

НА ПУТИ К ДОСТИЖЕНИЮ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

В.Майская

Частоты терагерцового (ТГц) диапазона (300 ГГц – 3 ТГц и более), заключенные между оптическим и радиочастотным частями спектра, долгое время оставались самыми малоисследованными и освоенными. Появилось даже понятие "терагерцовая щель", подчеркивающее отсутствие практического применения ТГц-излучения. Это понятие относится к технологиям генерации, передачи и приема терагерцового излучения, причем именно к технологиям, соответствующим требованиям реального мира (по размерам, стоимости и рабочей температуре). Но в последнее время ситуация изменилась, и разработки ТГц-источников и волноводов открыли ТГц-системам путь в такие сферы, как транспортная безопасность, средства связи, медицинское диагностическое оборудование, системы неразрушающих испытаний и во многие другие, помимо военной и аэрокосмической аппаратуры. Сегодня задача разработчиков – создать доступные по цене приборы и системы, работающие на столь высоких частотах. И она успешно решается.

Одно из основных свойств ТГц-излучения – способность проникать в разнообразные непроводящие материалы, которые непрозрачны для света в видимой части спектра (ткань, бумагу, пластмассу), а также во многие органические соединения, в том числе и в ткань человека. А поскольку энергия фотонов при ТГц-излучении невелика, они не оказывают такого неблагоприятного воздействия, как ионизирующее рентгеновское излучение, и, следовательно, безвредны для человека. Более того, многие химические и биологические вещества (взрывчатка, раковые клетки), в ТГц-диапазоне имеют уникальную структуру спектра, по которой возможна их идентификация. Поскольку волны субмиллиметровой длины поглощаются водой, ТГц-приборы

могут определять влажность материала. Таким образом, ТГц-излучение позволяет выполнять неинвазивный и неразрушающий контроль, который широко применяется в военных системах, средствах безопасности, медицине и здравоохранении, материаловедении и обрабатывающей промышленности. Все это обуславливает непрерывный рост спроса на ТГц-устройства.

Согласно отчету "Системы терагерцового излучения" (Terahertz Radiation Systems), подготовленному компанией BCC Research (США), исследующей развитие разнообразных технологий, рынок ТГц-приборов в 2016 году составит 127 млн. долл., а в 2021 достигнет 570 млн. [1] В 2011 году он был равен 83,7 млн. долл. Таким образом, совокупные темпы роста за период 2016–2021 годы будут равны 35%. Самые большие продажи за этот

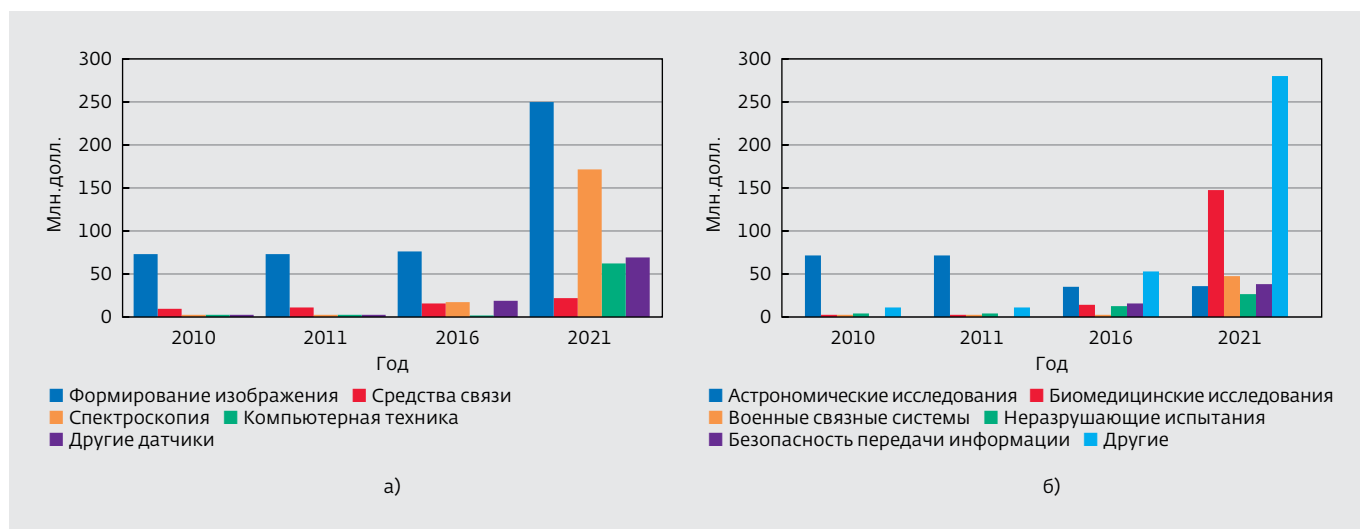


Рис.1. Динамика мирового рынка по типам ТГц-приборов и систем (а) и областям применения (б)

период будут у ТГц-устройств формирования изображения (с учетом систем сложной астрономической обсерватории ALMA, работающей в миллиметровом/субмиллиметровом диапазоне длин волн). В 2016 году они достигнут ~76 млн., а к концу 2021 – 248,3 млн. долл. (совокупные темпы роста – 26,8%) (рис.1а). Наибольшее применение сейчас ТГц-системы находят в астрономических исследованиях (объем продаж в 2011 году – 70 млн. долл.). Правда, ожидается, что к 2016 году продажи в этом сегменте рынка уменьшатся в два раза – до 35 млн. долл. – и останутся на этом уровне до 2021 (рис.1б).

Вместе с тем ежегодный необычайно высокий рост спроса на беспроводные системы связи привел к необходимости увеличения несущих частот систем связи до 100 ГГц и более, с тем чтобы повысить скорость передачи данных. А поскольку диапазон 0,3–3 ТГц пока не выделен какому-то конкретному приложению, он может быть использован для беспроводных широкодиапазонных высокоскоростных систем связи. ТГц-приборы смогут способствовать развитию средств беспроводной связи ближнего радиуса действия со скоростью передачи данных не менее 10 Гбит/с и тем самым позволят передавать большие объемы данных многочисленным пользователям, находящимся в одном помещении. Разумный телевизор с ТГц-трансивером сможет передавать и принимать изображение высокой четкости, а цифровая фотокамера с ТГц-блоком – практически мгновенно пересылать снимки портативному компьютеру.

Однако за последние несколько лет частоты микросхем, установленных в электронных системах (средствах обработки изображений, радиолокационных комплексах, средствах связи и аналитической аппаратуре), "буксуют". Современная технология становится слишком "горячей" и при превышении определенного уровня частоты не может справиться с требованиями обеспечения низкого энергопотребления. В терагерцовом частотном диапазоне все еще практически отсутствуют и компактные малогабаритные вакуумные приборы, весьма перспективные для средств спектроскопии и формирования изображения, используемых в медицинском и промышленном оборудовании, а также в системах сопровождения и посадки самолетов в условиях нулевой видимости.

Промежуточный вариант достижения терагерцовых частот заключается в умножении рабочих частот схем миллиметрового диапазона. Но этот метод ограничивает выходную мощность приборов и получаемое отношение сигнал-шум. Кроме того, приборы занимают относительно большую площадь и имеют большую массу. Эти недостатки и ограничения препятствуют широкому освоению субмиллиметрового диапазона длин волн. И сегодня перед разработчиками электронных систем стоит задача создания доступных по стоимости аппаратных средств, работающих на частотах этого диапазона. А согласно оценкам, при соблюдении закона Мура полупроводниковые приборы достигнут частот терагерцового диапазона лишь к 2030 году. Для военной аппаратуры это слишком большой срок.

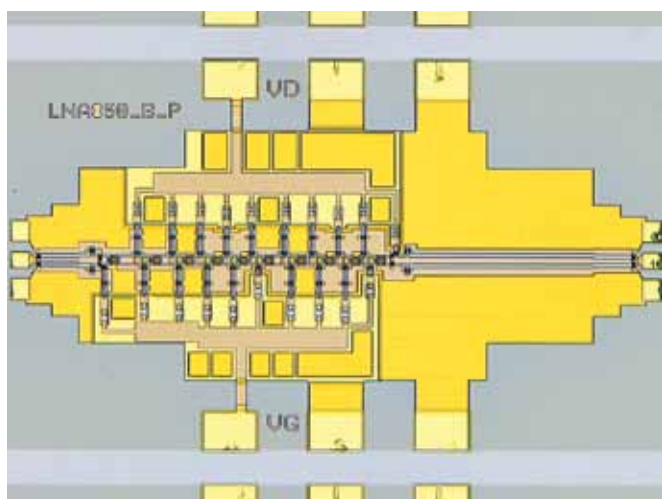


Рис.2. Твердотельный приемник на частоту 850 ГГц

РАЗВИТИЕ ПРОГРАММ DARPA

Эти проблемы стимулировали Управление перспективных исследований Министерства обороны США (DARPA) в феврале 2006 года открыть проект SWIFT (Sub-millimeter Wave Imaging Focal Plane Technology – получение изображений в субмиллиметровом диапазоне) и затем TFAST (Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitters – технологии передатчиков с синтезируемой цифровыми методами быстрой перестройкой частоты). В 2009 году была начата программа "Терагерцовая электроника" (Terahertz Electronics), предусматривающая разработку и демонстрацию материалов и технологии производства транзисторов и микросхем приемников и задающих генераторов терагерцовых частот [2]. Программа определила два основных направления работ по созданию терагерцовых устройств:

- InP HBT и InP НЕМТ для терагерцовых монолитных интегральных схем (sMMIC). Была также поставлена задача разработки технологии формирования межсоединений и интеграции элементов для построения малогабаритных модулей ТГц-передатчиков и приемников;
- модулей ТГц усилителей мощности: компактных электровакуумных устройств на частоты свыше 1 ТГц, изготавливаемых микромеханической обработкой.

Новейшие разработки

В августе 2013 года компания Northrop Grumman получила 10,1 млн. долл. для продолжения разработок технологий, необходимых для реализации компактных, высокопроизводительных

электронных схем, работающих на частоте 1,03 ТГц. Эти деньги предоставлены компании в результате изменения контракта HR0011-09-C-0062, заключенного в апреле 2009 года. Он предусматривал разработку для военных и космических систем приемников и передатчиков на основе InP НЕМТ, функционирующих на частоте 670 ГГц и обеспечивающих передачу изображения высокой четкости. Работы по измененному контракту будут проводиться в основном отделением космических и ракетных систем Space & Mission Systems в Редондо-Бич (83,95% от общей выделенной суммы), а также отделениями компании в Шарлотсвилле (6,17%) и Пасадене (9,88%). Окончание работ – февраль 2015 года. По ранее измененному контракту, заключенному в апреле 2011 году на сумму в 12,5 млн.долл., разработка схем на частоту 1,03 ТГц по фазе II программы должна была завершиться в апреле 2014 года.

Правда, в июле 2012 года компания Northrop Grumman объявила о создании в рамках фазы II первого в мире твердотельного приемника с предельной частотой усиления 0,85 ТГц (рис.2). DARPA расценивает эту разработку как важнейший шаг на пути к созданию интегральных схем на частоту 1,03 ТГц. Успешное освоение терагерцового диапазона открывает широкие возможности для реализации перспективных систем связи военного назначения и радиоэлектронных средств разведки. Так, руководитель программы "Терагерцовая электроника" Джон Альбрехт отметил, что способность синхронно обрабатывать сигналы на частоте 0,85 ТГц позволит создать аппаратуру, необходимую для реализации программы DARPA "Видеолокатор с синтезированием апертуры" (Video Synthetic Aperture Radar, ViSAR). Цель программы – разработка и демонстрация возможностей информационного датчика чрезвычайно высокой частоты (Extremely High Frequency, EHF), который в условиях плотной облачности (естественной, вроде песчаной бури, или искусственной дымовой завесы) сможет обеспечивать столь же эффективную работу систем обнаружения, прицеливания и наведения, как и современные ИК-системы в безоблачную погоду.

Компания добилась таких результатов благодаря разработке (частично финансируемой DARPA по программе "Терагерцовая электроника" и Исследовательской лабораторией СВ) еще в 2010 году фосфид-индиевых НЕМТ и HBT, максимальная частота которых превышает 1 и 0,62 ТГц соответственно (см. таблицу).

Характеристики созданных и разрабатываемых высокочастотных транзисторов компании Northrop Grumman

Характеристика	Технология			
	InP НЕМТ		InP НВТ	
	Существующего поколения	Следующего поколения	Существующего поколения	Следующего поколения
Минимальный топологический размер, нм	50 (затвор)	30 (затвор)	250 (эмиттер)	150 (эмиттер)
Предельная частота усиления по току f_T , ТГц	0,55	0,69	0,53	0,64
Предельная частота генерации, f_{max} , ТГц	> 1	> 1,2	> 0,63	> 1,2
Частота, реализуемых на основе транзисторов микросхем, ТГц	0,48	–	0,32	–

Увеличения частоты исследователи компании добились за счет улучшения технологического процесса формирования затвора длиной менее 50 нм (для НЕМТ) и увеличения плотности тока НВТ до 30 мА/мкм² с помощью процесса переноса транзистора, выращенного на InP-подложке, на

подложку нитрида алюминия (материала с лучшей теплопроводностью). Это позволило уменьшить температуру транзистора при высоких плотностях тока на ~40%.

На основе НЕМТ были изготовлены малошумящие усилители на частоты 300 и 480 ГГц.

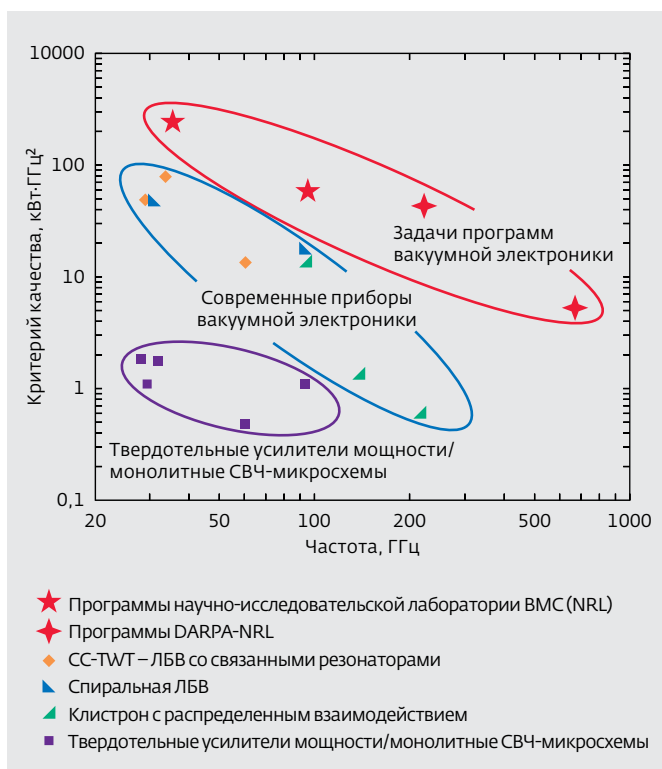


Рис.3. Критерий качества ($P_{cp} F^2 \Delta f / f$) современных и разрабатываемых приборов микро- и миллиметрового диапазонов длин волн

Коэффициент шума 480-ГГц усилителя составил 11,7 дБ при усилении 11,4 дБ. Были изготовлены НВТ-генераторы и однокаскадные усилители, в которых для соединения блоков использовались тонкопленочные микрополосковые соединительные линии. Так, в созданном на основе 250-нм биполярного транзистора с двойной структурой (ДНВТ) усилителе на частоту 324 ГГц для уменьшения индуктивности линии земли использовалась "перевернутая микрополосковая линия". Металлическая пленка заземления наносилась поверх слоя бензоциклобутена (BCB), РЧ-линии передачи сигнала и компоненты располагались в первом слое металлизации под пленкой BCB.

Не уступает Northrop Grumman в разработке InP НВТ компания Teledyne Scientific & Imaging (TSI). На конференции по вопросам исследований электронных приборов 2011 года (Device Research Conference 2011) TSI представила разработанный совместно с исследователями Калифорнийского университета в Санта-Барбаре по программе "Терагерцовая электроника" 130-нм InGaAs/InP ДНВТ с предельной частотой усиления по току f_t , превышающей 529 ГГц, и максимальной частотой генерации f_{max} более 1,1 ТГц.

Отмечается, что благодаря малому размеру эмиттера (2 нм) высокие характеристики прибора достигнуты при низком уровне энергопотребления. Напряжение пробоя транзистора при включении по схеме с общим эмиттером составило 3,5 В, плотность тока – 10 мкА/мкм². Размер транзистора – 0,13×2 мкм. По утверждению исследователей, созданный InGaAs/InP ДНВТ представляет собой первый биполярный транзистор с отношением $f_t/f_{max}=528$ ГГц/1 ТГц. Предназначен ДНВТ для приемопередатчиков, работающих на "низких частотах" ТГц-диапазона (0,3–3 ТГц) [3].

Назад в прошлое.

Компактные электровакуумные приборы

Вакуумные лампы в 1960-е годы прошли путь динозавров, но научные работники возвращают их к жизни, создавая наноразмерные варианты, превосходящие транзисторы по быстродействию и стойкости к воздействию окружающей среды, особенно к высоким уровням радиации. Электронные электровакуумные приборы по мощности превосходят твердотельные усилители (рис.3). К тому же, по сравнению с полупроводниковыми приборами, вероятность их пробоя при высокой мощности намного меньше, меньше и их разогрев при высоких плотностях тока. За счет применения средств рекуперации возможно повышение эффективности электронных электровакуумных приборов. Здесь следует отметить, что размеры платформ, на которых предполагается размещать терагерцовые системы, а также и мощность их питания ограничены. Приборы на быстрых волнах большой мощности на ТГц-частотах (например, гиротроны), не могут быть использованы в качестве источников, поскольку требуют применения громоздких сверхпроводящих или импульсных магнитов, а у традиционных вакуумных приборов на этих частотах из-за трудности прохождения электронных пучков через малоразмерные замедляющие структуры резко падает эффективность. Поэтому для получения достаточно высокой мощности на ТГц-частотах при относительно малых размерах корпуса перспективны интегрированные мощные СВЧ-модули на основе миниатюрной ЛБВ, при изготовлении которой применяются современные методы микромеханической обработки (МЭМС-технология).

Это побудило DARPA открыть в июле 2007 года программу создания высокочастотной интегрированной вакуумной электроники (High Frequency Integrated Vacuum Electronics, HiFIVE) и развернуть

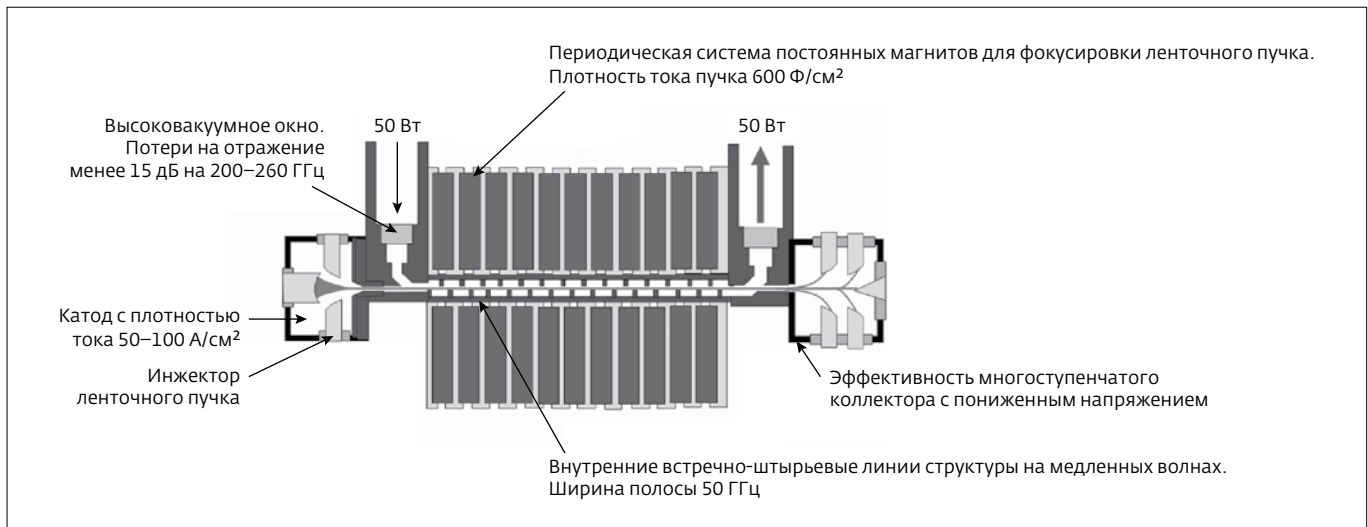


Рис.4. Структура модуля ЛБВ-усилителя

разработку ТГц-мощных модулей по программе "Терагерцовая электроника". Задачи программы HiFIVE – получение элементов, необходимых для создания усилителей с мощностью 50 Вт на частоте 200 ГГц по технологии интегрированной вакуумной электроники, и демонстрация такого усилителя. И, начиная с 2009 года, на Международных конференциях по вакуумной электронике (International Vacuum Electronics Conference, IVEC) ежегодно представлялись работы по этим программам [4, 5].

На конференции IVEC 2012 специалисты Калифорнийского университета в Дэвисе (UCD) представили разработанный по программе HiFIVE ЛБВ-усилитель с ленточным пучком на частоту 220 ГГц. При разработке ЛБВ-усилителя решались две задачи:

- применение новых методов изготовления, поскольку при использовании традиционной технологии для получения устройств, размеры которых с увеличением частоты существенно уменьшаются, не удастся выдерживать требуемые допуски. Кроме того, шероховатость поверхности элементов усилителя на частотах ТГц-диапазона становится сопоставимой с глубиной скин-эффекта, что приводит к росту потерь схемы;
- с уменьшением размеров замедляющей системы для обеспечения прохождения большого тока необходимо повышать плотность тока электронного луча, т.е. нужны катоды с чрезвычайно высокой плотностью тока.

Эти задачи были решены разработчиками за счет применения LIGA-технология

с использованием чувствительного в ближней УФ-области негативного фоторезиста. Разработанный специалистами UCD катод изготовлен на основе легированного окисью скандия вольфрама с единообразными зернистой структурой и размером пустот, полученного обработкой с применением золь-гель-технологии. Для придания катоду таблеточной формы успешно использовалась механическая микрообработка с помощью установки Nano CNC milling компании DTL, не вызывающей видоизменения или "забивания" пор. Усилитель с замедляющей структурой, представляющей собой волновод, составленный из двух внутренних встречно-штырьевых линий (рис.4), рассчитан на работу в широкой полосе частот.

Мгновенная полоса пропускания усилителя превышает 50 ГГц, выходная мощность – 50 Вт при мощности входного сигнала 50 мВт. Потери оптимально сконструированного устройства ввода излучения не превышали 1 дБ на 220 ГГц при полосе пропускания на уровне 1 дБ, равной ~75 ГГц. Радиочастотное окно, выполненное из тонкой пластины слюды, обеспечивает перекрытие нескольких диапазонов частот, равных октаве. Коэффициент токопрохождения ленточного пучка, формируемого структурой фокусировки пучка, составляет 73% [6, 7].

В результате совершенствования созданного по фазе I программы "Терагерцовая электроника" интегрированного модуля вакуумного усилителя мощностью 100 мВт на 670 ГГц [4] компания Northrop Grumman увеличила его частоту до 850 ГГц, о чем она сообщила на конференции

IVES 2012. Как и в предыдущем модуле, в новом усилителе использованы: замедляющая система на свернутом волноводе, изготовленная глубоким реактивным ионным травлением; термоионный катод с высокой плотностью тока электронного пучка; постоянный электромагнит с сильным магнитным полем и одноступенный понижающий коллектор [8].

НАНОРАЗМЕРНЫЕ ТГц-УСТРОЙСТВА ТГц-диоды

Немалую роль в освоении ТГц-диапазона играют и полупроводниковые наноразмерные диоды – резонансно-туннельные диоды (РТД) для источников излучения, а также диоды Шоттки и самопереключаемые диоды (Self-Switching Diodes, SSD) для детектирования излучения.

Резонансные туннельные диоды появились в результате перехода к наноразмерным структурам диодов Ганна, что привело к изменению их физических свойств. Базовая структура прибора содержит два нелегированных барьера (толщиной 1,5–5 нм) с размещенной между ними нелегированной 5-нм квантовой ямой. Эти слои заключены между полупроводником с узкой запрещенной зоной и сильнолегированным

материалом (рис.5а). Принцип функционирования диода, так же как и диода Ганна, основан на квантово-механическом эффекте туннелирования электронов, и его вольт-амперная характеристика имеет отрицательное дифференциальное сопротивление (рис.5б).

В связи со способностью генерировать непрерывный сигнал на ТГц-частотах, интерес к РТД в последнее время возрос. Так, исследователи крупнейшей телекоммуникационной компании Японии Nippon Telegraph and Telephone (NTT) и Технологического института Токио продемонстрировали передачу данных со скоростью 5 Гбит/с в ТГц-диапазоне при непосредственной амплитудно-кодовой модуляции и использовании РТД на основе InGaAs/AlAs с частотой генерации 542 ГГц и выходной мощностью 210 мкВт. Расстояние между передатчиком и приемником было ~1 см. Коэффициент побитовых ошибок при такой скорости передачи составлял $3 \cdot 10^{-5}$ ($2 \cdot 10^{-8}$ при 2 Гбит/с). По утверждению разработчиков, производительность системы может достигать 100 Гбит/с [9]. А по данным компании Саппон, за счет применения РТД с улучшенной мезоструктурой и регулировки длины микрополосковой антенны им удалось получить генерацию

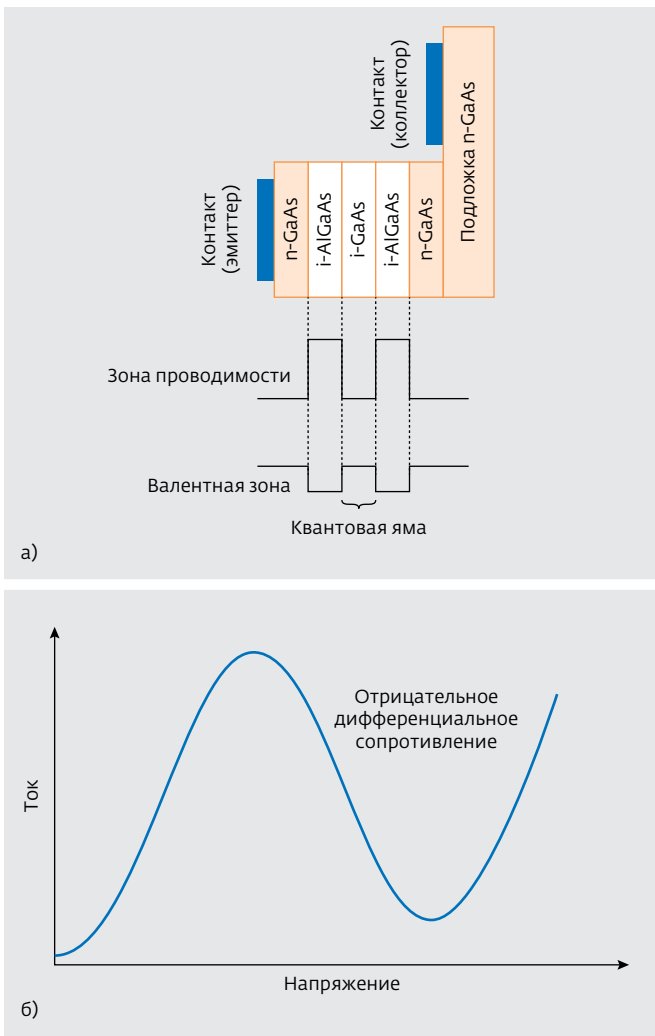


Рис.5. Структура (а) и вольт-амперная характеристика (б) резонансного туннельного диода

сигнала при комнатной температуре на частоте до 1,02-1,40 ТГц [10].

Самопереключаемый диод SSD, представляющий собой наноразмерный нелинейный прибор, сформированный в гетероструктуре (узко- или широкозонных полупроводниковых соединений - InGaAs/AlInAs и InAs/AlSb или GaN/AlGaN соответственно), содержащей двухмерный электронный газ, был предложен в 2003 году сотрудниками Манчестерского университета [11]. Самопереключаемый прибор образован двумя вытравливаемыми изолирующими канавками (глубина их зависит от используемого материала) шириной W_h и W_v , между которыми располагается канал (на основе InGaAs) А шириной W и длиной L . Канавки и канал ограничены выступами В, выполняющими функцию затвора, присоединенного к стоку (рис.6а)

Изготавливается прибор с помощью одного этапа нанолитографии (с применением атомного силового микроскопа или электронно-лучевой литографии).

Вольт-амперная характеристика SSD подобна характеристике обычного диода, но принцип работы отличен. Он основан на формировании у границы раздела канавок и слоя двухмерного электронного газа обедненной области. В результате реальная ширина канала фактически меньше заданного значения W (рис.6б). При прямом смещении диода (рис.6в) положительный заряд двух выступов будет притягивать электроны в канал и ток диода увеличивается, при обратном смещении электроны отталкиваются и ток уменьшается (рис.6г). Таким образом, проводимость канала модулируется приложенным напряжением. Чем меньше ширина канала, тем больше разница его проводимости при прямом и обратном смещении.

К достоинствам SSD относятся низкие затраты на производство благодаря его планарной структуре, изготавливаемой за один этап литографии, и возможность регулировки порогового напряжения в пределах от 0 до ~10 В. Это позволяет принимать чрезвычайно слабые сигналы. Простая планарная структура позволяет легко объединять отдельные диоды в матрицы без межсоединений, вносящих паразитные элементы в схему, и путем формирования дополнительных изолирующих канавок создавать такие устройства, как логический вентиль ИЛИ и мостовой выпрямитель.

Ученые Манчестерского университета продемонстрировали работу при комнатной температуре схемы приемника на частоту 1,5 ТГц,

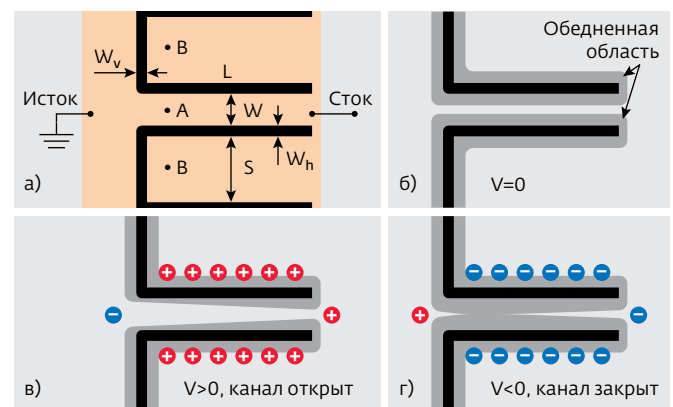


Рис.6. Структура самопереключаемого диода (а); обедненная зона у границы раздела канавок (б); подача положительного потенциала на канал (в); подача отрицательного потенциала на канал (г)

содержащего четыре GaAs/AlGaAs SSD-диода, изготовленных на гетероструктуре AlGaAs/GaAs, и антенну в виде симметричного вибратора с треугольными плечами. Длина и ширина наноканалов диодов составляла 1500 и 320 нм соответственно. Наибольшее значение чувствительности при комнатной температуре и токе смещения 100 нА было равно 300 В/Вт, в отсутствие смещения – 150 В/Вт. Был также проведен опыт по применению приемника на основе SSD для получения изображения объекта при облучении его источником равновесного излучения. В результате при растровом сканировании были получены изображения спрятанных объектов, например, USB-разъема, расположенного под пластмассовым покровом.

Проведенные в других лабораториях мира исследования показали возможность создания приемных устройств на охлаждаемых до криогенных температур InGaAs SSDs на частоту 2,5 ТГц и на GaN-диодах на 0,300 ТГц при комнатной температуре. SSDs, изготовленные на относительно дешевых полупроводниковых материалах (оксиде цинка, оксиде индия и олова), а также на полимерных пленках, были использованы в РЧ-датчиках. Таким образом, на основе

SSD-технологии возможно создание таких простых и дешевых устройств, как метки радиочастотной идентификации [12].

И еще: один наноразмерный диод привлекает внимание разработчиков ТГц-устройств. Это так называемый щелевой диод (Slot Diode) – диод, выполняемый на гетероструктуре InGaAs/AlInAs или InAs/AlSb с InGaAs двухмерным каналом, расположенным в зазоре (щели) между полосковыми контактами (рис.7) [13]. Правда, возможность получения излучения мощностью 50 мкВт на 0,8 ТГц и выше показана только на основе моделирования методом Монте-Карло. Исследователи отделения микроэлектроники и наноэлектроники Чалмерского технологического университета (Швеция) разработали, изготовили и измерили вольт-амперные характеристики InGaAs slot-диодов. Однако не сумели зафиксировать их ТГц-излучение ни с помощью детектора на эффекте Шоттки, рассчитанного на частоту до 900 ГГц, ни с помощью болометрического измерителя на частоту до 1 ТГц при уровне собственных шумов 10 нВт. Возможно, причина отсутствия детектируемого излучения обусловлена тем, что частота его превышает 1 ТГц. Кроме того, при моделировании slot-диод имитировали как короткозамкнутый на радиочастотах

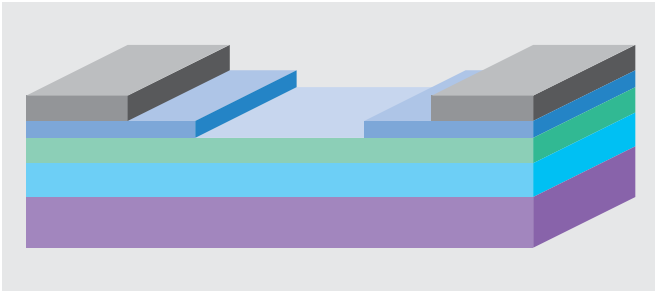


Рис.7. Щелевой диод (HEMT без затвора)

прибор, хотя при экспериментах он представлял собой 100-Ом нагрузку. И еще, техмерные размеры диода, дефекты материала и эффекты нагрева при моделировании не учитывались. В то же время результаты измерения вольт-амперных характеристик изготовленных диодов при комнатной температуре соответствовали данным Монте-Карло. Поэтому в дальнейшем разработчики намерены исследовать излучение InGaAs-диодов на более высоких ТГц-частотах, а также проводить эксперименты при криогенных температурах.

Ученые исследуют возможности применения в качестве генераторов и приемников не только традиционных электронных приборов.

Технология будущего?

Стремясь найти причину исчезновения вакуумных ламп из компьютерной и бытовой техники, несмотря на баллистический характер переноса электронов, которые не рассеиваются кристаллической решеткой полупроводникового материала, исследователи пришли к выводу, что для эффективного использования мощности, развиваемой электронами в вакууме, необходимо перейти к нанотехнологии. Результат этих работ – созданный специалистами центра нанотехнологии Исследовательского центра Эймса (Ames Research Centre) NASA и корейского Национального центра нанотехнологического производства (National NanoFab Center) транзистор с вакуумным каналом, или "вакуумная нанолампа", отличающийся значительно более высокой эффективностью переноса электронов в сочетании с достоинствами транзисторов, поскольку изготавливается с помощью хорошо освоенной полупроводниковой технологии [14]. Транзистор изготовлен на легированной фосфором кремниевой подложке, в которой с помощью литографии создается небольшая полость, с трех сторон которой расположены электроды наподобие полевого транзистора (рис.8). Расстояние между истоком (анодом) и стоком (катодом) равно 150 нм,

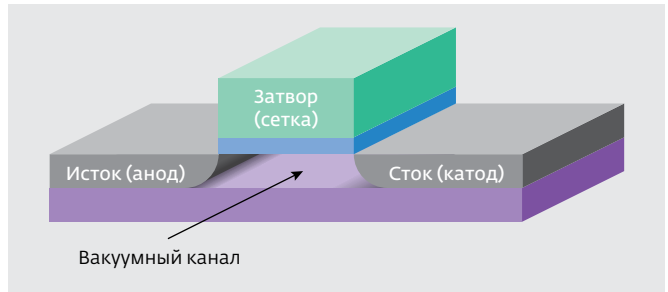


Рис.8. Структура вакуумного транзистора

т.е. настолько мало, что вероятность столкновения электронов, средняя длина свободного пробега которых равна 1 мкм, с атомами воздуха пренебрежимо мала. Таким образом, разработчикам не нужно создавать вакуум. Правда в сравнении с современными транзисторами рабочее напряжение вакуумного наноустройства велико – ~10 В (против 1 В). Предельная частота усиления по току f_T первого вакуумного транзистора составила 400 ГГц. Таким образом, наноразмерные вакуумные транзисторы могут работать на высоких частотах, не уступая при этом по массе, стоимости, сроку службы полупроводниковым приборам, а по устойчивости к воздействию неблагоприятных внешних условий, особенно к радиационному излучению, – превосходя их. Последнее свойство особенно важно для военных систем, на достижение радиационной стойкости которых тратятся большие финансовые и временные ресурсы. А высокое рабочее напряжение разработчики намерены снизить до ~2 В за счет уменьшения расстояния между истоком и стоком до 10–20 нм. В этом случае предельная частота может составить 600 ГГц. По утверждению исследователей, на основе вакуумных, как и обычных, транзисторов возможно построение логических схем, таких как НЕ, НЕ-ИЛИ и др.

Использовать баллистический перенос электронов в твердотельной среде пытаются не только специалисты NASA и Национального центра нанотехнологического производства. Ученые Питтсбургского университета показали возможность эмиссии электронов, захваченных ловушками на границе раздела полупроводника и оксидного или металлического слоя вследствие отталкивания одноименно заряженных носителей заряда. Группа исследователей направляла излучаемые при подаче небольшого напряжения электроны в наноразмерный воздушный канал, в котором они распространялись без соударений или рассеивания.

Новый класс энергоэффективных и быстро действующих "вакуумных твердотельных"

приборов, изготавливаемых по полупроводниковой технологии, должен расширить возможности ИТ-промышленности.

Оптически переключаемые хиральные ТГц-метамолекулы

Ключевым событием для развития ТГц-электроники DARPA считает получение в 2012 году межинституциональной группой исследователей первых искусственных молекул, хиральность которых под воздействием светового пучка может быстро переключаться с правосторонней ориентации на левостороннюю [15]. В состав группы входят ученые национальной лаборатории Лоуренса в Беркли Министерства энергетики США, Бирмингемского университета (Великобритания) и Лос-Аламосской национальной научной лаборатории Министерства энергетики США.

Хиральность – право- или левосторонняя ориентация или доминирование одной ориентации у некоторых типов молекул. Это означает, что молекула может принимать одно из двух форм

своего зеркального отображения. Свойства молекул право- и левосторонней формы, называемых энантиомерами, различны. Так, один энантиомер хиральной молекулы лимонена (бесцветная жидкость с цитровым запахом) пахнет как лимон, другой – как апельсин. Получение искусственных молекул, хиральность которых можно быстро переключать, сулит возможность применения их в терагерцовой технологии, в том числе для обработки данных с пониженным энергопотреблением для обеспечения национальной безопасности и поддержки сверхскоростной связи.

Хиральность природных материалов можно изменять, но для этого необходимо изменять их структуру. Этот процесс малоэффективен и длителен. Группа разработчиков под руководством ведущего исследователя отделения материаловедения берклийской лаборатории Сян Чжан при изучении метаматериалов на основе узких наноразмерных золотых лент, разделенных воздушным зазором, служащим диэлектриком, сумели создать светочувствительную искусственную хиральную метамолекулу.

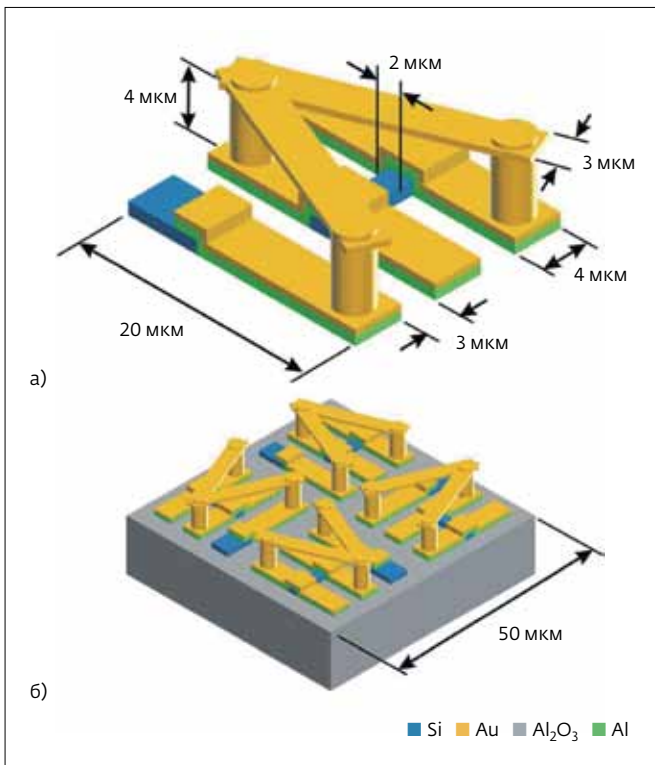


Рис.9. Структура искусственной метамолекулы с переключаемой хиральностью (а) и ячейка матрицы оптически переключаемых хиральных метамолекул (б)

Хиральная метамолекула в виде трехмерного V-образного элемента была сформирована поверх подложки кремний-на-сапфире и содержала два трехмерных метаатома противоположной хиральности. Вершина и концы V-образного элемента опирались на золотые столбики высотой 4 мкм, каждый из которых присоединен к отдельной золотой проводящей линии. Трехмерный V-образный элемент можно рассматривать как пару связанных резонаторов из двух полуколец, электрическое и магнитное поля которых взаимодействуют, что обеспечивает хиральность каждого атома и сильно выраженный циркулярный дихроизм молекулы (т.е. зависимость поглощения излучения от его круговой поляризации) на резонансной частоте. Метамолекула, содержащая два метаатома одной формы, но разной хиральности, обладает зеркальной симметрией и оптически неактивна. Иными словами, метаатомы с противоположной хиральностью нейтрализуют оптическую активность друг друга. Чтобы нарушать зеркальную симметрию, разработчики придали каждому метаатому кремниевую фоточувствительную контактную дорожку. При этом контактная дорожка одного метаатома соединяла два золотых электрода, тогда как в другом

атоме она продлевала электрод (рис.9а). При облучении метамолекулы интенсивным пучком света, энергия фотонов которого больше ширины запрещенной зоны кремния, кремниевая дорожка, соединяющая два электрода резонатора (метаатома), становится электропроводной, и резонатор прекращает функционировать. В результате V-образная структура приобретает хиральность второго работающего резонатора. Воздействие светового пучка на кремниевую дорожку, продлевающую золотой электрод, приводит к изменению емкости одного из резонаторов, и V-образная структура переключается в состояние, при котором циркулярный дихроизм наблюдается на двух разных частотах. Таким образом, кремниевые контакты выполняют функцию оптоэлектронного переключателя, обеспечивающего зеркальное изменение хиральности под воздействием фотовозбуждения.

Исследователи изготовили двухмерную матрицу метаматериала на основе квадратной ячейки с четырьмя V-образными элементами, вершины которых ориентированы против часовой стрелки (рис.9б). Компонировка структуры обеспечивает четырехкратную симметрию относительно оси вращения, с тем чтобы колебания, распространяющиеся перпендикулярно структуре, были циркулярно-поляризованы. Сторона ячейки равна 50 мкм, т.е. много меньше резонансной длины волны в ТГц-диапазоне, что и позволяет классифицировать искусственную хиральную структуру как метаматериал.

По утверждению разработчиков, возможность управления хиральностью материала позволит создавать системы детектирования, чувствительные к поляризации излучения на ТГц-частоте. Такие системы могут применяться для обнаружения молекул определенных веществ, исходя из их взаимодействия со светом с циркулярной поляризацией. Они перспективны и для повышения пропускной способности терагерцовых систем связи благодаря кодированию данных с помощью циркулярной поляризации. Поскольку ТГц-диапазон особо интересен с точки зрения обнаружения возможного взаимодействия биологически релевантных молекул, предложенная структура перспективна для оценки состояния новых материалов, например, циклотронного резонанса графена и топологических изоляторов.

Но, по мнению ученых, созданная ими структура может быть использована не только для управления хиральностью, но и для динамического изменения других электромагнитных свойств материалов, т.е. для управления не только поляризацией электромагнитных волн, но и их фазой,

интенсивностью и направлением распространения. Так, возможно создание метаповерхности с динамически переключаемым высоким и низким импедансом. Угол отражения такой метаповерхностью ТГц-сигнала можно будет динамически регулировать в пределах от 0 до 180°.

Пока состояние переключаемой хиральности нестабильно, и искусственный элемент возвращается в исходное состояние через 1 мс. Правда, процесс переключения хиральности воспроизводим. Сейчас работы группы направлены на улучшение свойств метаматериалов для получения более устойчивого переключения хиральности.

Рассмотренные приборы не охватывают весь диапазон ТГц-устройств на основе новейших полупроводниковых наногетероструктур и материалов. К ним относятся:

- перестраиваемые по частоте плазменно-резонансные ТГц-излучатели и приемники, которые на основе InP-структур НЕМТ с двойным сеточным затвором (DGG- НЕМТ) обеспечивают эмиссию когерентного монохромного ТГц-излучения и его сверхчувствительную регистрацию при комнатной температуре. Предназначены для ТГц-систем формирования изображения и спектроскопии;
 - транзисторы с предельно высокой частотой на основе графена, новых метаматериалов с углеродной матрицей и гетероструктур полупроводниковых соединений;
 - новейшие фотонные терагерцовые приборы на основе графена, преодолевающие ограничения существующей технологии. Созданный оптический квантовый генератор ТГц-излучения на основе графена с оптической накачкой – первый шаг на пути реализации новых типов графеновых ТГц-лазеров.
- Но все еще впереди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Terahertz Radiation Systems: Technologies and Global Markets. – www.bccresearch.com/market-research/instrumentation-and-sensors/terahertz-radiation-technologies-markets-ias029b.html
2. **Майская В.** Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон. – *Электроника: НТБ*, 2011, №6, с.74–87.
3. **Urteaga M., Pierson R., Rowell P. et al.** 130nm InP DHBTs with $f_t > 0.52$ THz and $f_{max} > 1.1$ THz. – ece.ucsb.edu/Faculty/rodwell/publications_and_presentations/publications/2011_6_june_urteaga_DRC.pdf
4. **Викулов И.** Вакуумная СВЧ-электроника. По материалам конференции IVEC 2009. – *Электроника: НТБ*, 2010, №4, с.62.
5. **Викулов И.** Вакуумная СВЧ-электроника в 2010 году: к миллиметровому и терагерцевому диапазонам. – *Электроника: НТБ*, 2011, №2, с.108.
6. THz Vacuum Electronic Devices. – Davis Millimeter-Wave Research Center Microwave/Millimeter Wave Technology Plasma Diagnostics. – tempest.das.ucdavis.edu/vacuum/
7. **Young-Min Shin, Barnett L.R., Baig A. et al.** 0.22 THz sheet beam TWT amplifier: System design and analysis. – ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6096401&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F16%2F6117780%2F06096401.pdf%3Farnumber%3D6096401
8. 0.85 THz Vacuum-Based Power Amplifier. – ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6262066&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6252115%2F6262049%2F06262066.pdf%3Farnumber%3D6262066
9. **Siegel P.H.** THz Technology: Science Overview, Comm Applications, and Safety Considerations. – *IEEE Trans. Terahz. Sci. Technol.*, 2011, 1, (1), p. 256-263 – www.ieeeusa.org/communications/ia/files/Siegel-FCC-19Dec2011.pdf
10. **Koyama Y., Sekiguchi R., and Ouchi T.** Oscillations up to 1.40 THz from Resonant-Tunneling-Diode-Based Oscillators with Integrated Patch Antennas. – *The Japan Society of Applied Physics*. – apex.jsap.jp/link?APEX/6/064102/
11. **Song A.M.** Nano-diode that does not rely on pn junction – personalpages.manchester.ac.uk/staff/A.Song/research/SelfSwitchingDevice.htm
12. **Singh A.K., Kasjoo S.R, Zhang L.Q. et al.** Novel nanodiodes for Terahertz Operation. – www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=13&ved=0CIMBEBYwDA&url=http%3A%2F%2Fwww.theiet.org%2Fcommunities%2Ffrf%2Factive-devices%2F2012%2Fdocuments%2Fnanodiodes-paper.cfm%3Ftype%3Dpdf&ei=Nh04Up_KLYHf4wSlioCgBQ&usq=AFQjCNEY7aWi6VI0lk0AWaSi0USMbOwdyQ&sig2=eovXvq6cT7eqjN_Dapt6Fw&bvm=bv.52164340,d.bGE&cad=rjt
13. **Westlund A.** Novel Terahertz Emitters and Detectors: InGaAs Slot Diodes and InAs Self-Switching Diodes – publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/178061/178061.pdf
14. **Boothroyd D.** How vacuum tube technology is being deployed at the nanoscale. – www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/how-vacuum-tube-technology-is-being-deployed-at-the-nanoscale/45695/
15. **Shuang Zhang, Jiangfeng Zhou, Yong-Shik Park et al** Photoinduced handedness switching in terahertz chiral metamolecules. – xlab.me.berkeley.edu/pdf/202.pdf

