

А.А. Грибков

Технологические и макроэкономические факторы развития микроэлектронного производства в России

УДК 338.5

Аннотация. Исходя из необходимости создания отечественного производства интегральных микросхем и полупроводниковых приборов в условиях действующих санкций, в статье рассматриваются основные факторы, от которых зависит развитие микроэлектронного производства в России. Проведен критический анализ текущих мировых технологических трендов, зависимости используемых технологий от объемов производства и доступности рынков сбыта. Выявлена экономическая целесообразность при текущих и доступных в краткосрочной перспективе объемах производства в России использования в качестве основного материала для микроэлектроники 100-мм пластин. Показано, что реализация долгосрочных тенденций развития микроэлектронного производства в условиях 4-й и 5-й промышленных революций приведет к росту значимости малоразмерных пластин.

Ключевые слова: микроэлектроника; интегральные микросхемы; проектные нормы; полупроводниковые пластины; себестоимость; промышленная революция

Введение

Необходимым условием обеспечения технологической безопасности, обороноспособности и глобальной конкурентоспособности России в настоящее время является обладание компетенциями в области микроэлектроники, а также наличие собственного производства основных типов микроэлектронной продукции и необходимого для этого технологического оборудования.

Отметим, что в настоящее время комплекс отраслевых технологий и производств мировой микроэлектронной промышленности (в состав которой нередко включают также изготовление технологического оборудования) формируется в рамках международного разделения труда. Ни одна страна в мире не обладает полным набором компетенций и производств, необходимых для выпуска всех типов микроэлектронной продукции.

Для США и аффилированных с ними в рамках НАТО других международных организаций государств (в их число входят большинство европейских стран, Япония, Южная Корея и др.), рассредоточение микроэлектронных компетенций среди фактических партнеров и союзников не представляет угрозы. Тем не менее определенные усилия по расширению компетенций в отдельных странах имеют место. В частности, в США реализуются планы по созданию собственного производства микросхем. На конец 2025 г. запланирован запуск завода Intel в штате Огайо¹. Это послужит снижению импортной зависимости США от Тайваня и Южной Кореи.

Проблема локализации микроэлектронного производства для России в последнее время чрезвычайно обострилась. Интеграция нашей страны в мировое распределение труда в условиях масштабных антироссийских санкций со стороны коллективного Запада становится практически нереализуемой, доступ ко многим видам товаров и технологий закрывается. В частности, существенно снижаются масштабы импорта микроэлектронной продукции.

Если в 2021 г. российский импорт микроэлектронной продукции (интегральных микросхем и полупроводниковых приборов) составил 2,044 млрд долл.,² то в 2022 г., после ужесточения санкций, он, согласно официальным данным, сократился более чем вдвое. С 2022 г. Россия не публикует данные таможенной статистики, поэтому изменения объемов импорта приходится оценивать по изменению экспорта микроэлектронной продукции из стран мира в Россию. Если в 2021 г. объем этого экспорта составлял 1,702 млрд долл., то в 2022 г. он снизился до 778 млн долл.³ Данные отечественных экспертов в области внешней торговли менее пессимистичные. В частности, газета «Коммерсант» приводит оценку⁴, согласно которой поставки микросхем в 2022 г. в стоимостном выражении выросли в два

¹ Exclusive: Intel Reveals Plans for Massive New Ohio Factory, Fighting the Chip Shortage Stateside. 2023 TIME USA, LLC. URL: <https://time.com/6140476/intel-building-factory-ohio/>

² Федеральная таможенная служба Российской Федерации. Выгрузка данных. URL: <http://stat.customs.ru/unload>

³ International Trade Centre. URL: <https://www.trademap.org/index.aspx>

⁴ Корнев Т. Чипы держатся за российский рынок // Коммерсантъ № 44 от 16.03.2023. С. 7. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5875593>

раза (до 2,1 млрд долл.) при снижении физических поставок на 19% (до 511 тыс.).

В сложившихся условиях очевидна необходимость создания в России собственного микроэлектронного производства, в минимальной степени интегрированного в мировую экономику и способного обеспечить базовые внутренние потребности. Практической реализации планов развития микроэлектронного производства в России должно предшествовать определение контуров формируемой отрасли, ключевых направлений ее развития.

Анализ современного микроэлектронного производства, основой которого являются несколько компаний – мировых лидеров с огромными объемами выпуска продукции [Зеленский и др., 2021], в том числе ведущего мирового производителя – тайваньской компании TSMC⁵, дает основания для формулирования ряда взаимосвязанных вопросов, ответы на которые имеют большое значение для определения планов развития микроэлектронной отрасли в России.

1. Что является стимулом активного развития микроэлектронных технологий, в том числе в направлении перманентного уменьшения используемых проектных норм? Принадлежит ли здесь ключевая роль соображениям технологической необходимости и стремлению удовлетворить реально существующие потребности экономики и рынка, либо имеет место гонка за максимизацией прибыли, подталкиваемая искусственно создаваемым ажиотажным спросом на товары (в частности, различные гаджеты), потребительские свойства которых не требуют столь частого изменения или улучшения?

2. Каким образом соотносятся технологии, лежащие в основе современного производства компаний – мировых лидеров микроэлектроники, и объемы рынка, на который ориентировано производство? Возможно ли, что для локального рынка (например, внутреннего рынка России) приоритетными могут быть иные технологии?

3. Соответствуют ли текущие мировые тренды развития микроэлектронных технологий долгосрочным тенденциям развития производства в условиях четвертой и пятой промышленных

⁵ TSMC Annual Report 2022 (1). Printed on: March 12, 2023. Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Ltd. URL:

революций? В частности, как согласуется массовый характер производства интегральных микросхем с персонализацией потребления? Не является ли неизбежным переход к мелкосерийному выпуску продукции с соответствующим ростом эффективности использования менее тонких проектных норм и пластин меньшего диаметра?

Мировые тенденции развития микроэлектронных технологий

Структура мирового производства по диаметрам пластин, используемым проектным нормам и направлениям реализации в настоящее время выглядит следующим образом.

Согласно данным консалтинговых исследований^{6,7,8}, основная часть имеющихся в мире мощностей по производству полупроводниковых пластин предназначена для выпуска 300-мм пластин (66% мощностей от 20,8 млн эквивалентных 200-мм пластин в месяц). Мощности по производству 200-мм пластин втрое меньше (22%), для производства 150-мм пластин предназначено 7% мощностей, малоразмерных (менее 150 мм) – 5%.

Распределение мирового производства интегральных микросхем по проектным нормам в стоимостном выражении выглядит примерно так⁹: свыше 180 нм – 19%, 100–180 нм – 19%, 55–90 нм – 9%, 28–45 нм – 13%, 10–22 нм – 37%, менее 10 нм – 2%.

В продажах ведущего мирового производителя интегральных микросхем – тайваньской компании TSMC¹⁰ преобладает продукция, изготовленная по проектным нормам 5 нм (25,5% от 2,26 млрд долл. общего объема выпуска в 2022 г.) и 7 нм (26,9%). На микрочипы от 28 до 10 нм приходится 23,8% выпуска,

⁶ Installed Capacity for 300mm Wafer Processing Forecast to Rise to 70% of Total Capacity by 2017 / IC Insights, Inc., 2013. URL: <https://www.icinsights.com/data/articles/documents/568.pdf>

⁷ Analyze the key factors and prospects of electronic components shortage from the perspective of wafer industry / SemiMedia, 2018. URL: <https://www.semimedia.cc/?p=1934>

⁸ 6” and Below: Small-Dimension Wafer Market Trends / Yole Group of Companies. i-Micronews, 2020. URL: <https://www.i-micronews.com/products/6-and-below-small-dimension-wafer-market-trends-2020/>

⁹ Extraordinary semiconductor cycle triggered by one-time events, cyclical and geopolitical effects. Deutsche Bank Research. 2022. https://www.dbresearch.com/PROD/RPS_EN-PROD/PROD000000000522983/

¹⁰ TSMC Annual Report 2022 (1). Printed on: March 12, 2023. Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Ltd.

от 65 до 40 нм – 12,0%, 90 нм и более – 11,8%. Используются они в основном при изготовлении систем высокопроизводительных вычислений (41% реализованной продукции по стоимости) и смартфонов (39%). При этом на сегмент интернета вещей приходится всего 9% продукции компании, на автомобилестроение – 5%, на производителей бытовой электроники – 2,5%.

В какой мере наблюдаемое в мире развитие микроэлектронных технологий служит решению реальных потребностей рынка?

Тенденция постепенного увеличения диаметра пластин имеет экономическую основу и (при больших объемах и серийности производства) служит снижению себестоимости производства интегральных микросхем.

Тенденция перехода ко все более «тонким» проектным нормам – более сложная. С одной стороны, существенная часть микрочипов от 10 нм и менее используется для производства смартфонов, т.е. в рыночном сегменте с максимально управляемым (при помощи рекламы и других маркетинговых инструментов) спросом, слабо связанным с удовлетворением реальных потребностей. С другой – не менее значительный объем таких микросхем применяется в системах высокопроизводительных вычислений, т.е. эффективно служит удовлетворению реальных потребностей.

Однако так выглядит ситуация только на первый взгляд. В действительности наращивание производительности вычислений за счет совершенствования электронной компонентной базы (т.е. перехода ко все более «тонким» проектным нормам) – лишь одно из возможных направлений, носящее название «Больше Мура», причем не самое перспективное. Не меньший, а возможно, и больший потенциал имеет развитие по направлению «Больше, чем Мур», которое в настоящее время активно формируется, а также по направлению «За пределами Мура», которое обещает стать основным в долгосрочной перспективе.

Направление «Больше Мура» (More Moore, CMOS) соответствует реализации концепции, обеспечивающей выполнение так называемого закона Мура (а именно – удвоение числа транзисторов на кристалле интегральной схемы каждые 18–24 месяца без увеличения удельной стоимости функции для конечного потребителя).

Направление «Больше, чем Мур» (англ. More than Moore) концептуально нацелено на достижение больших результатов и в более широком диапазоне, чем изложено в законе Мура, ориентировано на разнообразные компоненты (аналоговые, радиочастотные, микроэлектромеханические системы, датчики, оптика и др.) и подразумевает новые конструктивные исполнения – как трехмерную интеграцию гетерогенных схем, так и деление чипа на чиплеты по функциональному принципу¹¹.

Направление «За пределами Мура» (англ. Beyond CMOS) объединяет наиболее передовые технологии, которые стали доступны в последние два десятилетия: спинтронику (электронику на основе спинов), молекулярную электронику и другие технологии, использующие новые переменные состояния (фотоны, фононы, наноструктуры, механическое состояние, сопротивление, квантовое состояние, магнитный поток и др.)¹².

Таким образом, можно констатировать, что преобладающим (но, конечно, не единственным) стимулом «гонки за нанометрами» является не решение конкретных технологических задач, связанных с удовлетворением реальных потребностей, а расширение рынков и максимизация прибылей производителей. Это означает, что участие в этой «гонке» вовсе не обязательно для обеспечения глобальной конкурентоспособности и технологической безопасности страны. Кроме того, необходимо принимать во внимание, что основная часть интегральных микросхем индустриального и военного назначения в настоящее время строится на сравнительно «толстых» проектных нормах (90 нм, 180 нм и более).

Себестоимость и объемы производства

В определяющей степени детализировать текущую и перспективную структуру потребления микроэлектронной продукции в России могут помочь три ключевых показателя: используемые в интегральных микросхемах проектные нормы, диаметр полупроводниковых пластин, положенных в основу микроэлектронного

¹¹ Состоялся научный совет ОНИТ РАН по теме «Больше Мура и больше, чем Мур». НИИМЭ, 09.04.2021. URL: <https://www.niime.ru/press-center/news/2048-sostoyalsya-nauchnyy-sovet-onit-ran-po-teme-bolshe-mura-i-bolshe-chem-mur/>

¹² On the convergences between More Moore, More Than Moore and Beyond CMOS / SILO. October 9, 2017. URL: <https://silotips/download/on-the-convergences-between-more-moore-more-than-moore-and-beyond-cmos#>

производства, а также состояние машиностроения в части производства технологического оборудования для микроэлектронной промышленности. При этом проблематика обеспечения микроэлектронного производства технологическим оборудованием неразрывно связана с выбором приоритетных (исходя из специфики потребления) проектных норм и диаметров пластин.

В настоящее время создание в России экономически эффективного производства интегральных микросхем, аналогичных по своим техническим характеристикам продукции ведущих стран мира, не представляется возможным. Это обусловлено существенным технологическим отставанием нашей страны в данной области, для преодоления которого необходимо развитие (или создание) в России группы интегрированных отраслей, куда наряду с собственно микроэлектронным производством входят специальная металлургия, химия, машиностроение и др. Еще одним препятствием является ограниченность внутреннего рынка. Даже минимальные масштабы производства на одном предприятии (25 тыс. пластин в месяц), при ориентации на использование наиболее распространенных в мире 300-мм пластин соответствуют выпуску продукции в объемах, кратно превышающих емкость отечественного рынка.

Оценочные расчеты автора, проведенные на основе мировых данных 10–20-летней давности, когда преобладающими проектными нормами были 90 и 65 нм [Бондарь, 2015; Макушин, 2005, 2009, 2014; Коник, 2008], для условных кристаллов площадью 280 мм², выполненных по проектным нормам 90 нм и примерно соответствующих им кристаллов площадью 146 мм², выполненных по проектным нормам 65 нм, показали (рис. 1 и 2), что экономическая эффективность использования тех или иных диаметров полупроводниковых пластин в существенной степени зависит от объемов производства. В частности, для рассматриваемых примеров 100-мм (4") пластины имеют наименьшую по сравнению с пластинами большего диаметра себестоимость продукции при объемах производства менее 4 млн кристаллов в год по проектным нормам 90 нм и менее 6 млн по проектным нормам 65 нм.

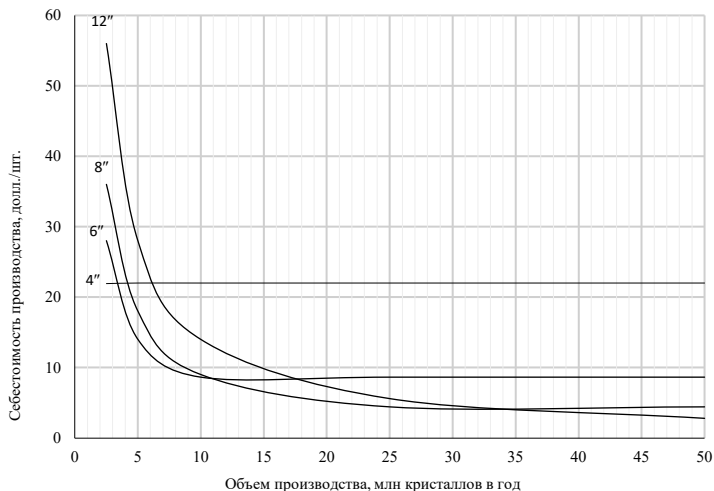


Рис. 1. Себестоимость производства кристалла (90 нм, 280 мм²), долл./шт.

При этом расчетные значения себестоимости оказываются значительно выше цен крупных мировых производителей. Например, у TSMC (производство на базе 300-мм пластин) стоимость кристалла площадью 280 мм² по норме 90 нм составляет менее 8 долл./шт. (из расчета 1650 долл. за пластину), а стоимость кристалла площадью 146 мм² по норме 65 нм – немногим более 5 долл./шт. (из расчета 1937 долл. за пластину)¹³. Такая низкая стоимость кристаллов становится возможной благодаря большим объемам производства, обусловленным широким доступом компании на мировые рынки. Согласно отчетности TSMC за 2022 год, ее продукция реализуется по всему миру: в США (65,9%), КНР (10,8%), самом Тайване (9,3%), а также в Японии (5,3%) и других странах¹⁴.

¹³ Известна стоимость кремниевых пластин TSMC в зависимости от используемого техпроцесса. URL: <https://i2hard.ru/publications/25819/>

¹⁴ TSMC Annual Report 2022 (1). Printed on: March 12, 2023. Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Ltd.

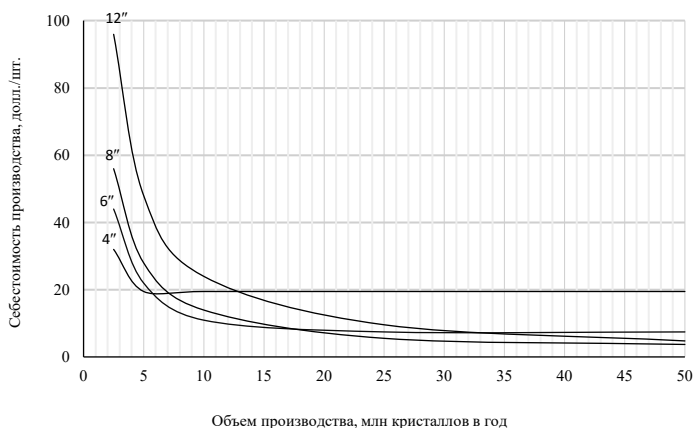


Рис. 2. Себестоимость производства кристалла (65 нм, 146 мм²), долл./шт.

На себестоимость производства оказывают влияние следующие факторы:

- число кристаллов на пластине: оно тем выше, чем больше диаметр пластины и меньше используемые проектные нормы;
- минимальный эффективный объем производства (число пластин в месяц) при переходе к большим диаметрам пластин немного увеличивается (с 10 тыс. для 100-мм пластин до 25 тыс. для 300-мм пластин);
- стоимость основных производственных фондов и, соответственно, необходимые затраты на их обновление растут по мере увеличения диаметра пластин, ежегодные расходы на обновление основных производственных фондов в ведущих мировых микроэлектронных компаниях (например, TSMC) составляют около 10% от их балансовой стоимости;
- при неполной загрузке производственных мощностей (например, связанных с ограниченностью рынка сбыта) растет доля постоянных производственных затрат в себестоимости продукции и, соответственно, снижается эффективность производства.

Текущий объем микроэлектронного производства в России составляет менее 10 тыс. эквивалентных 200-мм пластин в месяц. При этом реализуются проектные нормы не менее 180 нм. В результате общий объем российского производства – около

2,0–2,5 млн условных кристаллов (аналогичных рассмотренным в наших примерах), выполненных по проектным нормам 180 нм. В ближайшие несколько лет основной технологической нормой для российской микроэлектронной индустрии станет 90 нм. Это означает, что в краткосрочной перспективе с точки зрения экономической эффективности предпочтительным является использование 100-мм полупроводниковых пластин.

Текущие объемы российского производства, безусловно, не соответствуют внутренним потребностям страны и требуют активного наращивания, которое уже в среднесрочной перспективе составит десятки раз. Однако этот рост должен носить эволюционный характер, т.е. осуществляться согласованно с созданием и развитием всего комплекса технологий в самой микроэлектронной промышленности и связанных с ней отраслях.

Это означает, что переход к более «тонким» проектным нормам и большим диаметрам используемых полупроводниковых пластин будет происходить постепенно, по мере внедрения необходимых технологий во всем комплексе связанных производств. При этом в процессе эволюции характер производства (проектные нормы и диаметры пластин) в основном будет удовлетворять требованиям рынка по номенклатуре (в части обеспечения технологической безопасности и обороноспособности страны) и объему потребления.

Смещение технологических приоритетов

Несмотря на общую тенденцию увеличения размера используемых полупроводниковых пластин, абсолютная величина сегмента малоразмерных пластин (менее 150 мм) в последние 10 лет сохраняется на уровне около 1 млн эквивалентных 200-мм пластин в месяц. Кроме того, в последние годы замедлилась тенденция перехода с 200-мм пластин на 300-мм. В частности, компания SK Hynix (третья в мире по производству микросхем и один из мировых лидеров по использованию 300-мм пластин) наращивает использование 200-мм пластин (до 180 тыс. шт. в месяц) с целью расширения портфеля мелкосерийных заказов¹⁵.

¹⁵ SK Hynix решила нарастить производство 200-мм полупроводниковых пластин и набирает новый персонал // Электронное периодическое издание «3ДНьюс», 24.06.2021. URL: <https://3dnews.ru/1042799/sk-hynix-reshila-narastit-proizvodstvo-200mm-poluprovodnikovih-plastin-i-nabiraet-noviy-personal>

Можно с высокой долей уверенности прогнозировать, что тенденция роста мелкосерийных заказов, а значит – роста спроса на полупроводниковые пластины меньшего диаметра, будет долгосрочной. Это обусловлено изменениями в характере производства в условиях реализации 4-й и 5-й промышленных революций. Если для 4-й промышленной революции характерно движение в направлении персонализации потребления, то для 5-й персонализация потребления становится основным содержанием¹⁶.

Персонализация [Плеханов и др., 2021] – процесс, который создает релевантное, индивидуальное взаимодействие между двумя сторонами, направленное на улучшение взаимодействия с получателем [Аракелова, 2013. С. 48]. Применительно к потреблению персонализация предполагает предоставление покупателю товара (продукции) с эксплуатационными характеристиками, максимально соответствующими именно его персональным требованиям. Поскольку эти требования отличаются высокой вариативностью, неизбежным становится отказ от массового выпуска стандартной продукции (в большей или меньшей степени удовлетворяющей запросы большинства потребителей) в пользу мелкосерийного или даже единичного производства.

Интегральные микросхемы и полупроводниковые приборы, используемые для микроэлектронной продукции, производимой под мелкосерийный заказ или в рамках единичного производства, не требуют высокопроизводительных технологий. В этом случае малоразмерные полупроводниковые пластины (100 мм или меньше) могут обеспечить более высокую экономическую эффективность в силу меньшего числа кристаллов на каждой пластине и, соответственно, большей гибкости производства.

На рынках, характеризующихся сравнительно малыми объемами, как, например, российский, указанная тенденция перехода к мелкосерийному выпуску продукции и использованию малоразмерных полупроводниковых пластин проявится еще более выражено. Это необходимо учитывать в рамках построения государственной промышленной политики и в планах развития отечественных микроэлектронных производств.

¹⁶ Индустрия 4.0: состояние сегодня, тенденции и технологии 4-й промышленной революции // В-MAG.ru – Бизнес-журнал, 2023. URL: <https://b-mag.ru/industrija-4-0-sostojanie-segodnja-tendencii-i-tehnologii-4-j-promyshlennoj-revoljucii/>

Заключение

Исходя из проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Для России приоритетной является задача создания отечественного производства микроэлектронной продукции: интегральных микросхем и полупроводниковых приборов. В текущих условиях действия санкционных ограничений со стороны США и аффилированных с ними стран обеспечение потребностей страны за счет импорта затруднительно.

2. Ведущие мировые производители микроэлектронной продукции в настоящее время ориентированы на переход ко все более «тонким» проектным нормам и большим диаметрам используемых полупроводниковых пластин. Основными сегментами потребления являются производство гаджетов и систем высокопроизводительных вычислений.

3. В последние годы получают развитие направления повышения производительности микросхем («Больше, чем Мур» и «За пределами CMOS»), предъявляющие менее строгие требования к «тонкости» проектных норм, что открывает дополнительные возможности для России.

4. Себестоимость производства интегральных микросхем по различным проектным нормам и на базе полупроводниковых пластин различных диаметров, как показала предварительная оценка, в значительной степени зависит от объемов производства. Объемы производства в России, имеющиеся в настоящее время и доступные в краткосрочной перспективе, обеспечивают минимальную себестоимость интегральных микросхем при использовании 100-мм пластин.

5. В рамках реализуемой 4-й и предстоящей 5-й промышленной революции одним из приоритетов становится персонализация потребления, требующая постепенного отказа от массового производства товаров (услуг) и перехода к мелкосерийному и единичному производству. Для микроэлектронного производства это означает расширение использования малоразмерных пластин, обеспечивающих большую гибкость и экономическую эффективность при мелкосерийном и единичном производстве.

Литература

Аракелова И.В. Анализ и оценка эффективности современных программ лояльности потребителей // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 17 (120). С. 46–51

Бондарь Д. Новый формат компактных кремниевых фабрик – решение для микроэлектроники России // Электронные компоненты, 2015. № 3. С. 12–16. URL: <http://www.syntezmicro.ru/uploads/files/pub/Article20.pdf>

Зеленский А.А., Морозкин М.С., Грибков А.А. Обзор полупроводниковой промышленности в мире и России: производство и оборудование // Известия вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 468–480

Коник Л. Кто меньше? Маленькие размеры за большие деньги // Стандарт. 2008. № 9 (68). URL: <https://www.comnews.ru/standart/article/52215>

Макушин М. Заводы по обработке пластин диаметром 300 мм: мифы и реальность // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2005. № 8. С. 82–86.

Макушин М. 450-мм «Мегафабрики»: стоит ли овчинка выделки? // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 2. С. 2–7.

Макушин М. Домасштабировались? Экономика уменьшения топологий // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2014. № 3. С. 134–147.

Плеханов С.В., Прытков А.Н., Бабаев С.Э. Персонализация как неотъемлемый аспект деятельности современной организации // Парадигмы управления, экономики и права. 2021. № 1(3). С. 49–56.

Статья поступила 30.06.2023

Статья принята к публикации 05.07.2023

Для цитирования: *Грибков А.А.* Технологические и макроэкономические факторы развития микроэлектронного производства в России // ЭКО. 2023. № 8. С. 104–117. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-8-104-117

Информация об авторе

Грибков Андрей Армович (Москва) – доктор технических наук. НПЦ «Технологический центр». E-mail: andarmo@yandex.ru

Summary

A.A. Gribkov

Technological and Macroeconomic Factors of Microelectronic Production Development in Russia

Abstract. Based on the need to create domestic production of integrated circuits and semiconductor devices under the current sanctions, the paper considers the main factors on which the development of microelectronic production in Russia depends. Critical analysis of current world technological trends, dependence of used technologies on production volumes and availability of sales markets is carried out. The author determines the economic feasibility of using 100-mm wafers as the main material for microelectronics at the current and available in the short term production volumes in Russia. It is shown that the realization of long-term trends

in the development of microelectronic production in the conditions of the 4th and 5th industrial revolutions will lead to an increase in the importance of small-size wafers.

Keywords: *microelectronics; integrated circuits; design standards; semiconductor wafers; production cost; industrial revolution*

References

Arakelova, I.V. (2013). Analysis and evaluation of the effectiveness of modern customer loyalty programs. *Izvestia Volgograd State Technical University.*, No. 17 (120). Pp. 46–51. (In Russ.).

Bondar, D. (2015). New format of compact silicon factories – a solution for microelectronics in Russia. *Electronic Components*. No. 3. Pp. 12–16. (In Russ.). Available at: <http://www.syntezmicro.ru/uploads/files/pub/Article20.pdf>

Zelensky, A.A., Morozkin, M.S., Gribkov, A.A. (2021). Review of semiconductor industry in the world and Russia: production and equipment. *News of higher education institutions. Electronics*. Vol. 26. No 6. Pp. 468–480. (In Russ.).

Konik, L. (2008). Who's smaller? Small sizes for big money. *Standard*. No. 9 (68). Available at: <https://www.comnews.ru/standart/article/52215> (In Russ.).

Makushin, M. (2005). Plants for the processing of 300 mm diameter wafers: myths and reality. *Electronics: Science, Technology, Business*. No. 8. Pp. 82–86. (In Russ.).

Makushin, M. (2009). 450 mm „Megafactory“: is it worth the trouble? *Electronics: Science, Technology, Business*. No. 2. Pp. 2–7. (In Russ.).

Makushin, M. (2014). Domascaled? Economics of topology reduction. *Electronics: Science, Technology, Business*. No. 3. Pp. 134–147. (In Russ.).

Plekhanov S.V., Prytkov A.N., Babaev S.E. (2021). Personalization as an integral aspect of modern organization activity. *Paradigms of management, economics and law*. No. 1(3). Pp. 49–56. (In Russ.).

For citation: Gribkov, A.A. (2023). Technological and Macroeconomic Factors of Microelectronic Production Development in Russia. *ECO*. No. 8. Pp. 104–117. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-8-104-117

Information about the author

Gribkov, Andrey Armovich (Moscow) – Doctor of Technical Sciences. Scientific and Production Complex “Technological Center”.

E-mail: andarmo@yandex.ru