

## ПЕРСПЕКТИВЫ

# ШАГ ПО НАПРАВЛЕНИЮ К КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ ИЛИ ЖИЗНЬ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В ЭПОХУ ПОСТМУРА



Текст: Дмитрий Суханов

”

Закон Мура всегда был движущей силой науки, технологий, производства, оборудования, программного обеспечения, систем и приложений и способствовал развитию и процветанию тысяч людей и сотен корпораций в течение последних шести десятилетий. Чего удалось достичь за это время и какие шаги необходимо предпринять сейчас для дальнейшего развития электроники? Попробуем в этом разобраться.

Закон Мура<sup>1</sup> движется к своему «закату» не только по фундаментальным причинам, но и из-за ряда физических требований, предъявляемых к конечным изделиям. Производительность вычислений и выходная мощность устройств должны всегда расти, что оказывает существенное влияние на уровень инвестиций в их разработку и стоимость производства. В связи с этим возникает вопрос о целесообразности дальнейших шагов по движению закона Мура вперед. Если проанализировать **Т 1**, мы увидим, что должно появиться иное видение электронных систем, так как классический подход к полупроводниковому производству дошел до своего предела – доступны технологии с топологическими нормами в единицы нм (3-5 нм), но на этом классическое развитие закона Мура закончилось. Дальнейшее его развитие требует снижения топологических норм и приближения к толщинам тонких пленок, соразмерных с атомами материалов, используемых для их создания. А это, в свою очередь, не позволит создавать полноценные слои, обеспечивающие все необходимые электрофизические параметры (электропроводность, теплопроводность, диэлектрические свойства, устойчивость к миграции атомов из соседних слоев и многое другое), не считая технологического предела химической промышленности. Сейчас набирают обороты гетерогенная интеграция и 3D-масштабирование – развитие в вертикальной плоскости, но, по оценкам экспертов, такого подхода к реализации закона Мура хватит максимум на 10-15 лет.

Первым шагом является переход от закона Мура для интегральных схем (ИС) к закону Мура для корпусирования за счет использования межкомпонентных соединений в 2D, 2.5D и 3D между меньшими ИС с такой же или более высокой плотностью транзисторов, а также для всех других компонентов. Ведь смысл 3D-корпусирования – это снижение латеральных размеров основных элементов в горизонтальной плоскости, но при этом рост размеров в вертикальной плоскости. Такой рост достигнет своего предела намного быстрее, чем масштабирование технологии по закону Мура в его планарном варианте. Если предел развития электроники в планарном исполнении был достигнут за 60 лет, то предел в вертикальной плоскости, по оценкам экспертов, будет достигнут за 15 лет.

**Что же дальше? Неужели на этом развитие электроники закончится? Да, но только в классическом понимании.**

Следующим шагом станет переход к межкомпонентным соединениям оптоэлектронных корпусов. По мере

того, как электроника на основе транзисторов и межсоединений завершает свое существование, ожидается, что квантовая электроника начнет свое развитие. Концепция развития квантовых вычислений согласно проекции закона Мура на квантовые технологии показана на **рис 1**.

### Новый взгляд на электронику: закон Мура все еще жив или это всего лишь небольшое продление его жизни?

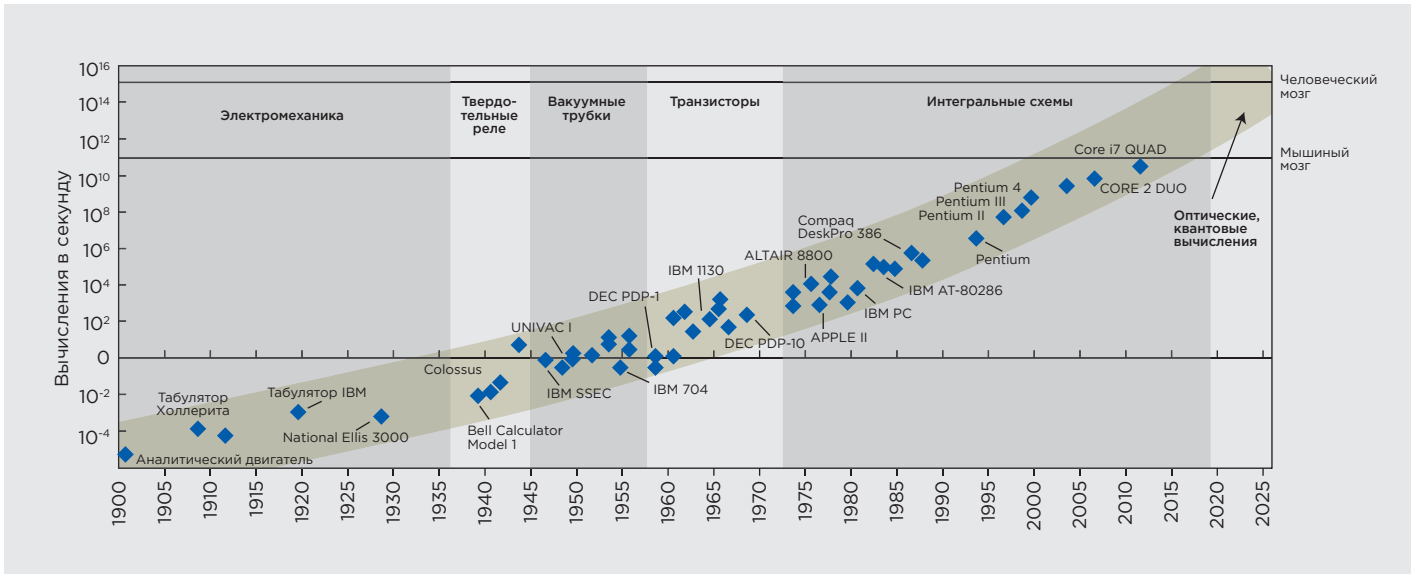
Переход от уменьшения размеров транзисторов и увеличения их количества в одной микросхеме был «двигателем» закона Мура долгое время. Но со временем потребовалось его развитие в вертикальной плоскости.

#### Т 1

Девять причин заменить закон Мура

- 1 Ток утечки – одно из фундаментальных ограничений, которое достигло своего предела
- 2 Увеличение количества транзисторов на единицу площади с 20 млн в настоящее время до 50 млн в будущем, что приведет к снижению производительности и повышению стоимости
- 3 Постоянный рост стоимости создания фабрики для работы с полупроводниковыми пластинами при переходе на меньшую топологическую норму
- 4 Снижение производительности межсоединений на одном кристалле из-за увеличения задержки RC-цепей
- 5 Производительность системы будет снижаться по сравнению с ростом производительности отдельного устройства из-за увеличения длины межсоединений в сравнении с размерами топологической нормы
- 6 Необходимость иного подхода к будущей вычислительной архитектуре в сравнении с текущими логическими устройствами и устройствами памяти
- 7 Увеличение вычислительной мощности за счет увеличения исключительно количества транзисторов
- 8 Достижение более высокой производительности при снижении энергоэффективности
- 9 Возникающие вариации гетерогенной интеграции, требующие абсолютно иного подхода, чем описано в классическом законе Мура

<sup>1</sup> Закон Мура (Moore's law) – эмпирическое наблюдение, изначально сделанное Гордоном Муром, согласно которому (в современной формулировке) количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца.

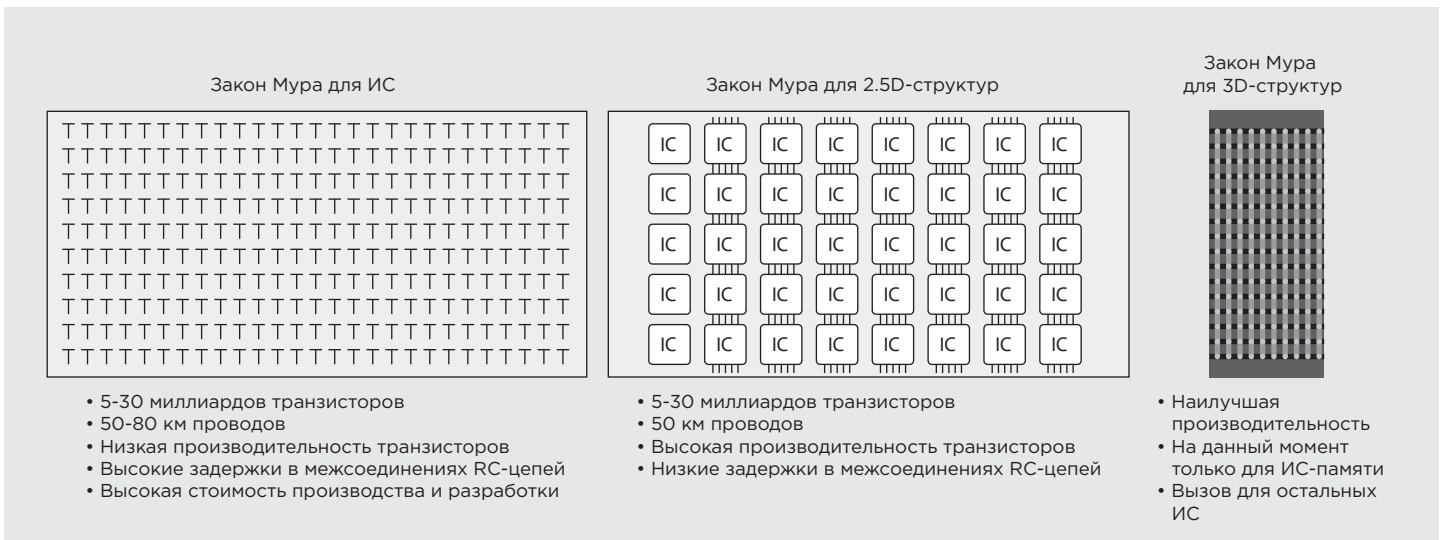


**1** Производительность вычислений, определяемая законом Мура и технологиями, принятыми после закона Мура. Источник: Ray Kurzweil, “The Singularity is near: when humans transcend biology”, p.67, The Viking Press, 2006. Datapointe between 2000 and 2012 represent BSA estimates

Для этого было необходимо увеличение количества «этажей» в электронной системе – формирование 3D-структур. Основой последнего подхода стало использование все большего количества межсоединений между функциональными чипами. Этот подход виден только в краткосрочной перспективе в отличие от квантовых вычислений, которые сулят развитие электроники в долгосрочном горизонте. Итак, на сегодняшний день интеграция чипов, содержащих по 20 миллиардов транзисторов в каждом, и есть основа закона Мура для ИС, но это тупиковая ветвь развития. Для дальнейшего движения необходим абсолютно новый подход. В краткосрочной перспективе это включает новые парадигмы в соединении электронных и оптоэлектронных корпусов в 2D, 2.5D и 3D (рис 2). Раньше в первую оче-

редь фокусировались на масштабировании транзисторов, теперь это масштабирование пакетов и систем. Оно сосредоточено на миниатюризации активных и пассивных компонентов и их соединений для формирования модулей и систем.

Как классический закон Мура предусматривает удвоение количества транзисторов и одновременное снижение их стоимости каждые 18-24 месяца, закон Мура для 3D-структур с использованием межкомпонентных соединений предлагает то же самое. Все межсоединения управляются вычислительными системами, а внутреннее взаимодействие вычислительных систем (взаимодействие между логикой и памятью) осуществляется в соответствии с архитектурой фон Неймана. Новая эра искусственного интеллекта, имитирующего челове-



**2** Закон Мура для ИС, 2.5D и 3D-структур. Источник: <https://chipscalereview.com/>

ский мозг с более высокой вычислительной производительностью при меньшем энергопотреблении, является еще одной причиной завершения классического закона Мура.

Человеческий мозг – это совершенная система межсоединений, обеспечивающая высочайшую производительность при наименьшем размере с наименьшим энергопотреблением. И это новый стандарт масштабирования системы и межсоединений, а также эффективности вычислений с точки зрения производительности и мощности – это намного больше, чем могут дать современные трехмерные электронные архитектуры. Типичный человеческий мозг имеет около 90 миллиардов нервных клеток, связанных между собой триллионами синапсов, что обеспечивает триллионы путей для обработки информации мозгом, а также петабайт памяти. Электроника сегодня – это более 200 000 соединений. Следовательно, новый закон Мура должен дублировать архитектуру человеческого мозга.

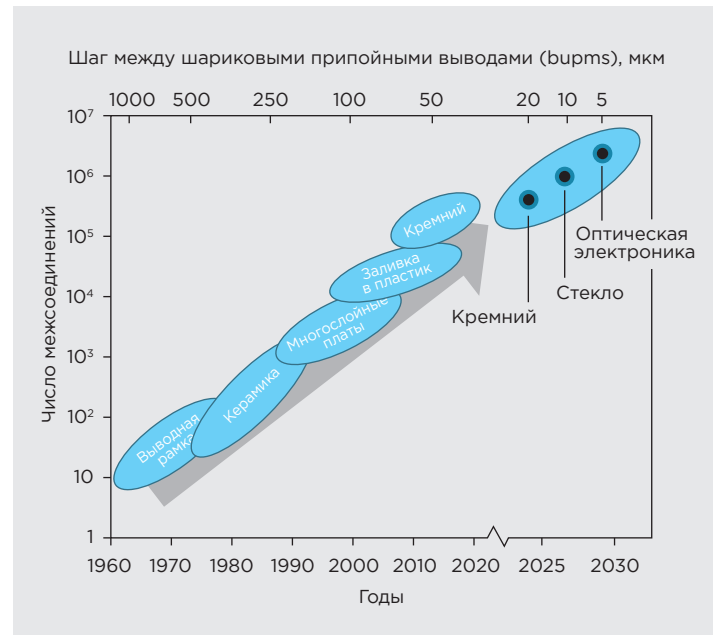
Закон Мура для 2.5D и 3D-структур (межсоединений в корпусировании) исторически значительно эволюционировал. Все началось с двухрядных керамических корпусов в 1970-х годах с 16 входами/выходами. Далее, в 1980-х годах, появились пластиковые четырехрядные плоские корпуса с 64 входами/выходами. Еще десятилетие спустя, в 1990-х годах, – керамические корпуса с количеством операций ввода-вывода более 1000. Но на этом «эволюция» не закончилась. Были разработаны системы для обработки встроенных пакетов с более чем 20 000 операций ввода-вывода, а также встроенных пакетов, приближающихся к 200 000 операций ввода-вывода.

Искусственному интеллекту, имитирующему человеческий мозг, может потребоваться на несколько порядков больше.

В настоящее время используются различные виды современного корпусирования. Давайте разберемся, какими возможностями обладают основные технологии корпусирования, и чего в итоге можно ожидать от квантовой электроники.

### Кремний – лучшее решение для современного корпусирования или все же нет?

Сегодня технология современного корпусирования с использованием кремниевых межсоединений (интерпозеров) является самой современной многоуровневой системой – «упаковкой» или «корпусом», если судить по количеству операций ввода-вывода. Следовательно, закон Мура для межкомпонентных соединений в настоящее время применяется в технологии корпусирования на уровне кремниевых пластин. К сожалению, у данной технологии есть один существенный минус – старение «корпусов», что влечет за собой множество ограничений



3 Закон Мура для современного корпусирования или новый подход к закону Мура в настоящий момент. Источник: <https://www.accessengineeringlibrary.com/>

по используемым материалам, получаемым устройствам, типам межсоединения и подходу к организации многоуровневой системы (рис 3).

Если рассматривать кремний как материал, то он имеет ограничения – сверхвысокие потери и высокую диэлектрическую проницаемость (11,4). Его применение также ограничено размерами пластин 300 мм по сравнению с обычными корпусами и системными платами, которые производятся в виде больших панелей обычно около 500-1000 мм. Вопрос по использованию 450 мм пластин еще до конца не проработан, и окончательное решение ведущими производителями ИС не принято, так как оборудование для работы с такими размерами – крайне дорогостоящее и требует полного переоснащения существующих производств. Кроме того, кремниевые структуры для корпусирования необходимо утонять от толщин 800 мкм до 30-100 мкм, что вызывает дополнительные проблемы для серийного производства. Кремниевые подложки обладают коэффициентом теплового расширения (ТКР) в 3 PPM/°C. Пусть они идеально подходят для ИС, но при этом абсолютно не соответствуют ТКР плат и подложек из органических материалов, у которых коэффициент термического расширения ~17 PPM/°C. Это, в свою очередь, требует дополнительных компенсационных слоев в многоуровневых системах между кремниевыми и органическими слоями.

На уровне межсоединений кремниевые «корпуса» обычно производятся с использованием литографических материалов и процессов BEOL, которые позволяют получать субмикронные размеры и достаточно толстые

структуры. Эти структуры обладают очень высоким сопротивлением и паразитными емкостями, что способствует возникновению так называемых RC-задержек, влияющих на конечные характеристики ИС, а особенно на их полосы пропускания. Но несмотря на эти нюансы почти все высокопроизводительные 3D-структуры (EMIB от Intel, Fiji от AMD и Nvidia), которые применяются для создания искусственного интеллекта, облачных вычислений и высокопроизводительных серверов, используют в своей основе кремниевые структуры.

### **Корпусирование на стеклянной основе – следующий шаг в современном корпусировании**

Корпусирование с использованием стекла впервые было разработано компанией Georgia Tech и ее многочисленными отраслевыми партнерами как лучшая «упаковка» (корпус) следующего поколения для преодоления недостатков кремния. Стекло, как материал, превосходит кремний по электрическим параметрам, диэлектрической проницаемости, возможности изменения ТКР от 3 до 9 PPM/°C, а также по производству и доступности ультратонких и сверхбольших размеров без необходимости утонения, шлифовки и полировки. На уровне межсоединений были разработаны материалы и процессы, позволяющие минимизировать задержки RC-цепей с более низкими сопротивлением и уровнем перераспределения емкости. На уровне системы (3D-структуры) такие стеклянные материалы могут быть непосредственно собраны как с кремниевыми ИС, так и с платами из органических материалов без дополнительных слоев.

Ряд новых элементов современного корпусирования, разработанный консорциумом Georgia Tech, включает обработку больших панелей (размером более 500 мм), разработку инструментов для литографии размером 1 мкм, полимерные диэлектрические материалы с низкой диэлектрической проницаемостью и процессы по получению высоких соотношений сторон проводников с более низким сопротивлением и высокой степенью планарности без химико-механической полировки, а также барьерные металлы для улучшения электромиграции близкорасположенных проводников. Кроме того, новая архитектура 3D-структур (3DGPE), которая развивает направления создания 3D-структур за счет встраивания сверхкоротких межсоединений и соединений с низким RC-потерями, помогает достичь более высокой пропускной способности, чем при использовании кремниевых интерпозеров.

### **Оптоэлектронное корпусирование – следующий шаг в современном корпусировании?**

Фотоника долгое время рассматривалась для решения задач по обеспечению

более широкой полосы пропускания при меньшей необходимой для этих целей затрачиваемой мощности, в меньших и более легких «упаковках», чем решения на основе электронных компонентов, при этом также обеспечивая невосприимчивость к электромагнитным помехам.

Фотонные технологии используются не только для волоконно-оптических линий связи, но и для межсетевых соединений. По мере того, как электронные компоненты и классические микроэлектронные технологии достигали пределов полосы пропускания из-за ограничений закона Мура, оптоэлектроника становилась необходимым решением для достижения полосы пропускания до 1 Пбит/с. В оптоэлектронике есть много способов улучшить полосу пропускания, включая мультиплексирование: большее количество связей на один оптический канал, мультиплексирование с разделением по длине волны (подход, который использует несколько длин волн в одной и той же среде), а также метод амплитудно-импульсной модуляции – предоставляет больше бит за то же время. Несмотря на множество способов изготовления модулей оптоэлектроники, наиболее желательной является технология с использованием кремния, как хорошо изученного материала в микроэлектронике. Это называется кремниевой фотоникой, при которой электронные и фотонные устройства интегрируются в один кремниевый кристалл с использованием технологий изготовления КМОП. Хотя у этой технологии есть много преимуществ, в том числе меньший размер (ширина волновода 400 нм) и отработанное десятилетиями производство КМОП-структур, фотонные процессы также имеют множество проблем, например, соединение волокон и невозможность использования кремния в качестве активного материала для генерации лазерного излучения, что требует альтернативных источников света на кремниевых структурах.

### **Квантовая электроника – будущее всей микроэлектронной отрасли**


Квантовая физика на протяжении десятилетий была отраслью физики со многими областями исследований, включая квантовую химию, квантовое моделирование, квантовое машинное обучение, квантовые алгоритмы и квантовые коммуникации. Квантовые вычисления были предметом исследований более двух десятилетий.

По мере того, как электроника, управляемая законом Мура, начинает «увядать» с точки зрения ее способности обеспечивать увеличение вычислительных процессов при более низкой потребляемой мощности, ученые из IBM начали исследовать квантовые устройства. В отличие от современных цифровых систем, которые запрограммированы с помощью битов с единицами данных либо 0, либо 1, квантовые компьютеры используют кубиты, которые могут представлять комбинацию как

0, так и 1 одновременно на основе принципа суперпозиции. Эта разница делает квантовые компьютеры экспоненциально быстрее, чем современные мэйнфреймы и серверы.

Кроме того, квантовые компьютеры могут выполнять несколько вычислений с несколькими входами одновременно в отличие от современных компьютеров, которые обрабатывают только один набор входных данных и одно вычисление за один раз. Например, с 50 кубитами вычислительная мощность может составлять от 2 до 50, т.е. может выполняться от 2 до 50 вычислений одновременно. Когда будут достигнуты 1000 кубитов, вычислительная мощность составит от 2 до 1000. В настоящее время количество кубитов составляет около 50, но даже при таких малых числах вычислительная мощность значительно превосходит лучшие суперкомпьютеры при гораздо меньшей потребляемой мощности. Сегодня наиболее заметными и доминирующими компаниями в данных разработках являются IBM, Microsoft и Google, а все крупные полупроводниковые и системные компании имеют большие внутренние программы по развитию квантовых технологий и вычислений. Применение квантовых вычислений: быстрые исследования и разработки в области химических и фармацевтических материалов с моделированием; получение супервычислительной мощности автономных транспортных средств с квантовым искусственным интеллектом для снижения количества смертельных случаев до нуля; устранение проблем кибербезопасности.

Ожидается, что квантовые компьютеры будут разрабатываться по закону Мура каждый год на протяжении нескольких десятилетий. Сегодня это 50 кубит и примерно 10 000 кубит к 2030 году. Amazon Web Services, Microsoft Azure, IBM и другие уже объявили о своих «квантовых предложениях» на рынке. Первоначально внедрение квантовых вычислений будет гибридным подходом, в котором одна часть проблемы будет решаться с помощью классических вычислений, а другая – с помощью квантового искусственного интеллекта. Подражание работе человеческого мозга станет лучшим результатом работы искусственного интеллекта.

Давайте вместе следить за развитием мировых квантовых технологий, а особенно за становлением и развитием квантового компьютера в России, в процесс создания которого в настоящее время вовлечены и ведущие ВУЗы нашей страны. 

### **В статье использованы материалы:**

1. G. E. Moore, "Cramming more components into integrated circuits," *Electronics*, 38(8), 1965.
2. <http://www.yole.fr/>
3. <https://chipscalereview.com/>
4. Post-Moore's Law electronics: now, until quantum electronics By Rao R. Tummala. *Chip Scale Review* March, April, 2020.