

## МЕМБРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ: ВОЗМОЖНОСТИ, ОГРАНИЧЕНИЯ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Н.А. Дюжев

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия  
dyuzhev@ckp-miet.ru*

Поступила 03.12.2020

Рассмотрено магистральное направление развития технологии и приборной базы микроэлектроники на ближайшие тридцать лет, называемое в международных прогнозах «Больше чем Мур». Основной и практически неограниченной областью применения этого направления является суперсистема «окружающий интеллект», а основными движителями являются: системы искусственного интеллекта, Интернета Всего и доверенные интеллектуальные сенсорные системы. Технологической основой указанного направления являются процессы объемной (3D) гетерогенной интеграции с использованием сквозных межсоединений и контактов через кремниевую пластину и промежуточной платы электрического интерфейса, называемого интерпозером. Такая технология позволяет объединять в единую вертикальную систему стек (пачку) кристаллы, изготовленные на разных подложках и на различных фабриках, но требует использования тонких (50 мкм и менее) кристаллов со сквозными отверстиями для формирования межсоединений, фактически представляющие собой мембранные структуры. Такое положение настоятельно требует оперативного проведения комплекса работ по изучению и измерению механических свойств тонких пластин, мембран и пленочных структур на мембранах для определения их прочности, а также величины и распределения внутренних механических напряжений в них. Так как указанные параметры определяют надежность и временную функциональную стабильность характеристик микросхем, микроприборов и микроэлектронных систем, как на отдельных кристаллах (подложках), так и в составе 3D структур, сформированных по технологиям гетерогенной интеграции.

*Ключевые слова:* магистральное направление развития микроэлектроники «Больше чем Мур», окружающий интеллект, искусственный интеллект, доверенные интеллектуальные сенсорные системы, гетерогенная объемная (3D) интеграция, мембранные технологии, механические свойства тонких пластин, мембран и пленочных структур на мембранах.

УДК 539.216.2

DOI: 10.31145/2224-8412-2020-21-2-05-32

## Введение

Микроэлектроника, базирующаяся на планарной КМОП-технологии (*planar CMOS technology*) и развивающаяся, согласно закону Мура (*Moore's law*), подошла к пределу своих возможностей по масштабированию (уменьшению линейных размеров) как полевых планарных транзисторов (*Planar FET's*), так и полевых реберных транзисторов (*Fin FET's*). А также по производительности, потребляемой мощности и главное, по себестоимости передовых интегральных микросхем (ИМС) на их основе [1 – 3].

Текущее десятилетие будет последним периодом времени, когда технология микроэлектроники будет развиваться в соответствии с законом Мура. Причем из-за сложности и дороговизны такого развития, которое приведет в 2029 году к технологической норме ("технологическому узлу") (*Technology Node – Node – N*) с размером 0,8 нм, участвовать в нем смогут только три самые передовые и богатые компании: Intel (США), TSMC (Тайвань) и Samsung (Корея) [1, 4].

Для остальных компаний, фирм разработчиков и кремниевых фабрик, работающих в области микро- и наноэлектроники, международные технологические прогнозы (*ITRS* и *IRDS*) («дорожные карты») предлагают два направления развития [5, 6].

1. Фундаментальное технологическое направление «За пределами КМОП» (*Beyond CMOS*), связанное с функциональным масштабированием, т.е. с разработкой аналогов КМОП-микросхем с помощью альтернативных инновационных технологий. Причем реализация должна быть такой, чтобы функции новой микросхемы были идентичны функциям оригинальной микросхемы, и, по крайней мере, одна из ее рабочих характеристик улучшалась, а остальные – не ухудшались [5].

Инновационные технологии, к которым относятся большинство нанотехнологий, могут быть реализованы с различной архитектурой (аналоговой, квантовой, морфологической) и разными видами представления данных (аналоговыми, квантовыми, топологическими). При этом открываются возможности применения материалов, отличных от кремния, например, соединений углерода и  $A_3B_5$ , германия, магнитных и наноструктурированных пленок, также создания систем на одноэлектронных транзисторах (*single electron transistor – SET*), на спинтронных, квантовых, молекулярных и ферромагнитных эффектах. На практике функциональное масштабирование предполагает такое проектирование микросхемы, при котором ее последующее изготовление возможно по различным технологическим нормам [3,7].

Это направление наиболее перспективно для компаний, фирм разработчиков, фабрик, производственных участков и линеек без значительных заделов в области разработки и изготовления микросхем по КМОП-технологии, которым легко переориентироваться на другие технологии.

2. Магистральное технологическое направление «Больше чем Мур» (*More than Moore*), в основе которого лежат процессы гетерогенной трехмерной (объемной) интеграции наборов микросхем логики и памяти, микро- и наносенсоров, микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС) и других цифровых и аналоговых информационно-коммуникационных устройств, изготовленных по разным технологиям на различных фабриках и реализующих всеобъемлющую область применения под названием «окружающий интеллект» (ОИ) (*Ambient Intelligence* или сокращенно *AmI*) [6, 8]. Следует напомнить, что термин «интеллект» относится к способности обучения на основе опыта и применения полученных знаний в новых ситуациях для управления окружающей средой [9].

Окружающий интеллект (ОИ) неразрывно связан с «искусственным интеллектом» (ИИ) (*Artificial Intelligence*) (AI), можно сказать, что окружающий интеллект это, по сути, искусственный интеллект в окружающей среде. С другой стороны, искусственный интеллект обязан своим успехом феноменальному развитию информационных и коммуникационных технологий (ИКТ), основанных на законах и достижениях микроэлектронного производства [8].

Под окружающим интеллектом (ОИ) понимаются электронные среды, которые чувствительны и реагируют на присутствие людей. Термин был первоначально разработан в конце 1990-х Э. Зелха (*Eli Zelkha*) и его командой в Palo Alto Ventures [10], а затем был распространен на окружающую среду без людей: «В мире интеллектуального окружения устройства работают сообща, чтобы поддерживать людей в выполнении их повседневных действий, задач и ритуалов простым, естественным образом, используя информацию и интеллект, который скрыт в сети, соединяющей эти устройства, например, Интернет Вещей (*Internet of Things*) (*IoT*)».

Сегодня Интернет вещей продолжает расти, движимый все большим количеством онлайн-информации, коммерции, развлечений и социальных сетей, и это лишь некоторые из его направлений. Доступ к Интернету первоначально осуществлялся с помощью жестких настольных компьютеров, но внедрение беспроводной технологии (*Wi-Fi*), смартфонов в 2007 году и планшетов в 2010 году произвело революцию в том, как люди стали взаимодействовать через Интернет. Мир коммуникаций через Интернет действительно стал беспроводным, вездесущим и постоянно взаимосвязанным и расширяющимся миром, уже называемым Интернетом Всего (*Internet of Everything*) (*IoE*) [1].

Современное определение окружающего интеллекта было дано Х.К. Аугусто и П. МакКаллагом [11]: «Окружающий интеллект – это междисциплинарный подход, направленный на улучшение взаимодействия среды и людей друг с другом. Конечная цель подхода – сделать места, в которых

люди живут и работают, более удобными, выгодными и благоприятными для них. «Умные дома» являются одним из примеров таких систем, но эту идею можно распространить на все области жизни людей: на учебные заведения, объекты здравоохранения и отдыха, рабочие места на фабриках, заводах и в офисах, общественный и личный транспорт, охрану окружающей среды и безопасность и на другие среды, включая целые города».

Компании, фирмы разработчики и фабрики, проигравшие конкурентную борьбу с *Samsung*, *Intel* и *TSMC* по развитию технологии в соответствии с законом Мура, но имеющие значительные заделы по разработке и производству микросхем по КМОП-технологии остановились на экономически выгодных для них уровнях проектирования технологии и производства. Поэтому их дальнейшее технологическое развитие будет связано с магистральным направлением «Больше чем Мур» (*More than Moore*) [1, 5, 6].

## 1. Системы окружающего интеллекта

Область окружающего интеллекта (ОИ) очень тесно связана с повсеместными и распределенными вычислениями, а также с пониманием контекста и ориентированным на человека дизайном взаимодействия с компьютером. Среди наиболее важных свойств систем ОИ следует отметить [8]:

- **встроенность**: системы интегрированы в среду, и они «невидимы» человеком;
- **учет контекста**: системы не только распознают пользователя, но также его текущее состояние и ситуационный контекст;
- **доверенность**: системы защищены от воздействия внешних факторов на обрабатываемую информацию;
- **персонализированность**: системы адаптированы к потребностям пользователя;
- **адаптивность**: системы меняют свою производительность в ответ на изменения физического или психического состояния пользователя;
- **упреждение**: системы могут предвидеть желания пользователя без сознательного посредничества;
- **ненавязчивость**: предоставление системами только необходимой информации о пользователе и только требуемым устройствам и людям;
- **неинвазивность**: системы не требуют никаких действий от пользователя, они действуют самостоятельно.

Таким образом, по прогнозам и дорожным картам суперсистемы окружающего интеллекта и входящие в их состав системы искусственного интеллекта (ИИ), Интернета Вещей и Интернета Всего, доверенные интеллектуальные сенсорные системы (ДИСС) ближайшие тридцать лет будут основными движителями (*drivers*) развития микроэлектроники, последовательно заменив настольные компьютеры, планшеты и смартфоны [1, 11].

Как уже отмечалось, успех разработки и внедрения систем окружающего интеллекта (ОИ) напрямую зависит от качества, количества и номенклатуры производимых подсистем и микросхем искусственного интеллекта (ИИ). В настоящее время созданы библиотеки для разработки ИИ, которые в основном требуют контролируемого обучения. Тем не менее, такие технологические гиганты, как Microsoft, Facebook и Google, работают над созданием программ, которые будут работать поверх существующих библиотек разработки ИИ, чтобы дать им кроссплатформенность и поддержку самообучения. Для разработки подсистем и микросхем самообучающегося ИИ будут использоваться «большие данные» (*big data*), квантовые вычисления, распределенные вычисления и связь 5G [12].

**Большие данные** – это обозначение структурированных и неструктурированных данных огромных объёмов и значительного многообразия, эффективно обрабатываемых горизонтально масштабируемыми программными инструментами, появившимися в конце первого десятилетия 21 века и альтернативных традиционным системам управления базами данных [13].

Современные сотовые телефоны в соответствии со спецификациями глобальной системы мобильной связи (*Global System for Mobile Communications*) (*GSM*) работают в формате 4G на частотах в диапазоне (2,5 – 2,7) ГГц. В настоящее время принято решение о внедрении более мощной коммуникационной инфраструктуры под названием 5G с использованием частот в диапазоне от (3,0 – 28) ГГц и выше [1].

Как известно, человеческое мышление базируется на взаимодействии нейронов мозга, связи которых изменяются под влиянием жизненного опыта. Аналогично, алгоритмы систем и микросхем ИИ были разработаны на основе нейронных сетей, которые позволяют компьютерам или микропроцессорам обретать новые навыки, как это делают люди.

Существует несколько основных, базовых направлений в разработке систем и микросхем ИИ, но в настоящее время наиболее эффективными являются алгоритмы на основе [12]:

– **сверточной нейронной сети** (*convolutional neural network*) (*CNN*) прямой связи, представляющей собой однонаправленную (без обратных связей) многослойную сеть, которая отлично подходит для работы с такими данными, как изображения и видео, где данные размещены в виде сетки пикселей;

– **рекуррентной нейронной сети** (*recurrent neural network*) (*RNN*) обратной связи, в которой связи между элементами образуют направленную последовательность, что позволяет хорошо справляться с последовательными данными, такими как текст и аудио.

Реализация функций слуха, возможности говорить, зрения и прогнозирующей интуиции базируются на использовании обеих сетей *CNN* и *RNN*, а также технологии обработки естественного языка (*natural language processing*) (*NLP*), которые дополняют друг друга. Подобные технологии используются практически во всех интеллектуальных голосовых помощниках.

На рис. 1 показано, как визуально может выглядеть нейронная сеть, запрограммированная в микросхеме ИИ для определения и анализа цифр на видеоизображении [12]. А на рис. 2 наглядно приведены технологии глубокого обучения систем и микросхем для реализации искусственного интеллекта на основе обучающих алгоритмов [14].

В настоящее время существуют десятки программных платформ – **фреймворков** (от английского слова (*framework*)), определяющих структуру программной системы (программное обеспечения), и облегчающее разработку и объединение разных компонентов большого программного проекта [15].

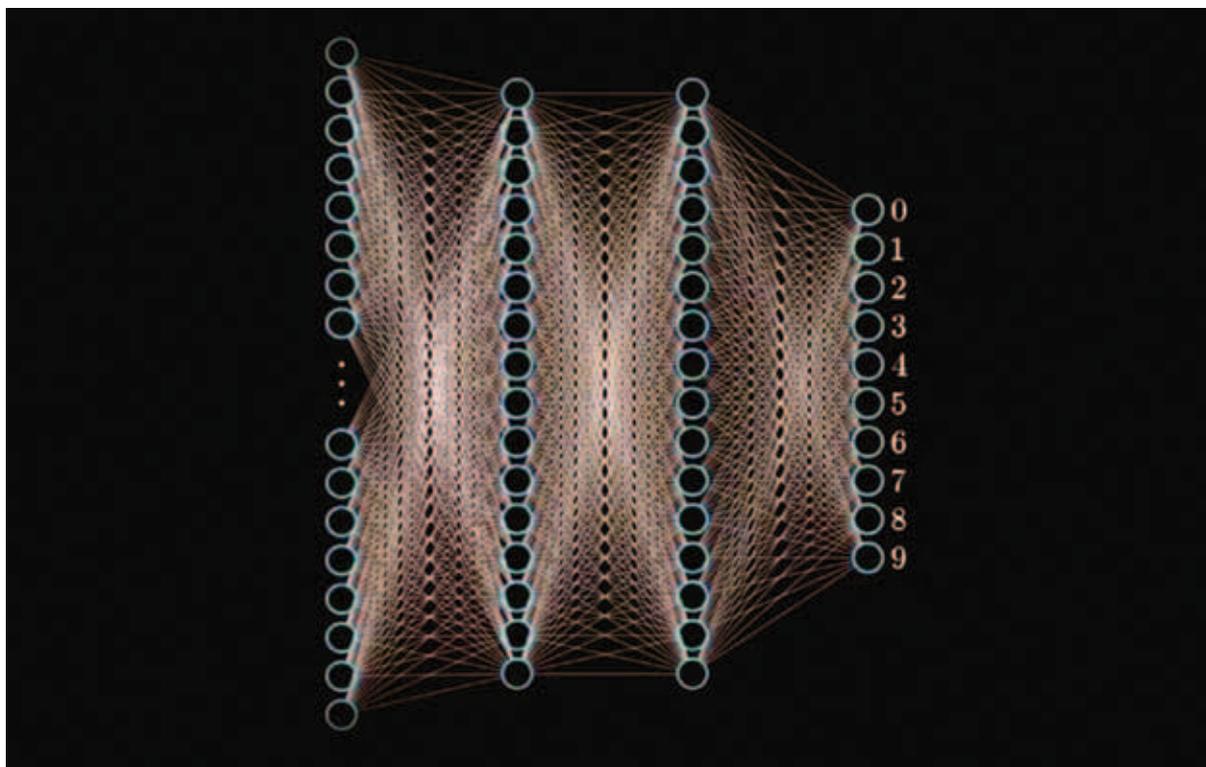


Рис. 1. Возможный визуальный вид нейронной сети, реализуемой в микросхеме искусственного интеллекта (ИИ) для определения и анализа цифр на видеоизображении [12].

К самым продвинутым программным платформам относятся: *KERAS*, *TENSORFLOW*, *SONNET*, *CNTK* (*Microsoft Cognitive Toolkit*), *PYTORCH* и *DL4J* (*Deeplearning4j*) [12].

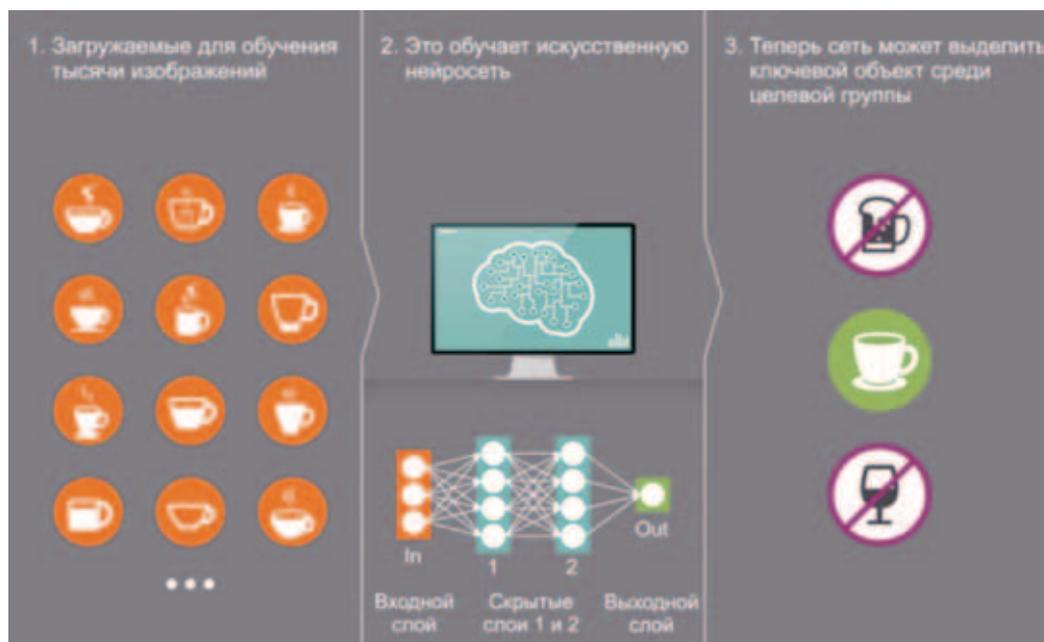


Рис. 2. Технологии глубокого обучения систем и микросхем для реализации искусственного интеллекта на основе обучающих алгоритмов [14].

Как уже отмечалось выше, системы и микросхемы искусственного интеллекта (ИИ) имеют неограниченный рынок использования в суперсистемах окружающего интеллекта (ОИ). В настоящее время среди наиболее продвинутых применений можно отметить: системы голосовых помощников, системы управления беспилотными средствами передвижения, системы распознавания лиц и поиска людей, системы балансировки нагрузки на транспортные магистрали и коммуникационные линии, системы языковых переводчиков, системы проверки плагиата и игровые системы.

Например, игровые шахматные системы ИИ в процессе обучения в течение нескольких недель анализируют миллионы сыгранных партий, и в настоящее время их не в состоянии обыграть в шахматы, ни один гроссмейстер в мире [12].

В традиционных микропроцессорах центральные процессорные устройства (ЦПУ) разрабатываются достаточно гибкими, чтобы поддерживать множество различных программ. Однако обучение системы искусственного интеллекта подразумевает многократное исполнение рутинных задач, требующих очень высокого потребления энергии. В то время как человеческий мозг в процессе обучения потребляет энергию мощностью (20 – 30) Вт, обучаемые системы искусственного интеллекта (ИИ) на традиционных микропроцессорах потребляют столько энергии, сколько было бы достаточно для обеспечения небольшого городка [14].

Для снижения уровня потребляемой мощности в системах ИИ используют графические процессорные устройства (ГПУ), которые разрабатывались для эффективного исполнения сложных математических функций. Чтобы

увеличить вычислительную мощность эти ГПУ можно использовать параллельно. Обработка информации современными ГПУ происходит существенно быстрее, чем традиционными ЦПУ, при практически той же потребляемой мощности.

На раннем этапе развития систем искусственного интеллекта на рынке доминировала компания *NVIDIA* (США). Ее суперкомпьютер DX1 на базе графических процессоров включал в себя 8 ГПУ *Tesla P100*, каждый из которых обладал вычислительной мощностью 21,2 ТФлопс и требовал для работы 3200 Вт мощности. Следует напомнить, что 1 ТФлопс – 1 ТераФлопс – 1 TeraFLOPS – 1 Tera(Floating-point Operations Per Second) =  $10^{12}$  Флопс – единица, используемая для измерения производительности микропроцессоров и компьютеров, показывающая, сколько операций с плавающей запятой в секунду выполняет данная вычислительная система [16].

Суперкомпьютеры DX1 при параллельной работе образуют эффективную нейронную сеть. На смену ГПУ пришли **нейронные процессоры** – микросхемы специального применения (*ASIC – application specific IC*), которые разрабатывались для систем искусственного интеллекта. **Нейронный процессор** (*Neural Processing Unit*) (*NPU*) или **ИИ-ускоритель** (*AI accelerator*) – это специализированный класс микропроцессоров и сопроцессоров, используемый для аппаратного ускорения работы алгоритмов искусственных нейронных сетей, компьютерного зрения, распознавания по голосу, машинного обучения и других методов искусственного интеллекта

В настоящее время к классу **нейронных процессоров** относятся разные по устройству и специализации типы микросхем, включающие: **нейроморфные процессоры**, **тензорные процессоры** и **процессоры машинного зрения**, которые позволяют повысить производительность компьютеров без значительного увеличения мощности [17].

Способность воспринимать является основной в процессе обучения систем ИИ. Подсоединенные к центральному серверу искусственного интеллекта маломощные датчики являются «глазами», «ушами», «носами», «языками» и «руками» нейросети. Специалисты оценивают, что количество подключенных к сети датчиков к концу 2020 году превысит 50 млрд. шт. [14].

В настоящее время разработками и изготовлением систем и микросхем ИИ и нейротехнологий занимаются более 50-ти компаний в мире, среди которых такие гиганты, как Google, Apple, Amazon, IBM, Intel, Facebook и Microsoft. Если учитывать мировой рынок искусственного интеллекта и нейротехнологий в целом – с учетом внутренних разработок компаний, – то в 2018 г. составил 396 млрд \$, а к 2024 г. он увеличится до 890 млрд \$. Аналогичным образом, размер мирового рынка нейротехнологий в целом в 2018 г. составил 7 млрд \$, к 2024 г. увеличится до 35 млрд \$ [18].

Интерес к системам искусственного интеллекта и нейротехнологий повышает спрос на специализированные микросхемы (*ASIC*). Те компании, которые не способны разрабатывать такие продукты самостоятельно, обращаются к контрактным специалистам. Например, *Global Unichip*, *A1chip* и *Faraday Technology* так загружены заказами, что даже вынуждены отказываться новым клиентам, пока не будет увеличен штат разработчиков под новые объёмы спроса. Заказы на разработку *ASIC* ИИ поступают от зарубежных клиентов и тайваньской компании *MediaTek*, которая широкой публике известна преимущественно своими процессорами для мобильных устройств [19].

Микросхемы *NDP100* компании *Syantiant*, изготавливаемые с использованием уровня технологии (УТ) 40 нм, подключаются напрямую к цифровым микрофонам или другим датчикам, активируя бездействующую систему, просыпающуюся после прослушивания таких слов, как «*Alexa*», «*Google*» или других голосовых команд. Микросхемы можно запрограммировать на непрерывное прослушивание 64 пробуждающих слов или специфических звуков, таких как разбитие стекла или плач ребенка. Как только система просыпается, микросхемы предупреждают ее о том, что было захвачено микрофоном. В случае если система не пробуждается немедленно, микросхемы, маленькие как нос Авраама Линкольна на одноцентовой монете (рис. 3), записывают в своей 112-килобайтной памяти три секунды звука [20].

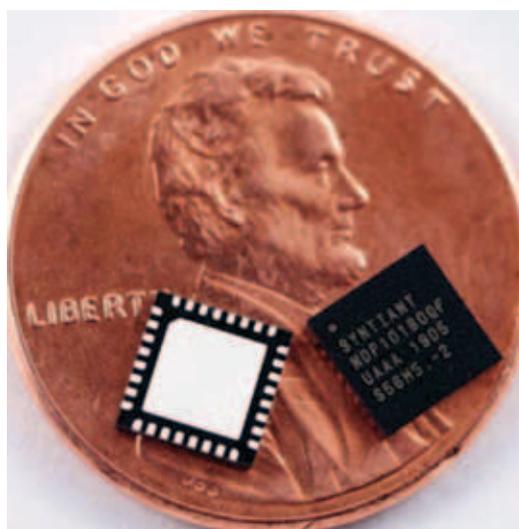


Рис. 3. Специализированная микросхема искусственного интеллекта *NDP100* компании *Syantiant* по сравнению с одноцентовой монетой [20].

Российский рынок ИИ в целом в 2018 г. составил 189 млрд руб., к 2024 г. он увеличится до 907 млрд руб. Данный показатель включает в себя выручку компаний в сфере искусственного интеллекта, выручку прочих ИТ-компаний, которые разрабатывают продукты благодаря ИИ, и прирост вы-

ручки компаний из различных отраслей экономики, который был получен благодаря искусственному интеллекту). Аналогичным образом, российский рынок нейротехнологий в целом в 2018 г. составил 45 млрд руб., в 2024 г. он вырастет до 65 млрд руб. [18].

В табл. 1 приведены уровни востребованности ряда технологий искусственного интеллекта по секторам, сферам и направлениям развития мировой экономики на 2019 год [18].

**Уровни востребованности ряда технологий искусственного интеллекта (ИИ) по секторам, сферам и направлениям развития мировой экономики на 2019 год.**

Таблица 1

Наименование технологии искусственного интеллекта (ИИ)	Рыночные сектора	Инфраструктурные сектора	Социальная сфера	Госуправление и безопасность
Компьютерное зрение	Высокий	Высокий	Средний	Средний
Обработка естественного языка	Высокий	Средний	Средний	Средний
Распознавание и синтез речи	Высокий	Средний	Средний	Средний
Рекомендательные и интеллектуальные системы поддержки и принятия решений	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий
Перспективные методы развития технологий ИИ	Средний	Низкий	Низкий	Низкий
Нейростимуляция и нейросенсинг	Средний	Низкий	Высокий	Низкий
Нейропротезирование и нейроинтерфейсы	Высокий	Низкий	Высокий	Средний

На рис. 4 приведено количество образованных компаний (*startup company*) по разработке и изготовлению систем и микросхем искусственного интеллекта (ИИ) за последние шесть лет с первоначальным капиталом более 1 млрд \$ [21].

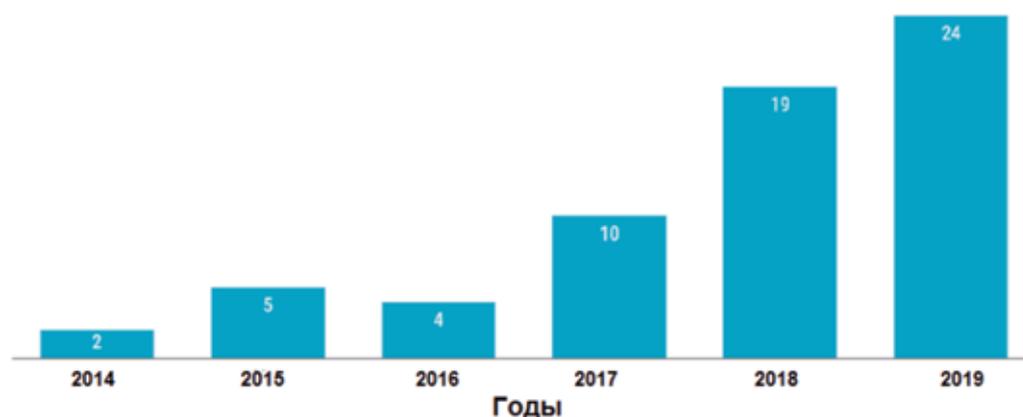
**Количество образованных компаний по разработке и изготовлению систем и микросхем искусственного интеллекта с первоначальным капиталом более 1 млрд \$**

Рис. 4. Количество образованных компаний по разработке систем и микросхем искусственного интеллекта с первоначальным капиталом более 1 млрд \$ [21].

В 2019 году среди отраслей инвестиций в образованные компании лидирует здравоохранение, в которое вложено 4 млрд \$, далее следуют финансы (2,2 млрд \$) и розничная торговля (1,5 млрд \$) \$ [21].

В конце декабря 2019 года Стэнфордский университет обнародовал результаты исследования, проведенного совместно с *McKinsey&Company*, *Google*, *PwC*, *OpenAI*, *Genpact* и *AI21Labs*, согласно которому вычислительная мощность систем искусственного интеллекта (ИИ) уже более семи лет опережает закон Мура (*Moore's Law*). Отчет группы исследователей показал, что вычислительная мощность систем ИИ растет быстрее, чем мощность традиционных процессоров. Переломным моментом, когда скорость развития искусственного интеллекта стала опережать закон Мура, оказался 2012 год.

Исследователи изучали, как алгоритмы ИИ улучшались с течением времени, отслеживая прогресс программы идентификации изображений *ImageNet*. Учитывая, что методы классификации изображений в значительной степени основаны на контролируемых методах машинного обучения (*Machine Learning*), авторы отчета рассмотрели, сколько времени требуется для обучения модели ИИ и связанные с этим затраты.

Исследование показало, что за 18 месяцев время, необходимое для обучения сети на облачной инфраструктуре, сократилось с трех часов в октябре 2017 года до 88 секунд в июле 2019 года. Авторы отчета использовали модель *ResNet*, чтобы оценить, сколько времени требуется алгоритмам классификации изображений для достижения высокого уровня точности. В октябре 2017 года для достижения точности выше 93% требовалось 13 дней обучения, что обходилось разработчикам в \$2323. Последний эталонный тест, доступный на платформе *Stanford DAWNbench* в сентябре 2018 года с

точностью классификации изображений чуть выше 93%, стоил чуть более \$12 [21].

### 3. Доверенные интеллектуальные сенсорные системы.

Как отмечалось в разделе 2 доверенные интеллектуальные сенсорные системы (ДИСС) (*trusted smart sensor systems*), являются одними из основных систем суперсистемы окружающего интеллекта, т.к. они осуществляют сбор данных об окружающей среде, без которого невозможно построение суперсистемы окружающего интеллекта. Для создания систем сбора данных об окружающей среде необходимо интегрировать микропроцессоры и датчики в повседневные бытовые устройства, чтобы сделать их интеллектуальными. Тогда устройства смогут собирать информацию об окружающей среде, обмениваться данными друг с другом и взаимодействовать с человеком [22]. На рис. 5 приведен состав и структура доверенной интеллектуальной сенсорной системы.

Доверенность, т.е. защита принимаемой, обрабатываемой и передаваемой информации от внешних воздействий и угроз осуществляется устройствами специальной кодировки и декодировки принимаемых и передаваемых сигналов в подсистеме связи.



Рис. 5. Состав и структура доверенной интеллектуальной сенсорной системы: сенсорная подсистема (набор датчиков одинаковых или различных физических величин); подсистема управления на основе специализированной микросхемы с опцией искусственного интеллекта (возможности обучения); исполнительная подсистема на основе МЭМС-механизмов; подсистема защищенной беспроводной связи; подсистема источников питания.

Интеллектуальность обеспечивается использованием в подсистеме управления специализированной микросхемы – микропроцессора с опцией искусственного интеллекта, т.е. с возможностью обучения в процессе работы.

Сенсорные и исполнительные подсистемы в ДИСС обычно реализуются с помощью устройств на основе микроэлектромеханических и микрооптоэлектромеханических систем (МЭМС и МОЭМС). В качестве источников питания используются аккумуляторные батареи большой емкости с опцией как обычной, так и дистанционной перезарядки.

В доверенных интеллектуальных сенсорных системах уже нашли применение семь инструментов с искусственным интеллектом (ИИ). Это системы на основе [22]:

- баз знаний (свода правил, набора ситуаций);
- нечеткой логики;
- технологии автоматического сбора знаний;
- нейронных сетей;
- генетических алгоритмов;
- отработанных ситуаций;
- технология внешнего интеллекта.

Доверенные интеллектуальные сенсорные системы с указанными инструментами ИИ используются, в первую очередь, в таких областях, где требуется сбор и обработка показаний датчиков, например: на сборочных линиях; в биодатчиках; при моделировании строительных объектов; в системах машинного зрения; при управлении режущими инструментами; при моделировании условий окружающей среды; при измерении силы; при мониторинге здоровья; при взаимодействии человека и машины; при использовании Интернета; при лазерном измельчении; обслуживании и инспекции оборудования; в системах-помощниках; в робототехнике; в сетях датчиков; в системах дистанционного управления.

**ДИСС на основе баз знаний или экспертные системы**, являются компьютерными программами, содержащими знания, которые требуются для выполнения поставленной задачи. Экспертная система обычно состоит из двух элементов: базы знаний и механизма принятия решений. Механизм принятия решений вырабатывает алгоритм выполнения поставленной задачи на основе имеющихся знаний. Среди методов манипуляции с данными – использование наследований и ограничений (в пакетно– и объектно-ориентированных экспертных системах), применение правил принятия решений (в системах на основе свода правил) в соответствии с процедурами управления (последовательная прямая или обратная передача) и стратегии поиска (выбор очередности – по глубине или ширине). К этому же классу доверенных интеллектуальных сенсорных систем относятся **ДИСС на основе отработанных ситуаций**, реализующая выделение и адаптацию исследуемых ситуаций.

Недостатком экспертных систем на основе свода правил и ситуаций является то, что они не могут справляться с абсолютно новыми ситуациями, не

похожими на ситуации, имеющиеся в базе. При встрече с неизвестной проблемой они ломаются, а не теряют быстродействие, как эксперты-люди. В таких случаях используются **ДИСС на основе нечеткой логики (нечеткие экспертные системы)**, базирующихся на математической теории нечетких массивов и имитирующих человеческое мышление. Люди легко принимают решения в сомнительных ситуациях, в то время как для машин это очень сложно. Нечеткие экспертные системы применяются, когда нельзя строго описать правила. Эти системы не имеют способности обучаться. Значения параметров предустановлены и не могут быть изменены. Нечеткие системы с успехом используются в мобильных и взаимодействующих роботах, системах предсказания детектируемых датчиком свойств, системах управления цепью поставок, при сварке.

Получение знаний для записи в базу может быть непростой процедурой и занимать много времени. Это создает препятствия при создании экспертной системы. Для решения данной проблемы созданы алгоритмы автоматического сбора знаний, которые применяются в **ДИСС на основе технологии автоматического сбора знаний**. Требование представления набора примеров в жестко заданном формате с известными атрибутами известных классов совпадает с требованиями сенсорных систем и сетей, поэтому автоматическое обучение широко используется в системах датчиков. Наиболее яркими примерами реализации ДИСС на основе технологии автоматического сбора знаний являются лазерная резка, обнаружение мин, робототехника.

**ДИСС на основе нейронных сетей** имеют высокую способность обобщения по сравнению с нечеткими экспертными системами. Нейронные сети – это численная модель мозга. Они предполагают, что вычисления распределены на нескольких простых узлах, называемых нейронами, которые взаимосвязаны и работают совместно. Нейронные сети иногда называют параллельно-распределенными или коннекционными. Точные знания заносятся в нейронную сеть путем тренировки. Среди недавно появившихся областей применения ДИСС на основе нейронных сетей следует отметить распознавание черт людских лиц, теплообменники, инспекцию паяных соединений, оптимизацию параметров точечной сварки, питание, сенсорные дисплеи, сенсорные транспортные системы [22, 23].

**ДИСС на основе генетических алгоритмов** позволяет найти глобальный оптимум в сложной среде с большим количеством параметров без использования специфических знаний о проблеме, которую предстоит решить. Генетический алгоритм – это вероятностная процедура оптимизации, созданная на основе эволюции в природе. Генетические алгоритмы нашли применение в ДИСС, таких как сборка, настройка линии сборки, диагностика ошибок, мониторинг здоровья, управление питанием.

**ДИСС на основе внешнего интеллекта** призвана облегчить работу человека в цифровой среде, в которой электронные устройства предсказывают его поведение и реагируют на его присутствие. Данная концепция обеспечивает адаптированное взаимодействие человека и сенсорной системы. Использование внешнего интеллекта пока ограничено, что связано с постоянно продолжающимися разработками новых, более интеллектуальных и более развитых интерактивных систем [22].

В современных условиях особое значение приобретают не только чисто технические характеристики ДИСС, такие как уровень реальной производительности решения конкретных прикладных задач, обеспечение информационной безопасности, энергопотребление и другие. Но и их эксплуатационно-экономические параметры – стоимость изготовления и эксплуатации, владение технологией изготовления, возможности «эволюционной» модернизации, масштабирование и т.д.

Достижение технико-экономической эффективности использования ДИСС требует перехода на технологическое направление «Больше чем Мур» (*More than Moore*), в основе которого лежат процессы гетерогенной трехмерной (объемной) интеграции наборов микросхем логики и памяти, микро– и наносенсоров, микро– и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС) и других цифровых и аналоговых информационно-коммуникационных устройств, изготовленных по разным технологиям на различных фабриках [23].

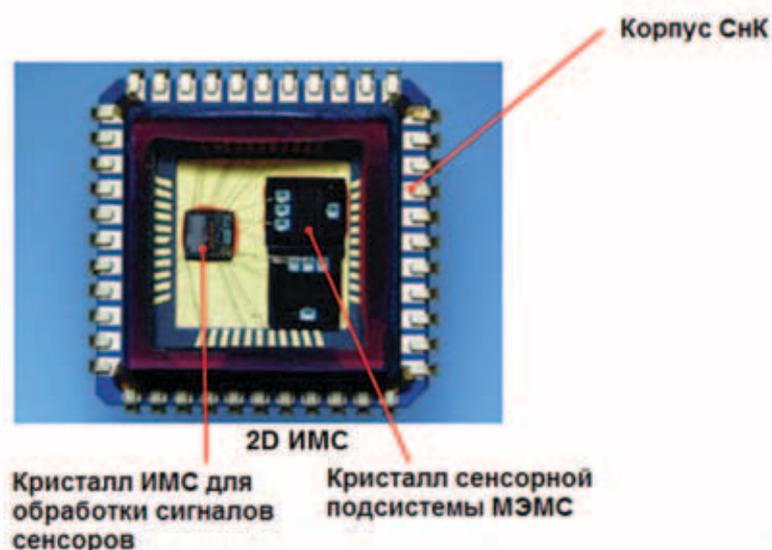
Роль **доверенных интеллектуальных сенсорных систем** непрерывно возрастает, и их создание превратилось в **новое направление технического развития человеческого общества**, которое называется «**сенсоризация**». Оно составляет содержание третьей промышленной революции, и на основе результатов двух первых – механизации и информатизации, по прогнозам многих ученых должна завершиться полной **автоматизацией и роботизацией человеческого общества** [24].

#### **4. Гетерогенная интеграция микросхем и микроэлектронных систем.**

Необходимость производства специализированных функционально законченных систем для мобильных продуктов микроэлектроники, таких как смартфоны, планшеты и носимые устройства, привело к появлению многокристальных модулей (МКМ) (*multichip module – MCM*) или интегральных микросхем (ИМС) типа «система на кристалле» (СнК) (*system-on-chip – SoC*). СнК интегрирует кристаллы микросхем с различными функциями в единый чип, установленный в одном корпусе, для реализации специализированной функционально законченной системы или подсистемы, например микропроцессора, устройства памяти или сенсорной микроэлектромеханической

системы (МЭМС) (*microelectromechanical system – MEMS*), как показано на рис. 6 [3, 25].

При этом оптимальным вариантом считается изготовление системы на кристалле на одной кремниевой пластине (подложке), когда большую часть соединений кристаллов можно выполнить на подложке, а не через связи кристаллов через выводы корпуса на печатной (монтажной) плате (*printed circuit board = PCB*), что позволяет значительно повысить быстродействие системы [7].



Заменить картинку

Рис. 6. Система на кристалле (СнК), состоящая из двух кристаллов микросхем: сенсорной, генерирующей сигналы датчиков, и логической, обрабатывающей эти сигналы [3].

Однако если учитывать рост стоимости микросхем с повышением уровня технологии (УТ) (с уменьшением размера технологической нормы), сложность и дороговизну проектирования и тестирования таких системных кристаллов. А также трудности технологического совмещения низковольтных логических блоков и высоковольтных блоков памяти, не позволяющие использовать самые передовые УТ для всех блоков, входящих в систему, то этот путь уже не покажется идеальным.

Более перспективным считается направление, объединяющее различные кристаллы, сделанные по предельным УТ на оптимальных подложках, в столбчатый модуль, размещаемый в одном корпусе, так называемая микросхема типа «система в корпусе» (СвК) (*system-in-a-package – SiP*). СвК использует упаковочные технологии с использованием сквозных контактов через кремниевую пластину (*through-silicon via – TSV*) и промежуточной платы электрического интерфейса, называемого интерпозером (*interposer*), позволяющих адаптировать и перенаправлять электрические соединения для ин-

теграции разнородных кристаллов, МЭМС, фотонных или других устройств или компонентов, либо бок о бок, либо в столбик или совместно (рис. 7) [26].

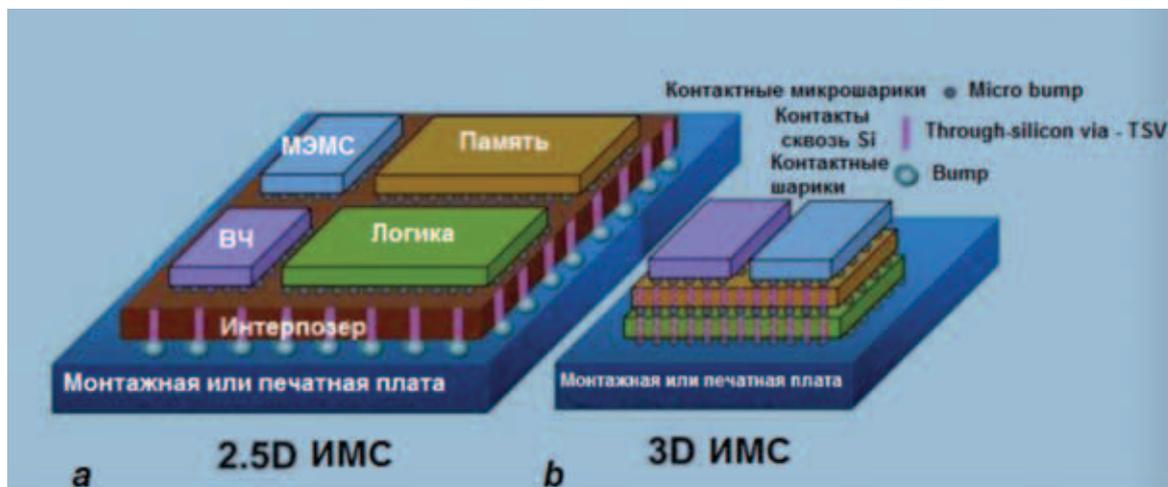


Рис. 7. Два основных типа технологий СвК (*SiP*): *a* – решение на основе интерпозера – вставляемой платы для адаптации и разводки электрических соединений; *b* – решение с более высокой плотностью упаковки 3D-штабелированных кристаллов за счет вертикальных сквозных межсоединений через кремниевые кристаллы (*through-silicon vias – TSV*) [26].

Технология 2.5D ИМС была так названа, поскольку кристаллы микросхем и микроэлектронных приборов располагаются на подложке в один слой, а интерпозер может быть многослойным, то есть в нем реализуется трехмерная структура межсоединений (рис. 7,*a*). От 2.5 D сборки ИМС всего один шаг до их 3D сборки, который обеспечивается применением того же интерпозера, и, на первый взгляд, все выглядит достаточно просто – нужно сложить подложки с сформированными на них кристаллами в стек (стопку) (*stack*), и обеспечить соединение между ними (рис. 7,*b*). В действительности же, одной из ключевых становится проблема теплоотвода, которая решается размещением теплопроводящих слоев, а геометрически все разнообразие технологических решений сводится к вертикальной сборке чипов (кристаллов) в стек (*chip stacking*), где существует много способов соединения между слоями кристаллов.

Причем кристаллы для технологии СвК могут быть спроектированы разными фирмами разработчиками без собственных производственных мощностей (*fabless*), изготовлены на различных кремниевых фабриках (*foundry*) с использованием пластин разных материалов и диаметров, иметь разные размеры и функциональные особенности [25].

В настоящее время существует широкий спектр современных изделий, использующих технологии 3D-микрочипирования и микросборки с вертикально расположенными кристаллами, или, иными словами, «системы в корпусе». Эти технологии можно упрощенно классифицировать по трем основным группам (рис. 8) [27]:

1. Многокристальные модули с кристаллами, расположенными один на другом (*stacked chips or dies*), и организацией межсоединений проволочными выводами.

2. Многоэтажные корпуса система корпус на корпусе (КнК) (*package-on package – PoP*) с организацией межсоединений с помощью шариковых выводов или так называемых «бампов» (*bumps*).

3. Многокристальные модули, с кристаллами, расположенными один на другом, использующие для организации межсоединений технологии создания переходных отверстий в материале самих полупроводниковых кристаллов (*through silicon vias – TSV*) и контактные микрошариковые выводы (*micro bumps*) или контактные микроплощадки (*contact micropad*) для контактов.

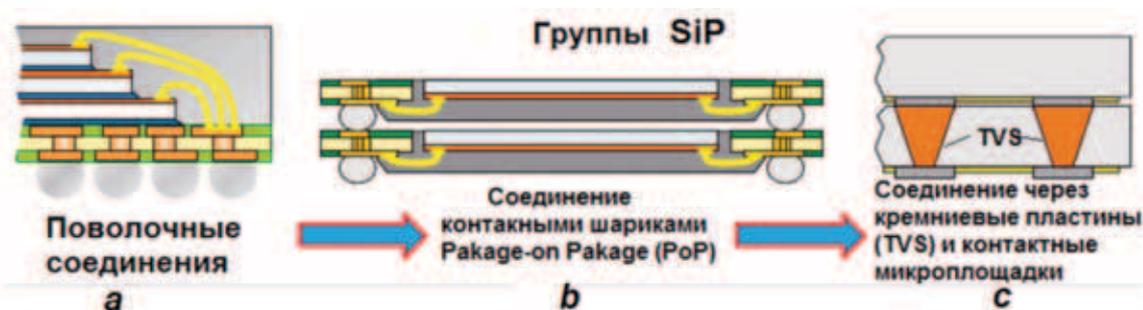


Рис. 8. Группы технологий микросборок вертикально расположенных кристаллов по базовому направлению кристалл в корпусе (КвК) (*SiP*): **a** – сборка с помощью проволочных соединений и контактных шариков; **b** – сборка кристаллов в корпусах с помощью контактных шариков (система «корпус на корпусе» – КнК) (*package-on package – PoP*); **c** – сборка с помощью межсоединений через переходные отверстия в материале самих полупроводниковых кристаллов (*through silicon vias – TSV*) и контактных микроплощадок.

Технологии гетерогенной интеграции (ГИ) (*heterogeneous integration – HI*) очень похожи на технологии система в корпусе (*SiP*), за исключением того, технологии ГИ адаптированы: для микросборки более тонких кристаллов; с большим количеством выводов (входов/выходов) (*inputs/outputs – I/O's*); более высокого уровня плотности элементов и производительности (совершенства, быстродействия) [25].

В настоящее время, кроме приведенных выше модернизированных СвК (*SiP*) технологий реализованы следующие технологии гетерогенной интеграции:

- гетерогенная интеграция на органических подложках;
- гетерогенной интеграции на керамических подложках;
- гетерогенной интеграции на кремниевых подложках с межсоединениями через сквозные отверстия (*through silicon vias – TSV*) в промежуточных кремниевых вставках – интерпозерах (*interposers*);
- гетерогенной интеграции на кремниевых подложках со вставками интерпозерами (*interposers*) без межсоединений через сквозные отверстия (*TSV*), а в виде мостов;

- гетерогенной интеграции на разветвленных подложках (*substrates with redistribution layer – RDL substrates*);
- гетерогенная интеграция на уровне пластин или панелей (*fan-out wafer/panel-level packaging – FOW/PLP*) путем формирования на их поверхности соединений с использованием разветвленных слоев (*redistribution layer – RDL*);
- гетерогенная интеграция КМОП-датчиков изображения (*CMOS image sensor – CIS*), светоизлучающих диодов (*light emitted diode – LED*), микроэлектромеханических систем (МЭМС) (*microelectromechanical systems – MEMS*), лазеров поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором (*vertical cavity surface emitting laser – VCSEL*) и фотодиодов (*photodiode – PD*) с устройствами логики, памяти и блоками питания имеет свои конкретные особенности, связанные с необходимостью обеспечения оптимального функционирования систем (рис. 9) [25].

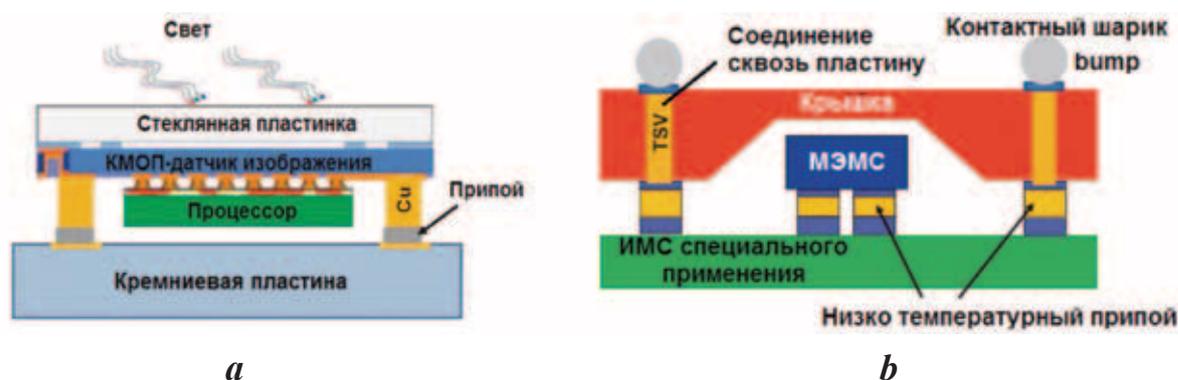


Рис. 9. Гетерогенная интеграция интегральных микросхем (ИМС) и различных микроэлектронных устройств и систем: *a* – 3D-микросборка микропроцессора размером (3,4×3,5) мм со 164 входами/выходами и КМОП-датчика изображения размером (5,0×4,4) мм с 80 входами/выходами; *b* – 3D-микросборка ИМС специального применения и микроэлектромеханической системы (МЭМС), расположенной под герметической кремниевой крышкой [25].

На рис. 10 показаны диапазоны применения гетерогенных интеграций на различных подложках в зависимости от количества выводов и площади кристалла 3D микросборок [25].

Как видно на рис. 10:

- гетерогенная интеграция на кремниевых подложках с TSV-интерпозерами может иметь наибольшее количество контактов >100000 штук, но самый большой размер кристалла пока ограничен площадью 1200 мм<sup>2</sup>;
- при гетерогенной интеграции на кремниевых подложках с интерпозерами без TSV (на мостиках) количество контактов может составлять до 4000 штук, а площадь кристалла – до 1200 мм<sup>2</sup>;

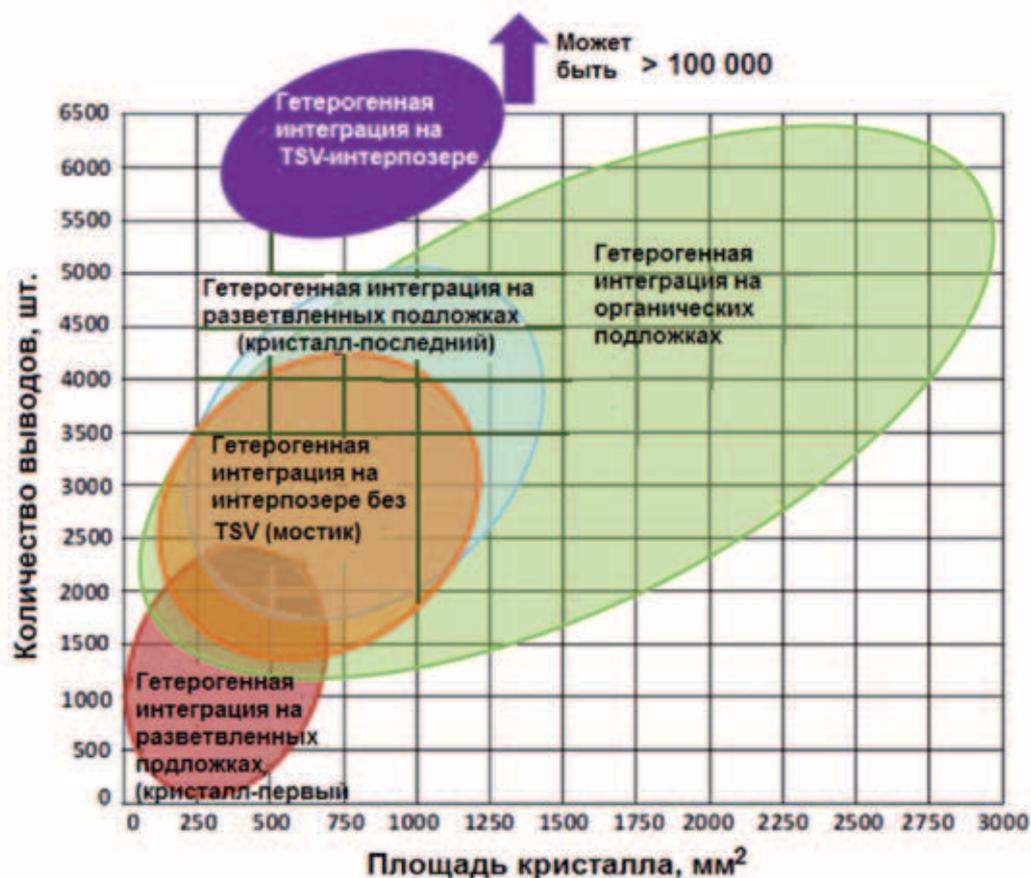


Рис. 10. Диапазоны применения гетерогенных интеграций на различных подложках в зависимости от количества выводов и площади кристалла [25].

– гетерогенная интеграция на разветвленных подложках с перераспределительным слоем (*FO RDL*) при монтаже кристалла первым (*chip-first*) может иметь количество контактов до 2500 штук и площадь кристалла (подложки) до 625 мм<sup>2</sup>;

– гетерогенная интеграция на разветвленных подложках с перераспределительным слоем (*FO RDL*) при монтаже кристалла последним (*chip-last*) может иметь количество контактов до 5000 штук и площадь кристалла (подложки) до 1400мм<sup>2</sup>;

– при гетерогенной интеграции на органических подложках количество контактов может составлять до 6000 штук, а площадь кристалла – до 3000 мм<sup>2</sup>.

Таким образом, технология 3D гетерогенной интеграции различных микросхем и микроэлектронных приборов в единые системы является наиболее перспективным путем дальнейшего развития технологии микроэлектроники в рамках направления «Больше чем Мур» (*More than Moore*) [1].

По сути, эта технология является повторением старой технологии монтажа отдельных (дискретных) компонентов – электровакуумных приборов, полупроводниковых транзисторов и диодов, резисторов, емкостей,

индуктивностей и т.д. в единые системные приборные блоки. Единственный убедительный ответ на вопрос: «почему до сих пор не налажено производство, интегрирующее микросхемы и другие микроэлектронные системы и устройства на одном кристалле» заключается в том, что **пока не создана приемлемая для массового производства универсальная технология 3D сборки полупроводниковых кристаллов на общей полупроводниковой подложке в рамках гетерогенной интеграции.**

Кроме того, выпускаемые кристаллы должны быть приспособлены для 3D сборки. Поэтому кремниевые кристаллы, разработанные в последние два года ведущими компаниями и кремниевыми фабриками и адаптированные на технологию 3D сборки в рамках гетерогенной интеграции в общую микросхему или микроэлектронную систему, назвали «чиплетами» (*chipllets*) или «микрочипами» (*micro chips*). Такое название необходимо, для того чтобы отличать их от традиционных кристаллов (чипов), предназначенных для монтажа на печатную плату (PCB) [28].

По сути, технология 3D гетерогенной интеграции на основе чиплетов (*chipllets*) – это набор нужных компонентов, размещённых не на печатной плате (PCB), а объединённых в один кристалл (чип). Идея состоит в том, чтобы максимально минимизировать количество промежуточных соединений между центральным и графическим процессорами, оперативной и постоянной памятью, а также другими элементами. Это позволяет, с одной стороны, снизить помехи и повысить быстродействие, а с другой – повысить вычислительную мощность и гибкость при создании кристаллов (чипов) [29].

Чиплеты предполагают замену единого кристалла кремния набором более мелких модулей, которые взаимодействуют друг с другом внутри унифицированного корпуса. Такой подход позволяет значительно увеличить число транзисторов по сравнению с монолитным микрочипом, т.е. превысить показатели в соответствии с законом Мура, а главное, упростить конструкцию и снизить себестоимость микросхем и микроэлектронных систем, производимых по технологии 3D гетерогенной интеграции с помощью чиплетов. По оценкам аналитиков компании *Omdia*, глобальный рынок кристаллов, в производстве которых используются чиплеты, в период с 2018-го по 2024 год должен вырасти в девять раз, с 645 млн \$ до 5,8 млрд \$ [30].

Чиплеты активно берут на вооружение производители наиболее продвинутых полупроводниковых устройств с высокой степенью интеграции: микропроцессоров, много модульных систем на кристалле, графических процессоров и программируемых логических матриц (*field--programmable gate array – FPGA*). Сегмент микропроцессоров представляет собой крупнейший для чиплетов рынок с различными типами продуктов. Ожидается,

что оборот глобального рынка микропроцессоров с чиплетами увеличится с 452 млн \$ в 2018 году до 2,4 млрд \$ в 2024-м [30].

Основными новаторами, проектирующими передовые микросхемы и микроэлектронные системы по технологиям 3D гетерогенной интеграции на чиплетах в собственном корпусе, стали крупнейшие производители микропроцессоров Intel и AMD. Они возглавляют открытую инициативу *Open Compute Project (OCP)*, в рамках которой реализуется проект *Open Domain-Specific Architecture: (ODSA)* по разработке стандартов и технологий, помогающих внедрять передовые стратегии размещения элементов в едином корпусе.

Ожидается, что со временем продажи чиплетов будут значительно расти, и к 2035 году их объем достигнет 57 млрд \$. Большая часть этого роста будет осуществляться за счет чиплетов, используемых при производстве микросхем и микроэлектронных систем по технологиям 3D гетерогенной интеграции, которые сочетают в себе различные элементы: обычные и графические процессоры, кристаллы (чипы) безопасности, МЭМС-приборы, системы сенсоров и исполнительных механизмов с пониженным энергопотреблением и т.д. [30].

Оптимальное деление (секционирование) и проектирование сложных гетерогенных интеграционных систем на чиплетах невозможно без использования специализированных программно-аппаратных комплексов автоматизации электронного проектирования (*electronic design automation – EDA*). С использованием такого комплекса компании *UCSB* и *AMD* разработали высокопроизводительную гетерогенную интеграционную систему на чиплетах.

Эта система включает в себя: чиплеты центрального микропроцессорного устройства (ЦПУ) (*central processing unit – CPU*) и несколько чиплетов графических микропроцессоров (*graphics processor unit – GPU*), а также стеки (стопки) устройств памяти с высокой пропускной способностью (*high bandwidth memories – HBMs*), расположенных на активных TSV интерпозерах с перераспределительными слоями (рис. 11) [25].

Как показано в разделах 2 и 3, область окружающего интеллекта (ОИ) очень тесно связана с повсеместными и распределенными вычислениями, а также с пониманием контекста и ориентированным на человека дизайном взаимодействия с компьютером. Причем компьютеры для областей окружающего и искусственного интеллекта, а также для входящих в эти области доверенных интеллектуальных сенсорных систем (ДИСС) будут иметь вид представленный на рис. 12 [31].

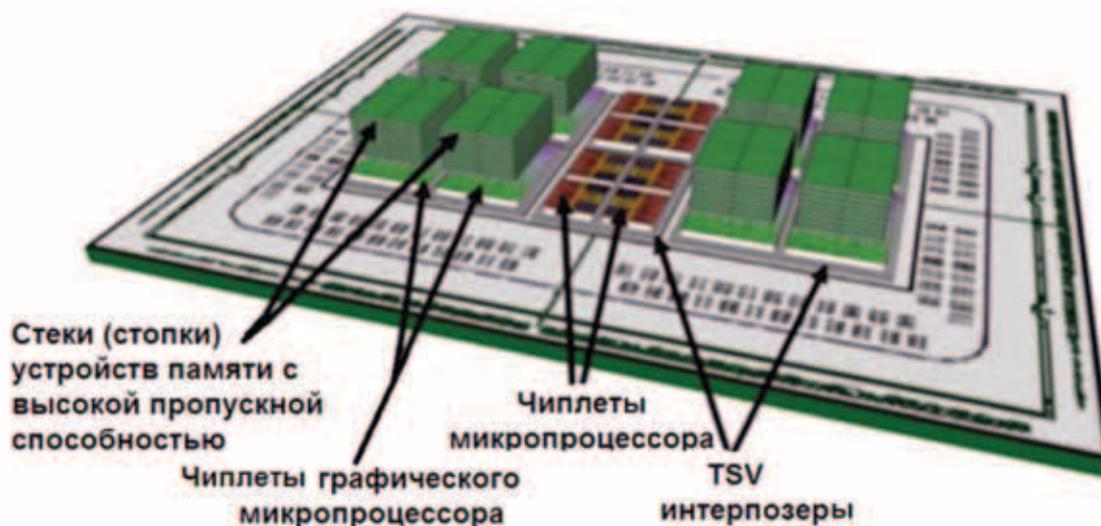


Рис. 11. Высокпроизводительное вычислительное устройство, изготовленное по технологиям 3D гетерогенной интеграции с применением чиплетов и активных TSV интерпозеров. Активный TSV интерпозер, в отличие от пассивного, имеет возможность автоматически переключать коммутацию распределительных межсоединений [25].



Рис. 12. Блок-схема компьютера для систем окружающего и искусственного интеллекта, а также доверенных интеллектуальных сенсорных систем (ДИСС) [31].

Таким образом, технологии направления «Больше чем Мур» (*More than Moore*), которая, согласно прогнозу специалистов [1], займет место основной технологии микроэлектроники в ближайшие тридцать лет. И эта технология должна иметь дело с тонкими (50 мкм и менее) кристаллами и пластинами кремния – фактически мембранами, в которых будут сформированы сотни сквозных отверстий диаметром (2 мкм и менее) с металлическими межсоединениями и контактами.

Кроме того, для производства сенсорных и исполнительных устройств на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) часто будут использоваться три мембранные кремниевые технологии на основе [3]:

– высокоселективных изотропных процессов жидкостного химического травления (ЖХТ);

– высокоселективных анизотропных процессов глубинного реактивного ионно-плазменного травления отверстий (РИПТ) с последовательно чередующимися за счет изменения состава газовой среды стадиями травления кремния и осаждения маскирующего покрытия на боковую стенку отверстия, так называемое Бош-травление (рис. 14) [32];

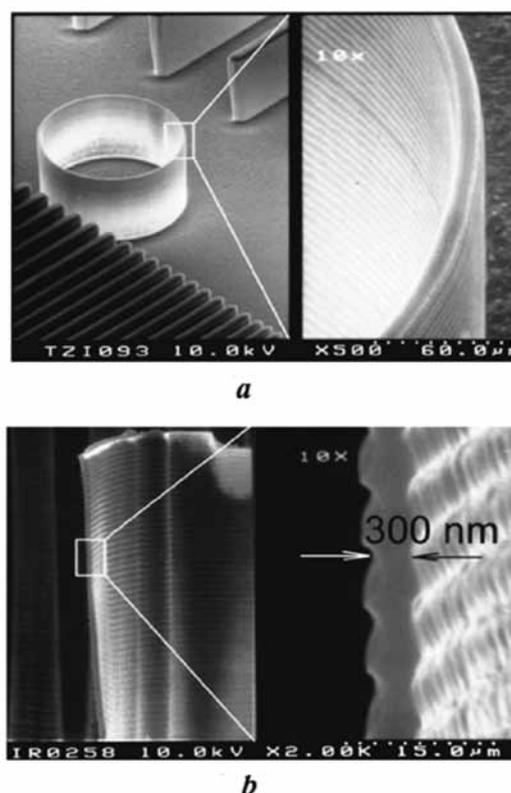


Рис. 14. Изготовление тонкостенных (мембранных) элементов МЭМС с аспектным отношением 137 с помощью Бош-технологии (глубинного реактивного ионно-плазменного травления монокремния с переключением газов с  $\text{SF}_6/\text{Ar}$  на  $\text{CHF}_3/\text{CH}_4$  соответственно на стадиях травления и осаждения): *a* – фото на электронном микроскопе цилиндрического элемента МЭМС; *b* – детальное изображение поперечного сечения этого элемента (видны неровности боковой стенки, отражающие последовательность стадий травления и осаждения) [32].

Осаждение функциональных и служебных (жертвенных) слоев с последующим высокоселективным изотропным жидкостным, газовым или плазмохимическим удалением служебных слоев, лежащих под функциональными слоями с уже сформированной топологией. Такая технология изготовления МЭМС, разработанная первоначально для пленочных ИМС, получила название технологии на **основе метода поверхностного пленочного (последовательного) формирования структур**, также позволяет получать мембранные элементы (рис. 15) [32].

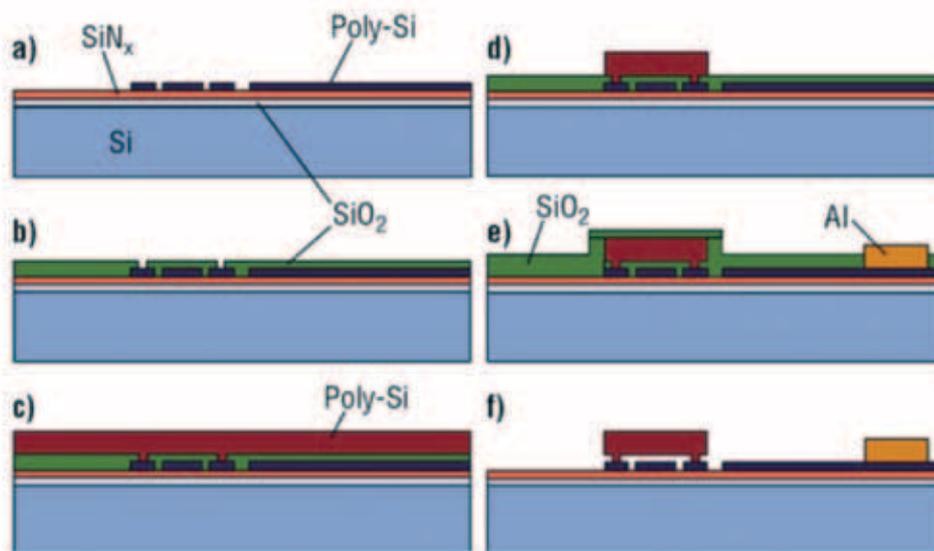


Рис. 15. Технологический процесс изготовления на кремниевой пластине резонаторной подсистемы МЭМС на основе метода поверхностного пленочного (последовательного) формирования структур: **a)** формирование топологии в слое поликремния (*poly-Si*), осажденного на структуру *Si-SiO<sub>2</sub>-SiN<sub>x</sub>*; **b)** осаждение служебного (жертвенного) (*sacrificial*) (в последующем удаляемого) слоя *SiO<sub>2</sub>* и формирование в нем топологии; **c)** осаждение верхнего слоя поликремния (*poly-Si*); **d)** формирование топологии в слое верхнего слоя поликремния; **e)** осаждение жертвенного слоя *SiO<sub>2</sub>*, формирование в нем топологии, нанесение слоя алюминия (*Al*) и создание в нем топологии; **f)** удаление жертвенных слоев *SiO<sub>2</sub>* [32].

## Заключение

Таким образом, развитие технологии и приборной базы микроэлектронике в ближайшие тридцать лет по магистральному направлению «Больше чем Мур» (*More than Moore*), определяемое универсальными драйверами в виде систем искусственного интеллекта, Интернета Всего и доверенных интеллектуальных сенсорных систем, выдвигает в первый ряд мембранные технологии и производство микро- и наноприборов на мембранных подложках и структурах, объединенных в микроэлектронные суперсистемы на основе 3D гетерогенной интеграции.

Такое положение настоятельно требует оперативного проведения комплекса работ по изучению и измерению механических свойств тонких пластин, мембран и пленочных структур на мембранах для определения их прочности, а также величины и распределения внутренних механических напряжений

в них. Так как указанные параметры определяют надежность и временную функциональную стабильность характеристик микросхем, микроприборов и микроэлектронных систем, как на отдельных кристаллах (подложках), так и в составе 3D структур, сформированных по технологиям гетерогенной интеграции. Причем очевидно, что с уменьшением линейных размеров элементов ИС и систем на их основе доля поверхностных атомов по отношению к внутренним возрастает. Это предопределяет переход науки от классической физики твердого тела к развитию физики поверхностного состояния.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (№ 075-03-2020-216, 0719-2020-0017) с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» НИУ МИЭТ.

### Литература

1. International Roadmap for Devices and Systems™ (IRDS). // 2018 Edition. Executive Summary. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated. 2019 – 32 p.
2. The International Technology Roadmap for Semiconductors // 2.0.2015 Edition. Executive Report. – Semiconductor Industry Association et al.
3. Дюжев Н.А., Куреев В.Ю. Элементный базис нано– и микросистемной техники. // Учебное пособие. Москва, ИПК МИЭТ, 2019. – 139 с.
4. Technology Node // [https://en.wikichip.org/wiki/technology\\_node](https://en.wikichip.org/wiki/technology_node)
5. В. Вернер, Г. Кузнецов, А. Сауров. Закону Мура 50 лет: Масштабирование элементов ИС. // Нано Индустрия. 2015, № 4 (58), с. 22 – 38.
6. Свистова Т.В. Основы микроэлектроники // учебное пособие. Воронеж, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – 148 с.
7. Куреев В.Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии. // Москва: Изд-во ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. – 427 с.
8. Gams M., Gu I.Y-H., Munoz A., Tam V. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments. // 2019, No. 11, pp. 71 – 86.
9. Интеллект. // Википедия. – <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82>
10. M. Arribas-Ayllon, Ambient Intelligence: An innovation narrative, available at // [http://www.academia.edu/1080720/Ambient\\_Intelligence\\_an\\_innovation\\_narrative](http://www.academia.edu/1080720/Ambient_Intelligence_an_innovation_narrative), 2003.
11. J.C. Augusto and P. McCullagh. Ambient intelligence: Concepts and applications. // Computer Science and Information Systems, 2007, v. 4, No. 1, pp. 1 – 27. doi:10.2298/CSIS0701001A
12. Сергей Яроцкий. Искусственный интеллект, разработка и области применения. // 06.05.2019. – <https://sci-news.ru/2019/oblasti-primeneniya-trendy-i-tehnologii-iskusstvennogo-intellekta/>
13. Большие данные. // Википедия. – <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D>

- 0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%88%D0%B8%D0%B5\_%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5
14. Перспективные системы искусственного интеллекта требуют большей мощности. // 14 сентября 2018. – <https://www.compel.ru/lib/94727>
  15. Фреймворк. // Википедия. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%80%D0%B5%D0%B9%D0%BC%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BA>
  16. FLOPS. // Википедия. – <https://ru.wikipedia.org/wiki/FLOPS>.
  17. Нейронный процессор. // Википедия. – [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9\\_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D1%80](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D1%80)
  18. *Игорь Королев*. Будущее искусственного интеллекта в России: как технологии превратятся в решения. // 02.10.2019. – [https://cnews.ru/articles/2019-10-02\\_budushchee\\_iskusstvennogo\\_intellekta](https://cnews.ru/articles/2019-10-02_budushchee_iskusstvennogo_intellekta)
  19. *Алексей Сычев*. Развитие искусственного интеллекта поднимает спрос на специализированные интегральные микросхемы. // – <https://overclockers.ru/hardnews/show/90367/razvitie-iskusstvennogo-intellekta-podnimaet-spros-na-specializirovannye-integralnye-mikroshemy>
  20. *James Morra*. Микросхема искусственного интеллекта поддерживает работу Amazon Alexa на устройствах с автономным питанием. // Электронный журнал «РадиоЛоцман» 2019, № 9, с. 38 – 39.
  21. Искусственный интеллект (мировой рынок). // [https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%98%D1%81%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9\\_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82\\_\(%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9\\_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA\)](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%98%D1%81%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82_(%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA))
  22. *Дэвид Сандерс*. Искусственный интеллект в сенсорных системах. // Control Engineering Россия, 2014, № 1 (49), с. 34 – 39.
  23. *Каляев И., Заборский В.* Искусственный интеллект от метафоры к техническим решениям. // Control Engineering Россия, 2019, № 5 (83), с. 26 – 31.
  24. Интеллектуальные сенсорные системы. // Под ред. *Мейджера Дж. К. М.* / Пер. с англ. под ред. *Шубарева В.А.* М.: Техносфера, 2011. – 464 с.
  25. *Lau J.H.* Heterogeneous Integrations. // Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. – 368 p.
  26. *Fritze M., Cheetham P., Lato J., Syers P.* The death of Moore’s law. // STEPS: Science. Technology. Engineering and Policy Studies. 2016. Issue 3, pp. 35 – 40.
  27. *Андрей Хохлун*. 3D-интеграция – один из возможных путей опережающего развития отечественной микроэлектроники. // Компоненты и технологии, 2010, № 12, с. 148 – 150.
  28. Что такое чиплеты и какую проблему с их использованием решили в AMD? // 10.07.2018 – <http://www.aethra.ru/что-такое-чиплеты-и-какую-проблему-с-их-использованием-решили-в-amd/>

29. Андрей Галадей. Intel представила первую трёхмерную архитектуру чипов Foveros. // 12.12.2018. – <https://tproger.ru/news/intel-3dchips-foveros/>
30. Чиплеты: новая жизнь закона Мура. // 08.06.2020. – <https://www.osp.ru/articles/2020/0608/13055514>
31. Л. Черняк. Электроника третьего измерения. // Открытые системы. СУБД. 2014, № 3. – <https://www.osp.ru/os/2014/03/13040839>
32. Springer Handbook of Nanotechnology. // Edited by B. Bhushan. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – 1222 p.

## MEMBRANE TECHNOLOGIES OF MICROELECTRONICS: POSSIBILITIES, LIMITATIONS, FIELDS OF APPLICATION AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT

N.A. Djuzhev

*National Research University «MIET», Moscow, Russia  
dyuzhev@ckp-miet.ru*

Received 03.12.2020

Annotation. The main direction of development of microelectronics technology and device base for the next thirty years, called in international forecasts "More than Moore" is considered. The main and almost unlimited field of application of this direction is super system of the "ambient intelligence", and the main drivers are: "artificial intelligence" systems, the Internet of Everything and trusted smart sensor systems. The technological basis of this direction is the processes of 3D heterogeneous integration using interconnections and contacts through a silicon wafer (through-silicon vias-TSV) and an intermediate board of an electrical interface called an interposer. This technology allows to combine in a single vertical system stack crystals made on different substrates and in different factories, but requires the use of thin (50 microns or less) crystals with through holes to form interconnections, which are actually membrane structures. This situation urgently requires the rapid implementation of a complex of works on the study and measurement of the mechanical properties of thin plates, membranes and film structures on membranes to determine their strength, as well as the size and distribution of internal mechanical stresses in them. Since these parameters determine the reliability and temporary functional stability of the characteristics of microchips, micro-devices and microelectronic systems, both on individual crystals (substrates) and as part of 3D structures formed by heterogeneous integration technologies.

*Keywords: direction of development of microelectronics "More than Moore", ambient intelligence, artificial intelligence, trusted intelligent sensor systems, heterogeneous 3D integration, membrane technologies, mechanical properties of thin plates, membranes and film structures on membranes.*