

# CHIPS Act и совершенствование экосистемы НИОКР в США

Б. Авдонин, д. э. н., проф.<sup>1</sup>, М. Макушин<sup>2</sup>

УДК 621.37 | ВАК 2.2.2

Современные полупроводниковые, в том числе микроэлектронные, технологии являются реализацией на практике результатов НИОКР, осуществление которых началось 5–10 (а иногда и более) лет назад. Полупроводниковая промышленность\* является не только капиталоемкой, но и наукоемкой отраслью. Поэтому для нее очень важно государственное финансирование НИОКР и государственно-частное партнерство в осуществлении этих работ. Подобная практика хорошо просматривается на примере Закона о создании полезных стимулов для производства полупроводниковых приборов в Америке (Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors for America Act, CHIPS Act) [1–4].

CHIPS Act рассматривался Конгрессом США с 2020 года, однако и Сенат, и Палата представителей предлагали свои варианты этого законопроекта – «Создание возможностей для превосходства Америки в производственных технологиях и экономической мощи» (America Creating Opportunities for Manufacturing Pre-Eminence in Technology and Economic Strength (America COMPETES) Act of 2022 и «Об инновациях и конкуренции» (U. S. Innovation and Competition Act of 2021, USICA of 2021) соответственно. Оба этих законопроекта предусматривали выделение более 52 млрд долл. на развитие производственной базы и НИОКР в области полупроводниковой промышленности. Согласовать свои разногласия палаты Конгресса смогли только летом 2022 года и 9 августа 2022 года президент США Джо Байден подписал закон под несколько измененным названием – CHIPS and Science Act с бюджетом в 52,7 млрд долл.

Следует отметить, что **финансирование работ по CHIPS Act в 2021 и 2022 годах осуществлялось через «Закон о полномочиях в сфере национальной обороны»** (National Defense Authorization Act, NDAA). Этот закон принимается ежегодно (с 1961 года) и утверждает годовой бюджет и все расходы МО США [4].

Данная статья посвящена рассмотрению вопроса о влиянии CHIPS and Science Act на совершенствование американской экосистемы НИОКР в области

полупроводниковых приборов с точки зрения структуры их организации и финансирования.

## ИЗМЕНЕНИЯ В СТРУКТУРЕ ОРГАНИЗАЦИИ И ФИНАНСИРОВАНИЯ НИОКР В СВЕТЕ ПРИНЯТИЯ CHIPS Act

Одной из задач принятого CHIPS and Science Act является совершенствование национальной экосистемы НИОКР и преодоления организационных проблем и проблем финансирования перспективных НИОКР.

### Проблемы экосистемы НИОКР в области микроэлектроники

В США существует достаточно отлаженная экосистема НИОКР, обеспечивающая их реализацию по различным направлениям, предоставляющая необходимые ресурсы и позволяющая организовывать совместные работы. Страна обладает развитой сетью национальных научно-исследовательских лабораторий, большим числом университетов и микроэлектронных (полупроводниковых) фирм. Тем не менее, в настоящее время экосистема НИОКР сталкивается с рядом вызовов и проблем в сфере воплощения в жизнь результатов инновационного процесса. К основным подобным трудностям можно отнести: несогласованность целей и задач правительственных ведомств и частного сектора; проблемы реализации НИОКР на инфраструктурном уровне; трудности организации совместных работ.

### Несогласованность целей и задач

#### правительственных ведомств и частного сектора

Инвестиции в НИОКР, ориентированные на интересы полупроводниковой промышленности, осуществляют различные государственные министерства и ведомства. Они реализуют важнейшие задачи и часто идут

<sup>1</sup> ГосНИИАС, советник генерального директора.

<sup>2</sup> НОБ «Военные науки и оборонная промышленность» БРЭ, научный редактор.

\* Включает в себя изделия микроэлектроники – интегральные схемы (ИС), а также полупроводниковые дискретные приборы, изделия оптоэлектроники и датчики.

на сотрудничество и друг с другом, и с частнопромышленными фирмами, научным сообществом [5, 6]. При этом их основные цели и задачи (а также потребности) часто отличаются от целей и задач частного сектора (табл. 1) [7]. В результате существует возможность возникновения разрывов, из-за которых некоторые НИОКР не получают необходимых инвестиций. Примером могут служить работы в области средств вычислительной техники со сверхнизким энергопотреблением, зависящие от совместных инноваций в таких сферах, как перспективные материалы, архитектуры и методы корпусирования, а также программное обеспечение. При этом внедрение подобных инноваций необходимо для поддержки дальнейшего развития технологической конкурентоспособности США, обеспечения возможности внедрения результатов НИОКР в промышленных масштабах [5, 6].

### Проблемы реализации НИОКР на инфраструктурном уровне

Как ни странно, на территории США ощущается дефицит инфраструктуры реализации НИОКР по некоторым существенным направлениям. Так, для университетских исследователей и стартапов в значительной степени

недоступны производственные мощности, работающие по проектным нормам менее 60 нм. Это затрудняет для американских стартапов, специализирующихся на полупроводниковом аппаратном обеспечении, реализацию и развитие их разработок и идей на национальной территории. Таким образом, **отсутствие или недостаточность поддерживающей НИОКР инфраструктуры сужает возможности американской экосистемы НИОКР в целом реализовывать все достижения инновационного процесса.**

### Трудности организации совместных работ

В таких областях, как совместная оптимизация, существуют серьезные возможности ускорения и оптимизации инновационного процесса. Они требуют совместной работы на разных уровнях стека реализации различных вычислительных задач. Продвижение НИОКР на любом из этих уровней часто требует узкоспециализированных возможностей как для отдельных лиц, так и для организаций. Однако в американской экосистеме НИОКР отсутствуют механизмы объединения возможностей различных фирм для решения задач, стоящих перед совместными разработками.

**Таблица 1.** Финансирование полупроводниковых НИОКР существующими институтами

Министерство или организация	Финансирование 2019 фин. г., млрд долл.	Соотношение задач министерства / организации и интересов полупроводниковой промышленности	
		Организации удовлетворяют важные потребности...	...но существуют различия, относящиеся к отрасли
Национальный научный фонд	2,7	Сквозное финансирование предконкурентных и фундаментальных исследований...	...области исследований не обязательно согласуются с гражданскими потребностями и требованиями к скорости реализации их результатов
Министерство энергетики	2,2	Управляет национальными научно-исследовательскими лабораториями, специализирующимися на технических (технологических) знаниях в области полупроводниковых приборов...	...специализированные технические (технологические) знания часто недоступны гражданским фирмам и промышленности
Министерство обороны	1,1	Осуществляет программы НИОКР в области национальной безопасности и обороны...	...сосредоточение на оборонных потребностях независимо от возможностей обеспечения жизнеспособности разработок в гражданской сфере
Национальные институты стандартов и технологий	0,03	Поддерживает распространение знаний через сеть производственных (отраслевых) институтов...	...не в состоянии поддерживать масштабирование производства до уровней, рентабельных в гражданском секторе

## Существующие и новые институты реализации НИОКР в области полупроводниковых приборов

До недавнего времени основными организациями в США, финансирующими государственные НИОКР, являлись Национальный научный фонд\*, министерство энергетики, министерство обороны и структура национальных институтов стандартов и технологий, входящая в министерство торговли США. Все они играли и продолжают играть важную роль в экосистеме микроэлектронных (полупроводниковых) НИОКР США. Необходимо отметить, что их деятельность хорошо демонстрирует несогласованность целей и задач правительственных ведомств и частного сектора (см. табл. 1).

В целях решения проблем и вызовов, стоящих перед экосистемой НИОКР США, в рамках CHIPS Act была предусмотрена реализация двух новых инициатив. Это Национальный центр полупроводниковых технологий (National Semiconductor Technology Center, NSTC) и его планируемая деятельность, а также Национальная программа по освоению в производстве полупроводниковых приборов перспективных методов корпусирования (National Advanced Packaging Manufacturing Program – NAPMP). Кроме того, продолжается реализация инициативы по созданию в США производственных институтов (Manufacturing USA Institutes), запущенная в 2014 году [8].

NSTC представляет собой государственно-частное партнерство (в рамках министерства торговли), цель которого – укрепление лидерства США в области полупроводниковых приборов за счет содействия реализации перспективных НИОКР, создания опытных образцов изделий микроэлектроники следующих поколений. Еще одна цель NSTC – укрепление технологической конкурентоспособности США и повышение безопасности цепочек поставок (и наращивания добавленной стоимости) полупроводниковых приборов.

Инициатива NAPMP реализуется в рамках работ Национального института стандартов и технологий (NIST, министерство торговли). Ее цель – расширение возможностей использования в экосистеме НИОКР США перспективных методик тестирования, сборки и корпусирования полупроводниковых приборов [9].

В соответствии с CHIPS and Science Act министерство торговли США сохраняет значительную свободу действий в отношении того, как структурировать NSTC и NAPMP. Для оценки ситуации министерство совместно с

Ассоциацией полупроводниковой промышленности США (SIA) опросило в 2022 году более чем 200 заинтересованных организаций и ведущих экспертов. Цель опроса – выявить диапазон мнений и оценок относительно мер стимулирования, инфраструктуры и требований к проведению НИОКР и реализации их результатов. Ожидается, что результат этого опроса позволит более эффективно использовать выделяемые для поддержки технологической конкурентоспособности США средства.

Как известно, CHIPS and Science Act (как и первоначально CHIPS Act) предполагает выделение более 52 млрд долл. в течение пяти лет на поддержку производства полупроводниковых приборов, перспективных НИОКР и перенос технологий новых поколений из лабораторных условий в условия массово-поточного производства. При этом, как упоминалось в начале статьи, финансирование этих задач уже два года осуществлялось через оборонные расходы. Около 75% предусмотренных законом средств (39 млрд долл.) предназначены для государственной финансовой поддержки строительства, модернизации или расширения заводов по обработке пластин, а также производства оборудования для них, на территории США. Остальные 13 млрд долл. предназначены для реализации программ НИОКР и освоения новых технологий в производстве с последующим выводом на рынок. Кроме того, в законе перечислены авторизованные в его рамках программы и определены их цели (табл. 2) [5, 6].

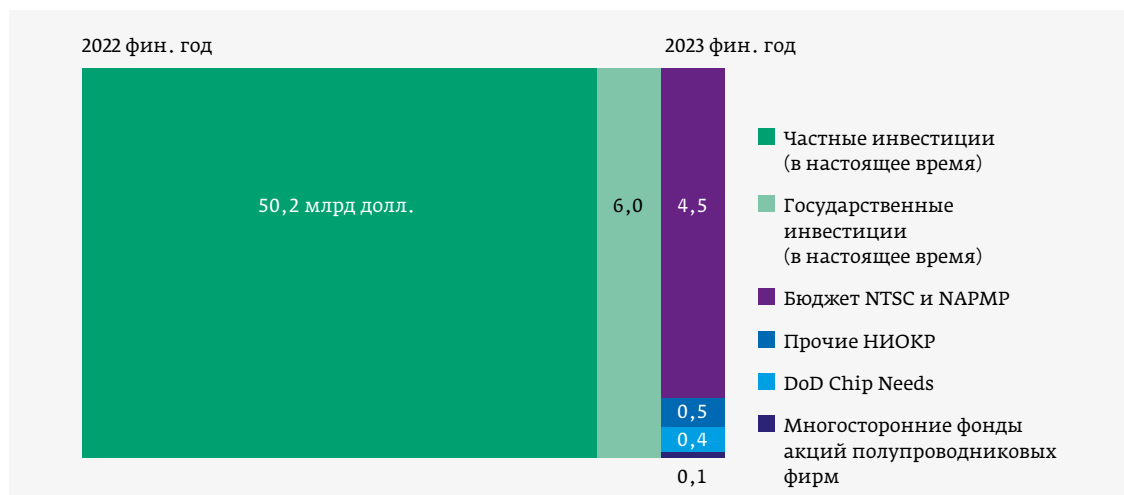
## Соотношение государственного и частного финансирования НИОКР в сфере микроэлектроники

Государственные и частнопромышленные инвестиции в НИОКР, ориентированные на интересы полупроводниковой промышленности, в 2022 году составляют 60 млрд долл. На долю частной промышленности приходится ~89% общего объема инвестиций, а на государственные министерства и ведомства – примерно 11%. В соответствии с принятым в августе 2022 года CHIPS and Science Act, на 2023 финансовый год на НИОКР, связанные с полупроводниковыми приборами, выделено 5,5 млрд долл. (рис. 1). Интересен следующий момент: **эти средства будут доступны до тех пор, пока не будут израсходованы.**

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ NSTC И NAPMP

Как уже говорилось, Национальный центр полупроводниковых технологий (NSTC) является государственно-частным партнерством, в рамках которого реализуется инициатива NAPMP. Тем не менее, руководство этих организаций действует достаточно самостоятельно – первые решают более широкий круг задач и не вмешиваются в компетенцию вторых. Основными задачами, которые решают данные институты, являются:

\* NSF (National Science Foundation) – Национальный научный фонд, независимое федеральное ведомство при администрации президента США, основанное в 1950 году с целью содействия развитию фундаментальных и прикладных научных и научно-технических исследований в государственных интересах. Поддерживает и финансирует перспективные разработки в университетах и научно-исследовательских учреждениях.



**Рис. 1.** Структура расходов на НИОКР в полупроводниковой промышленности США на 2023 финансовый год в соответствии с CHIPS Act. *Источник: CHIPS and Science Act of 2022, SIA.*

**Таблица 2.** Программы, авторизованные в рамках CHIPS Act for America

Организация	Программа	Уставные цели
Офис Белого дома	Подкомитет по вопросам лидерства в области микроэлектроники	Разработка Национальной стратегии в области микроэлектронных исследований
Министерство торговли	Промышленный консультативный комитет	Оценка эффективности Национальной стратегии
	Стимулирование полупроводниковой промышленности	Введение в строй, расширение или модернизация заводов по обработке пластин, расположенных в США
	<i>Национальный центр полупроводниковых технологий (NSTC)</i>	<i>Укрепление безопасности цепочек поставок и экономической конкурентоспособности; государственно-частное партнерство</i>
Министерство торговли (NIST)	<i>Национальная производственная программа в области перспективных методов корпусирования</i>	<i>Укрепление внутренних возможностей в области тестирования, сборки и корпусирования</i>
	Производственные институты США	Развитие и совершенствование возможностей производства полупроводниковых приборов в США
	Исследования в области микроэлектроники	Ускорение НИОКР по метрологии следующего поколения микроэлектроники
Министерство обороны	Национальная сеть разработки микроэлектроники	Обеспечение перехода инноваций в области микроэлектроники из лабораторных условий на заводы по обработке пластин
	Микроэлектроника военного назначения	Стимулирование консорциумов по созданию изделий микроэлектроники с измеримой безопасностью
Министерство финансов/ Госдепартамент	Многосторонний фонд обеспечения безопасности полупроводниковой промышленности	Совместное с союзниками развитие и стимулирование безопасных цепочек поставок полупроводниковых приборов

Зеленой заливкой выделены работы, финансируемые из бюджета CHIPS and Science Act of 2022. Курсивом выделены вопросы, рассматриваемые в данной статье.

- масштабирование и переходные технологии, то есть сосредоточение усилий на ранних этапах НИОКР по перспективным технологиям с целью поддержки их дальнейшего перехода от фундаментальных к прикладным исследованиям, а затем изменения масштаба – от уровня лабораторных разработок до уровня освоения в поточно-массовом производстве новой продукции;
- совершенствование инфраструктуры НИОКР с точки зрения их опытно-производственной базы;
- совершенствование инфраструктуры НИОКР с точки зрения поддерживающих технологий, доступности их самих и соответствующего оборудования;
- аспекты осуществления совместных программ НИОКР;
- вопросы подготовки и развития кадрового потенциала [5, 6].

### Масштабирование и переходные технологии

При проведении многих НИОКР предконкурентного уровня американские полупроводниковые фирмы активно сотрудничают с рядом известных организаций, таких как Межуниверситетский центр микроэлектроники (IMEC, Лёвен, Бельгия) и корпорация Semiconductor Research (SRC<sup>\*</sup>). Перед NSTC и NAPMP, в целях наиболее эффективной поддержки технологической и экономической конкурентоспособности США, поставлена задача дополнять, а не дублировать деятельность этих организаций. То есть, хотя инфраструктура NSTC и NAPMP может поддерживать исследования на их ранних стадиях, основное внимание в деятельности этих организаций предполагается уделять развитию и масштабированию технологий, обладающих потенциалом выхода за рамки ранних стадий НИОКР. Иначе говоря, NSTC и NAPMP призваны объединять и координировать работу государственных, академических и частнопромышленных исследовательских центров для оценки того, каким технологиям, представляющим коммерческий интерес для американских фирм, требуется, но не предоставляется финансирование для их перехода от стадии

лабораторных исследований в стадию промышленного производства и его наращивания [10].

Как известно, в 2019 году в США был принят десятилетний план развития полупроводниковых приборов и технологий (2030 Decadal Plan for Semiconductors). В соответствии с изложенными в нем пятью главными задачами, NSTC и NAPMP должны будут укреплять способность экосистемы НИОКР США, проводить разработку технологий, срок внедрения которых в производство составляет от 5 до 15 лет, и осуществлять коммерциализацию результатов этих разработок. Ориентация на перспективы технологического развития имеет большое значение: очевидно, что учитывая растянутые во времени сроки НИОКР в области полупроводниковых приборов, инвестиции, необходимые для сегодняшних крупных технологических достижений, были сделаны много лет назад. (У полупроводниковых НИОКР, как правило, достаточно длительный срок реализации – от фундаментальных до прикладных работ, а затем – от уровня лабораторных разработок до уровня освоения в поточно-массовом производстве новой продукции.) Исходя из этого, **NSTC и NAPMP придется** не воспроизводить или копировать имеющиеся сейчас разработки американских и зарубежных фирм и организаций, а **создавать и укреплять возможности экосистемы НИОКР в многообещающих и активно развивающихся областях, таких как материалы «пост-КМОП» эры, перспективные методы корпусирования, гетерогенная интеграция и инфраструктура формирования шаблонов для литографии**. Лидерство в этих перспективных областях еще не определено [11].

Итак, финансирование НИОКР во многом будет сосредоточено как на базовых полупроводниковых технологиях, так и на технологиях корпусирования. Но эти две области характеризуются различиями по срокам, течение которых в них могут быть реализованы прорывные решения. В целом, НИОКР в области базовых полупроводниковых технологий направляются на долгосрочные проекты, обладающие потенциалом революционных преобразований и в которых инновации будут результатом совершенствования материалов, технологических процессов и инструментальных средств (табл. 3).

НИОКР в области перспективных методов корпусирования сосредотачиваются на подходах, методах, которые выгоднее применять в каждом конкретном случае / проекте, помогающих решать проблемы отрасли в краткосрочной и среднесрочной перспективе. Масштабирование новых методов корпусирования может происходить быстрее и дешевле, чем фундаментальные достижения в области полупроводниковых материалов и технологических процессов. Очень вероятно, что прорывные решения в области корпусирования начнут оказывать воздействие на гражданский, коммерческий сектор уже через 5–10 лет после создания NSTC и NAPMP. В некоторых случаях такое

\* SRC (Semiconductor Research Corporation) – первый в полупроводниковой промышленности научно-исследовательский консорциум, бесприбыльная организация, созданная в 1982 г. (шт. Северная Каролина). Охватывает несколько сот университетов и высокотехнологичных фирм разных стран мира. Цель – осуществление широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в интересах членов консорциума по таким направлениям, как: НИОКР в области материалов (с освоением в краткосрочной перспективе), межсоединений, приборов, методов проектирования и инструментальных средств САПР; формирование требований к будущим поколениям ИС; определение информационных элементов «пост-КМОП» эры.

Таблица 3. Основные направления работ NSTC и NARMP в области базовых полупроводниковых технологий

Основные направления работ	Тематика основных направлений работ
Разработка перспективных архитектур логических и аналоговых приборов, схем памяти	3D-приборы; функциональность монолитной интеграции; вычисления, ориентированные на память*
Создание перспективных материалов для вычислений/ вычислительных средств «пост-КМОП» эры и использование новых парадигм	Двумерные материалы; современные функциональные материалы; альтернативные парадигмы, такие как фотонные или нейроморфные приборы и материалы для них; материалы для высоковольтных и мощных полупроводниковых приборов и силовой электроники; перспективные материалы радиочастотных приборов
Разработки базовых процессов	Перспективные методики литографии; разработка усовершенствованных источников излучения и совершенствование EUV-литографии;** оптимизация процессов формирования слоев металлизации
Инновации в области проектирования	Совершенствование ускорителей специфических задач в более широком спектре приложений; проектирование цифро-аналоговых ИС, интеграция интеллектуальных и сенсорных возможностей; разработка и совершенствование методик проектирования с учетом требований обеспечения безопасности***
Совершенствование инструментальных средств САПР	Интеграция искусственного интеллекта в инструментальные средства САПР, повышение уровня абстракции проектирования; совершенствование инструментальных средств САПР аналоговых и радиочастотных ИС; создание инструментальных средств САПР с расширенными возможностями полностековой оптимизации и внедрение в них возможностей аппаратно-программного кодирования
Содействие повышению устойчивости окружающей среды	Использование технологических газов с более низким потенциалом глобального потепления; создание химических соединений (используемых в литографии и других технологических процессах), отвечающих ужесточающимся природоохранным требованиям, а также разработка технологий обнаружения и нейтрализации опасных веществ в чрезвычайно низких концентрациях; разработка и внедрение на заводах по обработке пластин технологических процессов, удовлетворяющих строгим эксплуатационным требованиям при сохранении природных ресурсов (энергии, воды и т. д.)

\* Имеются ввиду архитектуры и приборы для вычислений и вычислительных средств, реализующих два подхода:

- «вычисления в непосредственной близости к памяти» (near-memory compute) предполагают расположение схемы/ кристалла/ кристаллов памяти и логических приборов в составе одного модуля, созданного с использованием перспективных методов корпусирования (2,5D/3D packaging, fan-out);
- высокопроизводительные распределенные системы (in-memory computing), предназначенные для хранения и обработки данных в оперативной памяти в реальном масштабе времени с производительностью на порядки быстрее, чем системы, использующие диски (ускоряют обработку больших объемов данных, по мере роста использования технологий Big Data приобретают все большую популярность).

\*\* EUV (extreme ultraviolet) – наиболее коротковолновая часть ультрафиолетовой области спектра (предельной УФ-области спектра). Длина волны излучения EUV-степперов – 13,5 нм.

\*\*\* DFS (design-for-security) – наименование методики проектирования, добавляющей специальные свойства обеспечения повышения устойчивости приборов к взламыванию в процесс проектирования изделий микроэлектроники.

может произойти и раньше. Основные направления работ NSTC и NARMP в этих областях представлены в табл. 4.

Предполагается, что инвестиции NSTC и NARMP в поисковые исследования по различным направлениям, рассчитанные на разные сроки, будут способствовать устойчивому совершенствованию базовых технологий в течение примерно 20 лет. Отраслевые эксперты отмечают: несмотря на то, что вышерассмотренные технические области классифицируются как однозначно относящиеся к базовым полупроводниковым технологиям и технологиям корпусирования полупроводниковых приборов, необходима значительная координация НИОКР в этих областях с НИОКР в смежных областях знаний и отраслях промышленности с привлечением соответствующих экспертов.

### ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ

По замыслу их создателей, NSTC и NARMP не должны ограничиваться простым финансированием или координацией осуществляемых в настоящее время исследовательских усилий. Они должны играть активную роль в облегчении доступа к новейшим средствам разработки опытных образцов, перспективному программному обеспечению моделирования. Кроме того, в числе их задач расширение доступа к мощностям, обеспечивающим переход перспективных технологий и приборов от этапа лабораторных работ к этапу производства (создание опытных образцов, опытное производство и внедрение), а также предоставление такого доступа отдельным исследователям, группам исследователей и стартапам. Выполняя подобные задачи, NSTC и NARMP будут содействовать расширению пула потенциальных инноваций и их создателей, способных пройти все этапы цикла разработки новой продукции – от фундаментальных исследований до освоения в массовом производстве и достижения рыночного успеха [5, 6].

В целях эффективного управления государственными инвестициями в мощности для выполнения НИОКР руководство NSTC не намерено ни распределять их равномерно, ни концентрировать инвестиции на одной технологии или конкретном территориально-производственном комплексе. **Планируется другое – расширение и модернизация отдельных мощностей и инфраструктуры ограниченного числа существующих учреждений, отобранных по принципу перспективности и потенциала.** Расширение и модернизация существующих объектов рассматриваются как предпочтительное решение по сравнению со строительством «с нуля». Реализация такого решения обходится дешевле и осуществляется быстрее. Действительно, строительство новых объектов для проведения НИОКР в области полупроводниковых приборов может занять несколько лет, а за это время их оснащение и они сами могут отстать от достигнутого отраслью нового уровня или даже устареть к моменту завершения их сооружения [12].

Таким образом, подход расширения и модернизации экономически выгоден и позволяет максимизировать отдачу от ограниченного объема государственных инвестиций. Правда, при этом исследовательские мощности нужно модернизировать с прицелом на максимальный эффект по отношению к затратам. Например, модернизация исследовательских мощностей по обработке пластин нескольких университетов с переводом с 200-мм на 300-мм пластины может легко исчерпать все средства NSTC, запланированные на подобные цели, но при этом появится ряд действительно современных мощностей.

Расширение и модернизация исследовательских мощностей не единственная альтернатива созданию новых мощностей. В некоторых случаях, с финансовой точки зрения, выгоднее использовать существующий потенциал частнопромышленных фирм (промышленные мощности крупнее исследовательских). Такой подход может применяться при опытном внедрении инфраструктуры, цель которой – увеличение производственных мощностей по обработке 300-мм пластин с использованием стандартных технологических процессов. Здесь роль NSTC – формирование новых возможностей для согласования доступа к внешним производственным мощностям и /или разработкам. Примеры: координация программ и услуг многопроектных пластин<sup>\*</sup> на мощностях частнопромышленных фирм или доступ к имеющимся на рынке инструментальным средствам САПР при разработки новых технологий на предконкурентном уровне.

Инфраструктура НИОКР в области перспективных методов корпусирования должна охватывать методы 2,5D- и 3D-этажирования, методику перераспределения слоев<sup>\*\*</sup> (с высокой плотностью расположения элементов), методику корпусирования на уровне пластины

\* MPW (Multi Project Wafer services) – (shuttle services) – услуги по производству на одной пластине опытных ИС разных проектировщиков с целью сокращения и распределения накладных расходов, затрат на разработку и производство.

При этом осуществляется объединение различных конструкций ИС на едином комплекте фотошаблонов и производство одной или нескольких ИС для различных талантливых разработчиков по достаточно передовым процессам, что при обычных условиях невозможно по экономическим соображениям.

\*\* RDL (Redistribution Layer) – методика перераспределения слоев, процесс, включающий в себя работу с одним-двумя слоями металлизации и двумя-тремя слоями полимерного диэлектрического материала. Цель – изменения местоположения контактных площадок на кристалле ИС (для большего удобства монтажа на плату или в систему) в случаях, когда поставщикам конечных электронных систем не подходят имеющиеся на рынке или в их товарно-материальных запасах ИС, а заказ специализированных ИС не выгоден.

**Таблица 4.** Основные направления работ NSTC и NARMP в области перспективных методов корпусирования

Основные направления работ	Тематика основных направлений работ
Расширение возможностей тестирования и аттестации	Использование для уменьшения ошибок проектирования методик DFT* и анализа данных; автоматизация процессов тестирования и интеграция в них инструментальных средств искусственного интеллекта / машинного обучения; совершенствование методик тестирования аналоговых, радиочастотных и цифро-аналоговых ИС и приборов
Гетерогенная интеграция	Разработка отраслевых стандартов гетерогенной интеграции; разработка СФ-блоков** чиплетов*** и обеспечение доступа к ним; методы гетерогенной интеграции для новых вычислительных парадигм (фотонных, квантовых и т. д.)
Совершенствование методов корпусирования и формирования межсоединения высокой плотности размещения (шаг устройств ввода / вывода <100 мкм)	Совершенствование методов 2,5D / 3D-этажирования и сборки приборов с высокой пропускной способностью, низким временем ожидания и высокой плотностью расположения элементов на уровне плат и пластин; разработка и совершенствование методов гибридного соединения, TSV**** и перспективных интерпозеров;***** совершенствование методов термокомпрессионного соединения для увеличения срока службы приборов; совершенствование методов управления температурой и уменьшение перекрестных помех, шума и паразитных явлений; разработка и совершенствование методов корпусирования приборов, имеющих ограничения по форм-фактору
Совершенствование инструментальных средств	Разработка и совершенствование инструментальных средств совместного проектирования на уровне копуса / модуля; совершенствование инструментальных средств проектирования и моделирования электрических, тепловых и механических параметров; автоматизация процессов сборки и совмещения

\* DFT (design for test (testability)) – «проектирование под тестируемость», наименование методики проектирования, добавляющей специальные свойства тестируемости в процесс проектирования изделий микроэлектроники.

\*\* semiconductor IP – совокупность наработок фирмы в области создания библиотек стандартных / заказных элементов и инфраструктуры их поддержки. В РФ именуется сложно-функциональными (СФ) блоками.

\*\*\* Chiplet – «чиплет», специализированные кристаллы ИС, обладающие минимальной вычислительной мощностью и рядом других функций, позволяющие им стать малым микропроцессором, устройством хранения данных, сложной логической схемой или частью MEMS, выполняющих функции датчиков различных параметров, к примеру освещенности, температуры, давления, движения и ускорения. Обеспечивают дальнейшее масштабирование ИС, недоступное при подходе «система-на-кристалле» (SoC). Могут рассматриваться как одни из основных элементов при создании высокофункциональных миниатюризированных «систем-в-модуле» (SiP).

\*\*\*\* TSV (through-silicon via) – технология TSV, одна из технологий 2,5D и трехмерного корпусирования, технология формирования межсоединений сквозь подложку ИС и / или сквозь кремниевую пластину, предполагающая этажерочное расположение кристаллов / ядер кристаллов с целью экономии занимаемого пространства, снижения потребляемой мощности и увеличения производительности и скорости внутрисхемной связи.

\*\*\*\*\* interposer – промежуточная плата, используемая в 2,5–3-мерных технологиях, на которой располагаются кристаллы ИС и сквозь которую формируются TSV, на ее обратной стороне установлены SMD-элементы (приборы, монтируемые на поверхность) для соединения с основной пластиной / подложкой многокристального модуля / электронного модуля.



с разветвлением\*. Не меньшее значение придается доступности для инфраструктуры НИОКР США оборудования гибридного и термокомпрессионного соединения, нанесения столбиковых выводов из припоя с высокой плотностью, осаждения меди, формирования переходных межслойных отверстий. Кроме того, требуются инструментальные средства проектирования перспективных интерпозеров (кремниевых, стеклянных и высокоплотных органических). Наконец, планируется уделять значительное внимание технологическим процессам создания перспективных подложек.

Отраслевые эксперты обращают внимание на то, что основной проблемой операций сборки, корпусирования и тестирования становится их рентабельность и повышение значения в производстве полупроводниковых приборов в целом. Традиционные методы корпусирования были достаточно трудоемки и характеризовались малой добавленной стоимостью. Поэтому их вынос за рубеж (в основном в азиатские страны) был естественным. Однако перспективные методы корпусирования требуют работников с более высокой квалификацией и повышения уровня автоматизации. **Именно на этапы 2,5/3D-корпусирования сейчас постепенно переносится все большая доля добавленной стоимости, возникающей в процессе производства ИС.** Учитывая это, а также необходимость сохранения интеллектуальной собственности, ноу-хау и промышленных секретов, американские власти и частнопромышленные фирмы отдают предпочтение созданию мощностей, использующих перспективные методы корпусирования, на территории США. Это станет одним из элементов сохранения и повышения конкурентоспособности национальной полупроводниковой промышленности. Кроме того, потребуются новые возможности тестирования и согласование доступа к ним становится одной из функций NAMP и NSTC.

В современном мире для NSTC и NAMP существует несколько примеров успешно действующих моделей организаций, специализирующихся на проведении комплексных НИОКР в области полупроводниковой промышленности и создания инфраструктуры для этого. Одним из примеров является IMEC, реализующий большое

число различных исследовательских программ и предоставляющий их участникам для разработки технологий и создания опытных образцов исследовательские мощности, инструментальные средства САПР и многое другое. Есть аналогичные примеры и в США – Центр прикладных микросистем и технических наук (Microsystems and Engineering Sciences Applications, MESA) Сандийской Национальной лаборатории (Sandia National Laboratory), предоставляющий для государственных и академических исследователей мелкосерийные услуги кремниевого завода (контрактное производство ИС) и дополнительные возможности проектирования, изготовления, корпусирования и тестирования разработанных ими ИС и полупроводниковых приборов. Также для NSTC и NAMP представляет большую ценность опыт реализации «Инициативы по созданию производственных институтов в США» (Manufacturing USA Institutes) [5, 6].

Вопросами совершенствования организации НИОКР влияние CHIPS Act на полупроводниковую промышленность не ограничивается. Существуют не менее важные аспекты, такие, как организация и проведение совместных НИОКР, подготовка кадров, реализация инициативы Manufacturing USA Institutes и некоторые международные аспекты действия CHIPS and Science Act. Все это будет рассмотрено в следующей статье.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Shepardson D.** U. S. Senate approves \$52 bln chips bill in bid to reach compromise // Reuters. March 29, 2022.
2. **Макушин М., Брыкин А.** Микроэлектроника и государственная политика высокотехнологичных стран: «национализация» взамен глобализации // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2021. № 9 (00210). С. 148–156.
3. SIA Applauds Senate Introduction of FABS Act // Semiconductor Digest. June 18. 2021.
4. **Авдонин Б., Макушин М.** Трансформация микроэлектроники США: формирование замкнутой национальной экосистемы микроэлектроники на примере корпорации Intel // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2022. № 5 (00216). С. 122–128.
5. American Semiconductor Research: Leadership Through Innovation // Semiconductor Industry Association, 2022.
6. CHIPS And Science Act // Public Law 117–167, Aug. 9, 2022.
7. SIA Sparking Innovation. Expert interviews // SIA. June 2020.
8. History // USA Manufacturing. Дата обращения: 20.10.2022.
9. Incentives, Infrastructure, and Research and Development Needs to Support a Strong Domestic Semiconductor Industry // Department of Commerce. January 23, 2022.
10. Sections 9906(c), (d) // National Defense Authorization Act of 2021.
11. The Decadal Plan for Semiconductors // Semiconductor Research Corporation. Дата обращения: 20.10.2022.
12. **VerWey J.** No Permits, No Fabs. The Importance of Regulatory Reform for Semiconductor Manufacturing // Center for Security and Emerging Technology (CSET). October 2021.

\* FO WLP (Fan-Out Wafer-Level Package) – корпусирование на уровне пластины с разветвлением, один из видов компромисса между корпусированием на уровне кристалла и корпусированием на уровне пластины. Полупроводниковая пластина режется на кристаллы и отдельные кристаллы ИС встраиваются в новую «искусственную» пластину. В полученной встраиваемой структуре между отдельными кристаллами образуется достаточно места, что позволяет формировать разветвленный слой перераспределения. Уникальное свойство FO WLP заключается в том, что в одной WLP-структуре можно интегрировать более одного кристалла – за счет этажирования.



## Разработка и производство конденсаторов

### оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104, K50-105, K50-106

### объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1M, K52-1BM, K52-1B, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

### оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1A, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

### суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31, K58-32, K58-33

### накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001

