

© 2011 р. Н.П. Проскурин, В.Л. Костенко, И.В. Касьяненко

Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя

Одеський національний політехнічний університет, Одеса

ВАТ «Запоріжсталь», Запоріжжя

МИКРОМОЩНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ ЛОГИКА И ИНТЕРФЕЙСЫ: ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ ОВЧ, УВЧ СХЕМ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ АВТОМАТОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены, проанализированы и приведены данные по результатам исследования схем оптоэлектронной логики (типа nИЛИ-НЕ) на моделях микромощных оптопар ОВЧ, УВЧ диапазонов для цифровых устройств, автоматов и интерфейсов компьютерных систем. Оценены возможности существующих технологий для производства интегральных схем с оптическими связями на их основе и области использования.

Examined, analyzed and presented data on the results of research schemes optoelectronic logic (type nOR-NOT) on models mikropower optopair VHF, UHF bands for digital devices and computer systems interfaces. The possibilities of existing technologies for the production of integrated circuits with optical links based on them and field use.

Введение

Современная цивилизационная структура общества характеризуется широким внедрением информационных и телекоммуникационных технологий (ИТТ), технически реализуемых в компьютерных системах (КС), цифровых автоматах (ЦА) и сетях различного функционального назначения. Основой их становятся оптические, оптоэлектронные элементы и устройства, позволяющие удовлетворять требованиям по использованию информационных потоков (доставке, хранению, обработке, их комбинации, др.) предъявляемым к таким КС. Переход к ним обусловлен необходимостью обеспечить возросшие: объемы потоков, требования к функциям и уровню сервисных возможностей, что достаточно сложно решить традиционными техническими методами (в рамках существующих технологий). Развитие компонентов КС (основой которых являются электронные интегральные схемы – ИС на Si, GaAs, функциональные блоки на их основе) посредством улучшения основных параметров ИС приближаются к пределам своих возможностей. Причиной этого, являются ограничения физического и

конструктивно-технологического характера, а также свойства используемых в ИС полупроводниковых материалов [1-3].

Одним из подходящих направлений для разрешения этой задачи является использование оптического способа связи, который имеет следующие преимущества: максимально возможную скорость распространения электрически нейтральных фотонов ($V_{nc} = C/n_{nc}$, где C – скорость света, n_{nc} – коэффициент преломления диэлектрика НС), широкую полосу пропускания – до 10^{16} Гц, использует диэлектрические материалы на основе прозрачных для излучения соединений – оксидов (типа SiO_2), стекол и пластмасс, обладает высокой помехозащищенностью, изоляционными свойствами, обеспечивает гальваническую развязку между компонентами, др. [4]. Поэтому создание, исследование технических решений для КС, ИС с широким применением в них оптической среды (ОС) например, в виде: схем оптоэлектронных логических элементов (ОЛЭ), устройств на их основе (ОЛУ) и оптических НС для интерфейсов КС, ИС, анализ полученных результатов является актуальной задачей.

1. Обоснованность постановки задачи и новизна информации

В последнее время появилось большое количество приборов использующих оптические, оптоэлектронные устройства и волоконно-оптические кабели, каналы (ВОК) для их связи между собой. Принципы оптической и оптоэлектронной передачи данных находят применения в цифровых и аналоговых приборах измерения и диагностики состояний в военной технике, промышленности, связи, медицине, др. [4]. В устройствах приема, передачи электрических, оптических цифровых сигналов все большее место занимают оптоэлектронные, интегрально-оптические компоненты, выполненные по планарным технологиям. Оптоэлектроника, интегральная оптика превращается в направление, которое характеризуется многофункциональностью - за счет простоты преобразований типа $L \leftrightarrow E$ и использования различных физических эффектов, их комбинаций [4,5]. Использование ВОК в цифровых системах связи и телефонии, управления объектами обеспечило занятие главенствующего положения во всех типах (сегментах) по длинам участков ЛС (магистральные - сотни и тысячи км, зоновые - единицы и десятки км, объектовые - десятки и сотни м, монтажные - единицы и десятки см) [5]. Из этого вытекает задача активного исследования и использования ОС для иных сфер приложения: например в КС и ИС в виде между- и внутрикомпонентной связи. Заданием этой работы является анализ полученных результатов проведенных исследований по созданию микромощных ОВЧ, УВЧ оптопар для схем ОЛЭ, ОЛУ [6] и оценка их применения в качестве переключателей, приемопередатчиков для создания оптических интерфейсов ИС и КС, а также общая оценка возможности их выполнения в рамках современных микро- и нанотехнологий при производстве ИС.

2. Оценка и перспективы развития интерфейсов ИС, КС

Элементами интерфейсов ИС, КС является шина - это совокупность металлических ЛС, по которым передаются сигналы одинакового функционального назначения: данных - ШД, адреса - ША, управления - ШУ, а их совокупность -

шина системная (ШС). Разрядность шин (количество металлических ЛС в ИС, КС) кратно значению $M = 2^{n=0,1,2,\dots,k} = 1, 2, 4, 8, 16$ и т.д. (1бит $\times 1, 2, 4, 8, 16 = 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2$ байт, соответственно); к ним обычно добавлены: общий провод и контрольные сигналы (КС - четность, нечетность) каждые $2^{n=1,2,\dots,k}$ бит (1 тетрада: $2^{n=2} = 4$ бит или $1/2$ байта; 1 октада: $2^{n=3} = 8$ бит или 1 байт). Проанализируем ряд параметров существующих проводных ИС (в виде ЛС на основе металлических дорожек), образующих последовательные (типа «точка-точка», рис.1а) и параллельные (типа «общая шина», рис.1б) интерфейсы ИС, КС и отметим их особенности. Межкомпонентные соединения ИС выполнены на основе направляющих сред (НС) в виде металлических проводников, что обеспечивает значение частоты переключения $F_{рцп}$ ядра центрального процессора (ЦП) в диапазоне 3...5 ГГц. Однако частота переключения $F_{рлс}$ интерфейсов и/или шин (в виде линий связи - ЛС), связывающих ЦП с остальными компонентами ИС, КС, имеет значения в 5...10 раз меньше (таблица 1). Это обусловлено увеличением значений емкости C и сопротивления R более длинных ЛС (чем в схеме генератора ЦП) и, соответственно, увеличением времени их переключения $t_{зд.лс} \sim R \times C$ ($F_{рлс} \sim 1/t_{зд.лс}$). Частоты переключения элементов ИС (в виде биполярных или МОП СВЧ транзисторов на основе Si) охватывают УВЧ диапазон (0,3...3ГГц), но близки к предельным значениям (10...20ГГц) из-за физических ограничений их параметров с учетом: физикотопологических характеристик схем логики (T^2 ЛШ, МОП, К-МОП, их минимальный размер, потребляемая мощность, задержка/ работа переключения, материал полупроводника, пр.) [2, 3] и металлической НС. Возникает актуальная задача повышения производительности ИС, КС через поиск альтернатив существующим техническим решениям - проводным металлическим ИС, интерфейсам и схемам логики электронных ИС. На рис.2 - микрофото части ИС с параллельным интерфейсом (вертикальные, горизонтальные ЛС) типа «общая шина». На них видны утолщения - места пайки для параллельного подключения устройств типа Device1, 2... m, (рис.1б).

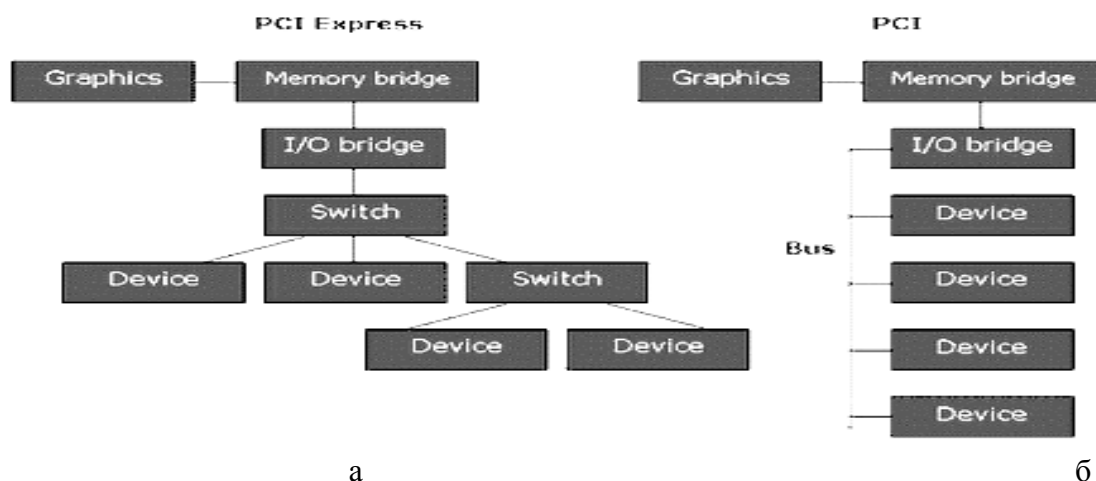


Рис. 1. Различия топологий шин: а) PCI-Express («точка-точка») и б) PCI («общая шина»).

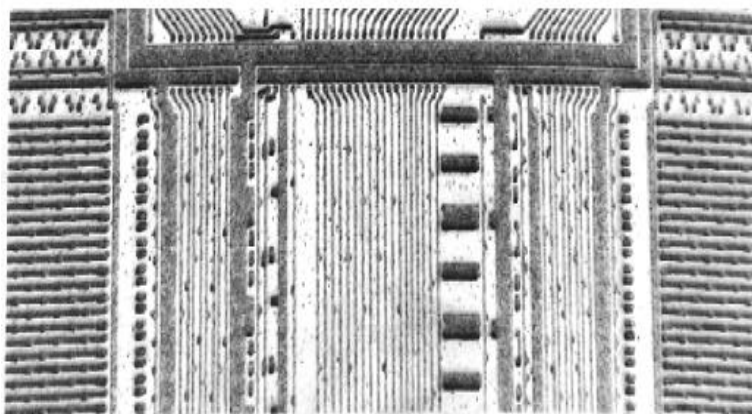


Рис. 2. – Фрагмент микрофото ИС с топологией типа «общая шина» на ИС в виде металлических проводников: вертикальные тонкие ЛС в виде n -разрядных ША, ШД кратные $n = 2^k$, утолщенные дорожки – разводка питания ИС, горизонтальные ЛС – входы, выходы триггеров (регистров) на ША, ШД.

Таблица 1. Некоторые характеристики внутренних интерфейсов (шин) ИС и КС

Стандарт	Типовое применение	Пиковая пропускная способность	Примечание
LPC	Последовательный и параллельный порты, клавиатура, мышь, контроллер НГМД	От 8.33 до 33 Мбайт/с (как ISA/EISA, которые не используются с 1999г.)	Предложена Intel в 1998 году как замена для шины ISA
PCI	Графические карты, адаптеры SCSI, звуковые карты новых поколений	133 Мбайт/с (32-битовая шина с частотой 33 МГц)	Параллельная универсальная шина, стандарт для периферийных устройств
PCI-X	Тоже	1 Гбайт/с (64-битовая шина с частотой 133 МГц)	Расширение PCI, предложено IBM, HP, Compaq. Увеличена скорость и количество устройств
PCI Express	Последовательная универсальная шина ввода/вывода	До 16 Гбайт/с	Практически вытеснила PCI
AGP	Графические карты	528 Мбайт/с 2x-mode (2 графические карты)	Стандарт для Intel-PC, начиная с Pentium II сосуществует с PCI
AGP PRO	3D-графика	800 Мбайт/с (4x-mode)	Поддерживает видеокарты, требующие мощность до 100 Вт (AGP - до 25 Вт)
HT(Гипер Транспорт)	Последовательный универсальный интерфейс	До 51 Гбайт/с	Разработка AMD в процессоры K7-K8

Проблема проводных параллельных интерфейсов заключается в том, что каждый отрезок ЛС (ИС, КС) от i -го передатчика до j -го приемника имеет свою длину, т.е. значения: ёмкости (C_{i-j}), сопротивления (R_{i-j}) и индуктивности (L_{i-j}) и, соответственно, своё характеристическое время прохождения сигнала от передатчика к приёмнику $t_{3-i,j} \sim R \times C$ (при малом L), при этом обычно неизвестно какой передатчик (ПРД) и/или приемник (ПРМ) станет активным в t -й момент времени. Это означает усложнение расчета $t_{3-i,j}$ для конкретной пары $i-j$ (т.е. имеется разница между $t_{3-i,j}$ и $t_{3(i+1)-(j+1)}$ – временем прохождения сигнала по металлической ЛС ИС, см. рис.1б, рис.2). Следовательно точно значение величин R_{i-j} , C_{i-j} ЛС сложно рассчитать, можно лишь определить границы изменения этих параметров и величины $t_{3-i,j}$ для разных пар ПРД и ПРМ (добавляется учет параметров собственно i -го ПРД и j -го ПРМ). В ситуации с параллельными интерфейсами в ИС, КС когда к одной ЛС подключено множество оконечных устройств (рис.1б), то сигнал (например «Сброс RG ») поступит: вначале до 1-го триггера (короче ЛС), затем до 2-го триггера (длиннее ЛС), а последним до 8-го триггера (самая длинная ЛС). Поэтому в отличие от сферы вычислений данных (где наблюдается продолжительное и устойчивое развитие параллельных архитектур КС и, соответственно, параллельных шин, рис.1б) в сфере технологий передачи данных (как среди внутренних, так и среди периферийных интерфейсов) имеет место тенденция перехода от синхронных параллельных шин к высокочастотным (ВЧ) последовательным типа «точка-точка» (рис.1а), имеющих фиксированные значения: длины ЛС от ПРД до ПРМ (C_{i-j} , R_{i-j}). Следовательно последовательные шины имеют ряд преимуществ: возможность снижения количества ЛС, использования освобожденной площади ИС и повышения частот $F_{рлс}$ в некоторых пределах. Но связь параметров проводной ЛС с величиной $t_{3лс} \sim R \times C$ указывает, что повышение частоты $F_{рлс}$ и развитие технологий передачи по металлическим НС возможно до определенного предела (в меньшей степени для параллельных, в большей для последовательных шин). В таблице 1

приведены некоторые характеристики интерфейсов (шин) ИС и КС на основе металлических НС, на рис.3 – их сравнительные параметры. На рис.4 приведена обобщенная прогнозная модель развития шин ИС, КС для параллельных и последовательных шин, при этом указаны границы применимости для каждой из них. Вывод по рис.4 однозначен: следующим типом НС в ИС, КС для параллельных (частоты более 1 ГГц) и последовательных шин (частоты более 10...12 ГГц) может быть ОС, преимущества которой приведены в таблице 2. Существует два подхода к решению указанных проблем ИС, КС на основе использования ОС. Первый предполагает организацию интерфейсов КС с использованием ВОК, но без изменения схем электронной логики (типа T^2 ЛШ, МДП, др.). Подход использовали корпорации *Intel* и *Apple* в технологии передачи данных «*Light Peak*» [7,8], которая в будущем способна потеснить другие типы интерфейсов КС (рис.5а,б). Этим же путем пошел российский изобретатель: им разработана плата ПК с межкомпонентными ОС [9]. Вторым подходом заключается в разработке и внедрении в ИС, КС (наряду с традиционными электронными типами логики ЭТЛ: T^2 ЛШ, МДП, К-МДП, др.) оптоэлектронной логики в виде схем ОЛЭ, ОЛУ, которые по характеристикам сопоставимы и/или превосходят существующие ЭТЛ (таблица 3). Основы функционального и схемотехнического применения схем логик такого типа были исследованы, изучены и развиты в работах научной школы д.т.н., профессора Кожемяко В.П., Винницкий НТУ, Украина [11]. Комплексные исследования ОЛЭ, направленные на снижение значения величин питания и потребления, перехода к мало- и микромощным режимам работы в ОВЧ, УВЧ диапазонах проведены одним из авторов этой статьи [6, 11, 12]. Оптоэлектронная схема типа НИЛИ-НЕ (базис Пирса) при $n = 1$ переходит в схему ИЛИ-НЕ (рис.6а), т.е. оптоэлектронного инвертора (ОИ). Для повышения частоты переключения СД в ОЛЭ используется «перелом» на ВАХ СД и режим «малый сигнал» [5], преимущества которого перед режимом «большой сигнал» приведены на рис.6б,в.

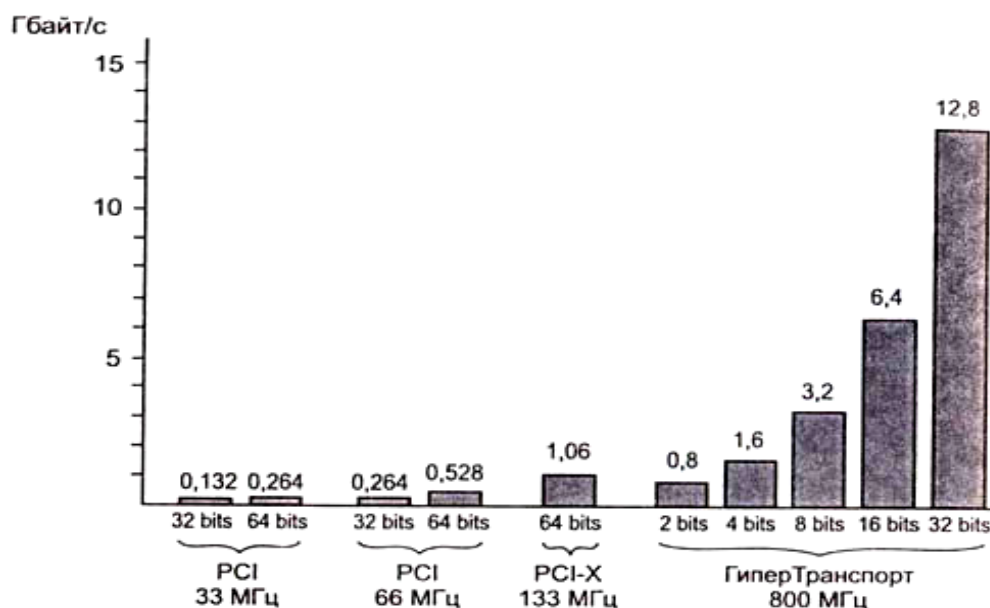


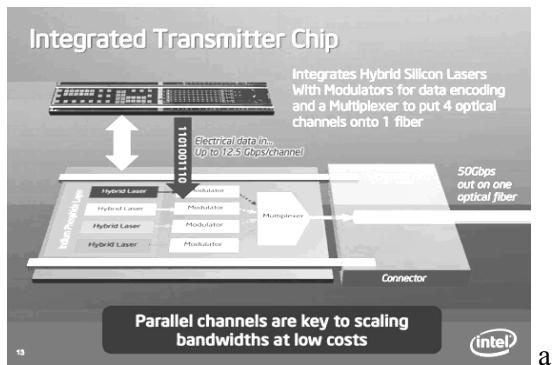
Рис. 3. Сравнительные параметры производительности внутренних интерфейсов (шин) ИС и КС.



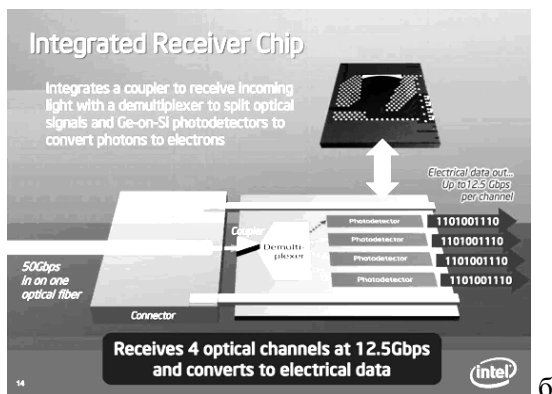
Рис. 4. Прогноз развития интерфейсов последовательных, параллельных (шин) ИС, КС.

Таблица 2. Обобщенная таблица недостатков ЭТЛ и металлических (проводных) ЛС и преимуществ ОС.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕХОДА НА ОПТИЧЕСКИЙ ТИП СВЯЗИ	
Недостатки электронной логики в ИС металлические линии связи(ЛС)	Преимущества оптоэлектронной логики оптический тип связи(ОС)
- конечные значения емкости C и сопротивления R, которые влияют на время задержки ($\tau \sim RC$) и работу ($A = P \cdot t$) переключения - трудноконтролируемые значения емкостей C между ЛС в ИС $\sim 70\%$ площади ИС занято ЛС $\sim 80\%$ мощности источника питания расходуется на перезарядку входов/выходов ЛЭ - чувствительность к электромагнитным помехам - максимальная частота модуляции $\sim 10^{10}$	- отсутствие влияния емкостных, резистивных, индуктивных нагрузок - невосприимчивость к электромагнитным помехам наличие встроенной гальванической развязки - большая пропускная способность(WDM) - относительная простота реализации на ИС в рамках существующего технологического процесса(Si, SiO_2) - высокая степень совместимости с существующими ЭТЛ - максимальная частота модуляции $\sim 10^{15}$



а



б

Рис. 5. Организация интегральных чипов передатчика (а), приемника (б) системы *Silicon Photonics Link* с применением WDM технологий (четыре параллельных канала в одной оптической ЛС).

На основе трех ($K = 3$) схем ОИ, соединенных последовательно (на рис.7а,б обозначены 1, 2, 3) получается универсальная испытательная схема кольцевого генератора импульсов (КГИ) - классический инструмент определения параметров логических элементов типа «инвертор» (входят в базы Буля, Пирса, Шеффера [2]). При этом $T_{КГИ} = 1 / F_{КГИ} = 2 K t_{зд.ОЛЭ}$.

3. Убедительность доказательств и правомерность выводов

Убедительность доказательств и правомерность выводов обеспечена результатами моделирования схем ОИ в различных режимах, частично приведенных в работах [6, 11, 12]. Среда моделирования – программа МАЭС-П, разработанная в НПО «Хартрон» и применяемая в ряде ВУЗов Украины [13, 14]. Результаты моделирования схем ОИ, разработанных авторами статьи (на двух виртуальных микромощных оптопарах: ОВЧ и УВЧ диапазонов) в составе КГИ приведены на рис.7а,б; сравнение основных параметров для схем типа ОИ (микромощная оптоэлектронная логика МОЭЛ1 - ОВЧ,

МОЭЛ2 - УВЧ) с ЭТЛ проведено в таблице 3. Следует отметить, что схема МОЭЛ1 (ОВЧ) рассчитана на основе параметров специально спроектированной модели микромощной оптопары К249КП1С ВП5 (виртуальные параметры, 5-й проект) [6] и может быть реализована на основе полупроводниковых технологий в виде изделия. Схема МОЭЛ2 (УВЧ) является вариантом модели оптопары К249КП1С ВП5, имеет название К249КП1С ВП6 и является демонстрационной: ее некоторые параметры завышены (по сравнению с реальными: ВЕТА транзистора на частоте 1,6ГГц принят $\beta \sim 21$, на самом деле его значение $\beta \sim 5$, т.к. $\text{ВЕТА} = 1$ при $F_{гр.} \sim 2,7\text{ГГц}$). Целью такого шага - определиться с перспективами освоения УВЧ диапазона (0,3...3ГГц) микромощными оптопарами и продемонстрировать потенциальные возможности схем ОЛЭ, ОЛУ типа ОИ, КГИ, др..Таким образом для освоения этого диапазона необходимо спроектировать очередную модель микромощной УВЧ оптопары (состав: СД на основе *GaAs* и *p-i-n* ФД с СВЧ транзистором на основе *Si*) – например К249КП1С ВП7 (виртуальные параметры, 7-й проект) с рабочей частотой ее переключения F_p до 3,0 ГГц при $\text{ВЕТА} \geq 10...20$ (граничная частота при $\text{ВЕТА} = 1$ составит $F_{гр.} \geq 10\text{ГГц}$). Эти параметры близки к предельным для СВЧ *n-p-n* биполярных транзисторов на основе *Si* [15].

4. Возможность практического применения

Возможность практического применения для указанных устройств в ИС, КС, по мнению авторов статьи, достаточно высокая. Это обеспечено близостью элементной базы электроники, оптоэлектроники и технологий [2-4], инструментов проектирования [13, 14], возможность использования традиционных полупроводниковых материалов *Si*, *SiO₂*, *GaAs*, их комбинаций для создания микромощных оптопар, ОЛЭ в ИС, КС в составе: передатчик - излучатель СД на основе *GaAs*, фотоприемник – *p-i-n* ФД на основе *Si*, а НС оптических шин интерфейсов для ИС и КС - *SiO₂* или *GaAs* [1, 4, 5]. На это же указывают интенсивные работы и полученные в последние годы результаты ведущих иностранных фирм, таких как *HP*, *Intel*, *Apple*, др. [7-9].

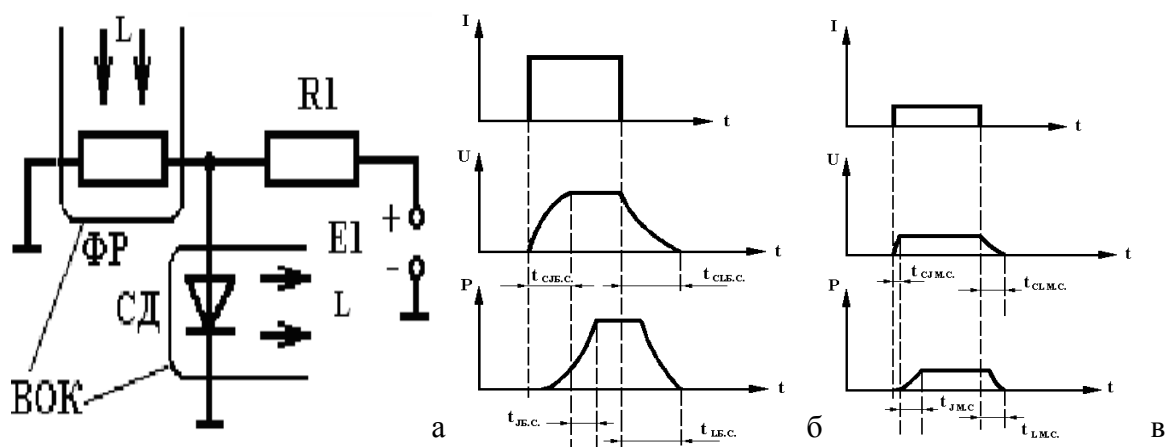


Рис. 6. Упрощенная схема ОИ (ИЛИ-НЕ) - а; сравнение качественных временных характеристик тока (I), напряжения (U), мощности (P) СД при модуляции СД цифровыми импульсами «0» и «1» в режимах: б - "большой сигнал", в - "малый сигнал", где: t_{CJ} , t_{CL} (t_J , t_L) - времена заряда, разряда емкости СД (включения, выключения излучения).

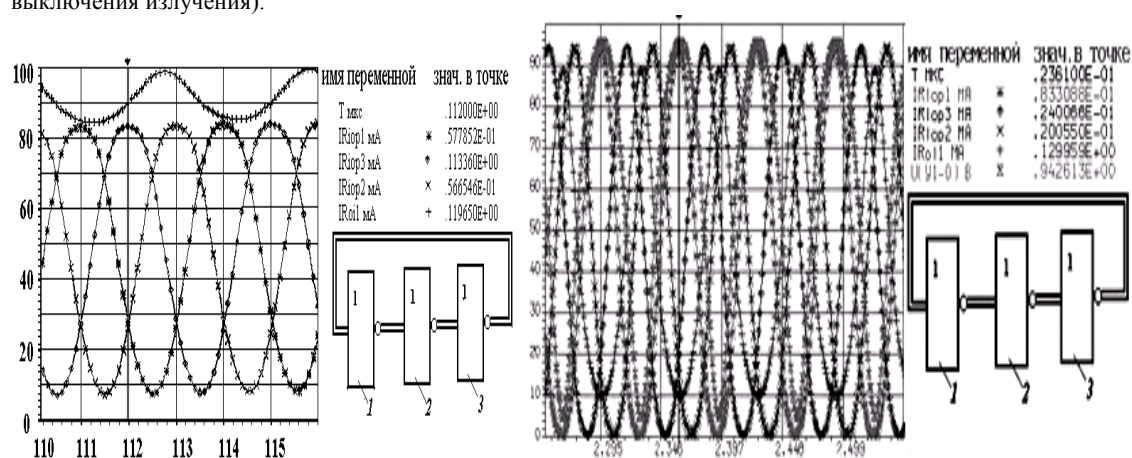


Рис. 7. Результаты моделирования двух микромощных схем ОЛУ типа "КГИ" на моделях ОВЧ - а и УВЧ - б оптопар в виде графиков токов: СД первого Iscd1 (IRiop1), второго Iscd2 (IRiop2), третьего Iscd3 (IRiop3) в зависимости от времени и значения их величин в произвольном сечении (отмечено) при Епит. КГИ= + 1,3В: ОВЧ (а) Iscd1 макс. ~ 113 мкА; $FR \sim 333$ МГц; $t_{зад.ОЛЭ} \sim 0,5$ нс; УВЧ (б) Iscd1 макс. ~ 83,3 мкА; $FR \sim 1,6$ ГГц; $t_{зад.ОЛЭ} \sim 0,1$ нс. По оси ОУ введен масштаб в % для удобства соотношения токов.

Таблица 3. Сравнительные параметры электронных логик [3, стр.438] и микромощной оптоэлектронной логики МОЭЛ1 (ОВЧ) и МОЭЛ2 (УВЧ) – выделено серым фоном.

Тип логики	Средние значения параметров логических элементов цифровых ИС			$K_{об}$ - коэф-фициент объе-динения по входу	$K_{раз}$ - коэф-фициент разветвления по выходу
	$P_{пот.ср.}$, мВт: средняя потребляемая мощность	$t_{зд.ср.}$, нс: среднее время задержки переключения	$A_{ср.}$, пДж: среднее значение работы переключения		
T^2 Л/Т ² ЛШ	1-20	5-20/2-10	50-100/10-20	2 – 5	10
ЭСЛ	20 – 50	0,5 – 2	20 – 50	2 – 5	10 – 20
И ² Л	0,01 – 0,1	10 – 100	0,2 – 200	1	3 – 5
МОП	1 – 10	20 – 200	50 – 200	2 – 5	10 – 20
КМОП	0,01 – 0,1	10 – 50	0,5 – 5		
ВиКМОП	0,01 – 0,1	2 – 10	2 – 20	2 – 5	10 – 100
МЭП	0,1 – 0,5	0,15– 0,5	0,1 – 0,5	2 – 5	2 – 5
МОЭЛ1(ОВЧ)	~0,16	~0,5	~0,08	2 – 4	1 – 4
МОЭЛ2(УВЧ)	~0,11	~0,1	~0,011	2 – 4	1 – 4

Цифровые системы высококачественной связи (макроуровень) практически повсеместно используют оптические ЛС [5]; они заменили металлические НС (кабели, провода, шлейфы) на ВОК по причине ряда существенных преимуществ ОС (таблица 2): высокой помехозащищенности, малых значений затуханий и возможности применения WDM технологий [5, 8]; те же концепции использования ОС (особенно при повышенной частоте $F_{рлс}$, рис.4) объективно могут быть внедрены в КС, ЦА (промежуточный уровень) [7-9], а затем и в ИС (микроуровень) [6, 11, 12]. Схемотехнические вопросы преобразования сигналов ЭТЛ (T^2 ЛШ, МДП, др.) в оптические и наоборот ($E \leftrightarrow L$) разработаны ранее и приведены [4, 10, 15, 16].

Выводы

1. Приведенная оценка данных, указывает, что металлические ЛС проводных интерфейсов (шин) в ИС, КС, ЦА приблизились к своим частотным пределам и вопрос дальнейшего наращивания частоты $F_{рлс}$ для них может быть решен широким применением ОС.

2. Полученные авторами данные в проведенных исследованиях показывают значительный потенциал схем ОЛЭ, ОЛУ в решении вопросов создания оптических интерфейсов в ИС, КС, ЦА [6, 11, 12].

3. Внедрение ОС для оптических интерфейсов (шин) ИС, КС, ЦА может проходить двумя путями: а - без изменения ЭТЛ (схем T^2 ЛШ, МДП, др.) путем формирования на их логических входах оптоприемников в виде $p-i-n$ ФД, выходах - светоизлучателей (в виде СД) и их соединения ОС [4, 5, 7-9]; б - внедрением в ИС, КС, ЦА оптоэлектронной логики - схем ОЛЭ, ОЛУ, по характеристикам сопоставимых и/или превосходящих ЭТЛ [6, 11, 12] и таблица 3.

Одним из заданий ученых СНГ может быть опережающие исследования в указанной области для создания оптических интерфейсов УВЧ, СВЧ диапазонов на собственных конструкциях [6, 7, 11, 12]. Необходим поиск новых физикотопологических решений схем с ОС, дальнейшее накопление теоретических и практических результатов исследований для перехода к интерфейсам с ОС в ИС, КС, ЦА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы развития компьютерных и информационных технологий. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://phoi.ifmo.ru/data_warehouse/bespalov_1.ppt – Загл. с экрана.
2. Алексенко А.Г. Основы микросхемотехники. М.: Юнимедиастилл, 2009. - 448 с.
3. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. - 488с.
4. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника.- М.: Радио и связь, 1989.- 360 с.
5. Р. Фриман. Волоконно-оптические системы связи.- М.: Техносфера, 2003.- 450 с.
6. Проскурін М.П. Мікропотужні оптоелектронні логічні елементи цифрових інтегральних схем на твердотільних світловипромінюючих і фотоелектричних пристроях: автореферат на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: спец. 05.27.01 «Твердотільна електроніка» / М.П.Проскурін. - Одеса, ОНПУ, 2007. - 20 с.
7. Light Peak -новая технология передачи данных от Intel и Apple. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://macspoon.ru/apple/light-peak/> – Загл. с экрана.
8. Intel Silicon Photonics Link: канал с пропускной способностью 50 Гб/с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.3dnews.ru/news/Intel-Silicon-Photonics-Link-kanal-s-propusknoy-sposobnostyu-50-Gbs/> - Загл. с экрана.
9. Российским специалистом разработана оптоэлектронная системная плата нового поколения, превосходящая даже современные аналоги компании IBM. [Электронный ресурс]// Новости Науки и Техники.-2003–Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/5833.html> – Загл. с экрана.
10. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники / В.П. Кожемяко, Л.И. Тимченко, Г.Л. Лысенко, Ю.Ф. Кутаев. - К.: УМК ВО, 1990.- 251с.
11. Проскурін Н.П., Грушко С.С. Моделирование оптоэлектронного инвертора на модели микромощной оптопары УВЧ диапазона для оптических интерфейсов цифровых автоматов. ISSN 1681-7710, Міністерство оборони України: Ж. Системи обробки інформації, №3(93), Харків 2011, с.72-75.
12. Проскурін М.П., Костенко В.Л., Щекотихін О.В., Грушко С.С. Обґрунтування необхідності переходу до мікропотужних інтегральних схем з оптоелектронними компонентами для цифрових автоматів та обчислювальних пристроїв. // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. Ж. Запорізький Національний

- Технічний Університет. Запоріжжя:- 2011. - №2 (25), с.15-23.
13. Программа моделирования аналоговых электронных схем / Лугин А.И., Мальцева Л.Д., Тимовский А.К., Шендерович В.Н.. Руководство пользователя. Запорожье: Филиал КБ Электроавтоматика, 1996. - 100 с.
 14. Піза Д.М., Тимовський А.К., Лугін О.І. Застосування програми МАЕС-П для моделювання радіоелектронних пристроїв. Навч. посібник.-Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. -133 с.
 15. С.М. Зи. Физика полупроводниковых приборов: В 2 т. / Мир.- М., 1984.- 912 с.
 16. Мкртчян С.О. Преобразование уровней логических элементов.-М: Радио и связь,1982.- 64 с.

N.P. Proskurin, V.L. Kostenko, I.V. Kasyanenko.
Micropowerful optoelectronic logic and interfaces: parameters of the models of VHR, UHR schemes for the digital automatic machines and computer systems.

М.П. Проскурін, В.Л. Костенко, І.В. Кас`яненко.
Мікропотужна оптоелектронна логіка і інтерфейси: параметри моделей ДВЧ, УВЧ схем для цифрових автоматів і комп'ютерних систем.

Розглянуто, проаналізовано і наведено дані за результатами дослідження схем оптоелектронної логіки (типу пАБО-НІ) на моделях мікропотужних оптопар ДВЧ, УВЧ діапазонів для цифрових пристроїв, автоматів і інтерфейсів комп'ютерних систем. Оцінено можливості існуючих технологій для виробництва інтегральних схем з оптичними зв'язками на їх основі і області використання.