Графен - на один шаг ближе к гибкой терагерцовой электронике

Около пяти лет назад фотоприемные приборы на основе графена вошли в терагерцовый диапазон из видимого и инфракрасного электромагнитного спектра. Это был довольно важный шаг, способный вывести всю современную электронику на качественно новый уровень. Терагерцовое излучение проникает сквозь различные материалы, на что не способны видимое и инфракрасное излучения. Это открывает ряд потенциальных применений в области медицины, контроле различных процессов и даже в интеллектуальных транспортных средствах (которые нам обещают подарить беспроводные сети следующего поколения – 5G).

[Графен - на один шаг ближе к гибкой терагерцовой электронике]

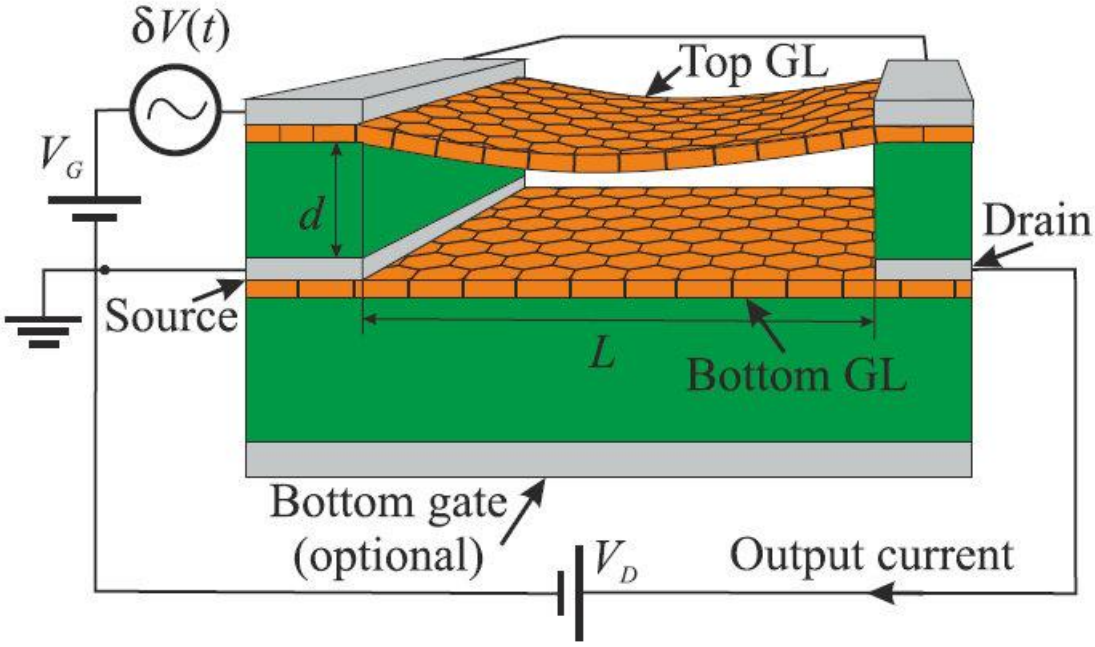
Терагерцовое излучение занимает в спектре электромагнитных волн промежуточное место между СВЧ- и ИК-излучением. Благодаря высокой частоте колебаний, оно может обеспечить еще более высокую скорость передачи данных по беспроводным сетям, а небольшая энергия квантов и хорошая проникающая способность делают его незаменимым инструментом для медицинской диагностики. Также, терагерцовые датчики могут быть использованы при досмотре людей и их багажа. Это возможно благодаря тому, что графеновый детектор может замерить количество отраженного от объекта терагерцового излучения, а после оцифровки результатов измерения, полученные данные могут быть преобразованы в изображение структуры сканируемого объекта. Терагерцовое излучение поглощается жидкостями и хорошо отражается от плотных объектов (костная ткань, металлы и пр.), благодаря чему можно легко использовать терагерцовое оборудование взамен рентгеновских аппаратов. Здесь возникает ряд преимуществ по сравнению с обычным рентгеном, и наиболее важное заключается в том, что терагерцовое излучение относится к неионизирующему, что позволяет применять их везде, не оказывая при этом негативного воздействия на людей.

Долгое время практическое применение терагерцового излучения было затруднительным из-за отсутствия эффективных источников и детекторов для данного диапазона. Сейчас электронная техника терагерцового диапазона переживает период бурного развития. В исследовании, опубликованном в журнале Applied Physics Letters, исследователи из Chalmers University в Швеции разработали полевой транзистор, созданный на гибкой пластиковой подложке, в которой канал между стоком и истоком сделан из графена. Получающееся в результате гибкое устройство может обнаруживать сигналы в диапазоне от 330 до 500 ГГц.

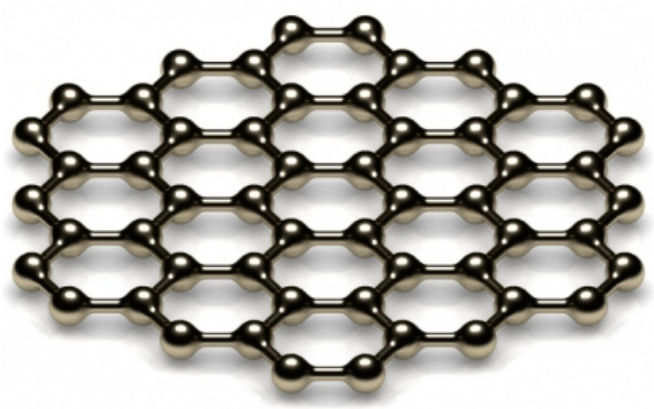
Команде из Chalmers University удалось создать устройство, которое сочетает в себе гибкость и функционал по обнаружению терагерцового излучения, что может позволить использовать его в IoT-устройствах с высокой пропускной способностью. В приведенном ниже видео вы можете увидеть несколько приложений, которые, по мнению исследователей, могут использовать предложенные детекторы.

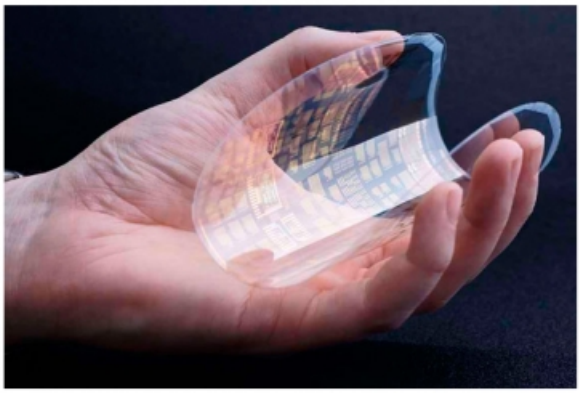
Графеновый детектор работает как полевой транзистор, который может обнаруживать THz-излучение из-за своих нелинейных свойств. Это приводит к выпрямлению или преобразованию переменного тока, который генерируется входящим высокочастотным излучением. В результате между истоком и стоком появляется сигнал в виде напряжения постоянного тока, который меняется пропорционально мощности получаемого излучения в терагерцевом диапазоне. Поскольку отношение тока и напряжения нелинейно, применяемый сигнал переменного тока (даже при малой мощности) будет генерировать гармоники.

А вот так выглядит детектор терагерцового излучения, который разработала группа физиков из России, Японии и США:



Ключевой особенностью, предложенного физиками варианта выполнения детектора, является использование механических, то есть подвижных, деталей для повышения чувствительности прибора. Предложенная конструкция также представляет собой полевой транзистор, затвор которого выполнен в виде гибкого графенового лепестка. Напомним, что ключевой особенностью графена является то, что он может быть выполнен с наименьшей возможной толщиной в один атом и при этом обладает высокой прочностью и жесткостью:



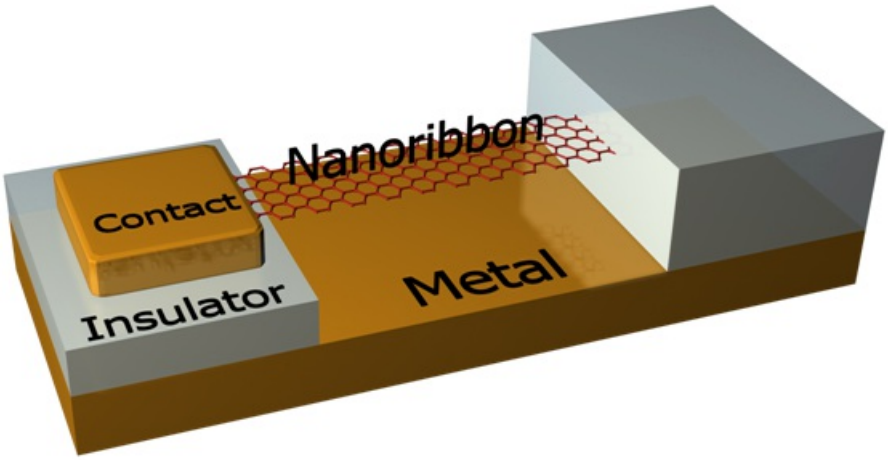


Достоинства графена заключаются не только в его уникальных механических свойствах, двумерный углерод еще является и хорошим проводником электрического тока и отличается высокой подвижностью носителей заряда. Сочетание механических и электрофизических характеристик графена обеспечит при взаимодействии с терагерцовым излучением сразу несколько положительных эффектов, которые позволят создать в будущем сверхпрочные гибкие и прозрачные гаджеты. Не так давно подобные вещи казались чем-то футуристичным, однако сейчас уже есть практические реализации подобных устройств:



Слева всего лишь концепт, а справа – реальная разработка Тайваньской компании Polytron Technologies

Рассмотрим принцип работы терагерцового детектора. Вначале падающее электромагнитное излучение, попадая на детектор, входит в резонанс с колебаниями свободных носителей заряда в графене (этот эффект известен как плазменный резонанс – коллективные колебания электронов в металлах и полупроводниках). За счет этого возрастет амплитуда колебаний и, как следствие, увеличивается напряженность поля в пространстве между графеновой мембраной и отделенным от нее небольшим зазором каналом транзистора. Электрическое поле будет притягивать мембрану, причем величина силы притяжения будет меняться со временем пропорционально квадрату напряженности поля.



Если падающее на мембрану терагерцовое излучение модулировано, то в колебаниях поля будут присутствовать гармоники (синусоидальные колебания), соответствующие частоте модулирующего сигнала. Если частота модуляционной гармоники совпадет с частотой собственных колебаний мембраны, то возникает условие резонанса и амплитуда колебаний мембраны многократно возрастет; она начнет раскачиваться подобно мосту. Так как прочность графена достаточно высока, мембрана выдержит эти колебания без разрыва, и ее движение неизбежно скажется на электрических параметрах транзистора. За счет изменения электрической емкости между графеном и подложкой будет изменяться протекающий по цепи ток, и эти изменения можно будет легко обнаружить.

Это значит, что если есть возможность принимать модулированные сигналы, то детектор на основе графена сможет не только фиксировать наличие терагерцового излучения, но и принимать закодированную в сигнале информацию и передавать ее дальше для обработки. Поэтому если сейчас наблюдается тенденция увеличения частот в системах беспроводной связи, то электроника на основе графена будет лежать в основе работы беспроводных устройств следующего поколения.

Таким образом, графен позволит создавать высокочастотную электронику благодаря своим многообещающим электрическим свойствам, а механическая прочность этого материала позволит создавать "гибкие" гаджеты. Конечно, все же еще имеются некоторые технические проблемы, которые необходимо будет решить, прежде чем такое устройство будет внедрено в промышленное производство. Очевидно, что сейчас перед исследователями стоит задача в улучшении характеристик транзисторов на основе графена, а также в разработке различных типов электронных схем на основе этих транзисторов.