

КРИЗИС КРЕМНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

П.А. КУПЧЕНЯ

*Учреждение образования Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
филиал Минский радиотехнический колледж*

Аннотация. В статье анализируются ограничения кремниевых технологий, приведшие к кризису масштабирования в микроэлектронике. Рассматриваются перспективы преодоления этих барьеров за счёт новых материалов и архитектур, включая 3D IC, нейроморфные и квантовые решения. Делается вывод о необходимости комплексной технологической трансформации отрасли.

Кремний на протяжении десятилетий являлся основой микроэлектронной промышленности. Его физико-химические свойства, зрелая технология очистки и доступность сделали возможным экспоненциальный рост производительности полупроводниковых приборов. Однако к началу 2020-х годов индустрия вплотную подошла к пределам масштабирования кремниевых технологий, что породило феномен, условно называемый "кризисом кремния". Данная работа рассматривает природу этого кризиса, а также возможные пути дальнейшего развития микроэлектроники.

Масштабирование транзисторов в соответствии с законом Мура сопровождалось снижением критических размеров, вплоть до технологических узлов 3–2 нм. Однако с уменьшением размеров начинают проявляться фундаментальные физические ограничения: туннелирование через истончающиеся диэлектрики, рост токов утечки, увеличение плотности тепловыделения и паразитных емкостей. При этом дальнейшее снижение напряжения питания ограничено требованиями к соотношению сигнал/шум и устойчивости логических состояний. Использование новых архитектур, таких как FinFET и GAAFET, временно отодвинуло эти пределы, но не устранило их корневых причин. К тому же, стоимость производства возрастает экспоненциально, что сдерживает массовое внедрение.

Современное производство микросхем требует экстремально высокой точности, в частности, за счёт внедрения EUV-литографии. Это влечёт за собой колоссальные затраты на оборудование, разработку фоторетикл и освоение новых технологических процессов. Только крупнейшие производители, такие как TSMC, Intel и Samsung, способны финансировать переходы на новые техпроцессы. Геополитические факторы (например, санкции, торговые войны и дефицит чипов в 2020–2022 гг.) усиливают уязвимость глобальных цепочек поставок. Стремление к технологическому суверенитету наблюдается в ряде стран, в том числе в России и Китае, что может привести к регионализации отрасли и усилению конкуренции в области технологий 28–14 нм.

Рассматривая перспективы выхода из кремниевого тупика, необходимо обратиться к альтернативным полупроводниковым материалам. В первую очередь — это карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN), применяемые в силовой электронике и СВЧ-устройствах благодаря высокой теплопроводности и широкой запрещённой зоне. Их использование позволяет повысить эффективность преобразователей

мощности и радиочастотных усилителей. Для ЦПУ и логических схем перспективны двумерные материалы, такие как графен и дисульфид молибдена (MoS₂), а также гетероструктуры на основе III–V соединений (InGaAs, GaAs). Технологии на их основе пока не достигли зрелости, однако демонстрируют высокую подвижность носителей и потенциал для сверхмалых транзисторов.

Существенные ожидания возлагаются на трёхмерные интегральные схемы (3D IC), позволяющие существенно повысить плотность размещения элементов без снижения критических размеров. Компании AMD и Intel уже демонстрируют коммерческие продукты с вертикальной укладкой кристаллов (например, 3D V-Cache, Foveros). Ещё одним вектором являются нейроморфные вычисления, где архитектура имитирует нейронные связи мозга, обеспечивая энергоэффективность при решении задач искусственного интеллекта. Примером могут служить чипы Intel Loihi и разработки IBM TrueNorth. Квантовые вычисления, несмотря на раннюю стадию развития, теоретически обеспечивают экспоненциальный выигрыш в вычислительной мощности в отдельных задачах, таких как факторизация или моделирование молекулярных систем. Вместе с этим ведутся разработки фотонных чипов, использующих свет вместо электронов, что теоретически позволяет увеличить скорость передачи данных и снизить тепловые потери.

Кризис кремния не следует воспринимать как конец эры микроэлектроники, а как стимул к трансформации. Очевидно, что одной лишь миниатюризацией проблема не решается. Будущее отрасли — за многоуровневыми решениями: использованием новых материалов, архитектур и методов обработки информации. Успех будет определяться интеграцией усилий науки, промышленности и государственной политики. В ближайшие десятилетия мы, вероятно, станем свидетелями перехода от традиционной кремниевой электроники к гибридным системам, сочетающим различные материалы и вычислительные парадигмы. В этом контексте особую роль играют университеты, научные центры и государственные программы, направленные на развитие суверенных технологических платформ и устойчивых цепочек поставок.

Список использованных источников

- [1] Zhang, Y. Future of Transistors: Expert Assessment of Key Challenges and Opportunities / Y. Zhang, A.D. Franklin // *Nature Electronics*. – 2020. – Vol. 3, № 5. – P. 274–280.
- [2] Radosavljevic, M. Gate-All-Around Transistor Scaling: The Next Evolution in CMOS / M. Radosavljevic [et al.] // *IEEE Electron Device Letters*. – 2018. – Vol. 39, № 9. – P. 1401–1404.
- [3] Красильников, А.Б. Основы наноструктурной электроники / А.Б. Красильников. – М. : Техносфера, 2019. – 336 с.
- [4] Электроника: наука, технология, бизнес. – 2023. – № 2. – С. 15–27.
- [5] Министерство промышленности и торговли РФ. Аналитический доклад по состоянию и перспективам отечественной микроэлектроники на 2023 год / Минпромторг РФ. – М. : Минпромторг, 2023. – 46 с.
- [6] IEDM 2022. IEEE International Electron Devices Meeting : abstracts and presentations. – San Francisco : IEEE, 2022. – 187 p.