

# Современные тенденции развития микроэлектроники

## Часть 2

М. Макушин<sup>1</sup>, В. Мартынов д. т. н.<sup>2</sup>

УДК 621.39 | ВАК 05.27.06

В первой части статьи рассматривались экономические аспекты развития микроэлектроники, проблемы масштабирования, включая возможность прекращения действия так называемого закона Мура или продления его действия за счет Интернета вещей. Также затрагивался вопрос освоения в производстве интегральных схем EUV-литографии. Во второй части статьи предпринята попытка оценить альтернативы масштабирования в производственно-технологическом плане, перспективы развития искусственного интеллекта как «замены» закону Мура и возникновения новых факторов роста рынка ИС.

### НЕ МАСШТАБИРОВАНИЕ, А МОДЕРНИЗАЦИЯ ЗРЕЛЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Все ли заинтересованы в масштабировании? Далеко не все. Одни не ставят перед собой такой цели, другие отказываются от него после многолетнего участия в процессе. Рассмотрим два характерных примера – корпорации GlobalFoundries и Управления перспективного планирования оборонных научно-исследовательских работ МО США (DARPA).

На первой ежегодной конференции после прекращения работы над 7-нм технологическим процессом кремниевый завод Globalfoundries продемонстрировал, по крайней мере, три встроенных кристалла ИС для глубокого обучения, реализованных по технологии 22-нм полностью обедненного «кремния-на-изоляторе» (FD-SOI). Globalfoundries предполагает уменьшить площадь кристаллов (в пределах от 10 до 22%) как на 12/14-нм FinFET-процессах, так и на планарных технологиях.

В чем причины подобного решения? Проведя глубокое исследование, специалисты корпорации обнаружили, что мало кто из ее заказчиков собирается применять ИС, реализованные с использованием топологий менее 10 нм. Кроме того, при существенном повышении издержек переход на меньшие топологии не всегда позволяет добиться лучших результатов, чем при создании следующего поколения более зрелой технологии. Более того, при модернизации процесса можно почти на столько же уменьшить кристалл ИС, как при масштабировании (рис. 3). Соответственно от планов сооружения за 3 млрд долл. (половина из которых заемные, а общий доход GlobalFoundries за 2017 год составил

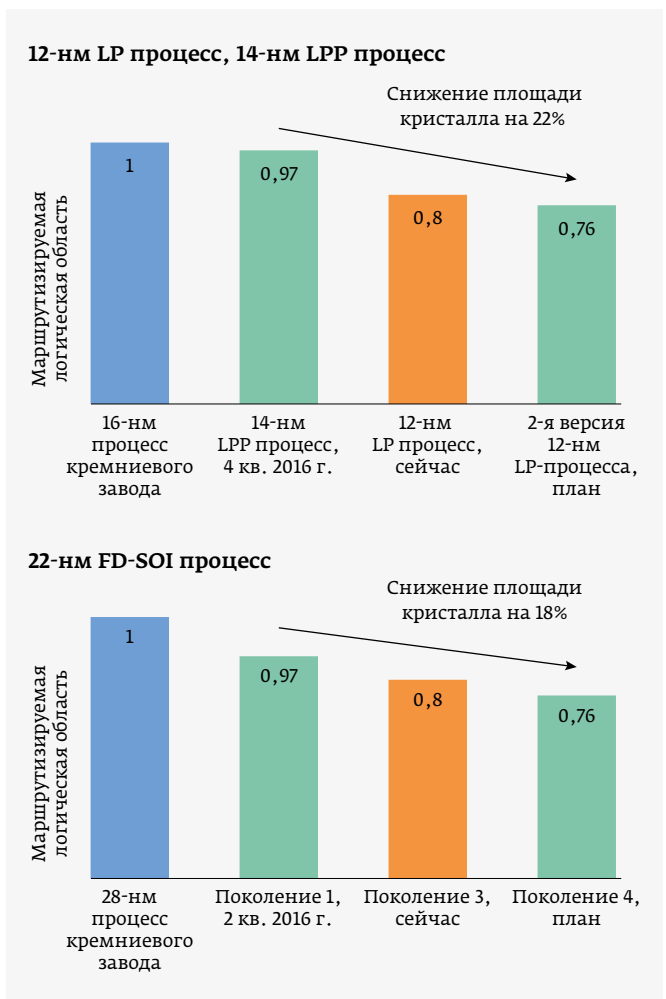


Рис. 3. Маршрутизируемая логическая область на основе оценки ядра Neon/Mali

1 АО «ЦНИИ «Электроника», mmacushin@gmail.com.

2 Проф., ФГБНУ «Аналитический центр», эксперт.

6,0 млрд долл.) завода по обработке 30 тыс. 300-мм в месяц по 7-нм технологии решили отказаться [11].

DARPA продолжает выполнять проекты, расширяющие возможности вооруженных сил страны на основе применения современной промышленной базы, в том числе электронной промышленности. В этих целях реализуется Инициатива по возрождению электроники (Electronics Resurgence Initiative, ERI). За пять лет в соответствии с этой программой на модернизацию электронной промышленности США предполагается направить 1,5 млрд долл. Один из проектов в рамках данной инициативы – обновление специализированного кремниевого завода корпорации SkyWater.

Для военной промышленности часто актуальна задача, как добиться того, чтобы зрелые топологические нормы (например, 90 нм) оказались конкурентоспособными в сочетании с конструкциями, созданными по топологиям 7 или 5 нм.

DARPA реализовало серию семенных\* проектов в различных университетах, чтобы продемонстрировать возможность совместного формирования памяти в одной монокристаллической 3D-этажерке с плотным расположением элементов и логики. Выяснилось, что для многих вариантов применения это предпочтительнее 7-нм процессора, расположенного рядом с блоком памяти. Идея перспективная, но сложная в реализации – при формировании монокристаллической 3D-структуры необходимо, чтобы требования всех этапов обработки, включая низкотемпературное осаждение материалов поверх кремниевой основы, были полностью совместимы.

Один из подходов – сохранение с помощью 3D-этажирования устаревших американских заводов, что дает возможность МО США защититься от встроенных в импортные аппаратные средства троянов и дефектов алгоритмов, позволяющих получить несанкционированный доступ (back door).

DARPA намерено реорганизовать электронную промышленность в стране таким образом, чтобы она наиболее полно соответствовала потребностям МО США и государства в целом.

Эксперты DARPA рассчитывают, что Инициатива по возрождению электроники повлияет на все области электроники, которая станет более жизнеспособной и динамичной отраслью [12].

Среди 42 проектов, перечисленных в ERI, проект «Революционизация вычислительных систем за счет

плотной и тонкоструктурной монокристаллической 3D-интеграции» (Revolutionizing Computing Systems through Dense and Fine-Grained Monolithic 3D Integration) является наиболее дорогостоящим – 61 млн долл. Цель проекта – применение монокристаллической 3D-интеграции для изготовления ИС с использованием зрелых технологических процессов (насчитывающих десятки лет). При этом подобные ИС должны быть конкурентоспособны по сравнению с ИС, изготавливаемыми по современным передовым технологиям. Основа проекта – технология, позволяющая формировать поверх стандартных кристаллов КМОП логических ИС углеродные нанотрубки (УНТ) и резистивные ОЗУ (RRAM). Данная технология разработана совместно учеными Массачусетского технологического института (MIT) и Стэнфордского университета. Производственной базой проекта является «чистый» кремниевый завод SkyWater Technology (Блумингтон, шт. Миннесота).

В ближайшие три года специалисты MIT сосредоточатся на разработке технологичных (пригодных для внедрения с точки зрения готовности технологии и рентабельности) производственных процессов, а специалисты Стэнфордского университета – на создании инструментальных средств проектирования, которые помогут разработчикам ИС воспользоваться преимуществами повышенной производительности, которую обеспечивает этажирование КМОП-логики, УНТ и RRAM. SkyWater Technology в свою очередь разработает и испытает обновленный вариант технологического процесса с высоким выходом годных, который уже применяется на данном кремниевом заводе [13].

**Технология 3D-интеграции может дать настолько большой прирост производительности, что ИС, созданные по 90-нм процессу SkyWater, могут превзойти ИС на базе самых современных 7-нм (планарных) технологий. Но это одна из оценок, есть и другие мнения.**

Возможно, выбор этого кремниевого завода был не лучшим, а единственным вариантом. Действительно, на основе данного надежного, хорошо отработанного процесса, широко доступного для создания сравнительно малых партий ИС выполняется большая часть заказов для производства. Иными словами, важно наличие технологии, позволяющей значительно повысить производительность приборов, но при условии, что для формирования ИС по-прежнему используется 90-нм производственный процесс. DARPA стремится сохранить технологию в пределах США, а SkyWater Technology является практически единственным «чистым» кремниевым заводом, принадлежащим американским собственникам. Соответственно, если DARPA заказывает разработку перспективного процесса в одной из Национальных научных лабораторий, например Сандийской им. Лоуренса, полагаясь на ее уникальное оборудование и опыт, то эту технологию все равно необходимо переносить на коммерческий кремниевый завод. В частности, в том случае, если новая

\* **Seed financing (investments)** – семенное (начальное) финансирование; выделение средств для создания нового проекта или программы, обычно речь идет о предоставлении средств в случаях, когда появилась общая идея нового проекта, но полная концепция еще не сформулирована, и конкретный план действий не разработан.



Рис. 4. Маршрутная карта развития фирмы SkyWater на 2018–2020 годы. Источник: SkyWater

разработка выходит за рамки чисто военных вариантов применения и может быть использована для выпуска гражданской продукции.

Таким образом, разработка и доводка перспективной технологии на том же заводе, где предполагается осваивать выпуск приборов на ее основе, позволяет получить более современный продукт. Кроме того, не каждый завод по обработке пластин возьмется за такие нестандартные материалы, как УНТ, которые при неправильном с ними обращении могут загрязнить продукты других клиентов.

Для того чтобы на одной и той же производственной линии можно было производить и сверхпроводящие материалы, и КМОП-приборы / материалы, необходим протокол, обеспечивающий нужную чистоту и отсутствие взаимного загрязнения различных материалов / приборов. Представители SkyWater Technology утверждают, что они не только ввели в действие, но и обладают 10-летним опытом обращения с ними. Это одно из основных преимуществ корпорации, с которым другим желающим поучаствовать в программах DARPA будет трудно конкурировать.

Возможность повысить производительность без прохождения дорогостоящего переоборудования при

переходе к меньшим топологическим нормам станет большой победой SkyWater Technology, а в конечном итоге будет иметь большое значение и для других небольших кремниевых заводов. Масштабирование минимальных размеров топологических элементов в соответствии с законом Мура становится слишком дорогостоящим. Новейшие процессы, использующие EUV-литографию, требуют инвестиций в миллиарды долларов. Объемы производства, необходимые для поддержания рентабельности подобных процессов, не соответствуют требованиям обслуживания малых заказчиков, например, в сфере Интернета вещей. Кроме того, представители SkyWater Technology утверждают, что в дальнейшем смогут масштабировать 90-нм процесс [14].

В настоящее время SkyWater Technology выполняет на своих мощностях как обработку малых партий пластин с коротким временем выполнения заказа, так и обработку крупных партий пластин для серийного производства ИС. При этом фирма осуществляет переход от 0,35-мкм к 90-нм производственным процессам. SkyWater Technology поддерживает аккредитацию «аттестованного производства», что позволяет ей как надежному поставщику предоставлять правительству США услуги по обработке пластин, проектированию и

тестированию. При этом фирма намерена расширять взаимодействие с МО США.

В рамках концепции развития на 2018–2020 годы («Маршрутная карта») фирма планирует создавать современные приборы с использованием проверенных технологических процессов и топологических норм (рис. 4) [13].

## О «ренессансе» мощностей по обработке пластин диаметром 200 мм и менее

Смена подходов к масштабированию и распространение Интернета вещей (IoT), а также ряд других тенденций приводят к изменению отношения к мощностям по обработке пластин диаметром 200 мм и менее. На 200-мм пластинах в основном производятся аналоговые ИС, MEMS и РЧ ИС. Благодаря развитию Интернета вещей, спрос на эти приборы быстро растет, что уже обусловило дефицит мощностей и оборудования для обработки 200-мм пластин.

Такая ситуация вызывает беспокойство у значительного числа заказчиков, которым по-прежнему требуются ИС, произведенные по «зрелым» технологиям. К подобным производителям относятся изготовители потребительской электроники, средств связи и систем на основе датчиков. Спрос на производственные мощности по обработке 200-мм пластин продиктован двумя основными факторами.

1. В соответствии со спросом GlobalFoundries, Samsung, SMIC, TowerJazz, TSMC, UMC и другие компании принимают меры по расширению существующих 200-мм мощностей. В то же время появляются новые фирмы, ставящие целью обработку исключительно 200-мм пластин, например SkyWater Technology.
2. Даже для существующих доступных мощностей по обработке 200-мм пластин трудно найти оборудование, необходимое для подобного производства.

Полупроводниковая промышленность столкнулась с дефицитом мощностей по обработке 200-мм пластин еще в конце 2015 года. Цепь поставок оказалась перегруженной, возник дефицит оборудования, и ведущие кремниевые заводы были вынуждены обновлять старые, создавать новые линии по обработке 200-мм пластин. Предполагается, что количество заводов по обработке пластин этого диаметра увеличится со 188 в 2016 году до 202 – в 2021-м. По мнению SEMI, динамика появления таких предприятий выглядит следующим образом:

- 1995 год – 70 шт.;
- 2016 год – 188 шт.;
- 2021 год – 202 шт.

Перед кремниевыми заводами стоит ряд проблем. Прежде всего они должны инвестировать в различные 200-мм процессы, в том числе в целях модернизации. При этом их основная задача – внедрять наиболее современные технологии. Развивать одновременно 300-мм

и 200-мм процессы затруднительно. Поэтому для наращивания 200-мм мощностей производители зачастую склоняются к одному из следующих вариантов:

- приобретение фирмы, обладающей мощностями по обработке 200-мм пластин;
- строительство новых заводов по обработке 200-мм пластин;
- наращивание существующих мощностей по обработке 200-мм пластин;
- перевод большего числа клиентов с приборов, изготавливаемых на 200-мм пластинах, на приборы на базе 300-мм пластин;
- строительство заводов по обработке 300-мм пластин вместо заводов по обработке 200-мм пластин.

Однако приобретение готовых предприятий не всегда выгодно.

Другой вариант – построить новый завод по обработке 200-мм пластин. Но где взять соответствующее оборудование и как обеспечить рентабельность предприятия в долгосрочной перспективе?

Третий вариант – перевод производства ряда ИС с пластин диаметром 200 мм на пластины диаметром 300 мм. Это возможно не для всех приборов, поскольку, например, для некоторых мощных дискретных приборов экономически неоправданно.

Таким образом, большая часть проблем связана с выбором производственной технологии, возможностями ее масштабирования и с приобретением оборудования.

При реализации планов по расширению 200-мм мощностей бывшее в использовании оборудование можно приобрести у других производителей ИС (при закрытии или репрофилировании мощностей) или поставщиков оборудования, через брокеров или интернет-ресурсы наподобие eBay.

В последнее время крупнейшие производители оборудования, такие как Applied Materials, ASML, KLA-Tencor, Lam Research, TEL и ряд других, начали выпускать новое оборудование для обработки пластин диаметром 200 мм.

Например, корпорация Applied Materials предлагала обеспечить выпуск оборудования для обработки 200-мм пластин с учетом требований заказчика за 12–16 недель. Это срок анонсировался на стадии расцвета рынка 200-мм оборудования. При этом Applied Materials планирует изготавливать оборудование для обработки 200-мм пластин в обозримом будущем. Горизонт планирования – 2030 год [15].

Что касается пластин диаметром 150 мм и менее, то развитие технологий связано с достижениями в области силовых полупроводниковых приборов, фотоприемников и волноводов, изготавливаемых с использованием таких материалов, как карбид кремния (SiC) и арсенид галлия (GaAs). Развитие 150-мм технологий, как ни странно,

стимулировало появление смартфона iPhone X (корпорации Apple). Например, из 121 кристалла, используемых в устройстве ИС, примерно 15 изготавливаются на 150-мм пластинах. Это чуть больше 12% общего количества кристаллов и всего 2% общей площади полупроводниковых пластин, необходимых для изготовления iPhone X, но тенденция к применению 150-мм пластин нарастает.

Эта тенденция лежит в основе медленно расширяющегося разнообразия приборов, изготавливаемых на 150-мм и 200-мм пластинах, в рамках концепции «Больше, чем Мур»\*. В сочетании с впечатляющими продажами смартфонов iPhone корпорации Apple, составляющими 200 млн долл. ежегодно, спрос на 150-мм пластины только для iPhone вскоре превысит 300 тыс. шт. ежегодно. Кроме того, многие другие производители смартфонов начинают использовать 150-мм пластины для изготовления мощных полупроводниковых приборов и фотонных ИС.

Вторая область применения 150-мм технологий – развитие SiC мощных МОП полевых транзисторов (MOSFET). Сейчас эти приборы используются преимущественно для мощных переключающих приборов в промышленности.

Корпорация Cree, оценивающая размер общего доступного рынка SiC-приборов в 2023 году на уровне 5 млрд долл., выделяет следующие его сегменты:

- SiC мощные MOSFET – 2,5 млрд долл.;
- SiC мощные инверторы – 2,3 млрд долл.;
- SiC-приборы для портативных зарядных устройств – 200 млн долл.

Это обеспечит значительный рост производства соответствующей промышленности, находящейся на этапе становления.

По оценкам корпорации Cree, производство необработанных пластин увеличится с 45 тыс. шт., в 2017 году до 2 млн шт. в 2023 году. Исследовательская фирма Yole Développement (Лион, Франция) придерживается более консервативных оценок – 150 тыс. пластин в 2023 году [16].

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ КАК НОВЫЙ ЗАКОН МУРА

Развитие искусственного интеллекта (ИИ) обещает существенно изменить жизнь человечества, как это сделала микроэлектроника, развивавшаяся до сих пор по

закону Мура. По некоторым оценкам, вклад ИИ в рост ВВП в предстоящие годы будет не меньшим, чем вклад микроэлектроники за последние 20 лет. Так, согласно данным нового исследования Брукингского института (Вашингтон, федеральный округ Колумбия), инвестиции в технологии ИИ увеличиваются в различных областях, включая национальную безопасность, финансы, здравоохранение, уголовное судопроизводство, транспорт и «умные» города. В то же время специалисты Pricewaterhouse Coopers (PWC) прогнозируют, что потенциальный вклад технологий ИИ в мировую экономику в 2030 году достигнет 15,7 трлн долл. (табл. 2). В этом смысле некоторые специалисты называют искусственный интеллект «новым законом Мура».

Правда, следует учитывать, что ИИ, машинное обучение и глубокое обучение по-прежнему находятся на этапе становления, несмотря на то, что в той или иной форме они исследовались с 1950-х годов. Но только в этом десятилетии рынок для них сформировался благодаря сочетанию нескольких факторов.

Во-первых, появились достаточные вычислительные мощности и объем памяти для обработки алгоритмов ИИ, машинного обучения и глубокого обучения – как в центрах обработки данных для обучения, так и на краю облака (edge computing) для формирования логических выводов.

Во-вторых, существуют приложения для этой технологии, поэтому в разработку улучшенных алгоритмов и более эффективных аппаратных архитектур стали вкладывать значительные средства.

В-третьих, возможность создания алгоритмов не вручную, а на компьютерах позволила многим фирмам начать деятельность в данной области с готовых алгоритмов и не пытаться разрабатывать собственные.

Все это предопределило продолжение работ в области ИИ, машинного обучения и глубокого обучения такими крупными компьютерными фирмами, как IBM и Digital Equipment, хотя в начале 1990-х годов стоял вопрос о прекращении их деятельности. С тех пор к IBM, продолжающей деятельность в этой области, присоединился ряд провайдеров облачных услуг, таких как Amazon, Microsoft, Google, а также Alibaba, Facebook и ряд компаний меньшего масштаба. Кроме того, правительства многих стран мира вкладывают миллиарды долларов в НИОКР в этой области (табл. 3).

Подобные перспективы вдохновляют разработчиков технологий ИИ, машинного и глубокого обучения. Это открывает двери для поставщиков инструментальных средств, таких как САПР, в плане автоматизации некоторых этапов контроля безопасности, в частности в процессе верификации. Многие фирмы уже заявили о работах в этом направлении [17].

\* «More than Moore» – «Больше, чем Мур», концепция достижения больших результатов и в более широком диапазоне, чем изложено так называемом законе Мура, заключается в использовании 2,5- и 3-мерных архитектур, позволяющих существенно наращивать функциональность, сокращать занимаемое пространство и потребляемую мощность, а также в применении перспективных материалов и приборных структур.



**Таблица 2.** Выигрыш различных стран и регионов от увеличения ВВП в 2030 году за счет использования технологий ИИ. *Источник: PWC, <https://semiengineering.com/wp-content/uploads/2018/07/aisecurity2.png>*

Страна/регион	Общее воздействие		Примечания
	Доля ВВП, %	Выигрыш, трлн долл.	
КНР	26,1	7,0	Северная Америка и КНР получают наибольшие экономические преимущества от увеличения ВВП за счет использования ИИ – суммарно 10,7 трлн долл. или 67,7% мирового экономического воздействия
С. Америка	14,5	3,7	
Северная Европа	9,9	1,8	Европа и промышленно развитые страны Азии получают значительный экономический выигрыш от увеличения ВВП за счет использования ИИ (21,5%)
Промышленно развитые страны Азии	10,4	0,9	
Южная Европа	11,5	0,7	
Латинская Америка	5,4	0,5	Развивающиеся страны могут рассчитывать на более скромное увеличение ВВП из-за более низких темпов освоения технологий ИИ (10,8)
Прочие страны мира	5,6	1,2	
<b>Итого</b>	<b>13,6</b>	<b>15,8</b>	Таким образом, все страны и регионы получают выгоды от использования ИИ

Освоение ИИ – очень широкая сфера деятельности. По оценкам специалистов корпорации IBM, **доход от реализации приложений, поддерживающих принятие решений на основе ИИ в 2025 году, может превысить 2 трлн долл. (табл. 4) При этом данные приложения основаны на достижениях в сфере информационных технологий, а ИТ-рынок в 2025 году достигнет отметки в 1,5 трлн долл. По оценкам международной консалтинговой фирмы McKinsey, годовые доходы**

**Таблица 3.** Структура инвестиций в ИИ. *Источник: McKinsey & Co. <https://semiengineering.com/wp-content/uploads/2018/07/McKinsey-AI.png>*

Область применения ИИ	Объем инвестиций, млрд долл.
Машинное обучение – универсальные и неспецифические применения	5,0–7,0
Компьютерное (машинное) зрение	2,5–3,3
Естественный язык	0,6–0,9
Автономные транспортные средства	0,3–0,5
Интеллектуальная робототехника	0,3–0,5
Виртуальные агенты	0,1–0,2
<b>Итого</b>	<b>8,8–12,6</b>

**сектора глубокого обучения будут находиться в пределах 3,5–5,8 трлн долл.**

Особенность настоящего момента – стремление интернет-провайдеров, таких как Alphabet, Alibaba, Amazon, Facebook, Microsoft и т.д., разрабатывать собственные конструкции ИС исходя из текущих и перспективных потребностей. Соответственно, в Кремниевой Долине активизируются работы по проектированию различных ИС. Растет спрос на инструментальные средства САПР и производственное оборудование. Причина – вступление отрасли в эпоху ИИ, ключом к которому являются как полупроводниковые приборы, так и новые вычислительные архитектуры. **При этом средством обеспечения возможности ИИ скачкообразно повысить производительность и использовать новые, подобные мозгу нейронные сети и архитектуры, служит именно аппаратное, а не программное обеспечение.**

Наряду с крупными инвестициями в ИС для ИИ, по типу программы Alphabet (стоимостью более 300 млн долл.) корпорации Google по разработке тензорного процессора (TPU<sup>\*</sup>), резко увеличилось число новых стартапов, возросли объемы венчурного финансирования. **В прошлом году венчурные и корпоративные инвесторы**

<sup>\*</sup> **TPU (Google Tensor Processing Unit, Google TPU)** – тензорный процессор корпорации Google, относящийся к классу нейронных процессоров и являющийся специализированной ИС для использования с библиотекой машинного обучения TensorFlow. Представлен в 2016 году (утверждалось, что к тому времени TPU уже более года пользовались Google).

## вложили в стартапы, специализирующиеся на ИИ для ИИ, более 1,5 млрд долл. – вдвое больше, чем в 2016 году.

Специалисты корпорации IBM отмечают, что ИИ будет преобразовывать не только персональные гаджеты и образ жизни людей, но и целые отрасли промышленности [18].

ИИ устанавливает новые интенсивные целевые показатели, предполагает разработку новых технологических направлений для их достижения. Они охватывают новые материалы, процессы, схемы, архитектуры, методики корпусирования и алгоритмы. Другими словами, достижения микроэлектроники переосмысливаются для использования с ИИ. Ранее в качестве замены флеш-памяти рассматривались магнитные (магниторезистивные) ОЗУ (MRAM) и резистивные ОЗУ (ReRAM). Теперь по-новому рассматриваются вопросы поперечных архитектур, использующих перспективные типы памяти и различные материалы, обеспечивающие большее линейное масштабирование аналоговых приборов. Речь идет о чем-то подобном программируемым мемристорам.

Так, например, в Калифорнийском университете (Лос-Анджелес) изучают матрицы трехполосниковых аналоговых схем памяти с интегрированными логическими функциями. Исследователи IBM, стартапов Syntiant и Mythic хотят использовать этот вид программируемых элементов для ускорителей ИИ на основе вычислений в оперативной памяти (in-memory computing).

Учитывая параллелизм рабочих нагрузок ИИ, широкие возможности открываются в плане методик корпусирования, которое отличается большим потенциалом для преодоления проблем, связанных с масштабированием Деннарда<sup>\*</sup>. Во многих последних ИС для ЦОД используются 2,5D-этажерки, содержащие логику и память. Крупнейший кремниевый завод, TSMC, постоянно представляет большое количество версий подобных этажерок с InFO<sup>\*\*</sup> корпусированием, предназначенных для смартфонов и других приборов. Причем версий так много, что раз-

\* **Dennard scaling** – масштабирование Деннарда, «правила», предполагавшие, что напряжение и ток должны быть пропорциональны линейным размерам транзистора, а потребляемая мощность (производное напряжения и тока) будет пропорционально площади транзистора.

\*\* **InFO (Integrated Fan-Out)** – технология кремниевого завода TSMC, интегрированное корпусирование на уровне пластины с разветвлением, один из компромиссов между корпусированием на уровне кристалла и на уровне пластины. Полупроводниковая пластина режется на кристаллы, и отдельные кристаллы ИС встраиваются в новую «искусственную» пластину. В полученной встраиваемой структуре между отдельными кристаллами образуются достаточно места, чтобы сформировать разветвленный слой перераспределения. Вариант технологии FO WLP.

работчикам требуется перечень расшифровки соответствующих аббревиатур. Тем не менее для решения задач ИИ этого недостаточно.

По оценкам ряда специалистов, среди многокристалльных технологий нет оптимальных с точки зрения соотношения стоимости и производительности. Эксперты признают лучшей из них технологию EMIB<sup>\*\*\*</sup> корпорации Intel, но она подходит не всем.

На прошедшем в июле 2018 года в рамках выставки-конференции Semicon West симпозиуме, спонсированном корпорацией Applied Materials, была кратко представлена работа по упрощению алгоритмов за счет уменьшения размера нейронных сетей (НС) и точности их матричных вычислений. С использованием математических методов смешанной точности на суперкомпьютере Summit удалось достичь экзафлопной ( $10^{18}$  операций/с) производительности операций с применением ИИ.

Исследователи корпорации Nvidia продемонстрировали перспективность операций с плавающей запятой на величинах всего два бита, а Межуниверситетский центр микроэлектроники IMEC (Левен, Бельгия) сообщил об изучении однобитного подхода.

Собственно НС могут быть радикально упрощены в целях снижения требующейся вычислительной мощности. При этом точность не несет неприемлемых потерь даже при использовании только 10% веса НС и ее 30%-активации. Примером такой сети, ориентированной на встроенный интеллект, является SqueezeNet. Эта глубокая НС была разработана совместно корпорацией Deep Scale, Калифорнийским университетом (Беркли) и Стэнфордским университетом и выпущена в 2016 году. При проектировании целью разработчиков было создание наименьшей НС с малым числом параметров, которая легче встраивается в компьютерную память и передается по вычислительной сети [19].

## СМЕНА ФАКТОРОВ РОСТА РЫНКА ИС

Развитие рынка полупроводниковых приборов на протяжении всей его истории обеспечивалось наиболее востребованными на конкретный период системами конечного потребления ИС. Долгое время «двигателем» рынка была вычислительная техника, что особенно ярко проявилось в эру персональных компьютеров, которые потребляли в лучшие годы до 40% всех производимых ИС. По мере появления сотовых телефонов ситуация менялась, и к началу 2010-х годов основным фактором

\*\*\* **EMIB (Embedded Multi-die Interconnect Bridge)** – встраиваемое мостовое межсоединение многокристалльного модуля, методика объединения в одном гетерогенном модульном процессоре блоков, изготовленных по процессам с разными топологическими нормами и функциональностью (ядра процессоров, блоки памяти, логика и т. п.).

**Таблица 4.** Структура дохода от приложений принятия решений на основе ИИ в 2025 году. *Источник: IBM Market Development & Insights Analysis; Oxford economics, CapitalIQ, McKinsey Global Institute, [https://electroi.com/wpcontent/uploads/2018/08/Ajit\\_Blog\\_73018\\_2.png](https://electroi.com/wpcontent/uploads/2018/08/Ajit_Blog_73018_2.png)*

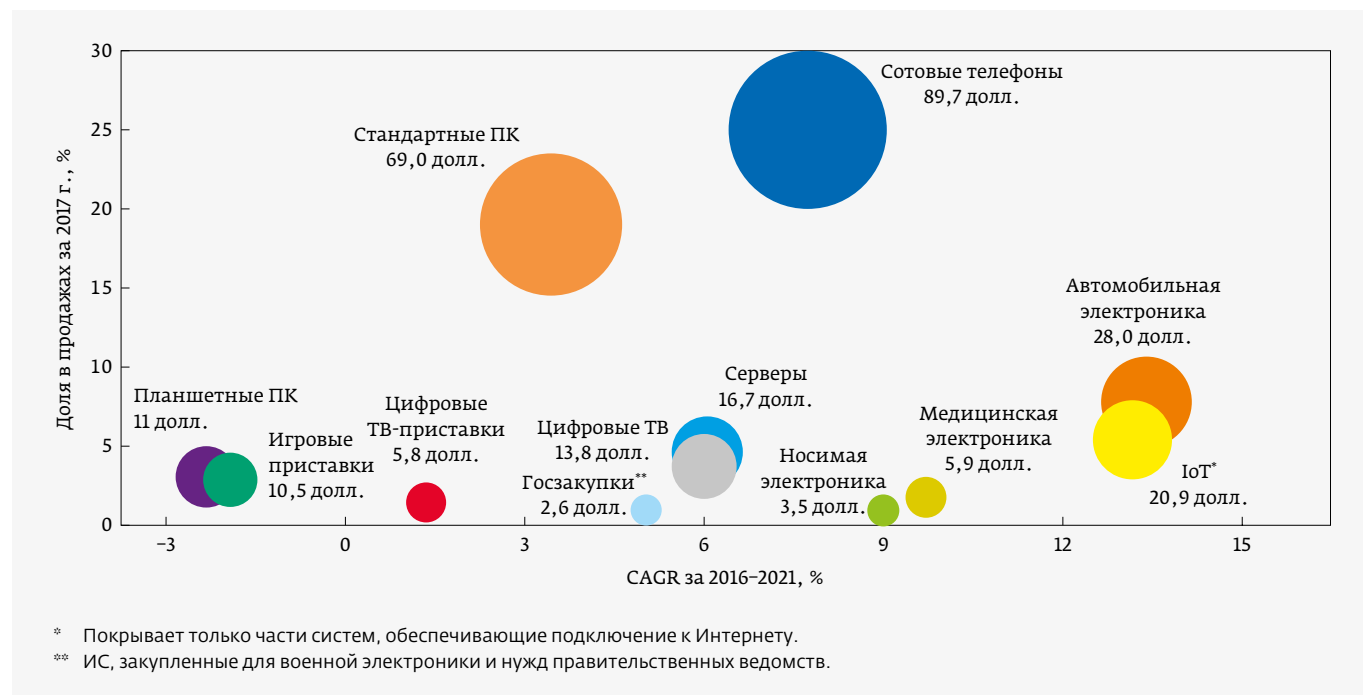
Сектор получения дохода	Объем дохода, млрд долл.	Доля, %
Промышленные изделия	480,0	24,0
Здравоохранение и науки о жизни*	240,0	12,0
Розничная/оптовая торговля, товары народного потребления	240,0	12,0
Автомобильная, авиакосмическая, военная промышленность	240,0	12,0
Финансовые услуги	220,0	11,0
Телекоммуникационные, медиа и информационно-развлекательное обслуживание/услуги	180,0	9,0
Прочие отрасли промышленности	400,0	20,0
<b>Итого</b>	<b>2 000,0</b>	<b>100,0</b>

\* **life sciences** – науки о жизни (биология, медицина, антропология, социология и т. п.).

развития рынка ИС стали средства связи, обогнавшие по доле потребления ИС вычислительную технику благодаря темпам роста спроса (в первую очередь на смартфоны), измерявшимся двузначными показателями. К настоящему моменту динамика спроса на сотовые телефоны существенно замедлилась. Следующим фактором роста востребованности ИС становится Интернет вещей (IoT), на подходе – автомобильная электроника

(особенно автономные транспортные средства, тесно связанные с IoT).

По данным корпорации IC Insights, между 2016 и 2021 годами продажи ИС для систем автомобильной электроники и IoT будут расти на 70% быстрее, чем общие продажи ИС в целом. Объем реализации микросхем, используемых в автомобилях и других транспортных средствах в 2021 году, составит 42,9 млрд долл. по сравнению



**Рис. 5.** Прогноз структуры и темпов роста продаж ИС для конечного применения в 2016–2021 годы.

Источник: <http://www.icinsights.com/files/images/bulletin20171206Fig01.png>



с 22,9 млрд долл. в 2016-м. В то же время доходы от продаж ИС для IoT, как ожидается, достигнут 34,2 млрд долл. по сравнению с 18,4 млрд долл. за тот же период в 2016 году. За прогнозируемый период темпы роста продаж в сложных процентах (CAGR) составят 13,4% по ИС для автомобильной электроники и 13,2% по ИС для IoT (рис. 5) [20].

Разумеется, по мере наращивания продаж электромобилей, гибридных автомобилей и тем более автономных транспортных средств, в общей стоимости которых доля автомобильной электроники постоянно увеличивается, будет расти спрос на соответствующие ИС. Развертывание IoT приведет к такому же результату. Таким образом, эти две сферы применения в обозримом будущем станут основными факторами повышения спроса на ИС.

\* \* \*

Микроэлектроника, как область знаний и высокотехнологичная отрасль, подошла к моменту, когда ряд традиционных тенденций развития ставятся под сомнение. С одной стороны, дальнейшее масштабирование возможно, но связано с необходимостью использования технологий ИИ, машинного и глубокого обучения, которые позволяют существенно ускорить проектирование ИС и усовершенствовать инструментальные средства САПР, методы их работы. Масштабирование также предусматривает использование EUV-литографии и методов непосредственной самосборки (Direct Self-Assembly, DSA) блок-сополимеров. С другой стороны, ряд производителей предпочли отказаться от дальнейшего масштабирования в пользу глубокой и многоэтапной модернизации более зрелых процессов.

Ряд перспективных технологий конечных электронных систем, например IoT, не требуют ИС, изготовленных по

новейшим технологическим процессам с использованием минимальных топологий, что, в свою очередь, ведет к «ренессансу» спроса на мощности по обработке 200-мм и даже 150-мм пластин.

Дальнейшее развитие микроэлектроники и конечных электронных систем становится все более взаимосвязанным, требующим тесного взаимодействия на этапах разработки, проектирования, производства ИС, обеспечения их надежности.

## ЛИТЕРАТУРА

11. **Merritt R.** GF Grabs AI Wins with FD-SOI // EE Times. 09/26/18.
12. **Samuel K. Moore.** DARPA Plans a Major Remake of U. S. Electronics // IEEE Spectrum. 16 July. 2018.
13. Phil Garrou IFTLE394 DoDs ERI will Depend on Sky Water; Will Apple Get Caught in the Trade War? // Solid State Technology. Advanced Packaging. August 22. 2018.
14. **Samuel K. Moore.** The Foundry at the Heart of DARPA's Plan to Let Old Fabs Beat New Ones // IEEE Spectrum. 6 Aug. 2018.
15. **LaPedus M.** 200mm Fab Crunch // Semiconductor Engineering. May 21<sup>st</sup>. 2018.
16. **Rosa M.** 150mm Alive and Kicking // Applied Materials. July 2018.
17. **Sperling E.** Security Holes In Machine Learning And AI. Semiconductor Engineering. July 9<sup>th</sup>. 2018.
18. **Manocha A.** The Rebirth of the Semiconductor Industry. SEMI Blog. July 30. 2018.
19. **Rick Merritt.** AI Becomes the New Moore's Law. EE Times. 7/13/2018.
20. Automotive and IoT Will Drive IC Growth Through 2021 // IC Insights. December 6. 2017.

## Предлагаем авторам сотрудничество с журналом "ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес"!

Приглашаем авторов для написания научных статей на темы, соответствующие рубрикам нашего журнала.

Если Вы заинтересованы в сотрудничестве, присылайте статьи на адрес электронной почты [redactor@electronics.ru](mailto:redactor@electronics.ru). Дополнительные пояснения можно получить в редакции журнала по тел. +7 495 234-0110, доб. 382.

По итогам рассмотрения присланных статей редакция принимает решение о возможности публикации. Срок публикации составляет от 2 до 10 месяцев (в зависимости от тематики статьи). С тематическим планом журнала можно ознакомиться на сайте: [www.electronics.ru](http://www.electronics.ru).

Публикация в журнале бесплатная.