

# Радиофотоника – передний край обороны страны

**Алексей Галицын** (a.a.galitsyn@gmail.com), **Владимир Егоров** (egorov-iptm@mail.ru), **Евгений Егоров** (hed1317@mail.ru)

## Вступление

Тридцать лет назад, волею судеб (работая в НПО «Космическое приборостроение»), автор этих строк Алексей Галицын, даже не задумываясь о каких-то там финансах, мог позволить себе быть заказчиком разработки первых волоконно-оптических систем связи (ВОЛС) и в составе госкомиссии участвовать в приёмке у НИИ «Дельта» (высотка на пересечении Щёлковского шоссе и Сиреневого бульвара) заказанных им ОКР по созданию первых отечественных волоконно-оптических систем. Руководителем той разработки был Михаил Арсеньевич Ананян – ныне д.т.н., академик РАЕН, президент НО «Национальная ассоциация наноиндустрии», главный редактор журнала «Нанотехника», автор более 200 печатных трудов, а также более 60 изобретений и патентов в области волоконной оптики и наноиндустрии. А в те времена автору этих строк уже через месяц удалось применить заказанные у НИИ «Дельта» ВОЛС в своём НПО для подключения к ЭВМ БЭСМ-6 терминалов (отечественных ДВК-2, вместо дефицитных и дорогостоящих импортных «Видеотонов») в удалённых корпусах предприятия, чтобы разрабатывать СБИС на основе базовых матричных кристаллов серии 1806ВП1 с последующим их производством на Зеленоградском заводе «Ангстрем».

Мог ли предположить автор, 30 лет назад выступавший заказчиком первых отечественных ВОЛС и оснащавший тогда где-то в деревне под Волоколамском отечественными компьютерами «прораба перестройки», будущего и последнего Героя Социалистического Труда Николая Ильича Травкина, инициатора коллективного подряда в сельском гражданском строительстве, что он тем самым участвует в выпуске из бутылки того самого джинна, который уничтожит не только электронную, но и вообще всю высокотехнологичную индустрию страны, а уникальное здание НИИ «Дельта» превратит в супермаркет? Да конечно же, нет, и в мыслях тогда ни у кого такого не было.

Высотное административное здание «НИИ Дельта» – теперь офисно-торговый комплекс в районе Северное Измайлово Восточного административного округа Москвы. Общая площадь здания с подземным паркингом составляет около 50 000 м<sup>2</sup>, пятно застройки – 13 446 м<sup>2</sup>. Здание общей высотой 132 метра имеет уникальную архитектуру. В 1978 году в этом здании был размещён НИИ «Дельта», созданный по приказу МЭП СССР на базе части КБ полупроводникового машиностроения (КБПМ). НИИ «Дельта» специализировался на научных исследованиях, разработке и опытном производстве интегральных микросхем для нужд народного хозяйства и спецтехники. С 1993 года началась сдача в аренду свободных площадей. В 2002 году Научно-исследовательский институт «Дельта» стал называться ОАО «Новая инвестиционная инициатива "Дельта"». Основным направлением его деятельности становится управление недвижимостью, сдача площадей в аренду [1].

Во времена Горбачёвской перестройки, когда КПСС позволила всем желающим немного «поругать» государством и принять участие в выборах народных депутатов на альтернативной основе, люди ждали от демократии справедливости, а получили вседозволенность и беспредел. От коллективного подряда ждали конкуренции и оплаты по труду, а вместо этого получили «базар» в экономике, уничтожение высокотехнологичных отраслей промышленности и науки, а вдобавок ко всему этому ещё и монополии и олигархов. Вместо развития страны, которое даже после Великой Отечественной войны (в условиях двухконтурной финансовой системы) на зависть всему миру длилось с сороковых по восьмидесятые годы, народу (под демократические лозунги) новоявленные реформаторы навязали «Вашингтонский консенсус» [2] – механизм угнетения стран-колоний, загнавший и людей, и предприятия страны в кредитное рабство и приведший их экономику (особенно высокотехнологичные её сектора) к полному разрушению, 30-летней стагнации и полной зависимости от импорта.

Суть Вашингтонского консенсуса как механизма управления колониями достаточно проста. Это узаконенный механизм ограбления колоний, а колониальная политика «глобальной метрополии» в отношении любой страны-колонии, в общем-то, одинакова и основана на власти доллара, военной силе, но главное (при существовании ядерного оружия) – на технологическом превосходстве. Не будем здесь и сейчас вдаваться в вопрос, почему и как в стране с гигантскими природными ресурсами, посевными пло-

щадями и образованным населением вдруг наступил голод, и почему в 90-х годах в России сменились и власть, и экономический уклад?. Достаточно знать, что в любой стране, как только власть страны (по тем или иным причинам) соглашалась перевести экономику на рельсы свободного рынка на условиях «Вашингтонского консенсуса», жизнь начинала развиваться, как в страшной сказке, которую и описать-то можно только в сказочной форме (см. приложение в конце статьи), причём везде с одним и тем же закономерным финалом!

Вы спросите: «Для чего мы всё это говорим?» Да для того, чтобы ни у кого не осталось иллюзий, и чтобы стало понятно, что в той финансово-экономической парадигме развития, в которой мы сейчас существуем (а существуем только для того, чтобы Россия продолжала исправно снабжать весь цивилизованный мир сырьём, которым она владеет), собственные высокотехнологичные отрасли принципиально развиваться не могут. Неужели кому-то ещё непонятно, что увеличился не ВВП страны (якобы в два раза), а только наше отставание от цивилизованных стран мира в развитии и технологиях – и не в два, а в 20 раз? Неужели, чтобы это понять, недостаточно 30-летнего бессмысленного ожидания хоть какого-то развития высокотехнологичных отраслей в стране Курчатовых, Королёвых, Туполевых и Котельниковых?

Написали мы это, чтобы открыть людям глаза на очевидное: развитие высокотехнологичных отраслей в России в рамках «открытой рыночной экономики» (в условиях миро-

вой конкуренции) и с её совершенно «дикой» банковской кредитной системой невозможно в принципе и доступно лишь отдельным категориям «доверенных» людей, для которых на постоянной основе доступны бюджетные средства. Конечно, снимать закредитованность предприятий бюджетными вливаниями, после разрушения в них производственного процесса, – тоже хорошее дело, но и это доступно лишь предприятиям ОПК, да и то не всем. А как быть с остальными – с теми, кто, например, поставяет комплектующие для ОПК; как быть с учёными РАН, «не вписавшимися в рынок» и впроголодь, за 25 тысяч рублей, двигающими российскую науку?

Любая новая высокотехнологичная продукция, за исключением примитивного программного продукта, который в стране почему-то десятилетиями гипертрофированно финансируется (немыслимые гранты Минцифры, средняя зарплата студента – программиста Java, Python, C++ в 200...300 тысяч рублей и т.п.), но сам материальным продуктом не является и может только способствовать производству материальных благ, которого в стране фактически нет, требует колоссальных финансовых затрат для своего создания, но деньгам на это просто неоткуда взяться. Видимо, поэтому (как в сказке про «Голого короля») проще и дешевле создавать в стране «виртуальную», так называемую «цифровую экономику» (причём на импортной технике!) вместо реального производства и экономики реальной. Но импортная техника в условиях современного жёсткого противостояния России и США – это «радиоуправляемая» мина замедленного действия, заложенная под экономику не виртуальную, а уже реальную...

Главная из высокотехнологичных отраслей в мире (как вдруг оказалось) – это полупроводниковая индустрия, а её передний край – радиофотоника. Полупроводниковая индустрия базируется на тысячах высокотехнологичных компонентов: инновациях, технологиях и чистых материалах, которые тоже, причём одновременно, теперь в нашей стране должны быть кем-то созданы: в высоких технологиях одного без другого просто не бывает.

Но о полупроводниковой индустрии в России не говорят с экранов телевизоров, нет её и в программах институтов так называемого «развития» страны. Видимо, согласно «консенсусу», страна

не должна иметь ни полупроводниковой индустрии, ни высокотехнологичных разработок в этой области, а интеллектуальный потенциал, исторически наперекор всему рождающийся в России, должен или работать на метрополию (на инофирмы), или погибнуть.

И рассчитывать на то, что в России «невидимая рука рынка» в области полупроводниковой индустрии сама всё создаст и расставит по местам или что спешно созданные чиновниками-экономистами ДРЭП бесхребетные «ручные» консорциумы (ориентированные на производство и сбыт конкретного продукта) спасут всю электронную промышленность страны, к сожалению, не приходится [3]. Это, наконец, просто глупо или даже преступно: пытаться действовать экономическими методами там, где просто нет экономики, как десятилетиями тщетно пытались делать «наноэкономисты» [4]. Какая тут может быть экономика, какое импортозамещение, когда цены на продукцию берутся даже не «с потолка», а «от плинтуса», а один квантовый компьютер завтра придёт и разрушит всё?

Должностные обязанности представителей профессии «экономист» [5] заключаются в исследовании, планировании и экономическом сопровождении финансово-хозяйственной деятельности, но отнюдь не в руководстве наукой и техникой. Именно в силу принципиальной ограниченности профессионального инструментария («перестановка мебели», ребрендинг, реструктуризации, консолидации, консорциумы, корпорации, ассоциации, IPO, SPO, PPO и т.п.) ни чиновники, ни экономисты полупроводниковую индустрию страны спасти не могут: ведь ничему другому эти люди, к сожалению, не обучены и ничего другого попросту не умеют. Возможно, их профессиональные навыки [6, 7] и полезны, когда нужно что-то оптимизировать или размещать на финансовых рынках, но для того, чтобы создавать технологии, нужны совсем другие люди. Показателен в этом плане «эксперимент» с нанотехнологиями, в результате которого 100 тонн пятитысячных купюр были волшебным образом превращены в никому не видимые «наноструктуры» [4].

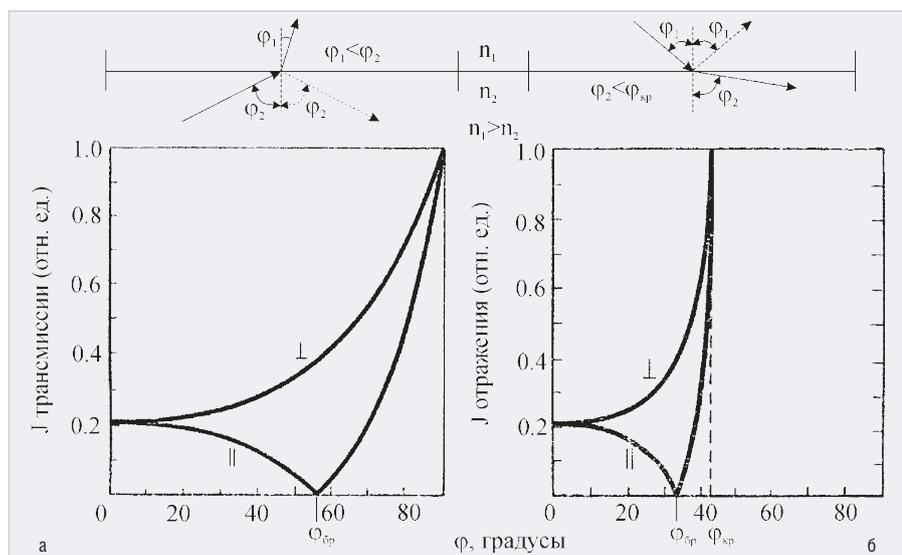
Но выход даже из этой патовой ситуации у страны и был, и есть – он описан нами в статье «Кому нужна электронная индустрия?» [8]. Впрочем, реализовать его на практике в России, по-видимому,

не удастся. Это становится очевидным на примере нашего опыта взаимодействия с чиновниками-экономистами ДРЭП Минпромторга РФ – департамента, «похоронившего» очередную уникальную инициативу добровольного объединения российских учёных и инженеров Российской инженерной академии, Российской академии инженерных наук и Российской академии естественных наук по созданию частно-государственной «Физико-технической корпорации» для выполнения (на основе разработанных предельных технологий) стратегически важных для страны проектов. Этот опыт авторы на примере десятка перспективнейших проектов описали в статьях «Современной электроники» [8...14]. А сегодня мы проиллюстрируем сказанное ещё одним реальным практическим примером. Этим примером является радиофотоника.

### Что же такое радиофотоника

О вкладе авторов в развитие этого направления мы уже писали [12], но в финансировании работ по этой теме им было отказано специалистами [7] ДРЭП, поскольку развивать эту технику, согласно законам российского рынка, должны совершенно другие, «правильные» люди. И неважно, что люди эти «правильные», осваивая бюджетные миллиарды, подобно юным радиолюбителям, будут осуществлять разработки методом научного тыка: «А что будет, если сделать так? А что будет, если сделать эдак?» В самом деле, ведь сегодня никто не может объяснить, почему, вопреки всем известным законам физики, передача сигналов по ВОЛС может осуществляться на сотни и даже на тысячи километров, а уж тем более рассчитывать и проводить микронные интегральные световоды непосредственно по кремниевой пластине, не говоря уже о нанофотонике, где действуют совсем иные – квантовые законы. В то время как авторы на основании сделанного ими открытия понимают реальную физику, схемотехнику, наперёд знают, что и как требуется сделать и получить в области радиофотоники, и её системотехники, и, как всегда, намерены поделиться своими знаниями с читателями журнала.

Поскольку чёткого определения радиофотоники (microwave photonics) пока нет даже в Википедии, сделанное нами открытие [12] «явления волноводно-резонансного распространения



**Рис. 1.** Зависимости интенсивности светового потока от угла его падения на интерфейс, разделяющий прозрачные диэлектрические среды 1 и 2 с различающимися коэффициентами преломления ( $n_1 > n_2$ ), 1 в условиях распространения первичного светового потока в среде 2 (а) и в среде 1 (б).  $\varphi_{Br}$  – угол Брюстера,  $\varphi_{cr}$  – критический угол полного внутреннего отражения. Обозначения  $\perp$  и  $\parallel$  указывают на поляризацию излучения, соответствующую волнам с электрическим вектором, перпендикулярным к плоскости падения ( $\sigma$ -компонента) и параллельным ей ( $\pi$ -компонента)

(и взаимодействия) квазимонохроматических радиационных потоков» даёт нам право впервые утверждать, что радиофотоника – это наука, возникающая на стыке как опосредованного (при помощи оптоэлектроники), так и непосредственного [12] взаимодействия СВЧ-радиочастотных и оптических сигналов. В практической плоскости она связана с передачей, приёмом и преобразованием сигналов посредством электромагнитного излучения и электронно-фотонных приборов, а также с технологиями их производства.

Электромагнитные волны и фотоны (в отличие от электронов) не обладают массой и зарядом, поэтому они обладают гораздо большей (чем электронные системы) дальностью, скоростью и шириной полосы пропускания сигнала, а также не подвержены воздействию внешних электромагнитных полей, что обеспечивает их работу на частотах порядка сотен ГГц со скоростью в сотни Гбит/с, а это на 5...6 порядков (!) больше, чем у электронных систем. Причём в перспективе могут быть созданы каналы связи с тера- и петабитной пропускной способностью. Без радиофотоники даже близко подступиться к таким частотам и скоростям принципиально невозможно, поскольку затухание электромагнитных сигналов на таких частотах будет составлять сотни дБ на каждые 100 м, не говоря уже о проблеме наводок и радиационной стойкости.

А все резервы повышения вычислительной мощности даже многопроцессорных систем, даже на единой кремниевой пластине и даже у мировых производителей практически исчерпаны, так как ограничены отводом тепла с пластины. Но радиофотоника позволяет решить и эти проблемы: во-первых, использование фотонных носителей информации и квантовых механизмов в её элементах позволяет создать так называемые «холодные» радиоаппаратуру и гига-процессоры (тактовую частоту можно размещать на степень интеграции и производительность, а в итоге – на себестоимость), которые практически не подвержены радиационным воздействиям; во-вторых, являясь во многом функциональной «электроникой», радиофотоника изменит (позволит значительно упростить) функциональное построение всей нынешней радиоэлектронной аппаратуры: средств наведения, обнаружения, разведки, радиолокации – и на несколько порядков улучшит её качество. Сможет превратить, например, радиолокацию в «радиовидение» и многократно сократить массу и габариты техники.

Именно поэтому без радиофотоники ни в настоящем, ни тем более в будущем принципиально не может быть ни многопроцессорных гипер- и квантовых компьютеров, ни новой радиолокации. Поэтому радиофотоника сегодня (особенно интегральная) – это действи-

тельно передний край обороны России. А «элементной базой» радиофотоники являются твердотельные терагерцовые приборы: лазеры, оптические волноводы, оптоэлектронные генераторы, усилители, дешифраторы, регистры, коммутаторы, динамическая и статическая память, фазовращатели, синтезаторы, смесители, умножители, УПЧ, оптические модуляторы, фазово-частотные компараторы, линии задержки, ускорения и дублирования входящей волны, гетероантенны, защитные устройства для входных трактов приёмных устройств и многое другое, вплоть до радиофотонных АЦП и АФАР (активная фазированная антенная решётка).

### Новый механизм распространения световых потоков в оптических волноводах

Сначала рассмотрим классическое представление. Само явление полного внутреннего отражения, имеющего место на границе двух прозрачных для света диэлектрических сред, имеющих разные коэффициенты преломления, было экспериментально обнаружено на самых ранних стадиях изучения взаимодействия световых потоков с материалом прозрачной диэлектрической среды [15, 16] и в дальнейшем изучалось различными исследователями. При падении на интерфейс, разделяющий две прозрачные диэлектрические среды с различающимися показателями преломления, световой поток испытывает частичное отражение и частично проходит через интерфейс. Прошедшая часть излучения преломляется, т.е. изменяет направление распространения относительно исходного направления, и эти части связаны между собой законом Снеллиуса:

$$n_2 \sin \varphi_2 = n_1 \sin \varphi_1, \quad (1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  являются коэффициентами преломления сред {1} и {2}, а  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  представляют собой угол падения исходно падающего потока и угол распространения его преломлённой части (рис. 1а), причём угол падения равен углу отражения потока, что было экспериментально установлено ещё во времена И. Ньютона [15].

Простейшим примером симметричного оптического волновода является стеклянная пластина в воздушном пространстве (в вакууме). Коэффициент преломления оптического излучения в воздухе (в вакууме) считается близким (или равным) единице. Коэффи-

циент преломления света в стекле, как правило, близок к 1,5. Общепринятым подходом к описанию распространения потоков оптического излучения в такой световодной структуре является использование механизма многократного полного внутреннего отражения на поверхностях этой пластины, представляющих собой интерфейсы между средой с высоким коэффициентом преломления (стеклом) и средой, характеризующейся низким значением этого коэффициента: воздухом.

В соответствии с подходом Френеля амплитудные соотношения отражения на интерфейсе для потоков светового излучения разной поляризации  $r_i$  и их проникновения из среды {2} в среду {1}  $t_i$  (рис. 1а) определяются выражениями [16, 17, 18]:

$$r_{\perp} = \frac{\vec{E}_{\perp}}{\vec{E}_0} = \frac{n_2 \cos \varphi_2 + n_1 \cos \varphi_1}{n_2 \cos \varphi_2 + n_1 \cos \varphi_1};$$

$$t_{\perp} = \frac{\vec{E}_{\perp}}{\vec{E}_0} = \frac{2n_2 \cos \varphi_2}{n_2 \cos \varphi_2 + n_1 \cos \varphi_1};$$

$$r_{\parallel} = \frac{\vec{E}_{\parallel}}{\vec{E}_0} = \frac{n_1 \cos \varphi_2 - n_2 \cos \varphi_1}{n_1 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_1};$$

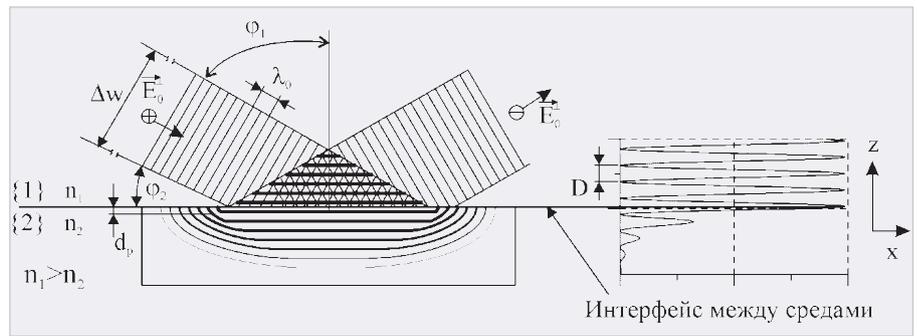
$$t_{\parallel} = \frac{\vec{E}_{\parallel}}{\vec{E}_0} = \frac{2n_2 \cos \varphi_2}{n_1 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_1}.$$

Фаза прошедшего через интерфейс светового потока для  $\pi$  и  $\sigma$  (параллельного и перпендикулярного плоскости падения светового потока) компонент излучения совпадает с фазой падающего потока. Фазы  $\sigma$  и  $\pi$  компоненты отражённого излучения будут запаздывать относительно падающего потока на  $180^\circ$  ( $\pi$ ). Коэффициенты отражения и трансмиссии светового излучения, отвечающие за распределение энергии падающего на интерфейс потока между отражённым и прошедшим его компонентами, определяются квадратами соотношений амплитуд [18]:

$$R_{\perp} = |r_{\perp}|^2; T_{\perp} = |t_{\perp}|^2$$

$$R_{\parallel} = |r_{\parallel}|^2; T_{\parallel} = |t_{\parallel}|^2$$

Рис. 1а отражает принципиальные особенности, подтверждённые прямыми экспериментальными измерениями, для случая распространения первичного светового потока в среде {2}, характеризующейся меньшим значением коэффициента преломления ( $n_1 > n_2$ ). Наблюдаемое на рисунке уменьшение интенсивности отражения  $\pi$ -компоненты в точке  $\varphi_{\text{кр}}$  практически до нуля является следствием того, что вектор электрического поля света в среде перпендикулярен направлению распространения преломлённого потока, и вызванное им возбуждение диполей среды распространяется



**Рис. 2. Продвинутое изображение формирования интерференционного поля стоячей волны квазимонохроматического оптического излучения со средней длиной волны  $\lambda_0$  и степенью монохроматичности  $\Delta\lambda$  при полном внутреннем отражении на плоском интерфейсе между материальными средами {2} и {1}.  $d_p$  – глубина проникновения,  $D$  – период стоячей волны,  $\varphi_1$  – угол падения первичного потока,  $\Delta w$  – ширина потока**

параллельно направлению отражения. Однако в этом направлении интенсивность дипольного излучения оказывается равной нулю [19]. Этот эффект впервые был экспериментально обнаружен Д. Брюстером в 1815 году [20] и впоследствии был детально исследован в целом ряде публикаций. Эти исследования показали, что при достижении критического угла Брюстера  $\varphi_{\text{кр}}$ , не удаётся полностью подавить интенсивность  $\pi$ -компоненты, как это, казалось бы, следует из уравнений Френеля.

В отличие от ситуации, когда исходный световой поток распространяется в среде с более низким показателем преломления (рис. 1а), его распространение в среде с более высоким значением этого параметра при наличии интерфейса со средой, характеризующейся более низким значением коэффициента преломления, приводит к появлению дополнительного эффекта, обусловленного явлением полного внутреннего отражения (ПВО) в области  $\varphi_{\text{кр}}$  (рис. 1б). В верхней части этого рисунка, демонстрирующей докритическое состояние ( $\varphi_1 < \varphi_{\text{кр}}$ ), наглядно показано, что при переходе светового потока из среды с более высоким значением коэффициента преломления в соответствии с законом Снеллеуса имеем  $\varphi_2 > \varphi_1$ . При достижении критического угла падения ( $\varphi_1 = \varphi_{\text{кр}}$ ) значение угла  $\varphi_2$  становится равным  $90^\circ$ , а экспериментально наблюдаемые величины интенсивности отражённого и падающего потоков сравниваются и реально демонстрируют явление ПВО. Дальнейшее увеличение значения  $\varphi_1$  не меняет вещественной величины  $\varphi_2$ . Поэтому принято считать, что в области ПВО угол преломления становится

комплексным, а его косинус представляется мнимой величиной [17]:

$$\cos \varphi_2 = -i \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \varphi_1 - 1};$$

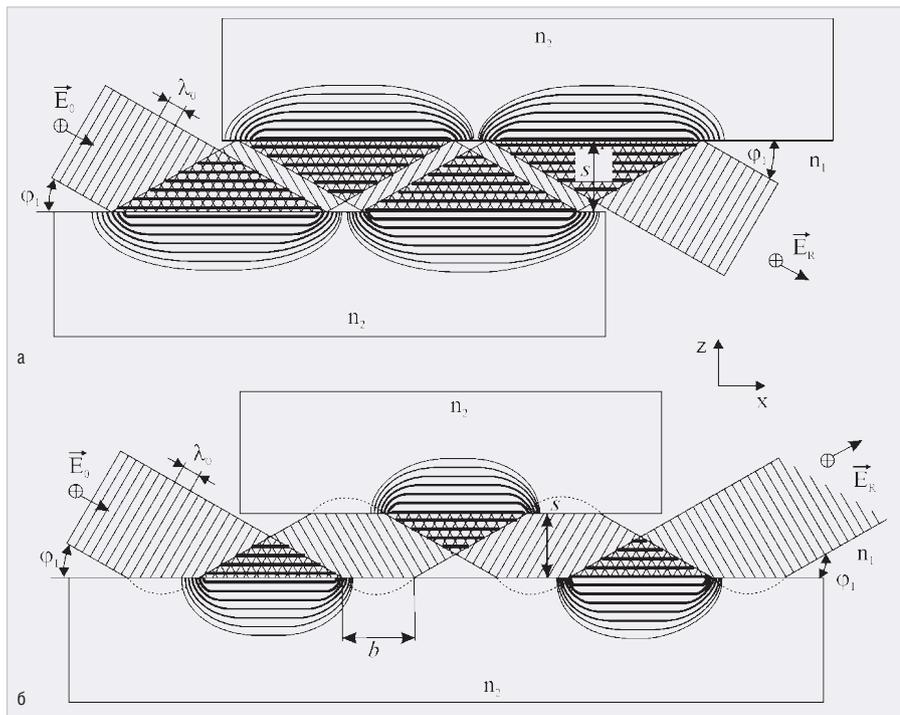
$$(\varphi_{\text{кр}} < \varphi_1 < \pi/2)$$

Перед корнем выбирается отрицательное значение знака, так как во второй среде в условиях ПВО ожидается затухание проникающего светового излучения [17]. В случае реализации явления ПВО амплитудные коэффициенты отражения и трансмиссии принимают более сложный вид [17, 21]. При этом оказывается, что в условиях полного внутреннего отражения фазы отражённого и проходящего во вторую среду потоков оказываются зависящими от угла падения  $\varphi_1$  [21].

Во второй среде в соответствии со схемой, приведённой на рис. 2, интенсивность светового поля для обеих поляризаций убывает экспоненциально. Глубиной проникновения светового потока из среды {1} в среду {2} считается расстояние  $d_p$  от интерфейса, разделяющего среды, до точки, на которой амплитуда вектора падающего потока уменьшается в «e» раз [22]:

$$d_p = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{\sin^2 \varphi_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}; (\varphi_1 > \arcsin \frac{n_2}{n_1})$$

Поскольку механизм реализации явления полного внутреннего отражения связан с передачей энергии оптического потока из среды {1} в среду {2} с последующей её обратной передачей в первую среду, было логично предположить, что оптический фотон, упавший на интерфейс, разделяющий вторую и первую среды, под углом полного внутреннего отражения, будет эмитирован средой {2} в среду {1} с некоторым смещением относительно места его попадания. Это смещение, впер-



**Рис. 3.** Схемы представления явления многократного последовательного полного внутреннего отражения в симметричном оптическом волноводе, учитывающие появление локальных интерференционных полей стоячих оптических волн в районе каждого отражения без учёта (а) и с учётом сдвига Гуса-Хенхена (б)

вые экспериментально зарегистрированное немецкими учёными, принято называть сдвигом Гуса-Хенхена [23]. Величина этого сдвига в упрощённой форме для  $\sigma$ -компоненты описывается выражением [24]:

$$b = \frac{\lambda_0}{\pi n_1} \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \varphi_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}; \left(\varphi_{кр} < \varphi_1 < \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

В соответствии с представленным выражением максимальный сдвиг Гуса-Хенхена ожидается вблизи критического угла ПВО, а его минимальное значение предполагается зарегистрировать в условиях, близких к скользящему падению первичного оптического потока.

В соответствии с общепринятым подходом при рассмотрении распространения оптического потока в симметричном волноводе на базе многократного последовательного ПВО (рис. 3) из геометрических соображений можно получить характеристическое уравнение, определяющее собственные значения мод симметричного оптического волновода. Углы  $\varphi_1$ , соответствующие этому уравнению, являются «магическими углами», определяющими сфазированность распространения потока. Реальные значения этих углов получаются на основании графического решения характеристического уравнения. При

учёте сдвига Гуса-Хенхена для более уточнённых расчётов в характеристическом уравнении вместо реального значения размера световодного канала используют его эффективное (с учётом сдвига) значение, также рассчитываемое из элементарных геометрических соображений [25, 26].

При нарушении самосогласованности каждое последовательное отражение приводит к перевозбуждению материала обкладок, вызывая последовательное уменьшение интенсивности распространяющегося потока. Таким образом, при падении на торец световода однородного непараллельного потока излучения, захватываемого световодом в угловой интервал, ограниченный двойным критическим углом ПВО, на его выходе будет реализован световой поток, структурированный в соответствии с набором разрешённых сфазированностью отражений, прошедших под «магическими» углами. Несфазированная часть исходного оптического потока потратит энергию на перевозбуждение материала обкладок, т.е. фактически уйдёт на их нагрев. Для оценки эффективности механизма многократного последовательного полного внутреннего отражения необходимо рассчитать, какую часть из захваченного световодом оптического потока

этот механизм способен доставить до его выхода.

Период стоячей оптической волны в возбуждаемых световым потоком локальных интерференционных полях определяется выражением:

$$D = \frac{\lambda_0}{2n_1 \cos \varphi_1}. \quad (9)$$

При отклонении светового луча на угол  $\Delta\varphi_1$  период стоячей волны изменится на величину  $\Delta D_\varphi$ , определяемую выражением:

$$|\Delta D_\varphi| = \frac{\lambda_0 \sin \varphi_1}{2n_1 \cos^2 \varphi_1} \Delta\varphi_1. \quad (10)$$

При изменении длины волны на величину  $\Delta\lambda$  период стоячей волны также изменится на величину  $\Delta D_\lambda$ , соответствующую выражению:

$$\Delta D_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{2n_1 \cos \varphi_1}. \quad (11)$$

Величина  $\Delta\lambda$  характеризует степень монохроматичности светового потока, падающего на световод, и фактически определяет уровень размывания интерференционной картины. Приравнивая величины  $\Delta D_\varphi$  и  $\Delta D_\lambda$ , можно оценить фактическую угловую ширину, которая допускает сфазированность последовательных полных внутренних отражений. Но при этом  $\Delta D_\varphi$  должна быть взята в удвоенном значении, поскольку отклонение от «магических» значений может быть в обе стороны. В итоге получаем:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{\Delta\lambda \cos \varphi_1}{2\lambda_0 \sin \varphi_1}. \quad (12)$$

Для оценки эффективности транспортировки потока оптического излучения на основе механизма многократного последовательного полного внутреннего отражения необходимо сопоставить угловую апертуру захвата оптического излучения световодом, составляющую двойной критический угол ПВО, что близко к  $90^\circ$ , и величину  $\Delta\varphi_1$ , умноженную на число разрешённых магических углов (или, как это принято говорить, на число мод), количество которых обычно не превышает 10. Поскольку отношение  $\Delta\lambda/\lambda_0$  для световых потоков, формируемых лазерными структурами, не превышает величину  $10^{-4}$ , можно ожидать, что эффективность транспортировки потоков оптического излучения в соответствии с механизмом многократного последовательного ПВО будет менее 0,1%, что явно не соответствует практически наблюдаемой эффективности. А это означает, что реальное физическое распространение светового потока в ну-

три световода осуществляется на основе несколько иного механизма распространения, нежели это предполагается в общепринятой классической трактовке механизма многократного последовательного полного внутреннего отражения. Так что же за механизм распространения светового потока внутри световода мы имеем на самом деле?

### Волноводно-резонансный механизм

Особенность образования интерференционной картины стоячей оптической волны в условиях стационарного режима полного внутреннего отражения квазимонохроматического оптического потока состоит в том, что размер области интерференции в среде {1} (рис. 2) пространственно ограничен, в то время как интерференционное возбуждение в среде {2} распространяется на весь её объём. Ограниченность размера области интерференции в среде {1} связана с тем, что интерференционное взаимодействие исчезает, когда фазовый сдвиг между взаимодействующими оптическими потоками достигает значения  $\pi$  ( $180^\circ$ ) [18]. На первый взгляд представляется, что размер этой области определяется только величиной сечения падающего оптического потока. Однако физически он является прямым следствием степени монохроматизации потока отражаемой оптической радиации [18, 27]. Поэтому ширина зоны интерференционного поля стоячей оптической волны ограничена фазовым критерием [18]:

$$\Delta\varphi \leq 2\pi \frac{\lambda_0}{2\Delta\lambda}. \quad (13)$$

Поскольку фаза оптической волны падающего излучения меняется на  $180^\circ$  (на « $\pi$ ») на линейной дистанции, соответствующей полуволне, фазовые ограничения, накладываемые выражением (17), могут быть преобразованы в линейный масштаб:

$$\Delta l = \frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi = \frac{\lambda_0^2}{2\Delta\lambda} = L/2, \quad (14)$$

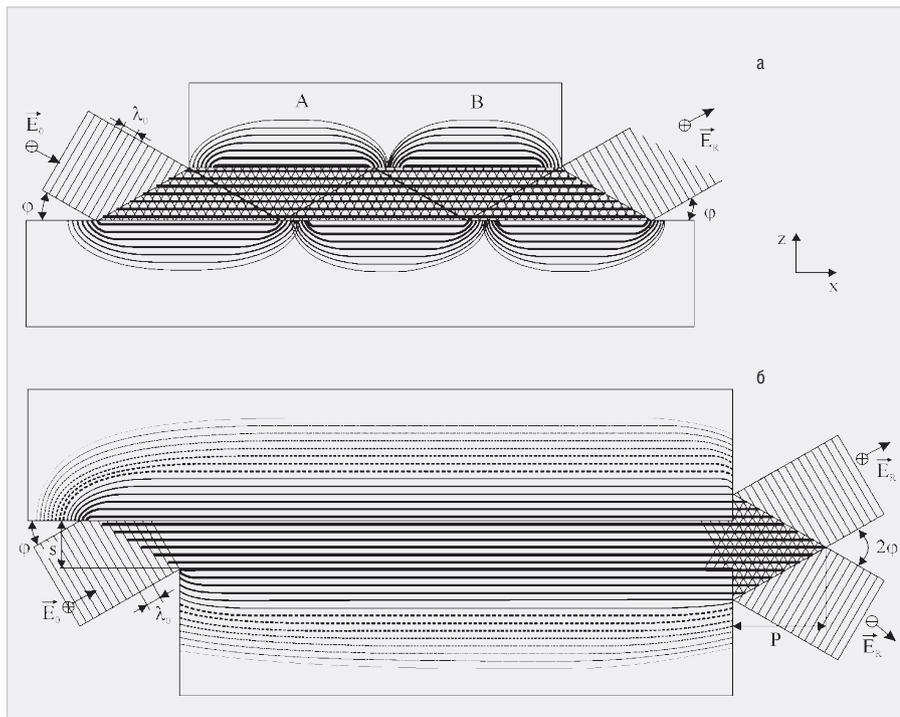
где параметр  $L$  представляет собой длину когерентности излучения, формально характеризующую продольный размер радиационного кванта [28]. Для оптического излучения этот параметр зависит от типа излучающей системы. Например, красная линия излучения атомов кадмия в газовой среде характеризуется средней длиной волны  $\lambda_0 = 643,8$  нм, а степень её монохроматичности определяется величиной  $\Delta\lambda = 3 \times 10^{-4}$  нм. Таким образом, длина

когерентности этого излучения составляет 1,3 метра. А для высококогерентных лазерных источников оптических лучей этот параметр составляет сотни метров [29]. Поскольку для возникновения интерференции необходимо, чтобы продольный размер интерференционной зоны не превышал величины, определяемой выражением (18), эта величина и определяет с физической точки зрения продольный размер интерференционного поля стоячей оптической волны. При этом понятно, что в некоторых случаях этот параметр может конкурировать с шириной (или сечением) пучка падающего излучения. Оценки поперечного размера, выполненные на основе концепции пространственной когерентности [27], показали, что он совпадает с продольным размером, т.е. соответствует половине длины когерентности излучения.

Схема явления многократного последовательного полного внутреннего отражения в симметричном оптическом волноводе, представленная на рис. 3, позволяет отойти от трактовки распространения светового потока в световоде как явления многократного полного внутреннего отражения, описываемого в рамках геометрической оптики, и представить его более реалистично: с учётом появления набора локальных интерференционных полей стоячих оптических волн. На рисунке представлена визуализация подхода, предполагающая появление локальных интерференционных зон как с учётом сдвига Гуса-Хансен (рис. 3а), так и без него (рис. 3б). Представленная на рисунке ситуация соответствует случаю применения световода, толщина световодного слоя которого превышает величину поперечного размера интерференционной области стоячей оптической волны ( $s > L/2$ ). При падении оптического квазимонохроматического потока на торец оптического волновода под одним из «магических» углов будет реализовываться его самосоглавленное распространение в световодном слое. В материале обкладок, покрывающих световодный слой, каждое последовательное отражение вызывает появление интерференционного поля стоячей оптической волны, затухающей по мере удаления от места отражения, но при этом распространяющейся на весь объём материала обкладок. Наличие самосогласованности последовательных отражений

не вызывает перевозбуждения этого материала, и поток распространяется в световодном слое практически без ослабления.

Механизм распространения квазимонохроматического оптического потока в симметричном оптическом волноводе путём многократного последовательного полного внутреннего отражения вполне ожидаем, когда ширина световодного слоя превышает поперечный размер локальных областей интерференции стоячей оптической волны. В то же время возникает вопрос, что будет наблюдаться в случае сравнимости этих размеров и дальнейшего уменьшения ширины световодного слоя – что чрезвычайно важно для нано- и радиофотоники. В этом случае произойдёт слияние локальных интерференционных областей с образованием однородного интерференционного поля стоячей радиационной волны, как это было экспериментально доказано для случая распространения потока квазимонохроматического рентгеновского излучения в узком протяжённом щелевом зазоре [30, 31, 32]. Эффект образования однородного интерференционного поля стоячей оптической волны оказывается связанным лишь с соотношением ширины световодного слоя и поперечного размера ожидаемых локальных интерференционных полей, возникающих вследствие взаимодействия падающего и отражённого от одного из интерфейсов оптических потоков. Образование этого поля, показанного на рис. 4, не связано с углом падения оптического квазимонохроматического потока на торец световода, т.е. вопрос о «магических» углах и модовой структуре транспортировки света перестает быть актуальным. Механизм распространения радиационных потоков в условиях образования однородного интерференционного поля стоячей радиационной волны во всем объёме радиационно-транспортной структуры был назван механизмом их волноводно-резонансного распространения [30]. Поскольку этот механизм не связан с углом падения радиационного потока на торец световода, он позволяет почти полностью транспортировать излучение, захваченное им в апертуре двойного критического угла полного внутреннего отражения. При этом распределение интенсивности поля стоячей оптической волны внутри световодного слоя и за его пределами визуально может быть представлено на рис. 5.



**Рис. 4.** Схематическое представление явления многократного последовательного полного внутреннего отражения квазимонохроматического оптического потока, падающего в световодный канал под углом  $\varphi$  в условиях, когда его ширина сравнивается с величиной половины длины когерентности излучения этого потока (а), что приводит к их взаимному перекрытию и образованию однородного интерференционного поля стоячей оптической волны во всем объёме световодного слоя (б). Величина  $P = \lambda_0^3 / 8\Delta\lambda^2$  является параметром выпячивания однородного интерференционного поля из световодного слоя оптического волновода

Фактическое уменьшение интенсивности потока при его транспортировке оптическим волноводом связано с потерей энергии, потраченной на возбуждение объёмов материала обкладок и потери в нём и, собственно, с поглощением в световодном слое. Оценим распределение интенсивности поля стоячей оптической волны. Допустим, что световой поток интенсивностью  $w_0$  под некоторым углом  $\varphi < \varphi_{кр}$  попадает в световодный канал шириной  $s$ . В области входного торца волновода ( $x=0$ ) происходит первое полное внутреннее отражение потока. Тогда полная интегральная интенсивность потока может быть представлена как сумма двух членов, составляющих его интенсивность в световодном слое  $L(\varphi, x=0)$  и интенсивность, связанную с возбуждением объёма материала обкладок  $M(\varphi, x=0)$ .

$$W(\varphi, x=0) = L(\varphi, x=0) + M(\varphi, x=0). \quad (15)$$

Функция  $L(\varphi, x=0)$  (см. рис. 5) может быть представлена выражением:

$$L(\varphi, 0) = \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} I(\varphi, z) dz, \quad (16)$$

где  $I(\varphi, z)$  является интенсивностью потока в световодном слое и представляется выражением:

$$I(\varphi, z) = |E_0^+|^2 \left[ 1 + R + 2\sqrt{R} \cos \delta + \frac{2\pi z}{D} \right], \quad (17)$$

в котором  $R$  определяется выражением (4), а  $D$  – выражением (9). Функция, связанная с возбуждением объёма материала обкладок волновода, может быть представлена в виде:

$$M(\varphi, 0) = 2 \int_{\lambda/2}^{\infty} I(\varphi, z) \exp\left(-\frac{z}{d_p}\right) dz, \quad (18)$$

где  $d_p$  является параметром глубины проникновения излучения в материал обкладок, определяемым выражением (7). При распространении радиационного потока в световодном слое, по мере углубления на расстояние  $x$ , его общая интенсивность  $W(\varphi, x)$  и его составляющие  $L(\varphi, x)$  и  $M(\varphi, x)$  будут уменьшаться вследствие наличия поглощения. Однако соотношение между этими величинами будет оставаться неизменным вследствие наличия однородности интерференционного поля стоячей оптической волны и неизменности интерфейсных граничных условий. Поэтому их взаимные соотношения будут связаны условиями:

$$\alpha = \frac{M(\varphi, 0)}{W(\varphi, 0)} = \frac{M(\varphi, x)}{W(\varphi, x)} = \text{const}; \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{M(\varphi, 0)}{W(\varphi, 0)} = \frac{M(\varphi, x)}{W(\varphi, x)} = \text{const}. \quad (20)$$

При этом фактор  $\beta$  оказывается связанным с поглощением в материале световодного слоя, в то время как параметр  $\alpha$  характеризует не только энергетические потери на возбуждение материала обкладок, но и поглощение в этом материале. Общие энергетические потери при транспортировке оптического потока на расстояние  $\Delta x$  могут быть представлены в следующей форме:

$$\Delta W(\varphi, \Delta x) = W(\varphi, 0) - W(\varphi, \Delta x) = M(\varphi, 0)(1 - e^{-\mu_1 \Delta x}) + L(\varphi, 0)(1 - e^{-\mu_2 \Delta x}), \quad (21)$$

где  $\mu_2$  представляет собой линейный коэффициент поглощения в материале световодного слоя, в то время как  $\mu_1$  учитывает поглощение в материале обкладки и потери на возбуждение объёмов этого материала. Разделив обе части уравнения (20) на  $W(\varphi, 0)$  и устремив  $\Delta x$  к нулю, можно получить дифференциальное соотношение, определяющее энергетические потери на единицу пути транспортирования оптического потока:

$$\frac{dW}{W} = -\frac{M(\varphi, 0)}{W(\varphi, 0)} \mu_1 dx + \frac{L(\varphi, 0)}{W(\varphi, 0)} \mu_2 dx - e^{-(\alpha \mu_1 + \beta \mu_2) x} dx. \quad (22)$$

Интегрирование этого выражения в предположении начального условия  $w_0 = W(\varphi, 0)$  позволяет получить основное уравнение для описания интенсивности потока квазимонохроматического оптического излучения:

$$W(\varphi, x) = w_0 e^{-(\alpha \mu_1 + \beta \mu_2) x}. \quad (23)$$

Поскольку поглощение оптического излучения в оптически прозрачных средах, как и энергетический вклад на возбуждение материалов в обкладках, представляет собой крайне малую величину, составляющую сотые доли процента на единицу пути транспортировки света, механизм волноводно-резонансного распространения квазимонохроматического оптического потока способен обеспечивать чрезвычайно высокую оптико-транспортную эффективность световодных структур. Ширина плоских световодных слоёв и диаметр цилиндрических световодных конструкций на практике варьируется от нескольких десятков микрометров до нескольких миллиметров. При этом длина когерентности лазерного излучения, применяемого в качестве базового инструмента для передачи информации по оптическим световодам (фибрам), составляет сотни метров. Таким образом, ширина их световодных каналов

существенно меньше половины длины когерентности оптических излучений, используемых в них для передачи информационных сообщений. Это позволяет утверждать, что оптические волноводы функционируют на основе механизма волноводно-резонансного распространения радиационных потоков, который и обеспечивает высокую оптико-транспортную эффективность этих устройств. (Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием ИПТМ РАН на 2021 год № 075-00355-21-00 при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-07-00271.)

### Заключение

В 1980 году СССР находился на третьем месте (после США и Японии) по общему объёму выпуска электроники (по военной электронике – на втором). У Китая электроники вообще не было. В 2018 году Россия произвела всего 0,8% мирового объёма электроники (и лишь 0,04% мирового объёма кремниевых пластин), в то время как в Китае производилось уже 40% её мирового объёма.

Выступая 10 декабря 2019 года в отеле InterContinental на конференции «Электроника в России: будущее отрасли», заместитель председателя Правительства РФ Юрий Иванович Борисов, более десяти лет руководивший электронной отраслью страны, довольно смело покритиковал себя за прошедшие без малого два года своего вице-премьерства и сказал: «Сегодня глупо говорить, что в России существует серийное микроэлектронное производство. Мы даже отсутствуем в статистике мировой. Китай просто строил дизайн-центры, потом отдавал их на достаточно льготных условиях дизайнерским компаниям, они арендовали ресурсы и, в конечном итоге, в долгую отбивали те инвестиции, которые государство позволяло себе вкладывать в это. Я сторонник такого пути: более агрессивной политики государства в выработке и реализации научно-технической политики в этой наукоемкой области. Это комплекс мер: прямое бюджетное финансирование, создание необходимых условий для привлечения частного капитала за счёт просто беспрецедентных мер льготного ведения бизнеса (нулевые налоги, субсидии, гранты, свободные экономические зоны – всё что угодно, всё, что мир придумал, это нужно

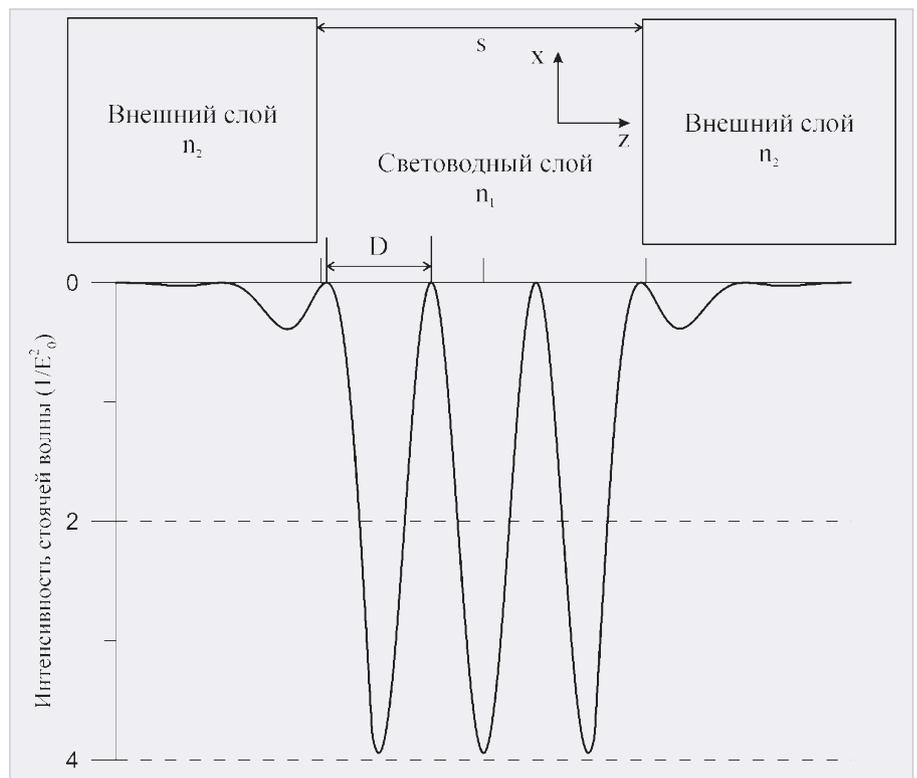


Рис. 5. Функция распределения интенсивности оптической стоячей волны в световодном слое симметричного оптического волновода и в его внешних обкладках, соответствующая падению параллельного оптического потока на его торец под углом  $\varphi < \varphi_{кр}$ ,  $d$  – ширина световодного слоя,  $n_1 > n_2$

активно внедрять), это того стоит, это окупится. Нельзя равнять наукоёмкую отрасль, каковой является электроника и микроэлектроника вообще, скажем, с деревообработкой... Россия не может не заниматься этим направлением, иначе мы потеряем все свои позиции, и вплоть до потери Государства может прийти, потому что это вопрос национальной безопасности».

С тех пор прошло ещё два года, и нам, авторам, написавшим после этого выступления Ю.И. Борисова уже десяток статей с предложениями о том, каким мы видим развитие отрасли и страны [8...14], но изначально получившим в ответ лишь немую усмешку (отписку) ДРЭП Минпромторга РФ, хотелось бы спросить Юрия Ивановича Борисова: «Ну и где же они, все эти обещания? Или это была просто очередная риторика (т.е. демонстрация ораторского искусства перед профессионалами, которые и без того всё понимают)»?

А ведь за эти потерянные нами и страной годы наши отвергнутые государством предложения по созданию частно-государственной «Физико-технической корпорации» для реализации прорывных проектов на основе предельных технологий [8...14]

(включая силовую и интегральную радиофотонику [33...35]), корпорации, в которой государство участвовало бы деньгами, а разработчики – интеллектуальной собственностью, – эти наши предложения могли бы реально «обнулить» тот непреодолимый отрыв от стран Запада и Юго-Восточной Азии, который в рамках классической кремниевой технологии страна сейчас имеет в области военной и гражданской радиоэлектроники. Наши предложения позволяли за счёт интеллектуального превосходства (даже при существующих технологических нормах российских фабрик) перейти на качественно новый уровень радиоэлектронной продукции, чисто экономически сохранив столь необходимое стране существующее полупроводниковое производство, создав при этом новое радиофотонное производство; перейти от позорного «импортозамещения» электронной компонентной базы к экспорту новой высокотехнологичной продукции.

Куда идёт российская полупроводниковая индустрия, если и слепому очевидно, что она 30 лет находится и будет находиться в состоянии стагнации, потому что в нашей стране в рам-

ках свободного рынка и открытой конкуренции с Западом при существующей финансово-экономической системе и принятой в стране денежно-кредитной политике эта индустрия в принципе ни существовать, ни развиваться не может!

А может быть, не должна? И вопрос это не риторический. В этой связи нам хотелось бы напомнить всем, что не так, как это делается сейчас, в своё время создавались электронная, атомная и космическая отрасли страны. Так не пора ли уже, как предлагается в басне И.А. Крылова (про того «Кота») [36]: «Речей не тратить по-пустому, где нужна власть употребить?»

### Сказка про стеклянные бусы и Вашингтонский консенсус

*«Devil is in the detail(s)»*

Обычно метрополия, монополично (в лице ФРС) «печатающая» твёрдую валюту и в лице своего исполнительного органа (МВФ) управляющая руководством ЦБ колониальных стран, «регулирует» экономику стран-колоний с помощью дефицита денежной массы «скоропортящихся» национальных валют, т.е. разноцветных местных «фантиков». Основным источником валюты для технологически отсталой колонии – экспорт сырья. Получаемая от экспорта валюта зачисляется на счета папуасов-экспортёров, но, как правило, хранится (на случай бунтов в колонии) в банках метрополии, что поддерживается вождями племён и колониальной администрацией в виде законов на разрешение свободного трансграничного движения капиталов.

Торговые операции в валюте внутри страны-колонии (под предлогом обеспечения независимости и суверенитета колонии) запрещаются МВФ и законами страны-колонии, навязанными метрополией (иначе сама суть эксплуатации колонии попросту исчезнет, и «стеклянных бус» ни у вождей племен, ни у самих папуасов не будет!). Поэтому по мере необходимости в реальном товарно-денежном обращении в пределах колонии папуасы-экспортёры, раньше принудительно, а теперь и как бы добровольно, вынуждены продавать валюту Центральному (ЦБ) или другим банкам и получать взамен «скоропортящиеся» «фантики» по текущему рыночному курсу, в процессе товарообменных операций постепенно распространяемые в среде папуа-

сов. Фактически при этом происходит естественная эмиссия национальных валют, т.е. выпускаемых Центробанком колонии в наличной и безналичной форме «фантиков», а сам рыночный курс «фантиков» хоть как-то, но выравнивает соотношение их покупательной способности в отношении разных мировых валют в каждый конкретный момент времени.

В результате закупки валюты у экспортёров у ЦБ колонии (независимой организации – неподвластной даже колониальной администрации!) образуется некоторое избыточное количество валюты. Этой валютой (но не только ей) и пополняется «кубышка» – золотовалютные резервы священного Резервного фонда ЦБ, которые раньше он имел право только копить себе на всякий пожарный случай (не закупать же, в самом деле, на них папуасам высокотехнологичные производства за рубежом!) или мог «сжигать» на валютной бирже, но исключительно якобы для стабилизации валютного курса. «Сжигать» (продавать) валюту – значит, в основном, дарить валюту разного рода спекулянтам. Из экономики при этом изымаются «фантики», и курс «фантиков» растёт. При закупке валюты «фантики», наоборот, вбрасываются в экономику Центробанком страны-колонии, и курс «фантиков» падает – создаётся видимость «регулирования» курса, а на самом деле происходит обыкновенная растрата, т.е. разграбление золотовалютных резервов страны-колонии. Причём в колониальных экономиках (в целях стимулирования экспорта сырья) курсы национальных валют всегда искусственно занижаются (раза в два) Центробанками стран-колоний, что губительно сказывается на всех остальных отраслях, кроме экспорта. Правда, после некоторых событий «топка печи» валютой при открытых в избе дверях и окнах и накопление «резаной зелёной бумаги» в отдельных колониях были признаны нецелесообразными, а кое-где даже священный Резервный фонд ЦБ «растворился» в других фондах (контролируемых ещё и колониальной администрацией и расходующих на все её экстренные нужды). Теоретически это делается под контролем собрания мало что понимающих во всём этом, но со всем согласных привилегированных представителей папуасов и вождей племён.

Вместе с тем «фантики» обладают свойством портиться (терять стоимость по отношению к внешней валюте и, соответственно, терять свою покупательную способность) в результате такого удивительного и стихийного (в представлении папуасов) явления, как инфляция или потеря стоимости со временем. Но инфляция – это естественный процесс, присущий капиталистической экономике, обусловленный монополизацией производства и существованием в ней паразитического «ссудного процента», являющегося узаконенной формой воровства, причём инфляция в самой метрополии бывает минимальной, а львиная её доля «экспортируется» в колонии. Инфляцию порождает не только произвол монополий, её разгоняет как сам ЦБ колоний своей ключевой ставкой, курсовой разницей и прочими «поборами», так и коммерческие банки: «ссудным процентом» и посредством банковского мультипликатора. В «социалистических» колониях, например, до «консенсуса» инфляции вообще не было. Цены каждый год снижались, и папуасы радовались этому: их благосостояние росло. Хранение валюты папуасами в банках метрополии тоже не вечно. Мало-помалу даже эту твёрдую валюту разъедает инфляция, ну а когда этой валюты будет напечатано и накопится там слишком много, неожиданно для папуасов грянет суверенный дефолт мировых валют, оставив всех их вообще «в чём мать родила».

Помимо этого, свобода трансграничного движения капиталов открывает широкие возможности специальным спекулянтам метрополии для разного рода «игр» с текущим курсом «фантиков» колоний с неугодной администрацией, что также не только разгоняет инфляцию, но иногда приводит даже к «неожиданному» дефолту «фантиков» страны-колонии, т.е. к практически полному их обнулению и, соответственно, утрате части, а то и всего ранее заработанного на экспорте. Для метрополии польза от инфляции в колонии, безусловно, есть: она уничтожает сбережения несчастных папуасов и заставляет их работать снова и снова. С другой стороны, потеря стоимости «фантиками» в результате инфляции требует всё большего их количества для нормального функционирования экономики, и при невоз-

возможности «законного» увеличения их количества возникает тот самый дефицит денежной массы «фантиков», а МВФ (ФРС) косвенно (пугая скачками курса, отлучением от «рыночной экономики» и санкциями) или явно (напрямую управляя ЦБ) запрещает ЦБ колониальных стран самим эмитировать необходимое для нормального функционирования их экономик количество собственных «фантиков». Таким образом, количество «фантиков» (денежная масса «фантиков») в колонии определяется вовсе не количеством затраченного папуасами труда и не объёмом созданных папуасами реальных материальных ценностей, как внушал им это Карл Маркс (трудись хоть с утра до ночи – «фантики» в колонии больше не станут), а определяется оно (странно?) объёмом экспорта природных ресурсов (и объёмами добычи золота и закупки его Центральным банком), чтобы метрополии из этого сырья строили рай на своей земле и устраивали войны и ад на землях колоний, делая новые высокотехнологичные «стеклянные бусы» и снова за «резаную зелёную бумагу» сбывая их папуасам.

Но денежная масса «фантиков» является кислородом, а сами «фантики» – кровью экономики страны-колонии. Её дефицит не позволяет нищим хозяйствам папуасов развиваться, а самим папуасам приобретать товары, и заставляет их отдавать последнее: свои природные ресурсы (уран, металлы, нефть, газ, лес и прочее) – тому, кто даст хоть что-то взамен («стеклянные бусы» или даже просто священную «резаную зелёную бумагу»). Причём отдавать, даже не задумываясь о том, что, продавая природные ресурсы за «резаную зелёную бумагу», они лишают будущего и своих детей, и их потомков. А «резаную зелёную бумагу», по мере необходимости в товарно-денежном обращении, со временем папуасам всё равно придётся снова менять на «фантики», тающие от инфляции с катастрофической быстротой, что в итоге и приводит к реальному обогащению эмитентов «твёрдой» валюты (метрополии), печатающих «зелёную бумагу» в неограниченных количествах, накоплению (с никому не известной целью) Центробанками стран-колоний этой священной «резаной зелёной бумаги» и к обнищанию сказочной страны «фантиков», т.е. к обнищанию страны-колонии и её папуа-

сов. Заботясь таким образом о своих колониях, метрополии даже предоставляют колониальным администрациям целевые кредиты на приобретение оружия (для усмирения бунтов и борьбы с соседними племенами) и на развитие инфраструктуры (дорог – для вывоза природных ресурсов, объектов энергетики – для выкачивания денег), которые, как правило, силами своих же компаний за эти же кредитные деньги и развивают, окончательно закабалая папуасов. Метрополиями широко используется практика инвестиций без передачи технологий, позволяющая использовать природные ресурсы колонии и бесплатный труд папуасов прямо на месте, т.е. непосредственно в колонии, оставляя там же отходы производства, собирая со всех папуасов колонии огромные деньги за произведённую ими же продукцию, расплачиваясь с колониёй копеечными налогами и вывозя в метрополию всю прибыль.

Искусственное создание дефицита денежной массы «фантиков» (сдерживающего развитие принудительно созданной «одноконтурной» экономики колонии и в первую очередь её наиболее высокотехнологичных отраслей), являющегося естественным результатом инфляции (а фактически продуктом «работы» монополий, ЦБ и коммерческих банков) и искусственно поддерживаемого МВФ (ФРС) и ЦБ стран-колоний – это и есть механизм угнетения и эксплуатации папуасов, живущих в «стране-сказке», придуманной для них специально обученными в Йельском университете посвящёнными папуасами-экономистами. Незыблемость этого механизма внедряется в сознание папуасов глашатаями-«экономистами» и охраняется колониальной администрацией. Если спросить папуаса: «Почему у вас такие убогие хижины? Глины и песка много. Что, нельзя из глины кирпичей сделать да дома построить?», папуас ответит: «Нельзя, потому что денег нет!» Если спросить: «Почему вы голодаете, почему у вас нет еды? Земли много – можно ведь посадить пшеницу и развести свиней и коров?», папуас ответит: «Нельзя, потому что нет денег!» Так и живут-прозябают веками в голоде, холоде и нищете бедные и несчастные папуасы, а зачем живут и что их ждёт – знать не знают и ведают не ведают.

Точка зрения и мнения, высказанные авторами в статье, являются оценочными суждениями и не имеют целью унижение достоинства человека, либо группы лиц, оскорбление, или запугивание кого бы то ни было. Все персонажи и события «Сказки» являются полностью вымышленными, любое сходство между ними и реальными людьми, организациями и событиями совершенно случайно.

Вот и сказке конец, а мораль её в том, что конец «сказки» не за горами.

## Литература

1. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Высотное\\_административное\\_здание\\_«НИИ\\_Дельта»](https://ru.wikipedia.org/wiki/Высотное_административное_здание_«НИИ_Дельта»).
2. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вашингтонский\\_консенсус](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вашингтонский_консенсус).
3. *Николаев А.* Кадры, которые не решают ничего // Интернет-журнал «Интересант». 2020 // URL: <https://www.interessant.ru/politics/kadry-kotoryie-nie-rieshai-1>.
4. *Садьркин П.* «Роснано» создавали для технологического прорыва. Почему его не случилось даже через 13 лет // Интернет-портал LENTA.RU // URL: <https://lenta.ru/articles/2021/01/27/rosnano/>.
5. *Экономист* // URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Экономист>.
6. Распил на 7 миллиардов: Секретные радиостанции для Минобороны оказались китайской подделкой // Интернет-портал FINANZ.RU. Новости. 2021 // URL: <https://www.finanz.ru/novosti/aktsii/raspil-na-7-milliardov-sekretnye-radiostancii-dlya-minoborony-okazalis-kitayskoy-poddelkoy-1030149397>.
7. ФСБ арестовала замглавы Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга // Интернет-портал C-NEWS. Новости. 2020 // URL: [https://www.cnews.ru/news/top/2020-09-11\\_siloviki\\_zaderzhali\\_zamglavy](https://www.cnews.ru/news/top/2020-09-11_siloviki_zaderzhali_zamglavy).
8. *Галицын А., Железнов А.* Кому нужна электронная индустрия? // Современная электроника. 2021. № 4.
9. *Галицын А.* Неуправляемые боевые роботы и беспилотники // Современная электроника. 2020. № 9.
10. *Галицын А., Рождественский А., Рождественский Д.* Системы управления с «предвидением» // Современная электроника. 2019. № 9.
11. *Галицын А.* Туманный Интернет вещей // Современная электроника. 2020. № 3.
12. *Егоров Е., Егоров В., Галицын А.* Явление и последствия волноводно-резонансного распространения и взаимодействия радиационных потоков. Ч. 1, 2 // Современная электроника. 2020. № 1, 2.
13. *Егоров Е., Егоров В., Галицын А.* Элементный анализ планарных наноструктур на

базе рентгеновской эмиссии индуцированной высокоэнергетическим возбуждением // Современная электроника. 2021. № 5.

14. *Галицын А.* IoT-радиопроектор с криптокодированием структуры радиосигнала // Современная электроника. 2019. № 7.

15. *Ньютон И.* Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. М.: ОНТИ, 1927. 371 с.

16. *Френель О.* Избранные труды по оптике / под ред. акад. Г.С. Лансберга. М.: ГИТТЛ, 1955. 607 с.

17. *Кизель В.А.* Отражение света. М.: Наука, ГРФМЛ, 1973. 351 с.

18. *Born M., Wolf E.* Principles of optics, electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction light. Oxford: Pergamon Press, 1993. 808 p. (Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, ГРФМЛ, 1973. 719 с.).

19. *Paniagua-Dominguez R., Yu Y.F., Krivitsky L., Fu Y.H.* Generalized Brewster effect in dielectric metasurfaces // Nature Communication, 7:10362, 2016, pp. 111.

20. *Brewster D.* On the laws which regulate the polarization of light by reflection from

transparent bodies // Philos. Trans. R. Soc. Lond, v105, 1815, pp. 125–159.

21. *Шеффер К.* Теоретическая физика. Т. 3, ч. 2, Оптика. М.: ГОНТИ, 1938. 538 с.

22. *Milosevic M.* Internal reflection and ATR spectroscopy. Hoboken, New Jersey: Wiley and sons, 2012. 239 p.

23. *Goos Von F., Hanchen H.* Ein neuer und fundamentaler versuch zur totalreflexion // Annd. der Physik, 6 folge, band 1, heft 7-8, 1947, pp. 333–346.

24. *Jakiel J., Kantor W.* Quantum (not frustrated) theory of the total internal reflection as the source of the Goos-Hanchen shift // Eur. Phys. Journal (D), v68, 2014, pp. 305–316.

25. *Unger H.G.* Planar optical waveguides and fibres. Oxford: Clarendon Press. 1977, 648 p. (Унгер Х.Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980. 656 с.).

26. *Yen P.* Optical waves in layered media. New York: Wiley, 1988. 406 p.

27. *Mandel L., Wolf E.* Optical coherence and quantum optics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995. 631 p. (Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Физматлит, 2000. 895 с.).

28. *Francon M., Slansky S.* Coherence en optique. Paris: Ed. Centre Nat. Rech. Sci. 1965, 77 p. (Франсон М., Сланский С. Когерентность в оптике. М.: Наука, 1967. 80 с.).

29. *Kaczmarek F.* Wster do fizyki laserow. Warszawa: Pans. Wyd. Nauk. 1979. 527 p. (Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1980. 540 с.).

30. *Egorov V.K., Egorov E.V.* Waveguide-resonance mechanism for X-ray beam propagation: physics and experimental background // Advances in X-ray analysis, v46, 2003, pp. 307–313.

31. *Egorov V.K., Egorov E.V.* Экспериментальные исследования и модель формирования рентгеновских пучков наноразмерного диапазона // Поверхность (рент., синх. и нейтр. исследования). 2005. № 12. С. 24–46.

32. *Egorov V.K., Egorov E.V.* Planar X-ray waveguide-resonator features // Trends in appl. Spect. V8, 2010, pp. 67–83.

33. *Гордеев А.И.* Перспективные терагерцовые поляризованные информационные системы. В 2 ч. // Современная электроника. 2016. № 6, 7.

34. *Гордеев А.И.* Проблемы становления российской цифровой экономики и способы исключения ошибок при их решении // Современная электроника. 2019. № 2.

35. *Гордеев А.И.* Как завоевать мировой рынок электроники в посткремниевую эпоху? // Современная электроника. 2021. № 5.

36. *Крылова И.А.* Басня «Кот и повар» // URL: <https://deti-online.com/basni/basni-krylova/kot-i-povar/>.



## Магнитодиэлектрики MICROMETALS

### Применение сердечников Micrometals гарантирует:

- снижение стоимости индуктивных компонентов
- повышение надёжности аппаратуры
- снижение потерь на 30...50% по сравнению с ферритами
- оптимизацию конструкции и уменьшение габаритов индуктивных компонентов



**PROCHIP**  
POWERED BY PROSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА  
(495) 232-2522 • INFO@PROCHIPRU • WWW.PROCHIPRU



Реклама



# ЧИТАЙТЕ В КОМФОРТЕ



**ПЕЧАТНАЯ ВЕРСИЯ ЖУРНАЛА «СТА»**

**подписка с гарантированной доставкой**



онлайн: [www.cta.ru](http://www.cta.ru) • +7 495 234-0635 • [info@cta.ru](mailto:info@cta.ru)

на почте: по каталогу «Урал-Пресс» (на год – 81872, на полугодие – 72419)

## НОВОСТИ МИРА

## Цюрихский университет научил дрон летать по незнакомому лесу на скорости 40 км/ч

Учёные из Цюрихского университета разработали новый подход к автономному полету квадрокоптеров в неизвестных и сложных условиях на высоких скоростях. Они использовали только бортовые измерения и вычисления. В итоге автономный квадрокоптер смог исследовать через ранее невидимые среды, пролетая над лесами, зданиями, руинами и поездами, но сохраняя при этом скорость до 40 км/ч и не врезааясь в препятствия.



Исследователи отмечают, что новый подход может быть полезен в чрезвычайных ситуациях, а также на строительных площадках. Проблема использования автономных дронов кроется в том, что им необходима навигация, которую обычно осуществляет опытный человек-пилот.

В Цюрихском университете создали алгоритм, который обучает квадрокоптер полетам в реальном мире только с помощью бортовых камер и вычислений. Нейросеть наблюдает за своего рода «смоделированным экспертом» – алгоритмом, который управляет созданным компьютером дроном в смоделированной среде, полную сложных препятствий. Алгоритм получал полную информацию о состоянии квадрокоптера и показаниях его датчиков, что позволяло ему находить лучшую траекторию.

В итоге данные «симулированного эксперта» применили для обучения алгоритма планированию в реальной среде. После обучения моделированию система была протестирована. «В то время как людям требуются годы для обучения, ИИ, используя высокопроизводительные симуляторы, может достичь сопоставимых навигационных способностей намного быстрее, в одиночку», – говорит Антонио Локерчио, аспирант и соавтор исследования. «Интересно, что эти симуляторы не обязательно должны быть точной копией реального мира. При правильном подходе будет достаточно даже упрощенных вариантов», – добавляет Элия Кауфманн, другой соавтор.

Исследователи объясняют, что тот же подход может быть полезен для повышения производительности автономных автомобилей или даже может открыть дверь к новому способу обучения систем искусственного интеллекта для работы в областях, где сбор данных затруднен или невозможен, например, на других планетах.

Теперь они займутся улучшением полетов дронов, а также разработкой более быстрых датчиков, которые смогут предоставить больше информации об окружающей среде за меньшее время.

Ранее исследователи Цюрихского университета показали, как обученный с помощью их алгоритма дрон обогнал двух опытных пилотов-людей на гоночной трассе.

*habr.com*

## Руководитель TSMC назвал истинную причину дефицита микросхем

Председатель правления TSMC Марк Лю (Mark Liu) в недавно опубликованном интервью журналу TIME Magazine назвал одну из причин дефицита микросхем. Похоже, что наряду с естественными факторами, нарушившими нормальную работу отрасли, действуют и искусственные.

Когда автопроизводители, одними из первых ощутившие нехватку полупроводниковых изделий, обвинили TSMC в неспособности обеспечить необходимые объемы выпуска, Лю поручил своим подчинённым собрать данные, чтобы попытаться выяснить, что происходит. Как оказалось, у некоторых заказчиков из канала поставок запасы действительно заканчивались, но другие в то же время накапливали продукцию на складах.

В результате в TSMC решили перераспределить мощности в пользу первой категории клиентов. Судя по всему, это решение было непопулярным, но, учитывая текущую ситуацию, оно кажется справедливым. По словам Лю, «есть люди, которые определённо накапливают микросхемы неизвестно где в цепочке поставок», то есть на самом деле проблема не в TSMC и не в возросших потребностях конечных пользователей полупроводниковой продукции, а в посредниках и дистрибуторах, которые накапливают микросхемы на складах, чтобы поднять цены.

*ixbt.com*

## Рост цен на медную фольгу заметно поднимет стоимость недорогих материнских плат

Тайваньские источники время от времени упоминают о новых негативных фак-

торах, способных усугубить и без того сложную ситуацию в отрасли по производству электронных компонентов. Рост цен на медную фольгу, которая активно применяется при производстве текстолита (основа любой печатной платы), в большей степени почувствуют на себе покупатели недорогих материнских плат, а вот в верхнем ценовом сегменте этот фактор просто утонет в более заметном влиянии других.

Публикация ресурса DigiTimes на тему роста цен на медную фольгу и ламинат, из которого делают печатные платы электронных устройств, заставила представителей сайта Tom's Hardware попытаться определить, как этот фактор повлияет на стоимость материнских плат и видеокарт – изделий, максимально использующих медную фольгу и текстолит. В случае с видеокартами цены и так высоки из-за спроса со стороны участников криптовалютного рынка, и на нынешних уровнях влияния со стороны цен на медную фольгу они не почувствуют.

Отчасти подобное утверждение справедливо и в отношении дорогих моделей материнских плат. В структуре их себестоимости цена активных электронных компонентов существенно перевешивает долю пассивных элементов и текстолита. С четвёртого квартала 2020 года стоимость медной фольги выросла на 35 %. Предположим, если средняя материнская плата с восьмислойным текстолитом использует 184 грамма меди, то сама стоимость этого материала с декабря прошлого года выросла с \$1,42 до \$1,70, что не так уж много. Другое дело, что к этой сумме нужно добавить накладные расходы, и тогда в форме медной фольги доля этого материала в себестоимости материнской платы уже может возрасти до \$54. Словом, даже если стоимость фольги увеличилась с конца прошлого года на 10 %, то в ценовом сегменте от \$100 до \$200 результирующее повышение цены материнской платы будет заметным для целевой покупательской аудитории.

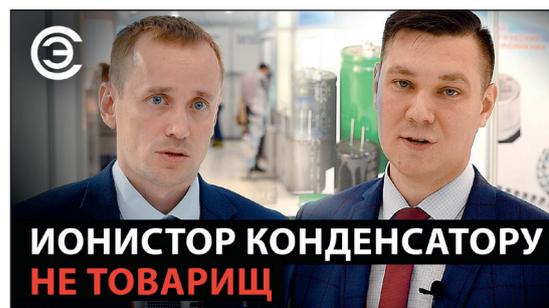
Медь в условиях электрификации транспорта, перехода на «зелёную» энергетику и распространения сетей связи 5G будет востребованным материалом, и цены продолжат расти. Адекватной альтернативы меди в качестве проводника в этом случае нет, поэтому к росту цен на электронику придётся привыкать.

*echemistry.ru*

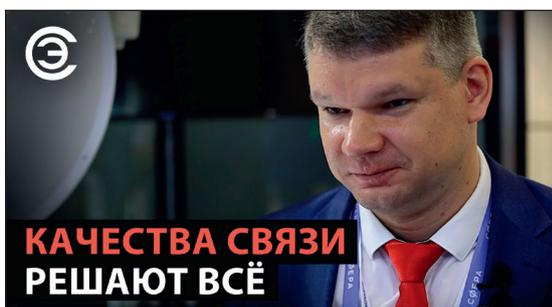
Смотрите на канале **СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**



«...С 1998 года GETAS поставляет защищённые ноутбуки в Министерство Обороны России...»



«...Суперконденсаторы выдерживают до 500 000 циклов перезарядки. Это надёжный резервный источник питания...»



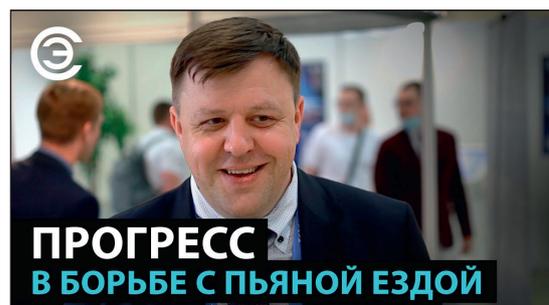
«...Наши системы радиорелейной связи используются на газопроводе «Сила Сибири». Это полностью российское оборудование...»



«...Нам важен контроль качества. Rohde & Schwarz полностью производит свои приборы сам и поэтому мы уверены в своей продукции...»



«...Разработчик сделал, конструктор сконструировал, на этапе контрактного производства всегда начинаются проблемы...»



«...Система имеет многоуровневую защиту. Фотографией, выдохом пассажира или воздухом из воздушного шарика её не обманешь...»

НОВОСТИ МИРА

**ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЗАВОД НАЧНЁТ СЕРИЙНО ПРОИЗВОДИТЬ БЕСПИЛОТНЫЕ ТРАКТОРЫ В 2022 ГОДУ**

Петербургский тракторный завод в следующем году запустит серийное производство беспилотных тракторов. Об этом сообщила компания Cognitive Pilot, которая подписала с ним соглашение. По контракту Cognitive Pilot оснастит обновлённую модель трактора «Кировец» системами автопилотирования на базе искусственного интеллекта.



Cognitive Pilot – дочернее предприятие Сбера и Cognitive Technologies. Последняя разработала систему управления для беспилотного трактора, который в 2016 году испытали в Татарстане. Машину оснастили парой камер, датчиками позиционирования ГЛОНАСС и GPS и вычислительным блоком для обработки данных.

Эта система во время предпосевных работ составляла карту рабочей площади и наносила на неё объекты и препятствия размером от 10...15 сантиметров на расстоянии до 15...20 метров. После этого трактор мог работать самостоятельно, в том числе в условиях недостаточной видимости или при сборке урожая.

6 октября Cognitive Pilot сообщила о контракте с Петербургским тракторным заводом на производство трактора «Кировец» с системами автопилотирования на базе искусственного интеллекта Cognitive Agro Pilot. Эта система должна увеличить производительность трактора на 15...20 процентов.

«Кировцев» начнут серийно оснащать первой версией системы автопилотирования с февраля 2022 года. Её уровень автономности примерно соответствует третьему автомобильному – он позволяет управлять основными процессами, такими как движение трактора. Тракторы с первой версией Cognitive Agro Pilot смогут двигаться по установленной траектории в автономном режиме, автоматиче-

чески контролировать оптимальную скорость, останавливаться перед препятствиями и работать в условиях недостаточной видимости.

На втором этапе уровень их автономности повысят до четвёртого автомобильного. Тракторы смогут автономно разворачиваться, автоматически рассчитывать оптимальный маршрут и уточнять курс по визуальным ориентирам, но водитель в них по-прежнему будет присутствовать. Вторая версия автопилота также позволит анализировать состояние почвы и культур.

Полностью беспилотными «Кировцы» станут только к третьей версии Cognitive Agro Pilot, которая должна быть готова к 2024 году. Тракторы смогут работать в группах с «лидером», ездить по дорогам необщего пользования и автономно двигаться в паре с комбайнами без системы автономного управления. Кроме того, им станет доступен расширенный набор сельскохозяйственных орудий.

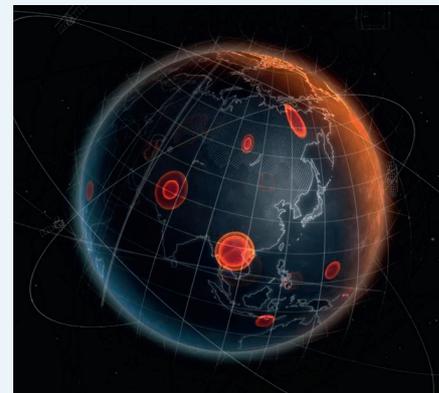
vpk.name

**КОСПАС-САРСАТ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ! ТЕПЕРЬ ПОПАВШИЕ В БЕДУ УЗНАЮТ, ЧТО СИГНАЛ ПРИНЯТ**

Бортовой радиокomплекс поиска и спасания (БРКС) нового поколения для среднеорбитального российского сегмента международной космической системы КОСПАС-САРСАТ разработали специалисты холдинга «Российские космические системы» (РКС, входит в Госкорпорацию «РОСКОСМОС»). Теперь аппаратура не только доставит в спасательные службы мира оперативную информацию о точном местонахождении самолётов, морских судов и людей, терпящих бедствие, но также по новому каналу обратной связи сообщит, что сигнал принят и помощь в пути.

Разработанный в РКС спасательный радиокomплекс устанавливается на модернизированные навигационные спутники системы ГЛОНАСС. Помимо штатного канала ретрансляции, который передаёт в систему КОСПАС-САРСАТ данные от аварийного радиобуя, радиокomплекс получил новый канал обратной передачи данных – канал «квартирования». Российские наземные технические средства смогут передавать на бортовую аппаратуру подтверждение о получении системой КОСПАС-САРСАТ сигнала радиобуя, оснащённого приёмной навигационной аппаратурой ГЛОНАСС.

Бортовой радиокomплекс далее обеспечит передачу этого подтверждения в массиве данных штатного навигационного сигнала, который будет принят активированным аварийным радиобуем. Так, система даст знать, что сигнал буя «услышан» системой КОСПАС-САРСАТ, и помощь уже в пути. Такая обратная связь поможет поддерживать активное психоэмоциональное состояние попавших в бедствие и позволит снизить вероятность необдуманных действий и деструктивной паники.



Главный конструктор направления бортовой аппаратуры поиска и спасания РКС Сергей Букин: «Как ответственные за отраслевые стандарты, при создании новой аппаратуры мы сделали акцент на унификации наших решений. Такой подход сократил сроки разработки, уменьшил количество применяемых комплектующих, позволил использовать единые схемотехнические решения к установке нашей аппаратуры на различные космические платформы».

В отличие от спутников на низкой орбите, относительно малое число которых в системе КОСПАС-САРСАТ неизбежно создаёт «слепые зоны» и длительные (в некоторых случаях до 2...3 часов) задержки передачи данных в службы поиска и спасания, удалённость спутников от Земли на расстояние 20 тысяч километров и многочисленность группировки позволяет новой среднеорбитальной составляющей КОСПАС-САРСАТ охватить и непрерывно принимать сигналы со всей территории Земли в реальном времени.

Международная спутниковая система поиска и спасания КОСПАС-САРСАТ почти 40 лет успешно помогает спасать человеческие жизни. С момента запуска в 1982 году первого спутника с аппаратурой поиска и спасания разработки РКС с помощью этой системы спасено более 50 тысяч человек по всей планете.

russianspacesystems.ru

## НОВОСТИ МИРА

## Новый оптический «ТРАНЗИСТОР» УСКОРИТ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ТЫСЯЧУ РАЗ ПРИ МИНИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТАХ

Международная научная группа во главе с исследователями из Сколтеха и IBM создала чрезвычайно энергоэффективный оптический переключатель, который мог бы заменить электронные транзисторы в новом поколении компьютеров, оперирующих фотонами, а не электронами. Переключатель не только напрямую сберегает энергию, но и не требует охлаждения и притом очень быстро работает: способный выполнять триллион операций в секунду, он в 100...1000 раз быстрее, чем самые производительные современные коммерческие транзисторы. Результаты исследования, поддержанного Российским научным фондом, опубликованы в научном журнале Nature.

«Новое устройство чрезвычайно энергоэффективно благодаря тому, что для его переключения требуется всего несколько фотонов», – прокомментировал первый автор исследования, Антон Заседателев. «На самом деле, в лабораториях Сколтеха мы добились переключения даже одним фотоном при комнатной температуре, – добавил профессор Павлос Лагудакис, возглавляющий лабораторию гибридной фотоники в Сколтехе. – Тем не менее предстоит пройти долгий путь от наблюдения эффекта в лаборатории до разработки реальных полностью оптических сопроцессоров».

Поскольку фотон – мельчайшая существующая в природе частица света, учёные, по сути, подошли к пределу энергоэффективности. Если говорить об электрических транзисторах, то большинство из них сегодня требуют в десятки раз больше энергии для переключения, а те, что достигают сопоставимой эффективности за счёт совершения манипуляций с одиночными электронами, работают намного медленнее.

Конкурирующие энергосберегающие электронные транзисторы не только проигрывают в производительности, но и нуждаются в громоздком охлаждающем оборудовании, которое, в свою очередь, потребляет дополнительную энергию и увеличивает эксплуатационные расходы. Новый переключатель может работать при комнатной температуре и, следовательно, не подвержен этим проблемам.

В дополнение к своей основной функции переключатель может работать как связывающий устройства компонент, который передаёт данные между ними в виде оптических сигналов. Он также может служить

усилителем, увеличивая интенсивность входного сигнала до 23 тысяч раз.

Устройство использует два лазера, чтобы установить своё состояние на уровне «0» или «1» и переключаться между ними. Концептуально это работает так, что очень слабый контрольный лазерный луч используется для включения или выключения другого, более яркого лазерного луча. Для этого в контрольном луче требуется всего несколько фотонов, чем и обусловлена высокая эффективность устройства.



Но сложность состоит в том, что лазеры сами по себе не способны оказывать влияние друг на друга из-за ничтожно слабого взаимодействия фотонов. Для того чтобы реализовать концепцию переключения, нужна некая среда. В нашем случае переключение происходит внутри микрорезонатора – органического полупроводникового полимера толщиной 35 нанометров, зажатого между неорганическими структурами с высокой отражающей способностью. Микрорезонатор построен таким образом, чтобы как можно дольше удерживать входящий свет внутри и усиливать его взаимодействие с веществом (органическим полимером).

Именно сильное взаимодействие света с веществом и обеспечивает функционирование нового устройства. Когда внутри резонатора фотоны взаимодействуют со связанными электронно-дырочными парами (экситонами), возникают экситон-поляритоны – гибридные состояния света и вещества с очень малым временем жизни, которые относятся к так называемым квазичастицам и лежат в основе работы переключателя.

Когда лазер накачки – более яркий из двух – светит на переключатель, в одном и том же месте создаются тысячи одинаковых квазичастиц, образуя так называемый конденсат Бозе-Эйнштейна, который кодирует логические состояния «0» и «1» устройства.

Чтобы переключаться между двумя уровнями устройства, команда использовала контрольный лазерный импульс, создающий условия для возникновения конденсата незадолго до появления лазерного импульса накачки. Таким образом, контрольный

импульс увеличивает эффективность преобразования энергии лазера накачки, что, в свою очередь приводит к большему количеству квазичастиц в конденсате. Большее количество частиц соответствует логическому уровню «1» устройства.

Для снижения энергопотребления учёные использовали ряд хитростей. Во-первых, эффективному переключению способствовали колебания молекул полупроводникового полимера. Трюк состоит в том, чтобы согласовать энергию частиц накачки и энергию частиц в конденсате при помощи молекулярных колебаний в полимере внутри резонатора. Во-вторых, команде удалось найти оптимальную длину волны лазеров и внедрить новую схему измерения, позволяющую регистрировать состояние конденсата в каждой отдельной реализации. В-третьих, формирующий конденсат контрольный лазер и схема детектирования были согласованы таким образом, чтобы минимизировать шум от фонового излучения устройства. Эти меры максимально улучшили показатель «сигнал – шум» устройства и предотвратили поглощение избыточной энергии в микрорезонаторе, избежав тем самым чрезмерного нагрева устройства.

«Нам предстоит работа по снижению общего энергопотребления устройства, в котором в настоящее время доминирует лазер накачки, поддерживающий переключатель в активном состоянии. Одним из перспективных способов достижения этой цели могут быть перовскитные суперкристаллические материалы, подобные тем, которые мы исследуем с коллегами. Они отлично подходят для этой цели, поскольку обеспечивают сильное взаимодействие света с веществом и, как следствие, мощный коллективный квантовый отклик в виде сверхизлучения», – заявили исследователи.

Авторы исследования подчёркивают важность предложенного принципа оптического однофотонного переключения: он может быть распространён на другие полностью оптические компоненты, которые коллектив разрабатывает последние несколько лет. В числе прочего их набор включает различные логические вентили, каскадный усилитель и кремниевый волновод с малыми потерями для переноса оптических сигналов между транзисторами. Разработка такого рода компонентов планомерно приближает нас к появлению оптических компьютеров, которые будут манипулировать фотонами, а не электронами, и за счёт этого работать быстрее традиционных вычислителей и расходовать меньше энергии.

skoltech.ru