

Дата поступления в редакцию
06.11 1997 г.
Оппонент д. ф.-м. н. И. М. ВИКУЛИН

Д. т. н. В. И. ОСИНСКИЙ, к. ф.-м. н. В. В. ЛУГОВСКИЙ,
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев

МИКРОЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — СТРАТЕГИЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ УКРАИНЫ

Рассмотрены состояние, проблемы и пути развития в Украине микролазерных технологий на основе гетероэлектроники.

The present state, questions and development ways of the microlaser technologies on the heteroelectronics base in Ukraine have been considered.

Одной из главных задач машиностроительного комплекса Украины является развитие наукоемких и высокотехнологических отраслей машиностроения, в частности микро- и радиоэлектроники, производства средств связи и телекоммуникаций.

Украина в настоящее время не имеет средств для преодоления отставания в области традиционной кремниевой транзисторной микроэлектроники. Поэтому она вынуждена создавать в основном свой машиностроительный и оборонный потенциал на импортной базе, что ставит отечественную промышленность в зависимость от высокоразвитых стран. В то же время в Украине имеются значительные наработки в области современных микролазерных технологий, внедрение которых в производство позволит вывести нашу промышленность из кризиса, обеспечить конкурентоспособность ее продукции, создать в Украине технологическую среду современного информационного общества по образцу США, Японии и стран Западной Европы (где скорость доступа к информации каждого человека составляет 240 Мбит/с, в то время как в Украине этот показатель почти в 1000 раз меньше).

Стратегическое значение микролазерных технологий в промышленной политике Украины

Низкая конкурентоспособность продукции машино- и приборостроения Украины объясняется в основном:

- высокой энергоемкостью производства и эксплуатации машин и приборов;
- высокой металлоемкостью (материалоемкостью);
- низкой компьютеризацией (информатизацией).

Такое положение в большой мере определяется неоптимальными технологическими решениями на всех этапах разработки материалов, конструкций и систем управления из-за слабого информационного обеспечения, в свою очередь обусловленного недостатком современных технических средств (процессоров, сенсоров, линий коммуникаций).

Современное состояние Украины подобно стартовым условиям послевоенной Японии, которая тогда взяла курс на развитие новейших наукоемких, нематаллоемких технологий, что позволило ей быстро наладить выпуск конкурентоспособной продукции и уверенно войти в технологии XXI века.

Какие же существуют в Украине объективные условия опережающего развития тех высоких микролазерных и электронных технологий, которые сейчас интенсивно развиваются в мире и где мы имеем лишь количественное, но не качественное отставание?

Современное состояние технологий информационной техники в мире (и в Украине) характеризуется двумя основными направлениями (рис. 1):

- компьютеры с периферийными устройствами и микропроцессоры на кремниевых БИС (объем мировых продаж 50–60 %);
- функциональные информационные устройства и системы, в первую очередь, оптоэлектронные микролазерные на основе новых материалов и физических принципов (объем продаж 40–50 %).



Рис. 1. Эволюция развития микроэлектронных (МЭ) и микролазерных (МЛ) информационных систем и их относительная информационная емкость

Решающими факторами развития первого направления являются системы автоматизированного проектирования (САПР) субмикронных СБИС, а также технологическое оборудование и помещения соответствующего класса.

Для второго направления главное — фундаментальный научно-технологический задел по высоким нанотехнологиям многокомпонентных квантоворазмерных гетероструктур на сложных материалах и наличие специалистов высшей квалификации, владеющих информационными технологиями создания изделий функциональной электроники.

Украинским ученым, в первую очередь академику С. В. Свечникову, принадлежит приоритет в разработке фундаментальных принципов оптоэлектроники и создании ряда

элементов автоматики и приборостроения. Необходимые материалы для скоростной и сверхскоростной оптоэлектроники в Украине производились уже в семидесятых годах. Однако первые полупроводниковые лазеры созданы у нас лишь в 1988 году (НИИ «Сатурн», г. Киев), через 25 лет после их изобретения в СССР и США, когда во всем мире уже широко использовались наработки украинских ученых и специалистов.

Проведенный нами анализ показывает, что развитие в Украине первого направления может обеспечить производство лишь 10–15 % необходимого объема конкурентоспособной продукции, в то время как развитие второго направления даст стране уникальную возможность удовлетворить собственные потребности на 80–90 % и выйти на мировой рынок благодаря следующим объективным предпосылкам:

1. Уровень фундаментальной науки по исследованию новых материалов электронной техники и квалификации имеющихся специалистов соответствуют лучшим зарубежным достижениям, а порой и превышают их.

2. Украина является крупнейшим в мире производителем новых материалов типа арсенида галлия для функциональных устройств, разработка и производство которых налажено в Харьковском институте монокристаллов, на Светловодском заводе чистых металлов, Институте физики полупроводников НАНУ, НПО «Карат» и других предприятиях. При этом цветная металлургия Украины способна обеспечить указанные производства исходным сырьем на 80 %.

3. В Украине имеется более ста крупных предприятий военно-промышленного комплекса, способных производить современную элементную базу и сложные функциональные устройства. (В настоящее время производственный потенциал этих предприятий используется лишь на 15–20 %.)

Гетероэлектроника как физико-технологическая основа подъема радиоэлектронной промышленности Украины

Электроника на гомогенных полупроводниках (кремний, арсенид галлия и других материалах) приблизилась к своему физико-технологическому пределу, преодоление которого традиционными методами, например, созданием больших интегральных схем с субмикронными и наноразмерами элементов, требует огромных энергетических и материальных затрат.

За последние три десятилетия разработаны принципиально новые гетерогенные (неоднородные) структуры на сложных полупроводниковых материалах, которые интенсивно внедряются во все области информационной техники. В первую очередь, это гетеролазеры на полупроводниках $A^{III}B^V$, которые сегодня имеют такое же фундаментальное значение в технике, как в свое время имели кремниевые транзисторы и устройства на их основе. Все известные электронные приборы на основе гетероструктур имеют в несколько раз (часто на несколько порядков) более высокие параметры, чем аналогичные приборы на гомоструктурах.

Кроме того, на гетероструктурах созданы принципиально новые приборы, не имеющие аналогов в традиционной электронике, такие как полупроводниковые лазеры (гетеролазеры), светодиоды, фотоприемники скоростные, сверхскоростные и многоволновые, оптроны, элементы интегральной оптики, полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (High electron mobility transistor — НЕМТ), гетеробиполярные транзисторы (ГБТ), приемно-передающие модули для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), оптоэлектронные интегральные схемы для ВОЛС и других информационных скоростных и сверхскоростных систем, оптические микроспеципроцес-

соры, новые типы датчиков физических и биологических величин.

Основными материалами гетероструктур являются твердые растворы $AlGaAs$, многокомпонентные полупроводники типа $InGaAsP$, впервые введенные в электронику в 1966 г. авторами [1] и получившие впоследствии широкое применение в мире. К настоящему времени разработана большая гамма материалов и гетероструктур, которая позволяет перекрыть практически весь оптический и радиодиапазон частот.

Основными технологиями создания гетероструктур являются методы молекулярно-лучевой эпитаксии, эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС) элементов третьей группы и гидридов элементов пятой группы, молекулярно-лучевой эпитаксии из МОС-источников, которые позволяют в сверхвысоком («космическом») вакууме (10^{-11} мм рт. ст.) с помощью компьютерного управления создавать наноструктуры любого состава и легирования с точностью управления составом $1/2$ монослоя, т. е. в несколько ангстрем.

Для развития технологий гетероструктур в Украине должны быть реанимированы и развиты цветная металлургия и химические производства таких материалов и реактивов, как галлий, индий, алюминий, азот, бор, фосфор, мышьяк, цинк, их металлоорганические соединения и гидриды, арсенид галлия, фосфид индия, кремний, фосфид галлия, селенид цинка, оптическое стекловолокно и кабельная продукция из него, микрооптика, пластмассы, полимерные материалы и др. Необходимо обеспечить развитие химического и электронного машиностроения, в частности, в ПО «Донец» (г. Луганск).

Существенным достоинством использования гетероструктур в радиоэлектронике является принципиальная возможность резкого повышения скорости и дальности передачи информации при одновременном уменьшении ее стоимости. Обусловлено это тем, что в наногетероструктурах обработка информации происходит на молекулярном (атомном) уровне, а на обработку и передачу одного бита информации при этом требуются очень малые удельные энергетические затраты [2].

По быстродействию гетероструктуры $InGaAsP/InP$ превышают кремниевые структуры примерно в 5 раз, а по эффективной скорости передачи информации в волоконно-оптических системах — на 1–2 порядка. Это приводит к снижению стоимости сверхскоростной передачи информационных потоков в сотни раз, что делает информационный обмен доступным практически для всех структур современного общества в любой точке Земли.

Проведенный анализ показывает, что для осуществления технологического прорыва в информационное общество в Украине необходимо приоритетное развитие функциональной гетероэлектроники на многокомпонентных полупроводниках. Создание микролазерных и СВЧ-систем, особенно скоростных цифровых сетей и линий телекоммуникаций, позволит существенно поднять производительность труда во всех областях хозяйства, науки, культуры, приблизить ее к уровню высокоразвитых стран.

Микролазерные технологии телекоммуникаций

В последнее время происходит смещение акцентов в создании информационной техники с микропроцессоров и терминалов к вычислительным сетям, обеспечивающим точную, скоростную и дешевую передачу больших объемов данных на любые расстояния между подключенными к сети терминалами (рис. 2). Широкое распространение получили сети со скоростью от 10 Мбит/с (Ethernet) до 200 Мбит/с (Hyperchannel Network) [3].

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

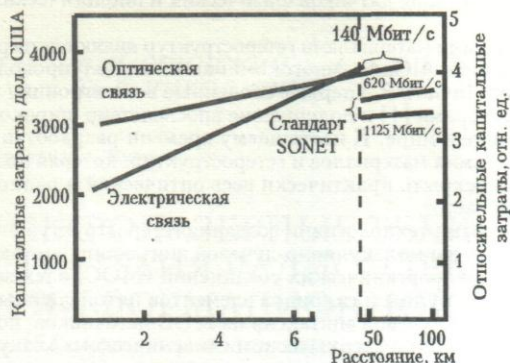


Рис. 2. Зависимость стоимости систем передачи информации от расстояния для различных значений скорости передачи



Рис. 3. Требования к производительности вычислительных устройств при передаче подвижных двухмерных изображений

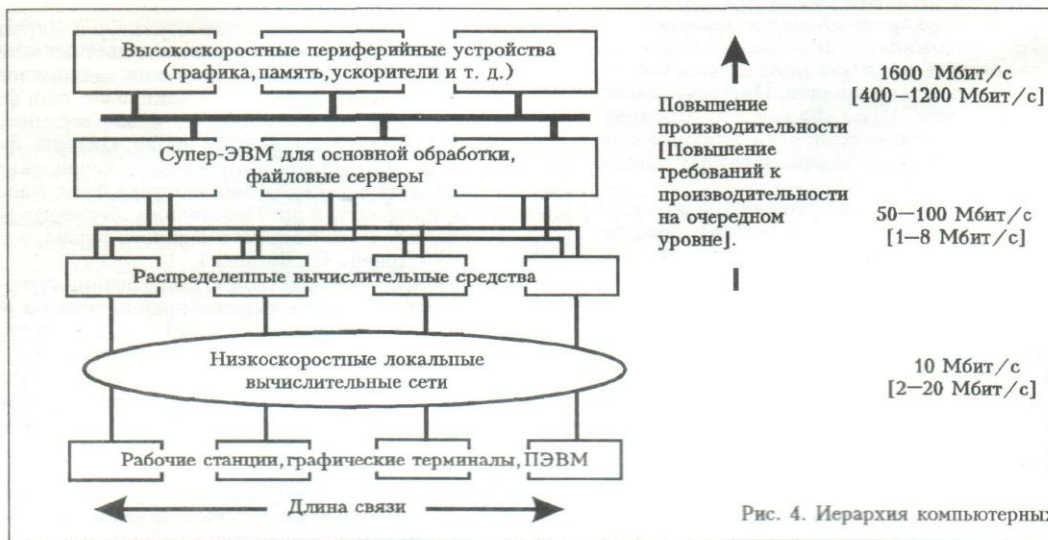


Рис. 4. Иерархия компьютерных сетей

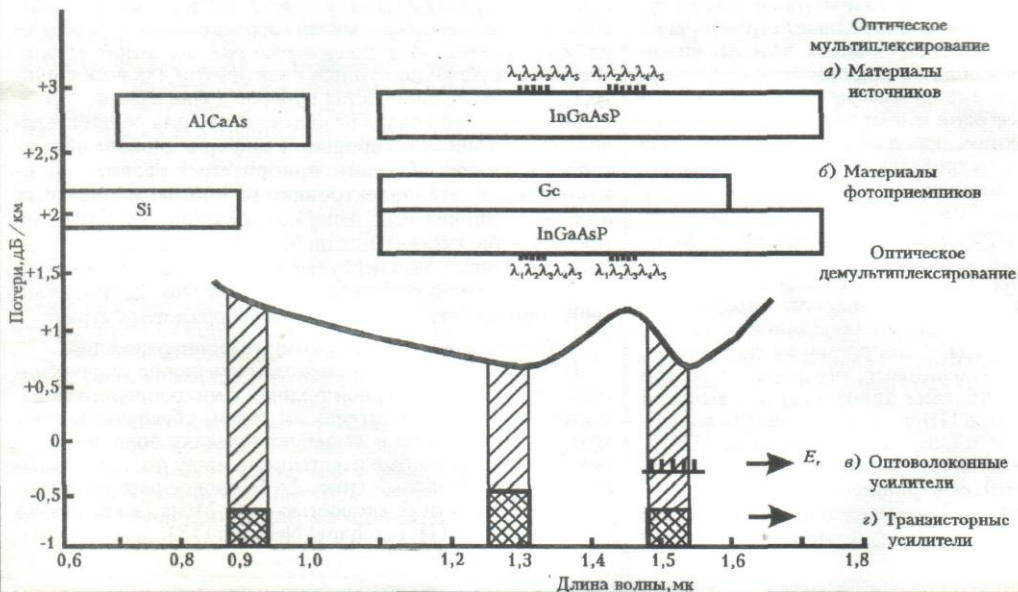


Рис. 5. Спектральные диапазоны применяемых материалов точечных (а) и приемников (б) оптического излучения с возможностью оптического мультиплексирования; компенсация потерь в оптоволоконных квантовых (в) транзисторными усилителями

Повсеместная автоматизация труда невозможна без распределенной обработки данных, для которых необходима организация сетей связи. Переход от терминала с центральной ЭВМ к сообществу равноправных абонентов вычислительной среды приводит к переходу от иерархических (терминальных) сетевых топологий к обеспечению связи каждого с каждым с помощью шины (Ethernet) или кольца (Token Ring). Высокоскоростные сети объединяют компьютеры и устройства памяти для включения в них большого числа пользователей. При этом необходимо обеспечить соответствующее количество широкополосных каналов с пропускной способностью порядка сотен и тысяч Мбит/с на локальном и региональном уровнях (рис. 4). Как видно из рисунка, высокоскоростная сеть фактически состоит из нескольких соединенных между собой подсистем.

Другой важной причиной потребности в высокоскоростных сетях является возрастающая производительность вычислительных устройств, которая сегодня равна 2–8 млн. операций/с, а уже в ближайшие годы возрастет до 100 млн. операций/с. Такое повышение эффективности устройств необходимо при работе с двухмерными изображениями, в первую очередь подвижными, для передачи которых от источника к приемнику требуется высокая пропускная способность канала — около 800 Мбит/с (рис. 3).

Существенным фактором является снижение стоимости передачи данных. В высокоскоростных оптических системах стоимость передачи одного бита информации снижается до такого уровня, что понятие «минимально необхо-

димая производительность» теряет смысл. Поэтому акцент в информатизации Украины следует делать не на увеличении производительности терминалов, а на создании сетевых мощностей путем развития микролазерных волоконно-оптических и радиооптических скоростных систем. Основные направления развития технологии состоят в совершенствовании оптоволоконна, коммутаторов и приемопередатчиков. Наиболее перспективными являются эрбиевые (Er) квантовые оптоволоконные усилители, интегрально-оптические или гетеротранзисторные коммутаторы на сложных полупроводниках $A^{III}B^V$ и оптическое мультиплексирование с разделением по длинам волн лазерных передатчиков и фотоприемников (рис. 5). Последнее существенно упрощает коммутацию и обработку на промежуточных узлах и переносит решение протокольных проблем коммутации в область высоких технологий создания микролазерных полупроводниковых наноструктур.

Анализ рынка микролазерной техники и гетероэлектроники

Существенным преимуществом микролазерных устройств по сравнению с электронными транзисторными системами является решение проблемы истощения мировых запасов меди путем замены медных проводов на стекловолокно, обладающее в тысячу раз более высокой помехоустойчивостью, пропускной способностью и долговечностью. К тому же стоимость волоконно-оптических систем в 100 раз ниже, чем электронных, а массогабаритные характеристики значительно меньше. Микролазерные устройства обеспечивают бесконтактность и защищенность информации, возможность обработки двух- и трехмерных сигналов (образов) в реальном масштабе времени на три порядка выше возможностей любых транзисторных устройств. Перечисленные преимущества обуславливают ежегодное расширение рынка такой продукции. Потребность Украины в элементах микролазерной техники и гетероэлектроники с учетом возможности экспортных поставок в ближайшие годы (согласно маркетинговым исследованиям) отражена в табл. 1. В стоимостном выражении внутренний и доступный нам внешний рынок указанных изделий составил 300 млн. долл. США в 1998 г. и до 3 млрд. дол. США в 2000 г.

Особенно интенсивно развивается рынок волоконно-оптических устройств (см. табл. 2).

К началу следующего тысячелетия предполагается замена 90% кабельных линий на металлических проводниках на волоконно-оптические. Сравнительные данные по стоимости скоростных и сверхскоростных линий: медные провода (витая пара) — 100 долл. США за милю, коаксиальный кабель — 1–10, радио — 1, ВОЛС — 0,1 доллара за милю.

Состояние разработок и производства

К настоящему времени на предприятиях и в научно-исследовательских учреждениях Украины разработаны следующие лазерные элементы, устройства и системы, зачастую не уступающие по своим характеристикам мировому уровню:

- аппаратура волоконно-оптических линий связи;
- полупроводниковые гетеролазеры и фотоприемники с длиной волны 0,78, 0,82, 1,3 и 1,55 мк;
- приемопередающие модули для магистральных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и локальных компьютерных сетей со скоростью передачи информации 155, 622, 1250 Мбит/с;
- микросхемы управления лазерами и усиления сигналов приемников;
- акустооптические микропроцессоры для обработки больших объемов информации и спектрального анализа радиосигналов;

Таблица 1
Прогнозируемая динамика рынка микролазерных устройств и гетероэлектроники, шт.

Наименование изделия	1998 г.	1999 г.	2000 г.
Гетеролазеры	10000	30000	100000
Светодиоды	1000000	1500000	5000000
Фотоприемники	500000	800000	2000000
Оптроны	10000	30000	60000
Приемо-передающие модули ВОЛС	10000	20000	50000
Интегральные схемы оптоэлектроники	20000	30000	70000
Оптические спецпроцессоры	10	20	100
Волоконно-оптические линии связи, в т. ч. компьютерные сети	1000	4000	10000
Гетеротранзисторы (HEMT, HBT)	10000	50000	100000
Коммутаторы	60000	100000	150000
Генераторы	50000	100000	200000
Элементы интегральной оптики	10000	20000	50000

Таблица 2
Прогнозируемая динамика рынка ВОЛС

Сети	Скорость передачи, Мбит/с	Доля на рынке, %			
		1987	1993	2000	2010
Ethernet	10	73	23	20	15
Token Ring	16	8	37	30	20
Высокоскоростные	>100	12	40	50	65

— оптические процессоры обработки и когерентные методы кодирования и декодирования, включая голографические.

На предприятиях Украины разработаны базовые лазерные технологии физического преобразования электрического цифрового информационного потока в оптический в широком диапазоне скоростей, что позволяет создавать на их основе современные средства информатизации. Имеющиеся разработки микролазерных устройств для волоконно-оптических компьютерных сетей находятся на уровне международных стандартов. Однако в связи с экономическими трудностями в последнее время высокие электронные технологии фактически свертываются, а экспериментальная база предприятий с уникальным технологическим оборудованием не используется. Большинство предприятий, которые ведут разработки приборов и систем на основе гетероэлектроники, используют элементную базу, импортируемую из России, Японии, США, Германии и других стран. В то же время из Украины экспортируются сложные полупроводниковые материалы типа арсенида галлия (Светловодский завод «Чистые металлы» является одним из крупнейших в Европе производителей сложных полупроводников).

Оказались практически замороженными сделанные в Украине капитальные затраты на экологически чистое производство цветных металлов и другого исходного сырья для изделий гетероэлектроники.

Даже в этих сложных условиях ряд предприятий, используя прежний многолетний задел, продолжают работы: созданы микролазерные изделия, которые по уровню соответствуют последним зарубежным достижениям. **Они могли бы быть запущены в производство уже в начале 1998 года для обеспечения внутреннего и экспортного рынка, что пополнило бы доход государства на несколько млн. долларов ежегодно.** Необходимо принять во внимание и тот факт, что, наряду с микропроцессорами, оптоэлектронные микролазерные системы определяют технический уровень современного оборонного комплекса и систем национальной безопасности. Однако необходима финансовая поддержка предприятий, разрабатывающих и внедряющих микролазерные технологии. Так, во всех странах

наукоемкие электронные технологии пользуются значительной государственной поддержкой, создание и внедрение их обеспечено льготными условиями налогообложения, создаются инновационные центры и технопарки со статусом свободных экономических зон.

В настоящее время основополагающим документом, определяющим на ближайшие годы государственную политику, объемы и распределение бюджетных средств в области информационных технологий, является Национальная программа информатизации Украины, проект которой находится на последней стадии согласования. Однако в этой программе не определена приоритетность микролазерных технологий для информатизации Украины. Правда, было утверждено несколько целостных программ развития этого направления, однако общая кризисная ситуация в экономике, отсутствие государственного финансирования и правовой поддержки так и не позволили реализовать их в полной мере.

Эффективные усилия по государственной поддержке рассматриваемого научно-технического направления могли бы обусловить возрождение отечественной микроэлектроники вопреки мнению о том, что развивать отечественное производство средств микроэлектроники, лазерной техники и информатики не имеет смысла и их нужно закупать за рубежом. В первую очередь это относится к микролазерным технологиям, широкое применение которых обеспечит значительный подъем уровня конкурентоспособности во многих областях народного хозяйства, что имеет для Украины стратегическое значение.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сирота Н. Н., Осинский В. И. Излучение р-п-переходов на кристаллах твердых растворов фосфида индия-арсенида галлия // Доклады АН СССР. Сер. Физ. — 1966. — Т. 171, № 2. — С. 317—319.
2. Осинский В. И. Гетероэлектроника как физико-технологическая основа сверхскоростных систем информационного общества // Мат-лы 7-ой Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь: 1997. — Т. 1. — С. 76—79.
3. Хламтак И., Франта У. Р. Высокоскоростные сети: обобщение, направления развития, проблемы // ТИИЭР. — 1990. — Т. 78, № 1. — С. 63—78.

1997

НАМ ПИШУТ

В связи с экономическим кризисом в промышленности Украины предлагаю формировать тематику журнала таким образом, чтобы она охватывала широкий круг вопросов, начиная с рекламы продукции, изготавливаемой на приборостроительных предприятиях, до информации о замене старых материалоемких и энергоемких технологий и конструкций изделий, а именно:

- реклама по номенклатуре продукции, выпускаемой приборостроительными предприятиями Украины;
- материалы ЧИР и ОКР по тематике приборостроительных предприятий, СКБ, институтов;
- переводы статей по прогрессивной технологии;
- материалы о новом оборудовании для монтажа радиоаппаратуры;
- материалы об энерго- и материалосберегающих технологиях;
- информация по патентным вопросам и изобретательству в приборостроении и электронике;
- материалы по модернизации энергетического оборудования приборостроительных предприятий;
- информация ведущих специалистов Министерства по делам науки и технологий и Минпромполитики относительно выполнения комплексно-целевых программ Украины и выработки стратегии приборостроительных предприятий;
- информация об опыте директорского корпуса приборостроительных предприятий в поисках выхода из экономического кризиса.

С. Новосядлый, г. Ивано-Франковск

