



Фотоника: техника уточнения

А. В. Наумов. АО «ОКБ «Астрон», г. Лыткарино, Моск. обл., Россия



Фотоника не может существовать без микроэлектронных технологий. Фотонные интегральные схемы оказались в центре внимания разработчиков и интеграторов самых разнообразных оптических систем связи и систем сенсорики. Однако системы оптической обработки информации (оптические компьютеры или оптические нейросети) все еще находятся на стадии лабораторных исследований. Проблемы развития социума, когда основной поток информации практически мгновенно становится известен любому члену этого социума, на современном этапе обусловлены запаздыванием социальной структуры за техническим прогрессом. Поэтому в кругу многообразия оптико-электронных и фотонных умений и компетенций необходимо выделить критически важные задачи для успешного достижения целей Стратегии научно-технологического развития России. Это под силу только объединенному сообществу науки и инженерии. 27 сентября 2024 года в рамках форума «Микроэлектроника 2024» состоялся круглый стол по вопросам координации усилий при создании дорожной карты по фотонике. Модератором научной встречи выступил д. ф.-м. н. профессор «Сколтеха» Аркадий Владимирович Шипулин. В статье представлены его ответы на ряд вопросов, поднятых во время обсуждений планов создания дорожной карты.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, оптические системы связи, уровни готовности технологий

Статья поступила: 11.11.2024. Статья принята: 25.11.2024

Photonics: Refinement Technique

A. V. Naumov. JSC "Optical and Mechanical Design Bureau "Astrohn", Lytkarino, Moscow region, Russia

Photonics cannot exist without microelectronic technologies. Photonic integrated circuits have become the focus of attention for developers and integrators of a wide variety of optical communication systems and sensor systems. However, optical information processing systems (optical computers or optical neural networks) are still at the stage of laboratory research. The problems of the development of society, when the main flow of information becomes almost instantly known to any member of this society, at the present stage are due to the lag of the social structure behind technological progress. Therefore, among the variety of optoelectronic and photonic skills and competencies, it is necessary to identify critical tasks for the successful achievement of the goals of the Strategy of Scientific and Technological Development of Russia. Only the united community of science and engineering can do this. On September 27, 2024, within the framework of the Microelectronics 2024 forum, a round table was held on coordinating efforts in creating a photonics roadmap. The moderator of the scientific meeting was Arkady Vladimirovich Shipulin, PhD, Professor of Skoltech. The article presents his answers to a number of questions raised during the discussions on the plans to create a roadmap.

Keywords: Photonic Integrated Circuits, Optical Communication Systems, Technology Readiness Levels

Article received: 11.11.2024. Article accepted: 25.11.2024



Аркадий Владимирович, какие приборы и устройства способствовали динамичному росту разработок фотонных интегральных схем?

Мы живем в информационном обществе, где за счет передачи информационных потоков происходят коммуникации между его членами. В системах оптических коммуникаций чаще всего используются оптоэлектронные преобразователи (то есть приборы, преобразующие оптический сигнал в электрический и наоборот, электрический в оптический). Это обусловлено тем, что без оптики в современных линиях связи (особенно магистральных) попросту не обойтись. Это, в свою очередь, обусловлено тем, что для передачи любого высокочастотного модулированного сигнала (в аналоговом или цифровом формате) необходимо, чтобы несущая частота опорного сигнала была существенно выше частоты информационной модуляции. Несущая частота света приблизительно 10^{15} Гц, частоты же информационной модуляции (без учета мультиплексирования) не превышают 10^{11} Гц (это на четыре порядка ниже световой частоты). Поэтому свет является идеальной несущей с точки зрения повышения емкости информационного потока. Генератором светового опорного сигнала (10^{15} Гц) служит обычно лазер, а информационная модуляция осуществляется либо прямой модуляцией лазера (в формате амплитудной модуляции до частот порядка 10^{10} Гц), либо с помощью электрооптического модулятора для более высоких частот и более сложных форматов модуляции. До настоящего времени части оптических систем, отвечающие за преобразование из оптики в электрический сигнал (детекторы или приемники) и из электричества в оптику (лазеры и модуляторы), поставлялись отдельно и монтировались на платы в соответствии с дизайном, разработанным для конкретной системы.

Рассмотрим, например, трансмиттер (передатчик), преобразующий электрический сигнал в оптический. Как мы знаем, большинство современных систем использует цифровой формат модуляции, то есть «нули» и «единицы» формируются в электрической области и далее переносятся в оптику. В каждом конкретном временном слоте формируется оптический сигнал, в котором упакованы «нули» и «единицы», переносящие информацию. В современных системах связи используются сложные форматы модуляции, в которых информация кодируется как в амплитуде, так и в фазе оптического сигнала. Таким образом, в одном временном слоте может быть упаковано

не просто один «ноль» или одна «единица», а много «нулей» и «единиц» одновременно. Кроме того, для мультиплексирования информационных потоков используются разные поляризации светового поля, что позволяет вдвое увеличивать количество передаваемой информации на одной длине волны. Ну и наконец таких длин волн может быть несколько сотен. Итак, мы видим, что для преобразования электрической последовательности «нулей» и «единиц» в трансмиттере необходимо иметь возможность модулировать амплитуду и фазу светового сигнала и, кроме того, делать это на разных поляризациях и разных длинах волн. Отсюда становится понятен и в достаточной степени определен базовый инженерный облик такого трансмиттера. Он состоит из источников когерентного излучения (лазеров), модуляторов (современные модуляторы могут одновременно модулировать и амплитуду, и фазу оптического сигнала), а также необходимых пассивных оптических элементов и электроники.

До появления ФИС все эти компоненты поставлялись и монтировались отдельно. В случае ФИС все эти компоненты изготавливаются сразу в рамках сложного, многоступенчатого технологического процесса.

Идеологией любой интегральной схемы (электрической или фотонной) является уменьшение размеров устройства при сохранении функциональности всех составных частей. При этом, как правило, повышается стабильность функционирования такого устройства, а также уменьшается цена при условии массового производства как интегральных схем, так и устройств на их основе.

Хотелось бы сказать несколько слов о том, как электронные интегральные схемы (ЭИС) качественно изменили наш мир. ЭИС позволяет с чудовищными скоростями принимать, обрабатывать, и отправлять информационные электрические сигналы. Переход на ЭИС привел в прошлом веке к созданию информационного общества – социума, где основной поток информации практически мгновенно становится известен любому члену этого социума. В большой степени проблемы развития социума на современном этапе обусловлены несоответствием структур последнего условию мгновенной доступности информации. Такая ситуация в истории – запаздывание социальной структуры за техническим прогрессом – происходит не в первый и, надеюсь, не в последний раз. К слову, попытки как-то ограничивать информационные потоки предприни-

маются практически во всех социальных системах (имеется в виду как в западных, так и не западных системах) и на всех уровнях и выглядят в большинстве случаев достаточно нелепо. Информационные каналы сами по себе не есть что-то плохое или что-то хорошее – это просто аналог нервной системы любого организма. По ним могут передаваться любые сообщения любого содержания, что и поддерживает жизнеспособность данного организма. Искусственная «фильтрация» информации приводит к искажению естественного, эволюционного развития. Например, искусственное ограничение «плохой» информации препятствует развитию иммунитета, что мы и можем наблюдать как в живых организмах (отсутствие иммунитета в случае «тепличного» развития), так и в социумах с жестким контролем информационных потоков.

ФИС в данном техническом концепте также представляет из себя аналогичную (как и в случае электронных интегральных схем) попытку перенести на одну платформу набор элементов для создания того же функционала, как и в случае систем, собранных из дискретных компонент. Основным драйвером интереса к ФИС также является применение последних в оптических информационных системах. Помимо этого, ФИС находят свое применение в области оптической сенсорики (включая лидары), оптических вычислений, применения квантовых технологий, радиофотоники и др.

Приведет ли массовое использование ФИС к такому же качественному скачку, которое вызвало в прошлом веке внедрение ЭИС? Думаю,

да, и это будет связано уже не с системами коммуникации «человек-человек», а все больше с коммуникациями с системами искусственного интеллекта (ИИ) типа «человек-гаджет» и «гаджет-гаджет»; в частности, с применением ФИС для систем искусственного интеллекта и связанных с ним упомянутых новых типов информационных потоков. В основном же применение ФИС будет обусловлено возрастанием количества точек перехода электричество-оптика и обратно в системах связи следующего поколения 6G. В этих точках перехода и предполагается использование ФИС.

Принципиальным отличием ФИС от электронных аналогов является отсутствие доступного фотонного транзистора, что не позволяет построить полностью оптическую систему, основанную на управлении света светом. Кроме того, «размеры» фотона не позволяют уменьшать оптические волноводы и элементы на их основе менее чем приблизительно на 200 нм (для платформы КНИ – кремний на изоляторе), иначе они просто не смогут проводить свет. Это позволяет создавать ФИС на установках с технологическими нормами, например, 90 нм, дальнейшее уменьшение технологических норм не является необходимым. Поэтому появляющиеся иногда утверждения о том, что, например, оптический компьютер будет и меньше, и быстрее, и энергоэффективнее, и т. д., следует воспринимать не слишком буквально. Меньше он точно не будет, да и с энергоэффективностью не все так однозначно. Уменьшение на порядок размеров составных элементов ФИС (и самой ФИС) возможно при переходе с фотонов

на плазмоны – квазичастицы, состоящие из связанных фотона и электрона на поверхности раздела диэлектрик-металл. Эта тема была достаточно модной лет 10-15 назад, однако в итоге планов практической реализации такого подхода пока немного.

Интересным применением ФИС могла бы стать реализация на их основе нейронных сетей. В настоящее время в мире существуют несколько стартапов, реализующих продукт нейросетей на основе ФИС. Важным фактом здесь является необходимость наличия оптического нелинейного отклика в нейронах. Следует отметить, что



наличие нелинейного отклика необходимо как в задаче фотонного транзистора (основа любого компьютера), так и в задаче построения фотонной нейронной сети. Оптическая же нелинейность может быть получена только на основе нелинейного отклика среды: в отличие от электронов, фотоны не взаимодействуют с электромагнитными полями и, соответственно, друг с другом. Оптическая нелинейность требует, как правило, существенных оптических мощностей, что делает задачу получения такого рода эффекта (а с ней и оптических компьютеров, и вычислителей разного рода) достаточно проблематичной.

Более практичной и развитой областью является применение ФИС в системах оптического мониторинга. В таких системах ФИС применяется в интеррогаторах – устройстве опроса оптических сенсоров. Интересным применением было бы сочетание интеррогатора и нейросетей для обработки получаемой информации без необходимости перехода из оптической в электрическую область.

Суммируя вышесказанное, могу сказать, что основным драйвером интереса к ФИС в настоящее время является оптические системы связи в разных вариантах и системы сенсорики. Системы же оптической обработки информации (будь то оптические компьютеры или оптические нейросети) пока что не вышли из стадии лабораторных исследований.

Какие преимущества выделяют ФИС на фоне ранее используемых элементов для модуляции, усиления, обработки и фильтрации оптических сигналов?

Основным преимуществом ФИС по сравнению с набором дискретных элементов является компактность. Следствием компактности является большая стабильность таких систем, что чрезвычайно важно, к примеру, для устройств, использующих фазу оптического сигнала. Компактность позволяет надеяться на использование фотонных технологий в различных гаджетах, что и является решающим для рыночных драйверов всей этой истории. Необходимо понимать, что лишь



рынок решает, будет та или иная технология развиваться или нет, причем здесь имеется в виду не только коммерческий рынок, но и рынок государственных заказов. При наличии спроса технология будет развиваться и будет стараться удовлетворять спрос независимо от уровня этой технологии в данный момент. И наоборот, даже при условии полной готовности технологии, при отсутствии рыночного спроса технология не будет передана в индустрию и не станет востребованной.

Необходимо также понимать, что для рынка не имеет значение понятие «инновации», то есть степень новизны самого решения. Имеет значение лишь достижимость необходимых технических параметров при минимальной себестоимости. Если этого сочетания проще достичь при существующем наборе технологий (например, использовать дискретные компоненты вместо ФИС), то новые технологии (в данном случае ФИС) рынком подхвачены не будут.

Какие параметры могут быть достигнуты с помощью технологии ФИС и недостижимы при использовании дискретных компонентов? Как уже было сказано выше, компактность и стабильность. Цена же может быть ниже только при условии массового производства, то есть большой емкости, соответствующей рыночной ниши, которая в настоящий момент лишь формируется. Поэтому массовое производство ФИС в настоящее время в любом случае не окупится, что и подтверждает анализ западного рынка: пока что производство ФИС и устройств на их основе экономически невыгодно.



Здесь стоит вспомнить историю с развитием технологии и рынка ЭИС (электронных интегральных схем). Совершенствование технологии шло по пути уменьшения технологических норм, что было необходимо для повышения быстродействия и для размещения большего количества электронных устройств в одном гаджете. При этом возникала ситуация, когда закупленные технологии и технологическое оборудование довольно быстро устаревало: достаточно вспомнить, как быстро был пройден путь от первых мобильных телефонов до современных смартфонов. Фирмы, выпускающие электронные чипы, вынуждены были периодически это оборудование менять. В то же время старое оборудование оказывалось никому не нужным и в лучшем случае перепродавалось другим участникам рынка или просто складировалось/выбрасывалось. Известны истории, когда оборудование успевало устаревать за время поставки и даже не распаковывалось. В случае ФИС технологии также развиваются, но, в отличие от ситуации с электронными чипами, нет необходимости в улучшении технологических норм, а, во-вторых, в настоящее время отсутствует насущная потребность рынка. Тем не менее, в этих условиях покупаемые технологии и оборудование также могут просто устареть за время формирования производственной цепочки. В настоящее время более оправдано было бы сосредоточиться на разработке технологий, а не на массовом производстве, и не отстать от текущих тенденций развития ФИС. Также хотелось бы подчеркнуть, что разработка и/или совершенствование технологии и массовое производство по такой технологии – это два достаточно разных процесса, которые, как правило, не сосредоточены в рамках одной фирмы, за исключением гигантов типа INTEL и TSMC. В противном случае фабрика рискует оказаться в ситуации, когда выпуск ФИС на технологически устаревшем оборудовании окажется невостребованным, как это уже происходило в случае ЭИС.

В США и странах западной Европы производство ФИС в настоящее время сосредоточено на фирмах, которые развивались в тесном контакте с университетами (то есть начинались как стартапы при университетах). В Нидерландах фирма по производству ФИС возникла при университете Эйндховена, а в Германии эта технология развивалась на базе одного из институтов сообщества Фраунгофера в Берлине. В любом случае, для выхода на режим работы опытного производ-

ства потребовалось порядка 10–15 лет и инвестиции в размерах миллиардов долларов. Для того, чтобы построить опытное производство с нуля, в настоящее время необходимо: а) оборудование с технологическими нормами не хуже 90 нм, б) опытные инженеры, часть из которых (хотя бы один) уже однажды прошел подобный путь создания такого производства. Тогда время от начала создания фабрики будет не менее 5 лет до выпуска опытных образцов, при этом размер инвестиций тем не менее измеряется в сумму порядка миллиарда долларов.

Какие задачи стоят перед инженерами в текущий период развития технологий производства ФИС?

В производстве ФИС задействованы несколько этапов, каждый из которых достаточно специфичен. В первую очередь необходимо сделать дизайн ФИС, для чего нужны специализированный САПР и инженеры, умеющие с этим САПРом работать. Соответственно, необходимо как обучать инженеров для работы на таком специализированном САПРе, так и создавать свой отечественный САПР (в настоящее время отечественный программный продукт такого рода отсутствует).

Далее для производства ФИС необходима фабрика или опытное производство. Вопросы постановки такого производства я описал выше, здесь лишь хочу еще раз подчеркнуть, что в настоящее время в России, с моей точки зрения, оправданными являются инвестиции в опытное производство в тесной кооперации с университетами, а не создание коммерчески оправданного массового производства. В любом случае, необходимо решать задачи, связанные именно с технологией создания ФИС.

Следующим этапом является стыковка и корпусировка готовых ФИС. Стыковка позволяет объединять несколько чипов в один, например, чип с лазером с чипом с модуляторами и/или спектрометрами и т. д. Также необходимо иметь в портфеле технологию стыковки с оптическими волокнами и электрическими контактами. Далее для тестирования либо создания конечного устройства необходимо разрабатывать и изготавливать платы, на которые будет устанавливаться ФИС. В данном случае необходимо решать вопросы геометрической совместимости, доступности, теплоотвода, а также стыковки с электрическими контактами. Последние необходимо сконструировать таким образом, чтобы



подаваемый высокочастотный сигнал (ширина полосы до 40 и выше ГГц) совпадал по импедансу с электрическими контактами ФИС. На данной стадии необходима работа как технологов, так и дизайнеров высокочастотной электроники, которые будут решать перечисленные выше задачи.

Наконец сконструированные, изготовленные и закорпусированные ФИС необходимо протестировать. Тесты готовых ФИС проводятся на низких частотах (потери, спектральные характеристики, пропускание модуляторов в зависимости от подаваемого сигнала и т.д.), а также на высоких частотах по специальным протоколам и методикам, принятыми либо в телекоме, либо в радиофотонике. В последнем случае необходимо промерять амплитудно-частотную и фазово-частотную характеристики (АЧХ и ФЧХ), которые измеряются с помощью векторного анализатора, а также линейность модуляции. В случае телекома линейность модуляции не проверяется, а АЧХ и ФЧХ можно проводить в качестве предварительных тестов. Основными же тестами являются, так называемые, глазковые диаграммы и тест на скорость возникновения ошибок. Для обоих тестов нужен источник случайных высокочастотных последовательностей цифрового сигнала (PRBS – Pseudo Random Bit Sequence Generator), для глазковой диаграммы – быстрый осциллограф (возможно стробоскопический), а для тестов на скорость возникновения ошибок – специальный анализатор скорости возникновения ошибок (BERT – Bit Error Rate Tester). Все три этих прибора достаточно специфичны как в смысле доступности, так и в смысле компетенций работы с ними. В принципе, подобного рода тесты (глазковые диаграммы и скорость возникновения ошибок) должны делаться и с ФИС до корпусировки, потому что отбракованные ФИС корпусировать, разумеется, не нужно. Однако такого рода тесты требуют наличия в одном месте зондовой станции (установка, позволяющая работать с незакорпусированными чипами) и высокочастотного оборудования (векторный анализатор, быстрый осциллограф, PRBS и BERT). В настоящее время такого рода лаборатория мне, по крайней мере, неизвестна. После корпусирования необходимость в зондовой станции отпадает, но и просто наличие в одной лаборатории быстрого осциллографа, PRBS и BERT достаточно нетипично. Я думаю, что отсутствие как последних двух приборов, так и опыта работы с ними является следствием недопонимания того факта,

что любые работы с цифровой информацией требуют именно такого рода приборов и тестов.

Таким образом, необходимо оснащение лабораторий, которые работают с ФИС, достаточно специфическим оборудованием.

При этом необходимо опять-таки разделять набор тестового оборудования для опытного производства и для дизайн-центров. Дело в том, что фабрика создает ФИС по дизайну, полученному из дизайн-центра. Задачей фабрики является создать ФИС, а не обеспечить его функциональные параметры. Например, задачей фабрики является создать световод размерами 250 на 300 нанометров и длиной 500 микрометров, при этом фабрика гарантирует именно эти размеры, а не то, как по этому световоду будет распространяться свет. То есть фабрика должна проверять соответствие размеров и материалов (структурные параметры), а не то, как, собственно, функционирует данная ФИС (функциональные параметры). Проверка последних есть задача именно дизайн-центра, который и закладывал тот или иной функционал в дизайн ФИС. Проверка функциональные параметры, дизайн центр может вносить в конструкцию изменения для улучшения функционала, реализовывая таким образом обратную связь. Тестирование функциональных параметров в рамках производства (даже опытного) имеет смысл только в случае наличия своего дизайн-центра. Если же принимать во внимание структуру экосистемы ФИС, то на весьма ограниченное количество фабрик приходится большое число дизайн-центров, для которых покупка собственного парка высокочастотного оборудования является в большинстве случаев неподъемной задачей. Поэтому оптимальной структурой было бы создание помимо дизайн-центров еще и тестовых установок общего пользования. Для этого нужны компетентные техники – операторы такого рода оборудования, подготовка которых также требует отдельного внимания.

АВТОР

Наумов Аркадий Валерьевич, e-mail: naumov_arkadii@mail.ru;
руководитель направления, Акционерное общество «Опτικο-механическое конструкторское бюро «Астрон» (АО «ОКБ «Астрон»),
<https://astrohn.ru>, г. Лыткарино, Московская обл., Россия.
ORCID: 0000-0001-6081-8304

ABOUT AUTHOR

Naumov Andrey V., Head of the Research Area, Joint Stock Company "Optical and Mechanical Design Bureau Astrohn", Lytkarino, Moscow region, Russia.
ORCID: 0000-0001-6081-8304