Выпуск 22 (6721) от 12 ноября 2020 г.

ЦНИИ «ЭЛЕКТРОНИКА»

Экспресс-информация

ПО ЗАРУБЕЖНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Обзор ключевых компаний в сфере платформ автономных транспортных средств

Криптографы готовятся к квантовой эре

Носимые устройства бытовой и медицинской электроники

Китайские власти сожалеют о пустой растрате средств

Untether AI переосмысливает архитектуру фон Неймана для ускорителей формирования вывода ИИ

ISSN 2500-3844

СЕГОДНЯ В ВЫПУСКЕ

1 Компетентное мнение

3 Обзор ключевых компаний в сфере платформ автономных транспортных средств

10 Криптографы готовятся к квантовой эре

14 Носимые устройства бытовой и медицинской электроники

17 Китайские власти сожалеют о пустой растрате средств

19 Untether AI переосмысливает архитектуру фон Неймана для ускорителей формирования вывода ИИ

22 OCD-скаттерометрия для GAA-процессов

30 Масштабирование и задержки сигнала на межсоединениях

37 ATREG о будущем кремниевых заводов: интервью Yole Développement

42 CEA-Leti создает квантово-фотонную систему

44 Глоссарий

ЦНИИ «ЭЛЕКТРОНИКА»

Издатель
АО «ЦНИИ «Электроника»

Главный редактор
Алена Фомина, д. э. н., доц.

Выпускающий редактор
Полина Корсунская

Авторы материалов
Михаил Макушин,
Анастасия Хомчик,
Иван Черепанов

Над выпуском работали
Григорий Арифулин,
Людмила Железнова,
Анастасия Никитина

Реклама
publish@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Адрес редакции
127299, г. Москва,
ул. Космонавта Волкова, д. 12
+7 (495) 940-65-24
www.instel.ru
publish@instel.ru

Экспресс-информация по зарубежной электронной технике издается с 1971 г., в электронной версии – с 2003 г.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № 77–13626 от 20 сентября 2002 г.).

КОМПЕТЕНТНОЕ МНЕНИЕ

С начала проведения «Политики четырех модернизаций» руководство КНР уделяло значительное внимание развитию микро- и радиоэлектроники. Причин было две: упускаемая выгода и соображения национальной безопасности. До середины 2010-х гг. развитие радиоэлектронного комплекса шло двумя параллельными путями – модернизация и совершенствование национальных производств, в том числе за счет организации СП с зарубежными фирмами, а также развитие сборочных производств электроники и сопутствующих им обеспечивающих производств полупроводниковых приборов. Страна накапливала средства и опыт. На основе анализа собственного опыта и изучения опыта других стран в КНР к 2014 г. была сформирована Национальная рамочная программа развития промышленности интегральных схем (集成电路产业发展国家框架), обозначившая эффективные и понятные перспективы для китайской полупроводниковой промышленности. Используя эту программу в качестве базы, Госсовет КНР в июне 2014 г. опубликовал «Рекомендации по развитию национальной полупроводниковой промышленности» (国家半导体产业发展指引) – документ, определивший стратегию модернизации полупроводниковой отрасли страны и пути перехода от догоняющего развития к опережающему благодаря прогрессирующему импортозамещению. В мае 2015 г. был принят план «Сделано в Китае – 2025» (中国制造2025). Для реализации поставленных целей был создан фонд инвестиций в национальную микроэлектронную промышленность, так называемый «Большой фонд». Вклад центрального правительства составил 120 млрд юаней (19 млрд долл.), еще примерно столько же вложили провинции и крупные города. В целом китайские инвестиции в создание и оснащение заводов по обработке пластин выросли с 2 млрд долл. в 2015 г. до 9 млрд в 2019-м, инвестиции зарубежных полупроводниковых фирм в КНР составили соответственно 5 и 15 млрд долл. Развитием производственной базы микроэлектроники занимались не только микроэлектронные фирмы, но и власти крупных городов – так, в 2015 г. власти Уханя построили завод по обработке 300-мм пластин и передали его под управление крупнейшему китайскому кремниевому заводу – SMIC. Обширные инвестиции привлекли в отрасль множество фирм вообще без опыта и знаний – для большинства из них это закономерно закончилось провалом (об этом говорят данные китайского новостного агентства Qichaca). Сейчас, в рамках предстоящей реализации XIV Пятилетнего плана, в китайскую микроэлектронную промышленность будет вложено 1,4 трлн долл., и в качестве новых полупроводниковых компаний уже зарегистрировались 13 тыс. фирм – однако это не значит, что все они получат свой кусок инвестиционного пирога.

Развитие микроэлектронной отрасли в КНР не всегда шло по плану – в частности, из-за нехватки квалифицированных кадров и оборудования, которое западные страны всегда довольно неохотно поставляли Китаю. Особенно хорошо это видно сейчас, в ходе ведущейся США против КНР холодной технологической войны. Тем не менее производство ИС китайскими предприятиями выросло с 5,8 млрд долл. в 2010 г. до 13,4 млрд в 2015-м, а в 2021 г. планируется достичь рубежа в 29,7 млрд долл. Показатели филиалов зарубежных фирм, расположенных на территории Поднебесной, составляют 2,3, 8,9 и 15,8 млрд долл. соответственно.

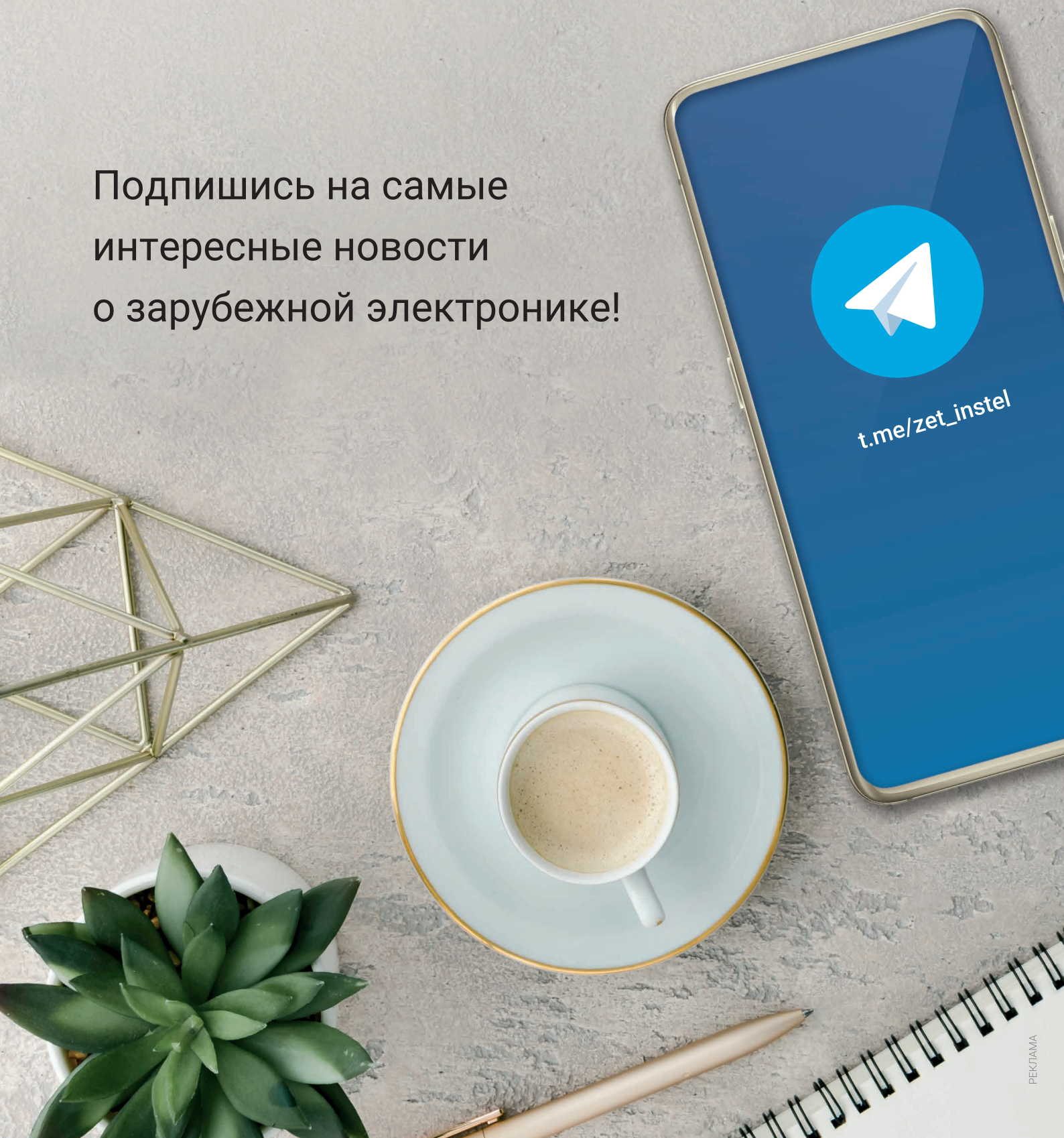
Михаил Макушин,
главный специалист отдела научно-технического планирования РЭП

Зарубежная электроника

теперь в Telegram

t.me/zet_instel

Подпишись на самые
интересные новости
о зарубежной электронике!



РЕКЛАМА

Обзор ключевых компаний в сфере платформ автономных транспортных средств

Ключевые слова: автономные транспортные средства (autonomous vehicle, AV), Единая служба доставки посылок (United Parcel Service, UPS), графические процессоры, электромобили.

Разработками в сфере автономных транспортных средств сегодня заняты такие крупные компании или совместные проекты, как Waymo, Cruise, Argo.ai, Aurora, nVidia, Amazon-Zoox, Motional, а также ряд китайских компаний и некоторые агрегаторы такси. Вниманию читателей предлагается продолжение исследований EE Times, представленных в выпуске 11 (Автомобильная электроника: Платформы и экономика автономных транспортных средств).

Журналисты еженедельника EE Times рассмотрели пять основных платформ автономных транспортных средств (autonomous vehicle, AV). Общий объем инвестиций по соответствующим компаниям за период 2019–2020 гг. составляет приблизительно 32 млрд долл. (см. таблицу). Каждая из этих фирм или платформ характеризуется собственными подходами и стратегиями. Значительное влияние на разработку AV-платформ оказывают корпорации компании nVidia и Amazon-Zoox.

WAYMO

Компания Waymo признана лидером в разработке программных платформ AV благодаря раннему запуску в 2009 г. и обширным инвестициям. В Waymo работает около 1500 сотрудников.

Программная платформа Waymo Driver ориентирована на три сценария использования AV. Сценарий использования роботакси с платными клиентами был развернут в американском Финиксе в декабре 2018 г. Пробная эксплуатация Early Rider была начата в июне 2017 г. в качестве бесплатной услуги. Тогда система помощи водителю использовалась в качестве резервной, но в сентябре 2019 г. Waymo запустила сервис без водителя. Доля поездок без водителя составляла менее 10% от общего числа поездок, но вскоре, по данным Waymo, почти все поездки будут обслуживаться роботакси без водителя (только в Финиксе).

Кроме того, Waymo тестирует доставку товаров с помощью фургонов, используемых в ее службе роботакси. В I кв. 2020 г. был запущен пилотный проект с Единой службой доставки посылок (United Parcel Service, UPS): фургоны Waymo забирают посылки в магази-

ТАБЛИЦА
ОСНОВНЫЕ ПЛАТФОРМЫ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Платформа / Основной разработчик	Объем инвестиций	Тестирование платформ
Waymo (дочерняя компания Alphabet Inc.)	От 4 до 5 млрд долл. В 2020 г. Waymo получила венчурное финансирование в размере 3 млрд долл.	Общее число машин, используемых при тестировании AV-платформ, – 600 единиц. Из них около 400 – в службе роботакси Waymo One (Финикс, шт. Аризона, США). Тестирование проводится в реальном и виртуальном режимах. В целом к настоящему времени в рамках испытаний на дорогах машинами с AV-платформами пройдено более 33,7 млн км. В рамках виртуальных испытаний общий пробег составляет 27 млрд км (с конца марта до середины мая испытания были прекращены из-за пандемии COVID-19). Среднемесячное приращение тестового пробега 1,61 млрд км
Cruise (в составе General Motors)	От GM: 728 млн долл. (2018), 1 млрд долл. (2019); также 7 млрд долл. от SoftBank, Honda и нескольких венчурных капиталистов. Общая оценка венчурных капиталовложений – около 20 млрд долл.	В общей сложности с 2017 по 2019 г. AV прошли 2,2 млн км, предположительное общее количество тестовых миль AV в настоящее время – более 3,2 млн км. Данные о виртуальных тестовых милях AV от Cruise отсутствуют
Argo.ai	Корпорация Ford в 2017 г. взяла на себя пятилетнее обязательство инвестировать в Argo 1 млрд долл. В июне 2020 г. закрылась инвестиционная сделка между Argo и Volkswagen: VW инвестирует 2,6 млрд долл. в Argo в рамках сотрудничества VW и Ford в области AV, электромобилей и других технологий	Около 1,6 млн виртуальных км в день
Aurora	690 млн долл. венчурного финансирования (один из инвесторов – Hyundai)	Aurora сосредоточена на виртуальном тестировании. Несколько AV-систем проходят дорожные испытания. Согласно данным тестирования Департамента автотранспорта Калифорнии, в 2019 г. Aurora использовала только 6 AV, однако у нее имеются дополнительные AV в Питтсбурге (шт. Пенсильвания, США)
Motional (совместное предприятие Aptiv и Hyundai)	Общий вклад Aptiv и Hyundai составляет 4 млрд долл.	Motional управляет более чем 100 AV-системами во многих городах, включая Лас-Вегас, Бостон и Сингапур. В январе 2020 г. AV-автомобили совершили более 100 тыс. поездок в качестве роботакси в присутствии водителей

нах и доставляют их на сортировочные станции UPS.

Также на программной платформе Waymo Driver тестируются автономные грузовики под брендом Waymo Via. Компания Waymo Via начала испытания в транспортном коридоре Техас – Нью-Мексико – Аризона – Калифорния. Центром тестирования автономных грузовиков стал Даллас (шт. Техас).

Стратегия Waymo состоит в том, чтобы лицензировать свою программную платформу Waymo Driver автопроизводителям (потребительские и коммерческие автомобили), операторам автопарков и другим участникам, использующим AV. Ожидается, что компания расширит предоставление услуги роботакси и на другие города, кроме Финикса.

Среди партнеров Waymo – несколько OEM-производителей, таких как Renault, Nissan, Volvo, Jaguar и Fiat Chrysler (FCA). Компания также работает с Magna, которая интегрирует FCA Pacifica и Jaguar I-Pace с оборудованием AV и необходимыми для его работы датчиками. Waymo заказала 60 тыс. машин Pacifica и 22 тыс. I-Pace для использования в будущих AV, но график поставок этих автомобилей недоступен и, по всей видимости, может быть изменен.

CRUISE

Компания Cruise была основана в 2013 г. и приобретена корпорацией General Motors (GM) в феврале 2016-го примерно за 1 млрд долл. GM продолжает инвестировать в Cruise и в настоящее время является лидером по затратам на платформы АТС среди автопроизводителей. В Cruise работает около 2000 сотрудников, для тестирования используются более 250 AV-систем.

Впоследствии к GM для инвестирования в Cruise присоединилась Honda, и в январе 2020 г. три компании анонсировали полностью электрический AV Origin – первый автомобиль, разработанный специально для сценариев использования AV, включая аппаратное резервирование для работы без водителя. Запуск в производство запланирован на 2022 г. на заводе GM в Детройте.

Когда штат Калифорния разрешит использовать роботакси, Cruise собирается развернуть соответствующую сеть в Сан-Франциско. По мере доступности планируется задействовать автомобили Origin. С середины 2018 г. компания предоставляет услуги роботакси в Сан-Франциско своим сотрудникам.

Cruise также намерена развивать доставку товаров с помощью AV. Когда разразилась пандемия COVID-19, Cruise начала использовать свои AV в Сан-Франциско для доставки посылок в местные продовольственные банки и аналогичной помощи, осуществив более 100 тыс. доставок.

ARGO.AI

Компания основана в 2016 г., ее основные клиенты и инвесторы – Ford и Volkswagen. Argo намерена продавать свою программную платформу AV другим фирмам.

У Argo есть некоторые очевидные преимущества: ее генеральный директор обладает бóльшим опытом в автомобильной промышленности, чем руководители конкурентов, и проводимая им политика выглядит более продуманной и менее претенциозной в сравнении с тем, что делают другие разработчики программного обеспечения AV, при этом компания публикует весьма ограниченную информацию о своей деятельности по тестирова-

нию AV. В компании верят в эффективность AV-моделирования: объем испытаний равен примерно 1,6 млн виртуальных км в день. Принадлежащий Argo парк AV оценивается в 150 экземпляров.

Argo ориентируется на два сценария использования: грузовые AV и роботакси. Оба варианта тестируются совместно с Ford в Майами. Тестирование роботакси Argo проводила вместе с Lyft, в тестировании AV-доставки товаров принимали участие компании Walmart, Postmates и Domino. Argo также использовала свои тестовые AV-автомобили для доставки товаров во время эпидемии COVID-19 в Питтсбурге.

AURORA

Компания Aurora создана в 2017 г. тремя основателями с опытом работы в сфере AV. Генеральный директор Aurora, до того как стать соучредителем компании, руководил AV-разработкой Waymo. Программная платформа Aurora, как и у Waymo, носит название Driver и ориентирована на множество вариантов использования AV. Aurora Driver интегрирована с шестью категориями транспортных средств: седанами, внедорожниками, минивэнами, большими коммерческими автомобилями и грузовиками.

Aurora – самая независимая из всех компаний, занимающихся платформами ПО AV, поскольку не связана с крупными OEM, за исключением Hyundai, инвестировавшей в Aurora немалые средства. В число инвесторов также входит Amazon. По состоянию на май 2020 г. в Aurora работало около 500 человек.

Компания развивает собственную экосистему Aurora для поддержки широкого круга партнеров, включая производителей автомобилей и операторов автопарков, начиная от услуг пассажироперевозки до логистики и услуг по управлению автопарком. Ядро экосистемы – программное обеспечение платформы Aurora Driver и оборудование для автономного вождения. Особенность Aurora Driver – значительная степень независимости от другого управляющего оборудования автомобиля. Второе ядро – Aurora Cloud – представляет собой единый интерфейс для партнеров.

По словам представителей компании, «экосистема Aurora была спроектирована с учетом гибкости, поэтому Aurora Driver может быть сначала развернута в приложениях для перевозки грузов от производителя к поставщикам, затем для доставки товаров непосредственно потребителю и, наконец, в сетях перевозки пассажиров». При отладке платформы Aurora Driver компания сосредотачивается в первую очередь на виртуальном тестировании, и лишь после тысяч виртуальных миль переходит непосредственно к дорожным испытаниям.

MOTIONAL

Motional – это совместное предприятие Aptiv и Hyundai (обоим принадлежит по 50% акций компании), специализирующееся на потребительских роботакси. Компания разрабатывает программную AV-платформу для поставщиков услуг роботакси, операторов автопарков и производителей автомобилей, развертывание планируется в 2022 г.

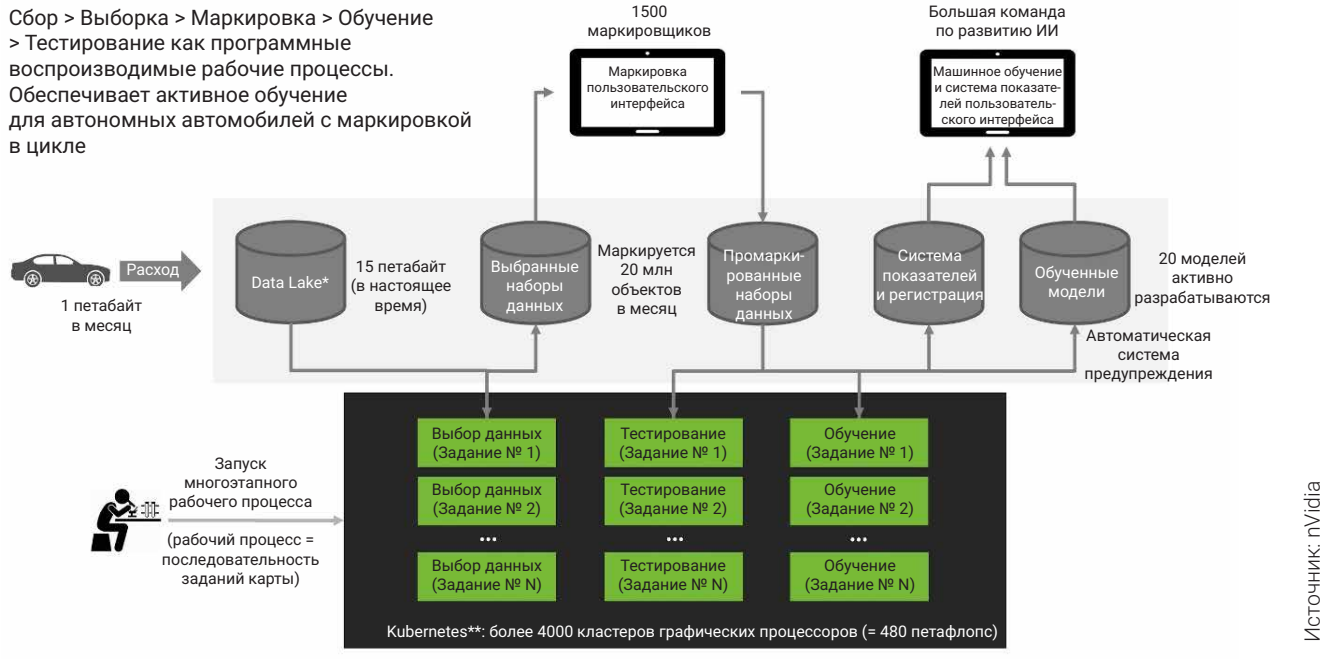
В основе платформы Motional лежит главным образом AV-технология Aptiv. Компания Aptiv стала одной из первых фирм, начавших приобретать AV-стартапы, такие как Ottomatika в 2013 г. и nuTonomy в 2017-м, и отлично справилась с интеграцией этих приобретений в мощную программную AV-платформу для использования в роботакси.

NVIDIA

Компания nVidia известна в первую очередь своим явным лидерством в поставках ИС графических процессоров для компьютерного AV-оборудования. Но она также поставляет большое количество ПО AV, уделяя особое внимание программным инструментам и платформам, необходимым для разработки, тестирования и поверки программных платформ AV у клиентов. Ключ к успеху компании – CUDA, платформа параллельных вычислений и модель интерфейса прикладного программирования. Ее программный уровень дает прямой доступ к виртуальному набору команд графического процессора и параллельным вычислительным элементам.

Платформа CUDA стала ведущей для разработки алгоритмов и приложений ИИ с использованием машинного обучения и нейронных сетей. Графические процессоры nVidia способны обеспечить всевозрастающую производительность вычислений, необходимую приложениям ИИ, с помощью совместимых процессоров GPU разных поколений. Аналогичная динамика наблюдается в индустрии AV- оборудования и ПО.

Компания также отдает себе отчет, что разработку программного обеспечения AV и особенно обучение моделей искусственного интеллекта сложно выполнять на ПК и для этого должны быть задействованы крупные ИТ-системы или облачные системы, такие как AWS, Azure, Google. В поставляемых ею ИТ-системах используются графические процессоры, совместимые с графическими процессорами, интегрированными в автомобильные AV-системы на базе nVidia. Благодаря этому разработка и тестирование AV-систем с использованием графических процессоров nVidia становятся выгодным занятием. nVidia



Источник: nVidia

Облачная веб-платформа MagLev 2.0 для разработки программного обеспечения AV

* Data Lake — «Озеро данных», хранилище данных, которое может хранить большие объемы структурированных, полуструктурированных и неструктурированных данных.
** Kubernetes – открытое ПО для автоматизации развертывания, масштабирования контейнеризированных приложений и управления ими. Поддерживает основные технологии контейнеризации, включая Docker, rkt, также возможна поддержка технологий аппаратной виртуализации.

В ЦЕНТРЕ ВНИМАНИЯ: NVIDIA

nVidia – американская корпорация, специализирующаяся на разработке графических процессоров для игрового и профессионального рынков, а также «систем-на-кристалле» (SoC) для мобильных систем и автомобильной электроники.

Штаб-квартира: Санта-Клара, шт. Калифорния, США.

Дата основания: 1993 г.

Выручка: 11,716 млрд долл. (2018 г.).

Чистая прибыль: 4,141 млрд долл. (2018 г.).

Количество работников: 18,1 тыс. чел. (на октябрь 2020 г.).

Основная продукция:

- графические процессоры;
- центральные процессоры;
- чипсеты;
- драйверы;
- планшетные компьютеры;
- ТВ-аксессуары;
- оборудование для автомобильной промышленности.

Основная продуктовая линейка графических процессоров nVidia, обозначенная как GeForce, находится в прямой конкуренции с продуктами Radeon от Advanced Micro Devices (AMD). Помимо AMD в число конкурентов nVidia входят Intel и Qualcomm. Кроме производства графических процессоров компания предоставляет исследователям и ученым возможности параллельной обработки, которые позволяют им эффективно запускать высокопроизводительные приложения. Подобные технологии используются в суперкомпьютерах по всему миру. Совсем недавно nVidia вышла на рынок мобильных компьютеров с мобильными процессорами Tegra для смартфонов и планшетных ПК, а также автомобильных навигационных и информационно-развлекательных систем.

Последние события и сделки

11 марта 2019 г.: nVidia объявила о покупке Mellanox Technologies за 6,9 млрд долл. Цель – существенно расширить свое присутствие на рынке высокопроизводительных вычислений.

Май 2020 г.: ведущие ученые nVidia разработали аппарат ИВЛ с открытым исходным кодом. Цель – решить проблему нехватки данных устройств, вызванную глобальной пандемией COVID-19.

14 мая 2020 г.: компания официально анонсировала свою микроархитектуру графического процессора Ampere и ускоритель графического процессора nVidia A100.

С июля 2020 г. nVidia вела переговоры о покупке Arm Holdings, британского разработчика ИС. 13 сентября 2020 г. было объявлено, что nVidia купит Arm у SoftBank Group за 40 млрд долл., при этом последняя сохранит за собой 10%-ную долю nVidia.

Октябрь 2020 г.: nVidia объявила о своем плане построить в Кембридже самый мощный в Великобритании суперкомпьютер Cambridge-1. Он будет использовать ИИ для поддержки медицинских исследований и станет национальным центром инноваций, способствуя новаторской работе в области здравоохранения и создания лекарств.

особенно сильна в виртуальном тестировании – для этого комбинируются аппаратные и программные платформы AV, которые могут использовать клиенты компании.

На виртуальной конференции 2020 г., посвященной графическим процессорам (nVidia's GPU Technology Conference (GTC)), nVidia представила свою облачную веб-платформу MagLev 2.0 для разработки ПО AV (см. рисунок). Презентация показывает, насколько разработка ПО AV отличается от разработки традиционного автомобильного ПО, такого как информационно-развлекательные системы или приложения помощи водителю ADAS. Ключевое отличие – в объеме данных, поступающих с датчиков (в петабайтах), которые необходимо изучить и встроить в основанные на ИИ алгоритмы логического вывода, используемые в ПО AV.

AMAZON-ZOOX

Amazon уже несколько лет инвестирует в автономные транспортные средства, что неудивительно, учитывая, что эта логистическая компания – одна из крупнейших в мире. В 2020 г. Amazon, по прогнозам, отправит по всему миру около 10 млрд посылок. В феврале 2019 г. Amazon в рамках венчурных инвестиций вложила 530 млн долл. в компанию Aurora, платформа которой – Aurora Driver – предназначена для грузовых AV, автономных грузовиков и роботакси, и Amazon весьма заинтересована в первых двух применениях. Также Amazon разработала собственный автономный мини-робомобиль для т. н. «доставки последней мили» – полевые испытания Amazon Scout начались в январе 2019 г. в Вашингтоне, – участвовала как партнер в концептуальном проекте Toyota e-Palette, а сейчас проводит тестирование перед запуском автономных грузовиков Embark.

Самая крупная инвестиция Amazon в AV – это приобретение фирмы Zoox за 1,2 млрд долл. в июне 2020 г. Zoox, использующая альтернативный подход к своему роботакси, разрабатывает как программную платформу AV, так и индивидуальную архитектуру автомобиля с четырехколесным рулевым управлением и без различия между движением назад и вперед. Из-за пандемии COVID-19 венчурные инвестиции в AV сильно упали, и Zoox начала искать партнера, который смог бы ее приобрести. Планируется, что Zoox продолжит разработку своей программной платформы роботакси, а Amazon задействует эту программную платформу для коммерческих AV и сможет также использовать специализированную автомобильную архитектуру в будущем. При этом у Amazon есть варианты – она может предпочесть технологию Zoox или Aurora, а может быть, и то и другое – например, Aurora для автономных грузовиков и Zoox для небольших грузовых автомобилей [1, 2].

Продолжение следует…

1. Juliussen Egil. AV Software Platforms: Cooperation & Competition. EE Times magazine, October 11, 2020: https://www.eetimes.com/av-software-platforms-cooperation-competition/?utm_source=newsletter&utm_campaign=link&utm_medium=EETimesDaily-20201012&oly_enc_id=5245B7817912J8Z#

2. Juliussen Egil. AV Software Platforms: More Partners & Rivals. EE Times magazine, October 15, 2020: https://www.eetimes.com/av-software-platforms-more-partners-rivals/

Криптографы готовятся к квантовой эре

Ключевые слова: алгоритм Шора, квантовые вычисления, кибербезопасность, криптография, цифровой сертификат

Квантовые вычисления обещают значительные прорывы в науке, медицине, финансовых стратегиях и т. д. Но с их помощью также появляется возможность взламывать современные криптографические системы, что делает их потенциально опасными для целого ряда технологий, от Интернета вещей до сред, предположительно защищенных от взлома, таких как блокчейн. Соответственно, специалистам в области кибербезопасности предстоит встретить наступление эры квантовых вычислений во всеоружии.

Криптография с нами повсюду – в сообщениях WhatsApp, онлайн-платежах, сайтах электронной торговли. Во избежание отслеживания в ходе проведения операций данные незаметно для пользователя несколько раз преобразуются. Даже «простой» Wi-Fi защищен протоколом Wi-Fi Protected Access 2 (WPA2), а каждая транзакция по кредитной карте – стандартом шифрования AES[1]. Все это разные методы шифрования с различным математическим аппаратом.

В качестве упреждающей меры по отношению к потенциальным проблемам безопасности длина ключей шифрования постепенно увеличивается, а алгоритмы становятся все более сложными. Общий принцип заключается в том, что чем больше длина ключа, тем труднее его взломать с применением полного перебора[2] или аналогичных методов, которые киберпреступники задействуют тысячи раз в попытках взломать ключи – пока не найдут нужный подход.

Все это остается верным для классических компьютеров, работающих с битами и байтами. Однако с появлением квантовых компьютеров, использующих «квантовые биты», или кубиты[3], ситуация меняется. В случае их применения для взлома ключей шифрования шансы преступников на успех увеличиваются, так как квантовые компьютеры способны обрабатывать параллельно огромное число потенциальных результатов.

Действительно, традиционные компьютеры опираются на два состояния – «включено» и «выключено», именно поэтому они называются двоичными. Квантовые же компьютеры способны также использовать третье состояние, именуемое суперпозицией, что дает им уникальную возможность очень быстро выполнять целочисленную факторизацию (разложение на множители). Поэтому современные алгоритмы, основанные на факторизации, в будущем становятся потенциально уязвимыми. Если традиционный двоичный компьютер решает подобные задачи медленно, то квантовый компьютер с достаточно стабильными кубитами, благодаря эффективным алгоритмам, известным как «алгоритм Шора», делает это гораздо быстрее и теоретически способен взломать

современные криптографические алгоритмы, такие как RSA[4] и ECC (эллиптическая кривая).

Прогресс в квантовых вычислениях может поставить под угрозу действенность сертификатов PKI X.509 (RSA, ECDSA[5]), используемых сегодня для аутентификации и алгоритмов цифровой подписи. Теперь для защиты придется применять новые, квантово-устойчивые алгоритмы.

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Квантовые компьютеры основаны на принципе кодирования цифрового значения в свойство элементарной частицы – кубит. В соответствии с законами квантовой механики операции в этих квантовых процессорах выполняются путем преобразования элементарных частиц. Алгоритм Шора (названный по имени своего разработчика Питера Шора) позволяет разложить целое число на полиномы, что обещает облегчить взлом зашифрованных данных в наступающей квантовой эре. При этом вторая часть алгоритма дает возможность ускорить поиск значения или инверсии функции.

При асимметричном шифровании создается пара открыто-закрытых ключей с очень сложной математической зависимостью. Секретный закрытый ключ поддерживает создание цифровой подписи, которая может быть проверена с помощью открытого ключа, который, в свою очередь, защищен необратимой (односторонней) функцией. Алгоритм Шора позволяет решить математическую задачу, лежащую в основе многих алгоритмов асимметричного шифрования (или открыто-закрытого ключа), таких как алгоритм RSA. С появлением квантовых процессоров, способных реализовать алгоритм Шора, все асимметричные алгоритмы RSA, ECC и все криптографические алгоритмы, основанные на математических задачах целочисленной факторизации, дискретных логарифмах и дискретных логарифмах на эллиптических кривых, станут полностью небезопасными.

КВАНТОВАЯ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ

Что мешает квантовым компьютерам уже сейчас превзойти обычные? Трудности создания и поддержания стабильности. Любое незначительное изменение температуры или вибрации могут привести к сбою в вычислениях. Тем не менее многие компании, включая Google и IBM, смогли добиться в этой сфере значительных успехов. Вывод однозначен – всем заинтересованным сторонам следует обезопасить свои данные еще до того, как квантовые вычисления станут повседневностью. Иначе, когда квантовые компьютеры попадут в руки киберпреступников, последним понадобится очень мало времени для расшифровки почти любой информации. Алгоритмы RSA и ECC практически невозможно расшифровать на традиционном компьютере с применением метода полного перебора. Но на квантовом компьютере с достаточным числом стабильных кубитов эта задача существенно облегчается. Таким образом, квантовые вычисления представляют собой угрозу для всех средств и линий связи, торговли и финансов.

Многие фирмы и ИТ-менеджеры уже работают над средствами защиты от квантовых атак. Важные факторы, которые здесь следует учитывать, – обучение и профессиональная подготовка. Квантово-безопасные алгоритмы шифрования уже созданы, но еще не получи-

ли широкого распространения. Чаще всего называют две причины этого. Первая заключается в недостаточной стандартизации новых алгоритмов, вторая – в том, что необходимо с предельной точностью описывать, как, когда и почему будет использоваться шифрование для существующих платформ и сервисов.

Предложенные в США квантово-устойчивые криптографические алгоритмы в настоящее время проходят процесс отбора в Национальном институте стандартов и технологий (NIST)[6]. Трудности возникают из-за выбора математического подхода, который должен быть сложным как для традиционных, так и для квантовых компьютеров. Современные криптографические алгоритмы, такие как RSA и ECC, базируются на алгебраических задачах, тогда как в основе квантово-устойчивых алгоритмов лежит совершенно другой класс задач. Например, криптография на основе решеток использует геометрический, а не алгебраический подход, что снижает эффективность особых свойств квантового компьютера. Другими словами, криптография на основе решеток трудна как для классических, так и для квантовых компьютеров, что делает ее хорошим кандидатом на то, чтобы стать основой подхода для постквантового криптографического алгоритма.

Отмечается, что сейчас очень важно получить практический опыт работы с новыми постквантовыми алгоритмами и протестировать выпуск и использование безопасных квантовых сертификатов. Например, фирма Sectigo объявила о создании «квантовой лаборатории», сочетающей web-ресурс, призванный обеспечить возможность образования по данному направлению, с набором инструментальных средств, позволяющим пользователю экспериментировать с квантово-устойчивыми алгоритмами и выпускать гибридные сертификаты. Решение включает в себя основные инструменты, необходимые для создания квантово-безопасных сертификатов для различных вариантов использования, а также примеры приложений, демонстрирующих использование квантово-безопасных алгоритмов (см. рисунок).

Источник: Sectigo

Использование гибридных сертификатов, сочетающих элементы традиционных и новых квантово-безопасных сертификатов, как один из способов подготовки к эре квантовых вычислений

В литературе описываются новые схемы квантовой защиты. Большинство из них имеют открытый ключ и значительно более длинные подписи, чем используемые сегодня. Хотя постквантовые сигнатуры могут в некоторых случаях хорошо работать, существуют опасения по поводу их размера и затрат на обработку в рамках технологий, использующих сертификаты X.509. Стандарт X.509 определяется как цифровой сертификат, электронный документ, связанный с физическим лицом или компьютерной службой и удостоверяющий их личность; он состоит из открытого и закрытого ключей, предоставленных Центром сертификации. В целом, будучи сертификатом идентичности, он применяется в системах аутентификации, основанных на инфраструктуре открытых ключей (PKI); кроме того, может использоваться для подписи и шифрования сообщений электронной почты.

Квантово-безопасные сертификаты – это PKI-сертификаты на основе стандарта X.509, где пара ключей генерируется с помощью квантово-устойчивого алгоритма. В будущем, скорее всего, будут одновременно использоваться как традиционные, так и постквантовые алгоритмы, поскольку маловероятно, что удастся быстро заменить все существующие инфраструктуры PKI. Гибридные сертификаты будут иметь как традиционные, так и квантово-безопасные ключи и подписи, что поможет преодолеть разрыв между системами, разработанными для использования преимуществ новых алгоритмов, и теми системами, которые на это не способны.

Почти все алгоритмы, работающие с открыто-закрытым ключом и используемые ежедневно для просмотра веб-страниц, подчиняются алгоритму Шора, что делает их небезопасными. Необходимо разработать новые алгоритмы для т. н. постквантовой эры, т. е. выявить и создать криптографические алгоритмы, остающиеся безопасными и после появления квантовых процессоров. Исследователи предлагают несколько постквантовых криптографических алгоритмов с разными подходами и основанных на различных математических задачах, которые предполагают высокое потребление сетевых ресурсов.

Di Paolo Emilio Maurizio. Quantum Computing is a Challenge for Cryptography. EE Times, October 2, 2020: https://www.eetimes.com/quantum-computing-is-a-challenge-for-cryptography/

Носимые устройства бытовой и медицинской электроники

Ключевые слова: бытовая электроника, медицинская электроника, носимые устройства, датчики, умные наушники, слуховые аппараты, COVID-19, мониторинг глюкозы.

Недавно группа Yole Développement (Лион, Франция) представила исследование «Носимые устройства в потребительских и медицинских приложениях за 2020 г.» (Wearables in Consumer and Medical Applications 2020 report). В нем содержится подробный анализ технологий носимых приборов, ориентированных на потребительскую и медицинскую электронику, обзор новых функций носимых устройств и соответствующих датчиков.

Основные выводы, сделанные специалистами Yole, следующие:

- ожидается, что к 2025 г. объем рынка носимых устройств достигнет 97,9 млрд долл., при этом среднегодовой темп прироста в сложных процентах (CAGR) в 2019–2025 гг. составит 11,2%;
- приближается эра слуховых аппаратов и наушников: в 2025 г. их продажи составят примерно 35 млрд долл., в том числе наушников-вкладышей – 26 млрд долл.;
- потребительские носимые устройства укрепляют свое присутствие в секторе медицинской электроники;
- рынок носимых устройств столкнулся с проблемами из-за текущей ситуации с эпидемией COVID-19.

Ведущим поставщиком в сфере носимых устройств остается корпорация Apple, занимающая почти 40% мирового рынка. Ее основные конкуренты, Samsung и Xiaomi, контролируют 7 и 6% продаж соответственно.

В плане технологических перспектив решения на основе MEMS по-прежнему являются ключевыми с точки зрения миниатюризации и оптимизации энергопотребления (рис. 1).

Большое значение для сокращения времени вывода на рынок и снижения затрат имеет возможность обработки нескольких параметров через специализированную платформу (рис. 2).

Эпоха носимых устройств определенно наступила, и это подтверждается большим спросом со стороны потребителей. Будь то приборы, носимые как браслет, носимые на голове приборы или умные наушники, носимые непосредственно на теле устройства или умная одежда – к 2025 г. их суммарные продажи приблизятся к 100 млрд долл.

В настоящее время носимые устройства даже считаются новой волной потребительской электроники, рассматриваемой как фактор роста производителями смартфонов, рынок которых достиг зрелости. Соответственно, темпы роста их продаж измеряются теперь однозначными показателями, а параллельно растут доходы поставщиков услуг, реализуемых через носимые приборы. Что же делает носимые устройства такими привлекательными?

Причина в двух основных приложениях: фитнес и здоровье. Если спортсмены быстро

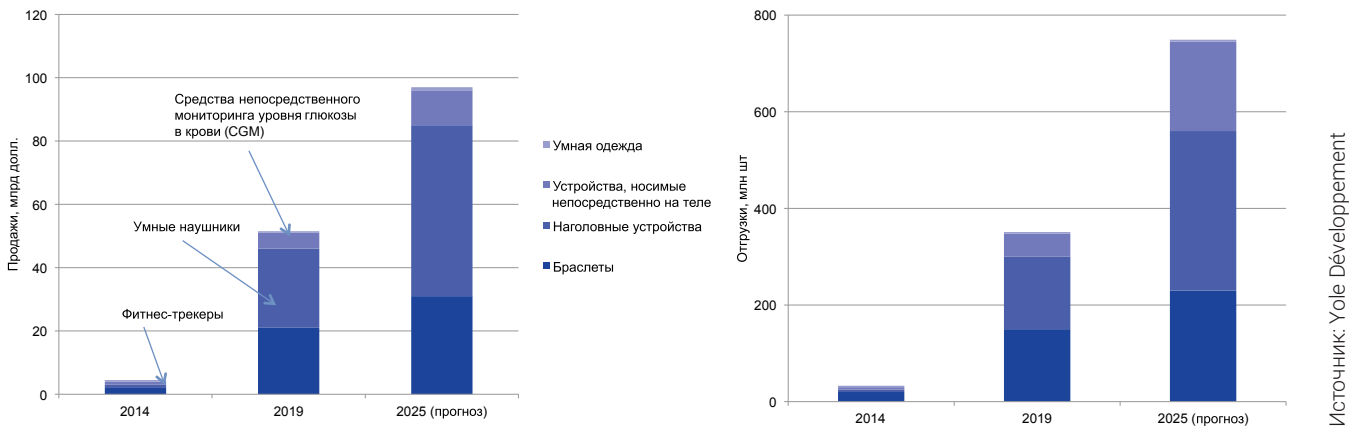


Рисунок 1. Динамика рынка носимых устройств в 2014–2025 гг.

оценили удобство фитнес-браслетов для отслеживания своих результатов, то приложения для мониторинга состояния здоровья быстро стали популярными среди широкой публики, использующей умные часы и наушники, причем последние вызвали большой интерес. Этот успех объясняется необходимостью количественной самооценки, позволяющей людям контролировать параметры своего здоровья в рамках профилактического подхода к хроническим заболеваниям. Кроме того, играет свою роль и преобразование систем здравоохранения с целью снижения затрат.

В результате расширение количества функций носимых устройств стало необходимым для удовлетворения потребностей наибольшего числа пользователей. Эти функции могут быть связаны с использованием систем,

Рисунок 2. Потребительские носимые устройства – от фитнеса до функций здравоохранения

обеспечивающих больший комфорт или интерактивность, со сбором жизненно важных параметров или даже данных об окружающей среде. Добавление возможностей искусственного интеллекта призвано объединить всю собираемую информацию с целью помочь пользователю в прогнозировании и принятии решений.

Носимые устройства не только вызвали интерес у игроков в сфере бытовой электроники, но и привлекли внимание производителей медицинского оборудования, особенно в период пандемии COVID-19, в связи с которой носимые устройства с функциями здравоохранения все шире применяются для отслеживания жизненно важных параметров организма. Однако выполнение медицинских функций не превращает носимые приборы в специализированные устройства. Компании, выпускающие бытовые носимые устройства, в основном нацелены на фитнес и велнес (англ. wellness, от be well – «хорошее самочувствие» или «благополучие», концепция здорового образа жизни). В свою очередь, компании, выпускающие медицинские носимые устройства, сосредоточены на мониторинге и диагностике пациентов. Ключевыми критериями для этих медицинских носимых устройств будут надежность систем и точность данных, которые они генерируют. Так, минимально инвазивные датчики CGM предоставляют людям с диабетом альтернативу измерениям с помощью глюкометров, обеспечивая простоту использования и комфорт. Более широкое применение умных пластырей позволяет больницам раньше отправлять пациентов домой и контролировать их удаленно. Сегодня в структуре продаж носимых устройств на медицинские приборы приходится около 20%.

В то же время границы между сертифицированными носимыми медицинскими устройствами и потребительскими носимыми устройствами, включающими в себя функции здравоохранения, постепенно стираются. Развитие биосенсорных платформ, интегрируемых в носимые устройства – умные часы, а в последнее время и в наушники, – достигло медицинского уровня. В этой конкурентной борьбе производители потребительских носимых устройств предлагают доступные цены на системы и возможности крупномасштабного производства, что, в свою очередь, может принести пользу в проведении широких клинических исследований с массовым сбором данных.

В то время как степень взаимопроникновения между медицинским сектором и потребительским здравоохранением с учетом внебиржевых продаж растет, конкуренция между поставщиками потребительских и медицинских устройств также усиливается. Производители бытовых электронных систем занимают наибольшую долю рынка. Неудивительно – хотя бы потому, что эти компании являются производителями смартфонов и другой массово выпускаемой продукции.

How Will Wearables Boost the Consumer and Medical Electronics Market? i-Micronews, October 21, 2020: https://www.i-micronews.com/how-will-wearables-boost-the-consumer-and-medical-electronics-market/

Китайские власти сожалеют о пустой растрате средств

Ключевые слова: инвестиции, микроэлектроника, планирование, проектирование, санкции.

Благодаря сочетанию централизованного пятилетнего планирования и рыночных механизмов КНР за последние 25–30 лет сумела практически с нуля создать современную полупроводниковую промышленность. На рубеже XII и XIII пятилеток, в 2014–2015 гг., было принято несколько программ модернизации экономики страны на современной технологической базе. В частности, это план «Сделано в Китае – 2025» (中国制造2025). Однако, несмотря на успехи, в развитии китайской электроники существуют и проблемы, причем они не всегда напрямую связаны с американо-китайской холодной технологической войной.

В одном из недавних выступлений представитель Государственного комитета по развитию и реформам[7] (ГКРР, 国家发展和改革委员会) КНР заявил, что в ходе реализации плана «Сделано в Китае – 2025» большие объемы средств были потрачены впустую, поскольку некоторые компании «…слепо вступали в проекты, связанные с развитием микроэлектроники, не обладая достаточными знаниями о разработке интегральных схем». Ситуация складывается следующим образом:

- с одной стороны, энтузиазм по поводу внутренних инвестиций в микроэлектронную промышленность постоянно растет;
- с другой, некоторые фирмы, приходящие в данную отрасль, не имеют необходимого опыта, технологий и талантов, недостаточно понимают закономерности развития ИС (что приводит к повторному воспроизведению успешных проектов по созданию ИС на более низком уровне, стагнации некоторых проектов, простою заводских площадей и в конечном итоге к бесполезной растрате ресурсов).

Указывается, что за последние 12 месяцев была свернута реализация шести крупных полупроводниковых проектов (см. таблицу).

Представители ГКРР заявляют, что намерены совместно со всеми заинтересованными сторонами предпринимать меры по улучшению проектирования ИС, уделять пристальное внимание планированию промышленных проектов, а также стремиться поддерживать порядок в развитии промышленности «…в ответ на нынешний хаос в отрасли».

Местные обозреватели заявляют, что правительству КНР можно предъявить определенные претензии, связанные с предоставлением крупных грантов полупроводниковым компаниям. Так, согласно данным китайского новостного агентства Qichaca, в 2020 г. вскоре после оглашения планов государственных капиталовложений в отечественную микроэлектронную промышленность в размере 1,4 трлн долл. (в рамках начинающейся реализации XIV Пятилетнего плана социально-экономического развития страны) было зарегистрировано 13 тыс. новых полупроводниковых компаний. При этом полупроводниковыми объявили себя компании

ТАБЛИЦА
ПРОЕКТЫ ПО СОЗДАНИЮ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОИЗВОДСТВ, ПРЕКРАЩЕННЫЕ ИЛИ ПРИОСТАНОВЛЕННЫЕ ЗА ОКТЯБРЬ 2019 – СЕНТЯБРЬ 2020 ГГ.

Компания	Обстоятельства прекращения проекта
Dekema (Nanjing) Semiconductor Technology (Нанкин, провинция Цзянсу)	Подала в июле 2020 г. заявление о банкротстве после инвестирования 3 млрд долл.
Wuhan Hongxin Semiconductor Manufacturing (Ухань)	Находится на грани банкротства после затрат в 19 млрд долл. Единственная установка литографии (для производства 7-нм ИС) в залоге у банка. Проблемы с землепользованием
GF (Chengdu) Integrated Circuit Manufacturing (СП между GlobalFoundries и г. Чэнду стоимостью 9,3 млрд долл.)	Зарегистрированный в США «чистый» кремниевый завод GlobalFoundries (№ 2 в мире, основной капитал – правительство эмирата Абу-Даби) заморозил проект из-за экспортных ограничений Министерства торговли США
Dehuai Semiconductor	Планировала инвестировать 6 млрд долл. Прекратила деятельность без объявления причин, существуют долги по заработной плате сотрудников
Guizhou Huaxintong Semiconductor Technology (Гуйчжоу)	СП с корпорацией Qualcomm, закрыто
Fujian Jin Hua (Фуцзянь)	Производитель ДОЗУ. Строительство завода прекращено после отказа США поставить производственное оборудование

с нулевым опытом не только в области проектирования или производства ИС, но и хоть какой-либо электроники. Ярким примером могут служить две компании, зарегистрировавшиеся в качестве полупроводниковых:

- Shanghai Xinpeng Industry, производитель автозапчастей;
- Dalian Morningstar Network Technology, поставщик морепродуктов и одновременно разработчик онлайн-игр.

Manners David. China to Monitor IC Investment More Carefully. Electronics Weekly, October 22, 2020: https://www.electronicsweekly.com/news/business/china-monitor-ic-investment-carefully-2020–10/

Untether AI переосмысливает архитектуру фон Неймана для ускорителей формирования вывода ИИ

Ключевые слова: архитектура, вычисления в памяти, искусственный интеллект, ускорители ИИ.

Поставщик микросхем искусственного интеллекта Untether AI создал карты ускорителя tsunAImi на собственных микросхемах runAI200. По заявлению компании, это первые блоки, осуществляющие вычисления в памяти и обеспечивающие эффективность до 8 тераопераций в секунду на ватт (ТОПС/Вт), что более чем вдвое превышает скорость вычислений любой другой платы компьютерной шины PCI Express (PCIe).

Вместо традиционной архитектуры фон Неймана, ориентированной на перемещение данных, устройства run200AI, используемые в картах ускорителя tsunAImi (см. рисунок), предназначены для вычислений в памяти. Элемент обработки расположен внутри памяти для создания массива распределенной обработки.

Устройства runAI200 используют целочисленные типы данных и пакетный режим. Банк памяти обладает 385-Кбайт СОЗУ с двумерным массивом из 512 обрабатывающих элементов. На каждую микросхему приходится 511 блоков, что в сумме дает 200 МБайт на устройство. В «спортивном» режиме быстродействие составляет до 502 ТОПС. В режиме «эко» – 8 ТОПС.

По заявлению представителей компании, вычислительная мощность карты ускорителя ИИ обеспечивает пропускную способность ResNet-50 v1.5 более 80 тыс. кадров в секунду при партии = 1, что в три раза превышает пропускную способность ближайшего конкурента. В другом тесте производительности, связанном с обработкой естественного языка, карты-ускорители могут обрабатывать более 12 тыс. запросов в секунду из BERT[8]-базы. Утверждается, что это в четыре раза быстрее, чем у любого другого представленного на рынке продукта аналогичного назначения.

ИИ для формирования логических выводов станет важным элементом в центрах обработки данных, где его плотность вычислений позволит повысить производительность для умных городов и других приложений ИИ и машинного обучения.

Устройства runAI200 производятся с использованием экономичного 16-нм технологического процесса. Карта ускорителя tsunAImi представляет собой карту PCI Express стандартного форм-фактора для использования в «облаке» или на серверах. Она поддерживает открытое программное обеспечение TensorFlow и PyTorch для машинного обучения.

Источник: Untether AI

Карта ускорителя ИИ tsunAImi

В дополнение к карте ускорителя в комплект разработчика программного обеспечения Untether AI imAIgine (SDK) включены квантование, оптимизация, физическое распределение и многочиповое разделение с помощью кнопок. Он также предоставляет набор инструментов визуализации, симулятор с точным циклом и API среды выполнения для интеграции.

Карта ускорителя tsunAImi сейчас находится в стадии тестирования и будет коммерчески доступна в I кв. 2021 г. SDK imAIgine находится в раннем доступе для избранных клиентов и партнеров.

Hayes Caroline. Untether AI Rethinks Von Neumann Architecture for AI Inference Accelerator Cards. Electronics Weekly, October 30, 2020: https://www.electronicsweekly.com/news/products/bus-systems-sbcs/untether-ai-rethinks-von-neumann-architecture-ai-inference-accelerator-cards-2020–10/

СПРАВОЧНИК ПРЕДПРИЯТИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 2020

Актуальные данные по более 500 предприятиям, расположенным в 60 регионах России:

- полное и сокращенное наименование организаций;
- ИНН, ОКВЭД-2, ОКПО;
- Ф.И.О. руководителя;
- юридический адрес;
- телефон;
- e-mail;
- адрес сайта;
- наименование головной организации;
- год основания;
- количество сотрудников;
- специализация;
- вид деятельности;
- состав входящих организаций;
- технологический уровень;
- контакты сотрудников Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России.

БУМАЖНАЯ ВЕРСИЯ

Купить на сайте www.instel.ru в разделе «Издания»

ЭЛЕКТРОННАЯ ВЕРСИЯ

Купить доступ на сайте www.spravochnikrep.ru

РЕКЛАМА

Телефон: 8 (495) 940-65-24 | E-mail: publish@instel.ru

ЦНИИ «ЭЛЕКТРОНИКА»

OCD-скаттерометрия для GAA-процессов

Ключевые слова: круговой затвор, метрология, технологический процесс, топологический элемент, транзистор.

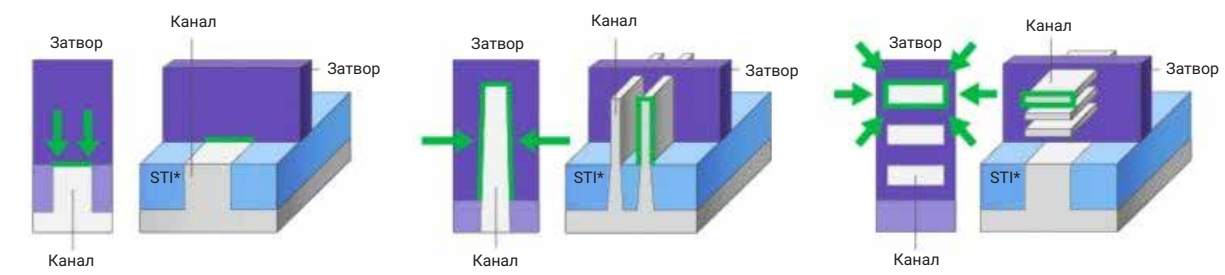
Дальнейшее развитие полупроводниковых технологий связано с переходом на новые приборные структуры – такие, например, как круговые затворы (gate-all-around, GAA), предлагающие значительный рост производительности на технологических уровнях с минимальными размерами топологических элементов. Однако при этом существенно увеличивается сложность технологического процесса, что делает точную метрологию производственных GAA-процессов как более важной, так и более сложной задачей.

При освоении нескольких последних поколений полупроводниковых технологий наиболее перспективной стала оптическая метрология критических размеров на основе на скаттерометрии (OCD-скаттерометрия) – отчасти из-за ее способности измерять трехмерные формы, подповерхностные и вторичные характеристики. Последнее поколение самих OCD-систем обладает улучшенными параметрами отношения сигнал–шум, повышенной точностью сигнала и перспективными возможностями машинного обучения, которые позволяют поддерживать самые сложные этапы GAA-процесса с повторяемостью измерений и высокой производительностью.

GAA-ТРАНЗИСТОРЫ В СРАВНЕНИИ С ПЛАНАРНЫМИ ТРАНЗИСТОРАМИ И FINFET

На протяжении большей части своей истории полупроводниковая промышленность была сосредоточена на планарных транзисторных архитектурах, в которых затвор, расположенный над каналом, управляет потоком тока через канал между истоком и стоком. Исток, канал и сток представляют собой копланарные структуры, созданные на поверхности полупроводниковой пластины, поверх которых формируется затвор (рис. 1). Увеличение вычислительной мощности интегральной схемы по существу связано с уменьшением ее размеров.

Когда номинальная длина затвора приблизилась к 20 нм, планарные приборы столкнулись с эффектами короткого канала, такими как увеличение токов утечки, что ухудшило их производительность. Для борьбы с этими эффектами производители перешли на FinFET-транзисторы, в которых канал имеет форму плавника, окруженного с трех сторон затвором (см. рис. 1). Это позволило увеличить эффек-



Источник: Onto Innovation

Рисунок 1. Архитектуры полевых транзисторов с планарными, «плавниковыми» и круговыми затворами

* STI (shallow trench isolation) – изоляция неглубоких канавок.

тивную площадь затвора в непосредственной близости от канала. FinFET-приборы дали возможность и дальше наращивать вычислительную мощность за счет уменьшения проектных норм – до уровня около 5 нм (отметим, что термин node – технологический уровень, узел – больше не отражает точно длину затворов, а является скорее условным обозначением последовательных поколений с точки зрения увеличения плотности расположения устройств и вычислительной мощности). Затем производители столкнулись с ограничениями FinFET и были вынуждены рассмотреть другие архитектуры. Некоторые выбрали конструкции с круговыми затворами, в которых, как следует из названия, затворы полностью окружают канал (см. рис. 1). GAA-приборы обещают постоянное улучшение производительности, но из-за трехмерности сложность процесса их производства значительно повышается.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ОПТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ

Управление технологическим процессом, обеспечивающее надежное создание функциональных устройств с физическими и электрическими характеристиками, попадающими в заданные окна процесса[9], – неотъемлемая часть любой операции по производству полупроводниковых приборов. Метрология, как наука и практика измерения производительности технологических процессов, обеспечивает основу для управления ими. Точно так же, как производственные процессы эволюционировали для создания более мелких и сложных устройств, измерительные технологии должны были измениться, чтобы контролировать новые процессы. Большая часть оптической метрологии на основе анализа изображений устарела, поскольку критические размеры сократились до субмикронного уровня еще десятилетия назад. Основой отрасли с тех пор стала сканирующая электронная микроскопия, специально разработанная для измерений критических размеров (CD-SEM). Этот неразрушающий подход обеспечивает нисходящие двумерные измерения. Электронная микроскопия поперечных сечений (XSEM) может обеспечить получение трехмерной информации, но за счет дополнительной разрушающей подготовки образца. Поскольку масштабирование продолжалось, разрешающая способность SEM стала недостаточной и производители начали применять просвечивающую электронную микроскопию (TEM), которая позволяет различать отдельные атомы, но только ценой разрушающей подготовки образца.

ТЕМ остается золотым стандартом точности и эталонных измерений, но ее длительный цикл и низкая пропускная способность плохо подходят для приложений управления технологическими процессами.

Хотя критические размеры давным-давно вышли за пределы разрешающей способности методов оптического формирования изображений, другие оптические методы могут обеспечить проведение неразрушающих измерений с большой скоростью и повторяемостью. OCD-скаттерометрия позволяет получить информацию о форме, размерах и составе на основе диаграмм рассеяния, наблюдаемых в свете, взаимодействовавшем с образцом. Для этого требуется правильно расположить схожие топологические элементы, что широко распространено в интегральных схемах. Мишень может быть встроенным в схему топологическим элементом, таким как линейная матрица, или специально разработанной измерительной мишенью, обычно расположенной в области между кристаллами на пластине.

Простейшая иллюстрация OCD-измерения – интерференционная картина, возникающая при падении света на расположенную с правильными интервалами матрицу токопроводящих дорожек (проводников) и пространств между ними. Расстояние между интерференционными полосами зависит от длины волны света, конфигурации оптического тракта и расстояния между проводниками. Поскольку информация переносится в форме фазовых соотношений световых волн, метод не ограничен связанными с длиной волны дифракционными ограничениями на разрешающую способность изображения. По мере того как производители уходили ниже 20-нм проектных норм и осваивали архитектуры FinFET с критическими трехмерными топологическими элементами, скаттерометрия становилась одним из основных методов метрологии управления технологическими процессами.

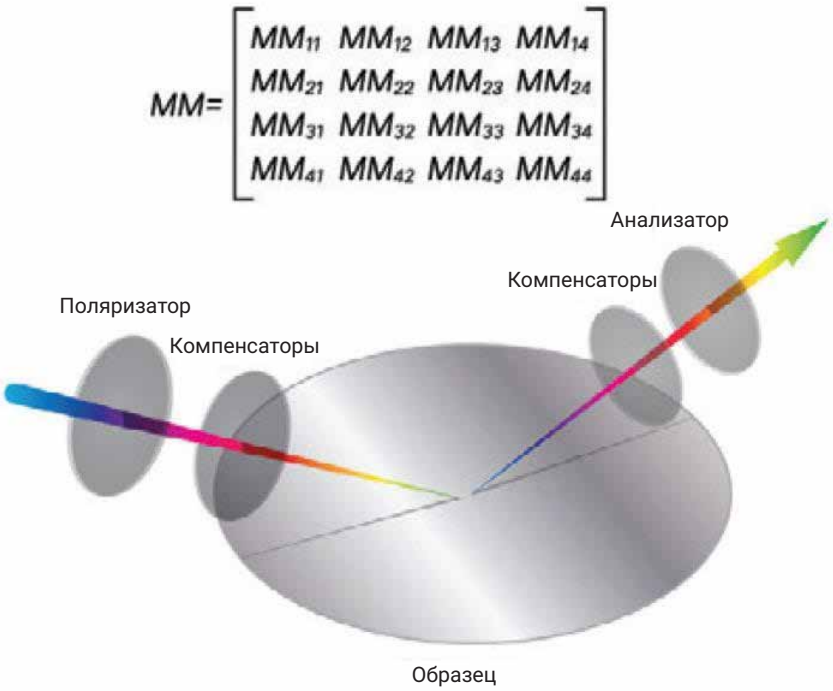
Скаттерометрия для управления полупроводниковым технологическим процессом производства основана на эллипсометрии. Эллипсометр измеряет влияние отражения (или пропускания) на поляризованный свет. Эллипсометрия уже давно используется в метрологии полупроводниковых приборов для определения характеристик тонких пленок в многослойных этажерках. Этот метод чрезвычайно чувствителен и точен, позволяет измерять пленки толщиной в один атомный слой. Для определения фундаментальных физических свойств материала эллипсометры измеряют комплексный показатель преломления материала или тензор диэлектрической проницаемости. Они могут быть использованы для определения таких характеристик, как толщина, состав, шероховатость (неравномерность), кристаллическая природа пленки, концентрация легирующих примесей в пленке, ее электропроводность и многое другое.

Стандартные эллипсометры анализируют поляризованный свет, отраженный от образца, и сравнивают его с известным состоянием поляризации падающего света. Это делается для измерения комплексного коэффициента контрастности, состоящего из двух параметров: амплитудной составляющей (ψ) и разности фазовых сдвигов (Δ). Спектроскопические эллипсометры используют широкополосный источник света и измеряют эти параметры в зависимости от длины волны. При измерении тонких неокрашенных пленок обычно предполагается, что образец состоит из небольшого числа дискретных, четко определенных слоев, которые оптически однородны и изотропны. Когда эти предположения справедливы, два параметра, ψ и Δ, являются достаточными для большинства применений тонких пленок.

Для скаттерометрических измерений сложных трехмерных топологических элементов эти предположения несправедливы. Обычная спектроскопическая эллипсометрия измеряет только количество падающего *p*-поляризованного (электрическое поле параллельно плоскости падения) света, который отражается как *p*-поляризованный свет, и количество падающего *s*-поляризованного (электрическое поле перпендикулярно пло-

скости падения) света, который отражается как *s*-поляризованный свет. Однако может также иметь место перекрестное поляризованное рассеяние, *p*/*s* и *s*/*p*. Матричная спектроскопическая эллипсометрия Мюллера (MMSE) охватывает полное описание поляризованного отражения, включая кросс-поляризацию и круговую поляризацию, которое осуществляется в матрице из 16 элементов на каждой длине волны. Перекрестная поляризация несет важную информацию о таких характеристиках, как симметрия, неравномерность краев и анизотропные оптические свойства. Это важно для характеристики трехмерных структур. Полная матрица Мюллера может быть измерена с помощью спектроскопического эллипсометра с двумя вращающимися компенсаторами (рис. 2), один из которых находится между поляризатором и образцом, а другой – между образцом и анализатором.

Полезность и ценность полной эллипсометрии матрицы Мюллера варьируются в зависимости от приложения. В некоторых случаях это может быть существенно, например при измерении структурной анизотропии, такой как наклон и сдвиг наложения. В других случаях подобные измерения сложных структур не нужны, но все же ценны – дополнительная информация может помочь в декорреляции параметров. Наконец, дополнительная информация может быть не только потенциально ценной, но и по существу бесплатной – например, когда двойные компенсаторы позволяют полностью собирать матрицу Мюллера без изменения угла положения анализатора.



Источник: Onto Innovation

Рисунок 2. Сопоставление падающего поляризованного и отраженного поляризованного света при помощи эллипсометра для определения структурности и свойств материала. Получение всех 16 элементов матрицы Мюллера, полностью описывающей отражение, достигается с помощью двух компенсаторов

АНАЛИЗ ДАННЫХ – ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВЯЗАННЫХ ВОЛН И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Методика OCD представляет собой методику косвенного измерения. В ее рамках не существует аналитического решения для получения желаемых физических или материальных свойств непосредственно из измеренных параметров. Скорее, этот процесс основывается на разработке моделей и их сравнении с полученными данными. Классический процесс основан на гармоническом анализе связанных волн (RCWA), применяемом для генерации набора ожидаемых элементов матрицы Мюллера, основанных на теоретических взаимодействиях света с виртуальной моделью структуры, которая включает в себя форму, размеры, материал, оптические свойства и многое другое. Параметры модели варьируются, а результирующие элементы матрицы записываются. Регрессионный анализ направлен на выявление ключевых особенностей спектров матричных элементов, которые предсказуемо и однозначно изменяются в зависимости от интересующего параметра и поэтому могут служить надежными эрзац-переменными. Процесс моделирования может быть длительным, трудоемким и дорогостоящим. В его рамках для получения желаемого значения измерения фактические данные измерений сравниваются с моделируемыми данными.

Последние разработки в области искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения предлагают значительное сокращение затрат и времени на нахождение решения. Машинное обучение позволяет существенно автоматизировать этот процесс. При наличии соответствующего набора данных измеренных спектров MMSE и эталонных значений машинное обучение часто позволяет найти характерные спектральные особенности и количественно оценить их связь с интересующими параметрами без физического моделирования или структурного регрессионного анализа. Решения на основе машинного обучения вряд ли полностью заменят решения на основе моделей – скорее обеспечат дополнительные возможности для ситуаций, где моделирование особенно сложно. Идеальным пространством для решений машинного обучения будут ситуации, при которых затраты на моделирование высоки из-за сложности структуры, ключевой параметр, представляющий интерес, имеет доминирующую или уникальную чувствительность в сигнале, а справочные данные доступны в изобилии.

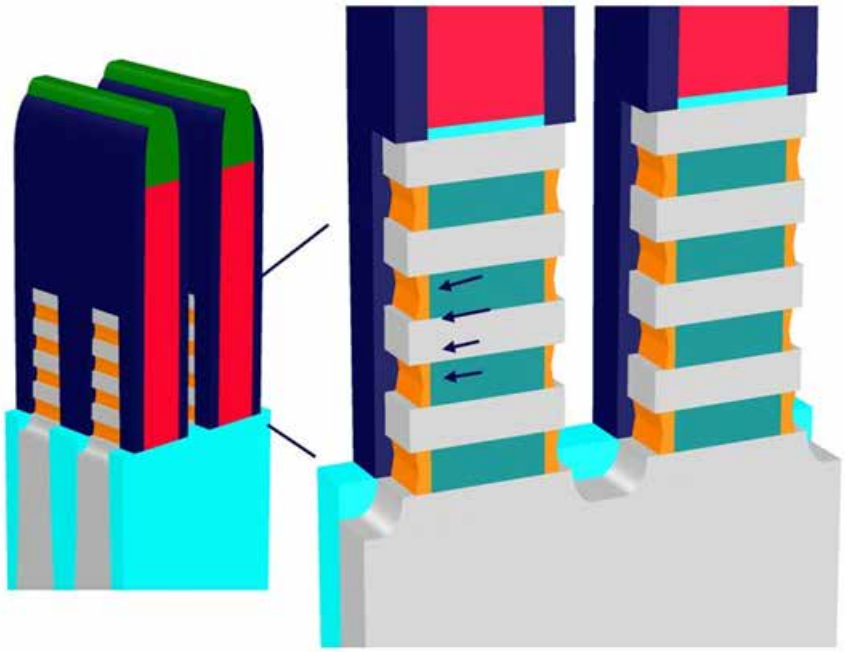
GAA-ПРОЦЕСС

Конструкция транзисторов с круговым затвором GAA состоит из нескольких вертикально расположенных нанолистовых каналов, проходящих через один затвор. Технологический процесс формирования GAA имеет некоторое сходство с процессами формирования FinFET. Сначала создается сверхрешетка – этажерка чередующихся эпитаксиально осажденных слоев кремния и SiGe. Канавки, протравленные в решетке, создают плавниковообразные структуры, причем каждый плавник содержит 3–4 слоя кремниевых нанолистов, которые станут каналами транзистора. Слои кремния чередуются со слоями SiGe, которые в конечном итоге будут заменены материалами затвора. Поперек нанолистов-плавников осаждаются фиктивные поликремниевые затворы, а поверх всего этого конформно осаждается материал спейсера. По обе стороны затвора вытравливаются исток и сток, прорезающие и обнажающие концы кремниевых каналов. На протяжении ряда критических этапов тех-

нологического процесса экспонированный SiGe между концами кремниевых каналов выборочно вытравливается для создания полостей для внутренних спейсеров, которые затем туда осаждаются (рис. 3). Эти топологические элементы весьма малы, и все же их размеры критичны по нескольким причинам. Глубина полости и внутреннего спейсера определяет длину затвора, внутренний спейсер защищает впоследствии осаждаемую область истока–стока во время высвобождения слоя, когда фиктивный затвор вытравливается и заменяется материалами затвора, а спейсер подавляет паразитную емкость между областью истока–стока и затвором.

При масштабировании каждый последующий технологический уровень (с меньшими проектными нормами) FinFET требовал от OCD-систем примерно 30%-ного улучшения отношения сигнал–шум (рис. 4). Переход к архитектурам с круговым затвором с исключительно небольшими, сложными топологическими элементами, такими как внутренние спейсерные полости и внутренние спейсеры, требует дальнейшего улучшения отношения сигнал–шум. Тем не менее OCD обладает основными возможностями, необходимыми для GAA-процессов. Одна из фирм, занимающихся разработкой OCD-решений для GAA-устройств, – корпорация Onto Innovation, предлагающая системы Atlas. Система Atlas III при увеличении глубины корректирующего травления SiGe на 0,1 нм демонстрирует уровень шума, близкий к уровню сигнала, что ограничивает возможность измерения. Более современные системы, Atlas III+ и Atlas V, обеспечивают лучшее отношение сигнал–шум, что дает возможность измерять индивидуальные параметры корректирующего травления SiGe.

Данные об общем (среднем) значении параметров при травлении SiGe-полости полезны, но намного важнее измерить параметры каждого спейсера по отдельности, потому



Источник: Onto Innovation

Рисунок 3. Транзистор с круговым затвором: кремниевые каналы (серый) будут полностью окружены затворами после заменещения SiGe (бирюзовый) и фиктивных (красный) затворов. Поперечное сечение (справа) проходит вдоль кремниевых каналов между истоком и стоком. Размеры внутренних спейсеров (оранжевый) имеют решающее значение для определения производительности устройства

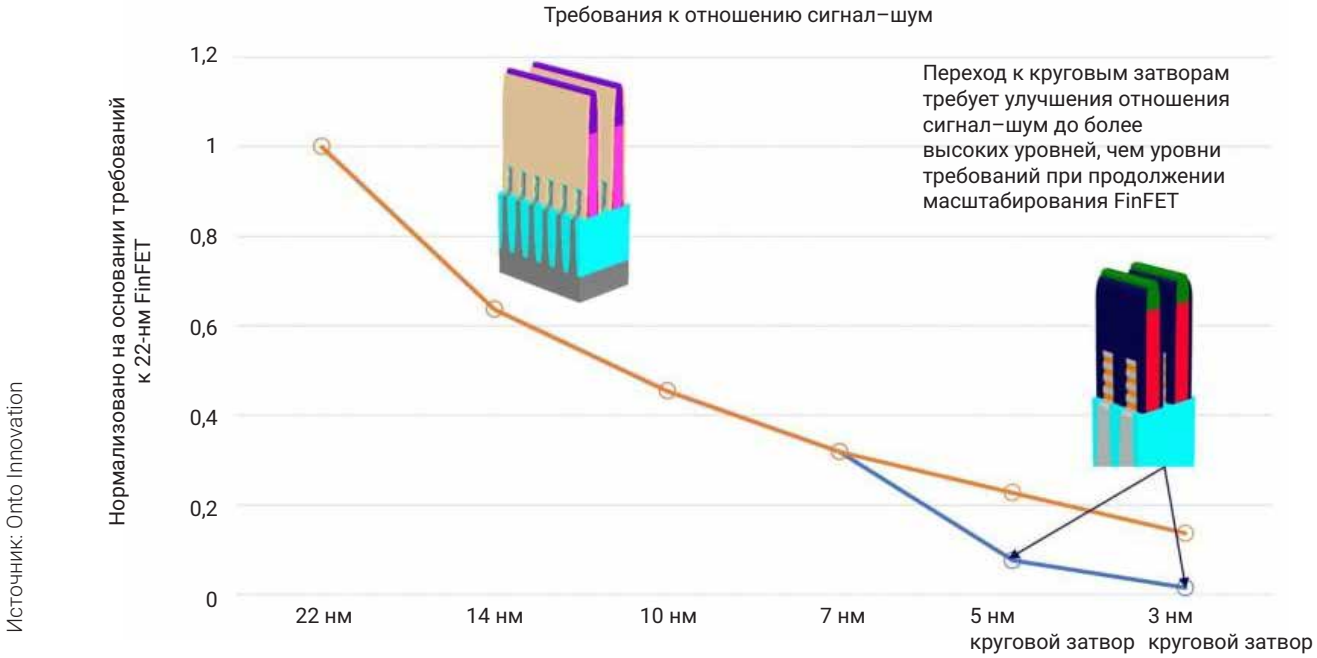
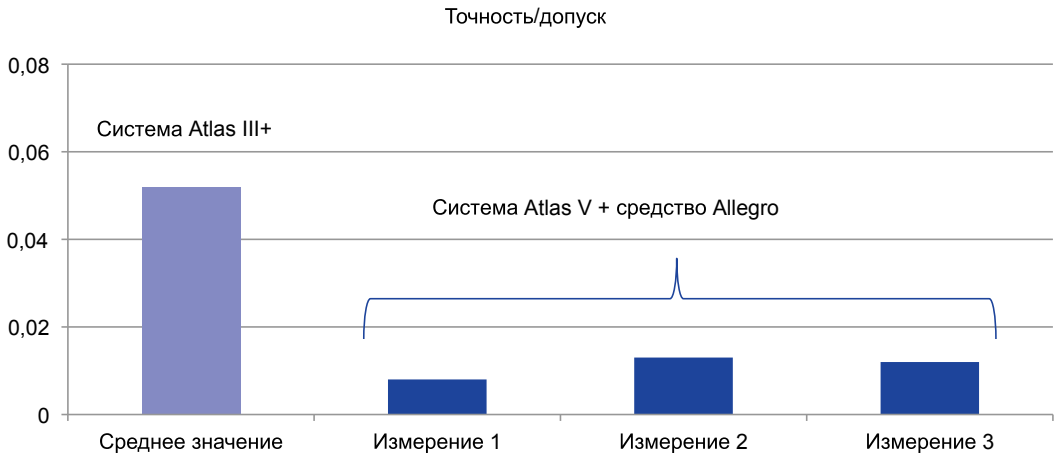


Рисунок 4. Транзисторы с круговыми затворами (слева) обеспечивают лучшую, чем у FinFET, производительность. Но они более сложны и требуют значительного улучшения отношения сигнал–шум измерительных OCD-систем. Спектры справа показывают устойчивое улучшение отношения сигнал–шум на протяжении трех поколений метрологических OCD-систем

что производительность транзистора будет определяться «худшим» нанолистом. Поэтому важность совершенствования средств метрологии непрерывно растет. В метрологической системе Atlas V используется недавно выпущенное программное OCD-решение на основе ИИ. Оно включает в себя как возможности классического моделирования, так и перспективные возможности машинного обучения, благодаря которым индивидуальные измерения внутреннего спейсера по таким параметрам, как точность и допуск, были существенно улучшены по сравнению со средними показателями измерения внутреннего спейсера, сделанными системой Atlas III+ (рис. 5).

Для некоторых этапов процесса формирования транзисторов с круговыми затворами производители изучают и другие технологии измерений, большинство из которых основаны на использовании рентгеновского излучения. Так, например, для измерения тонких пленок в исходной сверхрешетке может использоваться рентгеновская рефлектометрия (X-ray reflectivity, XRR), хотя для эллипсометрии это достаточно простое измерение. В случае тонких монокристаллических пленок может оказаться полезным метод рентгеновской дифракции высокого разрешения (high resolution X-ray diffraction, HRXRD). Корпорация Onto Innovation занимается совершенствованием метода измерения критических размеров рассеянием рентгеновского излучения под малым углом (CD small-angle X-ray scattering CD-SAXS). Этот метод сходен с методом скатерометрии, но в настоящее время слишком дорог и его быстродействие слишком мало. Еще одним перспективным методом считается рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) – метод анализа поверхности, позволяющий измерять состав, химическое состояние и электронное состояние элементов в тонких пленках.



Источник: Onto Innovation

Рисунок 5. Одна из самых больших проблем метрологии в технологическом процессе формирования кругового затвора – измерение травления полости внутреннего спейсера и самого внутреннего спейсера. Системы последнего поколения могут обеспечить индивидуальные измерения спейсера с точностью и допуском в несколько раз большими, чем средние измерения, доступные в системах предыдущего поколения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Транзисторы с круговым затвором – наиболее вероятная кандидатура на замену FinFET, так как позволяют получить больше вычислительной мощности в меньшем пространстве. Они предлагают увеличенную производительность, но требуют применения более сложных процессов для создания небольших трехмерных структур. Для управления соответствующими процессами требуется усовершенствованная метрология. Необходимыми фундаментальными возможностями обладает OCD-метрология – ее системы текущего поколения продемонстрировали способность измерять внутренние спейсеры, один из наиболее сложных топологических элементов. Отраслевые специалисты отмечают, что высокоскоростная неразрушающая OCD-метрология обладает базовыми параметрами, необходимыми для поддержки управления технологическим процессом формирования GAA-приборов.

Keller Nick, Liu Zhuan. Metrology Solutions for Gate-All-Around Transistors in High Volume Manufacturing. Semiconductor Digest, October 1, 2020: https://www.semiconductor-digest.com/2020/10/01/metrology-solutions-for-gate-all-around-transistors-in-high-volume-manufacturing/

Масштабирование и задержки сигнала на межсоединениях

Ключевые слова: архитектура, задержки, команды, межсоединения, сигналы.

По мере перехода к каждому новому технологическому уровню с меньшими топологиями увеличиваются задержки, обусловленные металлическими межсоединениями, что частично сводит на нет преимущества использования транзисторов с увеличенным быстродействием. Данная проблема заставляет проектировщиков «систем-на-кристалле» (SoC) переосмыслить методы их формирования. Появляются новые высокоуровневые архитектурные подходы к проектированию SoC.

Зрелые архитектуры появились в то время, когда главным ограничивающим фактором было время вычислений. Сейчас же по мере того, как основным ограничивающим фактором на перспективных технологических уровнях (с меньшими проектными нормами) становятся межсоединения, появляется возможность переосмыслить подходы к формированию «систем-на-кристалле» (SoC). Время задержки сигнала на межсоединениях – фундаментальная точка баланса для любой архитектуры компьютера. При разработке архитектуры процессора время задержки сигнала на межсоединениях всегда принимается во внимание. Правда, ранее данный ограничивающий фактор рассматривался в основном применительно к перемещению данных между кристаллами ИС. В настоящее время перемещение данных в необходимое место все чаще требует значительных затрат времени даже в пределах кристалла ИС. Это приводит к появлению новых подходов к проектированию SoC на основе архитектур высокого уровня.

РАЗНОНАПРАВЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Цели процесса масштабирования (пропорционального уменьшения размеров) топологических элементов имеют принципиально двойственную структуру. С одной стороны, это создание более быстродействующих транзисторов, а с другой – достижение возможности размещения на заданной площади кристалла ИС большего числа транзисторов. До сих пор удавалось успешно реализовывать обе эти цели. Однако соединение таких транзисторов с увеличенным быстродействием требует использования межсоединений, а если межсоединения занимают слишком много места, то цель интеграции достигнута не будет.

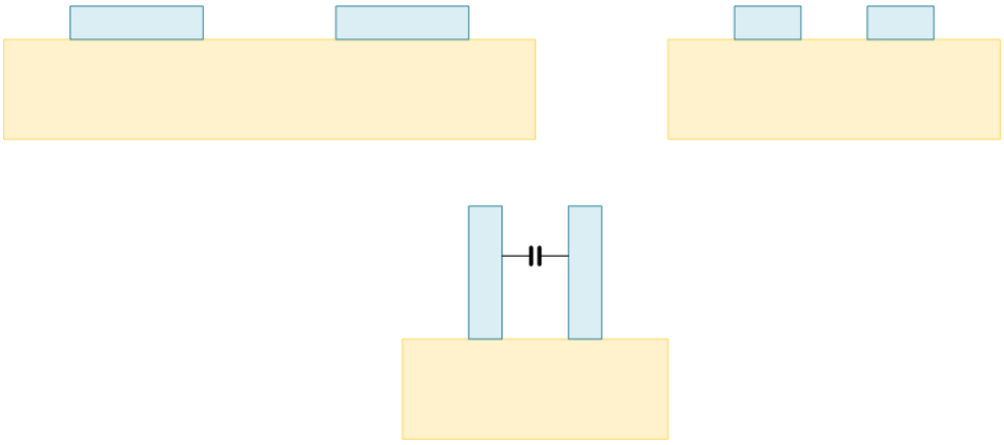
Производители ИС формируют межсоединения в виде все более узких токопроводящих дорожек, расположенных все ближе друг к другу. Линейное сопротивление обратно пропорционально площади поперечного сечения проводника. Сужение проводника приводит к уменьшению поперечного сечения. Это можно компенсировать, увеличив высоту токопроводящих дорожек (аналогично подходу, используемому в запоминающих конденсаторах ДОЗУ). Но если расстояние между ними

чрезмерно сокращается, то высокие токопроводящие дорожки фактически превращаются в металлические пластины с высокой емкостью, что, в свою очередь, увеличивает время задержки (рис. 1).

Таким образом достигается баланс между поперечным сечением и сопротивлением, с одной стороны, и высотой токопроводящей дорожки и взаимной емкостью – с другой стороны. Чистый эффект заключается в увеличении времени задержки сигнала на металлических токопроводящих дорожках в 10 раз за последние 20 лет (со 100 пс до 1200 пс на провод сечением 1 мм). Даный фактор не только работает против увеличения быстродействия транзисторов, но и изменяет баланс вклада транзисторов и межсоединений в длительность времени задержки.

Уменьшенное время передачи сигнала по токопроводящей дорожке не всегда становится причиной большой разницы в фактической задержке данного сигнала. С технической точки зрения емкость и сопротивление межсоединений значительно выросли. При этом расстояние между транзисторами в среднем сократилось. В современных этажерках число слоев металлизации при использовании 5-нм технологического процесса может доходить до 16 – по сравнению с 10 на уровне 28-нм проектных норм. Отмечается, что не все слои страдают одинаково – самые низкие слои с наименьшими токопроводящими дорожками больше подвержены задержкам.

На уровнях проектных норм ниже 28 нм этажерки слоев начинают телескопироваться. Нижние слои могут быть созданы при помощи метода двойного формирования рисунка[10]. В этом случае реальное соединение осуществляется на длину 3–4 ширин ячейки – из-за сопротивления. Соответственно, сигналы, которые необходимо передавать на большие расстояния, передаются на более высоких слоях, где токопроводящие дорожки шире и обладают меньшим сопротивлением. При этом сопротивление межслойных переходных отверстий и межслойных контактных столбиков также увеличивается. Поскольку современные транзисторы обладают более низким током возбуждения, чем транзисторы предшествующих поколений, длинные токопрово-



Источник: Semiconductor Engineering

Рисунок 1. Удельное сопротивление металлических токопроводящих дорожек пропорционально их поперечному сечению. В верхней левой части рисунка показано концептуальное изображение традиционных широких токопроводящих дорожек. В правой верхней части показаны суженные токопроводящие дорожки с уменьшенными расстоянием между ними и поперечным сечением, а также увеличенным удельным сопротивлением. Нижняя часть рисунка иллюстрирует попытку совместить исходную площадь поперечного сечения и уменьшенное расстояние между токопроводящими дорожками, что приводит к увеличению взаимной емкости

дящие дорожки становятся более восприимчивыми к помехам, и передаваемые по ним сигналы могут нуждаться в буферизации.

Это означает, что сигнал возвращается к кремниевой подложке, где буфер восстанавливает сигнал для дальнейшей передачи. Затем сигнал снова передается в верхние слои для передачи на большие расстояния. Таким образом, при использовании верхних слоев обеспечивается связь на большее расстояние, но требуется прохождение нескольких этапов буферизации. Как обычно, это вопрос компромисса. Внутри процессоров имеются такие структуры, как умножители и регистровые файлы, ограниченные всеми «проводами», необходимыми для маршрутизации операндов и обеспечения использования портов ввода–вывода. Обилие разводки отрицательно влияет на занимаемую площадь и быстродействие, а ее дефицит не позволяет получить максимальную отдачу от созданной конструкции.

Существует три уровня, на которых возможно если не устранение, то существенное облегчение проблемы задержек. Наиболее фундаментальный из них – собственно процесс. Также проблемы задержки могут быть решены на уровне реализации. Но когда ситуация становится еще сложнее, важным фактором борьбы с временем задержки сигнала становится архитектура.

ПРОЦЕСС И РЕАЛИЗАЦИЯ

На уровне процесса проблемы задержки на разводке привели к переоценке используемых металлов. По мере утончения токопроводящих дорожек решетчатая структура меди становится ее недостатком. Колебания в решетке (фононы) сокращают среднюю длину свободного пробега электронов, увеличивая удельное сопротивление. Разработчики приближаются к решеточным и квантово-механическим эффектам – например, при очень узких токопроводящих дорожках в медной решетке начинаются взаимодействия между фононами и носителями заряда.

В качестве альтернативы меди рассматривается кобальт, обладающий другой структурой решетки. В случае широких проводящих дорожек и проводников с большим поперечным сечением кобальт уступает меди, но в случае очень тонкой разводки значительно превосходит ее благодаря меньшему удельному сопротивлению. Эта особенность, наряду с использованием кобальта в межслойных переходных отверстиях вместо вольфрама, может существенно облегчить проблемы задержки сигнала. Отмечается, что превосходство кобальта начинает проявляться на рубеже 20–30 нм.

На уровне реализации для успешного завершения проектирования разработчики полагаются как на сложные инструментальные средства САПР, так и на ручное манипулирование. Два классических подхода к повышению тактовой частоты – параллелизм и конвейеризация.

При использовании низкоуровневого параллелизма для увеличения быстродействия обычно в жертву приносится число вентилей. Если «строительные блоки» проектировщика становятся слишком крупными, их разбивают на несколько параллельных блоков с несколькими параллельными путями передачи данных. В частности, это может обозначать выполнение одной и той же операции вычисления в нескольких местах.

Конвейеризация, со своей стороны, сокращает пути передачи данных для сокращения тактового периода за счет потенциальной задержки. То есть в случае, когда устранение задержки с помощью буферов неэффективно, используется конвейерная обработка – крупная рабочая нагрузка разбивается на серию более мелких, которые могут выполняться быстрее, что позволяет увеличить тактовую частоту.

Оба метода требуют дополнительных вентилей или триггеров, но за счет снижения нагрузки на транзисторы чистая площадь может быть сокращена.

На уровне реализации для решения проблемы задержки сигнала на межсоединениях можно сделать многое, но не все. В какой-то момент, особенно при переходе к технологическим уровням с меньшими топологиями, возникает необходимость решить данный вопрос на архитектурном уровне, до начала работ по проектированию.

«СЕТИ-НА-КРИСТАЛЛЕ» И СИНХРОНИЗАЦИЯ

Когда-то задержки, связанные с логикой, составляли бóльшую часть проблемы производительности – по сравнению с задержкой на токопроводящих дорожках. Архитектурные решения, разработанные в то время, могут не соответствовать современным реалиям. Одно из архитектурных новшеств заключается в том, что «шина» в качестве основного межсоединения кристалла уступает место «сети-на-кристалле» (network-on-chip, NoC). Фирмы, придерживающиеся идеи NoC – идеи конвейеризации, – используют ее, чтобы разбить длинные межсоединения на цепочку коротких.

Процесс перехода от проектных норм 180 нм к проектным нормам 5 нм подтолкнул многих проектировщиков и производителей отдать предпочтение NoC перед шинными структурами: на крупных площадях труднее осуществлять синхронизацию. NoC чаще используются на больших ИС, реализуемых с минимальными топологиями. Специалисты отмечают, что почти все SoC, в которых используется 20 и более сложнофункциональных (СФ) блоков, создаются с применением No C. Например, у корпорации Arteris IP, разработчика и поставщика СФ-блоков, почти половина проектов NoC предназначена для процессов с проектными нормами 7 нм и менее.

Однако использование NoC имеет свои издержки. Основная часть сигналов, проходящих по NoC, для размещения пакетов в этой области требует арбитража (по аналогии с арбитражем шины[11]). Соответственно, выбор между NoC и шиной основывается на сопоставлении числа арбитражей в межсоединениях при их использовании.

С этой точки зрения также имеет значение параллелизм. Если стоимость соединений высока, необходимо «утрамбовать» в однократное событие связи как можно больше данных. Для обеспечения подобного подхода специалисты корпорации Cadence планируют использовать в следующем поколении своих инструментальных средств САПР и СФ-блоков 1024-разрядные интерфейсы. Это помогает амортизировать арбитражные издержки или другие накладные расходы межсоединений.

Другой фундаментальный аспект архитектурных изменений связан с тактовыми областями. Задача поддержания согласованной синхронизации на кристалле ИС, который становится все больше (по стандартам задержки), побудила проектировщиков переосмыслить широкие области синхронизации в пользу «локально синхронного, глобально асинхронного» подхода. Сегодня проектировщики больше внимания, чем 10 лет назад, уделяют асинхронным областям синхронизации, и это непосредственно воздействует на архитектуру – потому что каждый переход через граничные синхронизаторы увеличивает время задержки.

При таком подходе оптимизация конкретной тактовой области возможна только в пределах заданного радиуса. Кроме того, некоторые специалисты предполагают, что отдаленные пункты назначения имеют собственную синхронизацию. Сигналы необходимо синхронизировать для передачи на большие расстояния, но наличие собственной синхро-

низации отдельных областей снимает проблему поддержания полной синхронизации на больших пространствах и между крупными блоками.

Для СОЗУ характерны собственные уникальные проблемы. Производительность СОЗУ не меняется в зависимости от скорости передачи данных на остальной части кристалла (SoC). Ячейки памяти масштабируются с меньшей скоростью, чем стандартные ячейки ИС. Подход корпорации Cadence состоит в перебросе из одного состояния в другое данных, входящих и исходящих из памяти. В своих новых архитектурах Cadence намерена и дальше придерживаться этого подхода.

Со своей стороны, корпорация Synopsys сделала еще один шаг вперед. В следующем поколении ее средств СОЗУ будет работать в собственной тактовой области – быстродействие СОЗУ будет отделено от скорости работы остальной части ядра. Компромисс заключается в увеличении времени ожидания при доступе к данной памяти (рис. 2).

Кроме того, размеры блоков памяти ограничены возможностями мощностей кремниевых заводов[12]. Компиляторы памяти не расширяют минимальный размер одиночной макроячейки. В результате разработчикам приходится создавать значительно большие банки памяти.

ИЗМЕНЕНИЯ АРХИТЕКТУР НАБОРОВ КОМАНД

Изменение влияния задержки на производительность может оказать воздействие даже на наборы команд и связанные с ними средства разработки ПО. Поскольку перемещение данных – один из факторов, ограничивающих производительность, специалисты, создающие наборы команд, компиляторы и собственно программисты не могут больше относиться к аппаратному обеспечению как к чему-то абстрактному. Им все больше требуется понимать лежащую в основе соответствующих процессов структуру.

Архитектура и микроархитектура процессоров и ускорителей адаптируются под задачи обеспечения эффективной конвейеризации. На архитектурном уровне такие функции, как умножение матриц общего вида (general matrix multiplication, GEMM), позволяют более эффективно использовать память за счет ПО. В то же время микроархитектуры продолжают разви-

Источник: Semiconductor Engineering

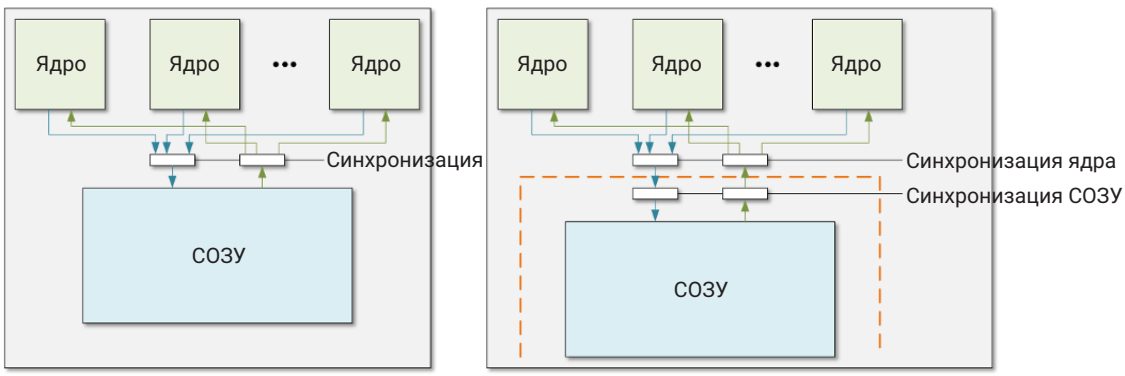


Рисунок 2. Синхронизация СОЗУ может быть облегчена посредством конвейеризации (слева) или отделена от синхронизации ядра за счет размещения СОЗУ в собственном домене

вать такие технологии, как упреждающее выполнение[13], кэширование и буферизация.

Стартап Tachyum, специализирующийся на процессорах, пытается извлечь пользу из данной тенденции за счет создания новой архитектуры набора команд (instruction set architecture, ISA), формируемой «с чистого листа». Фирма иллюстрирует свой подход рассуждением о том, что могло бы потребоваться для достижения тактовой частоты 5 ГГц за 200 пикосекунд (удобно для математических расчетов, но нереалистично). Основной вопрос в том, что можно сделать за 200 пс. Все операции, которые не могут быть осуществлены за данный интервал времени, необходимо либо разбить на более мелкие фрагменты с помощью конвейерной обработки, либо исполнять в течение более чем одного такта. ISA – это одна из областей, где специалисты в области архитектуры могут гибко использовать разнообразные возможности.

Утверждение специалистов Tachyum состоит в том, что многие известные в настоящее время ISA были разработаны тогда, когда преобладали транзисторные задержки. Поскольку к настоящему времени доля этих задержек в общей длительности задержки уменьшилось, время, требующееся арифметико-логическим устройствам (ALU) для выполнения своей работы, сократилось. Раньше на логические (транзисторные) задержки пришлась бы большая часть 200-пс цикла. Сейчас же на их долю приходится менее 100 пс, т. е. собственно вычисление занимает меньше половины общего времени, и около половины времени приходится на получение конкретной ALU данных от других ALU.

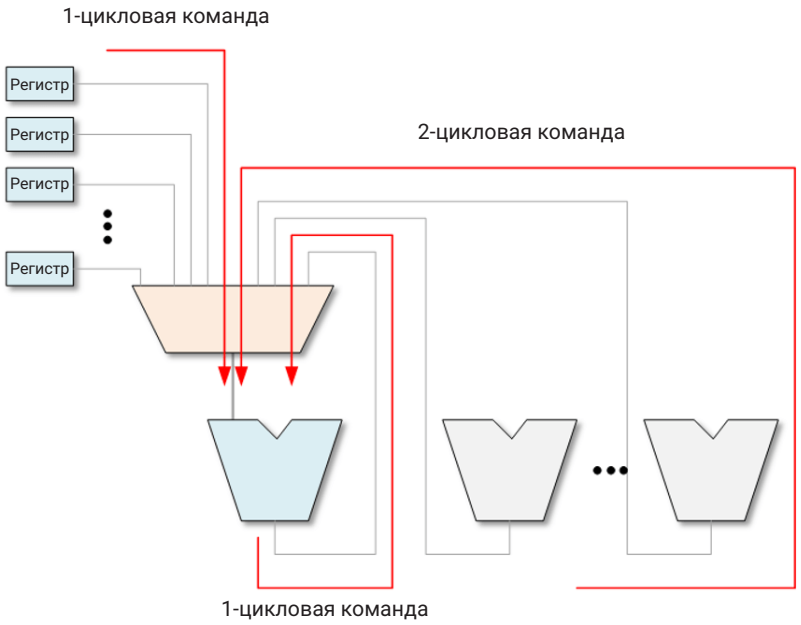
Примером того, как задержки воздействуют на ISA, можно считать получение данных в ALU. При наличии нескольких параллельных ALU соответствующая операция на одном из них представляет собой получение данных от одного из трех источников: регистра, самого ALU (с результатом его предыдущей операции) или другого ALU. Специалисты Tachyum отмечают, что в первых двух случаях длительность операции не превысит 100 пс. Если же данные поступают из другого ALU, то может потребоваться более 100 пс.

Решение Tachyum состоит в разделении набора команд. При этом одноцикловые команды используются там, где это позволяет источник данных. В противном случае используются двухцикловые команды. Решение об использовании одно- или двухцикловых команд принимает компилятор, так как в большинстве случаев ему известен источник входных данных ALU (рис. 3).

В реальных ситуациях существует возможность того, что при использовании динамических библиотек расположение данных на этапе компиляции известно не будет. В этом случае компилятор должен исходить из того, что данные находятся рядом. На случай, если данное предположение оказывается неверным, заготовлено аппаратное средство поддержки, позволяющее остановить машину и переключить режим, т. е. реализовать версию с двумя командными циклами. Отмечается, что подобный подход наиболее предпочтителен в случае частого использования версии с одним командным циклом. Специалисты Tachyum утверждают, что в 93% случаев используется более быстрая версия.

Исполнение с подсчетом циклов также может быть одной из стратегий процессорных архитектур, наподобие Tensilica корпорации Cadence, позволяющей создавать пользовательские инструкции для приложений. Они обеспечивают гибкость при определении количества циклов тактовой частоты, используемых данной потребительской командой. Собственные команды характеризуются фиксированным количеством циклов. Любые дополнительные пользовательские команды получают количество циклов для каждого проекта.

Изменения ISA имеют серьезные последствия. Фирмы, вынужденные поддерживать унаследованный код[14], не могут свободно модифицировать свои ISA. В случае пользовательских приложений в ядре Tensilica они обычно специфичны для встроенного приложения. Эти ядра вряд ли должны будут выпол-



Источник: Semiconductor Engineering

Рисунок 3. ISA-решение фирмы Tachyum: получение данных из регистров и этого же ALU возможно за один командный цикл, а получение данных из другого ALU требует использования двух командных циклов. Выбор соответствующей версии ISA возложен на компилятор

нять широкий спектр сторонних программ, что снижает важность фактора унаследованности.

Проблема с любыми архитектурными подходами заключается в том, что их необходимо рассматривать на самых ранних этапах планирования. Однако у них есть и преимущество – они позволяют снизить нагрузку на внедрение, обеспечивая в конечном итоге как сокращение времени выхода на рынок, так и увеличение производительности. Вероятно, в обозримом будущем внимание к архитектурным аспектам как к способу адаптации к меняющемуся фактору динамики задержки будет возрастать.

Moyer Bryon. Slower Metal Bogs Down SoC Performance. Semiconductor Engineering, October 15, 2020: https://semiengineering.com/slower-metal-bogs-down-soc-performance/

ATREG о будущем кремниевых заводов: интервью Yole Développement

Ключевые слова: кремниевые заводы, кремниевые пластины, изношенные заводы, арсенид галлия.

Размер пластины имеет решающее значение для расчета рентабельности инвестиций (ROI) и стоимости бизнес-модели полупроводникового производства. В случае массово выпускаемых ИС, процесс производства которых хорошо налажен, акцент делается в основном на отношение «потребляемая мощность – производительность – площадь кристалла – стоимость» (power–performance–area–cost, PPAC). С этой точки зрения для повышения рентабельности требуется переход на обработку пластин большего диаметра. Тем не менее в мире по-прежнему существует около 800 заводов, обрабатывающих пластины диаметром от 25 до 150 мм. Это примерно 35% от общего числа заводов по обработке пластин. Каковы перспективы их развития?

В области обработки пластин большого диаметра сохраняется тенденция использования 300-мм кремниевых пластин для изготовления мощных полупроводниковых приборов. Например, Infineon, помимо существующего завода в Дрездене (Германия), инвестировала 1,6 млрд евро в еще один завод по обработке пластин диаметром 300 мм в Австрии. Новые 300-миллиметровые фабрики Bosch и Infineon в основном предназначены для изготовления биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и мощных МОП полевых транзисторов (MOSFET) для автомобильного рынка. В области некремниевых пластин наблюдаются схожие тенденции. Так, Cree Wolfspeed переходит на обработку 200-мм (со 150- и 100-мм) SiC-пластин. За ними в ближайшие годы могут последовать фирмы, использующие сапфировые и GaAs-пластины. Но пока наблюдается дефицит 150-мм сапфировых и GaAs-пластин, поэтому основными остаются подложки меньшего диаметра.

Современный завод по обработке 300-мм кремниевых пластин стоит несколько миллиардов долларов, поэтому для обеспечения рентабельности инвестиций требуется производить ИС, пользующиеся большим спросом. Однако, хотя информация об устаревших заводах реже попадает в обзоры, этот рынок предоставляет огромные возможности для производства некоторых типов приборов по более низкой цене в любом объеме. Например, заводы по обработке 150-мм кремниевых пластин, действующие около 20 лет, хоть и полностью амортизированы, способны работать с гораздо меньшими объемами заказа, оставаясь при этом прибыльными. Есть несколько типов приборов, которые выгодно формировать на 150-мм кремниевых пластинах, – например, мелкосерийные MEMS для ограниченных приложений. В мире по-прежнему действует немало кремниевых заводов, сохраняющих возможность обработки пластин небольшого диаметра (рис. 1).

По оценкам Yole, около 800 существующих по всему миру полупроводниковых заводов все еще могут обрабатывать пластины диаметром от 25 до 150 мм (данные только по кремниевым пластинам). Обычно полупроводниковые приборы с проектными нормами

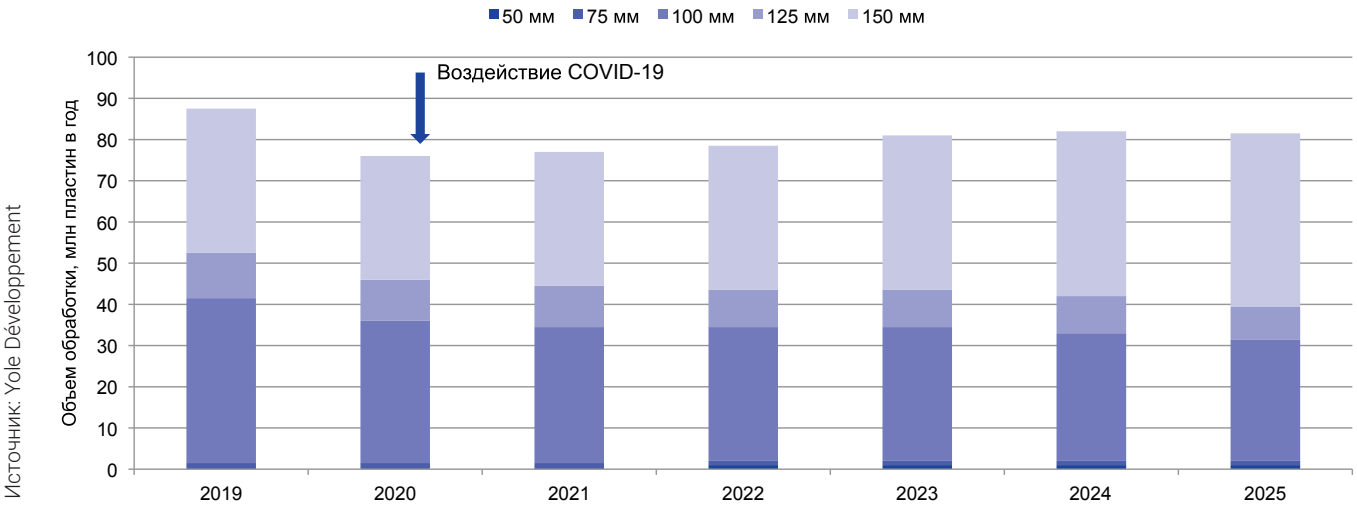


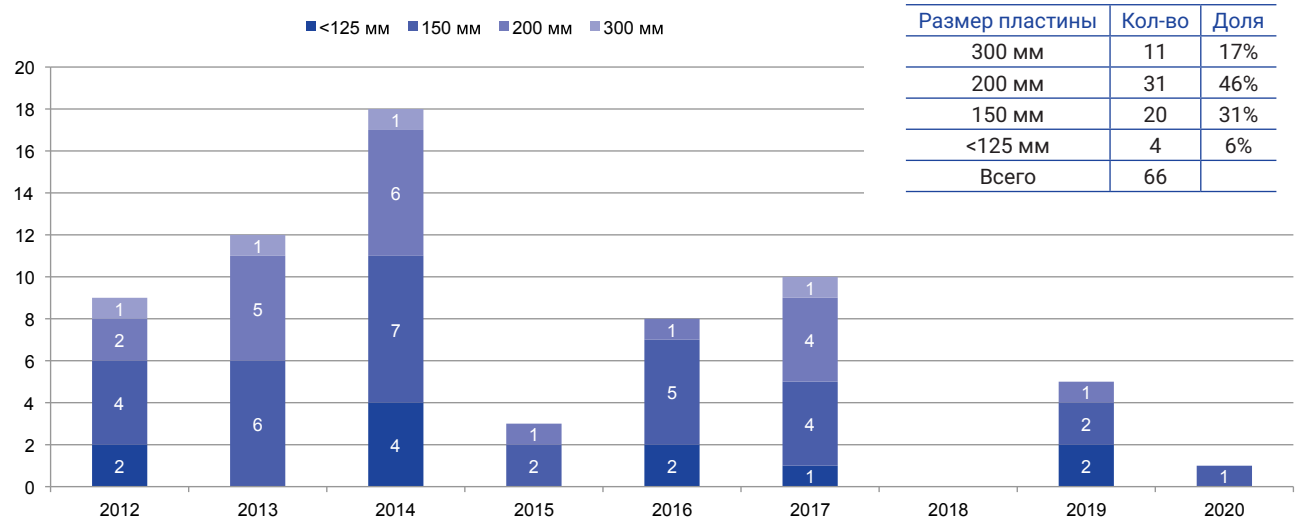
Рисунок 1. Оценка и прогноз рынка обработки пластин малого диаметра (<150 мм) на 2019–2025 гг.

менее 28 нм изготавливаются на новых заводах по обработке 300-мм пластин, располагающих современными чистыми комнатами и сверхточным оборудованием. Для изготовления других приборов, на которые предъявляется низкий спрос, или тех, которые производятся по более зрелым проектным нормам (>28 нм) и где изменения процесса происходят быстро, можно адаптировать устаревшие кремниевые заводы. С ростом применения не кремниевых пластин (GaAS, SiC и т. п.) все больше поставщиков предлагают специальное технологическое оборудование для таких материалов или оборудование, предполагающее возможность адаптации к различным материалам и диаметрам пластин, включая 100-мм и 150-мм подложки. Такое оборудование можно эффективно использовать на полностью амортизированных заводах, предназначенных для обработки пластин диаметром менее 150 мм, что дает возможность малым и крупным игрокам устанавливать конкурентоспособные цены на свою продукцию. Кроме того, экономически выгоднее покупать существующую фабрику, чем строить новую с нуля.

Компания ATREG, уникальный поставщик услуг в экосистеме заводов по обработке пластин, играет большую роль в том, что такие предприятия продолжают работать даже после значительного износа.

Компания была основана в 2000 г., ее штаб-квартира находится в Сиэтле (шт. Вашингтон, США). Это одна из ведущих мировых фирм по продаже и приобретению производственных активов с развитой технологической инфраструктурой, включая предприятия по производству полупроводниковых приборов и чистые комнаты. В течение первых шести лет существования компания сосредотачивалась исключительно на мощностях по обработке 200-мм пластин. Клиентами были в основном японские компании. ATREG стала первой компанией, купившей в 2010 г. устаревший завод по обработке 300-мм пластин и продавшей его после модернизации в 2011 г. Со временем фирма адаптировалась к новым потребностям рынка и стала облегчать транзакции с другими типами производственных активов, таких как мощности с улучшенными методами корпусирования и компании по сборке и тестированию полупроводниковых приборов. Сейчас предложение ATREG включает в себя гораздо больше, чем просто помощь при сделках (рис. 2).

За последние 20 лет компания ATREG реализовала около 40% всех глобальных продаж заводов по обработке пластин в полупровод-



Размер пластины	Кол-во	Доля
300 мм	11	17%
200 мм	31	46%
150 мм	20	31%
<125 мм	4	6%
Всего	66	

Источник: ATREG Inc., 2020

Рисунок 2. Сделки по заводам, обрабатывающим пластины различного диаметра, за период 2012–2020 гг.

Примечание: Несмотря на консолидацию отрасли, из-за высокого рыночного спроса было заключено меньше сделок. В 2020–2021 гг. ожидается рост сделок, связанных с заводами по обработке пластин

никовой промышленности. Она работает с рядом крупнейших и наиболее авторитетных мировых компаний в области производства, сборки и тестирования полупроводниковых приборов, дисплеев и электроники, включая ADI, Fujitsu, GlobalFoundries, IBM, Infineon, Matsushita (Panasonic), Maxim, Micron, NXP, ON Semiconductor, Sony, Qualcomm, Renesas, Texas Instruments и Western Digital. Сложные сделки ATREG охватывают землю, здания, интеллектуальную собственность, полный набор инструментальных средств и бизнес-элементы (контракты на поставку, персонал и т. д.).

Ниже приводится интервью представителей ATREG со специалистами группы Yole Développement.

С экономической точки зрения выгоднее покупать существующий завод, чем строить новый с нуля. Так ли это?

Действительно, в большинстве случаев для полупроводниковой компании будет разумнее купить существующий завод по обработке пластин, а затем модернизировать инструментальные средства или перепрофилировать завод – в зависимости от проектных норм и продукции, которая будет производиться. Актуальность заводов по обработке пластин на основе старых мощностей возросла из-за растущей потребности в ускоренном выводе на рынок определенных продуктов.

Хороший пример – бывший завод корпорации Texas Instruments по обработке 150/200-мм пластин, расположенный в Гриноке, Шотландия (GFAB). В феврале 2019 г. ATREG облегчила его продажу компании Diodes, которая объединила все текущие производственные операции и персонал Texas Instruments. В соответствии с многолетним соглашением о поставке полупроводниковых пластин Diodes продолжит производить аналоговую продукцию Texas Instruments до тех пор, пока Texas Instruments не переведет ее изготовление на другие свои производственные предприятия. Большую часть оборудования этого предприятия можно перепрофилировать на обработку 200-мм пластин, и Texas Instruments еще до продажи начала некоторую конверсию инструментальных средств, что сделало их очень привлекательными для компаний, ищущих мощности по обработке 200-мм пластин.

С другой стороны, если доступны местные налоговые льготы и государственные субси-

дии, приемлемым вариантом будет создание нового предприятия. Например Cree/Wolfspeed строит с нуля завод по обработке 200-мм SiC-пластин в Марси (шт. Нью-Йорк, США). Ожидается, что он будет завершен в начале 2021 г., а производство начнется в январе 2022 г. Другие компании, такие как TSMC, также не отстают – озвучены планы построить в Аризоне завод по производству 5-нм ИС при поддержке властей штата и федерального правительства США. Предполагается, что мощность обработки составит 20 тыс. пластин в месяц, будет создано более 1,6 тыс. рабочих мест на самом предприятии и несколько тысяч дополнительных рабочих мест у смежников.

Среди поставщиков оборудования существует консенсус в отношении того, что типы оборудования, доступные на вторичном рынке, являются показателем новизны технологий. Большая часть этого доступного бывшего в употреблении оборудования рассчитана на 200-мм пластины. Есть ли заводы, модернизирующиеся для перехода от обработки пластин 150 мм и менее к обработке пластин других диаметров?

Если сравнивать сделки за период с 2010 г. по настоящее время, то в стоимостном выражении сделок по заводам, обрабатывающим 200-мм пластины, было на 50% больше, чем по заводам, обрабатывающим пластины диаметром 150 мм и менее. Частично это связано со значительной консолидацией (сделки слияний и поглощений), которая наблюдается в отрасли, в сочетании с заметно большей стоимостью 200-мм заводов по сравнению с традиционными 150-мм заводами. Также важно отметить, что количество действующих 200-мм заводов меньше, чем число заводов, обрабатывающих пластины диаметром 150 мм и менее, поэтому относительно общего количества предприятий по обработке 200-мм пластин сделки по ним выполняются гораздо чаще. За последнее десятилетие сделки по мощностям обработки 300-мм пластин были количественно менее частыми, чем сделки по заводам, обрабатывающим пластины диаметром 150 мм и менее. Однако, поскольку заводов по обработке 300-мм пластин даже меньше, чем заводов по обработке 200-мм пластин, доля проданных предприятий здесь по-прежнему выше, чем доля заводов по обработке пластин диаметром 150 мм и меньше. Низкая удельная стоимость и высокая эффективность, достигаемые при производстве ИС на пластинах диаметром 300 и 200 мм, означают, что спрос на эти предприятия будет намного выше, если они станут доступны.

Завод ON Semi, продающийся в Бельгии, представляет производственную линию по обработке 150-мм пластин, в которой заложена возможность перехода на обработку 200-мм пластин. Сохранится ли тенденция перевода 150-мм линий на обработку 200-мм пластин?

ON Semiconductor действительно привлекла ATREG для помощи в модернизации своего действующего предприятия, отвечающего требованиям автомобильной промышленности. Почти 71% из 320 инструментальных средств начальных этапов обработки 150-мм пластин являются трансформируемыми под обработку 200-мм пластин, но это влечет за собой значительные затраты для покупателя. Правительство Фландрии предлагает несколько очень привлекательных стимулов для финансирования этой трансформации.

Несколько сделок в сфере заводов по обработке 150-мм пластин, заключенных за последнее десятилетие, касались линий с возможностью трансформации под обработку 200-мм пластин. Этот фактор во многих случаях заметно повышает привлекательность объекта в глазах традиционных производителей аналоговых и логических ИС, мощных полупроводниковых приборов. Однако почти половина заводов по обработке пластин диаметром 150 мм и менее предназначены для производства специализированной продукции – схем на материалах типа $A^{II}B^{VI}$, $A^{III}B^{V}$, MEMS и т. п. Такие предприятия зачастую не требуют трансформаций. Приборы на основе материалов с широкой запрещенной зоной только недавно начали массово внедряться в производство на 150-мм пластинах, очень

немногие компании способны производить их на 200-мм пластинах (один из примеров – недавно открытое предприятие Cree/Wolfspeed в северной части штата Нью-Йорк).

Много ли существует полностью амортизированных заводов с хорошо отлаженными процессами, которые «достаточно хороши» для своего конечного приложения и им не нужно постоянно обновляться до новейших проектных норм?

По опыту ATREG можно утверждать, что долговременная жизнеспособность процессов при диаметре обрабатываемой пластины 150 мм и ниже значительно варьируется в зависимости от конкретного предприятия. Специализированные заводы, работающие с некремниевыми пластинами, продемонстрировали высокие показатели при работе на 150-мм пластинах. Однако для производителей КМОП-приборов, других аналоговых или мощных полупроводниковых приборов, изготовление которых можно перевести на 200-мм пластины, такой переход необходим. В этом сегменте даже чрезвычайно хорошо работающие 150-мм производственные мощности не могут конкурировать с их 200-мм аналогами по издержкам. Это стало движущей силой перехода на обработку 200-мм пластин.

Как в целом можно оценить «здоровье» экосистемы заводов по обработке пластин диаметром 150 мм и менее?

На это влияют два основных фактора. Первый – стремление КНР увеличить производство полупроводниковых приборов внутри страны. Правительство предлагает компаниям впечатляющие стимулы для производства, однако многие китайские компании технологически отстают от своих ведущих зарубежных коллег. Это означает, что обработка пластин диаметром 150 мм и менее все еще приемлема для традиционных технологий, которые могут оказаться неконкурентоспособными по стоимости с обработкой 200-мм пластин в других регионах. Второй фактор – специализированные рынки, которые по-прежнему зависят от оборудования обработки пластин диаметром 150 мм. Это касается технологий изготовления MEMS, приборов на основе GaN, SiC, AsGa и многих других полупроводниковых соединений, имеющих узкое применение.

Подталкивают ли современные прорывные технологии (искусственный интеллект, Интернет вещей, 5G и т. д.) экосистему заводов по обработке пластин диаметром 150 мм и менее к дальнейшему развитию?

Бесспорно, что ИИ, Интернет вещей, 5G и тому подобное будут стимулировать эту экосистему к дальнейшему развивитию. Одна из областей, где производство продукции на пластинах 150 мм и меньше будет развиваться, – автомобильный сегмент, поскольку использование электромобилей продолжает расширяться. Полупроводниковые приборы на основе материалов с широкой запрещенной зоной часто используются в электромобилях из-за их более высоких эффективности и рабочих температур, обусловленных применением двух ведущих технологий в этой области – GaN и SiC. В обозримом будущем эта тенденция сохранится.

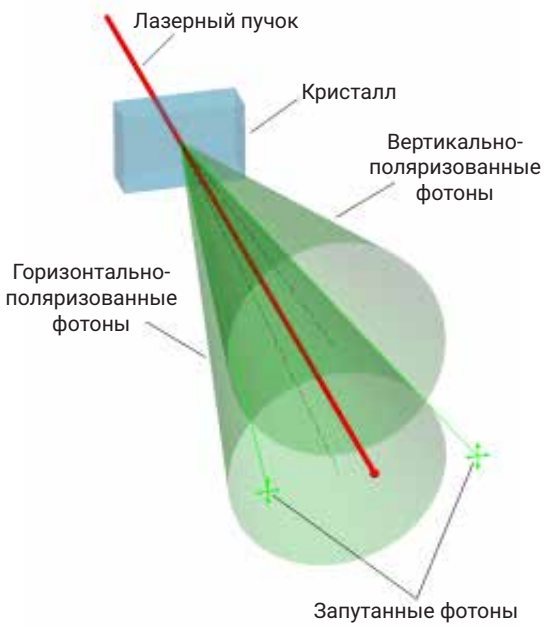
Giusti Gaël, Kumaresan Vishnu, Rothrock Stephen. Fabs Never Die: ATREG Helps Fabs Stay Immortal – An interview by Yole Développement. I–Micronews, October 19, 2020: https://www.i-micronews.com/fabs-never-die-atreg-helps-fabs-stay-immortal-an-interview-by-yole-developpement/

CEA-Leti создает квантово-фотонную систему

Ключевые слова: запутанный фотон, квантово-фотонная система, нанопроволочный детектор, одиночный фотон

Французский центр микроэлектроники CEA-Leti[15] объявил о планах создать квантово-фотонную систему защиты коммуникаций от взлома. Ожидается, что используемая при этом квантовая технология обеспечит безусловно безопасное шифрование данных, необходимое для приложений в области финансов, здравоохранения, энергетики, телекоммуникаций, обороны и т. п.

Финансирование проекта осуществляется научно-исследовательской сетью Carnot. За основу взята платформа кремниевой фотоники CEA-Leti, дополненная новым оборудованием определения квантовых характеристик в целях проектирования, обработки и тестирования квантово-фотонных интегральных компонентов и схем. В рамках этого трехлетнего проекта предполагается создать кремниевые фотонные схемы, генерирующие одиночные фотоны, а также манипулирующие этими фотонами с помощью линейных оптических компонентов, таких как медленные и быстрые фазовращатели. Для обнаружения фотонов



Источник: CEA-Leti

Установка генерации и запутывания фотонов

будут применяться сверхпроводящие нанопроволочные детекторы одиночных фотонов (superconducting nanowire single-photon detectors, SNSPD).

В рамках проекта предполагается построить демонстрационные установки для передачи и приема информации в квантовой системе, что позволит реализовать идею сверхзащищенной криптографии на основе квантовой технологии. Например, демонстрационные установки будут реализовывать интегрированный кубитный передатчик как схему, генерирующую одиночные фотоны и запутывающую их (см. рисунок). Для обнаружения фотонов будет создан встроенный кубитный приемник. Помимо этой демонстрации команда CEA-Leti сосредоточится на интеграции кубитного передатчика и кубитного приемника на одной платформе для решения задач квантовых вычислений.

Разработчики отмечают, что потери на распространение в волноводах напрямую влияют на скорость передачи данных и охват квантовых каналов связи, поэтому так важно создавать компоненты и схемы со сверхнизкими потерями. Лаборатория уже демонстрировала при помощи своей платформы кремниевой фотоники запутанные фотонные пары. Кроме того, у специалистов CEA-Leti имеются и другие методы решения проблем обнаружения одиночных фотонов: лавинные фотодиоды на CdHgTe (APD) с рекордной в мире скоростью подсчета фотонов, а также осаждаемые материалы для интегрированных сверхпроводящих нанопроволочных детекторов одиночных фотонов.

Manners David. Leti to Build Entangled Photon Comms System. Electronics Weekly, October 30, 2020: https://www.electronicsweekly.com/news/business/leti-build-entangled-photon-comms-system-2020–10/

ГЛОССАРИЙ

[1] **AES (Advanced Encryption Standard)** – усовершенствованный стандарт симметричного блочного шифрования, принятый Министерством торговли США в 2000 г. вместо устаревшего стандарта DES. AES использует стандартные 128-битовые ключи, но может поддерживать более длинные, 192- и 256-битовые. Базируется на криптографическом алгоритме Rijndael.

[2] **Полный перебор (brute force)** – метод решения математических задач путем исчерпания всех возможных вариантов.

[3] **Кубит (qubit, q-bit)** – квантовый бит (разряд), отличается от обычного «детерминированного» разряда памяти тем, что может одновременно находиться в двух состояниях, т. е. хранить 0 и 1 одновременно.

[4] **RSA-кодирование (RSA encryption)** – схема асимметричного шифрования с открытыми ключами. Названа по фамилиям авторов: Rivest–Shamir–Adleman (Рон Райвест, Ади Шамир и Леонард Адлеман), разработавших алгоритм в 1978 г. С некоторыми изменениями эта схема используется в системе шифрования PGP.

[5] **ECDSA (elliptic curve digital signature algorithm)** – алгоритм с открытым ключом для создания цифровой подписи, аналогичный по своему строению DSA (Digital Signature Algorithm), но определенный, в отличие от него, не над полем целых чисел, а в группе точек эллиптической кривой.

[6] **Национальный институт стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology, NIST)** – нерегулирующий федеральный орган в составе Управления по технологиям Министерства торговли США. Деятельность NIST направлена на продвижение инноваций и обеспечение промышленной конкурентоспособности США за счет развития метрологии, стандартизации и совершенствования технологий с целью обеспечения экономической безопасности и повышения качества жизни населения страны.

[7] **Государственный комитет по развитию и реформам КНР** – орган государственной власти КНР. Первоначально – Госплан КНР, затем Государственный комитет планового развития КНР. Текущее название с марта 2003 г.

[8] **BERT (bidirectional encoder representations from Transformers, двунаправленные представления кодировщика от Transformers)** – алгоритм глубокого обучения поисковых систем, базирующийся на Transformers (разработанная Google технология обработки естественного языка на основе нейросети).

[9] **Окно процесса (process window)** – набор значений параметров процесса, позволяющий изготавливать ИС и работающий при желаемых спецификациях. Например, окно процесса литографии обычно определяется как набор пунктов (фокус, экспозиция и т. д.) для контроля разбросов критических размеров в пределах 10%.

[10] **Двойное формирование рисунка (double patterning)** – перспективная методика, требующая двукратного экспонирования: на первом этапе осуществляется экспонирование половины числа линий, травление и дальнейшие стадии технологического процесса. Затем на пластину наносится следующий слой резиста, и другая половина рисунка экспонируется в промежутки между первым набором линий. Этот подход достаточно дорог и медленен, однако сравнительно легок с технической стороны, хотя требует повышенной точности совмещения – не хуже 2 нм.

[11] **Арбитраж шины (bus arbitration)** – в каждый момент времени контроль над шиной, к которой подключено несколько модулей, может иметь только одно устройство, иначе произойдет наложение и искажение сигналов. Для этого и служит арбитраж шины, решающий, какое из двух и более устройств получит к ней доступ. Все варианты арбитража делятся на две группы: централизованные и распределенные.

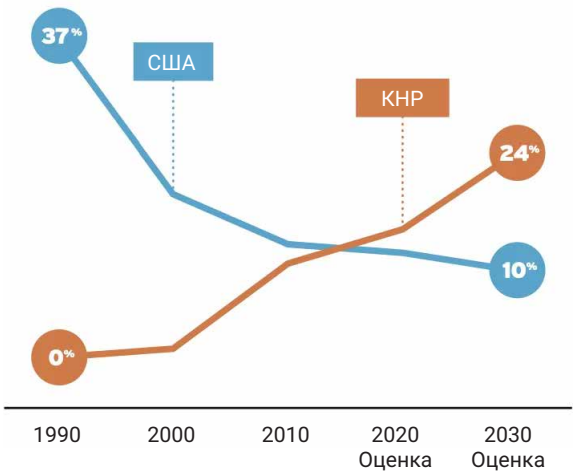
[12] **Кремниевый завод (foundry)** – производство ИС по спецификациям заказчика с предоставлением широкого спектра услуг по использованию инструментальных средств фирм-союзников из числа поставщиков САПР, баз библиотек стандартных элементов различных fabless- и IDM-фирм (по контрактам foundry с последними), платформ и сложнофункциональных блоков (на тех же условиях) для проектирования ИС.

[13] **Упреждающее исполнение (speculation)** – выборка, декодирование и исполнение команд, следующих за предсказанной точкой перехода, до того как станет известен действительный адрес перехода.

[14] **Унаследованный код (legacy code)** – код, переставший удовлетворять потребностям приложений, но все еще использующийся из-за трудностей замены, так как при его создании не были заложены возможности изменений.

[15] **CEA-Leti (Laboratoire d'électronique des technologies de l'information)** – Лаборатория электроники и информационных технологий при Французском Комиссариате по атомной и альтернативным видам энергии, крупный европейский центр исследований в области микроэлектроники.

В СЛЕДУЮЩЕМ ВЫПУСКЕ:



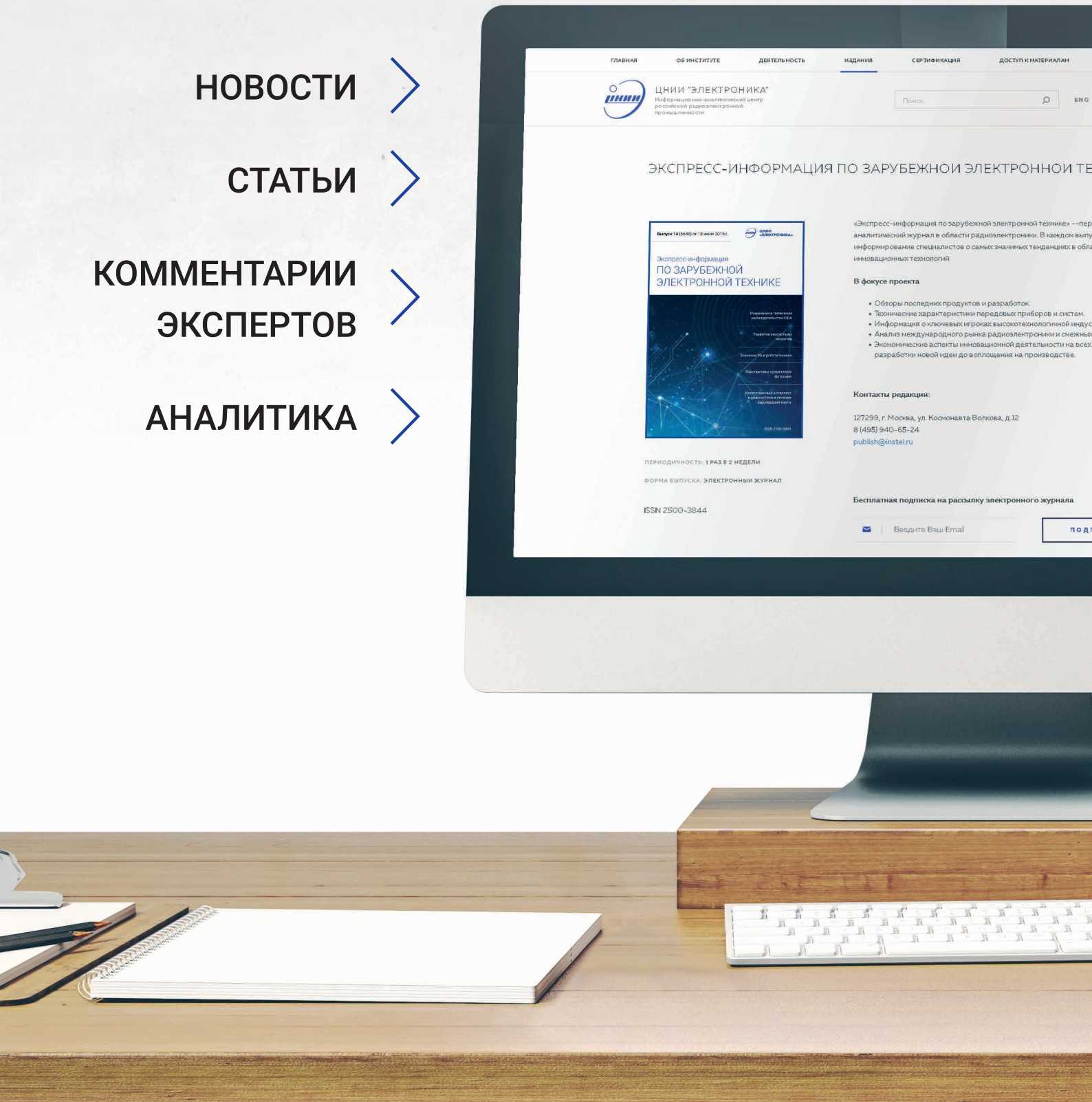
- В течение многих лет Америка была лидером в разработке новых микросхем, но сегодня теряет позиции в их производстве. Во-первых, американские кремниевые заводы, включая Intel, отстают по уровню техпроцессов от своих азиатских конкурентов. Во-вторых, в стране резко сократилось количество новых заводов по обработке пластин и производственных мощностей в целом. Чтобы не допустить дальнейшего отставания, США разрабатывают новые стратегии.
- По данным одного из последних исследований корпорации Wilson Research, в 2019 г. в полупроводниковой промышленности значительно возросло число отказов из-за выхода за пределы допусков аналоговой схемотехники специализированных ИС (ASIC). Чем оно было вызвано? Ответ в значительной степени зависит от аналоговых настроек.
- Растет роль кремниевых заводов как производственной базы полупроводниковой промышленности. Каждый из них при выборе стратегий дальнейшего развития основывается на уже имеющихся возможностях, а также ищет новые направления и конечные рынки. Это предполагает оценку необходимости расширения или оптимизации существующих мощностей, создания новых производств, формирования союзов по разработке перспективных технологических процессов и т. п.

zet.instel.ru

Всё о зарубежной электронной технике

НОВОСТИ

СТАТЬИ

КОММЕНТАРИИ ЭКСПЕРТОВ

АНАЛИТИКА