

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

*Петрович Д.А.*

*Институт информационных технологий БГУИР,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Скудняков Ю.А. - доцент каф. ПЭ, к.т.н., доцент*

В данной работе рассматривается состояние технологии производства в области микроэлектроники в настоящее время и перспективы развития технологии производства в будущем.

Проблеме разработки, производства и развития микроэлектронных средств посвящено множество публикаций, к которым, в частности, можно отнести работы [1 – 4].

В настоящее время ведущие производители микроэлектронных компонентов, такие как Intel, Global Foundries (бывшие AMD), TSMC стремятся соответствовать тенденции, заложенной еще в 1965 году Гордоном Муром. Закон Мура гласит, что каждые два года количество транзисторов на кристалле должно увеличиваться вдвое, а значит линейные размеры транзисторов должны уменьшаться в корень из двух раз. Наиболее простая и грубая формулировка методов реализации закона Мура (также известная как закон миниатюризации Деннарда) — рост числа транзисторов на чипе не должен приводить к росту плотности потребляемой мощности, то есть с уменьшением размеров транзисторов должны пропорционально уменьшаться напряжение питания и рабочий ток.

Численная оценка технологии и уровня производства сводится к одной величине, заложенной еще на этапе зарождения производства микропроцессоров, - длине канала полевого транзистора, так называемого затвора. Длина канала всегда была самым маленьким размером в топологии микросхемы, и самым логичным обозначением проектных норм. Также, для сравнения уровня технологии производства приводят информацию о площади транзисторной ячейки памяти — самого популярного строительного блока микропроцессоров.

Стремление к уменьшению минимальных размеров транзисторов является необходимостью, которая выражается в уменьшении потребляемой мощности и увеличении производительности. Так к примеру, у чипов, выполненных по 5-нм технологии есть ряд преимуществ, по сравнению с 7-нм. При одинаковой сложности, плотность транзисторов в обновленных микросхемах будет в 1,8 раз выше, а тактовая частота увеличится на 15%. При этом 5-нм процессор будет потреблять на 20% меньше энергии, чем 7-нм. Однако, при этом, согласно фундаментальным законам физики, необходимо учитывать предельные минимальные размеры. Кроме того, уменьшение длины канала приводит к тому, что носители заряда начинают свободно попадать из истока в сток, минуя канал и формируя ток утечки (badcurrent), создающий статическое энергопотребление. Стоимость разработки и производимого оборудования так велика, что ряд производителей отказывается от дальнейшей работы по микроминиатюризации элетронной техники.

Несмотря на трудности связанные с производством чипов по 7-нм технологии, ее разработку продолжают вести фирмы TSMC, Intel и Samsung.

Для уменьшения размера элементов приходится идти на многие ухищрения, так как достигнуть размеров, меньших 25-20 нм, без технологического прорыва не представляется возможным.

В настоящее время, для решения проблем уменьшения минимальных размеров транзисторов был предложен ряд технических решений. Технология «кремний на изоляторе» (КНИ) известна уже очень давно (она активно применялась все эти годы, например в 130-32-нм процессорах AMD, 90-нм процессоре приставки Sony Playstation 3, а также в радиочастотной, силовой или космической электронике), но с уменьшением проектных норм она получила второе дыхание.

Технология с полевыми транзисторами Fin FET (Fin Field Effect Transistor), позволяет получить у таких транзисторов не плоский канал, а находящийся прямо над поверхностью подложки и образующий вертикальный плавник (Fin - плавник), выступающий над поверхностью и с трех сторон

окруженный затвором. Впервые на основе технологии Fin FET полевые транзисторы серийно были произведены фирмой Intel на проектных нормах 22-нм, позже подтянулись остальные производители, включая Global Foundries (бывшие AMD).

В основе 7-нм техпроцесса первого поколения компании TSMC лежит DUV-литография (deep ultra violet — DUV) с «глубоким» ультрафиолетовым излучением. При этом используется иммерсионная литография и сканеры с длиной волны 193 нм. Инженеры использовали для разработки чипов фотолитографию в «жестком» ультрафиолете (DUV). В этом случае длина волны оказывается в двадцать раз меньше и составляет 13,5 нм. Переход на DUV (совместно с развитием методов моделирования и обнаружения дефектов и других процессов) снизил энергопотребление производимых микросхем на 8% и увеличил плотность транзисторов на 20%, по сравнению с технологией первого поколения.

Есть и альтернативная технология: экспонировать фоторезист не светом, а электронным пучком — получается электронная литография. Этим направлением с 2012 года занимается компания Mapper Lithography.

Оборудование для DUV-литографии, нанолиты, редкие материалы, вроде рутения, — все эти вещи стоят недешево, но без некоторых из них уже сложно обойтись. Чтобы окупить инвестиции в производство, нужно выпускать как минимум по 150 миллионов чипов в год. Поэтому реализация 7-, 5-, 3- и 2-нм процессов может оказаться коммерчески невыгодной.

Теперь же для дальнейшего развития технологии производства микроэлектронной техники требуется совершенно новый подход. Директор компании TSMC Марк Лиу назвал наиболее перспективным направлением развития микроэлектронной технологии не уменьшение размеров транзисторов, а 3D-интеграцию. Настоящая 3D-интеграция, а не объединение нескольких чипов в одном корпусе, действительно будет огромной вехой в развитии микроэлектроники, но вот закон Мура как закон уменьшения размеров транзисторов, кажется, теряет актуальность.

Закон Мура исчерпал себя уже довольно давно, и если десять лет назад ответ на вопрос: «Что дальше?» можно было найти в отчетах исследовательских центров, то сейчас имеет место проблема осуществления дальнейших перспективных разработок, так как они оказываются чрезмерно сложными во внедрении. Так уже произошло с пластинами диаметром 450 миллиметров, частично происходит и с DUV-литографией, которая совершенствуется на протяжении уже 20 лет. Также сейчас нет технологических возможностей для создания серийного производства транзисторов на графене и углеродных нанотрубках.

Что же касается предприятий микроэлектроники, расположенных на территории СНГ, то, например, российская микроэлектроника в последние годы существенно ожила — как в плане производства (90 и 180 нм на Микроне, 350 нм на Интеграле), так и разработки. Сейчас уже есть возможность разработать и произвести любую промышленную, военную и космическую продукцию — процессоры, микроконтроллеры, силовую электронику, радиационно-стойкие микросхемы, микросхемы для радиосвязи, ГЛОНАСС и системы радиолокации. В микроэлектронике нет «устаревшего» производства, продукция по любым нормам имеет свой рынок и цену. Даже советские заводы до сих пор работают на экспорт, выпуская микросхемы питания, дискретные элементы (силовые транзисторы и диоды), которые широко используются в системных платах компьютеров, сотовых телефонах и других устройствах под зарубежными торговыми марками.

**Список использованных источников:**

1. Проектные нормы в микроэлектронике: где на самом деле 7 нанометров в технологии 7 нм? [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <https://habr.com/ru/post/423575/>. – Дата доступа: 10.03.2019.
2. Новые техпроцессы для производства микросхем все чаще откладываются — почему? [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <https://habr.com/ru/company/it-grad/blog/422501/>. – Дата доступа: 09.03.2019.
3. 5-нм на подходе — когда ждать новый техпроцесс [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <https://habr.com/ru/company/it-grad/blog/427193/>. – Дата доступа: 09.03.2019.
4. Малышева, И.А. Технология производства интегральных микросхем, М., Радио и связь, 1991.