

ФОТОНИКА. НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

*Силаков К.И., студент; Силакова Т.Т., к.ф.-м.н, доцент
Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт” г. Киев, Украина*

Фотоника как область науки началась в 1960 году с изобретением лазера, а также с изобретения лазерного диода в 1970-х годах с последующим развитием волоконно-оптических систем связи как средств передачи информации, использующих световые методы. Эти изобретения сформировали базис для революции телекоммуникаций в конце XX-го века, и послужили подспорьем для развития сети Интернет.

Исторически, начало употребления в научном сообществе термина «фотоника» связано с выходом в свет в 1967 книги академика А. Н. Теренина «Фотоника молекул красителей», где фотоника определена как «совокупность взаимосвязанных фотофизических и фотохимических процессов». В мировой науке получило распространение более позднее и более широкое определение фотоники, как раздела науки, изучающего системы, в которых носителями информации являются фотоны. В этом смысле термин «фотоника» впервые прозвучал на 9-ом Международном конгрессе по скоростной фотографии (Denver, USA, 1970). Термин «Фотоника» начал широко употребляться в 1980-х в связи с началом широкого использования волоконно-оптической передачи электронных данных телекоммуникационными сетевыми провайдерами (хотя в узком употреблении оптическое волокно использовалось и ранее).

Приблизительно до 2001 года, фотоника как область науки была в значительной степени сконцентрирована на телекоммуникациях. С 2001 года термин «Фотоника» также охватывает огромную область наук и технологий, в том числе:

- лазерное производство,
- биологические и химические исследования,
- медицинская диагностика и терапия,
- технология показа и проекции,
- оптическое вычисление.

Перспективность, широкое распространение методов и средств фотоники, делает целесообразным ознакомление с этим направлением науки и техники специалистов различных отраслей знаний и, прежде всего радиоэлектроники, как основы создания соответствующих устройств и систем.

Лазер с накачкой ультракороткими импульсами электрического поля

Под действием ультракоротких импульсов высокого напряжения в полупроводниках наблюдается эффект генерации лазерного излучения [1,2]. Применение пикосекундных импульсов позволяет значительно увеличить напряженность и скорость нарастания электрического поля, и создать условия для усиления и генерации лазерного излучения. Лазер состоит из генератора с внутренним сопротивлением 75 Ом, формирующего импульсы длительностью 100-500 пкс, амплитудой 50-100 кВ и лазерной головки с полупроводниковым образцом. Устройство лазерной головки дано на рис. 1.

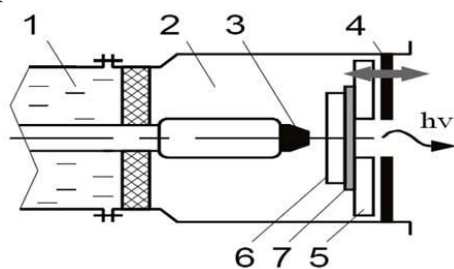


Рис. 1

Для достижения минимальных искажений формы импульса, лазерная головка 2 выполнена в виде отрезка 1 коаксиальной линии с волновым сопротивлением R , согласованным с передающей линией 1. Электрод 3 выполнен в виде усеченного конуса. Расстояние от вершины конуса 3 до полупроводниковой пластины 6

выбирается из условия: $L < V_p * t_f$, где L - расстояние между вершиной конуса и плоскостью полупроводниковой пластины 6, V_p - скорость замыкания промежутка между электродом 3 и полупроводниковой пластиной 6, t_f - длительность фронта импульса. Обычно $L < 1$ см. Лазерная мишень (ЛМ) состоит из плоскопараллельной полупроводниковой пластины 6, изготовленной из прямозонного полупроводникового соединения ZnSe и подложки из диэлектрического материала 5, с высокой электрической прочностью. На подложке, с целью концентрации электрического поля, сделано отверстие. Полупроводниковая пластина 6 соединяется с подложкой 5 через тонкую диэлектрическую прослойку 7 с диэлектрической постоянной, близкой или равной диэлектрической постоянной подложки. Прослойка 7 необходима для исключения воздушного зазора и закрепления полупроводниковой пластины на подложке. Второй подвижной заземленный электрод 4 расположен за ЛМ. На электроде 4 имеется отверстие, которое соосно отверстию на диэлектрической подложке. Зазор между электродом 4 и подложкой 5 можно менять, При увеличении зазора величина емкости C и напряженность электрического поля в полупроводниковой пластине уменьшаются, что приводит к уменьшению мощности излучения. Для уменьшения порога начала генерации и увеличения эффективности излучения на плоскости полупроводниковой пластины наносятся отражающие диэлектрические покрытия.

Волоконные лазеры в системах воспроизведения информации

В современных системах воспроизведения информации лазерная тех-

ника занимает преобладающее значение. Исторически первыми комплексами воспроизведения информации на базе лазерной техники были достаточно сложные наземные средства регистрации информации, поступающей с борта космических аппаратов (см. рис.2).

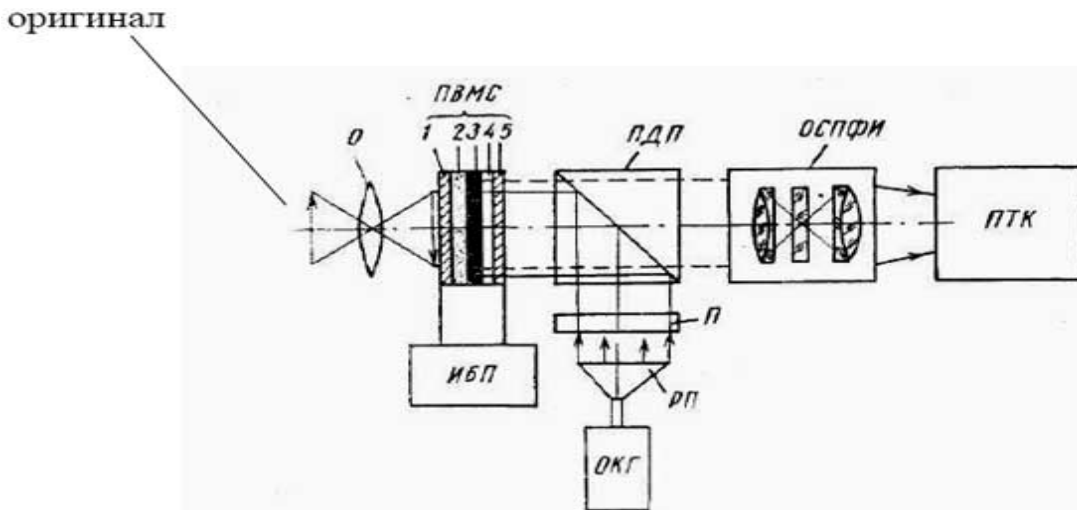


Рис. 2. Принципиальная схема блока воспроизведения информации с малоконтрастного оригинала при реализации «лазерного усиления» и пространственной фильтрации сигнала [1]:

О - высокоразрешающая оптическая система переноса изображения малоконтрастного оригинала; ПВМС – пространственно-временной модулятор света (1, 5 – прозрачные электроды; 2 – фотопроводник; 3 – диэлектрическое зеркало; 4 – электрооптический кристалл); ИБП – импульсный блок питания; ПДП – поляризационный делитель пучка; П – поляризатор; РП – расширитель лазерного пучка; ОКГ – оптический квантовый генератор; ОСПФИ – оптическая система пространственной фильтрации изображения; ПТК - прибор технического контроля в блоке «носителя информации»

Информация поступала с телевизионно-космической аппаратуры наблюдения различных космических объектов (Луны, земной поверхности и др.). Данный вид технических средств (вариант такой космической аппаратуры был использован в бортовой фототелевизионной аппаратуре «Луна-3», разработанной во ВНИИ Телевидения и успешно сфотографировавшей обратную сторону Луны) в настоящее время выделился в отдельный класс прецизионных приборов.

Следует отметить, что в гражданской аппаратуре наиболее близкие к этому типу лазерные комплексы воспроизведения информации нашли широкое применение в полиграфии, и, в частности, в допечатном оборудовании. Необходимо подчеркнуть, что теория работы этих лазерных комплексов достаточно сложна и в силу ее специфики слабо освещена в технической литературе [3].

Возрастающие требования по увеличению разрешающей способности, а также требования по увеличению формата воспроизводимой информации явились основанием для создания современной универсальной аппаратуры – лазерной аппаратуры воспроизведения информации третьего поколения.

Разработка такой аппаратуры стала возможной только с появлением соответствующей лазерной техники (лазеров, малогабаритных лазерных диодов, лавинных фотодиодов), новых оптико-электронных блоков управления потоком излучения (акустооптических модуляторов, акустооптических дефлекторов, микромеханических зеркальных устройств и др.) и прецизионных широкоугольных высокоразрешающих оптических систем.

Выполнимость требования увеличения разрешающей способности в современных комплексах воспроизведения информации зависит от характеристик используемых лазеров и проекционных оптических систем. Использование перспективных лазерных диодов в блоке излучателя комплексов в настоящее время не может решить данную проблему, поскольку излучение этих диодов характеризуется большой угловой расходимостью лазерного пучка и, что очень важно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Использование специальной достаточно сложной (цилиндрической) оптики для устранения вышеуказанной расходимости лазерного пучка в лазерных диодах не только усложняет и удорожает аппаратуру, но и приводит также к абберационному искажению в блоках воспроизведения информации конечного изображения.

Появление нового типа лазеров - современных волоконных лазеров позволяет рассчитывать на возможность создания аппаратуры воспроизведения информации повышенного качества. В частности, для этих целей могут быть использованы как непрерывные волоконные лазеры, работающие в спектральном диапазоне 0,9–2 мкм, так и лазеры с перенастраиваемыми параметрами, эффективно работающие в широком диапазоне спектра излучения: от ультрафиолета (УФ) до инфракрасной (ИК) области спектра.

Принцип возможного использования волоконных лазеров в различной аппаратуре воспроизведения информации представлен в виде схемы на рис. 3. В этой схеме используется волоконный лазер непрерывного действия средней мощности с полупроводниковой накачкой.

Основным достоинством волоконных лазеров такого типа является чрезвычайно малая величина диаметра волокна (6-8 мкм), в котором возникает лазерное излучение. В результате на выходе волоконного лазера формируется идеальный одномодовый лазерный пучок с равномерным распределением мощности. Именно это свойство позволяет сфокусировать пучок лазерного излучения в пятно малого размера со значительным увеличением глубины резкости, что чрезвычайно важно для лазерных многолучевых систем записи воспроизводимой информации. Более того, характер поляризации лазерного пучка позволяет реализовывать надежное управление излучением с помощью акустооптических блоков наиболее известного типа.

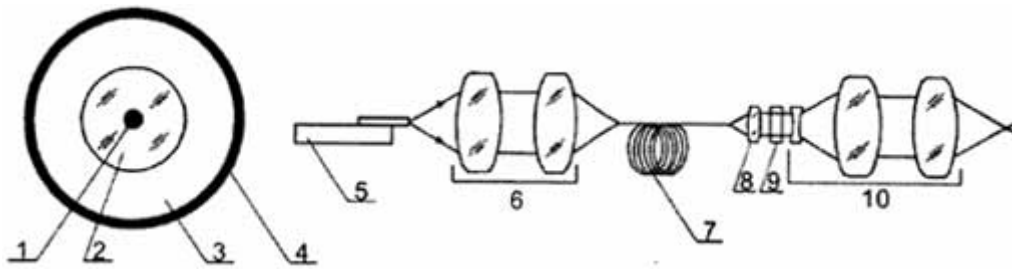


Рис. 3. Принципиальная схема блока воспроизведения информации на базе современных волоконных лазеров с полупроводниковой накачкой:

1 – сердцевина, легированная металлом (диаметр 6-8 мкм); 2 – кварцевое волокно; 3 – полимерная оболочка; 4 – внешнее защитное покрытие; 5 – лазерные диоды оптической накачки; 6 – оптическая система переноса излучения накачки на сердцевину волокна; 7 – волокно; 8 – оптическая телескопическая система; 9 – акустооптический модулятор света; 10 – высокоразрешающая фокусирующая оптическая система

Следует также отметить, что в волоконных лазерах отсутствуют эффекты (свойственные обычным твердотельным лазерам) образования термолинз в кристалле, искажения волнового фронта, девиации луча со временем и другие дефекты. В целом, современные волоконные лазеры этого типа гарантируют высокие технические характеристики и являются идеальными преобразователями светового излучения в лазерное.

Влияние расширителей лазерных пучков на качество изображения фоторегистрирующих устройств

Создание в классе современных оптико-электронных систем достаточно прецизионной аппаратуры воспроизведения качественных изображений (передаваемых по космическим и иным каналам связи) на базе высокоэнергетической лазерной техники требует использования весьма специфичных оптических и оптико-электронных блоков: расширителей лазерного пучка, оптико-электронных и акустооптических модуляторов, акустооптических дефлекторов, высокоразрешающих оптических проекционных систем, специальных голографических узлов, высококачественных оптических систем переноса точечного изображения и др.

Следует отметить, что конечное качество получаемого изображения зависит от результатов тщательного регулирования параметров лазерного пучка (изменения параметров в соответствии с решаемой задачей) при прохождении всего тракта, начиная непосредственно от этапа выхода пучка из лазера до момента его фокусировки на соответствующий «носитель информации» (например, фотопленку). При этом, естественно, что на первом этапе лазерный пучок должен характеризоваться следующими предельно возможными параметрами: малой расходимостью, высокой параллельностью выходящих лучей оптической оси системы, наибольшей для необходимой длины волны и решаемой задачи мощностью, а также высокой монохроматичностью.

Наиболее важным из требуемых параметров (с точки зрения возможности получения высококачественного конечного изображения) является ве-

личина угла расходимости выходящего лазерного пучка, а также его параллельность оптической визирной оси системы аппаратного комплекса. Возможность реализации вышеуказанных требуемых параметров зависит от достаточно сложных оптических блоков – «расширителей лазерного пучка». Поскольку описание работы, методика расчета предельных характеристик этих специфических блоков, а также влияние их характеристик на выходные характеристики аппаратуры в целом слабо отражены в технической литературе, имеет смысл остановиться на данном вопросе более подробно. Учитывая, что высококачественные оптико – электронные системы воспроизведения изображения нашли в настоящее время весьма широкое применение как в телевизионной аппаратуре, так и в достаточно специфичном (подчас прецизионном) полиграфическом оборудовании, рассмотрим принципиальные схемы наиболее распространенных их вариантов реализации [4].

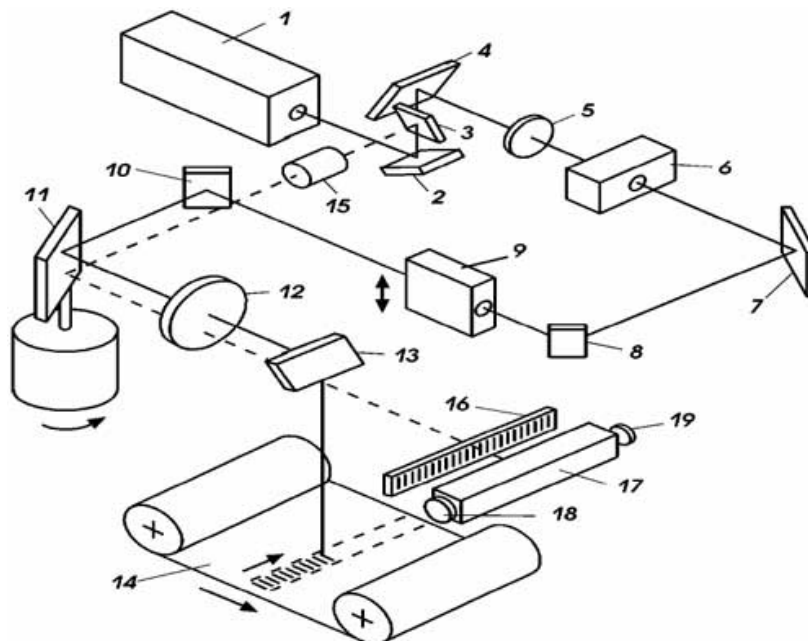


Рис. 4. Принципиальная схема оптической системы лазерной аппаратуры (фирма «Linotronik») с суперрастровой записью изображения на фотоносителе
 1 - лазер; 2, 3, 4, 7, 8, 11, 13 – зеркальные блоки; 5 – расширитель лазерного пучка; 6 – акусто-оптический модулятор; 9 – акусто-оптический дефлектор; 12 – выходная фокусирующая оптическая система; 14 – фотопленка; 15 – расширитель лазерного пучка; 16 – растровая линейка; 17 – кварцевый волновод; 18, 19 – фотоумножители

В современных оптикоэлектронных системах (например, в телевидении или в допечатном полиграфическом оборудовании (см. рис. 4, 5), расширители лазерного пучка обычно изменяют параметры пучка в зависимости от требуемой решаемой задачи. При этом в связи с появлением твердотельных аналогов лазеров – малогабаритных лазерных диодов, эти задачи существенно разнятся, поскольку в отличие от стандартных лазеров, последние характеризуются большим углом (измеряемым десятками градусов) расходимости. Более того, угол расходимости в горизонтальной и вертика-

льной плоскостях в современных лазерных диодах различен и отличается в 2,5–3 раза.

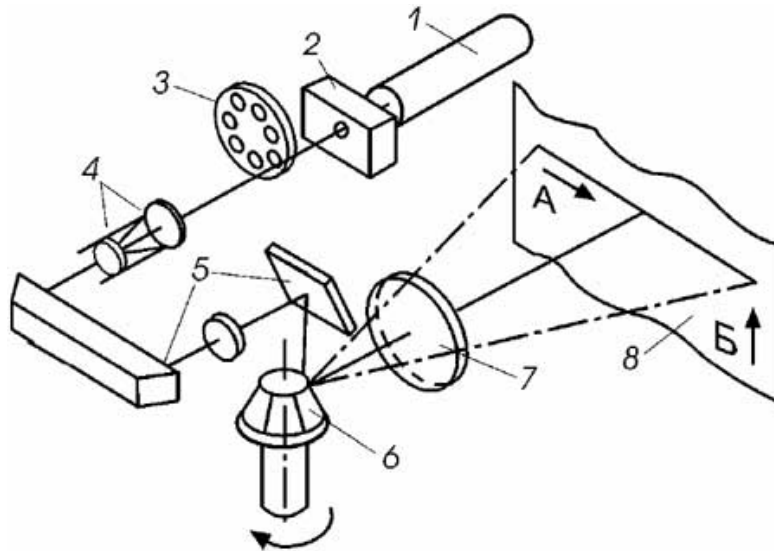


Рис. 5. Принципиальная схема оптической системы лазерной аппаратуры (фирма «Lasercorp») воспроизведения изображения с высокоточным вращающимся зеркальным барабаном

1 – лазер; 2 - акустооптический модулятор; 3 – турель со светофильтрами; 4 – зеркальный расширитель лазерного пучка; 5 – призмный блок; 6 – зеркальный барабан; 7 – выходная высокоразрешающая фокусирующая оптика; 8 – фотоматериал

Влияние параметров расширителя лазерного пучка на конечное качество изображения точки (которая проектируется выходной фокусирующей оптической системой на фотоноситель) можно определить из принципиальной оптической схемы (см. рис. 6), представляющей в упрощенном виде ход оптических лучей в любом из вышеуказанных типов аппаратуры.

Из рис. 6 следует, что угол расходимости $\Delta\alpha$ пучка из лазера определяет на выходе всей оптической системы размер пятна рассеяния $d_{кр}$ (размер диаметра «кружка рассеяния» фокусирующей оптической системы) и что чем меньше этот угол, тем меньше размер фокусируемой точки.

Как известно, в классической оптике наименьший размер кружка рассеяния может быть получен в случае работы «идеальной» оптической системы, у которой полностью отсутствуют все виды аберраций (искажений) и когда конечное качество на выходе системы определяется только дифракционными явлениями.

В большей части оптикоэлектронных систем воспроизведения изображений достаточно сложные оптические системы, работающие совместно с лазерами, возможно считать достаточно близкими по их характеристикам к «идеальным». Это утверждение правомочно, так как у них отсутствуют хроматические аберрации (хроматизм положения и хроматизм увеличения), поскольку они работают в монохроматическом режиме (на одной длине волны λ).

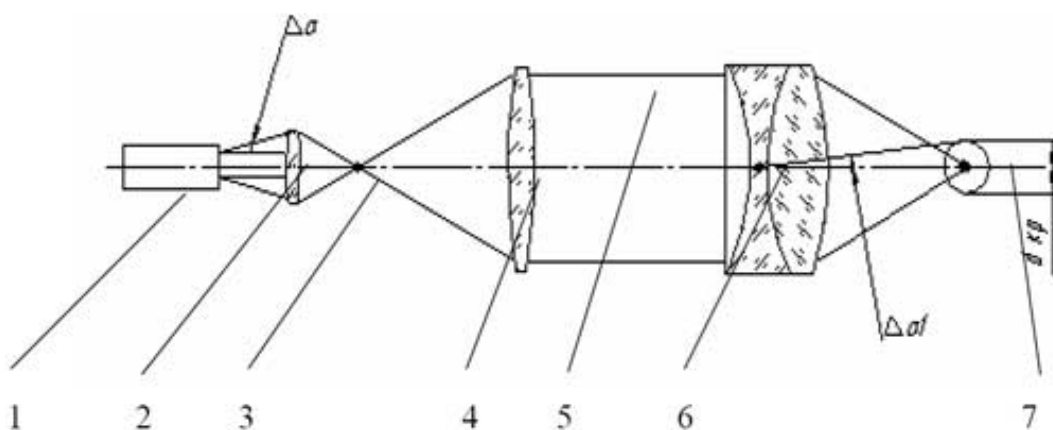


Рис. 6. Принципиальная схема оптических компонентов, определяющих конечный размер фокусируемой точки на фотоносителе лазерных машин

воспроизведения изображения:

1 - лазер; $\Delta\alpha$ – угол расходимости лазерного пучка; 2 – первый оптический компонент (объектив) расширителя; 3 – изображение точки после первого компонента; 4 - второй оптический компонент расширителя; 5 – расширенный параллельный лазерный пучок лучей; 6 – выходная фокусирующая высокоразрешающая оптическая система; 7 – кружок рассеяния ($d_{кр}$) оптической системы; $\Delta\alpha_1$ – значение величины предельно малого угла выхода луча, определяющего конечный размер $d_{кр}$. фокусируемой точки (размер диаметра «кружка рассеяния»)

Более того, возможно практически устранить и такие полевые aberrации как кому, дисторсию, астигматизм, поскольку большей частью эти системы работают в режиме «точка на оси». Оставшаяся aberrация широкого пучка – сферическая aberrация обычно устраняется применением нескольких компонентов в фокусирующей оптической системе, находящейся на выходе всего устройства. Таким образом, полагая, что в целом оптическая система практически по своим характеристикам близка к «идеальной», определим требования к параметрам расширителя лазерного пучка на основе дифракционных явлений в оптике.

Известно, что предельно малая величина диаметра дифракционного кружка рассеяния определяется формулой:

$$d_{кр} = 2,44 \lambda (F / D_{ф.с.}) \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения лазера; F – фокусное расстояние проекционной оптической системы; $D_{ф.с.}$ – диаметр входного зрачка выходной фокусирующей высокоразрешающей оптической системы.

Как следует из рис. 3, отношение $d_{кр} / 2F$ определяет угол выхода луча, т. е.:

$$d_{кр} / 2F = \Delta\alpha_1 \quad (2)$$

где $\Delta\alpha_1$ – предельно малый угол на выходе системы, определяющий размер диаметра дифракционного («идеального») кружка рассеяния оптической системы.

Естественно, что в случае, если после второго компонента расширителя лазерного пучка (рис. 6) угол падения луча на выходную фокусирующую

систему 6 будет меньше или равен $\Delta\alpha_1$ (то есть, если лазерный пучок 5 будет достаточно строго параллелен оптической оси), то дифракционное качество всей оптической системой будет реализовано и сфокусированное пятно будет наименьшим. Следовательно, обеспечение дифракционного качества при работе рассматриваемой оптической системы аппаратуры в данном случае зависит только от основных параметров и аберрационных характеристик расширителя лазерного пучка.

Основные геометрические параметры расширителя можно определить из следующих предпосылок. Поскольку расширители лазерного пучка являются с точки зрения теории классической оптики «телескопическими системами» и обычно состоят из двух объективов (каждый из которых характеризуется своим фокусным расстоянием F_1 и F_2), то угол входа лазерного пучка $\Delta\alpha$ на первый компонент расширителя связан с углом выхода ψ из второго компонента формулой:

$$\psi = \Gamma \Delta\alpha = (F_2 / F_1) \Delta\alpha \quad (3)$$

где Γ – коэффициент изменения геометрических размеров (в данном случае уменьшение) телескопической системы.

Как было указано выше для получения дифракционного качества всей оптической системы необходимо, чтобы угол выхода лазерного пучка ψ из второго компонента должен быть равен $\Delta\alpha_1$, то есть:

$$\Delta\alpha_1 = \psi = (F_2 / F_1) \Delta\alpha \quad (4)$$

Подставляя в выражение (4) равенства (1) и (2), получаем:

$$(F_2 / F_1) = 1,22 \lambda / (\Delta\alpha D_{ф.с.}). \quad (5)$$

Таким образом, в случае необходимости получения на выходе всей системы минимального кружка рассеяния дифракционного качества выбор основных параметров расширителя лазерного пучка (фокусных расстояний первого F_1 и второго F_2 компонентов) следует определять исходя из известного угла расходимости $\Delta\alpha$ пучка лазера и из известного размера диаметра зрачка $D_{ф.с.}$ фокусирующей оптической системы. Необходимо заметить, что для получения кружка рассеяния дифракционного качества, у компонентов лазерного расширителя должны быть исправлены все виды аберраций, кроме полевых аберраций. При этом особое внимание должно быть обращено на устранение сферической аберрации. Более того, как следует из формулы (5), с целью уменьшения кружка рассеяния при работе данной аппаратуры желателен переход в более коротковолновую область спектра.

Полупроводниковая фотоника

Полупроводниковая фотоника (ПФ) — одно из исследовательских направлений корпорации Intel [5,6,7]. Задача ПФ — поиск путей использования полупроводниковых компонентов и стандартных полупроводниковых технологий для создания оптических устройств. Идея состоит в том, чтобы создавать оптические конструктивные блоки, выполняющие активные фу-

нкции, а не просто пассивные волноводы. Такие крошечные полупроводниковые конструктивные блоки можно будет устанавливать в оптические модули, снижая их стоимость и габариты.

В центре этих исследований лежит принципиально новый подход, позволяющий управлять оптическими сигналами в динамическом режиме без использования движущихся частей. Среди устройств, являющихся целью исследований — оптические фильтры, быстродействующие (10 нс) коммутаторы и сверхскоростные (свыше 1 ГГц) оптические модуляторы. На сегодняшний день в рамках исследования удалось создать целый ряд функциональных оптических устройств исключительно на полупроводниковой основе. Так, перестраиваемый оптический фильтр уже был продемонстрирован корпорацией в феврале 2002 года. Он изготовлен на обычном заводе по производству полупроводниковых компонентов. Этот фильтр шириной в несколько микрон и длиной в пару миллиметров позволяет разделять по длинам волн сигналы в спектре DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing — плотное мультиплексирование по длине волны).

Технология DWDM позволяет поднять пропускную способность оптоволоконного кабеля, передавая по одному оптоволокну множество длин волн. Сегодня удаётся передавать на дальние расстояния несколько каналов по 10 Гбит/с каждый. В ходе эволюции оптической технологии скорость передачи данных будет возрастать до 40 Гбит/с и более. Сочетание более высокоскоростных каналов передачи и возможностей технологии DWDM позволит телекоммуникационным компаниям передавать по одному оптоволокну триллион бит в секунду — величина, превосходящая весь трафик Интернет сегодняшнего дня.

Кремнивая фотоника

IBM 03.11.05 объявила, что ее исследователи создали миниатюрное устройство, которое представляет собой значительный шаг к будущему переходу электронных устройств с электрических сигналов на оптические. Такой переход может значительно повысить возможности компьютеров и других электронных систем.

В статье [8], опубликованной в журнале «Nature», сообщается, что ученые IBM сумели замедлить свет до скорости менее 1/300 обычной, направив его по специально сконструированному каналу из перфорированного кремния (т.н. "кристаллический фотонный волновод"). Более того, уникальная конструкция этого устройства позволяет менять скорость света в широких пределах, просто прикладывая к волноводу электрическое напряжение.

Ученые давно научились замедлять движение света в специальных лабораторных условиях, но активное управление скоростью света на кристалле кремния, изготовленном с использованием стандартных микро- и нанoeлектронных технологий, удалось реализовать впервые. Благодаря

миниатюрным размерам нового устройства, применению стандартных полупроводниковых материалов и возможности более полно управлять характеристиками "медленного света" новая технология может найти применение в разработке сверхкомпактных оптических телекоммуникационных компонентов, которые можно будет применять в компьютерных системах.

"Эта работа - еще один пример нашего постоянного внимания к фундаментальным научным исследованиям, - отметил доктор Т.С. Чен (T.C. Chen), вице-президент подразделения IBM Research по науке и технологиям. - Мы постоянно исследуем новые технологии, которые могут расширить возможности наших компьютерных систем и устройств хранения данных. Мы убеждены, что эти исследования приносят реальную пользу и нашим заказчикам, которые применяют эту продукцию в своем бизнесе, и их клиентам, которые, в конечном счете, получают новые возможности и более высокий уровень услуг"[9,10].

Продолжающийся рост производительности микроэлектронных компонентов не всегда в полной мере реализуется на уровне систем в целом. Как транспортные пробки могут стать помехой для экономики, ограничивая движение товаров и сырья в переполненном городе, так и невозможность быстро передавать информацию внутри электронных систем сегодня является одним из основных "узких мест" при их проектировании. Представленная недавно работа исследователей IBM может помочь преодолеть эти ограничения.

Ученые искали практичные способы использования света для ускорения обмена информацией между компонентами компьютера. Однако чтобы практическое применение таких оптических компонентов было возможно, они должны обеспечивать безупречное управление световыми сигналами и при этом иметь очень малые размеры и низкую себестоимость производства. Работа ученых IBM позволяет соединить несколько частей этой головоломки.

Группе IBM удалось создать кремниевый фотонный волновод - тонкий брусок кремния с регулярно расположенными отверстиями, рассеивающими свет. Расположение и размеры отверстий придают материалу чрезвычайно высокий коэффициент преломления, а чем больше коэффициент преломления, тем медленнее распространяется свет. Локально нагревая волновод небольшим электрическим током, можно менять коэффициент преломления, что позволяет быстро регулировать скорость света в широком диапазоне с очень малыми затратами электрической энергии.

Активная область созданного в IBM устройства имеет микроскопически малые размеры, что означает возможность создавать сложные оптические схемы, не сильно превышающие по размерам обычные полупроводниковые. Производственные процессы, которые использовались для изготовления устройства, имеются практически на любом полупроводниковом за-

воде. Возможности, продемонстрированные в [8,9,10], могут быть использованы для создания разнообразных нанофотонных компонентов - оптических линий задержки, оптических буферов и даже оптических запоминающих устройств. Все эти компоненты могут найти применение при построении компьютерных систем, связанных между собой мощными оптическими сетями передачи данных.

Минувший год был успешным для развития многих технологий Intel, в том числе и в области кремниевой фотоники. Последние прорывные достижения Intel в этой сфере журнал MIT Technology Review сравнил с тройным выигрышем на скачках – так обозреватели ведущего издания оценили серию официальных анонсов корпорации. Как сообщил Джастин Раттнер (Justin Rattner), главный специалист по технологиям и глава Corporate Technology Group корпорации Intel: «Мы опытным путем продемонстрировали, что производственные технологии, совместимые с технологией разработки кремниевых CMOS-элементов, позволяют создавать полупроводниковые оптические устройства. Доказательство этого факта стало огромным достижением, однако для дальнейшего развития данного технологического направления необходимы не менее значимые шаги. Теперь нам нужно научиться интегрировать устройства кремниевой фотоники в стандартные компоненты компьютеров; пока еще мы не умеем делать этого. Но в то же время мы продолжаем активно работать вместе с подразделениями, занимающимися разработкой различных видов продукции, чтобы предложить производителям модели использования полупроводниковой фотоники в решениях Intel».

Кремниевая фотоника как средство устранения узких мест на пути к эре тера-вычислений

Кремниевая фотоника – важнейшая составная часть долгосрочной стратегии развития Corporate Technology Group, направленной на ускорение перехода к тера-вычислениям. Дело в том, что по мере развития многоядерных процессоров, обладающих огромной вычислительной мощностью, перед инженерами возникают новые проблемы. Например, потребность в скорости обмена данными между памятью и процессором скоро превысит физические ограничения, накладываемые медными проводниками, а скорость передачи электрических сигналов станет меньше, чем быстродействие процессора. Уже сейчас производительность мощных вычислительных систем, зачастую, ограничивается скоростью обмена данными между процессором и памятью. Сегодняшние технологии передачи данных рассчитаны на гораздо меньшую пропускную способность по сравнению с фотоникой, а с увеличением расстояния, на которое передаются данные, скорость передачи становится еще меньше.

«Необходимо привести скорость передачи данных между компонентами вычислительной платформы в соответствие с быстродействием процес-

соров. Это действительно очень важная задача. Мы видим кремниевую фотонику в качестве решения этой проблемы, и потому проводим в жизнь исследовательскую программу, которая позволяет нам занимать передовые позиции в этой области», — заявил заслуженный инженер-исследователь корпорации Intel Кевин Кан (Kevin Kahn) [11].

Испытания опытного образца оптического модуля памяти показали, что для доступа к памяти сервера может использоваться не электричество, а свет. Группа под руководством ведущего исследователя Intel в области оптики Дрю Элдуино (Drew Alduino) занимается созданием системы оптической связи между процессором и памятью для платформ Intel. Уже создана тестовая платформа на базе полностью буферизованной памяти FB-DIMM, на которой загружается и запускается Microsoft Windows. Действующий опытный образец является доказательством возможности подключения памяти к процессору с помощью оптических линий связи без ущерба для производительности системы.

Создание коммерческой версии подобного решения несет огромные преимущества для пользователей. Оптические системы связи позволят устранить узкое место, связанное с разницей в пропускной способности памяти и скоростью процессора, и повысить общую производительность вычислительной платформы [11,12].

От исследований – к реализации

В лаборатории Photonics Technology Lab (PTL), которой руководит заслуженный инженер-исследователь корпорации Intel Марио Паниччиа (Mario Paniccia), было доказано, что все компоненты для оптических коммуникаций – лазер, модулятор и демодулятор – можно изготавливать из полупроводников на базе имеющихся производственных технологий. В PTL уже были продемонстрированы важнейшие компоненты кремниевой фотоники, работающие с рекордной производительностью, включая модуляторы и демодуляторы, обеспечивающие скорость передачи данных до 40 Гбит/с.

Для реализации технологии полупроводниковой фотоники необходимы шесть основных компонентов:

- лазер, испускающий фотоны;
- модулятор для преобразования потока фотонов в поток информации для передачи между элементами вычислительной платформы;
- волноводы, играющие роль «линий передачи» для доставки фотонов к местам назначения, и мультиплексоры для объединения или разделения световых сигналов;
- корпус, особенно необходимый для создания сборочных технологий и недорогих решений, которые можно будет использовать при массовом производстве ПК;

- демодулятор для приема потоков фотонов, несущих информацию, и их обратного преобразования в поток электронов, доступный для обработки компьютером;

- электронные схемы для управления этими компонентами.

Вопрос реализации всех этих компонентов оптической связи на базе полупроводниковых технологий повсеместно признан важнейшей исследовательской проблемой, решение которой приведет к огромному техническому прорыву. Лаборатория PTL уже установила ряд мировых рекордов, разработав высокопроизводительные устройства, модуляторы, усилители и демодуляторы, обеспечивающие скорость передачи данных до 40 Гбит/с. В течение следующих пяти лет корпорация Intel будет искать пути для интеграции этих компонентов в реальную продукцию.

В области полупроводниковой фотоники Intel уже вышла на финишную прямую. Исследования в области интеграции оптических элементов уже перешли от стадии научных или технологических разработок к этапу создания коммерческой продукции. Исследовательская группа теперь занимается определением возможностей и спецификаций для проектирования новаторской продукции на базе этой революционной технологии. В конечном счете специалисты Intel создают опытные образцы и тесно сотрудничают с подразделениями, занимающимися разработкой различных видов продукции, чтобы ускорить внедрение новой технологии.

Кроме собственной деятельности, корпорация Intel финансирует некоторые наиболее перспективные исследования в этом направлении вне STG - в частности, сотрудничает с Калифорнийским университетом в Санта-Барбаре, который занимается разработкой гибридного полупроводникового лазера. В лаборатории PTL также проходят стажировку талантливые выпускники различных университетов из других стран.

Ведущий исследователь Intel в области оптики Ричард Джонс (Richard Jones) считает: «На текущую перспективу перед нами стоят две важнейшие задачи по реализации проекта гибридного полупроводникового лазера. Во-первых, мы должны перенести опытное производство гибридных лазеров из Калифорнийского университета на завод Intel. Во-вторых, нам предстоит объединить гибридный лазер, высокоскоростной полупроводниковый модулятор и мультиплексор, чтобы доказать, что мы можем создать единый оптический передатчик на базе производственной технологии, совместимой с CMOS».

Внедрение технологий кремниевой фотоники будет включать разработку новых производственных процессов для изготовления лазеров в крупносерийных масштабах. Успехи корпорации Intel в области фотоники позволят ей существенно опередить потенциальных конкурентов. Лаборатория PTL уже зарегистрировала около 150 патентов. Самые престижные издания, такие как «Nature», отметили небывалые достижения специалистов

Intel. Кроме того, в 2007 году корпорация Intel была удостоена награды EE Times ACE Award за самую перспективную новую технологию.

В погоне за фотонами

В отличие от имеющихся прочно устоявшихся и отработанных десятилетиями процессов производства транзисторов, технология создания элементов для полупроводниковой фотоники является полностью новой. На пути ее внедрения стоят определенные проблемы: оптимизация устройств, повышение надежности конструкции, отработка методологии испытаний, обеспечение энергоэффективности, разработка сверхминиатюрных устройств[13,14]..

Чтобы новые компоненты можно было использовать на практике, специалисты RTL должны убедиться в том, что оптические компоненты удовлетворяют исключительно высоким критериям надежности, принятым в производстве вычислительной техники. В оптической промышленности строгие стандарты надежности разрабатывались десятилетиями. В соответствии с ними перед началом серийного выпуска новой продукции требуются месяцы испытаний. Если в процессе этих длительных испытаний будут выявлены проблемы, их исправление и повторное тестирование могут значительно задержать выход продукции на рынок.

Одной из важнейших проблем является оптимизация, ведь лаборатория RTL разрабатывает оптические устройства для массовой вычислительной техники. Пока нет другой подобной продукции, стандартов и других точек отсчета, инженеры, разрабатывающие новый технологический процесс, сами ищут решения, наилучшим образом удовлетворяющие потребности компьютерных применений.

В настоящее время группа исследователей лаборатории RTL, относительно небольшая по меркам фотоэлектроники, постепенно переключается на коммерциализацию решений полупроводниковой фотоники и рассчитывает, что массовое внедрение этой невероятной технологии может начаться уже в 2011 году.

Группа специалистов по оптике из подразделения Digital Enterprise Group (DEG) под руководством Виктора Крутала (Victor Krutul) занимается разработкой приложений, которые обеспечат базу для становления новой технологии. «Мы верим, что благодаря освоению оптических коммуникаций продукция Intel и дальше будет соответствовать закону Мура», — говорит Крутал.

Когда для переноса информации между компонентами одной вычислительной платформы и между разными системами будут использоваться не электроны, а фотоны, свершится очередная компьютерная революция. Ведущие производители электронной техники во всем мире уже подключились к этой гонке, стремясь получить конкурентные преимущества. Значимость новой технологии можно сравнить с изобретением интегральных схем. Специалисты корпорации Intel лидируют в этих исследованиях и в

разработке компонентов на базе полупроводниковой фотоники.

28 февраля 2008 года исследователи IBM представили прототип технологии, которая позволит создавать коммуникационные каналы с высокой пропускной способностью и низким энергопотреблением для всех разновидностей компьютеризированных систем – от суперкомпьютеров до сотовых телефонов. Эта технология сможет коренным образом изменить возможности и условия доступа, использования и обмена информацией между людьми.

Новая технология, которая использует для передачи информации свет вместо проводов, способна обеспечивать, к примеру, обмен данными на скоростях 8 триллионов бит (или 8 терабит) в секунду – что эквивалентно передаче приблизительно 5000 видеопотоков высокой четкости – потребляя при этом количество электроэнергии не более чем расходует одна 100-ваттная лампочка.

Такой вид коммуникаций высокой пропускной способности существенно повышает энергетическую эффективность центров обработки данных и ускоряет обмен и совместное использование больших массивов данных – независимо от того, обрабатывают ли ученые полученную в процессе исследований информацию для создания новых лекарств или прогнозирования погоды, обмениваются ли люди кинофильмами высокой четкости со своими друзьями, посылают ли врачи медицинские снимки высокого разрешения своим коллегам для оперативного уточнения диагноза в присутствии пациента или передается в потоковом режиме видеoinформация для просмотра на экране мобильного телефона.

Новая оптическая сетевая технология, которая великолепно согласуется с экологическими инициативами в области высокопроизводительных вычислений, способна обеспечивать экономию большого количества электроэнергии, потребляемой суперкомпьютерами. Так, на 100-метровом участке сети канал передачи данных на базе новой оптической технологии будет расходовать в 100 раз меньше энергии, чем современные электрические кабельные соединения, и обеспечивать в 10 раз большую экономию электроэнергии, чем коммерчески доступные сегодня оптические модули.

Прототип такой «энергетически эффективной» линии связи разработан в целях удовлетворения растущих требований к пропускной способности коммуникационных каналов для высокопроизводительных вычислительных систем с быстродействием уровня петафлопс и эксафлопс (квадриллион и квинтильон операций с плавающей точкой в секунду соответственно). Благодаря новой технологии оптические чипы и оптические коммуникационные шины не будут теперь считаться традиционными «узкими местами» на пути данных и ограничивать общее быстродействие системы.

«В прошлом году мы создали набор микросхем для оптического трансивера, который мог передавать по сети фильм высокой четкости менее чем за секунду благодаря использованию специализированных оптических

компонентов и новейших технологических процессов, — говорит Клинт Шоу (Clint Schow), исследователь IBM Research, член команды, разработавшей прототип новой технологии. — Прошел всего год, и мы уже можем соединять между собой эти высокоскоростные чипы на печатных платах посредством каналов обмена данными на основе интегрированных оптических проводников высокой плотности размещения. Сегодня мы создали самый быстродействующий в мире трансивер и перевели оптические компоненты из категории уникальных узкоспециализированных устройств в категорию стандартных комплектующих, поставляемых массовыми производителями, сделав важный шаг к коммерциализации технологии» [9].

Новая оптическая сетевая технология может применяться в самых разнообразных компьютеризированных устройствах — от сотовых телефонов до суперкомпьютеров — и разных экономических отраслях — от потребительской электроники до здравоохранения. Вот лишь несколько областей практического применения этой технологии:

Видеоконтент высокой четкости — видео высокой четкости (high-definition, HD) становится все более распространенным, и новая оптическая сетевая технология позволит быстро обмениваться HD-фильмами по сети и повсеместно пользоваться услугами «видео по запросу» (video on-demand) благодаря значительному увеличению пропускной способности видеосерверов. Web-сайты, предлагающие видеоконтент, смогут использовать новую технологию для практически мгновенного доступа к базам данных с миллионами фильмов и видеоклипов высокой четкости, ускоряя обслуживание по запросам пользователей. Оснащение ноутбуков, mp3-проигрывателей, HD-видеопроекторов и карманных компьютеров портм для передачи оптических данных позволит записывать и воспроизводить HD-видеоконтент на внешних экранах с высоким разрешением.

Медицинские исследования и лечение больных — врачи и ученые смогут посылать по сети медицинские изображения высокого разрешения — подобно цифровым снимкам, полученным методом магнитно-резонансной томографии (MRI) или компьютерной томографии сердца (heart scan), которые представляют собой файлы большого размера — для анализа в реальном времени и трехмерной визуализации.

Потребительская электроника — различные варианты технологии оптических межсоединений могут найти применение в широком спектре потребительских товаров. Так, например, один чип сотового телефона может быть установлен на базовой плате, где смонтированы его основные электронные компоненты, а другой чип может быть установлен непосредственно у дисплея телефона, что позволит мгновенно выводить на экран изображения, загруженные в телефон в виде больших файлов, и даже воспроизводить на экране видеопотоки высокой четкости в реальном времени. Одно из преимуществ здесь, в частности, состоит в том, что новая технология позволяет упростить конструкцию мобильных «телефонов-слайдеров» (у

которых корпус дисплея перемещается относительно корпуса телефона), поскольку передача данных между экраном и основным электронным блоком осуществляется по световому каналу, а не по проводам.

Межсоединения с высокой пропускной способностью для суперкомпьютеров — высокая пропускная способность внутренних каналов обмена данными чрезвычайно важна для суперкомпьютеров с массовым параллелизмом, и применение здесь новой оптической технологии позволит, например, ускорить молекулярно-динамические расчеты, повысить точность прогнозирования погоды и моделирования изменений климата, глубже проникнуть в тайны субъядерной физики, в частности, квантовой хромодинамики.

Прототип новой технологии, анонсированный сегодня учеными IBM, представляет собой самую быстродействующую в мире и самую интегрированную оптическую шину данных, которая может быть использована для соединения в единую систему беспрецедентного количества высокопроизводительных компьютеров.

Литература

1. Месяц Г.А., Насибов А.С., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. Люминесценция и генерация лазерного излучения в монокристаллах селенида цинка и сульфида кадмия под действием субнаносекундных импульсов высокого напряжения. /ЖЭТФ 2008 т.133 №6, с.1162-1168.

2. Бережной К.А., Насибов А.С., Шапкин П.В., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. Излучение пластин селенида цинка при возбуждении импульсным электрическим полем. / Квантовая электроника 2008 т.38 №9, с.829-832.

3. Смирнов В.Д. Телевизионная аппаратура беспилотных летательных средств. /СПб., издательство «Петербургский институт Печати», 2007, 27с.

4. Смирнов В.Д. Оптико – электронные сканирующие системы в печатном и допечатном полиграфическом оборудовании. /СПб., издательство «Петербургский институт печати», 2004, 30 с.

5. Technology Roadmap for Nanoelectronics/European Comission 1ST programme Future and Emerging Technologies // Edit R.Compano. Second Edition, November 2000

6. Lukyanchikova N. Lorentzian Components in Low-Frequency Noise Spectra of SOI MOSFETS Proc. 16th Intern.Conf. Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations //Ed G. Bosman World Scientific.2001 London P. 127-132 .

7. Low Frequency Fluctuations and 1/f Noise in Scaled Down Silicon CMOS Devices//Proc. 13th Intem.Conf. Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations 29.5-3.6.1995 Palanga Lithuania //Ed V.Bareikis, R.Katilius//World Scientific 1995. London P. 404-409

8. Власов Ю.В., Мартин О'Бойл, Хендрик Хаманн и Шари Мак-Наб. «Активное управление медленным светом на полупроводниковом кристалле с кристаллическими фотонными волноводами». – Nature 2008 т.507, с.151-155.

9. Green W. M. J. , Fengnian Xia. «High-throughput silicon nanophotonic wavelength-insensitive switch for on-chip optical networks». IBM TJ Watson Research Center; Йорктаун Хейтс, штат Нью-Йорк, 2009, 45с

10. Intense Focused Ion Beams for Nanostructurisation / S Kalbitzer, Ch.Wilbertz, Th.Miller // Nanolithography: A Borderland between STM, EB, IB, and X-Ray Lithography Ed. M.Gentili, C.Giovanella, S.Selcy //Kluwer Acad.Publ. London P. 137-148

11. Intense Focused Ion Beams for Nanostructurisation / S Kalbitzer, Ch.Wilbertz,

-
- Th.Miller // Nanolithography: A Borderland between STM, EB, IB, and X-Ray Lithography
Ed. M.Gentili, C.Giovanella, S.Selcy //Kluwer Acad.Publ. London P. 137-148
12. Peercy P.S. The drive to miniaturization / Nature 2000. V.406. P. 1023-1026
13. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки . Пер. с англ, под ред А.Я.Шика
/УМ. Мир 1989 .240 С.
14. По Т. Pushing the Limits of Lithography / Nature 2000. V.406. N31. P. 156-160

Силаков К.И., Силакова Т.Т. Фотоніка. Сучасність та майбутнє. Представлено стислий огляд літератури в галузі фотоніки, котрий відображає нові технології створення надкомпактних оптичних телекомунікаційних компонентів, які для передавання інформації замість проводів використовують світловий потік. Це – напівпровідникова фотоніка – пошук шляхів використання напівпровідникових компонент та стандартних напівпровідникових технологій для створення оптичних пристроїв, кремнієва фотоніка – створення кремнієвого фотонного хвилеводу. Всі ці компоненти можуть знайти застосування для створення комп'ютерних систем, що пов'язані між собою потужними оптичними мережами передавання даних. Оптичні системи зв'язку дозволяють розв'язати задачу "вузького місця", пов'язаного з різницею пропускної здатності пам'яті та швидкістю процесору, підвищити загальну продуктивність обчислювальних платформ.

Ключові слова: фотоніка, технології супер комп'ютера, оптичні комунікації, швидкість комп'ютерних обчислень

Силаков К.И., Силакова Т.Т. Фотоника. Настоящее и будущее. Представлен краткий обзор литературы в области фотоники, который отражает новые технологии создания сверхкомпактных оптических телекоммуникационных компонентов, использующих для передачи информации свет вместо проводов. Это - полупроводниковая фотоника - поиск путей использования полупроводниковых компонентов и стандартных полупроводниковых технологий для создания оптических устройств, кремниевая фотоника - создание кремниевое фотонного волновода. Все эти компоненты могут найти применение при построении компьютерных систем, связанных между собой мощными оптическими сетями передачи данных. Оптические системы связи позволят устранить "узкое место", связанное с разницей в пропускной способности памяти и скоростью процессора, и повысит общую производительность вычислительной платформы.

Ключевые слова: фотоніка, технологии суперкомпьютера, оптические коммуникации, скорость компьютерных вычислений

Silakov K.I., Silakova T.T. Photonics. Present and future. Short review of the literature in the field of photonics, which reflects the new technology of ultra-compact optical communications components, the use of generators to transmission light instead of wires is represented. This is - silicon photonics - finding ways to use semiconductor components and of standard semiconductor technology to create optical devices, silicon photonics - the creation of a silicon photonic waveguide. All of these components can be used in the construction of computer systems linked by powerful optical data networks. Optical communication system will eliminate the "bottleneck" due to the difference in memory bandwidth and processor speed, and improve overall performance computing plate-tformy.

Keywords: fotonika, technology, supercomputers, optical communications, the speed of computing