

"ЧУДО-МАТЕРИАЛ" – ГРАФЕН: НОВЫЙ КОНКУРЕНТ НА РЫНКЕ РЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

ЧАСТЬ 2

В.Шурыгина

Вторая половина прошедшего столетия была свидетелем стремительного технического прогресса: от заимствования энергии у ядер атомов до покорения глубокого космоса. Но ни в одной области не наблюдалось столь быстрого развития, как в электронике – на смену громоздким ЭВМ недавнего прошлого пришли портативные компьютеры, на смену необъятным объемам магнитных лент для хранения данных – миниатюрные диски. Однако непрерывно растущие требования, предъявляемые к полупроводниковым приборам, могут привести к преждевременной гибели эры электроники. Среди физических событий, которые могут ее "спасти", ученые называют получение графена – двухмерного одноатомного слоя изолированного углерода со многими необычными электронными свойствами. По мнению аналитиков компании BCC Research, если современные усилия по созданию графеновых электронных устройств будут успешными (а они должны быть успешными), то к 2020 году рынок компонентов на основе графена может достичь 675 млн. долл. Благодаря таким свойствам графена, как высокая подвижность носителей заряда при комнатной температуре, даже при их высокой концентрации, и амбиполярный характер проводимости, заключающийся в возможности с помощью внешнего электрического поля непрерывно менять полярность носителей заряда – от электронов к дыркам и наоборот, – этот материал весьма перспективен для создания РЧ-компонентов. Однако чтобы графен представлял собой серьезную угрозу для современной полупроводниковой технологии, необходимо решить множество проблем.

НЕЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА Умножители частоты

Графеновый малошумящий усилитель хорошо известный старый прибор, выполненный на новом материале. Но появление графена позволяет реализовывать РЧ-схемы и схемы обработки смешанного сигнала совершенно нового типа, которые

нельзя выполнить на основе традиционных однополярных полупроводниковых приборов, таких как кремниевые транзисторы и транзисторы на полупроводниковых соединениях. Такая возможность обусловлена отчетливо проявляемым амбиполярным характером проводимости графена, позволяющим непрерывно чередовать полярность носителей заряда (электронов и дырок). При смещении

канала графенового транзистора в состояние электронейтральности и подаче на затвор синусоидального сигнала происходит чередование электронной и дырочной проводимости в канале. В результате передаточная характеристика $I_{ds}-V_g$ транзистора имеет V-образный вид. Благодаря такой характеристике можно реализовать РЧ-умножитель частоты путем подачи на затвор амбиполярного графенового полевого транзистора (АГПТ) синусоидального сигнала, смещающего характеристику транзистора в точку электронейтральности проводимости канала. Когда выходной ток стока графенового транзистора попеременно обусловлен электронной и дырочной проводимостью, он играет роль удвоителя частоты, и благодаря отсутствию запрещенной зоны непрерывная частота выходного сигнала в два раза превышает частоту сигнала, поступающего на затвор.

Впервые умножитель частоты на основе АГПТ был создан учеными Массачусетского технологического института, продемонстрировавшими возможность умножения частоты 10-кГц входного сигнала в два раза. Спектральная частота выходного 20-кГц сигнала свидетельствовала о том, что на выходной сигнал приходилось 90% мощности [9].

Однако рабочая частота первых графеновых РЧ-схем была невысокой из-за низкой частоты отсечки f_T используемых АГПТ. Это во многом связано с тем, что обычные процессы полупроводниковой технологии не вполне приемлемы для изготовления графеновых устройств, поскольку могут существенно повреждать монослои графена и значительно ухудшать характеристики прибора. Для решения этой проблемы исследователи Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе предложили конструкцию АГПТ с самосовмещенным верхним затвором чрезвычайно малой длины на основе нанопровода со структурой ядро-оболочка

($\text{Co}_2\text{Si}-\text{Al}_2\text{O}_3$). При этом длину канала определял диаметр нанопровода.

Самосовмещенный транзистор изготавливался путем физического монтажа на пленку графена, расположенную на высокоомной Si/SiO_2 -подложке, $\text{Co}_2\text{Si}-\text{Al}_2\text{O}_3$ нанопровода. Процесс монтажа проводился при комнатной температуре. Пленка Al_2O_3 -оболочки толщиной 5 нм служила диэлектриком затвора, тогда как металлическое Co_2Si -ядро – самосовмещенным локальным затвором. Поверх графена наносилась тонкая (5–10 нм) пленка платины, которую нанопровод делил на две изолированные области, служащие самосовмещенными электродами истока и стока (рис.1а, б).

Монтаж затвора на основе нанопровода не вносил изменения в значение высокой подвижности носителей заряда графена, а процесс самосовмещения обеспечивал автоматическое и точное расположение электродов истока, стока и затвора без перекрытий и существенных зазоров между ними, минимизируя, таким образом, сопротивление канала. Группой исследователей университета были изготовлены графеновые транзисторы с длиной канала 140 нм и рекордной частотой отсечки – 300 ГГц. Ток транзистора в открытом состоянии составлял 3,32 мА/мкм, крутизна – 1,27 мС/мкм.

При частоте входного сигнала 1,05 ГГц частота выходного сигнала умножителя на основе самосовмещенного АГПТ была равна 2,1 ГГц. Спектральный анализ выходного РЧ-сигнала дал высокие результаты – на него приходилось 90% выходной мощности [10].

На Международной конференции по электронным приборам IEDM 2010 группа ученых Массачусетского технологического университета сообщила о создании амбиполярного умножителя частоты на частоту 1,4 ГГц с чрезвычайно высокой спектральной частотой (>90%) [11].

Позднее специалистами Райсовского университета и Калифорнийского университета в Риверсайде был предложен усилитель, способный работать в трех режимах в зависимости от смещения канала: в режиме умножения, а также в режимах с общим истоком и общим стоком. Усилитель выполнен на основе трехвыводного АГПТ с тыльным затвором. Возможность управления работой транзистора с помощью напряжения затвора была использована для реализации фазовой и частотной модуляции. Прибор перспективен и для применения в аналоговых схемах связных систем [12].

Разработчиками Исследовательского центра нанoeлектроники компании Fujitsu продемонстрировали инвертор с управляемой полярностью, выполненный на основе четырехвыводного АГПТ.

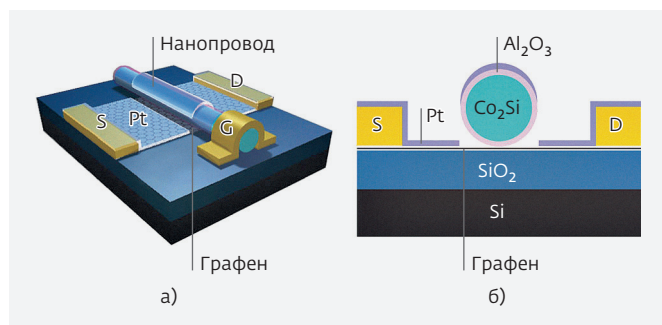


Рис.1. Графеновый транзистор с самосовмещенным затвором на основе $\text{Co}_2\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -нанопровода: топология прибора (а) и его поперечное сечение (б)

Транзистор имеет два входных контакта – к верхнему и нижнему затворам. Его полярностью можно управлять путем изменения напряжения нижнего затвора. На основе АГПТ построен цифровой фазовый модулятор, функционирующий посредством ввода цифровых данных на нижний затвор и синусоидального сигнала на верхний затвор [13].

Стоит отметить, что учеными Пекинского университета был создан амбиполярный полевой транзистор на основе углеродных трубок с небольшой запрещенной зоной (Small Band-Gap Carbon NanoTube, SBG CNT). Транзистор с верхним затвором и HfO_2 затворным окислом толщиной 12 нм имел хорошие амбиполярные передаточные характеристики без заметного гистерезиса. Выполненный на его основе удвоитель частоты при подаче на верхний затвор сигнала на частоте 1 кГц обеспечивал выход на частоте 2 кГц с высоким КПД преобразования. Усиление сигнала превышало 0,15. Анализ энергетического спектра показал, что 95% выходного сигнала приходилось на частоту 2 кГц [14].

Но вернемся к амбиполярному умножителю частоты и рассмотрим принцип его действия (рис.2). Для этого на затвор АГПТ подается смещение, соответствующее минимальной проводимости канала. Наложение синусоидального сигнала на постоянное смещение электрода затвора приводит к модуляции проводимости канала. Индуктивность в цепи смещения обеспечивает протекание постоянного тока при колебаниях напряжения стока вследствие изменения характера проводимости канала. При изменении входного сигнала от значения в точке А до значения в С, проходя через точку В (см. рис.2), ток в канале формируют носители положительного заряда (дырки, h^+), при изменении входного сигнала от значения в точке С до значения в Е, проходя через D, в канале преобладают носители отрицательного заряда (электроны, e^-). Таким образом, каждый полупериод изменения входного сигнала вызывает полный цикл изменения выходного сигнала, т.е. приводит к удвоению частоты. Схема работает в диапазоне частот Т-образного инжектора питания, элементы индуктивности и конденсаторы на входе и выходе выполняют функции дросселей и блокировочных конденсаторов.

Изучение спектра выходного сигнала умножителя при частоте выходного сигнала, подаваемого на затвор АГПТ длиной 300 нм, равного 8 ГГц, показало, что амплитуда выходного сигнала на частоту 16 ГГц на 11 дБ выше, чем у входного сигнала. Это означает, что на выходной сигнал приходится 93% выходной мощности. Частота снижения выходной

мощности составляет 17 дБ, или примерно 80% частоты отсечки, равной 20 ГГц. Благодаря высокой подвижности носителей заряда и высокой скорости насыщения транзистора, его ширина полосы ограничена не временем пролета носителей, а лишь постоянной времени внешней RC-цепи. Таким образом, с помощью одного АГПТ удалось реализовать удвоитель частоты Ку-диапазона (12–18 Гц) без каких-либо фильтров. Умножитель может найти применение в спутниковых и наземных СВЧ-системах связи, в радиолокаторах.

Смесители частоты, фазовые модуляторы

Симметричная передаточная характеристика ГПТ обычно имеет сильно выраженную квадратичную компоненту, что позволяет использовать его в качестве РЧ-смесителя с высокими характеристиками. Принимая во внимание, симметричность и дифференцируемость передаточной характеристики ГПТ, ток стока можно считать равным

$$I_D = a_0 + a_2(V_{GS} - V_{Gmin})^2 + a_4(V_{GS} - V_{Gmin})^4 + \dots,$$

где V_{Gmin} – точка минимума проводимости, a_0 , a_2 , $a_4 \dots$ – постоянные величины. При подаче на затвор графенового транзистора двух сигналов – входного РЧ-сигнала на частоте f_{RF} и сигнала гетеродина на частоте f_{LO} – транзистор генерирует сигналы промежуточных частот, равных сумме частот входных сигналов $f_{RF} + f_{LO}$ и их разности $f_{RF} - f_{LO}$. На выходе смесителя на основе идеального ГПТ с симметричной передаточной характеристикой при смещении канала в состояние электронейтральности получают сигнал, имеющий полезные гармоники $f_{RF} + f_{LO}$ и $f_{RF} - f_{LO}$. Гармоники нечетных порядков эффективно подавляются ГПТ, и вся выходная мощность присуща сигналам на разностных или суммарных частотах. Таким образом, в смесителях на ГПТ существенно подавляются интермодуляционные искажения нечетного порядка, часто присутствующие в смесителях на однополярных приборах и нарушающие работу схемы.

В ходе исследования РЧ графеновых транзисторов в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе был создан РЧ-смеситель на частоту 10 ГГц при $f_{RF} = 6,72$ ГГц и $f_{LO} = 2,98$ ГГц. Новые графеновые РЧ-схемы, в которых используются необычные свойства переноса носителей заряда графена, могут коренным образом преобразовать многие РЧ-системы связи.

Значительный успех в области создания и изготовления интегральных схем на основе графена достигли специалисты корпорации IBM,

разработавшие схему смесителя, в котором все компоненты, включая ГПТ, две индуктивности и требуемые межсоединения, интегрированы на одной SiC-подложке. Интегральная схема представляет собой РЧ-смеситель, работающий на частоте до 10 ГГц.

Ранее графеновые РЧ-схемы создавали на основе графенового транзистора, соединенного с внешними пассивными элементами. Характеристики такой гетерогенной схемы были невысокими из-за потерь в межсоединениях, преобладания паразитных эффектов и пренебрежения к присущим графену положительным свойствам. Трудности создания интегральной схемы, объединяющей ГПТ и паразитные элементы, обусловлены отличием свойств графена от материалов, используемых в полупроводниковом производстве, что проявляется в различном механизме формирования омических контактов, плохой адгезии металлов и окислов к графену и в повреждении графена при плазменной обработке. Поэтому для создания графеновой РЧ-схемы на единой подложке потребовалась разработка инновационной конструкции схемы и процессов ее изготовления.

Предложенный специалистами IBM процесс формирования интегральной аналоговой графеновой схемы на SiC-подложке заключался в следующем. Графеновая схема (рис.3) изготавливалась на двух- или трехслойной пластине графена, эпитаксиально выращенной на подложке карбида кремния при температуре выше 1400°C. Первоначально создавался

графеновый полевой транзистор с верхним затвором, а затем на том же кристалле изготавливались интегрированные индуктивности. Для создания канала транзистора на SiC-подложку с графеном методом центрифугирования наносился слой полиметилметакрилата (PMMA) толщиной 140 нм, а затем слой водород-силсесквиоксана (HSQ) толщиной 20 нм. Канал формировался электронной литографией. Избыточный графен вокруг канала удалялся кислородной плазмой, при этом экспонированная HSQ-пленка служила защитной маской. Двухслойное покрытие HSQ-PMMA области канала удалялось ацетоном. Удаление графена, окружающего канал, обеспечивало хорошую адгезию осаждаемых пленок палладия (20 нм) и золота (40 нм), формирующих омические контакты истока, стока и электрода затвора. Длина затвора транзистора составляла 550 нм, расстояние между истоком и стоком – 600 нм, толщина диэлектрика затвора Al_2O_3 – 20 нм. Индуктивности, соединяемые с истоком и стоком, изготавливались на алюминиевой пленке толщиной 1 мкм. Для изоляции петель индуктивности от расположенных ниже металлических соединений осаждалась пленка SiO_2 толщиной 120 нм (рис.3). Площадь схемы не превышала 1 мм².

Созданная графеновая интегральная схема выполняла функции широкополосного РЧ-смесителя, работающего на частотах до 10 ГГц. Испытания показали ее необычно высокую термостабильность и незначительное ухудшение рабочих

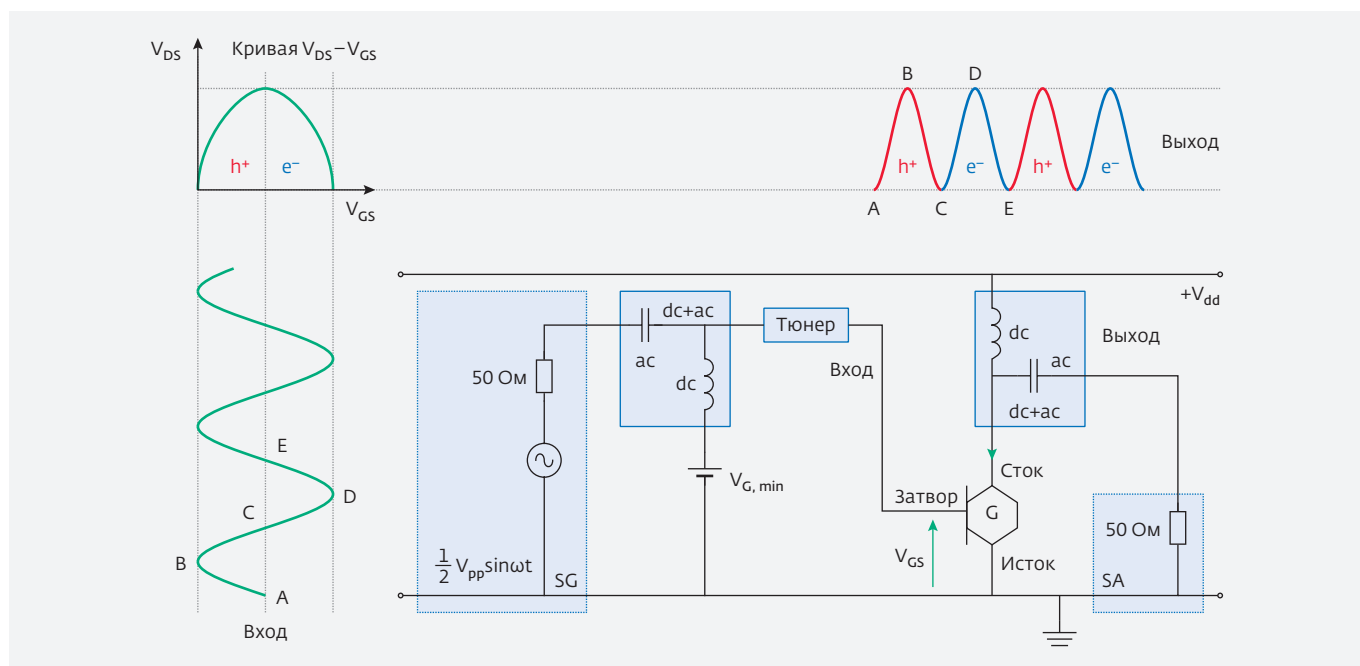


Рис.2. Схема графенового умножителя частоты, работающего в гигагерцовом диапазоне

характеристик (менее 1 дБ) при изменении температуры в диапазоне от 300 до 400 К. Потери на преобразование схемы составляли 27 дБ на частоте 4 ГГц, тогда как у созданных ранее смесителей на основе ГПТ, работающих на частоте 10 МГц, они были равны 40 дБ. Правда, у представленных на рынке смесителей на основе GaAs-транзисторов потери на преобразование равны 7 дБ на частоте 1,95 ГГц. По мнению разработчиков, применение тонкопленочных диэлектриков с высокой диэлектрической постоянной (например, HfO_2 толщиной 2 нм) или уменьшения длины затвора (до 40 нм) позволит улучшить крутизну транзистора на порядок и тем самым повысить усиление смесителя при преобразовании более чем на 20 дБ. Поскольку работа по созданию графеновой интегральной схемы в основном финансировалась DARPA, новые графеновые интегральные схемы очевидно найдут применение в системах скрытой связи между летчиками ВВС, так как предложенный метод интеграции графеновых транзисторов и пассивных элементов сможет использоваться для создания усилителей и генераторов беспроводных систем связи [15].

И действительно в начале 2014 года корпорация IBM объявила о создании графеновой интегральной схемы многокаскадного приемника, содержащего на кристалле площадью 0,6 мм² три ГПТ, четыре индуктивности, два конденсатора и два резистора (рис.4). Схема изготавливалась на линии производства полупроводниковых приборов на пластинах диаметром 200 мм. Для создания этой интегральной схемы разработчики пересмотрели обычную технологию формирования кремниевых микросхем, перенеся процессы изготовления ГПТ на последний этап получения схемы, с тем чтобы не повредить его характеристики. Отмечается, что

использованная технология пригодна для создания трехмерных микросхем на КМОП-основе [16].

Амбиполярные графеновые приборы могут выполнять и функцию двоичного фазового манипулятора – необходимого компонента беспроводных цифровых систем связи. Для этого при смещении передаточной характеристики ГПТ в точку электронейтральности на затвор подаются цифровой прямоугольный сигнал (данные) и высокочастотный синусоидальный сигнал (сигнал несущей частоты). Цифровой сигнал приводит к колебанию электронной и дырочной проводимости канала. Поскольку усиление передаточной характеристики прибора при дырочной проводимости отрицательное, а при электронной – положительное, выходной сигнал смоделирован сигналом данных, и фазовый сдвиг между "1" и "0" составляет 180°.

Характеристики двоичного фазового модулятора, построенного на основе ГПТ продемонстрировала группа исследователей Массачусетского технологического института (МТИ). Модулятор был построен на высокочастотном графеновом транзисторе, выращенном на медной фольге химическим осаждением из паровой фазы (CVD-метод). Транзистор имел многослойные Ti/Pd/Au-омические контакты

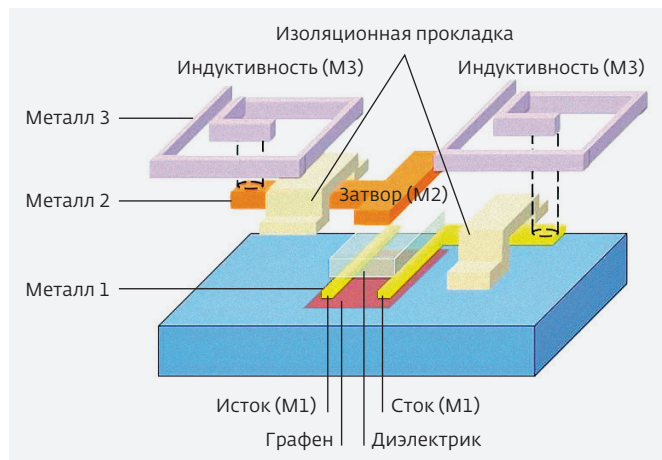


Рис.3. Структура схемы графенового смесителя

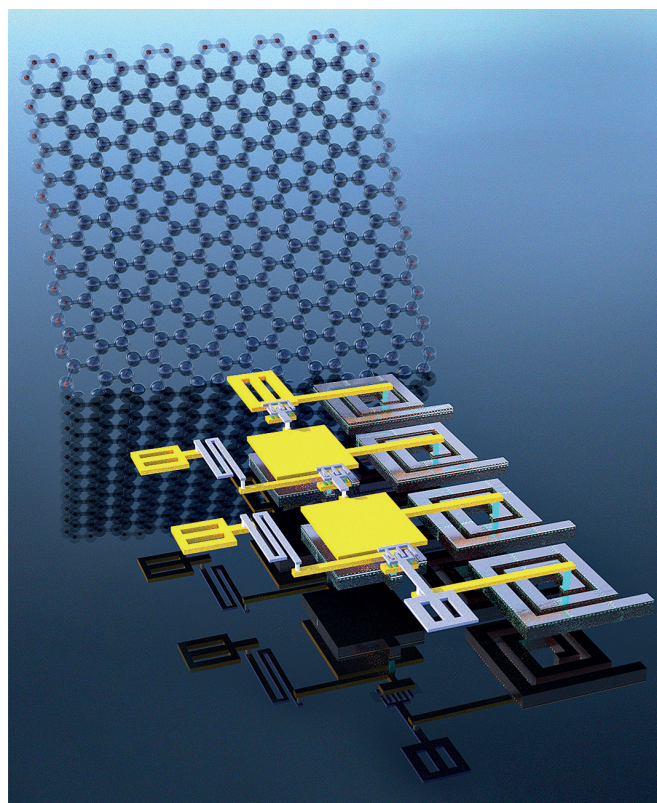


Рис.4. Схема графенового многокаскадного РЧ-приемника

и диэлектрик на основе пленок SiO_2 толщиной 5 нм и Al_2O_3 толщиной 15 нм. Частота отсечки f_T составляла 2 ГГц, максимальная частота f_{max} – 5,6 ГГц. Для демонстрации работы модулятора на затвор транзистора, смещенного в точку электронейтральности, подавались сигнал на несущей частота $f_{\text{нес}} = 500$ Гц (рис.5а) и цифровой сигнал на частоте $f_{\text{данные}} = 50$ Hz (рис.5б). Работа схемы началась на низкой частоте несущего сигнала, но ее реальная частота ограничена лишь быстродействием ГПТ.

Работа частично финансировалась Центром исследования материалов, структур и приборов (MSD Focus Center), Управлением научно-исследовательских работ ВМС в рамках межуниверситетской программы "Подходы к графеновой терагерцовой электронике" (ONR GATE MURI project) и НИИ нанотехнологии для военнослужащих при МТИ.

Ученые продолжают изучать возможности преодоления ограничений кремниевой технологии на создание будущих РЧ-схем с размерами элементов менее 10 нм за счет построения резонаторов, генераторов, РЧ-переключателей на основе графена. Но поскольку графен не полупроводник, для изготовления РЧ-схем на его основе необходимы компоненты, выполненные на других материалах. Пока работы по созданию графеновых РЧ-компонентов не вполне успешны, но,

тем не менее, уже появляются графеновые высокочастотные резонаторы, фильтры, генераторы.

Графеновые резонаторы, генераторы, РЧ-переключатели

Благодаря высокой прочности и малой плотности графен перспективен для построения фильтров, резонаторов, генераторов, РЧ-переключателей – одних из ключевых компонентов различных систем связи. И здесь особое внимание заслуживают графеновые наноэлектромеханические микросистемы (ГНЕМС). Впервые о создании схемы графенового наномеханического резонатора на частоту 50–80 МГц с возможностью считывания электрического сигнала в 2009 году сообщили ученые Колумбийского университета. Фактор качества резонатора составил 1×10^4 при температуре 5К.

Резонатор изготавливался на основе монослоя графена, размещенного на подложке SiO_2/Si . При этом допускалось применение пластины графена шириной в несколько микрометров или наноленты, формируемой литографией. К графеновому монослою создавались контакты истока и стока. После изготовления металлических электродов двуокись кремния под графеновым слоем канала удалялась, с тем чтобы он был подвешен. Для облегчения считывания пленка двуоксида кремния частично удалялась и под контактами к областям истока и стока (рис.6).

Работой резонатора управляют два РЧ-сигнала. Один сигнал на частоте f поступает на расположенный под подвешенным графитом затвор, на который предварительно подается постоянное напряжение для придания графену механического напряжения. Второй сигнал на частоте $f + \Delta f$ поступает на исток. Перемещение графеной мембраны регистрируется комбинированным током разных частот. Поскольку электропроводность графена меняется в зависимости от его зазора с затвором резонатор функционирует подобно транзистору, емкость затвора которого постоянно меняется. В результате

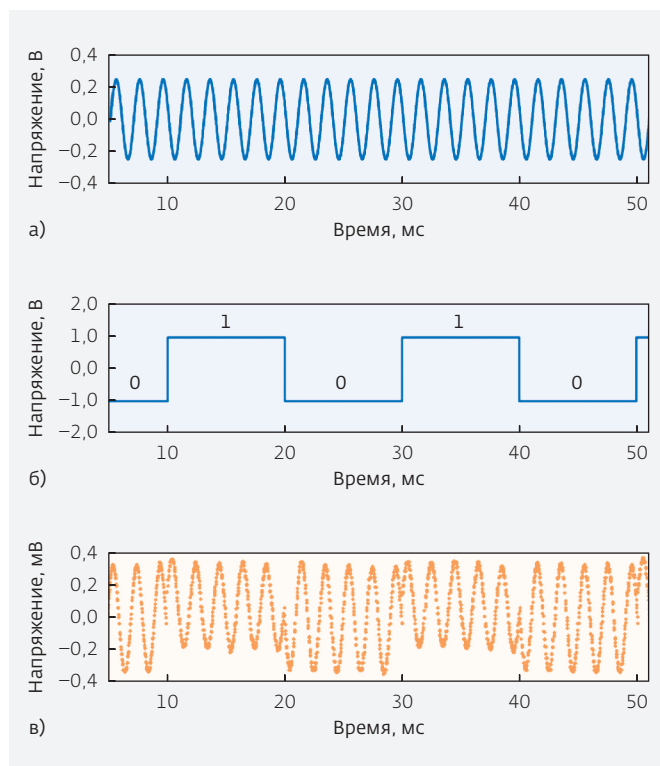


Рис.5. Модулирующий сигнал (а), несущий (б) и фазоманипулированный сигнал (в)

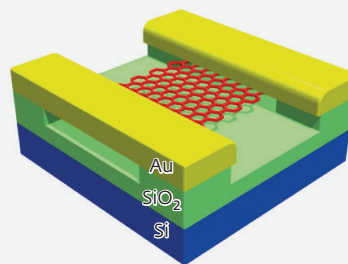


Рис.6. Структура графенового резонатора

генерируется РЧ-ток канала. Резонансная частота равна:

$$f_{\text{res}}(V_g) = 1/2L\sqrt{T_0 + T_e(V_g)/\rho W},$$

где L и W – длина и ширина графеновой мембраны, соответственно. Плотность двумерной массы ρ равна плотности графеновой мембраны плюс плотность любого тела, нанесенного на нее, T_0 – механическое напряжение мембраны, а T_e – электростатически индуцированное напряжение. Поскольку деформация графена при воздействии механических напряжений может составлять 25%, ожидается, что за счет уменьшения размеров графеновой мембраны можно будет достичь гигагерцовых рабочих частот.

В продолжении работ по созданию ГНЭМС-резонатора в Колумбийском университете был разработан графеновый генератор, управляемый напряжением. Для этого усиление прибора устанавливалось равным больше единицы (с помощью усилителя с регулируемым усилением), а фаза резонансной частоты – равной нулю (с помощью фазовращателя). Затем выходной сигнал подавался на затвор. Установившаяся в результате обратная связь приводила к усилению произвольной генерации сигнала. Группой исследователей был создан ГУН на частоту ~100 МГц. Для демонстрации его возможностей прибор был использован для частотной модуляции аудиосигнала. Отмечается, что при этом была получена эффективная передача сигнала [19].

Сейчас разработчики изучают возможность объединения созданных РЧ-устройств с интегральными схемами, содержащими необходимые блоки

управления и считывания, а также ищут пути улучшения их характеристик и уменьшения шума.

Появился и первый графеновый электронный генератор (рис.7). Входящий в него усилитель усиливает все сигналы в полосе частот генератора. Выходной сигнал усилителя через цепь положительной обратной связи поступает на его же вход. Для функционирования генератора на конкретной частоте, как и в первом случае, должны выполняться два условия. Во-первых, коэффициент усиления замкнутой цепи, равный у усилителя с учетом потерь схемы обратной связи, должен превышать единицу. Во-вторых, фазовый сдвиг цепи фазовой подстройки частоты на данной частоте должен быть кратен целочисленному значению, умноженному на 2π . Измерения спектра мощности прибора с частотой генерации 72 МГц показали, что усиление по мощности графеновой РЧ-схемы впервые превысило единицу.

Интерес представляет и созданная совместными усилиями научных сотрудников Политехнического института Милана, Научно-Исследовательского Института Ломбардии и Иллинойского университета цифровая схема, выполненная на выращенном CVD-методом графене и работающая на гигагерцовых частотах. На основе графена с помощью новой технологии ими построен кольцевой генератор. Для обеспечения сильной связи с другими компонентами схемы графен выращивался непосредственно на них. При испытаниях напряжение прибора медленно уменьшалось, что привело к увеличению частоты генерации с 350 МГц до 1,2 ГГц (это обычная частота для кремниевых приборов, но для графеновых устройств – это новый высокий

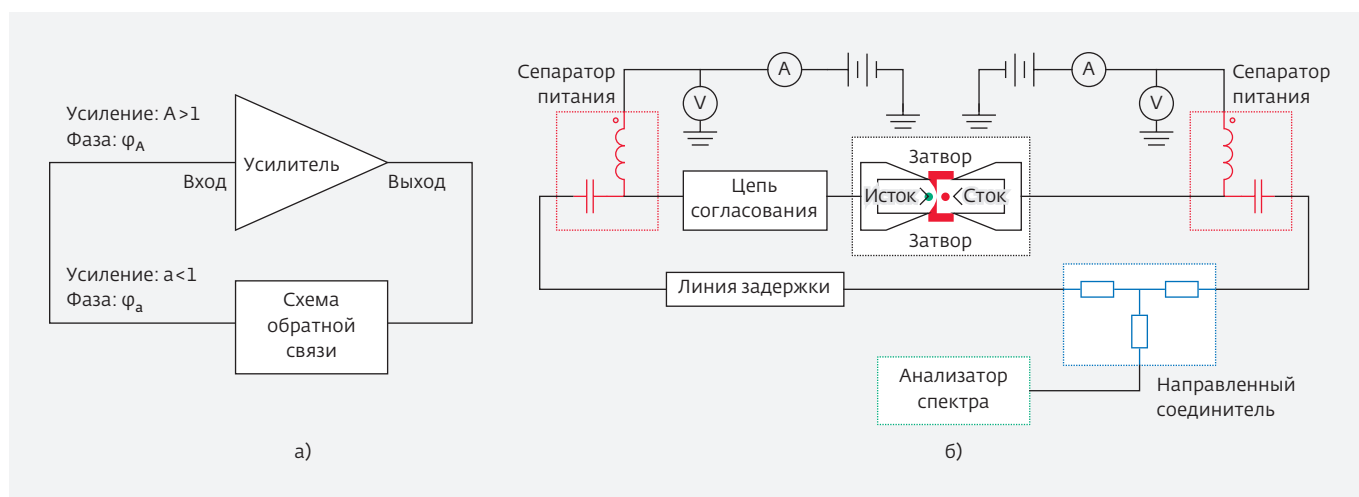


Рис.7. Схема графенового электронного генератора (а); измерительная установка для демонстрации свойств графенового электрического генератора

уровень. Наибольший размах выходного напряжения составил 0,57 В. По утверждению разработчиков, значения этих параметров обусловлены паразитными емкостями схемы, а не параметрами ГПТ, что позволяет надеяться на их улучшение.

Для демонстрации возможностей схемы графенового генератора на ее основе были реализованы первые автономные графеновые смесители, не требующие внешних генераторов для преобразования частоты. Первая многотранзисторная графеновая интегральная схема открывает путь к применению графеновых высокоскоростных цифровых и аналоговых схем, работающих на высоких частотах с приемлемым энергопотреблением [20].

Ведутся и разработки графеновых электромеханических переключателей. Специалистами МТИ создан переключатель на основе двух поликристаллических графеновых пленок (рис.9), выращенных на переходном металле CVD-методом при давлении окружающей среды. При напряжении 5 В между пленками нижняя пленка графена притягивается к верхней и между ними устанавливается контакт. При снятии напряжения контакт обрывается.

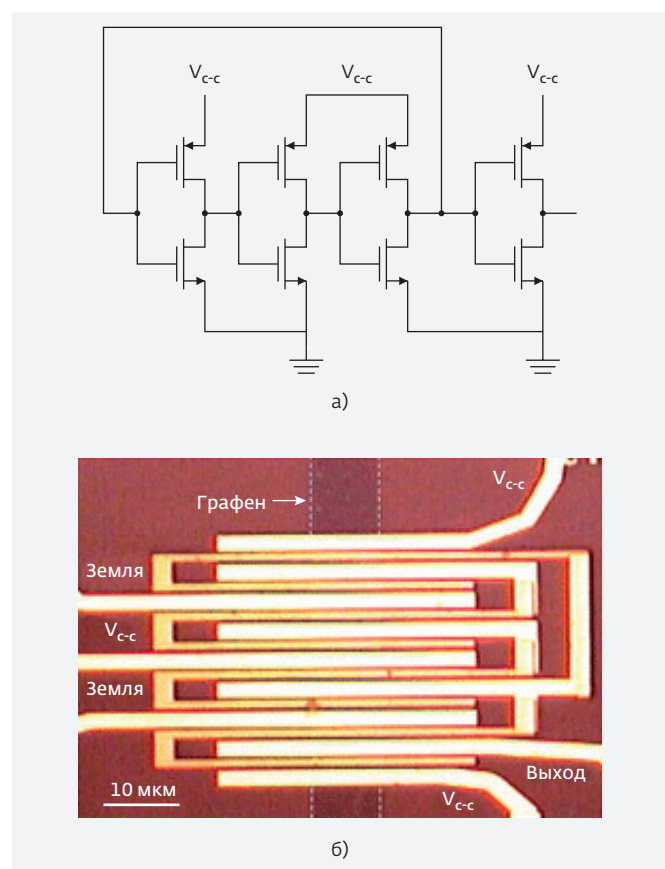


Рис.8. Схема (а) и структура (б) цифрового гигагерцового кольцевого генератора

В открытом состоянии переключатель выдерживает плотность тока в 7 кА/см². Таким образом, графен, обеспечивающий переключение при низких значениях напряжения, – перспективен для изготовления электромеханических переключателей. И хотя сопротивление контакта графен-графен транзистора относительно большое, разработчики считают, что соединение этого типа прочнее традиционного контакта металл-металл. С точки зрения специалистов, это позволит существенно улучшить надежность будущих переключателей [21].

В сравнении с традиционными полупроводниковыми приборами на основе кремния и полупроводниковых соединений III-V, у графеновых устройств

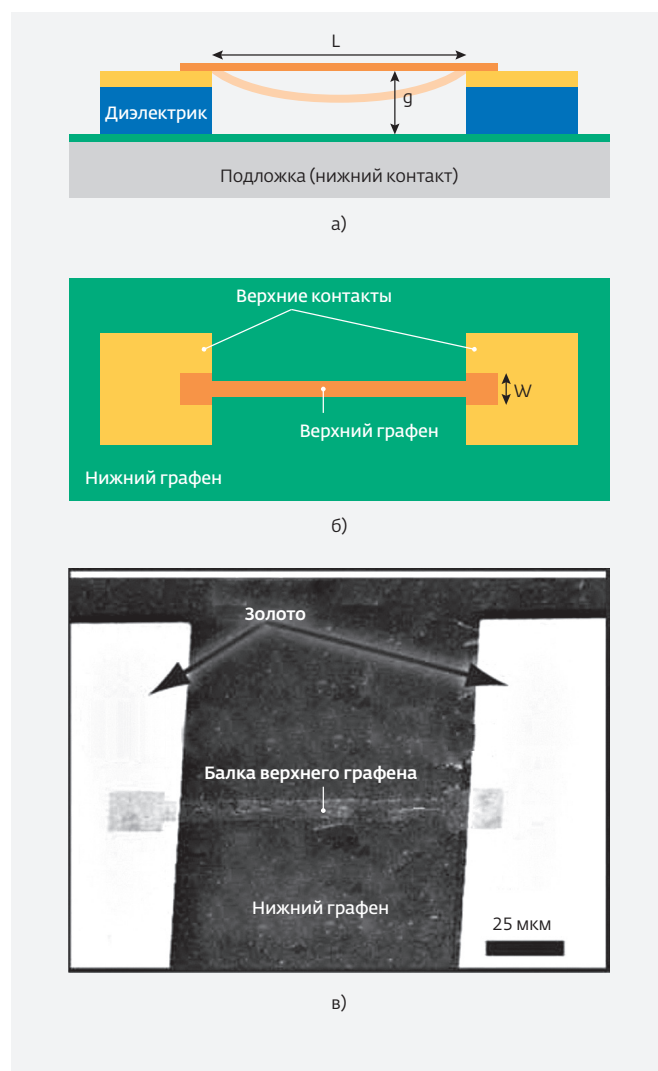


Рис.9. Структура выполненного полностью на графене переключателя (а); его поперечное сечение (б); вид сверху (в)

множество преимуществ. Во-первых, это амбиплярная характеристика проводимости, позволяющая реализовывать новые принципы построения РЧ-приборов на основе симметрии передаточной характеристики. Графеновые приборы позволяют создавать схемы, подобные полупроводниковым приборам, но более простые и с меньшими паразитными элементами. Во-вторых, отличная возможность электростатической регулировки параметров, при которой изменения производятся в пределах одного атомного слоя, весьма перспективна для масштабирования прибора и высокочастотных применений. К тому же, технология переноса выращенного CVD-методом графена на произвольные подложки обеспечивает интеграцию графеновых приборов с минимальным ухудшением подвижности носителей заряда. Таким образом, интеграция графеновой и кремниевой электроники не вызывает затруднений. Кремниевые схемы можно сначала изготавливать на кремниевой подложке, на которую затем могут быть перенесены графеновые приборы и соединены с компонентами с помощью сквозных перемычек. Кроме того, CVD-выращенный графен можно переносить на прозрачные эластичные материалы. Ко всему прочему, графен – материал с высокой подвижностью и скоростью носителей заряда, что позволяет реализовывать описанные выше применения графена на высоких частотах. И, наконец, благодаря двумерной геометрии в сочетании с химической и термической стабильностью графена процессы изготовления графеновых схем полностью совместимы с основной технологией производства кремниевых приборов.

Правда, пока для применения графеновых устройств в промышленном масштабе необходимо решить ряд важных проблем, для чего потребуются многосторонние исследования. В первую очередь необходимо улучшить качество графена, в том числе его однородность, размер получаемых листов, подвижность носителей заряда. Важное значение имеет и выбор подложки, которая не должна неблагоприятно влиять на подвижность носителей, и должна способствовать отводу тепла, минимизировать паразитные емкости, быть пригодной для увеличения размеров и, конечно, быть достаточно дешевой. Сейчас исследования, направленные на улучшение надежности графеновых устройств и получения однородных характеристик приборов на пластине, находятся на ранней стадии развития.

Однако, несмотря на существующие проблемы, быстрое развитие графеновой технологии за прошедшие несколько лет обещает достижение

положительных результатов в будущем. Можно считать, что непрерывное улучшение методов получения графена и изготовления приборов на его основе приведет в существенному влиянию графеновой электроники на последующие поколения РЧ-схем.

ЛИТЕРАТУРА

9. **Wang H., Nezich D., Kong J., and Palacios T.** Graphene frequency multipliers. – IEEE Electron Device Lett., 2009, v.30, №5, p.547–549.
10. **Liao L., Duan X.** Graphene for radio frequency electronics. – http://ac.els-cdn.com/S1369702112701384/1-s2.0-S1369702112701384-main.pdf?_tid=ddd1489a-0b54-11e4-9873-00000aacb35f&acdnat=1405342165_dfb308d16f71363fd7c17ed1997405e.
11. **Wang H., Hsu A., Kim K.K., Kong J., and T. Palacios.** Gigahertz ambipolar frequency multiplier based on CVD graphene. – Proc. 2010 IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM), p.23.6.1–23.6.4.
12. **Yang X., Liu G., Balandin A.A., and Mohanram K.** Triple-Mode Single-Transistor Graphene Amplifier and Its Applications. – arxiv.org/pdf/1010.1022.pdf
13. **Harada N., Yagi K., Sato S., and Yokoyama N.** A polarity-controllable graphene inverter. – Appl. Phys. Lett., 2010, v.96, №1, p.012102.
14. **Wang Z., Ding L., Pei T. et al.** Large signal operation of small band-gap carbon nanotube-based ambipolar transistor: A high-performance frequency doubler. – Nano Lett., 2010, v.10, № 9, p.3648–3655.
15. **Yu-Ming Lin, Valdes-Garcia A., Shu-Jen Han, et al.** Wafer-Scale Graphene Integrated Circuit. – www.gr-sci.net/papers/Science-2011-Lin-1294-7.pdf.
16. Graphene circuit ready for wireless. – file:///C:/Users/%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B3/Downloads/2014-01-graphene-circuit-ready-wireless.pdf.
17. **Hsu A., Wang H., Kim K.K., Kong J., and Palacios T.** High Frequency Performance of Graphene Transistors Grown by Chemical Vapor Deposition for Mixed Signal Applications. – www.rle.mit.edu/nmeg/wp-content/uploads/2014/03/pdf107.pdf.
18. **Dumé B.** Graphene works as a highly sensitive mass sensor. – nanotechweb.org/cws/article/tech/40469.
19. **Dumé B.** FM radio transmitter breaks new size record. – nanotechweb.org/cws/article/tech/55499.
20. **Guerriero E, Polloni L., Bianchi M, et al.** Gigahertz Integrated Graphene Ring Oscillators. – pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nn401933v.
21. **Milaninia K.M., Baldo M.A., Reina A., and Kong J.** All graphene electromechanical switch fabricated by chemical vapor deposition. – blog.nus.edu.sg/elelc/files/2010/03/Graphene-Electromechanical.pdf.