

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

ЧАСТЬ 1

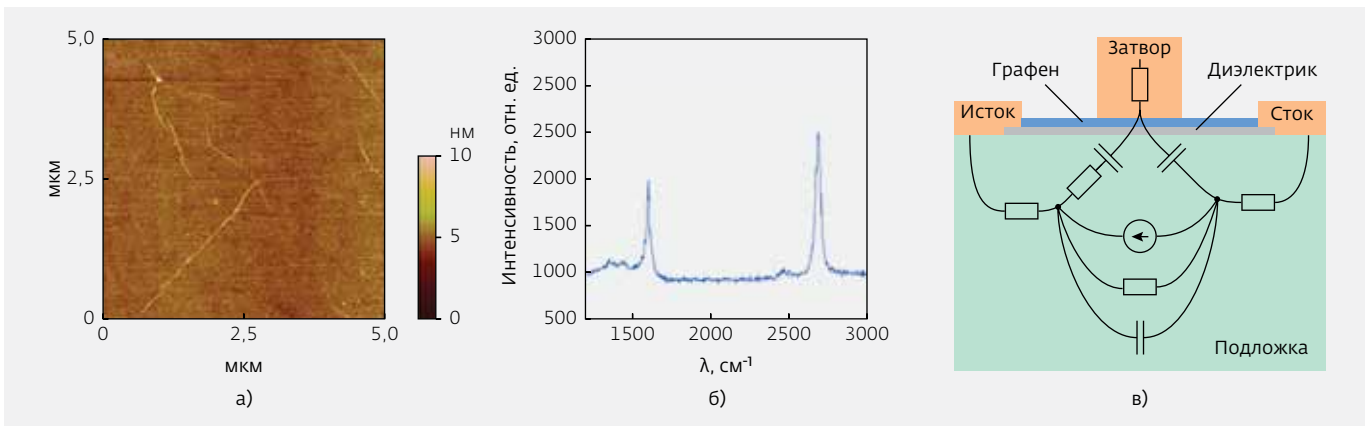
В.Шурыгина

Прошло девять лет с тех пор, как впервые были описаны электрические характеристики графена – двумерного кристалла, состоящего из монослоя атомов углерода, собранных в гексагональную решетку. Получение в 2004 году образцов графена (что многие десятилетия считалось невозможным) привлекло внимание разработчиков к возможности создания электронных устройств на основе углерода. Интерес к графену обусловлен его удивительными свойствами: необычайной прочностью при чрезвычайно малой толщине, высокой подвижностью носителей заряда, рекордно высокими значениями тепло- и электропроводности [1]. Он обладает большой механической жесткостью и непроницаем для молекул газа. Необычные свойства графена стимулировали интенсивное изучение возможности его использования для улучшения существующих и создания новых электронных устройств. К целевым приложениям графена относится и РЧ-электроника, особенно с учетом того, что РЧ-устройства могут быть изготовлены на материале, в зонной структуре которого отсутствует запрещенная зона (а графен именно такой материал). Так что же достигнуто в области применения графена для создания РЧ-схем и схем обработки смешанного сигнала (аналогового и цифрового), вероятно, одних из самых перспективных устройств электроники на основе графена?

## СИНТЕЗ ГРАФЕНА

Проводимые дерзкие проекты по разработке электронных приборов на основе графена привели к полезным результатам. Сегодня графен можно синтезировать не менее чем четырьмя методами. Первый метод отшелушивания (или метод "липучки"), использовавшийся для получения первых образцов графена лауреатами Нобелевской

премии А.К.Геймом и К.С.Новоселовым [2], остается важным методом получения листов материала длиной 20 нм – 10 мкм. Благодаря отличному качеству отшелушенных листов и простоте метод идеален для применения при проведении физических, химических и биологических исследований малоразмерных объектов. Однако из-за ограниченных размеров листов графена

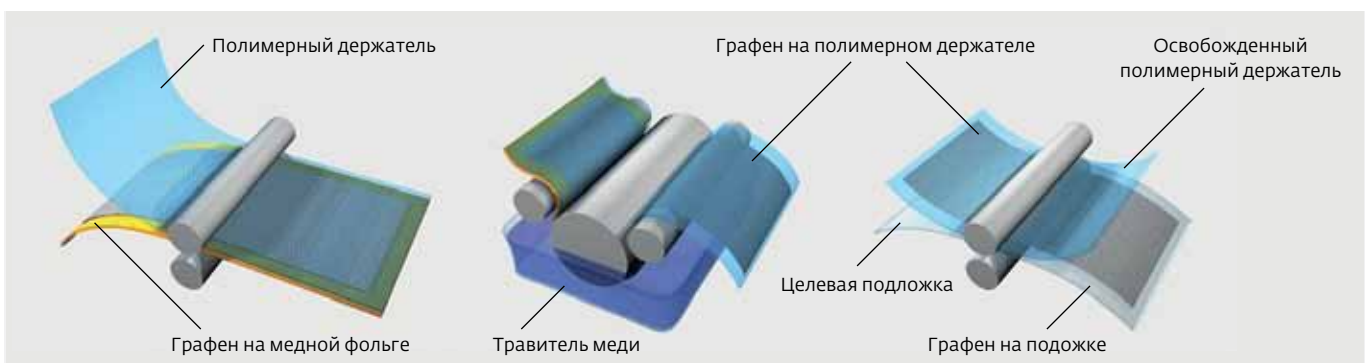


**Рис.1.** Вид слоя графена, полученный с помощью атомно-силового микроскопа (а); спектр рамановского рассеяния графеновой пленки, выращенной CVD-методом с использованием медного катализатора (б); типичная структура графенового полевого транзистора (в)

и трудности их укрепления на подложке такой материал непригоден для промышленного применения. Второй метод, предложенный специалистами школы физики Технологического института Джорджии (США) и Лаборатории прикладных исследований твердотельных электронных схем (Франция), заключается в вакуумной графитизации монокристаллического карбида кремния. Пластина карбида кремния нагревается в вакууме до температуры 1400°C, при которой находящиеся на поверхности пластины атомы кремния возгоняются, оставляя на ней графен. С помощью этого метода получают листы графена хорошего качества размером с кремниевую пластину. Правда, его электронно-транспортные свойства хуже, чем у отшелушенных листов, из-за уступов граничного слоя, образуемого при их выращивании, а также вследствие его легирования электронами подложки. Получаемый этим методом графен закреплен на подложке и не может быть удален с нее.

Третий, многообещающий, метод выращивания графена, изучаемый исследователями Массачусетского технологического института, Техасского университета в Остине и компании Samsung Electronics, – химическое осаждение из паровой фазы (CVD). Согласно этому методу для улавливания атомов углерода при высокой температуре с последующим выбросом их на подложку при охлаждении и получения в конечном итоге графена используется металлический катализатор. Метод позволяет получать большие однородные листы графена (рис.1). Металлический катализатор, укрепленный на графене, легко удаляется химическим травлением, а графен может быть перенесен на любую подложку, в том числе на прозрачную и гибкую. С помощью этого метода в компании Samsung Electronics путем непрерывного проката были получены графеновые листы размером 76,3 см (рис.2).

Другие методы выращивания графена заключаются в отшелушивании его в жидкой фазе



**Рис.2.** Получение листов графена большого размера с помощью метода непрерывного проката

и распаковке углеродных нанотрубок. Эти методы пригодны для получения графена в случаях, когда нужно большое число листов (например, для электронных паст или полупрозрачных электродов). Но подвижность носителей заряда выращенного этими способами графена намного меньше, чем у материала, полученного эпитаксиальным выращиванием или химическим осаждением из паровой фазы.

Необычный способ получения графеновых нанолент предложили ученые Стэнфордского университета. Поскольку размеры ДНК, содержащих большое число атомов углерода, и графеновых нанолент, пригодных для изготовления транзисторов, сопоставимы, группа ученых университета изучила возможность получения графеновых нанолент с заданными параметрами с помощью коротких молекул ДНК. Для этого первоначально исследователи выпрямили молекулы ДНК. Полученные относительно прямые линии молекул обрабатывались раствором соли меди, в результате чего они поглощали ионы меди. Нагрев обработанных молекул до высокой температуры в среде метана приводил к их разложению, оставшиеся атомы углерода при участии меди в качестве катализатора собирались в графеновые ленты, по форме повторяющие исходные ДНК.

Пока процесс получения графеновых лент с помощью ДНК несовершенен. В некоторых случаях атомы углерода вместо формирования листа одноатомной толщины связываются в ином порядке. Разработчикам еще предстоит вникнуть в процессы роста графеновых нанолент и усовершенствовать разработанную технологию. Но, несомненно, ученым Стэнфордского университета удалось продвинуться на пути создания масштабируемого, недорогого метода изготовления графеновой электроники, что в итоге приведет к появлению новых микросхем, в том числе и высокочастотных, на основе графена.

Одно из основных возможных применений графена для создания РЧ электронных приборов – транзисторы. Разработчики смогут разместить на кристалле значительно большее число графеновых транзисторов, чем относительно более "громоздких" кремниевых приборов. И эта задача успешно решается.

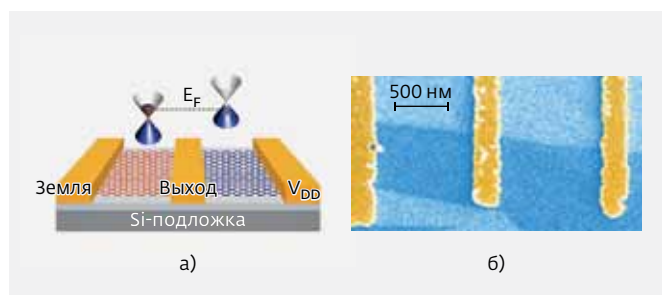
### ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА ДЛЯ МАЛОШУМЯЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Одно из важных свойств графена – активная реакция на воздействие электрического поля, благодаря чему его электростатически регулируемая

концентрация носителей превышает  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>. К тому же графен отличается высокой подвижностью и электронов, и дырок (до  $10^4$  см<sup>2</sup>/В·с при комнатной температуре). Это и привлекает внимание к графену как к перспективному материалу для создания высокочастотных полевых транзисторов. Разработка полевых транзисторов на основе графена началась практически одновременно с его получением. Первый графеновый полевой транзистор (GFET) был изготовлен в 2004 году на SiO<sub>2</sub>/Si-подложке. Пленка двуокиси кремния толщиной 300 нм служила диэлектриком затвора. Ее толщина была установлена из соображения возможности получения с помощью электронного микроскопа изображения однослойного или двух- и более слойного графена. Сильно легированная кремниевая подложка служила тыльным затвором транзистора, модулирующим проводимость графенового канала. Транзистор с такой структурой благодаря простоте часто используется в физических экспериментах, но из-за "большой" толщины затворного диэлектрика и паразитного конденсатора, образованного проводящей подложкой, транзистор мало пригоден для РЧ-систем.

Первый транзистор с верхним затвором был изготовлен в 2007 году специалистами Центра перспективной микроэлектроники Ахена (Германия). В следующем году в Колумбийском университете был продемонстрирован первый GFET с затвором из нитрида бора длиной 600 нм и с аналогичной для обычных Si- и A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>-транзисторов частотной характеристикой. Его максимальная частота была равна 34 ГГц. Это послужило толчком к оживлению разработок РЧ полевых транзисторов на графене. В конце 2008 года компания IBM объявила о создании GFET с затвором длиной 150 нм и частотой отсечки  $f_t$  26 ГГц, – важный шаг на пути выполнения программы создания углеродной электроники для ВЧ-применений (Carbon Electronics for RF Applications, CERA). Программа спонсировалась DARPA и проводилась под руководством Центра космических и военно-морских систем США (Space and Naval Warfare Systems Center, SNWSC). Вскоре компания Hughes Research Laboratories сообщила о создании РЧ GFET на графене, выращенном на карбиде кремния. Длина затвора составляла 2 мкм, частота  $f_t$  – 5 ГГц.

В 2010 году специалисты IBM получили частоту отсечки 100 ГГц у графенового транзистора с длиной затвора 240 нм, выполненного на SiC-подложке. В том же году группа ученых Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе изготовила GFET с использованием нанопроволоки в качестве



**Рис.3.** Структура инвертора на комплементарных графеновых транзисторах. Область листа графена между левыми электродами (красного цвета) – транзистор n-типа, область синего цвета – транзистор p-типа (а); изображение инвертора, полученное сканирующим электронным микроскопом (б)

затвора. Частота отсечки транзистора составила 300 ГГц и 420 ГГц при длине затвора 140 и 67 нм соответственно. Таким образом, экспериментальные графеновые транзисторы по частоте отсечки оказались сопоставимы с лучшими современными приборами на полупроводниковых соединениях III-V (300 и 400 ГГц при тех же значениях длины затвора) и существенно превосходят кремниевые транзисторы (140 и 250 ГГц при аналогичных значениях длины затвора).

Правда, здесь надо отметить, что высокие значения частоты отсечки получены после устранения (de-embedding) паразитных эффектов, вызываемых измерительными контактными площадками прибора. Значения частоты отсечки до и после устранения этих паразитных эффектов могут отличаться на два порядка. Поэтому нужно иметь в виду, что полученные при измерениях высокие значения частоты отсечки могут быть ошибочны.

На симпозиуме по СВЧ-электронике 2013 года группа специалистов Колумбийского университета доложила о возможности изготовления гибких графеновых транзисторов, необходимых для создания пластичных электронных устройств, используемых в электронной бумаге (средстве отображения информации, имитирующем обычную печать на бумаге и основанном на явлении электрофореза), гибких дисплеях и в пригодных для носки системах связи. Интерес к применению графена для создания гибких транзисторов обусловлен не только его высокой подвижностью носителей заряда, но и такими отличными механическими свойствами, как большая гибкость и прочность. Докладчики показали, что сочетание электрических и механических достоинств графена позволило создать гибкие GFETs, способные надежно

работать на терагерцовой частоте при уровне деформации до 2%.

Транзисторы с расщепленным затвором изготавливались на подложках из полиэтилена нафталата (polyethylene naphthalate, PEN) толщиной 127 мкм. С помощью электронно-лучевой литографии формировался рисунок нижнего двухпальцевого затвора с последующим осаждением слоев титана толщиной 1 нм и сплава Au-Pd толщиной 30 нм. Затворным диэлектриком служил слой  $\text{HfO}_2$  толщиной 6 нм. Монокристаллический графен выращивался CVD-методом и механически переносился поверх затвора. Приборы формировались с помощью электронно-лучевой литографии и травления. Материалом электродов истока и стока служили пленки Ti/Pd/Au. Длина затвора транзисторов была равна 500 нм, расстояние исток–сток – 900 нм, ширина канала – 30 мкм. Максимальная частота гибких графеновых транзисторов, изготовленных в Колумбийском университете, составляла 3,7 ГГц, частота отсечки – 10,7 ГГц, степень деформации – до 1,75%, что соответствует радиусу изгиба 3,6 мм. Таким образом, впервые показана возможность создания гибких графеновых транзисторов гигагерцового диапазона с уровнем деформации более 0,5% [3].

Помимо отдельных графеновых транзисторов в настоящее время реализованы и интегральные схемы на них. Так, разработчики Политехнического института Милана в 2009 году сообщили о создании интегральной микросхемы инвертора на основе двух графеновых транзисторов. Оба транзистора r-типа изготавливались на листе графена, полученного методом отшелушивания и нанесенного на сильно легированную кремниевую подложку с нанесенным на нее слоем двуоксида кремния толщиной 300 нм. Кремниевая подложка служила тыльным затвором. Полевые транзисторы формировались путем создания трех электродов на основе пленок Cr/Au (толщиной 5 и 50 нм, соответственно) с помощью электронно-лучевой литографии, при этом каждая область, заключенная между двумя соседними электродами, представляла собой канал одного из транзисторов r-типа (длиной 1 мкм). Для получения функционирующей микросхемы необходимо было изменить тип проводимости одного из r-канальных транзисторов, что и было достигнуто путем электроотжига одной из областей полученной структуры путем увеличения напряжения исток–сток с 0 до 3 В шагами в 0,1 В и выдержке на каждом этапе 5 мин. Нагрев проводился в атмосфере гелия. Максимальное значение тока было равно ~350 мкА. Максимальное



переходное сопротивление достигалось при входном напряжении 13,9 В. Таким образом, были изготовлены р- и п-канальные транзисторы, образующие схему инвертора (рис.3). Транзисторы рассчитаны на работу при входном напряжении (от 2,1 до 13,9 В), при котором переходное сопротивление канала становится максимальным. Для реализации инвертора исток п-канального графенового транзистора подключался к земле, исток р-канального транзистора – к источнику питания на напряжение 3,3 В и выход – к общему стоку обоих транзисторов.

Хотя потребляемая энергия разработанного инвертора и невозможность его непосредственного каскадного включения пока ограничивают его применение, реализация устройства доказывает возможность использования графена в качестве подложки для построения электронных схем [4].

В начале 2014 года компания IBM объявила о создании первой успешно функционирующей РЧ-схемы приемного устройства на основе графена. Правда, эта новость не удивительна. Еще в 2011 году компания представила созданный при финансировании DARPA макет смесителя частоты на частоту до 10 ГГц, выполненного на основе графенового транзистора. Правда, надежда на создание микросхем для беспроводных электронных устройств была невелика. Оказалось, что при размещении компонентов, для изготовления которых нужен металл (резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов), поверхность транзистора они повреждали, лист графена и схема не функционировала должным образом. Последовательность этапов изготовления РЧ-схемы была изменена: теперь первоначально на кремневой подложке формировались пассивные компоненты, а затем – графеновые транзисторы, что позволило устранить ранее наблюдавшееся структурное напряжение и повреждение графена и обеспечить ожидаемые высокие характеристики прибора.

Экспериментальная схема, предназначенная для беспроводных РЧ-приемников, содержит три каскада на графеновых транзисторах, четыре индуктивности, два конденсатора и два резистора, размещенных на кристалле площадью 0,6 мм<sup>2</sup>. Изготавливалась схема на кремниевой пластине диаметром 200 мм по технологии, доказавшей совместимость сложных процессов формирования графеновых устройств и КМОП-элементов. Потребляемая мощность графеновой схемы не превышала 20 мВт при необычайно высоком для существующих графеновых РЧ-схем коэффициенте передачи на гигагерцовой частоте. Схема успешно

приняла без искажений сообщение, переданное на частоте 4,3 ГГц и содержавшее три буквы – I-V-M.

По утверждению разработчиков, впервые продемонстрирована возможность создания графеновых приборов и схем для современных беспроводных коммуникационных систем, не уступающих по своим характеристикам традиционным кремниевым микросхемам. Однако, хотя в последние годы достигнуты значительные успехи в создании РЧ графеновых полевых транзисторов и перспективы их применения в РЧ-устройствах благоприятны, все еще существует ряд нерешенных проблем, сдерживающих появление РЧ интегральных схем с графеновыми компонентами.

## ПОДЛОЖКИ

Большинство современных РЧ графеновых транзисторов изготовлены либо на SiO<sub>2</sub>-, либо на SiC-подложке. В первое время предпочтение отдавалось подложкам двуокиси кремния, поскольку это позволяло с помощью оптических микроскопов идентифицировать монослой графена. Карбид кремния позволял применять естественный материал в качестве подложки. Однако ни SiO<sub>2</sub>, ни SiC не представляют собой идеальный материал для подложки графена. Одна из основных проблем, связанных с пленкой термически выращенной двуокиси кремния (толщиной в несколько сот нанометров) – шероховатость ее поверхности, приводящая к изменению морфологии поверхности сформированного на ней графена. Это, в свою очередь, вызывает увеличение рассеяния носителей заряда. Кроме того, двуокись кремния может содержать ловушки заряда и свободные связи атомов на поверхности, которые взаимодействуют с носителями заряда и снижают их подвижность. Ступенчатая неровная поверхность SiC-подложки также ухудшает характеристики графеновых транзисторов из-за высокого рассеяния носителей заряда. Следовательно, для того чтобы полностью использовать присущую графену высокую подвижность носителей заряда, нужно либо отказаться от применения подложки, либо заменить ее материал.

Поиск материала для замены используемых сегодня SiO<sub>2</sub>- и SiC-подложек активно ведут ученые Колумбийского университета, Массачусетского технологического института (МТИ), Университета штата Аризона. Ими предложено использовать подложки из гексагонального нитрида бора (hBN) – материала с большой шириной запрещенной зоны, сопоставимого по кристаллической решетке с графеном. Поверхность двумерного планарного hBN-листа чрезвычайно гладкая, без свободных связей

и ловушек заряда, т.е. такой лист представляет собой неактивную подложку графена. Сотрудники Колумбийского университета сообщили, что подвижность носителей заряда hBN-подложек при  $T=4\text{K}$  превышала  $60 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , а группа Манчестерского университета, возглавляемая А.Геймом, продемонстрировала микрометрический баллистический перенос электронов при комнатной температуре в графене, заключенном между двумя hBN-слоями.

Совместными усилиями исследователей МТИ и Национального института материаловедения Японии разработан РЧ полевой транзистор со структурой нитрид бора-графен-нитрид бора (BN/Graphene/BN), не влияющей на высокую подвижность носителей заряда графена. Плотность тока как n-, так и р-канальных полевых транзисторов с двухслойным графеновым каналом длиной 450 нм превышала 1 А/мм, крутизна характеристики прямой передачи по постоянному току составляла примерно 250 мС/мм. Частота отсечки была равна 33 ГГц. Работа частично финансировалась Исследовательской лабораторией ВС и Управлением научно-исследовательских работ ВМС в рамках многодисциплинарной институтской исследовательской инициативы по созданию терагерцовой электроники на основе графена (GATE MURI program) [6].

Однако из-за трудности выращивания hBN-листов большой площади подложки из этого материала для графена не находят широкого применения, хотя специалистами Райсовского университета (США), Агентства промышленной науки и технологии (AIST) Японии и Сибирского государственного университета достигнуты многообещающие результаты по выращиванию CVD-методом на кремниевой подложке листов, содержащих от двух до пяти hBN-монослоев.

В результате поиска новых подложек для графеновых транзисторов компании IBM удалось увеличить частоту отсечки (до 155 ГГц) GFET с затвором длиной 40 нм, выполненного на графене, выращенном CVD-методом на медной пленке и затем перенесенном на алмазоподобное углеродное основание. В отличие от обычных полупроводниковых приборов, характеристики созданных графеновых транзисторов практически не изменялись вплоть до температуры 4,3К, благодаря чему удастся существенно расширить рабочий диапазон приборов [7]. Энергия поверхностных фононов алмазоподобного углерода высокая, а плотность ловушек на поверхности небольшая, но процесс получения

высококачественных пленок алмазоподобного углерода дорогостоящий.

Специалисты Исследовательского центра графена Корейского института перспективных научных исследований и технологии предложили использовать в качестве материала подложки ультратонкий слой нитрида алюминия (AlN), осажденный на пленку двуокиси кремния. Энергия поверхностных фононов AlN выше, чем у двуокиси кремния. К тому же пленку AlN можно наносить с помощью отработанного процесса атомно-слоевого осаждения (ALD) или путем распыления. Разработчики осаждали пленку AlN на слой двуокиси кремния, выращенный поверх кремниевой подложки диаметром 100 мм, с помощью плазмостимулированного ALD-процесса, обеспечивающего однородность получаемой пленки. Пленка имела гладкую поверхность со среднеквадратическим значением шероховатости 0,5 нм.

Пленка графена для получения листа большого размера сначала выращивалась на тонкой медной пленке при температуре  $750^\circ\text{C}$  с помощью CVD-процесса. Используя в качестве защитного покрытия слой полиметилметакрилата, графеновый лист удаляли с медной пленки путем ее растворения в растворе  $\text{FeCl}_3$  и переносили на подложку AlN/SiO<sub>2</sub>/Si. Защитное покрытие удалялось при нагреве полученной структуры в атмосфере водорода. Графеновые транзисторы с верхним затвором изготавливались на полученной подложке с помощью обычных процессов полупроводниковой технологии. Для оценки характеристик нового прибора был изготовлен подобный контрольный транзистор на SiO<sub>2</sub>-подложке. Изучение характеристик обоих транзисторов показали, что подвижность дырок и электронов прибора на AlN-подложке составляла 1280 и 607  $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  соответственно, тогда как эти параметры контрольного транзистора были равны 782 и 250  $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . При изменении температуры со 113 до 323К подвижность носителей заряда прибора на AlN-подложке уменьшалась примерно на 12%, тогда как у контрольного транзистора это изменение составляло -24%.

Значение частоты отсечки графенового транзистора шириной 50 нм с длиной канала 6 мкм на AlN-подложке составляло 115 ГГц при напряжении затвора -2 В, частота контрольного транзистора того же размера - 55 ГГц при напряжении затвора -1 В.

Разработчики считают, что предложенный процесс - простой и доступный способ улучшения характеристик графеновых приборов [8].

И еще одна проблема, требующая решения при создании графеновых транзисторов. Если

максимальный ток обычных транзисторов ограничивают оптические фононы объемного материала, то ток насыщения графеновых транзисторов зависит от насыщения скорости носителей, которые определяют собственные оптические фононы и удаленные внешние оптические фононы. Это обусловлено тем, что вследствие отсутствия у графена запрещенной зоны у стока транзистора не образуется зона обеднения и, тем самым, не происходит насыщения тока стока, как в обычных кремниевых МОП-транзисторах. Правда, за исключением нескольких удачных решений в большинстве графеновых транзисторах трудно добиться насыщения тока в результате насыщения скорости носителей. Так какие проблемы графеновых транзисторов связаны с отсутствием тока насыщения?

### ТОК НАСЫЩЕНИЯ

Ученые приводят различные причины отсутствия насыщения скорости носителей заряда в графеновых транзисторах. Так, группа научных сотрудников Колумбийского университета считает, что насыщение тока не происходит вследствие наличия ловушек в затворном диэлектрике и подложке. Другое объяснение дают эксперты Исследовательского центра Томаса Ватсона компании IBM, считающие, что это явление обусловлено межзонным туннелированием в GFETs. И, наконец, высказывается предположение, что скорость насыщения носителей заряда в графене просто слишком большая, что затрудняет перенос носителей в сильном электрическом поле, чем в обычных полупроводниках.

Отсутствие насыщения тока вызывает множество проблем при использовании графеновых транзисторов в РЧ-приложениях. Ток насыщения влияет на параметры эквивалентной схемы GFET при малом сигнале, которая идентична эквивалентной схеме МОП- и НЕМТ-транзисторов. Почти линейные выходные характеристики графеновых транзисторов означают, что сопротивление канала, задаваемое длиной затвора, очень мало, примерно того же порядка, что и сопротивление стока и истока. При использовании GFET в качестве усилителя это может привести к существенным потерям на радиочастотах и к уменьшению тока и усилению по мощности. Другая проблема заключается в увеличении емкости между затвором и стоком  $C_{gd}$ , поскольку из-за отсутствия или слабого тока насыщения возникает сильная зависимость концентрации заряда в канале у стока от напряжения на затворе. А поскольку емкость  $C_{gd}$  – это емкость, связывающая вход и выход, она серьезно влияет

на значения частоты отсечки и максимальной частоты. К тому же усиление эффекта Миллера на входе транзистора может в сильной степени повлиять на его полосу частот при работе в качестве усилителя напряжения с общим истоком.

При отсутствии тока насыщения усиливается влияние напряжения стока на падение напряжения на канале. Убедительное доказательство этого – сильная зависимость напряжения, соответствующего минимальной проводимости канала  $V_{Gmin}$ , от смещения стока. Изменение напряжения  $V_{Gmin}$  с увеличением смещения стока приводит к резкому падению напряжения канала. Это свойство подобно сильной зависимости порогового напряжения кремниевого МОП-транзистора от смещения стока. Правда, эту проблему можно решить с помощью хорошо сконструированной схемы смещения.

И еще одно следствие слабого тока насыщения GFETs – сложность построения на основе графеновых транзисторов высококачественных источников тока, которые являются неотъемлемым блоком большинства РЧ-схем.

Для приборов, применяемых в интегральных схемах, возможность масштабирования столь же важна, как и свойства материала. Один из основных вопросов при масштабировании – что происходит с сопротивлением омического контакта?

### СОПРОТИВЛЕНИЕ ОМИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Сопротивление омических контактов графеновых транзисторов (~200–2000 Ом·мкм) больше, чем у кремниевых МОП-транзисторов, и сопоставимо с этим параметром приборов на полупроводниковых III-V соединениях. Сопротивление омического контакта вносит вклад в значение сопротивлений истока и стока ( $R_S$  и  $R_D$  соответственно). Чем больше значения этих сопротивлений, тем больше времени (известного как время задержки) требуется для зарядки и разрядки различных конденсаторов прибора и, соответственно, сокращается частота отсечки транзистора. Большие значения  $R_S$  и  $R_D$  приводят и к уменьшению максимальной частоты прибора, поскольку эти резисторные компоненты вызывают потерю мощности и тем самым ухудшают усиление транзистора по мощности.

Обычно в графеновых транзисторах используются Ti/Pd- или Ti/Au-контакты, отличающиеся сильным взаимодействием титана или палладия с углеродом. Но такие контакты чувствительны к технологии изготовления прибора и присутствующим при этом загрязнениям. Органические вещества, остающиеся от полимерного фототрезиста,

обычно трудно удалить из-за действия ван-дер-ваальсовой силы и отсутствия возможности применения кислородной плазмы для удаления остатков фоторезиста. Для получения чистых границ раздела металла и графена специалисты Университета штата Пенсильвания предложили метод управляемого удаления непроявленного фоторезиста, позволяющий получать сопротивление омического контакта менее  $10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>.

\* \* \*

Графеновый маломощный усилитель – хорошо известный старый прибор, выполненный на новом материале. Открытие графена привело к появлению совершенно новых применений РЧ-схем и схем смешанной обработки сигнала, ранее недоступных для традиционных униполярных приборов, таких как кремниевые МОП-транзисторы. Пример – амбиполярная нелинейная электроника, предложенная и продемонстрированная экспериментально в начале 2009 года в виде частотного умножителя, смесителя РЧ-сигналов и бинарного устройства с фазовой модуляцией. В последнее время характеристики этих систем существенно улучшены и созданы приборы на основе углеродных нанотрубок, которым также свойственно амбиполярное поведение. Эти приборы будут рассмотрены в следующем номере журнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **В.Юдинцев.** Графен. Нанoeлектроника стремительно набирает силы. – Электроника: НТБ, 2009, №6, с.82
2. Раздел Новости в журнале Электроника: НТБ, 2007, №2, с.14.
3. **Meric I., Petrone N., Hone J. et al.** Flexible Graphene Field-Effect Transistors for Microwave Electronics. – [www.bioee.ee.columbia.edu/downloads/2013/ims2013\\_meric.pdf](http://www.bioee.ee.columbia.edu/downloads/2013/ims2013_meric.pdf)
4. **Traversi F., Russo V, Sordan R.** Integrated complementary graphene inverter. – [scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/94/22/10.1063/1.3148342](http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/94/22/10.1063/1.3148342)
5. **Shu-Jen Han.** Graphene circuit ready for wireless. – [ibmresearchnews.blogspot.ru/2014/01/graphene-circuit-ready-for-wireless.html#fbid=Ppav5alX5pa](http://ibmresearchnews.blogspot.ru/2014/01/graphene-circuit-ready-for-wireless.html#fbid=Ppav5alX5pa)
6. **Wang H., Taychatanapat T., A. Hsu et al.** BN/Graphene/BN Transistors for RF Applications. – [arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1108/1108.2021.pdf](http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1108/1108.2021.pdf)
7. **Wu Y., Yu-ming Lin, Bol A.A. et al.** High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like carbon. – [www.nature.com/nature/journal/v472/n7341/full/nature09979.html](http://www.nature.com/nature/journal/v472/n7341/full/nature09979.html)
8. **J.Gun Oh, Seul Ki Hong, Choong-Ki Kim. et al.** High performance graphene field effect transistors on an aluminum nitride substrate with high surface phonon energy. – [scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/104/19/10.1063/1.4878316](http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/104/19/10.1063/1.4878316)

## Новейшая технология, поддерживающая силовую электронику

Две основные задачи, требующие решения при проектировании современных силовых систем, – это терморегулирование и конструкция токоведущей системы. Выполнение требований к электромагнитной совместимости систем и уменьшению их габаритов плюс необходимость обеспечения эффективного производства и снижения стоимости приводит к появлению многообразных и инновационных решений. К таким решениям в области печатных плат относятся усовершенствованные проводные соединения, сами печатные платы, электрические шины и точки контакта. Современные медные контактные шинные площадки обеспечивают рабочий ток платы до 800 А и более. Выпущенный компанией Weidmüller (Германия) терминал для печатных плат силовых устройств LXXX 15.00 позволяет заменить дорогие контакты шинными площадками, обеспечивающими передачу элементам печатной платы ток до 150 А/1000 В. К достоинствам терминала относятся:

- уникальные возможности зажимного приспособления, позволяющего надежно присоединять проволоку американского калибра AWG1 сечением 50 мм<sup>2</sup> к печатной плате. Многочисленные применения нового терминала доказали отсутствие необходимости технического обслуживания его самозажимного хомутового стального зажима;

- функциональная надежность, т.е. защита от функциональных ошибок. Встроенный блок охраны проволоки предотвращает ошибочные подключения и опасность ввода проводов под хомутовый зажим, нарушая тем самым контакт;
- применение высококачественного изоляционного материала WEMID компании, не содержащего галогены и фосфор и соответствующего самым жестким требованиям экологических стандартов;
- максимальная рабочая температура терминала составляет 120°C, что обеспечивает высокую надежность при работе в условиях циклического изменения температуры или при перегрузках;
- конструкция терминала с учетом печатной платы для которой он предназначен, что облегчает и ускоряет его установку благодаря расширенному допуску и защите от "утечке" зазора между креплениями, соответствующей документу МЭК IEC 61800-5-1;
- многочисленные типы маркировки, указывающие характер устройства: гибкое (маркировочные ленты Dekafix) или экономичные (липкие ленты). Прилагаемый проверочный вставной блок позволяет проверять характеристики терминала в течение длительного периода эксплуатации.

[www.engineerlive.com/content/21829](http://www.engineerlive.com/content/21829)