

Перспективные фотонные и фононные отечественные технологии для терагерцовых микропроцессоров, ОЗУ и интерфейса со сверхнизким энергопотреблением

Александр Гордеев, Виктор Войтович, Геннадий Святец

Статья раскрывает уникальные возможности России в области терагерцовых цифровых технологий – базовой основы будущей терагерцовой цифровой экономики с инструментами в виде искусственного интеллекта, 7G, модуляции окружающей терагерцовой среды обитания человека.

Введение

Новая технология откроет перед обществом абсолютно новые возможности, и её можно считать прорывной, поскольку её целью является превращение мегаваттных по энергопотреблению эксафлопсных компьютеров типа суперкомпьютера «Ломоносов» (МГУ, г. Москва) или «Кристофари» (Сбербанк) в обычное рабочее место студента МИФИ или работника Сбербанка.

Россия, как ни одна другая страна в мире, обладает достаточными технологическими возможностями и могла бы начать такую разработку значительно раньше появления программы «Росатома» по созданию квантового компьютера (2019–2024 гг., 24 млрд руб.). В России давно уже есть основа основ для этих целей – фотонные и фононные материалы. Вопрос заключается в культуре общества, культуре тех людей, которые разрабатывают Национальные Программы будущего. Выстраивать новейшую национальную технологическую платформу никогда не поздно. Учитывая, что правительство несёт огромное бремя по пандемии «SARS-Cov-2», мы озвучиваем предложение к крупнейшим банкам РФ, таким как Сбербанк, Газпромбанк, ВТБ, ВЭБ и др., рассмотреть возможность финансирования фотонно-фононного цифрового проекта с последующими подпрограммами в виде 7G, систем распознавания образов для искусственного интеллекта в «чёрноволновом», сугубо индивидуальном излучении человеческого тела (взамен тушикового направления – нейросетей или «чудотворных» биометок) и «зелёной» энергобиосреды обитания человека.

Проблемы с «цифрой»

С точки зрения наноэлектронных технологий Россия – третьеразряд-

ная страна с микроэлектронной технологией в 95 нм в сравнении с 3-нм процессорами фирм TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) или Samsung, Intel, IBM.

Уровень отечественной электроники и её место на мировом рынке были подчеркнуты вице-премьером Ю.И. Борисовым на конференции «Электроника в России: будущее отрасли» в декабре 2019 г. «Сегодня глупо говорить, что в России существует серийное микроэлектронное производство. Мы даже отсутствуем в мировой статистике», – отметил он. И буквально через месяц была принята «Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» (Распоряжение Правительства РФ от 17.01.2020 № 20-р), которая предусматривает (цитируем): «разработку изделий по кремниевой технологии с топологической нормой 5 нм с последующим выпуском изделий на их основе на зарубежных фабриках и переносом производств в Российскую Федерацию». Что намечается переносить – технологию компании TSMC от 2019 года (5 нм)? Или забыт печальный опыт с MC-21?

Если собственных процессорных чипов нет, то нет и базы под терагерцовую цифровую экономику [1], [2]. Если нет фундамента – процессорного чипа, то на чём строить цифровые технологии? На так называемой «цифровой трансформации»? Всем известно, что Программа импортозамещения (Приказ Минпромторга от 31.03.2015 № 662) не достигла плановых показателей в той же субмикронной технологии – освоение 28-нанометровой технологии в 2018 году. Отметим, что по предыдущей Стратегии развития отечественной электроники до 2025 года

от августа 2007 г. предусматривалось освоение 10-нм технологии в 2023 году.

И хотя программа импортозамещения в целом была огромным шагом вперед, но, с учётом геополитики (как непредвиденный враждебный акт против отечественной экономики), мы можем получить иски от ЕС на \$290 млрд (полугодовой объём углеводородного экспорта).

В настоящее время мы вынуждены использовать принципы «фаундри»-технологии, заказывая по нашим топологическим нормам и «зашивкам» микропроцессорные чипы фирме TSMC, которая обеспечивает 50% мирового рынка микропроцессоров. И конечно, при доле заказа РФ, составляющей тысячные доли % от оборота TSMC, ожидать долговременных гарантий на поставку чипов очень сложно, тем более что наблюдаются постоянные визиты в TSMC высокопоставленных чиновников из США с целью переноса производства микропроцессоров в США (хотя TSMC продумывает и просчитывает геополитическую ситуацию, связанную с материковым Китаем и уже строит свои филиалы в Японии и США). Сложно прогнозировать будущее наших «Байкалов» и «Эльбрусов», т.е. не всё безоблачно даже в текущем десятилетии.

Также важно подчеркнуть, что TSMC и Intel замахиваются на 3D MOSFET-технологию с топологической нормой в 1,0 нанометра. А на её освоение в России (чип) совместно с Белоруссией (оборудование) потребуется как минимум \$50 млрд или три четверти консолидированного оборонного бюджета. Такими свободными ресурсами наша экономика пока не обладает.

Однако добавим «ложку дёгтя» в «кулоновские» процессоры той же фирмы TSMC. Это связано с тем, что при полной загрузке даже 5-нм процессорный чип потребляет несколько сотен ватт электроэнергии, а процессорный чип с проектной нормой в 1,0 нанометр и количеством транзисторов порядка 0,2 триллиона – это по мощности эквивалент электрического утюга. И, конеч-

но же, возникают проблемы не только с теплоотводом. Предположим, что вы используете 16-ядерный компьютер с однананометровым процессором, тогда возникает угроза возгорания, поскольку на практических терагерцах такой процессор потребляет десятикиловаттные уровни электроэнергии с частотой 50 Гц, преобразованной хотя бы в СВЧ ВИП порядка 1,0 гигагерц, – мы должны иметь серию блоков ВИП с энергоплотностью до 200 кВт/дм³. Добавим сюда и электромиграцию в топологических многоуровневых проводящих дорожках, имеющих вероятный контакт с активными зонами транзистора $\approx 2 \times 2$ нанометра, или 4×10^{-14} см², т.е. мы можем иметь поточный ток через единичный транзистор не более 20...40 наноампер или в целом через общий кристалл процессора (при полной загрузке) – ток порядка 800 А.

Следовательно, не всё так просто выглядит с применением 0,2 триллионных по плотности транзисторов – процессоров фабрики TSMC.

Другими словами, «софт» – это один вопрос, а «электроника» – другой, включая флюенсовые СВЧ ВИП, которые на кремнии создать невозможно. Кроме того, необходимо обратить внимание на соседний с микропроцессором (грубо говоря – вычислителем) элемент в виде DMOS (diffused metal-oxide semiconductor) ОЗУ, который по плотности транзисторов на чип мало уступает главному «мозгу» цифровой системы.

Можно ли пойти другим путём, поставив следующие задачи:

- 1) снизить энергопотребление терагерцового компьютера (львиная доля которого приходится на процессорный чип);
- 2) сократить размеры будущих терагерцовых компьютеров хотя бы до уровня габаритов ноутбука;
- 3) довести скоростные характеристики «вычислителя» и ОЗУ до уровня десятков/сотен Тбит/с?

Всё это возможно. Но для этого необходимо следующее:

- общая культура;
- глубокие знания в области ФТТ и ядерной физики;
- наличие материально-технологической базы;
- финансирование;
- политическая воля.

Многие компании мира, в частности IBM, Microsoft, Intel, Honeywell, Amazon, D-Wave, а также наши отечественные госкорпорации («Росатом», «Ростех»), ВУЗы и инновацион-

ные центры (МФТИ, МГУ, «Сколково», Российский квантовый центр) заняты решением задач по созданию так называемых квантовых компьютеров. Первую модель квантового компьютера создал великолепный физик, лауреат Нобелевской премии Ричард Фейнман (США), а в СССР этой проблемой занимался известный во всём «электронном» мире физик К.А. Валиев, с которым один из авторов этой статьи лично обсуждал вопросы создания квантового компьютера и физику его работы.

Физические принципы создания квантовых компьютеров, на которых разрабатываются их конструкции, следующие: 1) спинтроника (спиновая электроника); 2) сверхпроводимость; 3) фотоника; 4) одиночные атомы (холодные ионы).

Не будем вдаваться в подробности каждого метода, будь то квантовая запутанность и телепортация спин-энергосостояния, или ридберговский атом рубидия (Rb), или куперовские пары. Подчеркнём лишь то, что практически во всех вышеназванных методах реализации «квантовой цифры» на кубитах (квантовых битах в сочетании с принципом Гейзенберга) нужны очень низкие криогенные температуры и танки (резервуары) с жидким азотом, а также теплоизолирующие саркофаги. Кроме того, квантовая запутанность на кубитах может давать сбой при малейшем отклонении условий для кубитного исчисления, хотя в узком применении такие машины незаменимы, например, в квантовой химии, криптографии, медицине, космических расчётах и др.

Фотоника стоит особняком, но и здесь имеются проблемы, такие как:

- проблема волноводного распределения фотонов от ЛД (лазерного диода);
- рассеяние и затухание «света»;
- размывание «колокола» светового импульса;
- мощность ЛД;
- отсутствие «светового» по скорости ОЗУ;
- медленный интерфейс;
- очень медленный (на три порядка «не успевающий» за оптическим (фотонным) микропроцессором) АЦП.

Можно ли решить вышеуказанные проблемы? Да, это можно сделать на основе нетрадиционной безынджектционной фотоники.

В России всё для этого есть. Подчеркнём – в России всё есть для реализации терагерцового, не криогенного, с низким энергопотреблением суперкомпью-

тера в формате планшета. Далее приведём некоторые детали по этому вопросу.

Общие физические и технологические принципы построения сверхкомпактного настольного суперкомпьютера с низким энергопотреблением

Этой проблемой также занимаются во многих странах мира, в частности, выстраивая цифровые вычисления на методе Фурье, исчислении на основе римских цифр и других. «Аналоговая цифра» – это далеко не иллюзия, и она, в принципе, создаёт условия для реализации скоростей как тера-, так и петабит/с, в том числе с переходом на мультикодовое исчисление.

Мы, с учётом понимания отечественных подходов к созданию квантового суперкомпьютера, немного усложнили себе задачу и предлагаем построение суперкомпьютера на следующих физических принципах и конструктивно-технологических решениях, на что не требуется около трети млрд долларов, с итоговой «квантовой запутанностью», а именно:

- 1) создание квантово-точечных локальных безынджектционных когерентных спин-противофазных 2-фотонных генераторов (с нулевой амплитудой световой волны);
- 2) принцип Паули для s-электронов;
- 3) авторская теория мультизонной проводимости (дополнение к зонной теории: от У. Шокли до Ж.И. Алфёрова [3]);
- 4) эффекты Штарка и Франца Келдыша (сверхполевое туннелирование зона/зона);
- 5) авторская теория цифровой фотоники [4] на базе основ теории поляризации в твёрдых телах [4], явления усиления света в твёрдых телах [5];
- 6) теория терагерцового транспорта электромагнитной энергии [4] в диэлектрических кристаллах, содержащих атомы Ga, или Al, или одновременно;
- 7) исключение «шариковой» модели атома по Резерфорду – Бору (это уже вчерашний день) или возврат к неопределённости Гейзенберга;
- 8) теория Ричарда Фейнмана о физическом вакууме, точнее, об энергии «твёрдого вакуума» в диэлектриках (межатомном пространстве, достигающем от 25% в AlN и до 34%, например, в i-GaAs);
- 9) квантово-точечная энергия Пойнтинга при построении релятивистского ОЗУ (RAM);
- 10) явление комнатной сверхпроводимости в нанослоевых атомных пе-

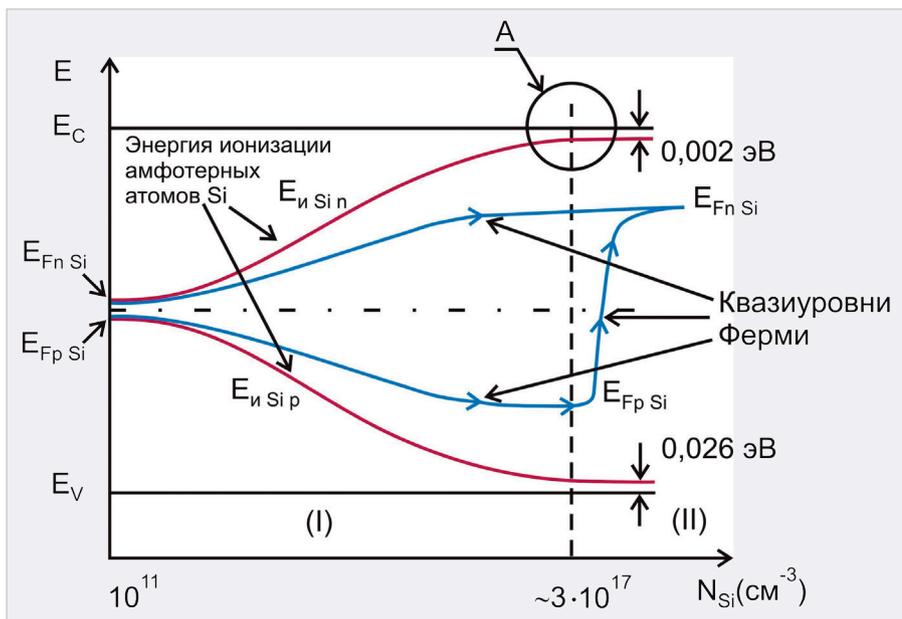


Рис. 1. Зонная диаграмма и квазиуровни Ферми кремниевых квантово-ямных центров

реходах $A_{IV}V_{IV}/A_{IV}$ и телепортации на s-электронной жидкости [6];

11) гибридизация и моно-/гетерокристаллографическая совместимость 2-фотонного квантово-точечного генератора с цифровой и логической квантово-точечными ячейками;

12) скин-фазная логика в металлах, стоящих правее атома водорода в ряду восстановления;

13) исключение постулата о «потолке» скорости света по Эйнштейну в твёрдых телах – как ненужной и консервативной догмы, что проявляется при поляризации по Клаузиусу – Москотти [7];

14) фотонные запрещённые зоны с минимумом энергощели до размеров толщины фронта волны (ангстремы);

15) теории Блоха и Брэгговских решёток;

16) эффект Поккельса.

Понимание теории и физических законов, изложенных выше в п. 1–16, предоставляет возможность реализовать суперкомпьютер в формате планшета, т.е. квантовый компьютер без применения «саркофагов» и т.п.

Фотонные и фононные кристаллы

К фотонным и фононным материалам относятся:

- 1) LPE $i\text{-}_{Si}\text{GaAs}_{Si}$, т.е. арсенид-галлиевый изолятор с $\rho \geq 10^9$ Ом·см с «тройной» подрешёткой Ga, As и слабодисперсной биузловой подрешёткой Si в GaAs; с атомной поляризацией атома Ga $\approx 146 \times 10^{-30}$ м (для сравнения – атом Li в ниобате лития LiNbO_3 имеет практически такой же коэффициент поля-

ризации – 151×10^{-30} м [4]). При этом необходимо учитывать, что при поляризации атом Ga может быть «раздут» полевой энергией в два раза эффективнее, чем, допустим, атомы Rb (по Ридбергу) для квантово-кубитной запутанности – квантовые компьютеры на ионах. Построение квантового компьютера на ионах Ga или квантово-ямных магнитно-атомных центрах лантаноидов в GaAs (спин-комнатная электроника – на свойствах атомно-орбитальной электроники – будет рассмотрена нами подробно в последующих публикациях). К данным кристаллам присматривается «Росатом»;

2) совершенно очевидно, что сюда же подходят и кристаллы AlN (опытное производство в г. С.-Петербурге), а также будущие или настоящие кристаллы-диэлектрики Ga_2O_3 и «чистые» сапфиры – Al_2O_3 ;

3) AlN/GaN – наносэндвичи [8];

4) легированный фотонный излучатель AlN [8].

«Комнатный» сверхпроводник

«Комнатный» сверхпроводник на наногетероструктурах Si-3C-SiC, выращенных дилатационным (атомное замещение) методом. Сверхпроводящая «комнатная» куперовская пара (электронная жидкость) образуется на основе несвязанных p-электронов на границе гетерофаза – твёрдый вакуум – физический вакуум.

Магнитные, или спин-кристаллы

Кристаллы на основе выращенных наноструктурных гетеросистем

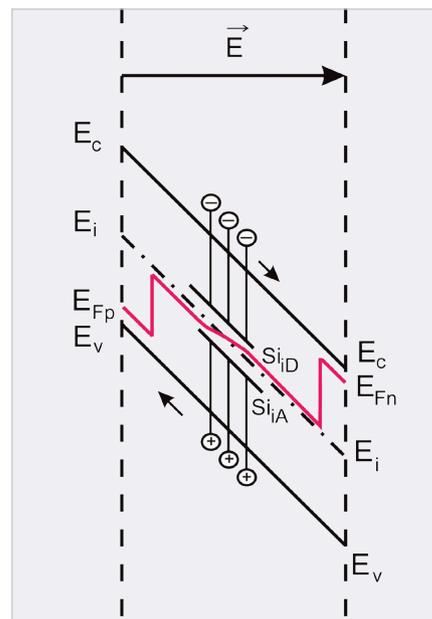


Рис. 2. Зонная диаграмма с учётом эффектов полевого туннелирования по Штарку и Францу – Келдышу

Si-3C-SiC обладают скоростным гистерезисом $\mu = f(\vec{B})$. Квантово-точечные домены в SiC обладают великолепным быстродействием (запись/считывание спин-квантовой памяти).

Металлофазные логические материалы

Для создания ОЗУ и 2-фотонных процессоров, а также регистров будут использоваться такие металлы, как Cu, Au, Ag с соотношением скоростей прохождения скин-электромагнитных волн по функции $V = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}}$.

Базовые физические принципы построения 2-фотонных процессоров на примере кристаллов LPE $i\text{-}_{Si}\text{GaAs}_{Si}$

Эффект мультизонной проводимости в LPE $i\text{-}_{Si}\text{GaAs}_{Si}$ кристаллах (эффект расщепления запрещённой энергетической зоны GaAs), дополняющий зонную теорию проводимости от зонной инжекции Шокли до квантовых диодных генераторов на гетероструктурах AlGaAs/GaAs Ж.И. Алфёрова, подробно описан в публикации [3].

Смысл состоит в том, что в процессе кристаллизации жидкофазной эпитаксии (LPE) GaAs в кварцевом реакторе с одновременным легированием атомами кремния (Si) в решётке GaAs образуются амфотерные, водородоподобные энергетические центры, симметричные относительно середины запрещённой зоны E_i GaAs.

Выяснено, что акцепторного и донорного типа E_{SiGa} и E_{SiAs} образуют внутрен-

ние запрещённые зоны за счёт сверхслабодисперсной биузловой кремниевой подрешётки с энергией ионизации/активации

$$E_{n, Si} = E_{p, Si} = AkT \frac{N_C N_V}{N_{Si}^2},$$

где N_C и N_V – плотность состояний в зоне проводимости и валентной зоне, а N_{Si} – концентрация амфотерных центров; A – расчётный коэффициент, зависящий от дисперсии $n = \sqrt{\mu\epsilon}$, энергии Пойнтинга и концентрации амфотерных центров. При этом нарушается постулат зонной теории – закон действующих масс $np = n_i^2$, поскольку учитывается плотность активированных энергоцентров в случае энерговоздействия, и, в конечном счёте, однополярное уравнение непрерывности в p - i - n переходе переходит в разряд биполярного, где в i -зоне нет понятия «неосновные» носители.

Зонная диаграмма и квазиуровни Ферми кремниевых квантовых центров выглядит следующим образом (рис. 1).

Энергия ионизации водородоподобных центров (с условным названием «статические экситоны») колеблется в пределах 0,7...0,2 эВ от краёв зон.

А энергия ионизации данных центров отличается от энергии ионизации по водороду (1) в полупроводниках на порядок и более.

С ростом энерговоздействия (температура + поле) зонная диаграмма, с учётом эффектов полевого туннелирования по Штарку и Францу-Келдышу, имеет вид, показанный на рис. 2.

Следовательно, с учётом того, что, допустим, при $N_{SiA} - N_{SiD} = 0$ и $N_{SiA} = N_{SiD} \sim 2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в решетке GaAs мы имеем приблизительно два атома (водородоподобных) кремния на 10 миллионов атомов в решётке GaAs.

Следовательно, если мы уменьшим нанобъём в $1,0 \text{ см}^3$ (это $\approx 10^{21}$ нанокубиков) в 10 млн раз, то мы будем иметь в уменьшенном кубике (при концентрации чуть больше 10^{15} см^{-3} атомов кремния) приблизительно два атома кремния, которые занимают глубокие симметричные водородоподобные центры ($F_{n, Si} = F_{p, Si}$).

При полевым воздействии мы можем активировать данные центры и **получить безынежекционный (без протекания тока, как это происходит в ЛД) лазер.**

Это и есть фундамент создания 2-фотонной логики и памяти в новых типах процессоров. Допустим, что мы имеем 50 млрд ячеек, тогда мы используем на них 100 млрд фотонов, т.е. 10^{11} фотонов. Сопоставим с количеством фотонов,

излучаемых в ЛД ($\approx 8 \times 10^{16} + 2 \times 10^{17}$ фотонов), очевидно, что энергопотребление 2-фотонного процессора будет приблизительно в миллион раз меньше, чем фотонного процессора, проектируемого с допустимой вероятностью в научных центрах РФ (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИ-ЭФ», г. Саров, Нижегородская область, или ряде институтов РАН, ВУЗов РФ).

2-фотонный LPE i - $_{Si}$ GaAs $_{Si}$ безынежекционный квантовый генератор – это экстремальный случай. Возможно и 100, и 1000 фотонов с генератора.

Это исключительно важно, поскольку такой фотонный процессор будет иметь гораздо бóльшую устойчивость, чем, допустим, «криогенный» громоздкий квантовый спин-мультикубитный процессор), так как в условиях присутствия внешнего ЭМИ (например, магнитоэнергетической бури на Солнце, искусственного подобия Курской аномалии или ядерного взрыва) можно ожидать катастрофического сбоя работы такого процессора.

Далее, применяя фазовый сдвиг «2-порционных фотонов», можно делать те же операции, что и в «субпиксельной» китайской интерференции, показанной в работе [9].

При этом мы делаем одно допущение: допустим, для фотона с арсенид-галлиевой длиной ИК-волны (0,81...0,75 мкм) в твёрдом теле вполне реальны латентные «волновые», точнее, корпускулярные каналы в межатомном твёрдом вакууме, который в решётке GaAs достигает по величине $\approx 34\%$ объёма, и при этом фотонные (корпускулярные) каналы имеют сторону сечения канала меньше, чем радиус атомов Ga или As ($\approx 1,25 \text{ \AA}$), что связано с поляризационной особенностью атомов Ga или Al (например, в сапфире или чистом корунде), когда вследствие поляризации атомов Ga или Al (схожих с Li- атомной поляризацией) форма атомов Ga в решётке того же диэлектрика i - $_{Si}$ GaAs $_{Si}$ принимает форму ближе к эллипсу и появляются «разрешённые» энергетические зоны для пролёта фотона в решетке GaAs. Это необходимое и, в принципе, обоснованное физическое трактование (учтём, что квантовый диодный генератор Ж.И. Алфёрова на гетероструктурах AlGaAs/GaAs выстраивается на рекомбинационных прямоходных явлениях излучения когерентной волны в тонких переходных р-п-областях с шириной $< 0,1 \text{ мкм}$ (100 нм).

Добавим, что, принимая во внимание оптические структуры AlN/GaN, разработанные д.ф.-м.н. профессором С.А. Кукушкиным (диэлектрик AlN с $\rho \geq 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{см}$) на поляризацион-

ных свойствах AlN (атома Al), мы также с исключительно высокой теоретической и технологической вероятностью, близкой к единице, сможем создать более коротковолновые 2-фотонные процессоры [10]. Здесь также нет технологических препятствий.

Другими словами, перед «Росатомом» могут быть открыты исключительные возможности по созданию экзафлопсных фотонных компьютеров с мощностями потребления не более чем у современных «кулоновских» планшетов или ноутбуков взамен огромных серверных блоков с энергопотреблением в несколько мегаватт (в качестве примера можно привести суперкомпьютер «Ломоносов» в МГУ).

Простейшие примеры 2-фотонных генераторов, цифровых и логических ячеек на основе LPE i - $_{Si}$ GaAs $_{Si}$ -кристалла

В этом разделе на рисунках 3–5 приведены примеры реализации базовых элементов, на которых будут строиться фотонные вычислители.

Физика фононных (релятивистских) ОЗУ (RAM)

Что такое конденсатор? Как правило, в учебниках физики изображается диэлектрик с металлическими обкладками и силовыми линиями поля поляризации между обкладками с накопившимся \pm зарядом на обкладках. И всё?

В реальности основное применение конденсатора – в качестве реактивного сопротивления в ВЧ или СВЧ приборостроении ($Z = \frac{1}{\omega C}$). Значение ёмкости $C = \frac{\epsilon S}{L}$ всем известно со школьной скамьи.

Совершенно очевидно, что накопленная энергия в кристалле

$$W \approx qU = \frac{qE}{L} \quad (1)$$

зависит от накопленного заряда в ёмкости:

$$Q(q) = CU. \quad (2)$$

И совершенно очевидно, что $C = f(\epsilon)$ и, следовательно, $Q = f(\epsilon)$, следовательно, накопленная в кристалле энергия зависит от частоты приложенного поля (рис. 6) и ϵ . Данная энергия описана в 4 уравнениях Максвелла, это атомно-волновая энергия, которая в каждой точке кристалла, допустим, в пределах колебаний фонона (узла решётки) имеет вид [4]:

$$W = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} = \frac{\mu H^2}{8\pi}. \quad (3)$$

Или при частотно-полевым воздействии дисперсия квантово-точечной энергии имеет вид:

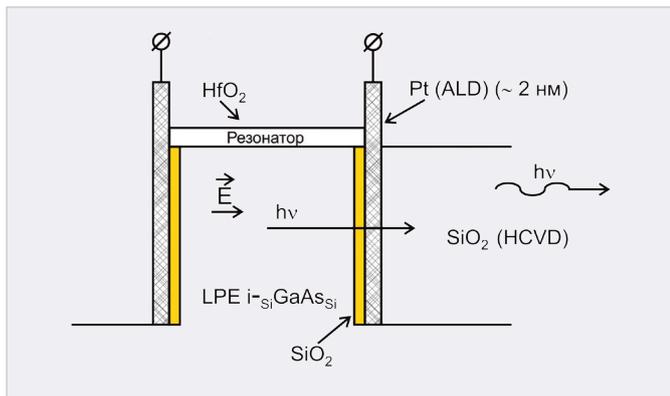


Рис. 3. 2-фотонный генератор со «световодом» SiO₂

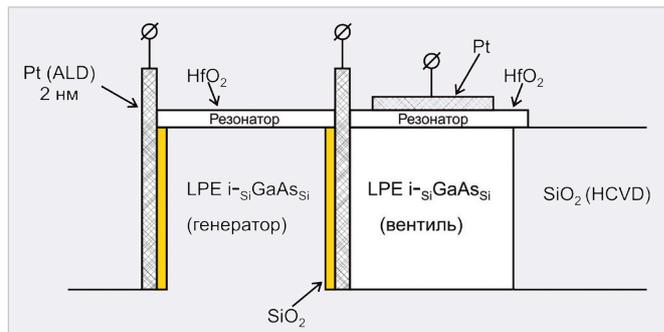


Рис. 4. 2-фотонный вентиль («1» ↔ «0») на основе рассеяния/отражения фотонов = «Ф» при открытой фотонной зоне в межатомном пространстве (туннельно-полевая генерация с последующей релаксацией при нулевом поле)

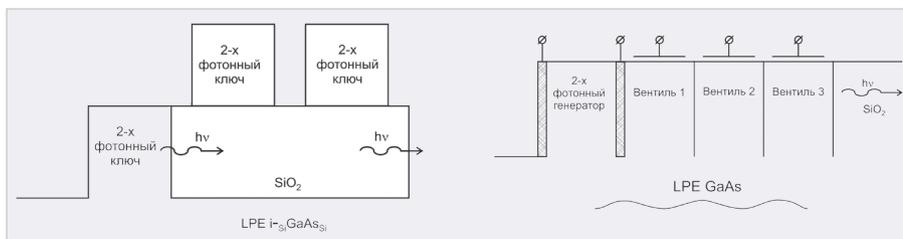


Рис. 5. Блок-схема ячейки «ИЛИ-НЕ» (а), блок-схема ячейки с набором функций «ИЛИ»; «НЕ»; «И» (б)

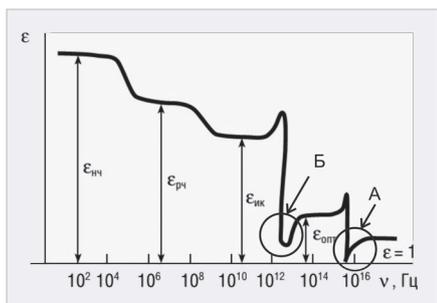


Рис. 6. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты электромагнитного поля

$$\begin{aligned} \vec{H} \operatorname{rot} \vec{E} &= \vec{E} \operatorname{rot} \vec{H} = \operatorname{div}(\vec{E}, \vec{H}) = \\ &= (-\vec{j} \vec{E}) - \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt} - \vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

В DRAM-ячейке ОЗУ (RAM), показанной на рис. 7, элементом накопления энергии («1») служит конденсатор С.

Элементом «закачки»/трансфера энергии («кулоновских» электронов) является открытый канал MOSFET, который ограничен по частоте коммутации (по промежутку $\tau = R_{Dson} \times C$, где R_{Dson} – сопротивление открытого канала MOSFET).

Чаще всего частота коммутации не превышает $\tau = 10^{-11} \div 5 \times 10^{-12}$ с. Это слишком медленно для обмена со «световым»/фотонным процессором. Нужны скорости ОЗУ на полтора-три порядка выше. Логически возникает вопрос – а зачем нужен медленный MOSFET?

С учётом сказанного ранее в данном разделе и при условии понимания эффекта Поккельса, на котором работают оптомодуляторы Маха – Цендера в РОФАР, мы приходим к выводу, что в $i\text{-SiGaAsSi}$ изоляторе можно модулировать значение $\epsilon = 12,8$ до $\epsilon = 0$ (!) (на частоте вблизи $\lambda = 1/300 \text{ см}^{-1}$). Следовательно, количество запасённой/аккумулированной или обеднённой энергии можно «переключать» от значения $\frac{12,8 \times E^2}{8\pi}$ до $\frac{1,0 \times E^2}{8\pi}$, чего, в принципе, даже нет в MOSFET – это модуляция или коммутация энергии, поставляемой на ёмкостный накопитель. Так зачем же нужен медленный, устаревший MOSFET? Не нужен.

С учётом одного из оптических каналов Маха – Цендера, а также с учётом

исключительной чувствительности по Поккельсу ϵ_{GaAs} к слабоэнергетичным квантам фотонов с энергией $\leq 0,1$ эВ, релятивистская ячейка электронно-фононной, или проще – фононной DRAM, будет выглядеть так, как показано на рис. 8.

То есть это тот же конденсатор накопленной (в равновесии) энергии и обеднённой энергии (при электромагнитном воздействии) $U = U_0 \sin \omega t$ или $W = hv$ (где $W \leq 0,1$ эВ).

В качестве диэлектрика могут быть использованы AlN [8], а также Ga_2O_3 или Al_2O_3 .

В принципе, нет проблем и с логикой, например, с «интерференционной» логикой «ИЛИ-НЕ», см. рис. 9.

Фононные генераторы, усилители, источники электропитания

В работе Ахманова С.А., Хохлова Р.В. «Об одной возможности усиления световых волн» [5], а также в работе Гордева А.И. «Перспективные терагерцовые поляризованные информационные системы» [4] показано, что при прохождении электромагнитной волны через нанодиэлектрик с атомами Ga, или Al, или Li микро-, субмикро-, наноячейка представляет собой LC-контур, который обладает добротностью $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Из двух-трёх таких ячеек, например, из наноячеек $i\text{-SiGaAsSi}$ или AlN при $Q_1 = Q_2 = Q_3$ можно построить или высокоэффективный генератор, или усилитель «световой» или, в общем случае, электромагнитной волны в дальнем ТГц-диапазоне (т.е. вплоть до частот 300 терагерц).

Фрагмент релятивистского источника электропитания с «нулевой точкой» (релятивистский ВИП) показан на рис. 10.

В дополнение: для терагерцовых цифровых систем, а также для 7G, 8G вплоть до 60 терагерц уже выполнены терагерцовые генераторы (см. рис. 11)

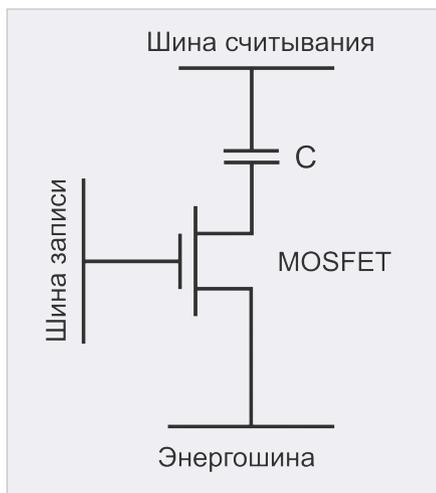


Рис. 7. DRAM ячейка 03У (RAM)

[11] и, конечно же, терагерцовые ОАФ (объёмно-акустические фильтры) [8].

То есть проблем с инжекцией и кодовым транспортом сигналов абсолютно нет.

Скин-металлофазовая «интерференционная» логика

Данная скин-фазовая логика базируется на максвелловском постулате:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}} \approx \frac{c}{n},$$

где n – показатель преломления.

Скорость света зависит от показателя ϵ (эффект Поккельса) или от n (основополагающего показателя скорости электромагнитной волны в ТТ по Максвеллу).

С учётом того, что металлы никель (Ni) – это ферромагнетик, а серебро (Ag) – это диамагнетик, показатель преломления в таких металлических проводниках отличается в терагерцовом диапазоне в значительной степени и сближается в ультрафиолетовом диапазоне. Следовательно, мы можем иметь следующую фазово-скоростную упрощённую интерпретацию скорости электромагнитной волны в Ag и Ni (рис. 12).

Это даёт качественное представление о фазовой и временной модуляции при создании фотонной и фононной логики, а также имеет исключительное важное значение при построении АЦП терагерцовых компьютеров.

Как мы видим, при $n_{Ag} < 1$ и $n_{Ni} \gg 1$ мы можем создавать как в ТГц-сетях, так и в СВЧ (субтерагерцовом) диапазоне ЛУ (линии ускорения) и ЛЗ (линии задержки). Это имеет также большое значение для 7G, 8G, 9G.

Терагерцовые АЦП

ЦАП/АЦП – обязательные конструктивные элементы цифровых систем.

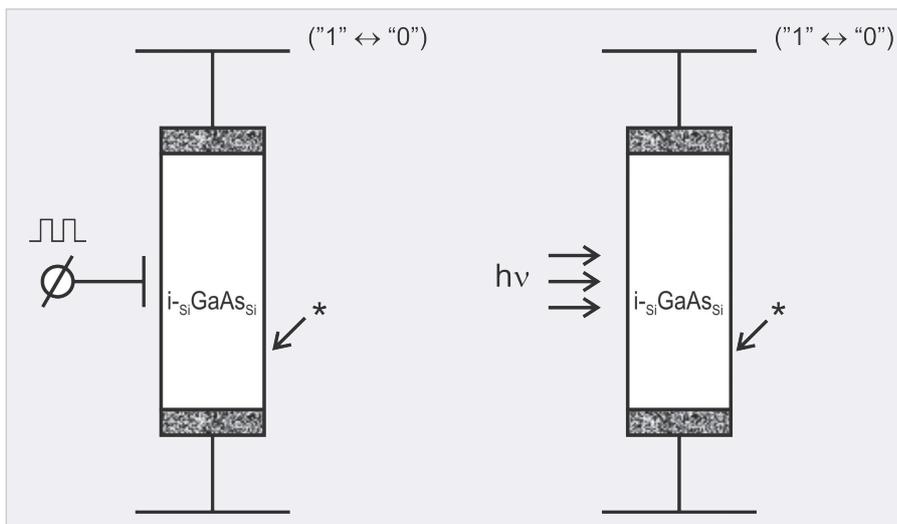


Рис. 8. Фононная ячейка DRAM на эффекте Поккельса

СВЧ ЦАП – достаточно серьёзная технологическая проблема, но проходимая на базе набора элементов на мировом рынке. А вот спроектировать и создать терагерцовые АЦП хотя бы до 10 терагерц (7G) – это важнейшая проблема для архитектуры суперкомпьютеров. Необходимо отметить, что на собственной элементной базе у России с АЦП проблема даже в X-диапазоне частот, не говоря уже о длинах волн $l = 1,0$ мм (300 ГГц). А необходимо – на 10...100 ТГц. Как же это сделать? Это сложно, но можно.

Важнейшими звеньями терагерцового АЦП следует считать:

- 1) терагерцовый компаратор;
- 2) терагерцовые широкополосные операционные усилители (без искажения формы сигнала);
- 3) терагерцовые регистры и демодуляторы/шифраторы.

Решить проблему АЦП на основе зонной проводимости на дрейфе электронов невозможно. Поэтому нужен такой же комплексный подход, который описан в разделе 2 статьи, т.е. на законах ФТТ.

Важнейшие звенья терагерцового АЦП как в интерфейсе, так и при параллельной работе специализированного АЦП-адаптера под GSM/GPS в терагерцовом диапазоне – это терагерцовый мультиразрядный компаратор «Маха – Цендера» – компаратор с высокой разрядностью, допустим, с числом разрядности 12 на терачастотах и выше, с высокочувствительными усилителями, ТГц-шифратором или регистрами, встроенной системой динамической памяти (RAM) – это исключительно сложный функциональный блок, упрощённая схема которого показана на рис. 13.

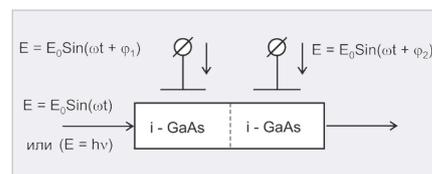


Рис. 9. Упрощённая интерференционная, точнее, релятивистская фазовая логическая ячейка «ИЛИ-НЕ»

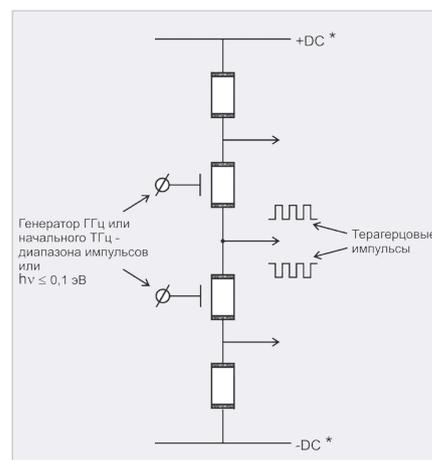


Рис. 10. Упрощённая схема источника терагерцовых импульсов на основе последовательных $i\text{-SiGaAs}_{\text{Si}}$ или AlN наноструктур (* ± DC – источник ВИП с энергоплотностью в несколько сотен кВт/л)

Комнатная сверхпроводимость и магнетика для построения терагерцовых MRAM

При наличии GaN петагерцовых генераторов вблизи GaN-излучения – 460 нм, а также AlN излучения на 0,24...0,36 мкм возможно создание сверхпроводников на основе дилатационной границы Si-3C-SiC с необычными магнитными свойствами.

Прочитируем отрывок из публикации [12]:

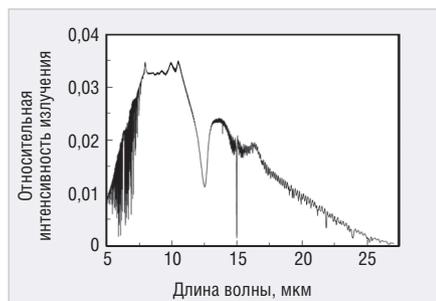


Рис. 11. Спектральная плотность излучения опытного терагерцового генератора

«...установлено, что межфазная граница раздела гетероструктуры 3C-SiC(111)/Si(111), выращенной методом согласованного замещения атомов, обладает необычными электрофизическими и оптическими свойствами и соответствует полуметаллу (рис. 2), а не полупроводнику. Удельное сопротивление среды интерфейсного слоя и время рассеяния носителей заряда в ней оценены как $4 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}$ и $4 \times 10^{-16} \text{ s}$ соответственно».

Также приведём ещё одну цитату из публикации [12]:

«Выполнен цикл экспериментальных исследований, а именно, проведены измерения и выполнен анализ полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости в образцах тонких плёнок монокристаллического SiC, выращенных на поверхностях (100), (110) и (111) монокристаллического Si методом согласованного замещения атомов за счёт химической реакции Si с газом CO. В результате исследований в структурах SiC, выращенных на Si (110) и Si (111), обнаружено возникновение в слабых магнитных полях двух квантовых эффектов при комнатной температуре. Этими эффектами являются, во-первых, образование гистерезиса статической магнитной восприимчивости...»

Ничего особенного, на первый взгляд, кроме гениальности и невероятности, ведь открывается возможность создания фотонного транзисторного ключа для петагерцовой цифры и логики, управляемого электромагнитной волной на частоте от 700 ТГц или (для обывателя) – «синими» или ближне-ультрафиолетовыми квантами!

И как итог – неисчерпаемые возможности, вплоть до «тарелки-рефлектора» – «корректировщика» магнитного поля окружающих Землю тропо-, страто-, ионо- и магнитосфер («не кинетическая» защита воздушных, космических и наземных объектов) в виде «магнитного гиперболоида». Фактически это путь к исключению ядерной катастрофы на планете.

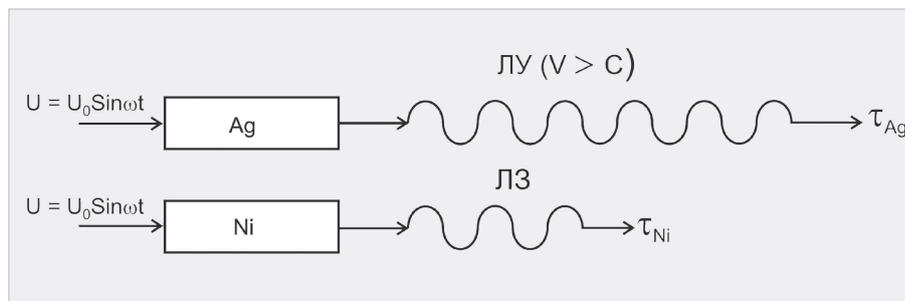


Рис. 12. Время прохождения скин-электромагнитной волны в равнозначных по длине и сечению проводниках из Ag и Ni

7G, 8G, 9G

Несмотря на сложности, в России идет развитие сетей 5-го поколения (5G). Предполагается использовать диапазон частот 4,4...4,9 ГГц и 24,5...29,5 ГГц. 4,4...4,9 ГГц – это не что иное, как 4G «M» (не более 2 гигабит/с).

Большинство стран для развития сетей пятого поколения выделяют различные спектры частот – как ниже 6 ГГц, так и выше.

США в области развития 5G вообще стоят особняком. Основным диапазоном частот сетей пятого поколения там предполагается сделать сверхвысокие частоты 24 ГГц, 28 ГГц, также намечается использование ещё трёх диапазонов частот: 37, 39 и 47 ГГц.

США ведут разработку 6G на частотах 240...320 ГГц (до 100 гигабит/с).

На Международной конференции по коммуникациям IEEE 2021 сотрудники Samsung и Калифорнийского университета в Санта-Барбаре (UCSB) показали работу сквозной системы беспроводной связи 6G. Точнее, была показана возможность и перспективы использования для сетей 6G диапазона частот в терагерцовом диапазоне, что значительно снизит задержки в передаче данных и в десятки раз увеличит скорость передачи по сравнению с 5G.

Конечно, ничто не мешает вести отечественную разработку 6G на LPE/MOCVD GaAs кристаллах **на абсолютно новой элементной СВЧ-базе (униполярно-инжекционных и зонно-релятивистских GaAs СВЧ-диодах и транзисторах с потенциалом работоспособности на $\lambda = 1,0 \text{ мм}$)**, включая создание синтезаторов, ЦАП, АЦП, УПЧ, фотонных процессоров и др. на рабочей частоте около 300 гигагерц с трансляцией и приёмом из ближнего космоса с мини-спутников с энергопитанием от i-GaAs солнечных батарей с КПД > 30%.

Рынок 6G по западным оценкам составляет около \$1,0 трлн. Но Россия

пока «идет своим путём» по стандартной схеме так называемого «импортозамещения».

Напомним, что вышеназванные диоды и транзисторы на GaAs и, в принципе, также на GaN в перспективе вытеснят те же GaAs, GaN p-HEMT и другие «классические» СВЧ-приборы. В итоге появляется прекрасная возможность создания вместо печально известной Программы импортозамещения (вероятный потенциал судебных исков ЕС – \$290 млрд) **реальной Программы развития ЭКБ и радиоэлектроники, опережающей мировой уровень**. Одним из авторов статьи подготовлена концепция Программы опережения в области ЭКБ. Также имеется проект создания Центра экстремальной силовой, СВЧ, ТГц электроники, фотоники и фононики с рабочими температурами 300...800°C, находящийся в настоящее время в Правительстве Ульяновской области.

Что касается 7G вблизи частот 6 ТГц, или 8G вблизи частот 30 ТГц, или, наконец, 9G вблизи частот 60 ТГц, то Россия, исходя из вышеуказанной цифровой и аналоговой фотоники и фононики, способна в текущий момент приступить к таким GSM/GPS-разработкам как для цифровой экономики, так и для элементов искусственного интеллекта (на основе «чёрноволнового» излучения человека).

Прогноз рынка вышеназванного направления («твёрдой нефти») оценивается в триллионах \$.

Как создавать 7G, 8G, 9G – это отдельная тема. С точки зрения физики твёрдого тела (ФТТ) – это не так уж и сложно, включая ТГц электромагнитно-акустические технологии Wi-Fi на ОАВ.

Заключение

1) В статье показаны фундаментальные основы создания фотонных и фононных терагерцовых суперкомпьютеров «настольного форма-

та» без применения криогенной техники и саркофагов к ним. Описана принципиально новая технология туннельно-полевой, безыинжекционной лазерной генерации единичных фотонов, которая позволяет изменить архитектуру фотонного процессора с созданием единой нанообъёмной лазерной, цифровой и логической ячейки процессора («три в одном») с интегрированным «свето»-скоростным фотонным ОЗУ.

- 2) В статье показано наличие уникальных технологий по созданию нового поколения фотонных, фотонных материалов для терагерцовой и петагерцовой цифровой и аналоговой техники.
- 3) В статье показаны уникальные $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$ наногетеросистемы для «комнатной» сверхпроводимости и магноники.
- 4) В статье показана системность подхода и переход мышления от «цифровой трансформации» к реальным прорывным технологическим подходам для цифровой экономики, а именно: технология терагерцовых портативных фотонных, фотонных, магнонных терагерцовых суперкомпьютеров с беспроводными системами связи 7G, 8G, 9G – через мини-спутники на LPE GaAs фотovoltaике.
- 5) Статья тезисно создаёт основание для разработки отечественной Программы по экстремальной аналоговой и цифровой электронике, фотонике, фононике и магнонике, опережающей мировой уровень на несколько лет вперёд, с пересмотром текущей Стратегии развития отечественной электроники.
- 6) В статье показан коммерческий потенциал мирового рынка в триллионах \$ на основе предложенных фотонных, фотонных и магнонных технологий, с возможностью национальной монополии отдельных сегментов мирового рынка.
- 7) Статья, на наш взгляд, отвечает интересам госкорпораций «Росатом», «Роскосмос», «Ростех», «Росавиация», «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», Корпорации «Тактическое ракетное вооружение» (КТРВ), а также коммерческим интересам ряда крупнейших банков РФ (Сбербанк, ВТБ, Газпромбанк, ВЭБ и др.).

Литература

1. Гордеев А.И. Проблемы становления российской цифровой экономики и спосо-

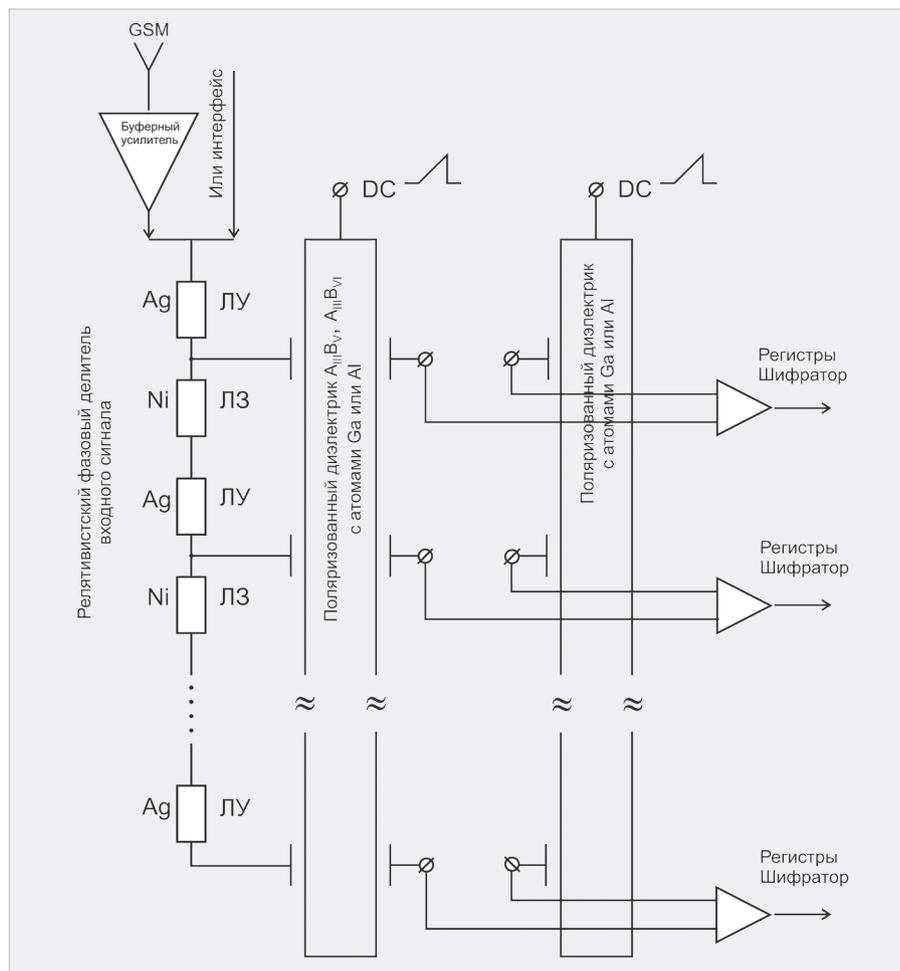


Рис. 13. Мультиразрядный компаратор с блоком усиления и фазовыми ЛУ (линиями ускорения) и LZ (линиями задержки) на принципах Поккеля модуляции и $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ (функциональный аналог оптомодулятора Маха-Цендера)

- бы исключения ошибок при их решении // Современная электроника. 2019. № 2.
2. Гордеев А.И. Как завоевать мировой рынок электроники в посткремниевую эпоху? // Современная электроника. 2021. № 5.
3. Гордеев А.И., Войтович В.Е., Звонарев А.В. Новая физическая твердотельная электроника на основе терагерцового расщепления и деформации запрещенной зоны LPE SiGaAsSi-кристаллов (Ч. 1) // Радиотехника. 2017. № 10.
4. Гордеев А.И. Перспективные терагерцовые поляризованные информационные системы в двух частях // Современная электроника. 2016. № 6; 2016. № 7.
5. Ахманов С.А., Хохлов П.В. Об одной возможности усиления световых волн // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. № 1. С. 351–353.
6. Кукушкин С.А., Оситов А.В. Оптические свойства, зонная структура и проводимость межфазной границы раздела гетероструктуры 3C-SiC(111)/Si(111), выращенной методом замещения атомов // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. Вып. 22.
7. Гроссе П. Свободные электроны в твердых телах. М.: Мир, 1982.

8. Кукушкин С.А., Шарофидинов Ш.Ш. Новый метод получения объемных кристаллов AlN, GaN и AlGaIn с использованием гибридных подложек SiC/Si // Физика твердого тела. 2019. Т. 61. Вып. 12.
9. Степаненко С.А. Фотонный компьютер: Структура и алгоритмы, оценки параметров // Фотоника. 2017. № 7.
10. Черкашин Н.А., Сахаров А.В., Николаев А.Е. и др. Особенности эпитаксиального роста III-N светодиодных гетероструктур на подложках SiC/Si // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 15.
11. Баграев Н.Т., Кукушкин С.А., Оситов А.В. и др. Терагерцовое излучение из наноструктур карбида кремния // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55. Вып. 11.
12. Баграев Н.Т., Кукушкин С.А., Оситов А.В. и др. Магнитные свойства тонких эпитаксиальных слоев SiC, выращенных методом самосогласованного замещения атомов на поверхностях монокристаллического кремния // Физика и техника полупроводников. 2021. № 55(2). С. 103–111.

