

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЫНКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Варшавский Л.Е.

В статье анализируется состояние мирового рынка полупроводников. Исследуются проблемы, связанные с глобализацией в производстве полупроводников. Рассматриваются разработанные сценарии развития рынка интегральных схем, а также возможные потери, связанные с серьезным нарушением цепи поставок в краткосрочной перспективе.

DOI: 10.20537/mce2022econ09

Введение. По мере своего развития, полупроводниковая промышленность, возникшая во второй половине XX века, оказывает все большее влияние на мировую экономику. Так, если в 1980–1989 гг. коэффициент корреляции глобального ВВП и рынка интегральных схем (ИС) (на него приходится более 80% рынка полупроводников), составлял 0.35, то в 2000–2009 гг. он повысился до 0.63, а в 2010–2018 гг. — до 0.87 [1].

Возрастающий спрос на полупроводниковую промышленность обусловлен непрерывным появлением и распространением инновационных продуктов и технологий (вначале персональных компьютеров (ПК), затем Интернета, а в последние 10–15 лет — смартфонов, высокопроизводительных суперкомпьютеров, серверов для облачных вычислений и др.). С начала 2000-х гг. развитие отрасли сопровождается значительным снижением доли компьютеров в структуре потребления полупроводников и ИС (за период с 2003 г. по 2019 г. с 51% до почти 36%), при одновременном возрастании доли таких отраслей, как связь и автомобилестроение (за тот же период, соответственно, с 22% до почти 36% и с 6.3% до 8.7%) [2].

Глобальный рынок полупроводников, включая интегральные схемы, а также устройства оптоэлектроники, датчики / исполнительные механизмы и дискретные устройства (OSD), достиг в 2021 г. 614 млрд долл., в том числе ИС — почти 510 млрд долл., что на 88.5% превышает уровень 2011 г.! При этом общий объем выпуска полупроводниковых приборов составил 1.3 трлн единиц. В текущем 2022 г. по оценкам ИС

Insights общий объем производства полупроводников увеличится до 681 млрд долл., а ИС — до 565 млрд долл. [3]

Вместе с тем, следует отметить неравномерность темпов роста рынка полупроводников и особенно ИС. Так, основной рост произошел в 2016–2021 гг. (на 71%), после относительно стабилизации в 2011–2015 гг. (рис. 1). Особенно заметный рост рынка произошел в 2019–2021 гг., что связано с интенсификацией торговой войны между США и Китаем в 2018–2019 гг., а также с распространением COVID-19.

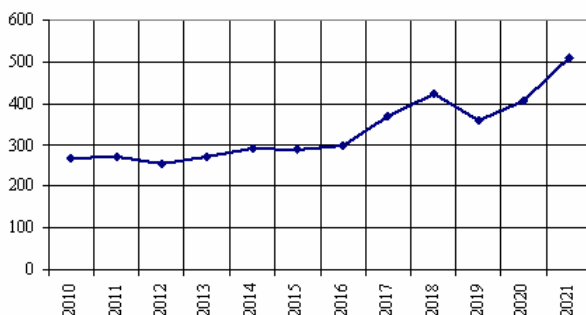


Рис. 1. Динамика объемов мирового рынка ИС (млрд долл.). По данным [4].

Более того, из-за распространения COVID-19 и связанных с этим производственных и логистических проблем, в последние годы проявляется острый дефицит полупроводников. В значительной степени это обусловлено ростом спроса на устройства для поддержки удаленной работы и обучения, а также ростом облачных вычислений. Из-за дефицита полупроводниковой продукции существенно сократилось производство в автомобильной промышленности, которая становится крупным потребителем полупроводников. Вместе с тем, обострился дефицит полупроводниковых комплектующих для компьютеров, который, по оценкам ряда компаний, может продлиться и до 2023–2025 гг. В связи с этим, существенно выросли цены на компьютеры и ноутбуки (за 2021 г., например, на российском рынке — на 25–30%) [5].

1. Проблемы, связанные с глобализацией полупроводниковой промышленности.

1.1. Структура производства в отрасли. Полупроводниковая промышленность характеризуется весьма высокой капиталоемкостью и наукоемкостью (эти показатели составляют соответственно 20% и 14% по отношению к объемам дохода в отрасли). Процесс производства полупроводниковых пластин может включать до 1400 этапов, а для изготовления готового чипа требуется 14–20 недель. В целом, время выполнения заказа с момента размещения заказа до получения конечного продукта (включая внутреннюю сборку, тестирование и упаковку) может занять до 26 недель [6, 7].

В связи с колоссальной науко- и капиталоемкостью отрасли, а также ростом номенклатуры продукции, уже в 1980–1990-е гг. произошло разделение фирм на фирмы-производители пластин и чипов (англ. pure-play foundries, лидирующую роль среди них занимает тайваньская TSMC с четырьмя своими гигантскими комплексами GigagFab) и большое число фирм-разработчиков дизайна разнообразных схем и приборов (англ. fabless, т.е. не имеющие в своем составе фабрик). Такое разделение позволило большому числу дизайнерских фирм (их число достигает несколько тысяч) сосредоточиться на стадии исследований и разработок, а также на маркетинге продукции. За счет аутсорсинга производства на фабриках фирм-производителей пластин и чипов, им удалось избежать крупных капиталовложений, существенно снизить зависимость от выпуска своей продукции на свободных мощностях фабрик крупнейших компаний и, тем самым, риск потери прав на интеллектуальную собственность. Кроме перечисленных выше групп фирм, производством в отрасли занимается небольшое число гигантских интегрированных компаний (англ. integrated device manufacturer (IDM)) с полным циклом создания продукции, которые доминируют на рынке. К их числу относятся такие крупнейшие компании, как Intel, Samsung, STMicroelectronics и др. [8].

1.2. Проблемы, связанные с глобализацией отрасли. В связи со сложностью высокотехнологического производства полупроводниковой продукции, зависящего от длинной цепи поставок исходной продукции и оборудования, уже в конце XX века по инициативе деловых кругов и администрации США был осуществлен переход к глобализации отрасли. В результате глобализации развернутая цепь поставок продукции охватила многие страны мира, в первую очередь слаборазвитые в тот

период страны Дальневосточного региона с низким уровнем заработной платы. В рамках Всемирной торговой организации (ВТО) был принят ряд соглашений, способствовавших удешевлению продукции отрасли и ускорению распространения информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) [9].

Уже в начале 2000-х гг. в отрасли сформировалась сложная и обширная экосистема, состоящая из взаимосвязанных цепочек создания стоимости, представляющих самые разнообразные товары и услуги (химические газы, материалы, строительные услуги, производство пластин, капитальное оборудование, запасные части, системы управления, вычислительное оборудование, исследования рынка, технические консультации и медиа-услуги). Участие в глобальной цепочке создания стоимости оказало положительное влияние, на экономическое развитие стран-участников глобализации, особенно стран Дальневосточного региона.

Вместе с тем, к настоящему времени, под влиянием ситуации, сложившейся в 2019–2020 гг., стали остро ощущаться негативные явления, связанные с неравномерностью географического размещения производств. Так, в цепочке создания стоимости присутствует более 50 точек, в которых на один регион приходится более 65% доли мирового рынка; около 75% мировых мощностей по производству полупроводников, сосредоточено в Юго-Восточной Азии, регионе, который подвержен высокой сейсмической активности и геополитической напряженности; 100% самых передовых (менее 10 нанометров) производственных мощностей в мире по производству полупроводников в настоящее время расположены на Тайване (92%) и в Южной Корее (8%). Следует отметить и то, что в результате глобализации, удельный вес США в производстве полупроводников снизился с 37% в 1990 г. до 12% в 2020 г. Вместе с тем, на долю американских компаний, разбросанных в разных частях мира, все еще приходится свыше 50% производства интегральных схем (ИС) [10].

Неравномерность географического размещения производств повышает риски нарушения поставок при возникновении нештатных ситуаций (типичных для Юго-Восточной Азии землетрясений, наводнений, геополитических трений) и возникновения значительных объемов затрат, необходимых для их устранения или для смягчения последствий от их появления. Во многом с этим фактором связан продолжающийся из-за пандемии серьезный дефицит полупроводниковой продукции, оказавший существенное влияние на глобальную инфляцию.

Из-за возникшего в 2019–2020 гг. дефицита на рынке полупроводников в США, опасаящихся серьезных перебоев в поставках продукции, угрожающих национальной безопасности, разработан и принят ряд законодательных актов, направленных на стимулирование производства полупроводниковой продукции в стране (в частности, Закон об инновациях и конкуренции — U.S. Innovation and Competition Act — USICA)) [11].

Следует также отметить активность, проявляемую Китаем в налаживании собственного производства полупроводников. В настоящее время эта страна является крупнейшим потребителем полупроводников (свыше 30% мирового потребления), но при этом она производит менее 16% от объема потребления этой продукции. В связи с разразившейся в 2018–2019 гг. торговой войной с США, на поставку в китайские компании (включая Huawei) оборудования для фабрик и чипов с малым топологическим размером (14 нм и ниже) были наложены санкции. В результате стране не удалось выполнить задания планов и инициатив, принятых в 2015–2015 гг. Однако в недавно принятом 14-м пятилетнем плане на 2021–2025 гг. намечено обеспечить 70% потребления чипов собственной продукцией. Ввиду того, что многие аналитики считают достижение этой цели маловероятной, в последнее время на Западе усилились опасения относительно обострения ситуации вокруг Тайваня [12].

Вместе с тем, по оценкам ряда американских исследователей, переход от глобализации к автаркии в отрасли приведет к существенным инвестициям, росту затрат и, в конечном счете, к росту цен на полупроводниковую продукцию [6].

2. Развитие рынка полупроводников в перспективе. В связи с неопределенной обстановкой, вызванной пандемией и усилением международной напряженности, существуют объективные трудности при разработке сценариев развития рынка полупроводников даже на краткосрочную перспективу. В настоящей работе на основе простой экономико-статистической модели построены возможные сценарии развития глобального рынка полупроводников до 2030 г.

В модели исследуются такие показатели, как объем выпуска пластин W для ИС (приведенных к диаметру 200 мм) в млн ед., объем производимой продукции (доходы или revenues) всего Q_{tot} , в том числе как в дизайнерских компаниях (fables) Q_{FL} , так и в компаниях — производителях пластин и чипов (foundries) Q_F , в млрд. долл. В качестве базовых значений для 2022 г. взяты оценки консалтинговой компании IC Insight. Во всех сценариях в качестве экзогенной переменной принят

температура прироста объема выпуска пластин, который определяет динамику остальных показателей рынка.

В связи с тем, что имеет место достаточно надежная линейная зависимость между объемом производства пластин и производства ИС всего ($Q_{tot} = 1.5W$; $R^2 = 0.995$), в трех сценариях использовались одинаковые темпы прироста показателей W и Q_{tot} , равные $\lambda = 0.05$; $\lambda = 0.065$ и $\lambda = 0.08$ (эти значения близки к фактическим величинам темпов прироста исследуемых показателей за разные периоды времени в 2000–2020 гг.).

Связь между объемами производимой продукции (доходами) всего Q_{tot} , и в дизайнерских компаниях (fables) Q_{FL} описывается соотношением:

$$Q_{FLt} = 0.643Q_{FLt-1} + 0.117Q_{tott}, \quad R^2 = 0.996 \quad (1)$$

(1.189) (0.048)

а между объемами производимой продукции в дизайнерских компаниях (fables) Q_{FL} , и в компаниях -производителях пластин и чипов — простым линейным соотношением:

$$Q_{Ft} = 0.516Q_{FLt}, \quad R^2 = 0.996 \quad (2)$$

(0.011)

(в скобках указаны значения среднеквадратических ошибок оценок).

Оценки объемов рынка ИС на среднесрочную перспективу (в ценах 2020 г.), полученные на основе соотношений (1), (2) для 3-х сценариев, приведены в табл. 1–3.

Таблица 1. Развитие рынка ИС при первом сценарии, млрд. долл. (температура прироста $\lambda = 0.05$).

	Доходы всего	Доходы фирм- дизайнеров.	Доходы фирм-производителей пластин и чипов
2020	404.4	132.6	68.4
2025	654.2	194.9	100.6
2030	834.9	252.3	130.2

Таблица 2. Развитие рынка ИС при втором сценарии, млрд. долл. (температура прироста $\lambda = 0.065$).

	Доходы всего	Доходы фирм- дизайнеров.	Доходы фирм-производителей пластин и чипов
2020	404.4	132.6	68.4
2025	682.6	200.0	103.2
2030	935.2	276.6	142.7

Таблица 3. Развитие рынка ИС при третьем сценарии, млрд. долл. (темпы прироста $\lambda = 0.08$).

	Доходы всего	Доходы фирм- дизайнеров	Доходы фирм-производителей пластин и чипов
2020	404.4	132.6	68.4
2025	711.9	205.2	105.9
2030	1046.0	303.1	156.4

3. Роль Тайваня в надежности обеспечения поставок. К настоящему времени Тайвань превратился в регион с высокоразвитой высокотехнологичной промышленностью. В 2021 г. суммарный годовой доход 800 публичных компаний Тайваня превысил 900 млрд долл. Особая роль на острове принадлежит отрасли ИКТ. Так, суммарный доход только 7 крупнейших тайваньских компаний ИКТ лишь за 3 квартала 2021 г. составил более 312 млрд долл. [13, 14].

Бурному экономическому развитию острова способствовало вступление Тайваня, наряду с Китаем и Южной Кореей, в ВТО в 2001 г. Местные аналитики отмечают, что прошедшие 20 лет были для острова «золотыми днями», которые, однако, закончились в связи с обострением проблем в мировой экономике.

Особое место в развитии высокотехнологичного производства Тайваня занимает основанная в 1987 г. компания TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited). Компания, в которой $\frac{3}{4}$ акций принадлежит иностранным акционерам и в которой трудится 56000 сотрудников, является доминирующим участником рынка производства пластин и чипов (Pure-Play Foundries). В 2020–2021 гг. ее удельный вес в производстве пластин и чипов превышал 20%, а рыночная доля в доходах всего фабричного сектора (включая IDM-компании) превышала 55%. Большую часть потребителей полупроводниковой продукции составляют дизайнерские фирмы США (более 60%, в том числе Apple — более 20%) и Китая (около 29%). Такое распределение потребителей во многом объясняется высоким инновационным уровнем выпускаемой компанией продукции. Так в 2020 г. доля доходов компании от продажи пластин с чипами, имеющими топологический размер 16 нм и менее, составляла 58%. В настоящее время идет подготовка к запуску процессов с размерами 3 и 2 нм. О технологических успехах TSMC свидетельствует тот факт, что Intel, лидер в производстве универсальных

процессоров, столкнувшись с трудностями освоения техпроцесса 10 нм, предполагает разместить заказы на тайваньских фабриках [15].

Достижения TSMC обусловлены значительным вниманием, уделяемым с начала 2000-х гг. в компании исследованиям и разработкам, на которые расходуется более 8% доходов. В компании были выделены 2 параллельные группы исследователей, одна из которых в течение 18-24 месяцев работала над разработкой и освоением технологий с размерами схем 28 нм, затем 16 нм и далее 7 нм и 3 нм, а другая — одновременно над разработкой и освоением технологий с размерами схем 20 нм, затем 10 нм и далее 5 нм. Исследователи компании проводили большую работу по освоению и доработке установок экстремальной ультрафиолетовой фотолитографии EUV, необходимых для производства современных микросхем с размером менее 7 нанометров (в настоящее время на TSMC поставлена половина этих установок, производимых компанией ASML, на поставку которых для других стран распространяются санкции) [16].

В результате, за счет высокой эффективности исследований и разработок, и, как следствие, значительного увеличения наукоемкости производства в расчете на 1 пластину, компания добилась существенных конкурентных преимуществ над другими участниками рынка.

Вышеприведенные факты подчеркивают значимость компании как для инновационного развития отрасли, так и для обеспечения надежности цепи поставок. Последнее связано с тем, что объем доходов дизайнерских компаний, зависящих от поставок продукции TSMC, примерно в 2 раза превосходит объем доходов тайваньской компании. Прекращение работы этой компании в силу каких-либо экстремальных причин будет иметь катастрофические последствия для всей отрасли. Так, расчеты на основе вышеприведенной модели (1)–(3) показывают, что при прекращении работы TSMC в 2024 г. (по нашим оценкам доходы компании могут составить не менее 70 млрд долл.) доходы производителей ИС в целом уменьшатся на 140 млрд долл. Для восстановления к 2028 г. фабрик и прерванного выпуска продукции компании потребуется, по самым скромным оценкам, израсходовать в 2024–2027 гг. капитальных вложений на сумму свыше 133 млрд. долл. При таком отклонении, например, от сценария 1, потери за 2024–2030 гг. фирм-дизайнеров могут составить около 600 млрд долл., а всей отрасли — более 910 млрд долл. Об отклонении динамики доходов в этом случае (т.е. при выходе TSMC из эксплуатации) от первого сценария дает представление рис. 2. Значительное снижение объемов производства полупроводниковой

продукции в краткосрочной перспективе (до 2025 г.) повлечет спад производства в смежных отраслях и усилит инфляцию, что будет иметь катастрофические последствия для мировой экономики.

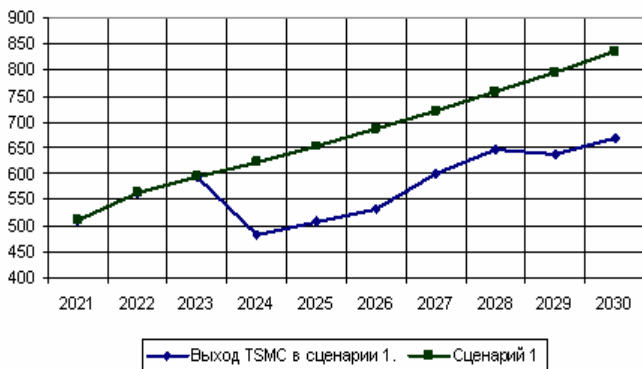


Рис. 2. Динамика объемов мирового рынка ИС в сценарии 1 и при отклонении от него (выход TSMC) в млрд долл.

Выводы. Производство полупроводников является в настоящее время ключевым фактором развития экономики.

В связи с обострением международной обстановки и пандемией стали отчетливо проявляться негативные явления, связанные с глобализацией, что заставляет развитые страны переходить к локализации полупроводниковых производств на своей территории.

В кратко- и среднесрочной перспективе серьезное нарушение сложившихся структуры отрасли и цепи поставок может привести к катастрофическим последствиям для экономики и к провалу планов цифровизации общества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Auto segment to show strongest semi market CAGR. URL: <https://www.electronicsworld.com/news/business/auto-strongest-semi-market-segment-2020-06/>
2. US holds 52% IC market share. URL: <https://www.electronicsworld.com/news/business/us-holds-50-ic-market-share-2019-06>
3. Semiconductor market to rise 10.8 percent in 2022. URL: <https://www.eenewseurope.com/news/semiconductor-market-rise-108-percent-2022>
4. EENews. URL: www.eenewseurope.com
5. Продажи персональных компьютеров в мире выросли на 14,8% в 2021 году. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/01/13/904637-prodazhi-personalnih-kompyuterov>
6. Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era. URL: <https://www.bcg.com/publications/2021/strengthening-the-global-semiconductor-supply-chain>
7. Chipmakers Are Ramping Up Production to Address Semiconductor Shortage. Here's Why that Takes Time. URL: <https://www.semiconductors.org/chipmakers-are-ramping-up-production-to-address-semiconductor-shortage-heres-why-that-takes-time/>
8. *Варшавский Л.Е.* Моделирование динамики ключевых показателей рынков компонентов высокопроизводительных вычислительных систем// Труды Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН).— 2017, Том 67. Выпуск 1. С.12-27.
9. Trade in Transition: The Importance of Re-Establishing U.S. Trade Leadership. URL: <https://www.semiconductors.org/trade-in-transition-the-importance-of-re-establishing-u-s-trade-leadership/>
10. Semiconductor Industry Leaders Urge President Biden to Prioritize Funding for Semiconductor Manufacturing, Research. URL: <https://www.semiconductors.org/semiconductor-industry-leaders-urge-president-biden-to-prioritize-funding-for-semiconductor-manufacturing-research/>
11. CHIPS for America Act & FABS Act. URL: <https://www.semiconductors.org/chips/>
12. China Accelerates Foundry, Power Semi Efforts. URL: <https://semiengineering.com/china-accelerates-foundry-power-semi-efforts/>
13. Industry watch: Big issues must be addressed. URL: <https://www.digitimes.com/news/a20220124VL208.html?mod=2>
14. Industry watch: The era of market equilibrium is gone. URL: <https://www.digitimes.com/news/a20211103VL206.html?mod=2>

15. IT industry outlook (5): TSMC under the microscope. URL:
<https://www.digitimes.com/news/a20210817VL203.html?mod=2>
16. TSMC dossier (3): Tech leadership and aggressive investment. URL:
<https://www.digitimes.com/news/a20210712VL201.html>

MODERN TRENDS OF SEMICONDUCTOR INDUSTRY DEVELOPMENT

Varshavsky L.E.

The article analyzes the state of the world semiconductor market. The problems associated with globalization in the production of semiconductors are investigated. The scenarios for the development of the integrated circuits market are considered, as well as possible losses associated with a serious disruption of the supply chain in the short term.