТАПНО РАБОТУ ЛИТОГРАФА И СОЗДАДИМ МИКРОЛОГОТИП ФИЗТЕХА



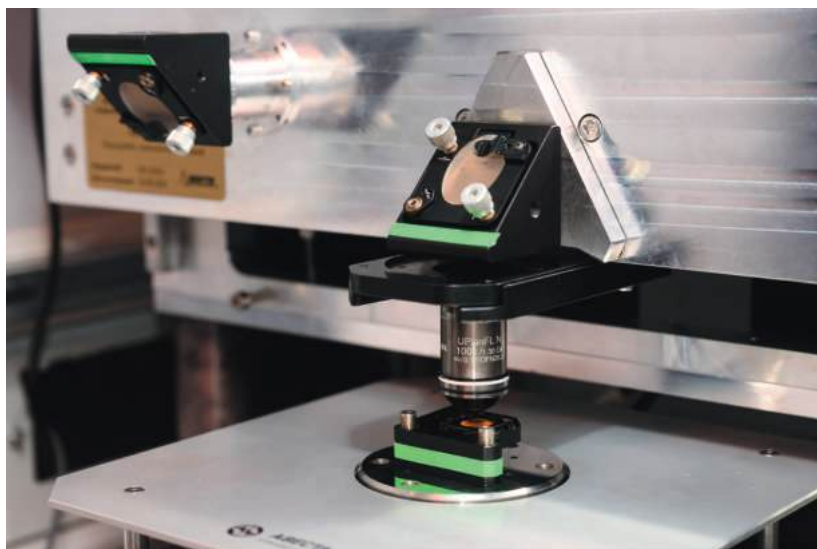
Готовим базу для будущей микроформы. Так как конструкция литографа подобна конструкции микроскопа, подготовку препаратов можно вести так же, как для микроскопа

Наносим с помощью дозатора фотополимер на подложку. Это жидкий мономер, который при засветке твердеет, наподобие лака для ногтей под лампой. В литографе засветка происходит с помощью редуцированного излучения. Так как у нас 3D-печать, не обязательно раскатывать материал по поверхности, как в стандартных фотографических процессах



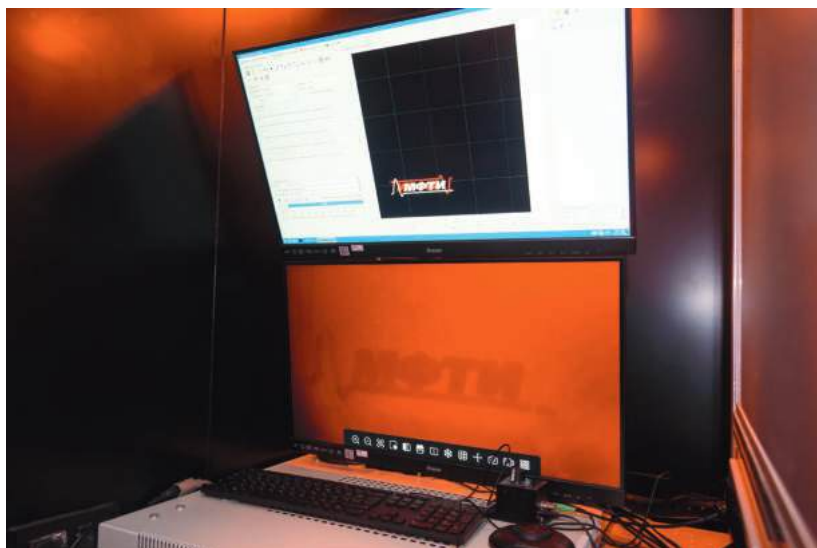
Подложка является основой, на которой будет формироваться литографический рисунок или 3D-микроструктура, и изготавливается из разных материалов. В демонстрации было использовано покрывное стекло, но можно также использовать кремний

Ставим подложку под объектив литографа в системе позиционирования. Принцип работы этого фотолитографа очень близок к принципу работы струйного принтера: сопло заменяет объектив, в фокальной плоскости которого формируется полимерный элемент наименьшего размера, а еще есть непосредственно позиционер, который формирует своим движением 3D-объект



С помощью специальной программы, разработанной в МФТИ, выставляем параметры будущей структуры

Через несколько минут форма готова. Но результат мы можем наблюдать только через микроскоп, который выводится на второй экран (на фото ниже первого)



«НЕЗАВИСИМОСТЬ НАШЕЙ СТРАНЫ ТЕСНО СВЯЗАНА С НАЛИЧИЕМ СОБСТВЕННОЙ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ И НАУЧНОЙ БАЗЫ»



КОРРЕСПОНДЕНТ ЖУРНАЛА «ЗА НАУКУ» ЕГОР БЫКОВСКИЙ ОТПРАВИЛСЯ ПОБЕСЕДОВАТЬ С ПРЕЗИДЕНТОМ РАН ГЕННАДИЕМ КРАСНИКОВЫМ О ПРОШЛОМ, НАСТОЯЩЕМ И БУДУЩЕМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В РОССИИ. ГЕННАДИЙ ЯКОВЛЕВИЧ КРАСНИКОВ ВОЗГЛАВЛЯЕТ КАФЕДРУ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В МФТИ, НО, ЧТО ВАЖНЕЕ ДЛЯ ЭТОГО РАЗГОВОРА, ОН БОЛЬШЕ 40 ЛЕТ ПРОРАБОТАЛ В НИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И НА ЗАВОДЕ «МИКРОН», ПРОЙДЯ ПУТЬ ОТ ИНЖЕНЕРА ДО ДИРЕКТОРА И НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

«За науку»: Геннадий Яковлевич, мы пришли к вам, потому что лучшего собеседника для разговора о микроэлектронике, чем вы, нет. Давайте прямо так, в лоб, и начнем: как вы думаете, насколько государство в целом осознаёт серьёзность вызовов в области микроэлектроники?

Геннадий Красников: Микроэлектроника — одна из самых во всех отношениях наукоемких и затратоемких отраслей, которая определяла и будет еще долго определять

наше технологическое развитие. Сейчас все говорят о нейросетях, или, как их еще называют, «искусственном интеллекте», но и они связаны с электроникой. В микроэлектронике есть такое понятие, как правило Мура (в 1965 году американский инженер и соучредитель Intel Гордон Мур предсказал, что число транзисторов на кремниевом чипе будет удваиваться каждый год. — «ЗН»). Все сейчас обсуждают, когда правило Мура перестанет

работать: где-то должен быть предел с точки зрения минимизации топологических размеров. На протяжении всей моей деятельности постоянно звучали заявления, что дальнейшее уменьшение топологических размеров невозможно. Так, одной из основных проблем назывался рост энергопотребления. Если просто умножить число транзисторов в микрочипе на мощность, которую каждый транзистор потребляет, то там



Фотограф Андрей Коршунов

гигаватты энергии получают. Казалось бы, дальше увеличивать число транзисторов невозможно, однако с уменьшением размера падает и энергопотребление каждого транзистора.

Другая проблема — в фотолитографии. Передовые фабрики работают на длине волны 193,5 нанометра, при этом создаваемые этим процессом структуры в несколько раз меньше. То есть длина волны почти в 20 раз больше, чем минимальный топологический размер. Но и эти задачи решаются применением определенных технологий. Так что правило все еще работает, хотя там есть нюансы. Правило предполагало не только то, что число транзисторов на единице площади должно удваиваться за определенный период, но и то, что цена за один транзистор падает. И в тот период развития технологий, когда она действительно падала, это было мощным драйвером развития. Однако после

достижения рубежа 20 нанометров эти пропорции уже перестали работать, цена на транзистор, наоборот, стала расти.

А если говорить про отношение государства, то, конечно, оно осознаёт, что независимость нашей страны неразрывно связана с наличием собственной микроэлектронной и научной базы.

«ЗН»: Я читал ваше интервью, которое вы давали на прошлом

Завод «Микрон» на окраине Зеленограда: сердце российского хайтека
Фотограф Андрей Коршунов



Форуме микроэлектроники, где в том числе вы говорили, что без собственной микроэлектроники не будет суверенитета...

ГК: Да, абсолютно верно. И наш президент это понимает: если у нас не будет собственной электронной базы, то говорить о независимости нашей страны очень сложно.

«ЗН»: Ну у Швеции, допустим, нет собственной электроники, и ничего, с суверенитетом все в порядке...

ГК: Не уверен в суверенитете Швеции — она состоит и в Евросоюзе, и в НАТО. И во многом зависит от этих организаций. Хотел бы отметить, что до 2022 года у нас многие считали, что ничего страшного в том, чтобы покупать технологии за рубежом, нет. В итоге же оказалось, что не все так просто, как вы понимаете. Ключевые технологии никто так просто вам не продаст.

«ЗН»: Вы поступали в МИЭТ в 70-х годах прошлого века. Тогда ведь тоже, наверное, многим казалось, что микроэлектроника — очень важная область, одна из важнейших. И сейчас всем так кажется. Но отставание от лидеров, кажется, не очень сократилось за последние полвека. Или сократилось? Или приобрело какой-то другой характер?

ГК: Советский Союз занимал второе-третье место в мире по уровню развития микроэлектроники. Например, по топологическим размерам у нас было второе место, а по объему производства микро-





Президент Российской Академии наук
Г. Я. Красников

технологии радиационно-стойких микросхем, которые работают в космосе. Там мы где-то находимся на мировом уровне, где-то с отставанием на два-три года. Если говорить о мобильных телефонах, другой бытовой технике — там, конечно, существенное отставание: лет на 15–18. Но опять же — есть технологическая база, где определяющим является уровень технологий, а есть схемотехническая база, где требуется спроектировать сложные микросхемы.

«ЗН»: Что можно принять как главный индикатор состояния отрасли?

ГК: Базовые технологии, на которых создаются микросхемы. Это не только топологические размеры, но и сама по себе технология. Их несколько десятков, и именно они определяют потребительские свойства микросхем.

«ЗН»: А если сформулировать простую цель? Вот, скажем, планы собираются для отрасли, для правительства. Что формулировалось как план и цель 50 лет назад? Четверть века назад и сейчас? Чем эти планы отличаются?

ГК: В целом особенно ничего не изменилось за исключением некоторых деталей. Конечно, в этих планах ставится во главу угла технология, а вторым идет объем производства. Основное отличие от времен Советского Союза в том, что в те времена у нас было достаточно автономное производство со своим собственным оборудованием, материалами, «чистыми комнатами», где идет производство. А это целые индустрии, которые сейчас мы вынуждены создавать заново. «Чистая комната» — это не «комната» в обычном понимании. Это десятки тысяч квадратных метров изолированных помещений с контролируемым климатом, постоянной очисткой воздуха,

электронной продукции мы третье место занимали.

Дело в том, что вся наша микроэлектроника тогда была сосредоточена в первую очередь на решении задач оборонно-промышленного комплекса. Вспомним «Буран» — он был фактически первым космическим беспилотником полностью на отечественной электронике. Это высочайший уровень технологий для того времени! Но народ оценивал уровень развития отечественной электроники в основном по бытовым приборам: какие у тебя телевизоры, магнитофоны, утюги, другая техника... И здесь, конечно, были большие проблемы: и по качеству товаров, и по их наличию в продаже. Но это отдельная история, которая была связана не с уровнем микроэлектроники в стране, а с работой Министерства радиопромышленности, Министерства приборостроения, Министерства связи.

Мало кто знает, но наш зеленоградский НИИМЭ и «Микрон» в 1989–1990 годах, когда Samsung ставил свои заводы на реконструкцию, несколько лет поставляли продук-

цию Samsung, чтобы их заказчики не ушли. Мы в Зеленограде производили электронику по заказу Samsung и отправляли их заказчикам. И на изделиях было написано: Samsung. Made in Mikron. Это был высокий уровень.

Но 1990-е стали губительными для отечественной микроэлектроники. Для развития микроэлектроники требуются постоянные огромные вложения в строительство новых фабрик. В конце 80-х эти фабрики построить не успели, а в условиях постоянных кризисов начала 90-х это стало уже нереально.

«ЗН»: Если оценивать отставание полувековой давности как второе-третье место, то сейчас мы на каком?

ГК: Здесь есть разные взгляды и подходы. Есть такое понятие, как «отставание в поколениях». Поколение — это примерно два-три года. По разным технологиям отставание разное. Скажем, в области Embedded Flash, технологии, на которой делаются SIM-карты, банковские и транспортные карты — отставание в два-три поколения, то есть шесть-семь лет. Есть

которые обслуживаются подсобной инфраструктурой в сотни тысяч квадратных метров. Это огромная инфраструктура, и она работает 24 часа в сутки.

Особо чистые материалы, которые требуются для микроэлектронного производства, мы тоже должны сами производить. В том числе и специальную тару для их транспортировки и хранения. И под разработку и производство этой химии сейчас сформирована отдельная программа по особо чистым материалам. Еще одна большая задача — электронное машиностроение. Оно должно быть у нас хорошо развито, потому что вся микроэлектроника производится на специальном технологическом оборудовании. Третья программа — САПР (системы автоматизированного проектирования), потому что современная микросхема — это миллиарды транзисторов, объединенные в сложнофункциональные блоки, собирать и моделировать которые можно только на компьютерах на специальном софте. И у государства сейчас есть четкое осознание необходимости развития по всем этим трем направлениям.

«ЗН»: А почему вообще науке и бизнесу, даже высокотехнологичному, так сложно строить взаимоотношения?

ГК: Сам процесс внедрения, он очень непростой. У нас в Зеленограде хорошо показала себя схема, когда у НИИ и опытного завода был один и тот же директор. Это очень помогло процессу внедрения. Но самой большой проблемой стала полная ликвидация в период перестройки и начала 90-х звена прикладной отраслевой науки. Пропал «интерфейс» взаимодействия между теми, кто занимается фундаментальной наукой, и теми, кто внедряет хайтек: люди фактически на разных языках говорят. Вот на Западе это все было в свое время очень хорошо выстроено, а у нас, к сожалению, всё постепенно разломали.

Сначала у нас «специалисты» появились, которые говорили: зачем нам что-то производить, когда мы можем все купить? И все производ-

ство без заказов постепенно умерло, зато сфера закупок и посредников при них неплохо выросла и прекрасно себя чувствовала. А теперь у нас появилась потребность создавать все самим, но это же совершенно другой процесс, который требует других людей, других специалистов. У нас технологов, руководителей производств почти не осталось — одни юристы с экономистами... И это сегодня тоже очень серьезная проблема.

«ЗН»: А где сейчас вообще сосредоточены лучшие силы? Можете ли вы назвать одну-две-три какие-то яркие отечественные разработки последних лет, навскидку?

ГК: Когда говорят, что у нас ничего нет, это неправда. Одним из знаковых моментов я считаю создание отечественных фоторезистов для глубокого ультрафиолета. Это выдающийся результат: Китай, например, пока свои собственные сделать не смог. Очень интересные работы у нас по технологическому машиностроению: установки эпитаксии для создания нитрида галлия на кремниевой подложке. В области технологий новая энергонезависимая память FRAM, на фазовых переходах. Это очень перспективная технология, которую мы рассматриваем для создания в перспективе нейрочипов. Есть хорошие работы в области схемотехники, в области процессоров. Это схемы для обработки видеоизображений в телекоммуникациях. Новаторских работ у нас очень много.

Развитие микроэлектронных технологий — одна из важнейших задач не только для нас, но и для всего мира!

«ЗН»: Хорошо. Давайте тогда к фундаментальным масштабам перейдем и Академии наук. На этом уровне существует какой-то разрыв?

ГК: Мы, конечно, участвуем в развитии микроэлектронных технологий — то есть фундаментальная наука. А когда доходит до внедрения, то академия очень активно участвует в этих процессах. Наш соотечественник Нобелевский лауреат Жорес Иванович Алфёров часто повторял слова Джорджа Портера, президента Лондонского королевского научного общества: «Вся наука — прикладная, только в отдельных случаях приложение возникает очень быстро, а в других — через пятьдесят-сто лет». Тот же транзистор, скажем, Бардин, Браттейн и Шокли открыли в 1949 году, а в 1956-м уже Нобелевскую премию получили. В создание фоторезистов, о которых я уже говорил, очень большой вклад внес ФИЦ ПХФ и МХ в Черноголовке. Мы получили уникальные фоторезисты для глубокого ультрафиолета, а это уже масштабы 28 нанометров и меньше. То есть академические институты в этой цепочке постоянно участвуют.

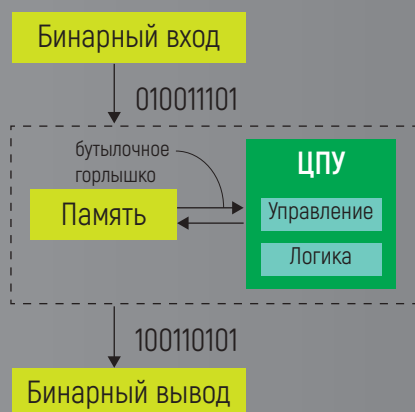
«ЗН»: Появились ли, может быть, за последние лет двадцать новые способы внедрения, которые позволяют быстрее переходить из фундаментальной науки в прикладную?

ГК: Новые способы... Смотрите, давно известно, что цикл внедрения выглядит так: фундаментальная наука, прикладная наука, отраслевая наука и высокотехнологичная компания. А у нас основным показателем в академических институтах была публикационная активность, да еще в высокорейтинговых зарубежных журналах. Но высокотехнологичные компании не смотрят, какой у тебя индекс Хирша, а смотрят на возможность создания новых приборов. Вот сейчас мы вынуждены фактически пересобирать эту конструкцию. Нам нужно как можно быстрее создавать отраслевые институты.

АРХИТЕКТУРНЫЕ ИЗЛИШЕСТВА

Переход к новой архитектуре вычислений «взламывает» и жесткую вертикаль проектирования

Архитектура фон Неймана



Нейроморфные вычислители



Последовательная	←	ОБРАБОТКА	→	Параллельная
Разделены	←	ВЫЧИСЛЕНИЯ И ПАМЯТЬ	→	Совмещены
Тактовая (clock-driven)	←	СИНХРОНИЗАЦИЯ	→	Событийно-ориентированная (event-driven)

Стандартный дизайн «снизу-вверх»

Прекрасное нейроморфное будущее?



ПРЫЖОК В КВАНТОВЫЙ ПОЕЗД

Василий Столяров, директор центра перспективных методов мезофизики и нанотехнологий МФТИ

Развитие перспективной микроэлектроники в России трансформировалось из чисто технологической задачи в вопрос стратегической национальной безопасности и экономического суверенитета. Беспрецедентное санкционное давление повысило необходимость создания, устойчивого к внешним шокам цикла проектирования и производства электронных компонентов. Ключевым вызовом остается технологическое отставание в области литографии. Создание собственного современного фотолитографического оборудования, сопоставимого с лучшими зарубежными образцами, — фундаментальная задача, решение которой определит будущее всей отрасли на десятилетия вперед.

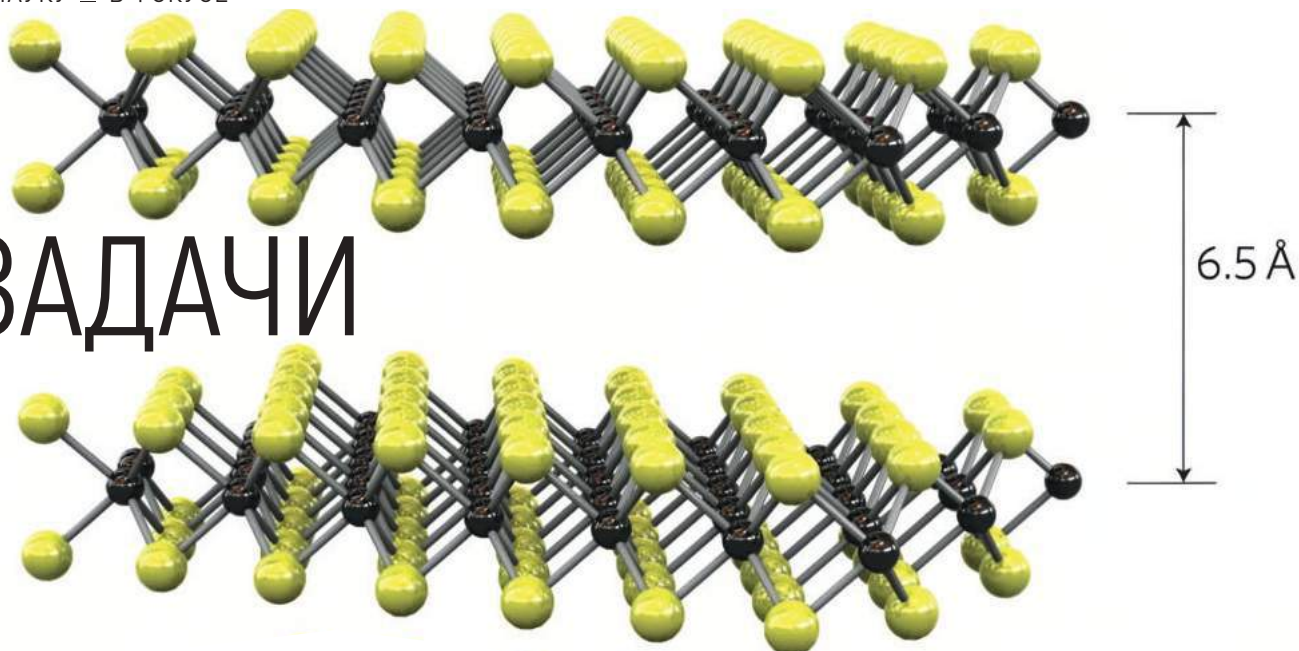
Параллельно ведутся интенсивные работы по освоению субмикронных технологий на отечественных производствах, что крайне важно для обеспечения надежной элементной базы для автомобилестроения, энергетики, телекоммуникаций. Однако перспективное развитие видится не только в догоняющей логике. Нужно не только прыгнуть в уже идущий на высокой скорости поезд мирового прогресса, но и найти свои направления и ниши, где можно достичь прорыва, то есть наш поезд должен быть немного «квантовым», а не просто обычным, с понятным всем движением. Это прежде всего создание процессоров и систем на кристалле для задач искусственного интеллекта, квантовых процессоров, сверхпроводящей электроники на основе функциональных материалов,



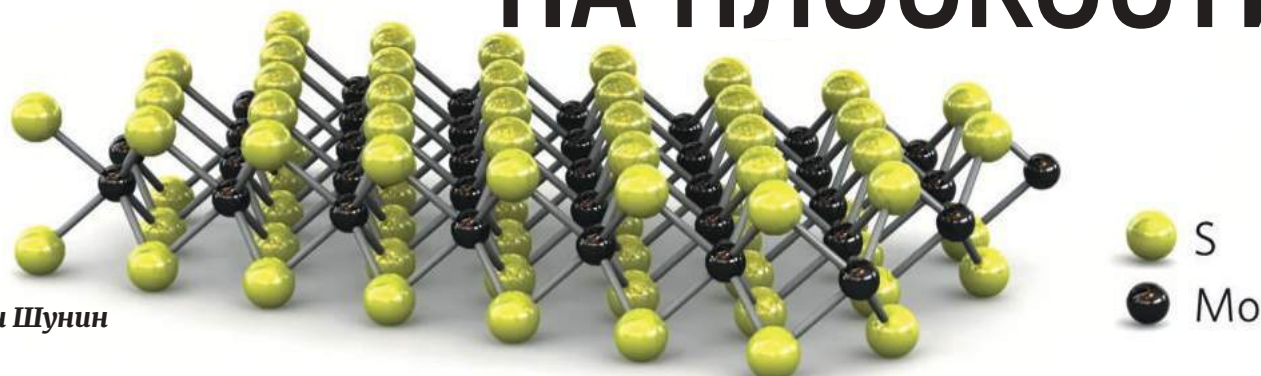
которые имеют иную архитектуру и могут быть более конкурентоспособными даже при использовании не самых передовых техпроцессов. В основе современной электроники, в силу очень малых размеров элементов электрических цепей на чипе, сильно проявляются квантовые эффекты, распространяющиеся на мезоскопических масштабах. Здесь проявляют себя наши ученые, занимающиеся именно фундаментальными исследованиями новых физических эффектов в микро- и наноструктурах, синтезом и изучением новых функциональных материалов. Они разрабатывают теорию, описывают изученные и предсказывают возможные эффекты, которые могут лечь в основу перспективных вычислителей, памяти и сенсоров нового типа. Активно развивается направление проектирования чипов с применением открытой архитектуры, что позволяет избежать зависимости от зарубежных лицензий

и создавать микроустройства для конкретных применений: от интернета вещей до высокопроизводительных вычислений. Важнейшим элементом стратегии является опора на отечественное научное наследие и подготовку кадров. Разработка новых материалов (кремний-германиевые гетероструктуры, двумерные Ван-дер-Ваальсовы материалы, соединения A^3B^5 , сверхпроводники), исследование посткремниевой электроники (квантовые вычисления, фотоника, спинтроника) — важные инвестиции в технологический суверенитет будущего. Путь России в микроэлектронике — сложная комбинация фундаментальных исследований, импортозамещения критически важных компонентов, рывка в создании собственного оборудования и асимметричного прорыва в перспективных направлениях, где можно занять лидирующие позиции, обеспечив страну необходимым.

ЗАДАЧИ



НА ПЛОСКОСТИ



Иван Шунин

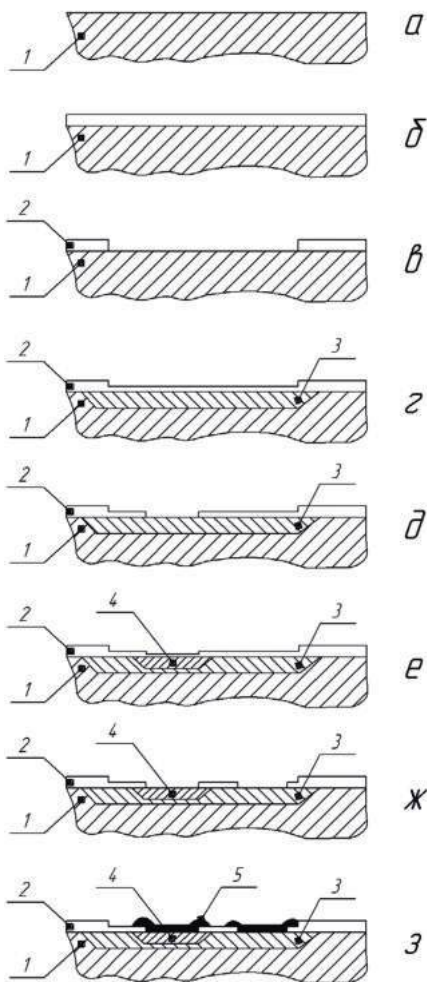
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ПО-ПРЕЖНЕМУ ДЕЛИТСЯ НА ДВЕ ОСНОВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ: ЛОГИКУ И ПАМЯТЬ. ГЛАВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ ВСЕХ НИХ — КИРПИЧИК, ИЗ КОТОРОГО ВСЕ СТРОИТСЯ, — КРЕМНИЕВЫЙ ТРАНЗИСТОР МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК, ОН ЖЕ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР. МЫ ПОЧТИ ПОЛВЕКА ПРОСТО УМЕНЬШАЛИ ЕГО РАЗМЕРЫ, А ПОТОМ УПЕРЛИСЬ В ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КРЕМНИЯ

Функции подзатворного диэлектрика в классическом полевом транзисторе выполнял диоксид кремния SiO_2 . Его замечательность в простоте получения: это делается хорошо контролируемым окислением поверхности кремниевой подложки, на которой печатаются транзисторные схемы. Слой оксида получается, во-первых, очень тонкий,

а во-вторых — очень качественный. Соответственно, постепенное уменьшение этого слоя позволяло продолжать миниатюризировать транзисторы на кремниевой подложке.

До предела толщины диоксида кремния микроэлектронная промышленность дошла в нулевые годы XXI века. Уже в 2001 году слой подзатворного SiO_2 стал

исчисляться в атомах. Диаметр атома кремния — 0,26 нанометра; в слое толщиной 1,3 нанометра их никак не больше пяти. И для электронов, бегущих по затвору, такая преграда уже перестала быть сплошной — потому что на таких масштабах управлять начинают законы квантового мира. Носители заряда, одновременно частицы и волны, стали



Изготовление транзистора по планарной технологии:

(1) полупроводник с электропроводностью n-типа; (2) пленка диоксида кремния; (3) область базы; (4) область эмиттера; (5) металлическая пленка (электроды).

(а) подложка; (б)-(ж) три цикла окисления и засветки в степпере для создания областей базы и эмиттера; (з) металлизация

© Sergey Buzun / CC BY-SA 3.0

просачиваться сквозь кристаллы изоляции, разогревая платы. Разогреченные ноутбуки теряли заряд быстрее прежнего, дата-центрам пришлось разоряться на дополнительное охлаждение, а разработчики мобильных устройств — внедрять процедуры форсированного энергосбережения.

Проблема энергоэффективности — вечная. Пределы кремния привели к тому, что дальше 4 гигагерц частота процессоров не пошла, вместо этого стало расти число самих процессоров.

HKMG, FINFET, GAAFET

В 2007 году Intel выпустила на рынок high-k / metal gate процессор, в котором в качестве подзатворного изолятора вместо кремния использовался оксид гафния.

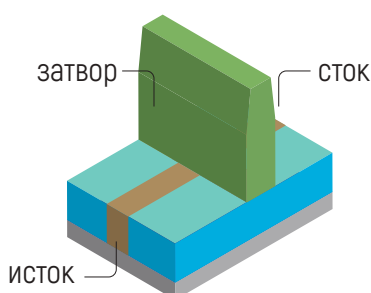
Смена материала для индустрии ознаменовала серьезное изменение технологического процесса. Если прежде достаточно было просто окислять подложку, теперь на нее надо было наносить тонкий слой металлического диэлектрика. Для этого в порядок производства пришлось добавить еще один этап.

Так оборудование для атомно-слоевого осаждения из лабораторий переехало на фабрики полупроводников. Вместе с этим пришлось отказаться и от кремниевого затвора, чтобы получить транзисторы n- и p-типа, которые прежде делали так называемым легированием — просто «накачивая» кремниевый слой бором или фосфором.

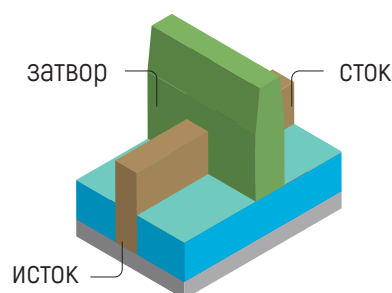
«К сожалению, этот путь, high-k / metal gate (HKMG), тоже исчерпал себя, — говорит Андрей Маркеев, руководитель группы атомно-слоевого осаждения ЦКП МФТИ. — В планарных транзисторах на кремнии удалось получить длину канала порядка 20 нанометров. Дальше уже ничего не помогало. Если вы решаете уравнение Пуассона, там есть такой параметр лямбда, характерная длина экранирования, уж меньше которой вы вообще не сделаете транзистор. И эта лямбда, она зависит не только от диэлектрической проницаемости (k) диэлектрика, от толщины диэлектрика, но и от толщины полупроводника». И это дает еще один ключ к уменьшению длины транзистора, а именно уменьшение толщины самого кремния.

И тогда транзисторы перевели на тонкий и вертикально расположенный канал. Появилась технология, известная сейчас как FinFET (fin — англ. «плавник»): при этом затвор стал «обнимать» канал между истоком и стоком с трех сторон. А чтобы шагнуть еще дальше, идею с «плавниками» довели до предела: GAAFET (GAA — gate all around, то есть буквально «затвор со всех сторон»). «Полную технологию, конечно, никто не расписывает, но там длина канала порядка 10 нанометров, — объясняет Маркеев. — Это уже очень серьезная технология. Gate All Around освоили только две компании. Это Intel и TSMC. Это еще сложнее, чем FinFET».

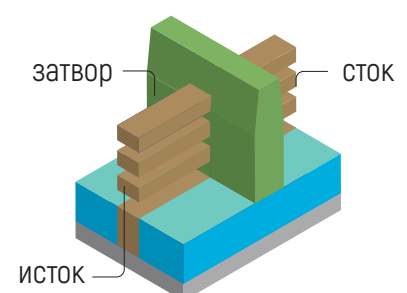
Обычный MOSFET

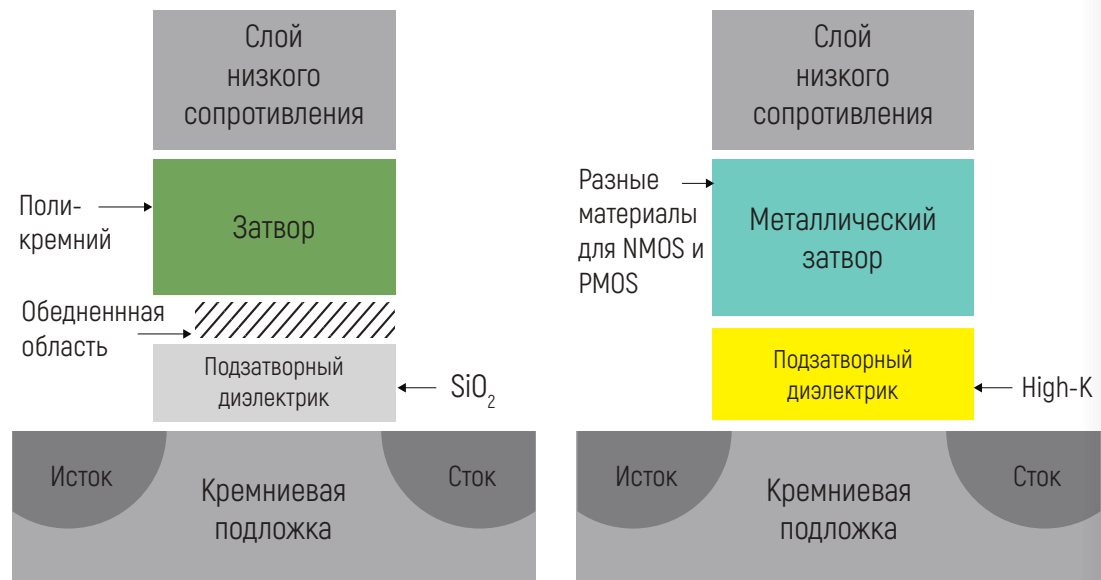


FinFET



GAAFET





Mingshi Wang 2024 J. Phys.: Conf. Ser. 2798 012039

ОТ ОБЪЕМА К ПЛОСКОСТИ

Кремний — обычный, «объемный» материал. Получить слой нанометровой толщины, в принципе, возможно, но он не будет однозначно ровным, просто потому, что это совсем неестественное состояние для материала с такой структурой. И шероховатости на его поверхности будут сопоставимы с толщиной канала вашего нанометрового транзистора. Что делает в целом бессмысленным всю затею.

Возбуждение, которое испытал большой бизнес после открытия графена, был связан в первую очередь с тем, что ультра-тонкие и плоские слои графена можно получать контролируемо. Однако, как быстро выяснилось, графен по своим свойствам все-таки не полупроводник, а полуметалл. В нем нельзя так просто взять и «пережать» проводимость, как это делают в полупроводнике. Это, конечно, не делает графен бессмысленным для микроэлектроники в принципе. Просто он не закрывает вопрос, волнующий

индустрию в первую очередь, а он все тот же: как уменьшить размер транзисторов, которые были придуманы в середине XX века, когда о квантовой физике, двумерных материалах и прочих тонкостях физического устройства микромира думали только в университетских стенах?

Графен, тем не менее, пробил дорогу всему классу двумерных материалов. В центре внимания прямо сейчас дихалькогениды переходных металлов (ДПМ). Дисульфид молибдена, дисульфид вольфрама и их же диселениды. Они похожи на графен тем, что их кристаллы представляют собой мономолекулярные слои, «склеенные» ван-дер-ваальсовым притяжением, и при этом, в отличие от него, по природе своей — полупроводники.

«Сейчас все сообщество, которое отвечает за закон Мура, рассматривает двумерные ДПМ уже серьезно, — говорит Маркеев. — Строят машины, чтобы их растить. С ним совсем другая технология, и к нему неприменимо ионное ле-

гирование. Я лет пять назад думал, что это только университетская наука. Но нет: Intel, TSMC и IMEC ведут исследования в этой области.

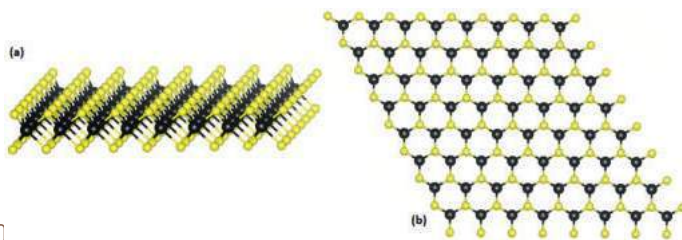
И в одном из своих обзоров Intel уже пишет, что надо с ним, конечно, еще поразбираться, но есть признаки того, что электроника может перейти на атомарный уровень, и это будет сопоставимо с той революцией, которую вызвала кремниевая микроэлектроника. Так что двумерные дихалькогениды переходных металлов уже рассматриваются как прямая альтернатива кремнию».

Один из первых «двумерных» ДПМ транзисторов сделали в 2011 году, естественно в лаборатории. На подложку из окисленного кремния перенесли слой дисульфида молибдена, который довели до сверхтонкого состояния механическим расщеплением (так же получают монослои графена). Этот слой покрыли сверхтонким слоем оксида гафния — тут уже действовали точно так же, как уже придумали в Intel, используя метод атомно-слоевого осаждения. Получился классический «бутерброд» планарной технологии: подложка — полупроводник — изолятор, электроды и затвор ученые сделали из золота. Он работал как транзистор n-типа.

Генерально, для выхода «в продакшн» с дихалькогенидами нужно все еще решить три проблемы:

Структура гексагонального монослоя дихалькогенида переходного металла
M — атомы металла, X — халькогены
(a) профиль
(б) решетка

© 3113lan / CC BY-SA 3.0



бездефектного роста строго атомарного слоя на подложках коммерчески значимых площадей; снижения разницы сопротивления между слоем полупроводника и контактами транзистора, то есть получения качественных омических контактов истока и стока; возможность получать транзисторы n- и p-типов.

Первая — вопрос совершенствования метода ACO как такового. Вторая, скорее всего, решается балансным перебором материала для электродов и затвора. С третьей все несколько сложнее.



Андрей МАРКЕЕВ,
руководитель
группы атомно-
слоевого осаждения
ЦКП МФТИ:

“ ”

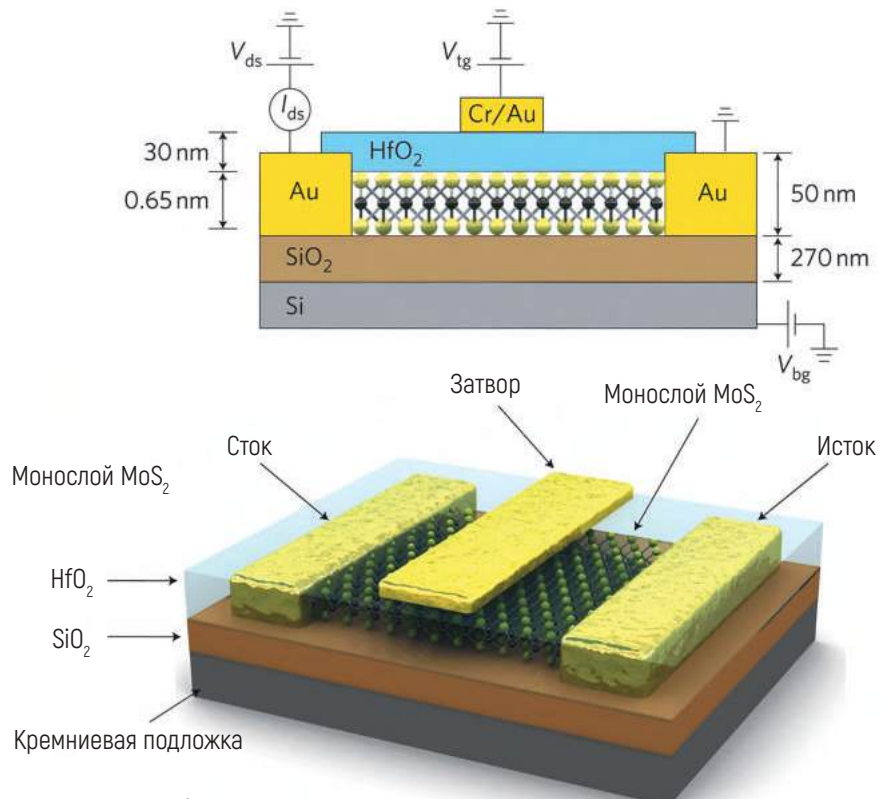
«Современная флеш-память, на самом деле, одно из немногих изделий, которые можно считать трехмерными. Вот там — десятки слоев. Вы укладываете эту память “этажами”, а канал для нее делают из поликремния. И диаметр этого канала настолько мал, что он получается практически аморфным. И, соответственно, в такой аморфной структуре подвижность электронов уже $0,1 \text{ см}^2/(\text{Вс})$. Люди пишут, что нам, конечно, хотелось бы считывать ток 1 микроампер, но у них всего 200 наноампер. Да, в памяти, конечно, не требуется безумного быстродействия, но и тут есть пределы. И если, например, получится заменить поликремний на тот же дисульфид молибдена — здесь он показал, что у него подвижность $50 \text{ см}^2/(\text{Вс})$, не $0,1 \text{ см}^2/(\text{Вс})$ ».

«В кремнии это решалось легированием, — объясняет Маркеев. — Для двумерных материалов это пока проблема: они плоские, в них ионы не застревают, прошибают насквозь. Но оказалось, что диселенид вольфрама позволяет реализовать транзистор p-типа. А дисульфид молибдена — транзистор n-типа. Надежда на то, что на этой паре, MoS_2 и WSe_2 , можно будет делать комплементарные устройства».

В апреле 2025 года китайские исследователи отчитались в журнале Nature, что создали 32-битный процессор с 5931 транзистором, слой дисульфида молибдена на котором строго один — толщиной три атома: сера, молибден, сера. Его производительность на порядки ниже, чем у его кремниевых коллег даже прошлых поколений — он работает на частоте нескольких килоггерц. Но на нем уже реализована логическая архитектура RISC-V, то есть это полноценный процессор, причем этапы его производства могут быть воспроизведены на современных

фабриках, печатающих кремниевые CMOS. Вопрос, переводимо ли это «могут» в глагол совершенного вида «смогут», конечно, до сих пор открыт: это дело техники. На которое нередко уходят годы.

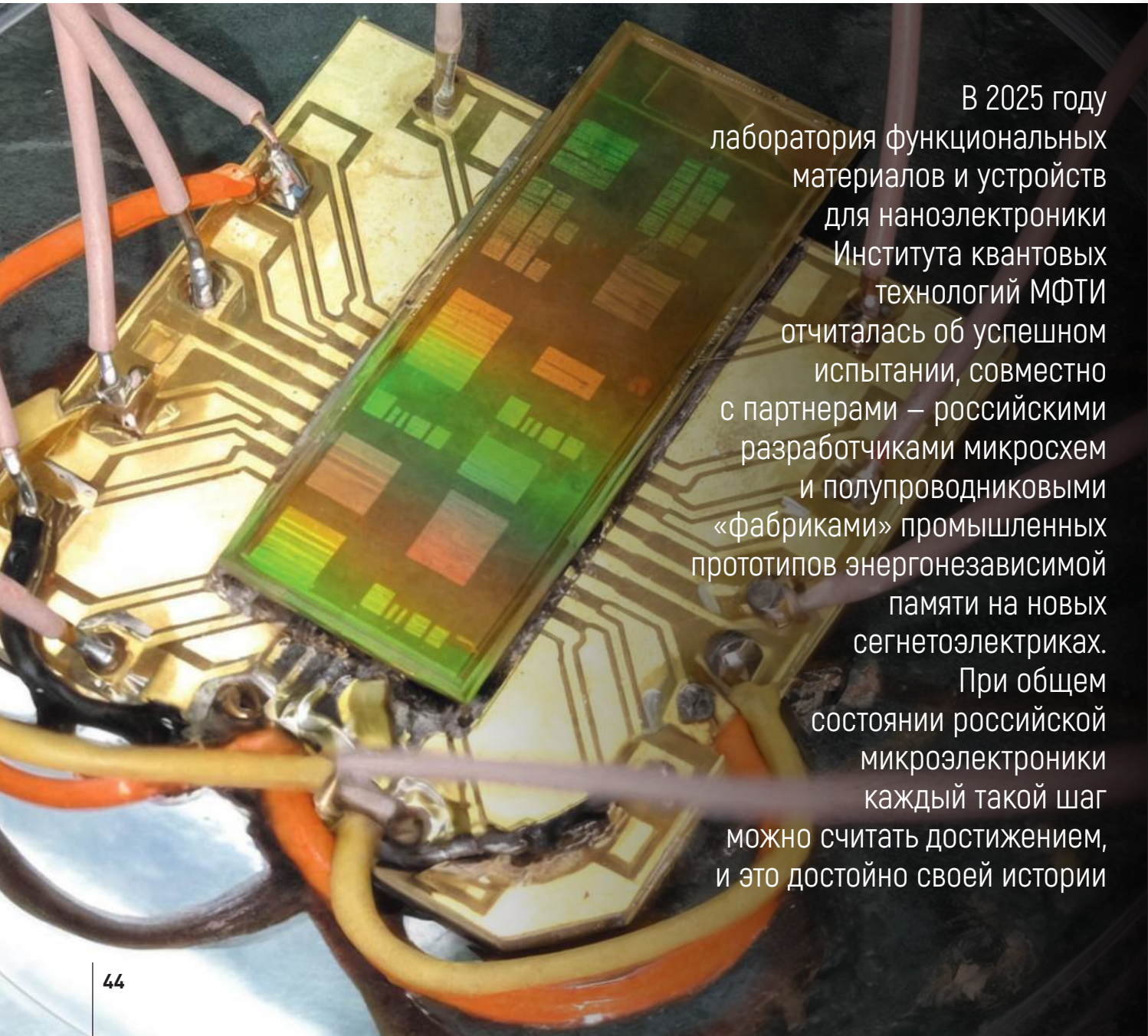
И наконец, двумерные ДПМ преподнесли микроэлектронике еще один подарок: они относительно легко переносятся на пластину с уже готовым слоем транзисторов. То есть транзисторы из 2D-материалов можно просто укладывать друг на друга. Таким образом, с одной стороны, оставаясь в логике планарного CMOS-производства, где сложение слоев порождает один «плоский» функциональный слой, вы приходите к сложным, многоуровневым устройствам, в каждом слое которого реализована отдельная интегральная схема. Это путь к давней мечте микроэлектроники: выход «в объем», к освоению третьего измерения. Но это, конечно, еще очень далекое — в технологическом смысле — будущее. Пока что нам надо научиться решать задачи на плоскости.



© Radisavljevic, B. et al. / Nature Nanotech, 2011

БЫСТРАЯ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ И ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКАЯ ПАМЯТЬ

Татьяна Небольсина



В 2025 году лаборатория функциональных материалов и устройств для нанoeлектроники Института квантовых технологий МФТИ отчиталась об успешном испытании, совместно с партнерами – российскими разработчиками микросхем и полупроводниковыми «фабриками» промышленных прототипов энергонезависимой памяти на новых сегнетоэлектриках. При общем состоянии российской микроэлектроники каждый такой шаг можно считать достижением, и это достойно своей истории

Сейчас повсеместно мы имеем дело с памятью на МОП-транзисторах (металл-оксид-полупроводник). До ее появления информация из процессора хранилась на магнитных сердечниках, которые использовали эффект магнитного гистерезиса. В начале 1950-х некто Дадли Аллен Бак предложил альтернативу — сегнетоэлектрическую энергонезависимую память. Будучи аспирантом Массачусетского технологического института, он защитил магистерскую диссертацию под названием «Сегнетоэлектрики для хранения и коммутации цифровой информации». В 1990-е на рынке появилась память на сегнетоэлектриках FRAM (ferroelectric random access memory). Такими были, например, карты памяти для Playstation 2, но серьезным конкурентом энергонезависимой DRAM на диэлектрических конденсаторах технология не стала: она использует перовскитные сегнетоэлектрики, которые не используются в других областях микроэлектроники. Но важнее оказалось то, что эти материалы эффективно справляются со своими функциями только при сравнительно большой (~100 нм) толщине слоя, и устройства на их базе оказываются слишком велики, и, стало быть, такая память имеет недостаточную емкость для современных стандартов потребительской электроники. Объем рынка сегнетоэлектрической памяти оценивается в \$350 млн в год (для сравнения: в 2024 году объем мирового рынка памяти DRAM был \$115,89 млрд). Преимущества FRAM по сравнению с энергонезависимой флеш-памятью, такие как быстрая запись, гораздо большее число циклов перезаписи, меньшее энергопо-

Специально разработанная (под руководством Дмитрия Негрова) и изготовленная на промышленной линии АО «Микрон» в рамках проекта исследовательская микросхема — во время статистических исследований матриц устройств памяти на основе сегнетоэлектрического HfO_2 .

требление, делают ее выгодной для записи и хранения небольшого объема, но часто меняющихся данных и показаний датчиков с минимальным энергопотреблением, например в портативных устройствах и IoT, 3D-принтерах, промышленной электронике.

НАЧАЛО

Возможность покинуть свою узкую нишу появилась у сегнетоэлектриков в 2011 году, когда немецкие ученые Мюллер и Бёске (T. Boscke, J. Muller) показали, что метастабильная кристаллическая фаза с сегнетоэлектрическими свойствами может быть сформирована в пленках оксида гафния, легированного SiO_2 , толщиной около 10 нм. «Сегнетоэлектрический оксид гафния идеально подходит для сегнетоэлектрических полевых транзисторов и конденсаторов благодаря своей превосходной совместимости с кремниевой технологией», — написали они в своей пионерской статье. Оксид гафния используется при производстве микропроцессоров в качестве подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов, а это уже полдела на пути к внедрению новой технологии в существующий техпроцесс. Неудивительно, что публикации на тему сегнетоэлектриков, которые стали в 10 раз меньше своих 100-нанометровых предшественников, моментально заинтересовали ученых и инженеров.

Среди них, например, была и группа Андрея Маркеева из Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий МФТИ. К концу 2015 года ученым удалось вырастить сверхтонкие (2,5 нм) сегнетоэлектрические пленки из оксидов гафния и циркония — и это размер, который позволяет всерьез говорить о конкурентной энергонезависимой сегнетоэлектрической памяти.

Для роста пленки использовался метод атомно-слоевого осаждения, который в индустрии микроэлектроники используется с 2000-х годов. Метод хорош еще и тем, что позволяет растить функциональные слои в трехмерных структурах.



Анастасия Чуприк, заведующая лабораторией перспективных концепций хранения данных МФТИ:

“ ”

Мюллер и Бёске сделали свое открытие еще в 2007 году. Но они работали в коммерческой компании, поэтому еще четыре года занимались патентованием и изготовлением макетов устройств памяти, так что научная публикация вышла только в 2011 году. Я хорошо помню, как в 2012 году на конференции обсуждали эту работу. Как всегда, некоторое время ушло на раскачку. Андрей Маркеев проявил настоящую научную интуицию: его группа, специализирующаяся на развитии метода атомно-слоевого осаждения (АСО), одной из первых повторила синтез этого материала — уже в 2014 году. Сегодня же подобные исследования ведутся десятками научных групп по всему миру.

В этот момент перед учеными маячила перспектива вывести лабораторную разработку в реальную промышленность. На этом этапе к работе подключились коллеги из лаборатории функциональных материалов и устройств для нанoeлектроники МФТИ и лаборатории перспективных концепций хранения данных.

ТРИ ТИПА ПАМЯТИ И МЕМРИСТОРЫ

Сегодня известных концепций сегнетоэлектрической памяти три:

- на конденсаторах (FRAM),
- на транзисторах (FeFET),
- на туннельных переходах.



FRAM — самая простая с точки зрения конструкции, по такому же принципу построена классическая DRAM-память. Конденсатор или заряжен или разряжен — значение соответствующего бита принимает либо 1, либо 0. Соответственно, при считывании состояния эта информация теряется, и чтобы она совсем не пропала, после цикла чтения должен идти новый цикл записи. Этой концепции 70 с лишним лет, и она до сих пор прекрасно работает в памяти DRAM. В памяти на транзисторах FeFET информация при считывании не теряется («недеструктивное считывание») — так работает Flash-память, прогресс в масштабировании которой мы все видели своими глазами: совсем недавно в ходу были «флешки» на 128 МБ,

сейчас точно в таком же корпусе умещается уже терабайт, а стоимость устройства осталась практически той же. С этой точки зрения, потенциал сегнетоэлектрической памяти на транзисторах также весьма велик: при размере одной ячейки ~20 нм (соизмеримом с доменами в сегнетоэлектрическом слое), можно рассчитывать на емкость ~10 Гбит, и при этом быстро (~10 нс) записывать информацию, иметь на много (4–5) порядков больший ресурс перезаписи, а энергопотребление в ~1000 раз ниже, чем у Flash. Концепция сегнетоэлектрической памяти на туннельных переходах была предложена в 2006 году. Сегнетоэлектрики — изоляторы, они не проводят электрический ток. Однако если слой изолятора

достаточно тонкий, электроны начинают «проскакивать» сквозь него благодаря эффекту квантового туннелирования. Вероятность туннелирования зависит от формы потенциального барьера (энергетической характеристики структуры), а «проскочившие» электроны образуют туннельный ток. Движение электронов в этом случае напоминает бег с препятствиями, а величина этого препятствия определяется направлением вектора спонтанной поляризации, который меняет форму потенциального барьера. Запись информации производится подачей напряжения на электроды, между которыми заключен сверхтонкий сегнетоэлектрик, а считывание — измерением туннельного тока. Такая память также может обладать исключи-



2016 год, первая команда разработчиков. Слева направо, дальше всех Андрей Зенкевич, затем Сергей Зарубин, Анна Черникова, Дмитрий Негров, Андрей Маркеев и Максим Козодаев после публикации результата первой в мире успешной попытки вырастить сегнетоэлектрический HfO_2 толщиной всего 2,5 нм. © Евгений Пелевин, пресс-служба МФТИ

ПАМЯТЬ НА КОНДЕНСАТОРАХ

Первым видом памяти на сегнетоэлектриках, разработкой которого занялись команды Маркеева, Зенкевича и Чуприк, стала память на конденсаторах (FRAM). Для этого необходимо было детально исследовать свойства выращиваемого группой Маркеева материала. Чтобы перейти из лаборатории в промышленность, новое устройство должно как минимум не уступать по ключевым характеристикам уже существующим. Для памяти это:

- время доступа,
- срок хранения,
- ресурс перезаписи,
- энергопотребление.

Время доступа у кремниевого стандарта DRAM — менее 10 нс, а у Flash — 20–70 нс, и у новой памяти оно должно быть по возможности сопоставимо. Далее — время хранения, созданная в конце прошлого века память на перовскитных сегнетоэлектриках может хранить информацию 10 лет без перезаписи (на это ушла пара десятков лет разработок), но достичь такого же результата с использованием нового сегнетоэлектрика на основе HfO_2 оказалось сложной технической задачей. Следующий критерий — ресурс, то есть максимальное число циклов перезаписи. Для замены энергозависимой DRAM на энергонезависимую FRAM это число должно быть $\sim 10^{14}$, но до этого пока далеко, для СЭ- HfO_2 это $\sim 10^9$. К началу 2018 года эксперименты, проведенные коллективом, позволили детально описать процесс переключения электрической поляризации в легированном оксиде гафния. Полученные данные впервые продемонстрировали существование у этого класса материалов наноразмерных доменов, то есть областей сегнетоэлектрика с определенной поляризацией. Была также экспериментально подтверждена перестройка кристаллической решетки оксида гафния в результате воздействия внешнего электрического поля. Таким образом, ученые выяснили и описали микроскопическую природу сегне-

тельно высокой плотностью (малым размером ячеек памяти), скоростью записи и считывания, а также низким энергопотреблением. Но и это еще не все. У сегнетоэлектрических туннельных переходов есть так называемые мемристорные свойства, то есть их проводимость зависит от амплитуды и числа импульсов приложенного напряжения (подобно тому, как проводимость в синапсах мозга зависит от амплитуды и частоты нервных импульсов-спайков). Такие свойства являются необходимым условием для создания электронных синапсов, которые могут быть использованы в нейроморфных вычислительных системах с принципиальной иной архитектурой, отдаленно напоминающей принципы работы человеческого мозга.



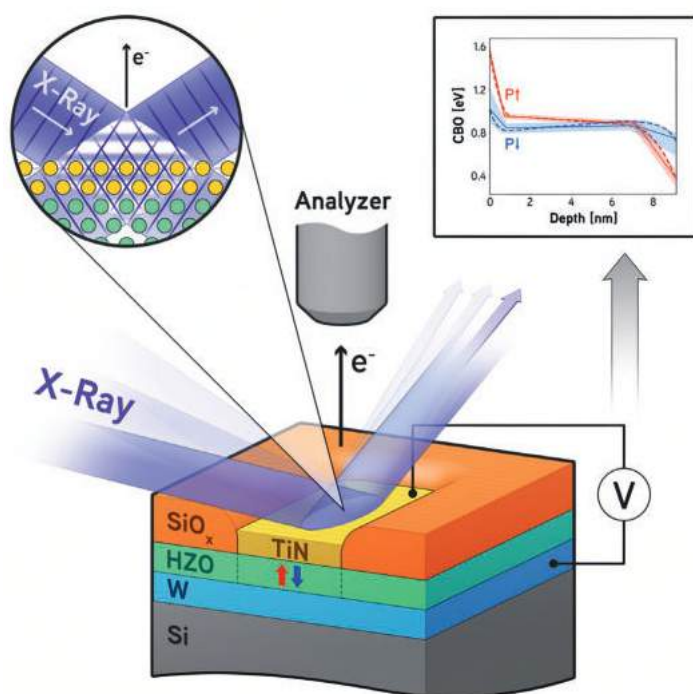
Анастасия Чуприк, заведующая лабораторией перспективных концепций хранения данных МФТИ:

“ ”

Нам предстояло определить условия синтеза пленок, обеспечивающие высокую остаточную поляризацию — ключевой параметр, определяющий величину «окна памяти». Параллельно требовалось добиться низких рабочих напряжений для минимизации энергопотребления, а также обеспечить другие критически важные функциональные характеристики: длительное время хранения информации, высокий ресурс переключений и быстрое действие.

Каждая из этих характеристик требовала отдельной серии исследований. По масштабу работы это, условно, одна характеристика — одна кандидатская диссертация. При этом все целевые параметры должны были превосходить показатели flash-памяти — только в этом случае разработка могла представлять интерес для промышленности.

то- и пьезоэлектрических свойств этого тонкопленочного материала. Также были детально изучены механизмы, ответственные за переключение поляризации, и за наблюдаемые эффекты «пробуждения» и «старения» сегнетоэлектриков (то есть относительного увеличения и снижения величины остаточной поляризации). Затем нужно было решить проблему надежности устройств. Эффекты «усталости» должны быть минимизированы, если не полностью устранены, прежде чем новая технология



Принципиальная схема проведенного синхротронного эксперимента по измерению распределения электрического потенциала в наноразмерных слоях сегнетоэлектрического $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2$. Специально созданный прототип ячейки памяти был помещен в сверхвысоковакуумную камеру электронного спектрометра, при этом он был подключен к аппаратуре, контролирующей ее электрическое состояние и позволяющий переключать направление поляризации прямо под рентгеновским пучком. При скользящем ($\sim 0,5$ градуса) падении сфокусированного рентгеновского излучения на поверхность ячейки можно добиться появления «стоячей» волны рентгена в структуре. Возбужденные этой волной фотоэлектроны фиксировались энергоанализатором, и сканирование по углу позволило восстановить профиль электрического потенциала по глубине слоя оксида гафния толщиной 10 нм. © Nanoscale



Подготовка к росту тонкопленочного слоя сегнетоэлектрического HfO_2 на пластину кремния диаметром 200 мм методом атомно-слоевого осаждения в лаборатории Андрея Маркеева Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий МФТИ. © Станислав Любаускас, пресс-служба РНФ

сможет выйти на рынок. Оказалось, что характеристики сегнетоэлектрических устройств на основе оксида гафния в течение их жизненного цикла критически зависят от наличия точечных дефектов. К 2021 году научная группа разработала физические принципы повышения надежности. Ученые разобрались с тем, как теряются состояния в FRAM-ячейках, как идет деградация, и придумали систему тестирования и методы минимизации деградации. После этого уже можно было перейти к созданию промышленных прототипов. Здесь к делу подключились промышленные партнеры, привлеченные Фондом перспективных исследований. С их помощью были изготовлены опытно-заводские образцы энергонезависимой памяти на основе сегнетоэлектрического HfO_2 .



Андрей Зенкевич, заведующий лабораторией функциональных материалов и устройств для нанoeлектроники МФТИ:

“ ”

Путь от научного открытия до внедрения всегда непрост, и конечный результат никогда не гарантирован. Даже в случае успеха это занимает от 10 лет. Например, технология беспилотного вождения автомобиля была в основном разработана к 2004 году, а внедрена в практику в Калифорнии в 2024-м. Более близкий нам пример — магнитные диски на эффекте гигантского магнетосопротивления: открытие Альбер Ферт и Петер Грюнберг сделали в 1988 году, а первые коммерческие ГМС-головки для жестких дисков были выпущены в 1997 году. Если взять тех же немцев из частной лаборатории NamLab (Дрезден, Германия), которые опубликовали свою статью про сегнетоэлектрические свойства оксида гафния в 2011-м (а впервые обнаружили свойства еще в 2007-м), создали стартап-компанию в 2015 году, но коммерческих устройств памяти они еще пока так и не сделали — ни они, никто другой в мире. Первый этап для нас заключался в том, чтобы добиться хороших сегнетоэлектрических свойств в сверхтонких сплавных поликристаллических слоях $\text{HfO}_2\text{-ZrO}_2$, интегрировать их в конденсаторные структуры с материалами электродов, используемыми в промышленности (TiN), и продемонстрировать на таких одиночных «устройствах памяти» конкурентоспособные функциональные характеристики, не уступающие мировым аналогам. Следующим шагом явилась демонстрация возможности создания работоспособных матриц таких

сегнетоэлектрических устройств, в частности над процессором (который разрабатывался в рамках другого проекта ФПИ под руководством Дмитрия Негрова). Успех той демонстрации стал отправной точкой для проекта Фонда перспективных исследований по разработке демонстратора микросхемы сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти на основе HfO_2 . Это потребовало вовлечения усилий всего коллектива в МФТИ, вместе с партнерами — разработчиками микросхем в Зеленограде (НИИМЭ) и Нижнем Новгороде (НИИИС им. Ю. Е. Седакова), а также промышленных предприятий микроэлектроники (ПАО «Микрон», НИИИС). Важно отметить, что при запуске проекта на этих предприятиях еще не существовало технологии роста тонкопленочных слоев методом АСО, и поэтому процесс изготовления чипов предполагал перемещение кремниевых пластин с завода в МФТИ и обратно. Параллельно велись интенсивные исследования физических явлений, которые мешают нам получить требуемые функциональные характеристики, прежде всего времени хранения и ресурса перезаписи. Сейчас эти проблемы в целом решены, и уже продемонстрирован промышленный прототип микросхемы памяти на основе HfO_2 . У него пока ограниченная емкость, да и характеристики требуют дальнейшего улучшения. Но уже более или менее понятен путь, как этого добиться, и есть достаточные основания надеяться, что проект будет успешно завершен в 2026 году.

НАША ПАМЯТЬ НА FeFET

Анастасия Чуприк,
заведующая лабораторией
перспективных концепций
хранения данных МФТИ

Коллектив лаборатории перспективных концепций хранения данных Института квантовых технологий МФТИ совместно с АО «НИИМЭ» успешно завершил ключевой этап разработки и изготовления макетов энергонезависимой памяти на основе сегнетоэлектрических полевых транзисторов (FeFET) с архитектурой 1T-1C. Работа была выполнена в рамках проекта молодежной лаборатории МФТИ в области микроэлектроники. Руководитель лаборатории Анастасия Чуприк рассказала, что они сделали

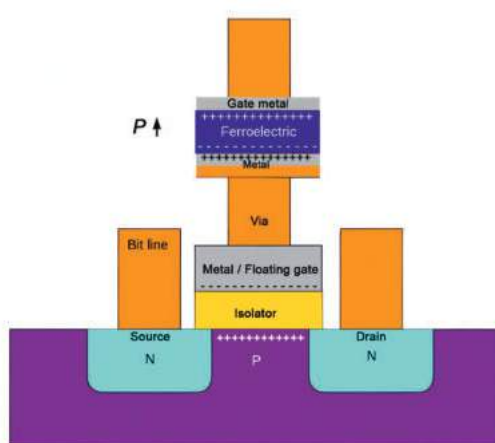
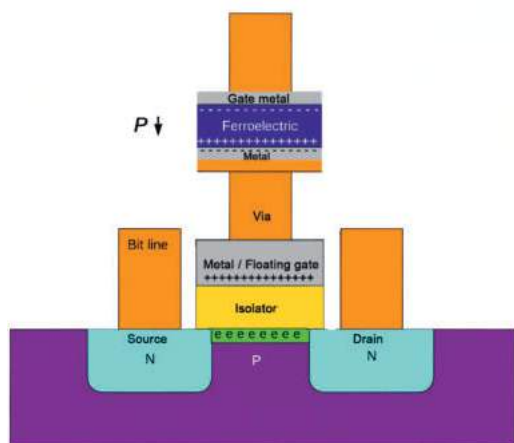
**Архитектура
1T-1C FeFET
также
известна как
MFMIIS FeFET
(metal-
ferroelectric-
metal-insulator-
semiconductor)
и MFM FET
(metal-
ferroelectric-metal)**

Наш коллектив сосредоточился на памяти FeFET, которая обеспечивает неdestructive считывание информации и высокую масштабируемость — характеристики, недостижимые для классической FRAM-памяти. В качестве функционального слоя мы использовали оксид гафния-циркония ($\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$). Фундаментальная проблема традиционных 1T FeFET-ячеек вызвана нестабильностью интерфейса

кремний- $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ (инжекция заряда, высокая плотность дефектов, нестабильная поляризация). Поэтому мы решили использовать альтернативную топологию 1T-1C. Как часто бывает, «изобрели» ее, а потом обнаружили, что такая концепция существует, хотя и мало известна. В этой архитектуре информация хранится в сегнетоэлектрическом конденсаторе, последовательно соединенном с затвором транзистора, что позволяет изо-

лировать проблемный интерфейс и сохранить преимущества технологии.

Сначала мы сделали тестовые структуры. Изготовили их на тестовом кристалле с транзисторами АО «Микрон» для проверки дизайна и всесторонне изучили. Затем провели проектирование для производства. Разработали схемотехнические решения и топологии, адаптированные для заводского техпроцесса.



Два состояния
ячейки памяти 1T-1C,
соответствующие
битам 1 и 0

После этого можно было делать макет. Технологический пуск и производство полнофункциональных макетов происходили на производственной линии АО «НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (Нижний Новгород). Было изготовлено 60 макетов с вариантами компонентов.

Тестирование подтвердило работоспособность макетов. Образцы с оптимальным соотношением параметров продемонстрировали четкий эффект памяти с переходной и выходной характеристиками, управляемыми сегнетоэлектрической поляризацией.

Не обошлось без проблем. И главной стало отсутствие эффекта памяти в первоначальных тестовых структурах. Мы провели анализ и выявили две причины: неверное соотношение емкостей сегнетоэлектрического конденсатора и затворного диэлектрика, а также компенсацию потенциала на плавающем затворе поверхностными зарядами.

Решение заключалось в точном расчете требуемых емкостей, оптимизации топологии с изолированным плавающим затвором и подборе геометрических параметров элементов. Это позволило получить стабильные и воспроизводимые характеристики.

Работу над памятью FeFET начали в 2022 году, на третьем году реализации проектов по FRAM и гибкой сегнетоэлектрической памяти. Накопленный опыт оказался бесценным: он позволил нам уложиться в жесткие сроки, отведенные грантодателем — Министерством науки и высшего образования РФ, и создать первые заводские макеты FeFET всего за два года и два месяца. Успешное создание макетов открывает путь к дальнейшим исследованиям в области масштабирования и повышения надежности архитектуры.

Эта технология — перспективная платформа для создания энергонезависимой памяти следующего поколения, которая сочетает низкое энергопотребление, высокую скорость и ресурс циклов перезаписи сегнетоэлектрической памяти с идеальной масштабируемостью флеш-памяти, что критически важно для создания высокоплотных энергоэффективных носителей информации.

Индустриальный партнер лаборатории: АО «НИИ МЭ» (Зеленоград) — одно из ведущих российских предприятий в области разработки и производства интегральных схем и полупроводниковых приборов

Кремниевые
пластины
с чипами памяти



СМОТРЕТЬ И ВИДЕТЬ

Игорь Воронцов

КАКИЕ УМНЫЕ СЕНСОРЫ ПРИХОДЯТ НА СМЕНУ КАМЕРАМ НАБЛЮДЕНИЯ

В XXI веке появилась новая форма алхимии, куда более радикальная. Она занимается не трансмутацией веществ, а переиначивает их взаимодействие со светом. А началась эта история с черной жидкости, крошечных частиц и человека по имени Итан Клем. В 2012 году Клем работал над проектом, который тогда казался почти футуристическим. Он наблюдал за суспензией крошечных кристаллов сульфида свинца, известных как коллоидные квантовые точки. Это были не просто наночастицы. Это были управляемые, настраиваемые поглотители света.

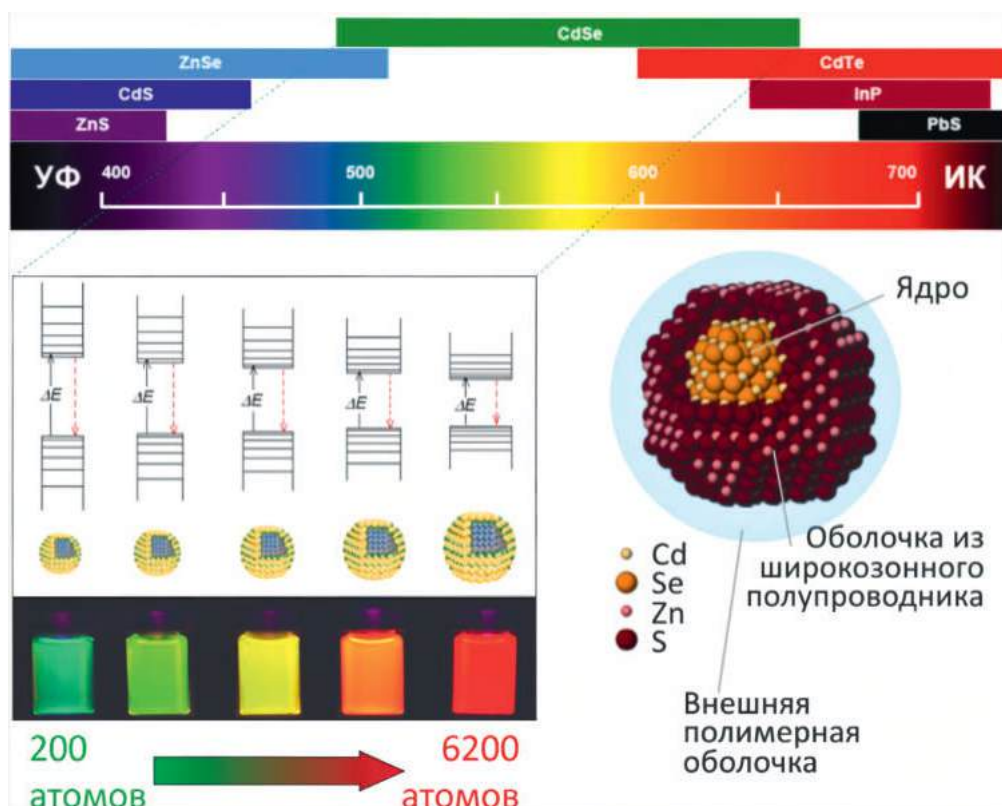
СВЕЯЩИЕСЯ ТОЧКИ

Коллоидная квантовая точка — это микроскопический кристалл полупроводника, настолько маленький (от нескольких сотен до нескольких тысяч атомов), что его электроны оказываются запертыми в трехмерной «квантовой ловушке». Из-за этого он начинает подчиняться законам квантовой механики и вести себя как гигантский искусственный атом.

Особенность, привлекавшая Клема, — возможность простой «настройки» квантовых точек. Чем меньше кристалл, тем сильнее

в нем «сжаты» электроны, и тем больше энергии требуется для их возбуждения. Поэтому самые маленькие точки поглощают и излучают высокоэнергетический свет (синий, фиолетовый, УФ), а по мере увеличения их размера — все более низкоэнергетический (желтый, красный и, наконец, инфракрасный). Просто меняя время реакции при синтезе, можно получить точки, работающие в любой нужной части спектра.

Для стабильности и эффективности эти нанокристаллы имеют сложную структуру «ядро—оболочка». Ядро состоит из материала, от-



Коллоидные квантовые точки — это полупроводниковые нанокристаллы, носители заряда которых ограничены в пространстве во всех трех направлениях. Сверху: диапазоны флуоресценции нанокристаллов, изготовленных из разных материалов. Снизу: CdSe квантовые точки разных размеров покрывают весь видимый диапазон 460–660 нм. Снизу справа: схема стабилизированной квантовой точки, где «ядро» покрыто оболочкой из полупроводника и защитным слоем полимера.

вещающего за квантовые эффекты (у Клема это был сульфид свинца), оболочка состоит из другого, более широкозонного полупроводника, который защищает ядро, предотвращая потерю энергии, а внешний слой защищает частицу от внешней среды. Спектральная шкала позволяет понять, почему Клем интересовал именно сульфид свинца. В то время как материалы на основе кадмия (CdS, CdSe) превосходно работают в видимом диапазоне — именно поэтому их сегодня используют в QLED-телевизорах, — целью Клема было создать сенсор для коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR). А для этой части спектра подходит именно сульфид свинца.

Традиционные инфракрасные сенсоры, особенно те, что работают в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR, 1000–2000 нм), используют арсенид индия-галлия (InGaAs). Он обладает высокой эффективностью и чувствительностью. Однако InGaAs-сенсоры невероятно дороги. Оттого эти материалы «по умолчанию» не используются в потребительской микроэлектронике — а интегрировать такие сенсоры в уже сложившийся техпроцесс проблематично, потому как такой реформы не

оправдывает рисков для участников сложившегося рынка. Поэтому коротковолновые инфракрасные сенсоры применяют только в военной и аэрокосмической индустрии. А еще — в производстве микроэлектроники.

ЗАДАЧА НА МИЛЛИАРД

Современные фабрики микросхем — стерильные храмы технологии. А любой, даже невидимый глазу дефект на кремниевых пластинах стоимостью сотни тысяч долларов может обернуться миллиардными потерями. Инспекционные системы на фабриках работают в SWIR-диапазоне (~900–1700 нм): в этом спектре кремний прозрачен.

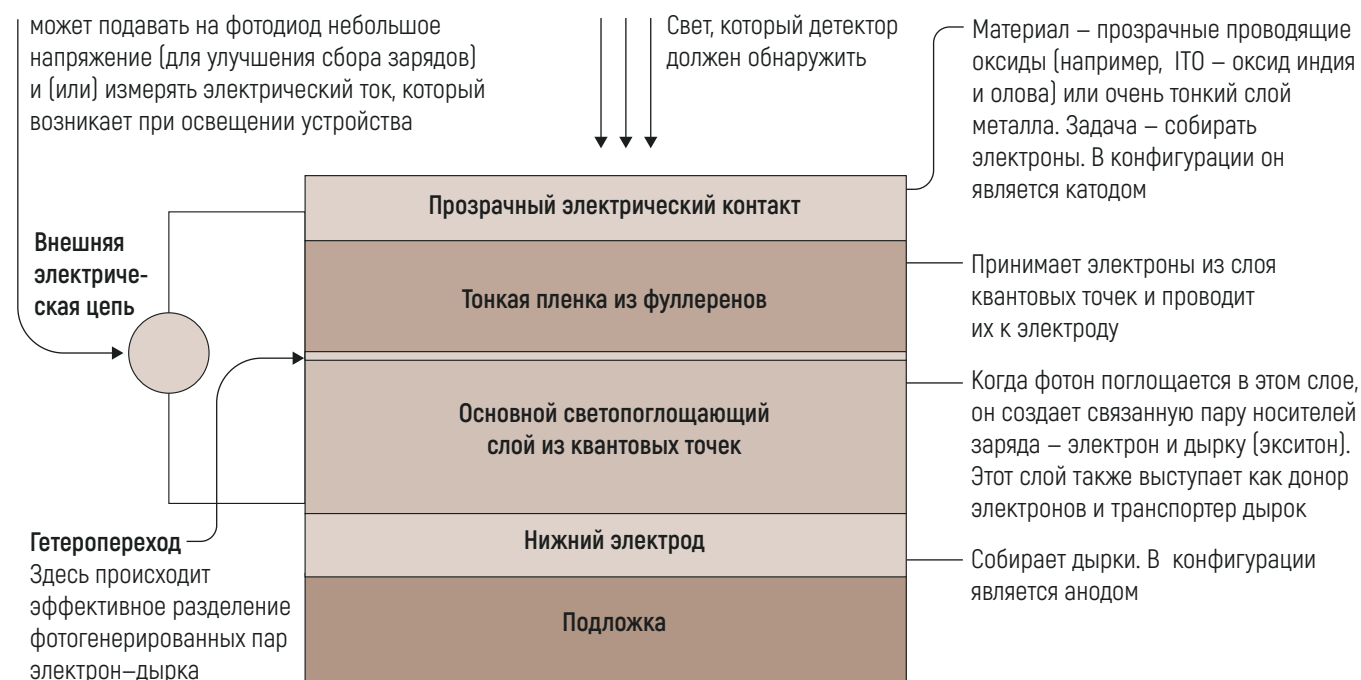
В 2014 году техпроцесс 14 нм столкнулся с резким снижением выхода годных чипов. Причина — подповерхностные микротрещины, которые не мог выявить InGaAs-сенсор. Исследователи признавали: система отстала, но заменить ее нечем.

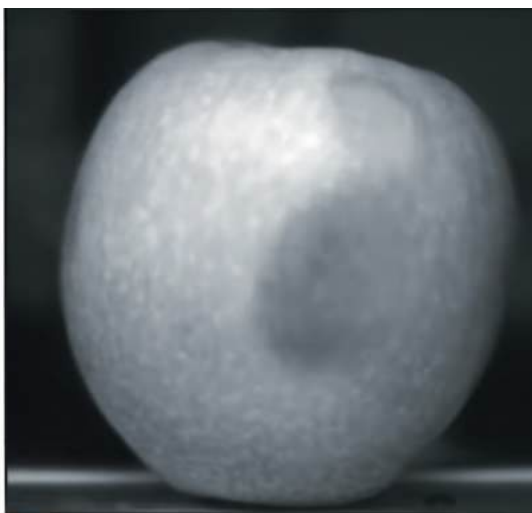
Клем задался целью создать альтернативу InGaAs, которая не уступала бы тому в производительности, была бы в несколько раз дешевле и совместима с существующими производственными

ми процессами. Им должен был стать CQD-сенсор, потому что он способен охватывать диапазон 400–1700 нм, точно настраиваясь на длину волны, совместим с кремнием и очень дешев в производстве, так как CQD синтезируются в колбах, как химический суп, и существуют в виде коллоидного раствора, который можно наносить как чернила. Другие альтернативы, которые рассматривал Клем (германий, органические полупроводники, другие экзотические материалы и тому подобное), были значительно хуже, и не могли обеспечить одновременно все эти преимущества: настраиваемый диапазон, низкую стоимость и интеграцию с кремнием. Но чтобы создать альтернативу InGaAs, ему нужно было решить сразу три фундаментальные проблемы:

- достичь стабильности материала,
- поднять коэффициент полезного действия (КПД),
- разобраться с трудностями интеграции.

Базовая многослойная структура. Источник: патент US 9,349,970 B2





Испорченный плод для человеческого глаза (слева) и для SWIR-камеры. Источник: Птицын А. «Что мы видим, а что не видим?» (НПК «Фотоника»)

Путь от концепции до работающего прототипа занял три года кропотливой работы. Первым шагом было решение проблемы стабильности. Квантовые точки сульфида свинца (PbS) оказались чрезвычайно чувствительны к кислороду и влаге, но при этом стандартные методы защиты не подходили.

Для синтеза высококачественных квантовых точек в растворе использовалась олеиновая кислота. Ее длинные органические «хвосты» создавали вокруг каждой наночастицы защитную и одновременно изолирующую «шубу». Суть всей проблемы в том, что это хорошо для хранения в колбе, но абсолютно губительно для электронного устройства: в пленке такие длинные молекулы держали квантовые точки слишком далеко друг от друга, мешая электронам свободно перемещаться.

Изобретение команды Клема, известное как твердотельная замена лигандов, элегантно решило эту дилемму. Процесс состоял из двух шагов. Сначала на подложку наносилась пленка из квантовых точек, покрытых «длинной» и непроводящей олеиновой кислотой, а затем эту пленку «промывали» раствором с короткими лигандами, такими как бутиламин или муравьиная кислота.

Короткие молекулы вытесняли длинные хвосты олеиновой кислоты и занимали их место. Этот, казалось бы, простой шаг приводил к тому, что изолирующая пленка превращалась в полупроводнико-

вую, по которой могли эффективно двигаться носители заряда, так как короткие молекулы-«мостики» стягивали наночастицы гораздо ближе друг к другу. Кроме того, процесс замены также «залечивал» дефекты на поверхности квантовых точек. Новое покрытие оказалось гораздо более устойчивым к окислению, защищая наночастицы от кислорода и влаги.

Сначала Клем использовал в этом процессе бутиламин, но в патенте описал огромное количество других химических соединений, которые подойдут для этой роли, закрепляя права на сам технологический подход.

Затем команда Клема взялась за повышение КПД. Поначалу большая часть фотонов, поглощенных материалом, не превращалась в полезный электрический сигнал. Прорыв был достигнут за счет многослойной архитектуры: вместо одного слоя CQD исследователи создали структуру из нескольких слоев, где каждый оптимизирован для своей задачи. Первый поглощает свет, другие — разделяют и транспортируют носители заряда.

Но самой сложной оказалась последняя задача — интеграция с кремнием. Клем описывал это как «попытки соединить воду и камень». Традиционные методы соединения мягкого наноматериала и жесткого кристалла не работали. Революционная идея заключалась в том, чтобы переформулировать задачу: отказаться от соединения в пользу прямого

нанесения. Ученые разработали технологию, позволяющую превратить раствор с квантовыми точками в своего рода чернила. CQD стало можно печатать непосредственно на CMOS-матрицу, создавая гибридный сенсор на оборудовании, которое участвует в техпроцессах массового производства.

В 2018 году Клем запатентовал технологию производства своего «молекулярного бутерброда» и основал компанию SWIR Vision Systems.

В том же году она выпустила Acuros CQD — первую в мире SWIR-камеру на квантовых точках с разрешением Full HD. Это был прямой вызов гигантам отрасли, Teledyne FLIR и Hamamatsu, которые традиционно доминировали на рынке с более дорогими InGaAs-решениями.

НОВАЯ КАМЕРА ЗАВОЕВЫВАЕТ РЫНОК

Ключевым преимуществом Acuros CQD стала цена: впервые инфракрасная камера стоила не десятки тысяч долларов, а лишь немного дороже обычной промышленной камеры. Это открыло двери для применения SWIR-технологии в сельском хозяйстве, транспорте, индустрии контроля качества. Вскоре Acuros CQD начали применять для инспекции кремниевых плат с разрешением до 14 нм. Их комбинированный спектральный отклик (от видимого до SWIR) оказался чувствителен к микродефектам, которые не могли разглядеть сенсоры на арсенидах галлия. Ком-

панию Клема немедленно выкупил гигант полупроводниковой индустрии ON Semiconductor, заявив: «Мы приобретаем не просто технологию, а стратегический актив для расширения нашего сенсорного портфеля».

Поглощение стало признанием того, что альтернативная технология смогла пошатнуть монополию InGaAs и предложить рынку более масштабируемую, дешевую и гибкую платформу. Onsemi объединила свои кремниевые CMOS-сенсоры и производственный опыт с технологией CQD, чтобы выпускать более компактные и экономически эффективные системы визуализации с расширенным спектром. Так технология квантовых точек преодолела «долину смерти», которая лежит перед каждым научным открытием на пути к коммерческому применению.

В 2023 году на производстве внедрились QD-камеры для контроля пятен на пластинах, снизив долю брака на 30% (sic!) и увеличив, соответственно, свою прибыль на несколько миллиардов.

Камеры нового типа нашли применение и во многих других областях. Фермеры, производители и дистрибуторы фруктов получили возможность заглядывать внутрь плодов и отбраковывать невидимые глазу дефекты. Видимый свет не позво-

ляет оценить внутреннее состояние продукта, например скрытую гниль или избыток влаги, а ближний инфракрасный диапазон с этим отлично справляется.

Неожиданным применением прорывной технологии оказалось повышение безопасности автомобильного движения. «Черный лед» — тонкий слой прозрачного льда, который практически сливается с дорожным покрытием, делая его почти невидимым для водителя и традиционных камер. Традиционные RGB-камеры не могут обнаружить «черный лед», так как он отражает свет в видимом спектре почти так же, как и асфальт. Камеры нового типа способны обнаруживать этот лед, предотвращая автомобильные катастрофы.

В 2024 году финский стартап Emberion представил камеру VS20 — устройство, которое может изменить правила игры в мире машинного зрения. Его основа — инновационный сенсор, где двумерный углеродный материал графен усилен квантовыми точками. Это сочетание позволило решить давнюю проблему: создать одну камеру, которая видит мир одновременно как человеческий глаз (видимый диапазон) и в скрытом от нас коротковолновом инфракрасном спектре (SWIR).

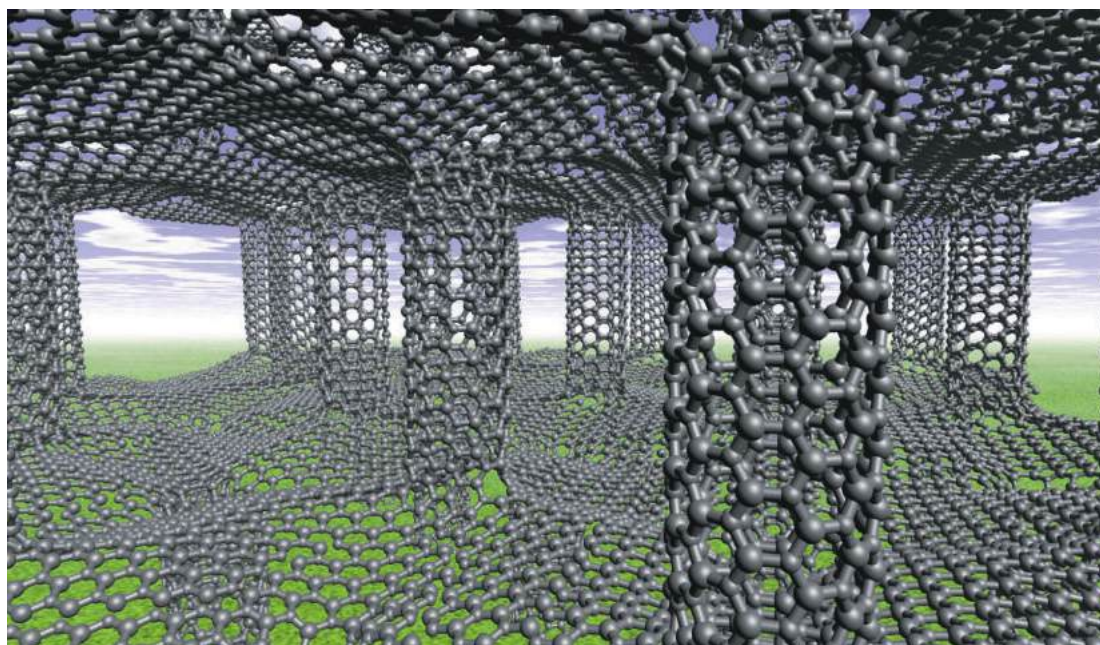
Emberion — не единственный игрок

на этом перспективном поле. Рынок SWIR-сенсоров активно растет, привлекая крупные инвестиции. Например, израильский стартап TriEye, использующий другую технологию на основе квантовых точек (но без графена), привлек уже \$74 млн на разработку камер для автомобильной промышленности. На этом фоне финская компания выделяется уникальным подходом — ставкой именно на графен. Так в чем же заключается их технологический прорыв? Секрет — в объединении сильных сторон двух уникальных материалов. Первый из них — графен.

КОЛЛОИДНЫЕ ТОЧКИ & ГРАФЕН

Графен — двумерный углеродный материал толщиной всего в атом — известен своими уникальными физическими и электронными свойствами, такими как высокая проводимость, гибкость и прочность. Однако традиционно графен не использовался в инфракрасных сенсорах из-за отсутствия фоточувствительности в нужных диапазонах. Объединение графена с квантовыми точками позволило преодолеть этот барьер: квантовые точки выступают как «усилители» сигнала, настраивая спектральный

Графен на микроуровне, художественная иллюстрация



отклик камеры и повышая ее чувствительность к SWIR-диапазону. Идея Emberion — компенсировать этот недостаток с помощью квантовых точек. Слой этих нанокристаллов, настроенных на поглощение SWIR-излучения, наносится прямо на графеновую подложку. Квантовые точки улавливают свет и создают электрический заряд, который мгновенно передается в графен. А графен, как идеальный проводник, переносит этот сигнал для считывания почти без шумов. В результате камера может одновременно видеть очень яркие и тусклые объекты, не теряя деталей, и все это в компактном корпусе, работающем при комнатной температуре.

Основной рынок для таких устройств — промышленная автоматизация и машинное зрение. Именно здесь способность камеры видеть «скрытое» приносит максимальную пользу. Например, на конвейере по переработке отходов камера VS20 легко отличает разные виды пластика (включая ПВХ) или находит посторонние предметы в пищевых продуктах. В сельском хозяйстве она может определять уровень влажности урожая, а в фармацевтике — контролировать целостность упаковки. Известный японский производитель оптики Kowa уже создает комплексные решения, объединяя свои линзы с камерами Emberion для инспекции продуктов питания и проверки подлинности банкнот. А дистрибуторы, такие как Polytex France, поставляют эти камеры для нужд оборонной промышленности и медицины во Франции.

РОССИЙСКАЯ РАЗРАБОТКА

В последние годы технология квантовых точек активно развивается по всему миру, предлагая новые решения для инфракрасной визуализации.

Например, недавно российские ученые при участии АО «НПО „Орион“», МФТИ и Федерального исследовательского центра проблем химической физики



Виктор Попов, руководитель лаборатории квантовой фотосенсорики МФТИ, начальник конструкторско-технологического центра НПО «Орион»:

“ ”

Для видимого диапазона это делать можно, но экономически бессмысленно из-за дешевизны кремния. А вот все остальное — УФ, ИК — там все ждут этого с нетерпением. Потенциальный рынок — это буквально все, кто работает не в видимом диапазоне. Сейчас на рынке стадия тестирования новой технологии в классических задачах, где раньше стояли дорогие камеры. Например, есть компания, которая анализирует мусор на конвейере для сортировки. Они используют дорогие ИК-камеры, чтобы различать виды пластика. Узнав, что можно получить то же самое, но на порядок дешевле и с более широким диапазоном, они, конечно, загорелись. Или другой пример — беспилотные поезда «Ласточка». Им нужно инфракрасное зрение, чтобы «видеть» сквозь туман, так как более длинная волна ИК-излучения лучше огибает капли воды. Классические ИК-камеры для них слишком дороги, даже при стоимости всего поезда. С использованием сенсоров на основе квантовых точек цена такой камеры упадет на два порядка, это уже совсем другой разговор.

и медицинской химии РАН, представили уникальный неохлаждаемый сенсор на основе свинцовых сульфидных (PbS) квантовых точек с расширенным спектральным диапазоном до 2 микрометров (мкм). Большинство инфракрасных сенсоров, работающих в диапазоне SWIR (0,9–1,7 мкм), требуют охлаждения для снижения шума, что значительно увеличивает их стоимость и усложняет эксплуатацию. Российская разработка отличается тем, что работает без необходимости охлаждения, что упрощает ее интеграцию в компактные, мобильные устройства. Расширение спектрального диапазона до 2 мкм обеспечивает более глубокое проникновение инфракрасного света в материалы и ткани.

Камера на базе этого сенсора продемонстрировала впечатляющие результаты: способность видеть раскаленный паяльник как источник тепла, а не просто света; различать детали дорожного покрытия через дымку и слабый туман; и визуализировать рисунок кровеносных сосудов под кожей человека. Эти возможности критически важны для гражданских систем ночного видения, безопасности на дорогах, специального оборудования (военного, спасательного) и медицинских технологий, таких как диагностика кровообращения. Основным преимуществом является использование технологии «плоской» интеграции, которая позволяет создавать тонкие, легкие



и надежные сенсоры без сложных многослойных структур и дорогого охлаждения, что снижает себестоимость и расширяет области применения.

К ДУМАЮЩИМ СЕНСОРАМ

То, что начиналось в колбе с черной жидкостью, стало одним из крупнейших технологических сдвигов в инфракрасной визуализации за последние 30 лет. Прогресс в области SWIR-технологий, особенно благодаря инновациям с квантовыми точками, демонстрирует несколько важных тенденций.

Во-первых, это демократизация высокотехнологических решений. Еще десять лет назад камера, способная видеть сквозь дым или выявлять влажность в продуктах, стоила десятки тысяч долларов и была доступна лишь военным и крупным промышленным лабораториям. Сегодня, благодаря технологиям печати сенсоров на основе квантовых точек, стоимость таких устройств снизилась на порядок. Теперь фермерские дроны могут с воздуха определять, каким участкам поля не хватает воды; конвейерные линии на заводах автоматически отбраковывают пластик неподходящего типа для переработки; а системы безопасности в автомобилях начинают видеть дорогу сквозь туман, что недоступно ни человеческому гла-

зу, ни обычным камерам.

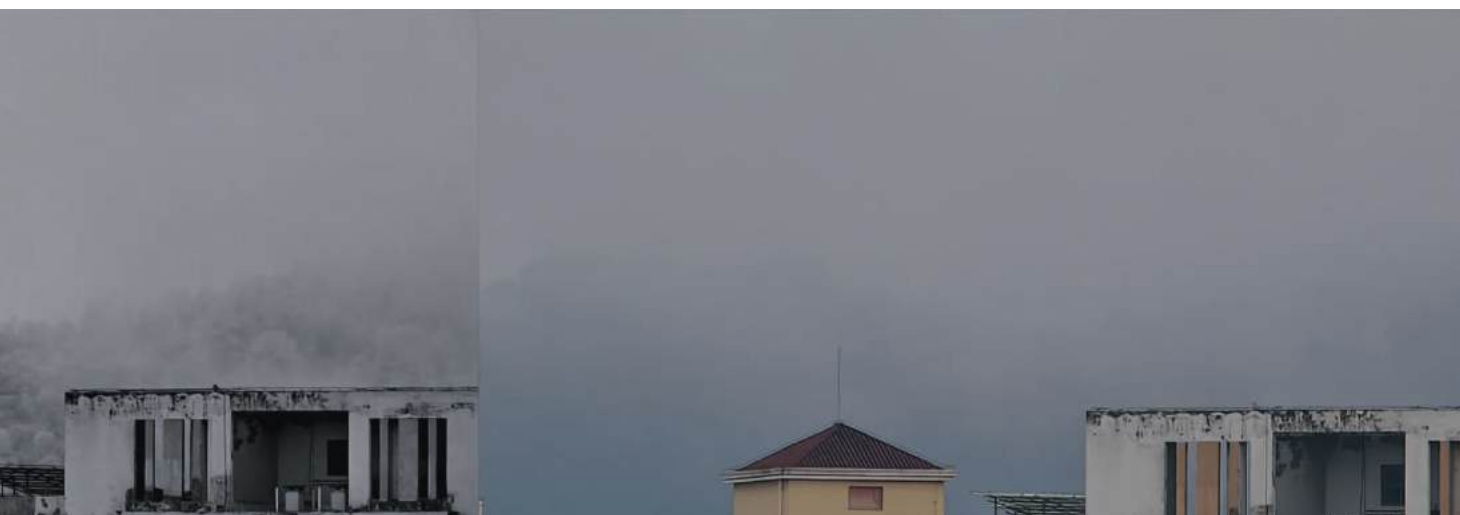
Во-вторых, мы наблюдаем переход от кремниевой к посткремниевой, или «плоской», электронике. Кремниевая электроника была плоской по необходимости: микросхемы изготавливались на плоских кремниевых пластинах, потому что так было удобно с точки зрения производства.

Новая же электроника становится плоской в функциональных целях: она опирается на законы физики, которые проявляются только в атомарно-тонких, двумерных материалах, таких как графен. Например, электроны в графене движутся почти без сопротивления, но только в пределах его плоского листа. Разработка сенсоров, где слой квантовых точек нанесен на лист графена, — прямой пример такой плоской электроники, где 2D-свойства материала используются для достижения беспрецедентной производительности.

Наконец, мы видим конвергенцию передовых материалов с искусственным интеллектом, ведущую к созданию «умных» сенсоров. Сегодняшние камеры, даже самые продвинутые, работают по прин-

ципу, придуманному еще в середине XX века: сенсор собирает данные (свет), а отдельный процессор их обрабатывает. Это создает фундаментальную проблему, известную как «узкое место фон Неймана»: быстрый процессор постоянно простаивает, ожидая, пока данные дойдут до него из более медленной памяти. Это неэффективно и энергозатратно. Новый подход решает проблему: светочувствительные элементы (например, те же квантовые точки) и элементы обработки информации объединены. Сенсор не просто фиксирует картинку, он ее сразу же анализирует. Так камера, следящая за конвейером, не будет передавать видео на сервер. Она на месте обнаружит деталь с дефектом и отправит лишь короткий сигнал: «Брак на линии, позиция X, Y». Это становится возможным благодаря материалам, которые могут одновременно и чувствовать свет, и выполнять логические операции. Такие «думающие» сенсоры — следующий шаг, переход от простого сбора данных к их интеллектуальной обработке и принятию решений прямо на устройстве, что открывает путь к по-настоящему автономным системам.

Слева снимок SWIR-камерой, справа — обычной камерой
изображение VISHEEN



СТРОГО КВАНТОВАНИЕМ

Иван Шунин при участии Глеба Федорова

Все электронные устройства, которыми мы пользуемся сегодня — от серверных ферм до смартфонов, — относятся к классическим вычислителям. Этим массив вычислителей, однако, не ограничивается.

Основные элементы классической машины «логика», память и каналы передачи данных. Процессор выполняет простейшие логические операции, сложение и сравнение чисел. Эти операции оперируют битами, программы задают последовательности операций, а универсальность обеспечивается тем, что любую алгоритмическую задачу можно свести к этим элементарным шагам. Классические вычислители опираются на булеву логику и последовательное исполнение команд. Соответственно, если для решения задачи размера n нужно совершить экспоненциально большее число операций (2^n и больше), у классической машины быстро начнутся проблемы.

О «неклассических вычислениях» начали активно говорить в 1980-е годы, когда стало ясно: прогресса внутри фон-неймановской парадигмы может оказаться мало. Инженеры и физики стали искать альтернативные модели вычислений. Так что неклассические вычислители это большое множество, внутри которого есть как устройства, остающиеся в тьюринговой модели, так и те, что идут еще дальше. Всерьез про «нейроморфные вычислители» заговорил Карвер Мид, когда предложил проектировать схемы

на кремнии по образцу нейронных сетей. Здесь вычисления происходят в массивно-параллельных сетях, результат которых — приближенный ответ. Чисто математически, это по-прежнему классическая аппроксимация функций и стохастическая оптимизация. То есть саму проблему экспоненциального числа шагов этот подход не отменяет, просто справляется в ряде случаев значительно быстрее.

Квантовые компьютеры — совсем другой случай. Здесь в дело вступает физика микромира: суперпозиция, интерференция и запутанность. Кубиты находятся в комбинации состояний 0 и 1, а несколько кубитов образуют вектор в гильбертовом пространстве. Благодаря этому

меняется сама асимптотика сложности задачи. То, что на классике требует экспоненты (например, факторизация больших чисел), на квантовой схеме может решаться за полиномиальное время. Это не просто другой процессор, а другая модель вычислений. Класс сложности BQP шире классической вероятностной полиномиальной сложности (BPP).

Таким образом, если нейроморфные вычислители занимаются оптимизацией того, что уже достижимо, квантовые претендуют на то, чтобы пробить стену экспоненциальной

Как меняется время решения полиномиально и экспоненциально сложных задач в зависимости от размера входных данных

Сложность функции	Размер входных данных					
	10	20	30	40	50	60
n	,00001 секунды	,00002 секунды	,00003 секунды	,00004 секунды	,00005 секунды	,00006 секунды
n^2	,0001 секунды	,0004 секунды	,0009 секунды	,0016 секунды	,0025 секунды	,0036 секунды
n^3	,001 секунды	,008 секунды	,027 секунды	,064 секунды	,125 секунды	,216 секунды
n^5	,1 секунды	3,2 секунды	24,3 секунды	1,7 минуты	5,2 минуты	13,0 минуты
2^n	,001 секунды	1,00 секунды	17,9 минуты	12,7 дней	35,7 лет	366 веков
3^n	,59 секунды	58 минуты	6,5 лет	3855 веков	2×10^8 веков	$1,3 \times 10^{13}$ веков

сложности. То, что это возможно, окончательно стало ясно в 1994 году, когда возник алгоритм Шора и задача факторизации больших чисел стала полиномиальной на квантовой машине. С этого момента «классические» и «квантовые» вычисления стали противопоставляться как принципиально разные модели. При этом универсального квантового вычислителя у нас нет, а его разработка продолжается вот уже 30 лет. Мы попросили Глеба Федорова перечислить, где в океане прямо сейчас находятся «острова квантового превосходства» и какие задачи можно решить строго квантованием.

СЭМПЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ КВАНТОВЫХ СХЕМ (RANDOM CIRCUIT SAMPLING, RCS)

Хотя эта задача не имеет прямого практического применения, она является показательным тестом: современные квантовые компьютеры уже решают задачи, алгоритмически находящиеся далеко за пределами возможностей классических систем. Работу Google 2019 года удалось превзойти с помощью кластеров GPU (и по скорости, и по энергопотреблению), последние результаты (Willow, Zuchongzhi-3) пока не имеют сопоставимой классической симуляции.

СЭМПЛИРОВАНИЕ БОЗОНОВ (GAUSSIAN BOSON SAMPLING, GBS)

GBS также демонстрирует огромное превосходство квантовых устройств над классическим моделированием. Однако поскольку внутри таких процессоров нет четко определенных квантовых схем, правильнее рассматривать их как специализированные квантовые симуляторы. Фотонные чипы решают похожую задачу. Например, известны эксперименты на китайской установке Jiuzhang (50–100 мод сжатого света) и канадском Xanadu Borealis (216 мод, 2022). В последнем случае оценка классической сложности составила ~9 тысяч лет.

Кто	Платформа	Время работы	Оценка «классической» стоимости
Google Willow (2024)	105 сверхпроводящих кубитов	менее 5 минут	~ 10^{25} лет
USTC — Zuchongzhi-3 (2024)	105 сверхпроводящих кубитов (эксперимент шел на 83)	~сотни секунд	~ $6,4 \times 10^9$ лет
Google Sycamore (2019)	53 сверхпроводящих кубита	~200 секунд	~ 10^4 лет

КВАНТОВАЯ ХИМИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Классические методы — теория функционала плотности (DFT), теория связанных кластеров (CC) — фундаментальны, но становятся вычислительно неприемлемыми для больших молекул и часто теряют точность при описании радикалов.

IBM Research и Lockheed Martin провели симуляцию молекулы CH_2 на 52-кубитном процессоре с использованием выборочного квантового диагонализатора (SQD). Получена энергия синглет-триплетного перехода (~19 мидиХартри), согласующаяся с точными классическими расчетами и экспериментом. Молекула CH_2 известна своей трудностью для классических методов. Другой пример — Fe_4S_4 кластер, который также неразрешим классическим методом. По оценкам IBM, даже отказоустойчивому квантовому компьютеру с ~4,53 млн кубитов потребуется ~13 дней для моделирования этой молекулы. Однако гибридные техники (SQD + классическая постобработка) могут давать полезные приближения куда эффективнее.

IBM также применяет расширенные модели Хаббарда и SQD к расчету запрещенных зон металлооксидов и сверхпроводников — задач, крайне сложных для классики, но критически важных для материаловедения.

КОМБИНАТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Многие NP-трудные задачи (логистика, финансы, машинное обучение) кодируются в гамильтонианы

типа спиновых стекол и решаются с помощью вариационных или адiabатических методов.

IBM в 2025 году провела эксперимент на 156-кубитном сверхпроводниковом процессоре с алгоритмом BF-DCQO. Для некоторых синтетических HUBO-задач получены хорошие приближенные решения быстрее (по реальному времени), чем лучшие классические решатели (симулированный отжиг, CPLEX). Это также наглядная экспериментальная демонстрация квантового ускорения на специально подобранных трудных задачах.

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛИ

Активно изучается QML (quantum machine learning), совмещение квантовых алгоритмов и методов машинного обучения. Так, развиваются подходы, в которых квантовые операции оптимизируются подобно тому, как это происходит в алгоритмах машинного обучения (vQML). Уже известны случаи «деквантизации» задач: находился классический алгоритм, эффективность которого не уступает квантовому. Но это в принципе возможно лишь для некоторых типов задач.

Когда данные сами по себе — квантовые, преимущество квантового моделирования над классическими подходами доказано и экспериментально подтверждено. Квантовым моделям нужно меньше данных для эффективных предсказаний, чем любым классическим. В случае с применением квантовых алгоритмов к классическим данным, однако, вопрос о превосходстве остается открытым.

ЭТТОРЕ МАЙОРАНА И ЕГО УРАВНЕНИЕ

Алексей Левин



В ФЕВРАЛЕ 2025 ГОДА КОМПАНИЯ MICROSOFT ЗАЯВИЛА, ЧТО СОЗДАЛА КВАНТОВЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ НА БАЗЕ МАЙОРАНОВСКИХ ФЕРМИОНОВ – НАУЧНАЯ ГРУППА КОМПАНИИ ВЫПУСТИЛА СТАТЬЮ В ЖУРНАЛЕ NATURE, А ПРЕСС-СЛУЖБА ДОСТУЧАЛАСЬ ЧУТЬ ЛИ НЕ ДО ВСЕХ КРУПНЫХ ИЗДАНИЙ. ОДНАКО НАУЧНОЕ СООБЩЕСТВО, КАК И ПРЕЖДЕ, СОМНЕВАЕТСЯ, ЧТО МАШИНА, НА КОТОРОЙ MICROSOFT ПЫТАЕТСЯ ВКЛИНИТЬСЯ В «КВАНТОВУЮ ГОНКУ», ЗАСЛУЖИВАЕТ СТОЛЬ ГРОМКОГО ПРИЕМА. А ПОКА ВОПРОС О СТАТУСЕ MAJORANA 1 ПРОДОЛЖАЕТ ОБСУЖДАТЬСЯ, АЛЕКСЕЙ ЛЕВИН РАССКАЗЫВАЕТ, КТО ТАКОЙ ЭТТОРЕ МАЙОРАНА И КАК ВОЗНИКЛИ ЧАСТИЦЫ, НОСЯЩИЕ ЕГО ИМЯ

Начало этой истории может поспорить с античной трагедией. 26 марта 1938 года 31-летний профессор Неапольского университета Этторе Майорана сел в Палермо на пароход до Неаполя. Однако там он не появился, и вообще с тех пор его никто не видел.

За несколько месяцев до исчезновения Майорана опубликовал свою последнюю статью, причем, скорее всего, сделал это только по настоянию Ферми. Эту работу и сегодня считают крупным вкладом в фундаментальную физику. Она содержит названное его именем уравнение, которое предсказывает возможность квантовых частиц с парадоксальными свойствами, до сих пор не открытых в эксперименте.

ОТ ШРЁДИНГЕРА ДО ДИРАКА

Однако начать следует не с 1937-го, а 1926 года, когда профессор Цюрихского университета Эрвин Шрёдингер задумался об описании динамики элементарных частиц с помощью методов математического анализа. Он пришел к дифференциальному уравнению в частных производных, которое стало главным инструментом нерелятивистской квантовой механики. Чтобы записать его для одной свободной частицы, надо перевести на квантовый язык элементарное уравнение ньютоновской механики, согласно которому кинетическая энергия частицы равна отношению квадрата ее импульса к удвоенной массе. Для этого на место энергии и импульса ста-

вятся специальные преобразования волновой функции, так называемые дифференциальные операторы.

В результате получается уравнение, решения которого определяют динамику частицы. Если она не свободна, в уравнение добавляются те или иные силовые поля, но это уже детали.

Здесь есть одна тонкость. Уравнение Шрёдингера описывает частицу, которая не имеет собственного углового импульса, спина. Однако в 1926 году уже было известно, что спин у электрона есть, он равен половине постоянной Планка, деленной на 2π .

Проекция спина свободного электрона на любое направление имеет два значения, которые равны по абсолютной величине, но отличаются знаком. Можно представить, что ось



электронного волчка ориентируется в пространстве лишь двумя противоположными способами. Через год аналогичное свойство было обнаружено и у протонов, а швейцарский теоретик Вольфганг Паули обобщил уравнение Эрвина Шрёдингера для электрона таким образом, чтобы оно учитывало спин. Для этого вместо одной волновой функции он ввел пару функций, записанных в виде столбца, и снабдил уравнение Шрёдингера тремя квадратными матрицами.

Однако Шрёдингер хотел начать с квантовой переформулировки не ньютоновой механики, а механики специальной теории относительности. У Эйнштейна формула для энергии свободной частицы выглядит сложнее, нежели у Ньютона. В нее входит не сама энергия, а ее квадрат: $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ (E — энергия частицы, m — ее масса, p — импульс, c — скорость света). Отсюда следует, что и квантовый оператор энергии надо возвести во вторую степень, а это чревато множеством затруднений. Перевести эйнштейновскую формулу в квантовое уравнение несложно, но решения такого уравнения показывают, что вероятность нахождения частицы в определенной точке может оказаться отрицательной, что не имеет физического смысла. Воз-

Эрвин Шрёдингер сконцентрировался на нерелятивистской теории

никают и другие неприятности, обусловленные тем, что математическая структура этого уравнения расходится со специальной теорией относительности.

Шрёдингер воздержался от публикации этой работы и сконцентрировался на нерелятивистской теории. А его первое уравнение независимо друг от друга и разными способами переоткрыли шведский физик Оскар Клейн и немец Вальтер Гордон. Их имена оно с тех пор и носит. В 1934 году Вольфганг Паули и Виктор Вайскопф показали, что его можно разумно интерпретировать как способ описания не свободных частиц, а квантовых полей с нулевым спином. Но это уже совсем другая история. А проблема адекватного релятивистского описания атомных частиц, и прежде всего электронов, никуда не делась и настоятельно требовала решения. Над ней в 1927 году задумался Поль Адриен Морис Дирак, 25-летний теоретик из Кембриджского университета, уже тогда — великий создатель нерелятивистской квантовой механики и квантовой теории излучения. Он понял, что для сохранения лоренц-инвариантности в уравнение электрона должны войти не квадраты операторов энергии и импульса, а их первые степени. Чтобы записать уравнение для электрона в таком виде, пришлось изначально ввести в него более сложные, чем у Паули, матрицы размерности 4×4 , так называемые гамма-матрицы. В результате получилось очень красивое уравнение весьма непривычного для тогдашней физики вида.

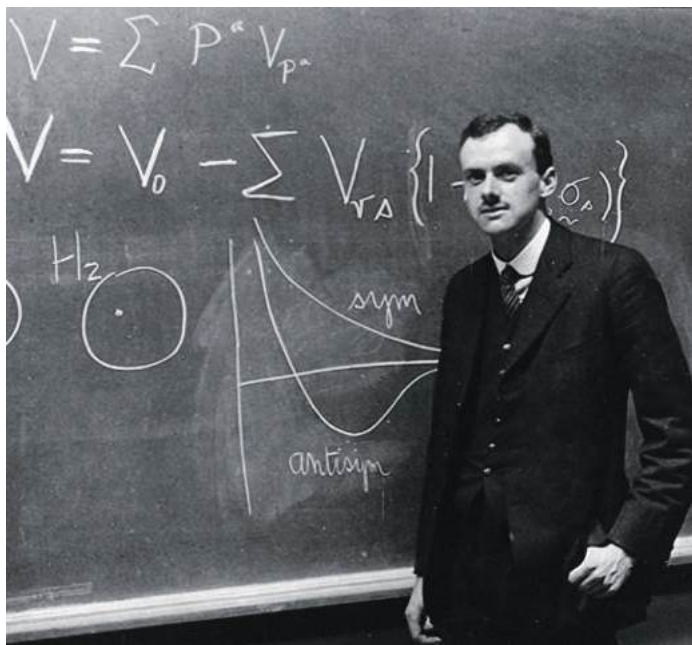
Новаторский подход Дирака себя оправдал: из его уравнения для свободного электрона автоматически вытекало наличие спина той самой величины, которая уже была надежно установлена. А объединение этого уравнения с уравнениями электромагнитного поля обязывало электрон обладать и собственным магнитным моментом. Это был огромный успех релятивистской квантовой теории электрона.

ЭТО СТРАННОЕ УРАВНЕНИЕ

Найденные Дираком решения несколько лет считались эталонными. Но в 1937 году Этторе Майорана опубликовал статью с очень оригинальной модификацией дираковского уравнения — он воспользовался тем обстоятельством, что дираковские гамма-матрицы должны удовлетворять некоторым алгебраическим соотношениям, но в остальном выбор их конкретного вида (на формальном языке, представления) произволен. Пользуясь этой свободой, он заполнил все четыре матрицы только мнимыми единицами и нулями (у Дирака там фигурируют также действительные единицы). Поскольку в уравнении Дирака каждая из этих матриц умножается на мнимую единицу, у Майораны получились полностью действительные гамма-матрицы. Выбор такого представления для гамма-матриц оказался делом столь же новым, сколь и нетри-



Оскар Клейн переоткрыл первое уравнение Шрёдингера



Поль Адриен Морис Дирак понял, что для сохранения лоренц-инвариантности в уравнение электрона должны войти не квадраты операторов энергии и импульса, а их первые степени

виальным. Он позволил получить решения, где фигурируют квантовые поля, которые описываются не комплексными, а действительными функциями. В этом уравнении Майораны отличается от уравнения Дирака с его комплексными электронно-позитронными полями, однако демонстрирует сходство с уравнением Клейна — Гордона, уравнениями Максвелла и уравнениями гравитационного поля, которые фигурируют в эйнштейновской общей теории относительности.

Поначалу уравнение Майораны привлекало внимание коллег только из-за необычного вида гамма-матриц. О его физическом смысле физики стали думать только через пару десятилетий. Тогда и было понято, что оно описывает электрически нейтральные частицы с половинным спином, которые подчиняются квантовой статистике Ферми — Дирака (и потому их называют майорановскими фермионами), однако лишены таких атрибутов, как электрический заряд и, возможно, масса. Частицы с подобными свойствами были известны теоретикам под именем нейтрино. Поэтому уравнение Майораны выглядело просто идеальным кандидатом на роль математической структуры, как нельзя лучше подходящей для их описания.

Другая особенность уравнения Майораны состоит в том, что оно, в противоположность дираковскому, сохраняет симметрию правосторонней и левосторонней ориентации (так называемая киральная симметрия). На пальцах это объяснить не так просто, так что на этом аспекте я останавливаться не буду.

Нейтрино очень долго (и до, и после детектирования в 1956 году) считались безмассовыми частицами, которые, как и фотоны, могут двигаться в вакууме только со скоростью света. Сейчас известно, что они все же обладают массой, хотя и очень небольшой. Точная величина массы трех известных разновидностей нейтрино (электронного, мюонного и тау-нейтрино) пока не установлена, однако, по последним данным, нейтрино как минимум на шесть порядков легче электрона. Уравнение Майораны имеет еще одну интересную черту. Частицы, которые оно описывает, могут быть полными копиями своих античастиц. Это свойство отнюдь не уникально (например, именно таковы фотоны и незаряженные пионы), причем оно может реализоваться и при нулевой, и при ненулевой массе. Напротив, в дираковской теории электроны и позитроны это разные частицы, хотя и со строго одинаковой массой.

Нейтрино, которые тождественны своим антиверсиям (так называемые майорановские нейтрино, они же просто майораны) пока не обнаружены в эксперименте, однако не исключено, что когда-то они в изобилии существовали в природе. Сегодня эта гипотеза играет важную роль в теории, объясняющей космическую асимметрию между материей и антиматерией, о которой мы поговорим в следующем разделе.

Замечательное уравнение Майораны заслуживает подробного анализа, однако он невозможен без привлечения серьезной математики. Поэтому ограничусь только одной иллюстрацией, которую можно описать простыми словами. У Дирака электрону и позитрону соответствуют два разных уравнения. При этом, если четырехкомпонентная волновая функция электрона, так называемый дираковский спинор, обладает левосторонней ориентацией, то у позитрона она будет правосторонней (конечно, верно и обратное). Уравнение Майораны, напротив, объединяет электрон и позитрон в единой математической структуре — отсюда и его название «Симметричная теория электрона и позитрона».

МАЙОРАНОВСКИЕ НЕЙТРИНО И СУДЬБА АНТИМАТЕРИИ

Пока нейтрино считались частицами с нулевой массой, теоретики не испытывали с ними больших проблем. А вот когда оказалось, что масса у них имеется, жизнь стала куда интересней.

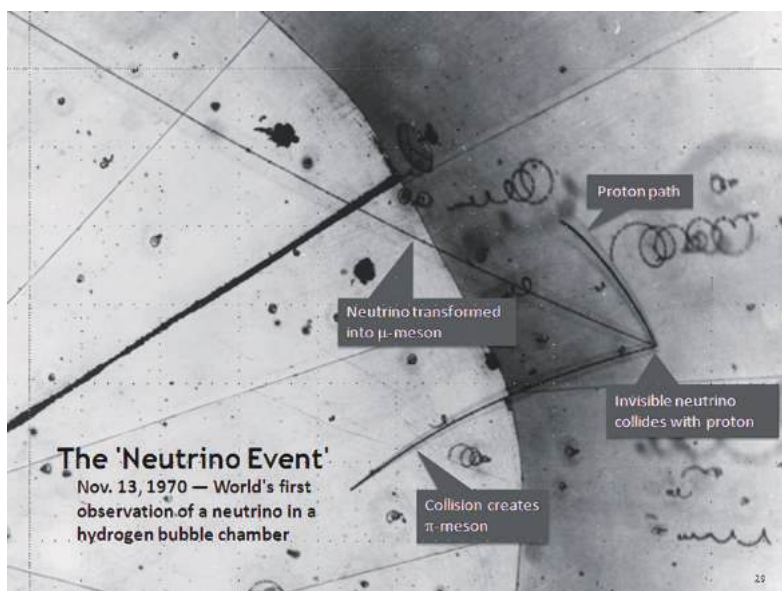
Если бы нейтрино было безмассовым, вопрос о том, отличается оно от своей античастицы или совпадает с ней, не имел бы смысла (как он не имеет смысла для фотонов). А вот наличие массы означает, что возможны оба варианта. В первом случае нейтрино называется дираковским, во втором, как уже говорилось, майорановским. И как на этот счет распорядилась природа, пока не ясно.

Вот что отсюда следует. В теории элементарных частиц существует

такое понятие, как лептонное число, разность общего числа лептонов и антилептонов в данной физической системе. Ранее эксперименты показывали, что лептонные числа (они же лептонные заряды) строго сохраняются во всех ядерных реакциях. Однако в конце прошлого столетия в космическом пространстве были обнаружены взаимные превращения нейтрино разных видов (на языке поколений), так называемые нейтринные осцилляции. После этого стало ясно, что как минимум на уровне поколений сформулированный еще в 1953 году принцип сохранения лептонных зарядов не работает. Однако теория утверждает, что дираковские частицы должны ему полностью подчиняться. А вот для майорановских нейтрино он может соблюдаться лишь приближенно и, следовательно, допускать нарушения. Если это так, то несохранение лептонных чисел в принципе можно обнаружить посредством прямых экспериментов. Известно даже, где его искать. Есть такой внутриядерный процесс, двойной бета-распад, который в 1935 году был впервые теоретически рассмотрен не кем иным, как Майораной. В отличие от известного с конца XIX века классического бета-распада, в этом случае не один, а сразу два нейтрона превращаются в протоны, испуская пару электронов и пару антинейтрино. Эти превращения случаются только в самых долгоживущих изотопах с периодом полураспада как минимум порядка 10^{19} лет (Майорана оценил этот минимум в 10^{17} лет, почти не ошибся!) и потому происходят чрезвычайно редко, но все же случаются и детектируются. Согласно некоторым теоретическим моделям, у этого процесса есть другая версия — двойной безнейтринный бета-распад. Здесь опять-таки заряд ядра подскакивает на две единицы (иными словами, происходит сдвиг исходного элемента на две позиции вправо на таблице Менделеева), однако с испусканием одних лишь электронов. Примером такого процесса мог бы быть переход германия-76 в селен-76 и пару элект-

тронов. Поскольку на входе здесь вообще нет лептонов, а на выходе рождаются два полноценных электрона, ясно, что при таком распаде лептонное число возрастает на два. В обычном двойном бета-распаде оно сохраняется, так как заряд пары антинейтрино равен -2 . Двойной безнейтринный бета-распад пока не обнаружен, хотя его ищут на нескольких подземных детекторах. Если эти усилия увенчаются успехом, это будет куда более убедительной демонстрацией несохранения лептонных чисел, нежели нейтринные осцилляции. Такой результат стал бы сильным аргументом в пользу того, что электронное нейтрино (в бета-распадах испускаются именно они) — майорановская частица. Возможно, то же самое окажется справедливым и для мюонного и таонного нейтрино. Пойдем дальше. Во всех экспериментах наблюдается только нейтрино, у которых спин по направлению противоположен импульсу — такие частицы называют левовинтовыми. У антинейтрино спин смотрит в ту же сторону, что и импульс — это правовинтовые частицы. Правовинтовые нейтрино и левовинтовые антинейтрино обнаружены не были. Но если бы нейтрино подчинялось уравнению Майораны, оно могло бы проявлять себя и как частица с правой ориентацией. Как я только что отметил, физике такие нейтринные версии не известны, но это не фатально. Например, можно предположить, что из-за гигантской массы порядка 10^{14} – 10^{15} ГэВ они рождались лишь в составе сверхгорячей материи, существовавшей в первые мгновения после завершения космологической инфляции. Это было так называемое термальное рождение вещества, обеспеченное гигантской тепловой энергией кварк-глюонной плазмы. При этом, согласно большинству теоретических схем, они не участвовали в слабых взаимодействиях с частицами Стандартной Модели. Когда в процессе расширения Вселенной температура первичной плазмы достаточно упала, эти стерильные нейтрино перестали рождаться и больше уже не возни-

кали. Будучи крайне нестабильными из-за своей гигантской массы, они быстро распадались на частицы Стандартной Модели, увеличивая их плотность. Конечно, для того чтобы этот сценарий был возможен, необходимо, чтобы в ту космологическую эпоху скорость расширения Вселенной, которую задавал параметр Хаббла, была выше темпа распада стерильных нейтрино. И вот тут-то начинается самое интересное. Согласно ряду теоретических моделей, стерильные нейтрино должны были в основном превращаться в бозоны Хиггса и различные лептоны, включая и обычные, активные нейтрино. В этих реакциях не сохранялись лептонные числа, и потому они могли порождать больше электронов, нежели позитронов. Аналогично, число новорожденных активных нейтрино не обязано совпадать с числом антинейтрино. В результате у тогдашней Вселенной появилось ненулевое лептонное число, которое после полного распада всех стерильных частиц практически не изменилось (т. н. макроскопическая лептонная асимметрия). Этот гипотетический процесс называется лептогенезом. Для его успеха необходимо еще несколько условий, но это уже тонкие детали для специалистов. Например, согласно наиболее правдоподобным моделям, для работы механизма лептогенеза необходимы как минимум два различных стерильных нейтрино, а их массы должны быть не меньше 10^{10} – 10^{12} ГэВ. Теория также допускает производство лептонной асимметрии и при массах стерильных нейтрино в диапазоне 10^2 – 10^9 ГэВ (возможно, даже и меньших), но для этого требуются дополнительные факторы, которых я не буду касаться. Предположим, что лептогенез тем или иным образом запущен. Согласно все тем же моделям, этим дело не кончилось. Взаимодействие между оставшимися после нейтринных распадов лептонами сверхвысоких энергий могло привести к появлению кварков и антикварков, которые ранее еще не существовали. Это уже бариогенез, возникновение



протонов и нейтронов. Существуют правдоподобные сценарии, в которых дисбаланс лептонов и антилептонов оборачивается избытком кварков над антикварками и, следовательно, барионов над антибарионами. Согласно этому сценарию, потом случилась так называемая Великая Аннигиляция, которая уничтожила антиматерию. В результате во Вселенной возникла барионная асимметрия — преобладание вещества над антивеществом. Этот механизм, так называемый бариогенез через лептогенез, позволяет объяснить дефицит антиматерии в нашей Вселенной, по крайней мере в первом приближении. Многие физики считают, что на сегодня модель с участием тяжелых стерильных нейтрино обеспечивает наилучшие шансы для понимания абсолютного преобладания материи над антиматерией в нашей Вселенной (конечно, есть и другие теории). При этом гипотетическое рождение активных нейтрино Стандартной Модели при распаде стерильных частиц позволяет довольно правдоподобно объяснить их ничтожную массу. Для этого придумана очень красивая теория, так называемый качельный механизм (seesaw mechanism). Однако ее вряд ли можно проверить экспериментом, во всяком случае в близком будущем. Барионную асимметрию Вселенной в принципе можно понять на основе Стандартной Модели, но только

на качественном уровне. А вот вещь посущественней: по аналогии с лептонными числами физика оперирует также барионными числами. Они определяются чуть сложнее лептонных: каждому кварку приписывается барионное число $1/3$, а антикварку, соответственно, $-1/3$. Понятно что только что описанный процесс бариогенезиса по определению предполагает несохранение барионных чисел — кварки рождались там, где их до того не существовало. Однако это еще не все. Есть основания считать, что хотя во взаимодействиях частиц в ранней Вселенной барионные и лептонные числа по отдельности не сохранялись, их разность во всех реакциях оставалась неизменной. Теория утверждает, что это сохранение обеспечивали особые статические конфигурации квантовых полей, связанных с электрослабыми взаимодействиями. Эти конфигурации принято называть сфалеронами. Согласно этой модели, именно сфалероны оказались посредниками тех процессов, которые вскоре после Большого Взрыва привели к несохранению барионных чисел.

ДРУГИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Майорановские фермионы в принципе можно искать не только в начале Вселенной, но и сегодня. Хорошими кандидатами здесь считаются партнеры уже известных частиц, чье существование вытека-

ет из очень красивой идеи суперсимметрии. Согласно этой концепции, у каждого фермиона должен существовать парный ему бозон, а у каждого бозона — фермион. Например, фотону с его единичными спином соответствует суперпартнер с половинным спином, так называемое фотино. Но фотон, как известно, сам себе античастица, и того же можно ожидать от фотино. Получается, что фотино — это майорановский фермион. Если суперпартнеры частиц Стандартной Модели удастся обнаружить на Большом Адронном Коллайдере или, скорее, более мощных ускорителях, эту гипотезу можно будет подвергнуть проверке. Другая возможность состоит в том, что темная материя хотя бы частично состоит из майорановских фермионов. Есть даже гипотеза, что эти фермионы при столкновениях или распадах производят космические лучи самых высоких энергий. В последнее время майорановские фермионы активно ищут и среди обширного набора квазичастиц, которыми оперирует современная физика конденсированных систем. Так называют квантованные периодические коллективные возбуждения в конденсированных средах. С классической точки зрения, это волновые процессы. Однако, в соответствии с гипотезой Луи де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме их можно рассматривать и как аналоги элементарных частиц, правда отнюдь не полные. Корпускулярные свойства квазичастиц реально проявляются только при очень низких температурах, когда их число относительно невелико. При нагреве оно быстро растет, квазичастицы «смешиваются», и их «заквантованность» постепенно исчезает. Квазичастицы в высшей степени востребованы в теории конденсированных сред. Например, магнеты вносят важный вклад в такие свойства веществ, как теплоемкость и намагниченность. Знаменитая теория сверхпроводимости Джона Бардина, Леона Нила Купера и Джона Роберта Шриффера (теория БКШ) основана на гипотезе, что

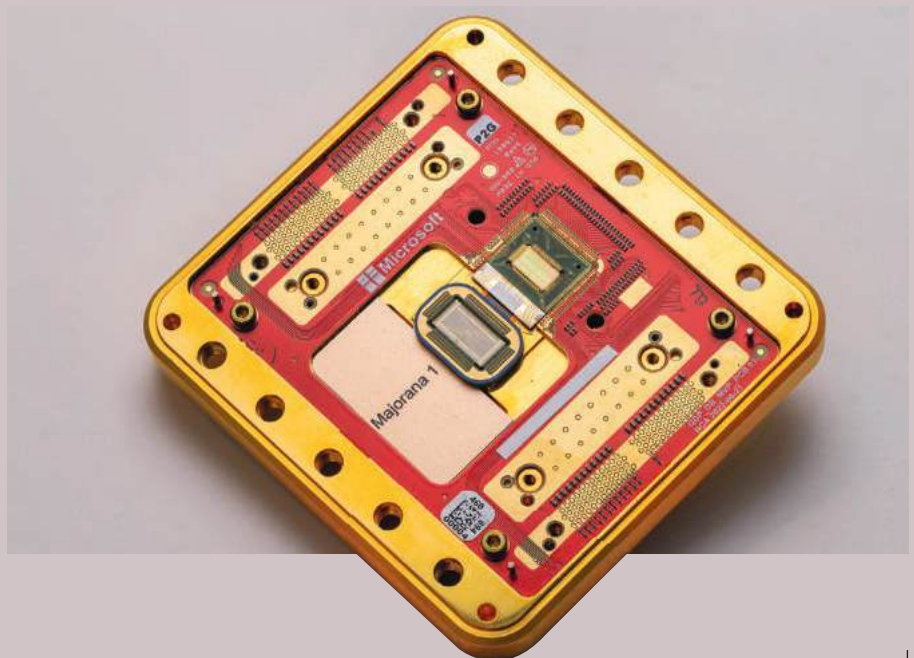
сверхпроводящий ток переносится электронными парами, которые возникают благодаря электрон-фононному взаимодействию. Переход жидкого гелия из сверхтекучего состояния в нормальное объясняется тем, что вблизи критической температуры быстро растет плотность квазичастиц двух видов (фоонов и квантованных вихрей, ротонов), которые при дальнейшем повышении температуры разрушают сверхтекучую компоненту. Квазичастицы с успехом используют и при объяснении свойств ядерной материи. Известны квазичастицы, которые можно считать копиями своих антиверсий (таковы, например, экситоны). Правда, все они бо-зоны, и потому на роль аналогов майорановских частиц явно не годятся. Однако в последние годы появились сообщения, что в некоторых сверхпроводящих системах удалось реализовать полноценные квазичастичные аналоги майорановских фермионов. Но полного признания у специалистов они пока не получили.

Совсем недавно эта тема нашла довольно сенсационное продолжение. 19 февраля корпорация Microsoft объявила о создании прототипа первого в мире компьютерного чипа с принципиально новой архитектурой, реализованной на основе алюминиевых нанопроволок на подложке из арсенида индия. Компания утверждает, что ее работа основана на генерации контролируемых квантовых возбуждений майорановского типа, иначе говоря майорановских квазичастиц. Этому микропроцессору присвоено и соответствующее название — Majorana 1. Фирма обещает, что ее чип позволит получать более стабильные и лучше управляемые кубиты, нежели другие прототипы квантовых компьютерных систем. Это сообщение одновременно появилось как в пресс-релизе компании, так и в журнале Nature. Однако уже на следующей неделе тот же журнал опубликовал присланную в редакцию критику: отсутствие деталей в пресс-релизе и даже сомнения в самой возможности создания квантового компьютера

на основе майорановских квазичастиц. 20 марта о растущих сомнениях в отношении корректности претензий сотрудников Microsoft на создание майорановского процессора сообщил и журнал Science. Вот примерно так сейчас обстоит дело. Предсказывать, чем закончится история с «майорановым» чипом, я не берусь, хотя скорого успеха в любом случае не жду. Напомню, что в 2018 году связанные с этой корпорацией физики из Дельфтского университета опубликовали в Nature статью о создании низкотемпературного наноустройства, в котором им якобы удалось обнаружить майорановские квазичастицы. Однако осенью 2019 года сотрудники Питтсбургского университета во главе с Сергеем Фроловым объявили, что им не удалось воспроизвести результаты нидерландских коллег. В результате университет Дельфты начал расследование, а авторы вызвавшей сомнения статьи в марте 2021 года поместили в том же Nature фактическое отречение от своей первоначальной заявки. Эта история уже не нова, но еще не забыта. Напоследок два замечания. Иногда пишут, что надежно удостоверенное открытие майорановских квазичастиц полностью подтвердило бы теорию Майораны. На самом деле все не так просто. Во-первых, квазичастицы физики конденсированных систем сильно отличаются от электронов, нейтрино и прочих «настоящих» частиц Стандартной Модели. Во-вторых, уравнение Майораны

написано для четырехмерного псевдоевклидова пространства-времени специальной теории относительности (пространства Минковского). В основе физики твердого тела и других конденсированных систем лежит уравнение Шрёдингера, «действующее» в трехмерном евклидовом пространстве. Есть и другие различия, но этих достаточно.

Второе замечание уже, скорее, философское. Многие верят, что любая достаточно красивая математизированная физическая модель обязательно должна иметь реальное воплощение — если не в нашем мире, то в Мультивселенной. Про последнюю рассуждать не берусь, но вот в первой версии сильно сомневаюсь. Например, теории суперсимметрии и суперструн отличаются бесспорной красотой, но никаких экспериментальных подтверждений за несколько десятилетий своего существования не обрели, а обретут ли в будущем, неизвестно. В качестве примера из «раньше времени», как говорил Паниковский, можно вспомнить хотя бы немецкого математика Теодора Калуцу, который в 1921 году предложил единую теорию гравитации и электромагнетизма на основе пятимерного расширения пространства Минковского. Она была очень элегантной, особенно после модификации, выполненной через пять лет Оскаром Клейном, но тоже «не пошла». И таких примеров в истории физики великое множество. Забывать о них не стоит.



ПЕРСПЕКТИВЫ И РЕАЛИИ

Варвара Кравцова

На что может рассчитывать молодой ученый в науке и на производстве — ответы от первого лица! Мы задали три вопроса о самом насущном двум инженерам-микроэлектронщикам

ДИССЕРТАЦИЯ — КЛЮЧ ОТ ВСЕХ ДВЕРЕЙ

Егор Седов, старший научный сотрудник лаборатории топологических квантовых явлений в сверхпроводящих системах МФТИ

1. Егор, наш основной вопрос весьма нескромен. Какую заработную плату вы получаете сейчас, будучи кандидатом наук и работая в лаборатории Физтеха?

Какой примерно доход может получить молодой специалист, работая в области микроэлектроники?

Начнем с самого начала, в 2015 году, когда я еще учился в Московском институте электроники и математики (сейчас это Высшая школа экономики), то устроился на работу к своему научному руководителю, и мне начали платить мою первую зарплату. Примерно 10 тысяч рублей в месяц. Плюс стипендия 1500 рублей. Через год мы выпустили статью, и мою стипендию повысили до 10 тысяч рублей в месяц. Стало уже 20 тысяч рублей.

Потом я поступил в аспирантуру на академическую программу, и моя стипендия возросла до 30 тысяч рублей, плюс бывали премии по 10–15 тысяч рублей в месяц. Эти деньги позволили мне выжить целых три месяца на стажировке в Греции, правда тогда премий не платили. Но даже эта сумма равнялась примерно 400 евро.

Затем я выпустился из аспирантуры и устроился младшим научным сотрудником в ФИАН, и мне платили зарплату 5 тысяч рублей в месяц. Но сейчас ситуация меняется в положительную сторону, и если 10 лет назад деньги начали получать профессора, то сейчас уже прилич-

ную заработную плату начинают получать и молодые сотрудники. Более того, на Физтехе и активные студенты могут получать по 100 тысяч рублей в месяц, но это зависит от направления и участия в проектах.

А сейчас вас устраивает ваш уровень дохода?

После того как я перевелся в сентябре работать на Физтех, меня устраивает и моя работа, и мой уровень дохода. Я вполне доволен. Это выше того, что я получал, работая преподавателем — 55 тысяч рублей минус налоги, плюс научным сотрудником на ФИАН — здесь я выбил даже повышенную ставку 7 тысяч рублей. Но для этого перехода необходимо было защитить кандидатскую диссертацию. Именно защита открыла мне многие двери, в том числе и на Физтех. Более того, многие крупные престижные компании активно ищут молодых специалистов. И был случай, когда меня приглашали в Huawei, им подходило мое образование и навыки, но узнав, что я пока не защитился, они решили подождать: «Ну как защититесь, так пишите». Но стоит отметить, что если молодой выпускник вуза устраивается на производство, то там заработная плата существенно выше, чем в науке. А с кандидатской можно занять хорошую вакансию даже без опыта работы на производстве.

2. Какие стремления, амбиции у вас есть и можете ли вы сказать, что они достигнуты или будут достигнуты?

Хочется сделать что-нибудь полезное, весомое, чтобы людям жилось лучше. Над чем в целом и работают ученые. И я могу сказать, что наша лаборатория идет к этой цели. В этом году мы выиграли грант на создание Научного центра мирового уровня. И в этой победе есть и моя заслуга. Я практически две недели жил на работе, составляя заявку на грант. Мой научный руководитель был локомотивом, а я набивал вагоны мебелью, строго по списку. Но мы в итоге выиграли, и я очень доволен. Конечно, это только начало пути, но он уже обозначен, а это главное. Обозначены цели, и они весьма амбициозные и полезные. Мы будем разрабатывать технологию готовых производств двумерных материалов для изготовления на их основе транзисторов, детекторов и сенсоров. Наш мегагрант рассчитан на шесть лет.

3. Ваши основные ценности? К чему вы стремитесь в будущем?

Развиваться в науке, создавать полезные прикладные разработки. Внедрение их в производство наглядно покажет результат моего труда. Конечно, хочется благополучия и для семьи. Моя жена архитектор, у нас родился ребенок. Нам есть к чему стремиться.



Фото Анастасии Каплиной

КОНСТРУИРОВАТЬ, РАЗРАБАТЫВАТЬ, ИСПЫТЫВАТЬ

Виктор Долгов, инженер-исследователь Центра испытаний функциональных материалов МФТИ

1. Какой примерно доход может получить молодой специалист, работающий в области микроэлектроники?

Сейчас в науке даже начинающим специалистам, ученым и инженерам, можно ожидать дохода на уровне 100 тысяч рублей, а при наличии опыта стоит рассчитывать и на 150 тысяч. Я, инженер и аспирант первого года в МФТИ, не отклоняюсь сильно от общего тренда. Можно сказать, что по сравнению с моим первым местом работы на четвертом курсе бакалавриата доход вырос в 10 раз. Да, тогда я работал три дня, а сейчас полную неделю, но все равно за пару лет рост получается впечатляющий. В дальнейшем я хочу продолжать расти именно как специалист в своей области.

2. Какие стремления, амбиции у вас есть и можете ли вы сказать, что они достигнуты или будут достигнуты?

Важное достижение для меня — что я занимаюсь тем, чем давно хотел: не просто наукой, а прикладными

разработками. Моя должность — инженер-исследователь, и хотелось бы развиваться дальше именно в этой сфере, продолжая заниматься микроэлектроникой и нанотехнологиями. В лаборатории множество интересных задач, достойное оснащение и хороший коллектив, поэтому я рассчитываю продолжать работать здесь и после поступления в аспирантуру.

Мне нравится, что работа динамичная и прикладная, а не бумажная. Интересно конструировать, разрабатывать, испытывать. Когда одни проекты заканчиваются, другие начинаются. Думаю, я бы не оставался на одном месте так долго, если бы не видел возможности развиваться.

Конечно, раз я поступил в аспирантуру, в будущем хочу защитить диссертацию и получить звание кандидата наук. Пока я в самом начале этого пути, но верю, что все получится. Научный руководитель — и мой начальник — порекомендовал мне довольно широкую специальность «физика конденса-

рованного состояния». Она лучше всего соответствует моим исследованиям с наночастицами металлов. Рабочие проекты, где я принимаю участие, дадут научные публикации, которые лягут в основу будущей диссертации, но в целом спектр задач в лаборатории гораздо шире, и мне это нравится.

3. Ваши основные ценности? К чему вы стремитесь в будущем?

Мне нравятся возможности, которые дает работа здесь. И интересные проекты и задачи, и перспективы роста, и финансовая независимость, позволяющая жить интереснее, чем дом-работа-учеба. Только благодаря этой работе я могу позволить себе как хобби заниматься фотографией, это тоже довольно затратно. Да и в обычном офисе или банке я себя не представляю, для меня гораздо интереснее исследования и разработки. Считаю большой удачей, что смог попасть в эту лабораторию, найти интересную работу и при этом работать не только за идею.



Уникальный российский принтер сухой аэрозольной печати с которым работает Виктор.

Фото: Анастасия Каплина

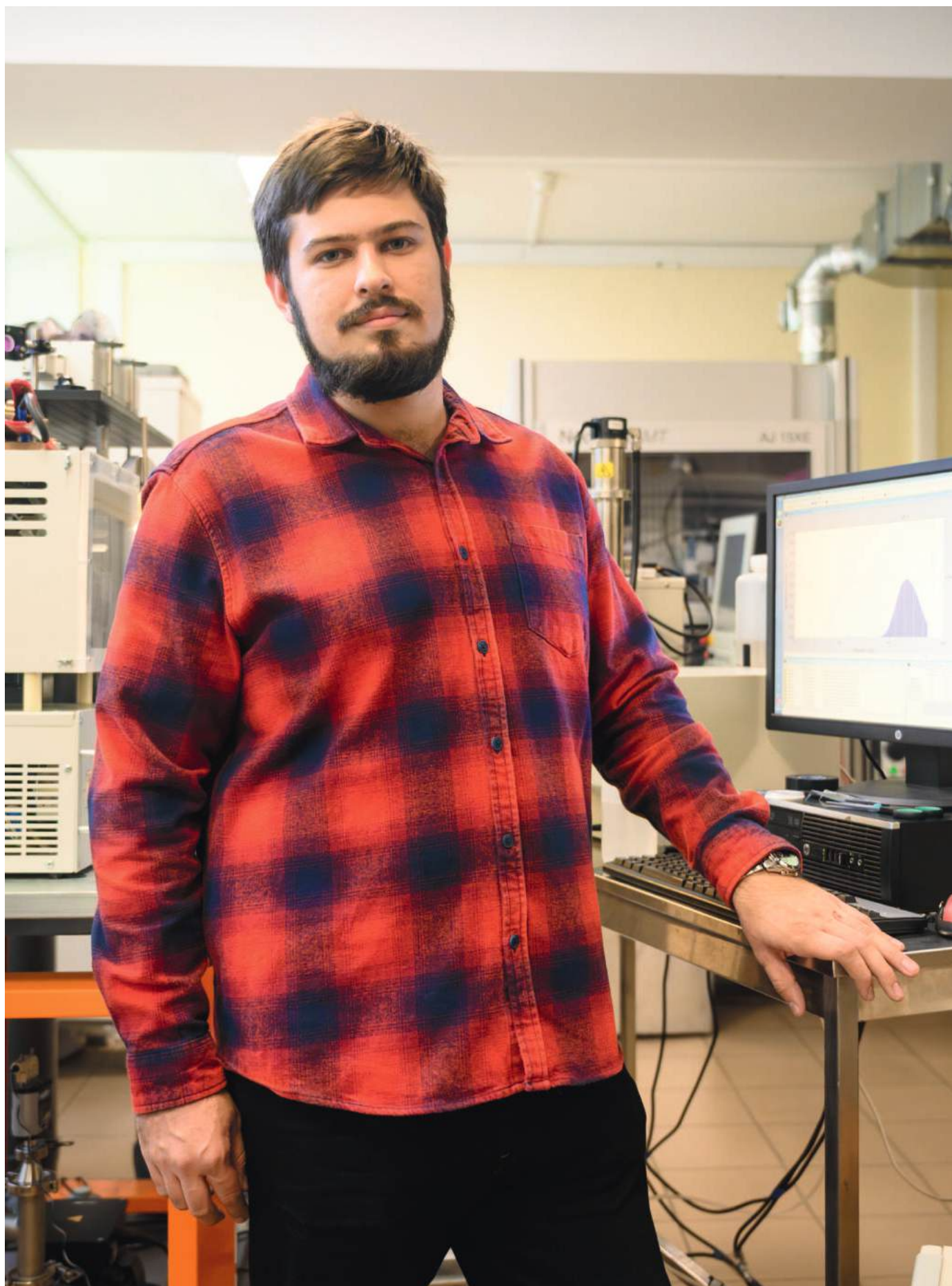


Фото Натальи Арефьевой

КРИТЕРИЙ УСПЕХА

«РЕШЕНИЕ,
КОТОРОЕ САМ
ПРИДУМАЛ
И РАЗРАБОТАЛ,
А НЕ ВЫПУСТИЛ
КИТАЙСКО-РОССИЙ-
СКИЙ ВАРИАНТ»



Варвара Кравцова
Фотограф Наталья Арефьева

Рынок и люди – самые важные ресурсы для развития успешного бизнеса с точки зрения Владимира Трещикова, генерального директора компании «Т8». Журналу «За науку» Владимир рассказал, как поступил в Физтех, почему уехал из США и занялся бизнесом в России

«За науку»: Владимир, вы и в науке реализовались, и в бизнесе. Это оттого, что вы сознательно технологический бизнес выбрали?

Владимир Трешков: Наука и бизнес — зачастую противоречивые понятия, и естественно, здесь важен вопрос мотивации. Самое главное — занятие техникой мне доставляет удовольствие. Но если ты не руководишь сам всеми

технологическими процессами, то, к сожалению, приходится сталкиваться с бюрократией. Я начинал работать в 90-е годы и многие решения принимал, исходя из той весьма непростой ситуации в стране. Сейчас времена намного лучше — вполне возможно, в этой действительности я бы выбрал другой путь и стал бы, скорее всего, техническим руководителем.

«ЗН»: А как все начиналось?

ВТ: Я пришел к своему шефу в Институт радиотехники и электроники Академии наук и представил ему новый метод, который уже вполне мог подтвердить экспериментально. Говорю: беремся? Получаю ответ: «Конечно! Ставим в план на следующий год, на третий квартал». И у меня возникло ощущение, что жизнь утекает сквозь пальцы,

как песок, очень быстро и в никуда. К сожалению, в большой системе бюрократии не избежать. Проще деньги на исследование самим заработать, чем доказать, выбить, обосновать, потратить, а потом отчитаться и заполнить множество отчетов.

«ЗН»: То есть свой бизнес — самый прямой путь для реализации своих идей?

ВТ: Это все в комплексе. Вопрос в том, что является для человека приоритетом, критерием успеха. Самый главный «зачет» мы сдаем сами себе. Это может быть звание профессора, признание в научных кругах, статьи в высокорейтинговых журналах. Но я по складу характера больше прикладной человек. Для меня критерий успеха — сделать для заказчика реальное полезное техническое решение, которое сам придумал и разработал, а не выпустил китайско-российский вариант. Если это решение оценили, стали применять, оно хорошо работает — для меня это и есть «зачет» самому себе. Поэтому я создал компанию.

«ЗН»: Вам что-то дало обучение на Физтехе? Почему вы сюда поступили?

ВТ: Ну понятно, что если нравится физика, то выберешь технический вуз. Остается вопрос: какой? Я олимпиадник, у меня диплом с межна. Я буквально в последний момент заметался и решил, что в МИФИ. В этот год как раз открыли горячий термояд. Помните, термояд в пузырьках, термояд в стакане воды? Это все оказалось фейком, но тогда казалось, что это такой прорыв и надо идти этим заниматься. В МИФИ процесс подачи документов выглядел как идеально отлаженная машина. Ты проходишь много залов: первый зал — тебя регистрируют, выдают пакет документов, которые ты заполняешь во втором зале, в третьем зале проверяют правильность заполнения документов, и если все хорошо, ты проходишь в четвертый — там принимают твои документы и выдают квитанцию. А когда я уже ехал на

электричке домой во Фрязино, то встретил знакомого физтеха. Он говорит: «Зачем ты туда идешь? Знаешь, в чем проблема всех ядерных физиков? Там нет права на ошибку. А нормальные физики постоянно ошибаются». И за полтора часа он меня реально убедил поступать в МФТИ. Я вышел из электрички, сел во встречную, вернулся в МИФИ, забрал документы, поехал на Физтех.

Там атмосфера была абсолютно противоположная. Все происходило в коридоре без стульев. Люди, как правило, сидели на полу, и на коленях заполняли заявления на прием. Когда я пришел, выключили свет, и все сидели в темноте. Мы стали переговариваться, не придет ли это все к тому, что заявления не смогут принять. Некоторые даже ушли, но те, кто дождался, получили приятный бонус. Мы в итоге сдавали документы лично академику, который с нами беседовал и задавал классические вопросы. Например: «Чего ради ты пошел на Физтех?» Все, естественно, отвечали: «Потому что я люблю физику». Но тут тебя спрашивают: «Ну не юли, скажи, действительно, почему ты решил поступить на Физтех?» И здесь ты теряешься и понимаешь, что должен уже сказать что-то

настоящее, свое. Так я понял, что пришел в нужный мне вуз. В то время было много свободы, но порой в очень странных проявлениях. Сейчас, наверное, это покажется даже диковатым. Ну например, в общежитии все могли жить, где успели занять место, не только в комнатах, но и в подсобных помещениях. Например, я жил в так называемой «Читалке №2». И это было совершенно нормально — хочешь избавиться от соседей, найди свое уединенное место. Да, в 90-е было весело, свободно, но для себя я это время расцениваю как украденное. В то время бизнес строить было очень сложно, практически невозможно. Когда наступили нулевые, одновременно у всех появилось много возможностей. И, конечно, 90-е печальны первым крупным потоком эмиграции, люди массово разбежались, и это всячески поддерживалось и пропагандировалось. Конечно, мы можем гордиться, что наши выпускники работают в лучших мировых центрах, но это значит, что свои центры мы не создали.

«ЗН»: После окончания вуза вы тоже уехали в США. Почему вы вернулись и построили карьеру именно в России?





ВТ: Я бы не сказал, что у меня было намерение жить в Америке, я много раз там был. Да, мне предлагали работу в престижной лаборатории профессора Файнберга в Лос-Анджелесе после успешного доклада на конференции Photonics West. Но это все выглядело так, как будто я приехал из колонии в метрополию. И это всячески подчеркивали, что теперь ты переходишь из нищей России в Настоящий Научный Центр. Мне это не понравилось, и я вернулся. Хотя в России тогда я зарабатывал примерно 200 долларов в месяц, а в США мне сразу предложили около 3 тысяч. Условия были идеальными, все мои навыки были очень востребованные. Но сама агитация была неверная, провальный PR.

Кроме того, Америка пропитана своей идеологией. В Кремниевой долине присутствуют и NASA, и Lockheed Martin — военно-промышленные корпорации, крупные военные базы. На них работают крупнейшие научные центры. Кто-то этого упорно не замечает и говорит: да нет, это просто наука. Кому-то удастся закрыть на это глаза, а мне тяжело с этой мыслью. Когда я окончательно решил не работать в Штатах, я поехал в Ка-

захстан. Это был конец 90-х. Там мы протянули через степь несколько тысяч километров оптических сетей, это был еще не полноценный DWDM (Dense Wavelength-Division Multiplexing — современная технология передачи большого числа оптических каналов по одному волокну. — «ЗН»), а скорее первая система волоконно-оптических усилителей. Как любой человек, я поехал в другую страну с главной

Что это за DWDM такая?

Мультиплексирование — это технология, которая позволяет передавать несколько потоков данных или сигналов по одному физическому каналу связи (оптоволоконный кабель, радиоканал, пр.). Канал можно делить «на кусочки» как по времени, так и по частоте. В оптоволоконных сетях практикуют WDM — разделение по длине волны. DWDM (то есть «плотное» разделение) — это относительно новая и очень эффективная технология передачи сигнала. Она позволяет многократно увеличить пропускную способность одного волокна для высокоскоростной передачи больших объемов данных для магистральных и региональных сетей, крупных дата-центров и пр.

целью — заработать на квартиру в Москве. Но в итоге проект приду- мал, реализовал его, сдал, а денег не получил: казахская сторона деньги перевела, а российский заказчик нас просто кинул. Надо было что-то делать. Я четко понимал, что придуманное решение — рабочее, технология востребована, но никому доверять нельзя. И получилось, что единственный способ как-то удержать ситуацию, направить деньги на развитие, на дело, на технику — создать свою компанию. Что мы и сделали. Всего у нас было три акционера, два из которых физтехи. Начальный капитал 2 тысячи долларов, комната 25 квадратных метров и очень много энтузиазма. Так мы и раскрутились, с трех человек до 600.

«ЗН»: В 2024 году вышло уже 5-е издание вашей книги «DWDM-системы».

ВТ: Это совместный труд, и его основной и самый важный автор — Владимир Николаевич Листвин. Он профессор Физтеха, преподавал здесь 30 лет и очень много лет работает у нас. Крупнейший специалист в области волоконной оптики и фотоники. И, конечно, один из главных факторов нашей истории успеха — в том, что нам удалось его привлечь. Но это далось большой кровью. (Смеется.) Нам пришлось перенести офис компании поближе к его дому! Владимир Николаевич читал у нас курс лекций, и своим именем привлек много сильных специалистов и ученых. По сути, это он создал научный центр в «Т8» — просто звонил людям и говорил: «Слушай, удивительно, в наше мутное время люди делом занялись. Я уже здесь, и вы тоже приходите».

Сегодня «Т8» это в первую очередь мощный научный центр. Мы в очередной раз вошли в десятку лучших инновационных и крупных компаний России. Мой индекс Хирша ушел за 20. В смысле реальных результатов это абсолютный «зачет». Но даже не это главное, а то, что мы конкурируем с иностранными DWDM-системами. А сегодня наши главные конкурен-

ты — те, кто выдают китайский товар за российский.

«ЗН»: Это распространено на рынке?

ВТ: К сожалению, да. История «Т8» интересна тем, что мы уже прошли этап стартапа и вышли на самый сложный — найти сегмент рынка, на котором можно реализовать наш продукт. В русских сказках все истории заканчиваются, когда герой, преодолев множество препятствий, завоевал невесту. Что же делать дальше, непонятно, на этом сказка заканчивается, а дальше — тяжелые будни, о которых нам не рассказывают. В сказках про русские стартапы вся история заканчивается, когда герой, преодолев массу технических проблем, наконец сделал шикарный продукт, шикарность которого подтвердили все. Что же дальше? А дальше очень интересно. Ты приходишь с этим продуктом, говоришь: ура, у меня шикарный продукт! И оказывается, что тут возникает страшный конфликт интересов. Представьте, в 2012 году мы пятыми в мире сделали 100-гигабитную DWDM-систему, которая оказалась невероятно продуктивной. Она побила три мировых рекорда по дальности, по скорости, она была

компактная и стоила в три раза дешевле аналогов. Казалось бы, мы можем заработать миллиарды. Но вместо этого мы столкнулись с просто колоссальной ненавистью. Стольким людям мы помешали в налаженном бизнесе! Они уже так привыкли продавать иностранную продукцию, а тут вышел успешный российский продукт.

В 2013 году в Америке на Russian Innovation Week я сидел в президиуме рядом с Чубайсом и говорил: «Давайте сделаем российский знаковый проект. У нас уже есть продукт для волоконной оптики с пропускной способностью 100 Гбит/с, мы можем его предложить Google, который покупает колоссальное количество систем связи. Вы покупаете блоки 100 Гбит/с примерно по 130 тысяч долларов, а мы можем продать за 50 тысяч долларов». О, отлично, тут же вписались, начали готовить контакт. Через недели три пришел американец должностью повыше и сказал: «Нет, вы что! Никогда американская компания не возьмет оборудование Made in Russia». Я говорю: «Почему? Вам правительство запрещает?» В ответ: «Нет, при чем тут правительство? Мы частная компания. Но красная кнопка должна быть в США. Никог-

да не возьмем». Я говорю: «В три раза дешевле». В ответ услышал: «Не имеет значения». Я тогда пожал ему руку и сказал: «Когда мы в России будем руководствоваться такими же принципами, как вы в Америке, тогда мы будем жить так же хорошо».

«ЗН»: А в России?

ВТ: В параллель мы пытались выходить на отечественный рынок. И нас несколько лет даже на сертификацию не пускали. Потому что знаменитая китайская компания продавала по 300 тысяч долларов, а мы предлагали по 70 тысяч. То есть люди понимали, что наша система многократно лучше, и она вызывала дичайшее отторжение. К сожалению, во многом у нас до сих пор колониальный менталитет. Мы очень хотим быть независимыми, но что-то мешает. Я даже про это анекдот придумал. Исторический факт: основатель Huawei Жэнь Чжэнфэй пришел к председателю компартии Китая и сказал: «Государство без собственного телекоммуникационного оборудования все равно что без армии». Его выслушали и поменяли Cisco на Huawei. Затем он приехал в Россию, сказал ту же самую фразу, и мы тоже поменяли Cisco на Huawei.

Дмитрий Ливанов,
ректор МФТИ,
и Владимир Трешиков,
генеральный директор «Т8»
Фото: Анастасия Каплина





«ЗН»: Вы еще в 2015 году говорили, что импортозамещение в России — это замена американского на китайское. За 10 лет произошли какие-то изменения?

ВТ: Изменения есть, медленные, но в целом позитивные. В России начинают появляться компании, которые по-настоящему что-то производят и разрабатывают сами. Но, конечно, везде есть свои особенности. Меня на каком-то совещании спросили: «Скажите, кто, на ваш взгляд, больше всего сделал для развития российской промышленности?» Я ответил: «Хочу поблагодарить руководителей компаний Nokia и Huawei за то, что они ушли из России».

«ЗН»: То есть предпочтений для отечественного бизнеса не было?

ВТ: Нет, скорее наоборот. Лет десять назад подходит к нам на выставке «Связь» на вид очень квалифицированный, хорошо одетый мужчина в костюме, задает много профессиональных вопросов. Приятно разговаривать. Я его спрашиваю: «Слушайте, судя по тому, как вы общаетесь, вы очень квалифицированный человек. Вы хотите использовать нашу систему на своих сетях?» Он отвечает: «Да нет. Я просто пытаюсь понять, по какому недосмотру ваши DWDM-системы оказались на сетях одного из крупнейших операторов связи». Рынок был поделен, и не в пользу российского производителя. Это такой ресурсный подход: продажа любых ресурсов в виде сырья. Такой подход приводит к тому, что рынок тоже продают, и дальше в него не войдешь. Вторая проблема, конечно, люди. В России мы живем в условиях жесткого дефицита профессиональных кадров, и то, что продолжается эмиграция и ее пропаганда, — самая главная проблема. Мы участвуем в проекте «Долина Физтех», первыми подали заявку, стали базовой организацией Физтех. У нас уже есть совместные проекты.

На мой взгляд, в любом бизнесе есть две важные вещи. Первая рынок, а вторая — люди, которые могут сделать продукт для этого рынка. И, ко-

нечно, очень важно, чтобы люди, которые создают высокие технологии, были здесь. Необходимо создавать условия для комфортной работы именно в России. Я рад, что сейчас идет мощное движение за то, чтобы создавать инфраструктуру, рабочие места, которые для этих людей будут конкурентоспособны. Здесь, конечно, выделился МГТУ имени Баумана, где уже построили 17 гигантских современных корпусов. Хочется, чтобы подобный масштаб был и на Физтехе. Необходимо создавать конкурентоспособные условия для наших специалистов, и сейчас Бауманка задает высокую планку.

Моя мечта — сделать на Физтехе большой и конкурентоспособный прикладной научный центр по скоростной волоконной оптике и фотонике, который бы действительно показал результаты мирового уровня. Сейчас появились новые задачи по оптическим вычислениям, направление активно развивается, нам есть куда двигаться. У нас есть рабочая лаборатория на Физтехе, к нам идут работать физтехи, у нас примерно 16 аспирантов, но к сожалению, они очень медленно идут к защите. Работа работой, а защищаться надо.

«ЗН»: А вы при такой нагрузке не только кандидатскую, но еще и докторскую защитили. Как?

ВТ: Кандидатскую я более или менее быстро защитил, в 25 лет. Конечно, и тогда приходилось совмещать работу и науку — все свои результаты я получил в основном от двух ночи до пяти утра, днем я работал. Здесь главный вопрос, до какой степени ты можешь поступаться комфортом ради того, чтобы стать кандидатом или в целом достичь своих целей. И если люди говорят: «Дайте мне отпуск на кандидатскую, примерно на три месяца». Я говорю: «Не дам. Халявы не будет, есть у нас такое выражение на Физтехе». Пока мы молоды, сил много, надо трудиться. Везет тому, кто везет.

«ЗН»: А докторская?

ВТ: Ну вы знаете, если совсем честно, то выйти на защиту докторской меня убедил Андрей Леонов, мой



заместитель по стратегическому развитию «Т8», тоже доктор наук. Мы сделали ряд очень интересных задач, которые вполне подходили для докторской. Долго думал, стоит или нет, и все-таки пришел с собой в согласие. Я подумал, что сейчас коллектив уже большой, техники много, оборудования. Мы выпускаем 10 тысяч новых изделий в год, налажены основные бизнес-процессы. Будет перед самим собой не стыдно. Перед защитой я наметил ряд вопросов, изучил их, подготовился. Думаю, если бы я хотел кого-то завалить, то сам бы их задал. Подготовил даже слайды, чтобы наглядней были ответы. Прихожу на защиту, в комиссии 11 человек, и после доклада первый же вопрос получаю не тот, причем в разы сложнее, он касался когерентной волоконной оптики. Почему шум пропорционален третьей степени сигнала? Почему третьей? Почему не четвертой? Почему не второй? Ученые из Италии нашли ответ — с большим трудом, но в целом в этом сложно разобраться. Я подумал, что на Физтехе по-прежнему нет халявы и сказал: «Спасибо. Вы задали самый главный и сложный вопрос». И началась битва, 40 вопросов за три часа... В общем, Физтех марку держит. Задавали максимально сложные вопросы. И мне, конечно, это очень понравилось, это «зачет» по-настоящему.

Редакция журнала «За науку» решила вспомнить добрые традиции советских и многих российских научно-популярных журналов, которые традиционно в конце выпуска публиковали хорошие фантастические рассказы (или печатали романы и повести с продолжением). Именно в научно-популярных журналах впервые увидели свет литературные произведения, получившие в дальнейшем внимание миллионов читателей и десятки престижных наград. Но «За науку» решил обратиться не к профессиональным писателям, а к своим читателям-физтехам. Наш конкурс научно-фантастических рассказов прошел нынешним летом, на него поступило полтора десятка работ, редакция выбрала из них одну, представленную ниже. Наш приз – авторский гонорар 15 тысяч рублей.



ЖЕЛЕЗНОЕ СЕРДЦЕ ЭЛИЗИОНА

Мария Карела

Элизион казался раем. Панели, утопленные в стены зданий-садов, пили солнечные лучи, питая вертикальные фермы. Воздух, всегда свежий, сладкий от цветения гидропоник, струился по широким улицам. Над головой пешеходов, бесшумно скользя по магнитным дорожкам, сновали капсулы общественного транспорта.

Большинство жителей Элизиона принадлежали искусству. На площадях звучали сложные полифонические симфонии, стены зданий украшали пейзажи далеких планет или абстракции чистого чувства. В парках танцоры в костюмах, меняющих цвет по воле мысли, исполняли невероятные па. Шаги Микки по мягкому, самоочищающемуся покрытию тротуара были тяжелее, чем у других. Он смотрел не вверх, на парящие сады, а себе под ноги. В кармане лежала драгоценная находка — небольшой угловатый болт. Микки чувствовал себя сломанным датчиком в отлаженной машине. Его попытки рисовать заканчивались кривыми линиями, которые доброжелательный ИИ-наставник мягко назвал «уникальным проявлением внутреннего хаоса». Пение? Его голос то и дело срывался на фальцет, вызывая безудержный кашель окружающих — смеяться им, конечно, не позволяло хорошее воспитание. Танец изображал в лучшем случае скольжение парнокопытного по льду. А о том, что породили руки Микки на уроках скульптуры, он предпочитал не вспоминать.

— Ты просто пока не нашел себя, Микки, — утешала его мать, чьи световые инсталляции украшали центральный атриум.

— Терпение, сынок. Творчество есть в каждом! — подбадривал отец, создавший музыкальные паттерны, управляющие ростом городских лесов. В их голосах сын слышал любовь — такую же искреннюю, как и их недоумение.

Микки ценил красоту вокруг, чистый воздух и отсутствие нужды, но его душа не пела с этой гармонией в унисон. Все это великолепие казалось оберткой, скрывающей текстуру реальности. Его тянуло к скрытым в стенах панелям, интересовало жужжание сервоприводов дронов-садовников — манило то, что производило и поддерживало окружающее его благолепие. Микки сломя голову бежал туда, где сверкающий фасад Элизиона давал трещину. Ходил в одинокие прогулки на самую окраину купола, к зоне заброшенных ангаров и складов времен Перехода, когда город только строился. Здесь под толстым слоем пыли дремали забытые системы мониторинга, пахло металлом, маслом и тихой грустью ушедшей эпохи.

Здесь-то Микки и нашел громадный дизельный двигатель в шубе из пыли и паутины. Он высился под полуистлевшим брезентом, словно спящий железный дракон. Когда Микки коснулся холодного металла, его охватил трепет, которого он никогда не испытывал перед мольбертом. Дракон был настоящим. Сложным. Мощным. Запретным.

Пока город парил в свете и музыке, Микки пробирался в ангар, давший убежище двигателю.

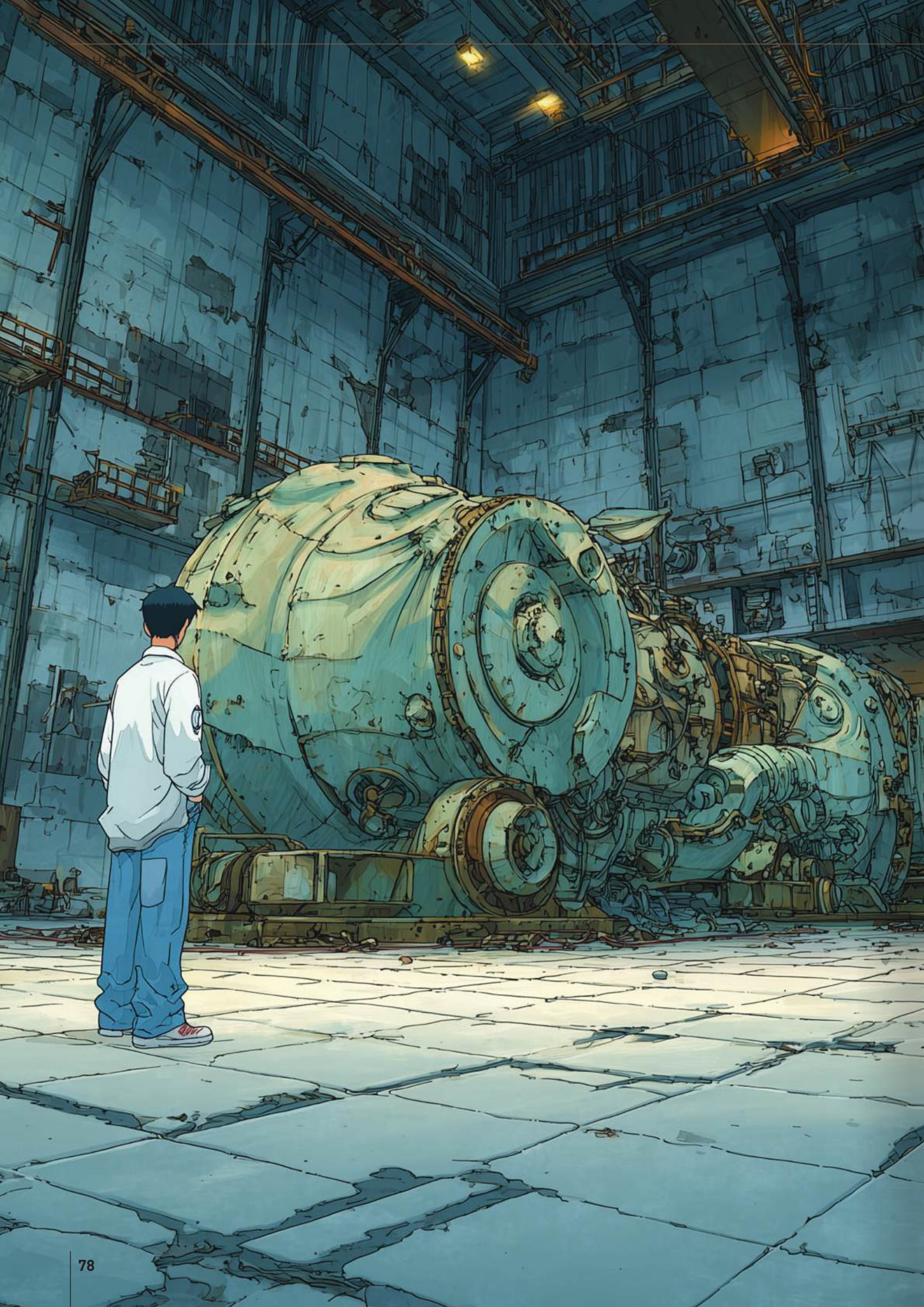
Его руки, неуклюжие с кистью, прекрасно подошли для работы ключом и отверткой. Микки крутил гайки, чистил детали, сверяясь с распечатками старых учебников механики, которые он раздобыл в глубинах Сети. Каждый очищенный от ржавчины болт был его маленькой победой, дарующей радость творения. Скрип затягиваемых гаек будоражил не меньше, чем поклонника оперы — обрывки звуков из оркестровой ямы перед началом представления. Сны Микки все чаще заканчивались одинаково: ураган сорвал с ангара крышу, разметал лоскуты брезента, на голой земле сидит стальной дракон — еще миг, и Микки наконец услышит первый, оглушительный, дикий рык его пробуждения.

Ангар стал для мальчика святилищем, укрывающим древнее божество на пьедестале из ржавых труб и облупившегося бетона. Вернее, то, что от него осталось: массивный блок цилиндров, покореженный коленвал и грудку безыманных железяк.

Хлипкие биоразлагаемые страницы учебника, что норовили разложиться от прикосновения потных пальцев, стали его скрижалями — и картой сокровищ одновременно. Страницы пожелтели, схемы были смазаны, а термины звучали, как заклинания на мертвом языке: «ТНВД», «форсунка», «поршневое кольцо», «впускной коллектор». Микки пожирал страницы глазами, но понимание приходило медленно, обрывками. Он видел картинку, знал название детали, но как именно она взаимодействует с соседней? Почему у нее именно такая форма? Учебник давал теорию, но не давал опыта. Опыт Микки получал единственным возможным методом: бесконечных проб и ошибок.

Многого не хватало, но главное — топлива. Микки знал, что любые механизмы из эпохи до Перехода запрещены, как и все виды топлива, но он просто должен был его запустить! Он ходил в экспедиции по темным закоулкам заброшенных цехов, рискуя провалиться сквозь прогнивший пол. Его руки превратились в ловкие инструменты: он выковыривал болты из бетона, отвинчивал намертво заржавевшие гайки с помощью самодельного ключа и капельки древнего машинного масла, найденного в запечатанной канистре. Каждая найденная гайка, шайба или пружинка, подходящая по размеру, была победой.

Находки Микки пытался вживить в тело двигателя. Иногда — о чудо! — она вставала на место, резьба схватывалась с едва слышным скрипом, и сердце Микки трепетало от радости. Такие дни становились для него праздничными. Неудач было больше, но Микки не сдавался, снова разбирал узел, изучал, шлифовал заусе-



ницы или искал другую деталь-посредник. Он научился чувствовать металл, понимать, где пределы его податливости. Пальцы покрылись царапинами и тонкой пленкой масла, и это ему невероятно нравилось.

Самой большой загадкой оставался дизель. Учебник сухо констатировал: «Дизельное топливо. Соляровое масло». В мире Элизиона, где энергию давали солнце, ветер и геотермальные станции, а транспорт работал на водороде или магнитной левитации, найти жидкое топливо было почти невозможно. Микки перерыл все склады, нашел банки с высохшей краской, пустые канистры с давно испарившимся содержимым, даже странную густую маслянистую жидкость в запечатанной колбе, которая пахла чем-то непривычным. Но солярку — нет. Под конец учебника взгляд Микки уперся в маленькую сноску: «В аварийных случаях возможно кратковременное использование некоторых видов очищенных растительных масел или синтетических аналогов, хотя это приводит к повышенному износу и снижению мощности». Микки вскочил. Растительное масло! Оно было в городе! Его использовали на кухнях для особых блюд, в артпроектах, даже в некоторых биосмазках! Рискованно, предупреждал учебник, но — шанс.

Добыча масла стала его самой масштабной операцией. Он стал собирать отходы. Подкарауливал, когда в кафе на окраине сольют отработанное масло после жарки синтезированных оладий, выменивал у друзей-художников небольшие флакончики льняного или конопляного масла, которые они использовали для создания эффекта старины на холстах. Капля за каплей, неделя за неделей, он заполнил топливом старую канистру.

Наконец настал тот день, когда двигатель, хотя и выглядел как Франкенштейн из ржавых запчастей, был собран согласно учебнику. Вернее, по той схеме, которую Микки счел верной. Он не был уверен на сто процентов, особенно в хитросплетении топливных трубок и работе таинственного топливного насоса высокого давления, который он, кажется, реанимировал. Может, он перепутал впуск с выпуском? Может, зазоры в клапанах не те?

Но сомнения отступили перед жгучим желанием попробовать. Его руки дрожали, когда он подсоединил к насосу канистру. Микки прокачал систему ручной помпой, чувствуя, как масло пробивает себе дорогу по старым трубкам. Подключил восстановленный аккумулятор к стартеру.

Сердце Микки бешено колотилось, когда он в последний раз окинул взглядом свое творение: ржавое, масляное, стянутое болтами разного калибра. Глубоко вдохнув, он вспомнил

яростный рев, который преследовал его во сне. Палец потянулся к кнопке пуска. Сработает ли? Он не был уверен. Он знал только, что хочет наконец услышать этот звук.

Стартер заскрежетал, цепляя маховик, тот дернулся раз, другой... Микки замер, кровь застучала в висках. БА-БАХ! Сухой, как выстрел, хлопок из выхлопной трубы. Облачко дыма ударило в нос. Двигатель дернулся, кашлянул еще раз... и ЗАРЫЧАЛ.

Первобытный грохот бил по груди, вытесняя воздух из легких. Микки, стуча зубами, закричал от восторга, и голос потонул в реве железного зверя.

На смену восторгу вскоре пришел ужас. Такой звук невозможно скрыть! Микки метнулся к двигателю, трясущимися руками пытаясь найти тумблер, рычаг, хоть что-то, чтобы заглушить механического зверя, но внезапно рев изменился.

Грубый, рваный кашель цилиндров вдруг сгладился. Балансиры, казалось, нашли потерянное равновесие. Вибрация, грозившая развалить хлипкую конструкцию, стала ровной, мощной. Динг-динг-динг-динг... Это был уже не хаотичный рев, а низкий, размеренный гул, биение гигантского железного сердца, в нем появилась странная, механическая гармония. Микки замер. Двигатель не разваливался — он работал! Нашел свой ритм!

В тот же миг высоко на закопченной стене ангара вспыхнули два тусклых красных светодиода. Со скрежетом заклинивших шестерен, древний проекционный аппарат, вмурованный в стену, вздрогнул. Его пыльная линза слабо зажглась, пробивая сгусток вековой тьмы лучом мутного света.

На противоположной стене, там, где когда-то, должно быть, висел огромный экран, проступило изображение.

Микки узнал контуры Элизиона — сферические узлы геотермальных скважин, паутину солнечных коллекторов на куполе. Но уровень детализации был ошеломляющим. Это была живая карта всей энергосистемы, от главных артерий до мельчайших капилляров.

И прямо в ее сердце, в районе Геоядра-3 — основного источника тепла и энергии — пульсировала ядовито-алая точка. От нее расходились трещины. Внизу горела пугающая надпись: «КРИТИЧЕСКИЙ СБОЙ. ДЕСТАБИЛИЗАЦИЯ ЯДРА T-12724:11м:43с... 42с... 41с...»

Микки смотрел на свой дымящийся шедевр, пахнувший жареными оладьями, потом на пульсирующую красную язву на схеме. В голове, перегруженной грохотом и ужасом, щелкнуло. Механизм, который он столько времени собирал, вовсе не должен был быть забытым! Он оказался механическим резонатором, «камер-



тоном» для системы, способным уловить глубинные вибрации сбоя, недоступные электронной диагностике.

Рев, трансформировавшийся в мощный, ритмичный гул, длился недолго. Спустя минуту, казавшуюся Микки вечностью, двигатель самопроизвольно заглох с последним выдохом маслянистого дыма. Тишина, навалившаяся внезапно, оглушила даже сильнее. Но и она длилась лишь мгновение.

Ворота, не открывавшиеся десятилетиями, с грохотом разъехались. В проеме, окутанные облаком пыли, встали фигуры в комбинезонах аварийных инженеров. Первым шагнул к Микки мужчина, считывающий данные с портативного терминала:

— Диагностика подтверждает сбой в Геоядре-3. Глубинный резонансный коллапс. Микротрещина в камере плазменного удержания вызвала асимметричную вибрацию на частоте 7,83 Гц, это ниже порога чувствительности наших квантовых акселерометров, а нейросети классифицировали ее как фоновый сейсмический шум, — он с благоговением посмотрел на дизель. — Мы бы узнали об этом только когда плазма прожгла бы корпус. Как... как ты узнал?

— Нечаянно, — осторожно ответил Микки. — Это... дизель В-46. По схеме здесь, смотрите! — он ткнул пальцем в учебник, лежащий на верстаке. — Его вибрация зависит от оборотов. Вот рычаг!.. Он начал гудеть ровно, когда вибрация снизу совпала с его частотой, как камертон, он усилил ее. Если изменить обороты, подстроить частоту... может, мы сможем точнее локали-

зовать? Или подавить контрвибрацией? Есть теория акустической стабилизации плазмы, я видел в старом журнале...

Собеседник обвел глазами фигуру мальчика, как будто бы тот на мгновение пропал и вновь появился на том же месте. Теперь он смотрел на младшего коллегу, одного из немногих, кто понимал язык железной реликвии.

— Работаем! — коротко бросил он.

Следующие часы Микки вместе с инженерами настраивал обороты древнего двигателя. Рев то нарастал, превращаясь в оглушительный гул, то стихал до размеренного постукивания. Алая точка на проекционной карте то пульсировала ярче, то бледнела. Данные с резонатора, дополняя показания современных, но ослепших систем, позволили инженерам понять природу сбоя и дистанционно стабилизировать Геоядро-3.

Когда точка погасла, а карту залил ровный белый свет, в ангаре воцарилась тишина, нарушаемая лишь тихим постукиванием остывающего двигателя. Главный инженер подошел к Микки. Масло и копоть на лице мальчика выглядели теперь не грязью, а боевой раскраской героя.

— Меня зовут Аркадий, — сказал мужчина, протягивая мальчику руку, — думаю, мы с тобой сработаемся.

— Микки, — представился тот, потупив взгляд. — Я не знал, что такое можно. Что можно... ну, работать. Мне тоже можно?

Когда ангар взорвался хохотом, мальчик поднял глаза на людей, которые его нашли. И нашел среди них себя.



**«САМЫЙ ПЕЧАЛЬНЫЙ АСПЕКТ
СЕГОДНЯШНЕЙ ЖИЗНИ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ
В ТОМ, ЧТО НАУКА ПОЛУЧАЕТ ЗНАНИЯ
ГОРАЗДО БЫСТРЕЕ, ЧЕМ ОБЩЕСТВО
ПРИБРЕТАЕТ МУДРОСТЬ»**

**АЙЗЕК АЗИМОВ (1920–1992)
АМЕРИКАНСКИЙ ПИСАТЕЛЬ-ФАНАСТ,
ПОПУЛЯРИЗАТОР НАУКИ, БИОХИМИК**