\section{Введение}  
  
Еще 15-20 лет назад многие даже и не задумывались над возможной заменой кремния. Мало кто мог предполагать, что уже в начале двадцать первого века между полупроводниковыми компаниями начнется настоящая «гонка нанометров». Одними из наиболее вероятных кандидатов на должность «кремниезаменителей» являются материалы на основе углерода — углеродные нанотрубки и графен — которые, предположительно, могут стать основой наноэлектроники будущего. Часть исследователей полагают, что графен является более перспективным материалом, чем углеродные нанотрубки.

В частности, быстро развиваются транзисторы на основе графена. Однако многие детали потенциальной производительности графеновых транзисторов в реальных приложениях остаются неясными. Здесь я рассматриваю свойства графена, имеющие отношение к электронным устройствам, обсуждаю компромиссы между этими свойствами и изучаю их влияние на производительность графеновых транзисторов как в логических, так и в радиочастотных приложениях. Я пришел к выводу, что превосходная подвижность графена может быть не самой привлекательной особенностью графена, как это часто предполагается, с точки зрения устройства. Скорее, это может быть возможность создания устройств с очень тонкими каналами, что позволит масштабировать графеновые полевые транзисторы для более коротких каналов и более высоких скоростей, не сталкиваясь с неблагоприятными эффектами короткого канала, которые ограничивают производительность существующих устройств. Нерешенные проблемы для графеновых транзисторов включают в себя открытие значительной и четко определенной ширины запрещенной зоны в графене, создание графеновых транзисторов большой площади, которые работают в режиме насыщения по току, и изготовление графеновых нанолент с четко определенной шириной и четкими краями.

Очень время от времени одна статья зажигает революцию в науке. Тем не менее, в сообществе существует консенсус в отношении того, что MOSFET масштабируется и является технологией. Такая революция была начата в октябре 2004 г., она приближается к своему пределу и что в долгосрочной перспективе она будет необходима, когда физики конденсированных сред сообщили, что они должны были заранее представить новые концепции материалов и устройств, чтобы гарантировать, что упрощенный графен- двумерные листы атомов углерода — и производительность продолжает улучшаться. наблюдали эффект электрического поля в своих образцах ${ }^{1}$. Это было недолго. Иная ситуация в радиочастотной электронике. Это до того, как этот новый материал привлек внимание в области электронных устройств, до конца 1980-х годов доминировали оборонные приложения, сообщество, и сегодня все большее число групп успешно, и хотя он стал основным в 1990-х годах из-за изготовления графеновые транзисторы. Основные производители чипов в настоящее время активно продвигаются в области беспроводной связи, военные продолжают исследования графена, а Международная технологическая дорожная карта обеспечивает щедрую финансовую поддержку исследований в области новых радиополупроводников, документа стратегического планирования для полукончастотных устройств. Это, вместе с тем фактом, что индустрия радиочастотных проводников считает графен одним из возможных матехсхем, которые намного менее сложны, чем цифровые логические микросхемы, привело к риалам для посткремниевой электроники ${ }^{2}$. производители радиочастотных чипов более открыты для новых устройств В нескольких превосходных обзорах по основам науки о графене есть концепции. Свидетельством этого является большое разнообразие опубликованных в последние годы различных трансов ${ }^{3-5}$. Учитывая растущий интерес к типам графситоров и материалам, используемым в радиочастотной электронике: они широко распространены в сообществе разработчиков электронных устройств, а также продолжающиеся обсуждения, в том числе транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), основанные на потенциале графеновых транзисторов III-V, обзор статья, посвященная графическим полупроводникам, таким как GaAs и InP, кремниевые n-канальные МОП-транзисторы, электронные устройства, является своевременной. Здесь с точки зрения устройства используются различные типы биполярных транзисторов ${ }^{8,9}$. Далее я обсуждаю потенциал графена как нового материала для электронных устройств и обобщаю состояние дел в области графеновых транзисторов. Я сосредоточусь в основном на полевых транзисторах (FET), потому что это наиболее успешная концепция устройства в электронике, и поскольку большая часть работ по графеновым устройствам до сих пор была связана с FET.

Двумя основными подразделениями полупроводниковой электроники являются цифровые логические устройства и радиочастотные устройства. Степень готовности к внедрению новых концепций устройств, как правило, выше для радиочастотных приложений, отчасти потому, что судьба цифровой логики почти полностью зависит от производительности одного типа устройства: полевого транзистора металл-оксид-полупроводник кремния (MOSFET). На протяжении десятилетий уменьшение размера полевых МОП-транзисторов было ключом к прогрессу в области цифровой логики. Такое масштабирование позволило удвоить сложность интегральных схем каждые 18 месяцев, что привело к значительному повышению производительности и снижению цены на транзистор ${ }^{6,7}$. Сегодня процессоры, содержащие два миллиарда МОП-транзисторов, многие из которых имеют длину затвора всего

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-01}\\

$30 \mathrm{~nm}$, находятся в серийном производстве (рис. 1).

Поскольку изготовление интегральных схем очень сложно, Рис. 1 | Тенденции цифровой электроники. Развитие заводов по производству полупроводников с длиной затвора полевых МОП-транзисторов чрезвычайно дорого (в настоящее время это касается интегральных схем на стадии производства (закрашенные красные кружки) и международных затрат на несколько миллиардов долларов США). Кроме того, потому что цели масштабируемой дорожной карты технологий для полупроводников (ITRS) (открытые красные кружки). только это обеспечило необходимые улучшения производительности по мере того, как длина затвора уменьшалась, количество транзисторов на процессор от одного поколения интегральных схем к другому, количество литчипов увеличивалось (синие звезды). Сохранение этих тенденций является важным мотивом для производителей чипов, чтобы представить устройства, основанные на вызове для полупроводниковой промышленности, поэтому новые материалы с такими фундаментально отличающимися физическими свойствами или на материале, отличном от кремния. поскольку графен исследуется.

\texttt{https://cdn.mathpix.com/2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-02.jpg}

проводимость стока $g\_{\mathrm{ds}}$, а все емкости и сопротивления в схеме замещения (рис. 3) как можно меньше ${ }^{7,8}$. Однако значения всех этих величин меняются в зависимости от применяемого постоянного тока. напряжение затвор-исток, $V\_{\mathrm{GS}}$, и приложенный постоянный ток. напряжение сток-исток, $V\_{\mathrm{DS}}$. Как показано на примере типичного GaAs $\mathrm{HEMT}^{15,16}$ (рис. 3b,c), $V\_{\mathrm{DS}}$ оказывает заметное влияние на характеристики полевого транзистора. Для этого транзистора $f\_{\mathrm{T}}$ достигает пика около $V\_{\mathrm{DS}}=1 \mathrm{~V}$, то есть глубоко в области насыщения тока стока, где $ g\_{\mathrm{m}}$ близок к своему пику, а $g\_{\mathrm{ds}}$ значительно снизился. При меньших значениях $V\_{\mathrm{DS}}$ прибор работает в линейном режиме, а частота среза мала, так как $g\_{\mathrm{m}}$ мала, а $g\_{\mathrm{ ds}}$ большой.

Суть радиочастотных характеристик заключается в том, что хотя более короткие затворы, более быстрые несущие и более низкие последовательные сопротивления приводят к более высоким частотам среза, насыщение тока стока необходимо для достижения максимально возможных рабочих скоростей. Этот момент часто упускают из виду при обсуждении быстродействия транзисторов. Насыщение тока стока

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-03}\\

также необходимо максимизировать собственное усиление, $ G \_ {\ text {int}} = g \_ {\ mathrm {m}} / g \_ {\ mathrm {ds}} $, которое стало популярным показателем качества для схем со смешанными сигналами.

**\section{Некоторые свойства графена}**

Однослойный графен — чисто двумерный материал. Его решетка состоит из правильных шестиугольников с атомом углерода в каждом углу. Длина связи между соседними атомами углерода $L\_{\mathrm{b}}$ составляет $1,42 \AA$, а постоянная решетки $a$ - $2,46 \AA$ (рис. 4а).

В настоящее время наиболее популярными подходами к получению графена являются механическое расслоение ${ }^{1}$, выращивание на металлах и последующий перенос графена на изолирующие подложки ${ }^{20,21}$, термическое разложение $\mathrm {SiC}$ для производства так называемого эпитаксиального графена поверх

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-03(1)}\\

пластины $\mathrm{SiC}$ ${ }^{22,23}$. Расслоение по-прежнему популярно для лабораторного использования, но не подходит для электронной промышленности, в то время как два других варианта имеют потенциал для производства графена в масштабе пластины. После того, как графен подготовлен, для изготовления графеновых транзисторов можно применять обычные методы обработки полупроводников (такие как литография, металлизация и травление).

В этом разделе рассмотрены два важных свойства графена: наличие (или отсутствие) запрещенной зоны и перенос заряда (подвижность и перенос в сильном поле) при комнатной температуре.

Запрещенная зона. Графен с большой площадью представляет собой полуметалл с нулевой запрещенной зоной. Его валентная зона и зона проводимости имеют форму конуса и сходятся в точках $\mathrm{K}$ зоны Бриллюэна (рис. 4б). Поскольку ширина запрещенной зоны равна нулю, устройства с каналами из графена большой площади не могут быть отключены и, следовательно, не подходят для логических приложений. Однако зонная структура графена может быть изменена, и можно открыть запрещенную зону тремя способами: ограничивая графен большой площади одним

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-03(2)}\\

размер для формирования графеновых нанолент путем смещения двухслойного графена и приложения деформации к графену. См. Таблицу 2 и ссылки $24-43$ на Рисунок 3 | полевой транзистор постоянного тока и работа со слабым сигналом. a, Эквивалент слабого сигнала подробнее. схема полевого транзистора. Собственная крутизна, $g\_{m^{\prime}}$, связана с внутренним. Было предсказано ${ }^{28}$, что как наноленты "кресло", так и слабосигнальные напряжения затвор-исток и сток-исток, $ v\_{G S i}$ и $v\_{D S i i}$, тогда как в зигзагообразных нанолентах (два идеальных типа нанолент; рис. 4а) оконечная крутизна $g\_{\mathrm{mt}}$ связана с примененным затвором. исток имеют ширину запрещенной зоны, которая в хорошем приближении обратно пропорциональна напряжениям сток-исток, $V\_{G S}$ и $V\_{D S}$ (табл. 1 и рис. 2б). $\mathbf{b}$, отношение к ширине наноленты. Открытие запрещенной зоны в токе стока $I\_{D}$ (синие линии) при различных значениях $V\_{G S}$ и отсечка нанолент подтверждены экспериментально для ширин вплоть до частоты $f\_{ T}$ (красная линия), обе по сравнению с $V\_{D S}$ для высокочастотного GaAs с высокой частотой около $1 \mathrm{~нм}$ (ссылки 24-27), и теория, и эксперименты показывают наличие транзистора с подвижностью электронов ${ }^ {15,16}$. Пик частоты отсечки при ширине запрещенной зоны $V\_{D S}=1 \mathrm{~V}$ превышает $200 \mathrm{мэВ}$ при ширине менее $20 \mathrm{~нм}$ (рис. 4в). и $V\_{GS}=0,15 \mathrm{~V} . \mathbf{c}$, Собственная крутизна (синяя линия), общая Однако следует отметить, что реальные наноленты имеют шероховатую емкость затвора, $C\_{G}=C\_{GS}+C\_{G D}$ (красный линия), и проводимость стока, и ширины, изменяющиеся по их длине. Даже скромное ребро dis$g\_{d s}\left(1 / r\_{d s} ;\right.$ черная линия) по сравнению с $V\_{D S}$ для того же $F E T$. порядок стирает любую разницу в ширине запрещенной зоны между нанолентами с различной геометрией края ${ }^{29}$ и доступным на данный момент оборудованием для функционализации края. В последнее время наноленты и легирование также могут влиять на ширину запрещенной зоны ${ }^{44}$. были однородными по ширине и имели уменьшенную шероховатость краев, что позволяло открывать запрещенную зону, полезную для обычных полевых устройств, за счет «расстегивания» углеродных нанотрубок ${ }^{45}$. Однако необходимы даже идеальные очень узкие наноленты с четко очерченными краями. Эта нанолента не идеальна для применения в электронике. В общем, представляет собой серьезную проблему, учитывая обработку полупроводников, чем больше ширина запрещенной зоны, открывающейся в наноленте, тем больше ширина запрещенной зоны. Таблица 1 | Показатели производительности полевого транзистора.

Определение количества

Конечная крутизна $g \_ {\ mathrm {mt}} = \ left. \ frac {\ mathrm {d} I \_ {\ mathrm {D}}} {\ mathrm {d} V \_ {\ mathrm {GS}}} \ right | \_{\ mathrm{DS}=\текст {const}}$

Собственная крутизна $ g \_ {\ mathrm {m}} = \ left. \ frac {\ mathrm {d} I \_ {\ mathrm {D}}} {\ mathrm {d} V \_ {\ mathrm {GSi}}} \ right | \_{\ mathrm{DSi}=\text {const}}$

Проводимость стока $g\_{\mathrm{ds}}=\frac{1}{r\_{\mathrm{ds}}}=\left.\frac{\mathrm{d} I\_{\mathrm{D}}}{\ mathrm{d} V \_{\mathrm{DSi}}}\right|\_{\mathrm{GSi}}=$ const

Емкость затвор-исток $ C \_ {\ mathrm {GS}} = - \ left. \right|\_{V\_{\mathrm{DSi}}=\text {const}}$

Емкость затвор-сток {\ mathrm {GSi} = \ текст { const }} $

Частота среза C \_ {\ mathrm {GD}} \ right) \ left [1 + g \_ {\ mathrm {ds}} \ left (R \_ {\ mathrm {S}} + R \_ {\ mathrm {D}} \ right) \ right] + C \_ {\ mathrm {GD}} g \_ {\ mathrm {m}} \ left (R \_ {\ mathrm {S}} + R \_ {\ mathrm {D}} \ right)} $

Полевая мобильность $\mu\_{\mathrm{FE}}=\frac{L\_{\mathrm{ch}} g\_{\mathrm{m}}}{W\_{\mathrm{ch}} C\_{\mathrm{G}} V\_{\mathrm{DS}}}$

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-04}

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-04(1)}\\

для эквивалентной схемы полевого транзистора, показанной на рис. 3а.7. Также показано выражение для полевой подвижности в каналах МОП ${ }^{66}$.

валентная зона и зона проводимости становятся параболическими (а не

Таким образом, хотя и существует ряд способов вскрытия конусообразных): это уменьшает кривизну вокруг точки $K$ и увеличивает эффективную массу носителей заряда ${ }^{46}$, что, вероятно, подходит для использования в реальных приложениях. для снижения подвижности.

Двухслойный графен также бесщелевой (рис. 4б), а его валентность и консистенция

Мобильность. Наиболее часто упоминаемым преимуществом полос индукции графена является параболическая форма вблизи точки $\mathrm{K}$. Если электрическая, то это высокая подвижность ее носителей при комнатной температуре. Подвижность поля приложена перпендикулярно бислою, открывается запрещенная зона и $10,000-15,000 \mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^{-1} $ обычно измеряются для отслоившихся полос вблизи точки $\mathrm{K}$, которые принимают форму так называемой мексиканской шляпы. Этот графен на $\mathrm{SiO}\_{2}$-покрытых кремниевых пластинах ${ }^{1,47}$, а верхний предел раскрытия был предсказан теорией ${ }^{30,31}$ и имеет проверено в экспериментах от 40 000 до 70 000 долларов $\mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^{-1}$ было предложено ${ }^{47, 48}$. ${ }^{32,33}$. Теоретические исследования также показали, что размер запрещенной зоны в отсутствие заряженных примесей и ряби зависит от напряженности перпендикулярного поля и подвижностей $200 000 \mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V} ^{-1} \mathrm{~s}^{-1}$ были предсказаны ${ }^{49}$, и a может достигать значений $200-250 \mathrm{мэВ}$ для высоких полей $\left ((1-3) \times 10^{7} \mathrm{~V} \mathrm{~cm}{ }^{-1}\right.$; подвижность $10^{6} \mathrm{~cm} ^{2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^{-1}$ недавно сообщалось о приостановленных ссылках 30,31 ). графен ${ }^{50}$. Для графена большой площади, выращенного на никеле и транс-

Ширина запрещенной зоны однослойного эпитаксиального графена с большой площадью связана с подложкой, подвижность превышает $3700 \mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^ {-1}$ представляют собой предмет спора ${ }^{34}$. Хотя некоторые результаты были измерены ${ }^{20}$. имеет нулевую ширину запрещенной зоны ${ }^{37,38}$, другие сообщают о ширине запрещенной зоны около $0,25 \mathrm{eV}$

Наконец, для эпитаксиального графена на карбиде кремния — подвижность (ссылки 35,36). Передаточные характеристики эпитаксиального графена зависят от того, выращен ли графен на кремниевой поверхности или полевые МОП-транзисторы не показывают отключения, что предполагает нулевую полосу на углеродной поверхности SiC. Хотя графен вырос на углеродном зазоре. Тем не менее, ширина запрещенной зоны постоянно наблюдается для эпитаксиальной поверхности с более высокой подвижностью (значения $\sim 5000 \mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^{- 1}$ были двухслойными графенами ${ }^{38,39}$. Сообщается о ${ }^{23}$, по сравнению с $\sim 1000 \mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V} ^{-1} \mathrm{~s}^{-1}$ для выращенного графена

Наконец, деформация обсуждалась как средство открытия полосы на грани кремния ${ }^{23,51}$ ), в графене большой площади легче выращивать однослойную и двухслойную щель, а также эффект одноосной смоделирована деформация графена на кремниевой грани, придающая кремниевой грани $\mathrm{SiC}$ зонную структуру ${ }^{40,41}$. В настоящее время кажется, что если он больше подходит для электронных приложений. вообще возможно, открытие разрыва таким образом потребует глобального одноосного

В ранних графеновых МОП-структурах на подвижность влияла ионная деформация, превышающая $20\%$, чего будет трудно достичь на практике при использовании диэлектрика с верхним затвором ${ }^{52,53}$. Однако недавняя демонстрация. Более того, мало что известно о способах, которыми другие типы мобильностей в размере около 23 000 долларов США $\mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^{-1} $ в верхнем закрытом графике деформации, такие как двухосная деформация и локальная деформация, влияют на ленточные МОП-каналы ${ }^{54}$ и наблюдают аналогичные подвижности в структуре графена. и после формирования верхних ворот ${ }^{55}$ показывают, что графен с высокой подвижностью представляет собой ребро кресла

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-05}

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-05(1)}

Рисунок 4 | Свойства графена и графеновых нанолент. $a$, Схема графеновой наноленты (ГНЛ) кресла (ac) длиной $L\_{a c}$ и шириной $W\_{a c}$. Показанная здесь нанолента имеет по ширине $N=9$ атомов углерода и, таким образом, принадлежит к семейству $3p$, где $p$ — целое число. $\mathbf{b}$, Зонная структура вокруг точки K (i) графена большой площади, (ii) графеновых нанолент, (iii) несмещенного двухслойного графена и (iv) двухслойного графена с приложенным перпендикулярным полем. Графен с большой площадью и несмещенный двухслойный графен не имеют запрещенной зоны, что делает их менее полезными для цифровой электроники. $\mathbf{c}$, Ширина запрещенной зоны в зависимости от ширины наноленты из экспериментов ${ }^{24-27}$ и расчетов ${ }^{28,29}$. Для сравнения, ширина запрещенной зоны $\mathrm{Si}$ превышает $1 \mathrm{eV}$. зз: зигзаг.

Каналы МОП могут быть созданы при правильном выборе затворного диэлектрика, описывающего транспорт носителей в слабых электрических полях; короткая длина затвора и оптимизация процесса осаждения. в современных полевых транзисторах приводят к высоким полям на значительной части канала. Эти показатели мобильности впечатляют, но они требуют более тесной связи, что снижает значимость мобильности для производительности устройства. К осмотру. Упомянутые выше высокие подвижности, относящиеся к большой площади, иллюстрируют это, рассмотрим полевой транзистор с затвором длиной $100 \mathrm{~nm}$ и графеном, который не содержит зазоров. Общая тенденция для обычного напряжения полусток-исток $1 \mathrm{~V}$. Если мы предположим, что падение напряжения на проводниках составляет $0,3 \mathrm{~V}$ из-за того, что подвижность электронов уменьшается по мере увеличения ширины запрещенной зоны последовательных сопротивлений, среднее поле в канале составляет $70 \mathrm{kV} \mathrm{cm}$- 1. возрастает, и аналогичная тенденция была предсказана для углеродных нанотрубок. При таких высоких полях стационарная скорость носителей выходит на насыщение, а это $(\mathrm{УНТ})^{56,57}$ и графеновые наноленты ${ }^{ 58-61}$ (рис. 5а). Это означает, что скорость насыщения становится еще одной важной мерой подвижности носителей в нанолентах с шириной запрещенной зоны, аналогичной транспорту кремния. На рисунке $5 \mathrm{c}$ показаны графики зависимости скорости электрона от $(1,1 \mathrm{eV})$, которая, как ожидается, будет ниже, чем в объемном кремнии, и не выше, чем электрическое поле для обычных полупроводников, а также смоделированные графики для подвижность в кремниевом канале обычного МОП-устройства ${ }^{58}$. графен большой площади ${ }^{63,64}$ и углеродная нанотрубка ${ }^{57}$. Для графена и подвижности, измеренной в экспериментах - менее $200 \mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^{-1}$ нанотрубка, максимальный носитель скорости около $4 \times 10^{7} \mathrm{~cm} \mathrm{~s}^{-1}$ для нанолент шириной $1-10 \mathrm{~нм}$ ${ }^{26, 62}$ и $1500 \mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^{-1}$ для нанопрогнозируемого, по сравнению с $2 \times 10^ {7} \mathrm{~cm} \mathrm{~s}^{-1}$ для $\mathrm{GaAs}$ и $10^{7} \mathrm{~cm} \mathrm{~s}^{- 1}$ bbon $14 \mathrm{~nm}$ wide $^{45}$ (что является самой высокой подвижностью, измеренной до сих пор для кремния. результаты (рис. 5б). Таким образом, нанотрубки не падают так резко, как в полупроводниках III-V, хотя высокая подвижность графена может увеличить крутящие моменты. К сожалению, в настоящее время нет доступных экспериментальных данных о скорости устройств, они достигаются за счет затруднения переноса в сильном поле в графеновых нанолентах и ​​отключения устройств с большой площадью, что устраняет одно из основных преимуществ графен. Тем не менее, другие измерения ${ }^{65}$ показывают, что конфигурация CMOS с несущей с высоким полем обеспечивает низкое статическое энергопотребление. скорости в несколько $10^{7} \mathrm{~cm} \mathrm{~s}^{-1}$ в графене. Таким образом, в отношении переноса в сильном поле графен и нанотрубки, по-видимому, имеют небольшое преимущество перед переносом в сильном поле. В те дни, когда у полевых транзисторов было несколько затворов по сравнению с обычными полупроводниками. микрометров в длину, подвижность была подходящей мерой. Наконец, стоит отметить, что сообщается о подвижности графена для скорости переноса носителя. Однако, строго говоря, устройства мобильности следует интерпретировать осторожно, поскольку существует несколько

Таблица 2 | Есть ли у графена запрещенная зона?

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-05(2)}

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-05(3)}\\

Кулоновская блокада ${ }^{42.43}$ или андерсоновская локализация ${ }^{29}$ могут быть причиной образования щели. Теоретики расходятся во мнениях относительно существования запрещенной зоны для напряженного графена SL.\\

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-06}

Рисунок 5 | Транспорт носителя в графене. a, Подвижность электронов в зависимости от ширины запрещенной зоны в слабых электрических полях для различных материалов, как указано (слева направо, соединения III-v: $\ln \mathrm{Sb}, \ln \mathrm{As}, \ln \_{0,53} \mathrm{Ga}\_{0,47} \mathrm{As}$, $\ln \mathrm{P}, \mathrm{GaAs}, \ln \_{0,49} \mathrm{Ga}\_{0,51} \mathrm{P }$ и $\mathrm{GaN}$ ). Данные по подвижности относятся к нелегированному материалу, за исключением $S i \mathrm{MOS}$

данные. Также показаны данные о подвижности углеродных нанотрубок (УНТ; моделирование ${ }^{56,57}$), графеновых нанолент (моделирование ${ }^{58,59}$) и графена (эксперимент и моделирование ${ }^{ 47-50}$). б, подвижность носителей в зависимости от ширины наноленты при низких электрических полях из моделирования ${ }^{60,61}$ и экспериментов (открытые ${ }^{62}$ и полные звезды). Данные для $^{45}$. также показан графен большой площади $n^{1.47,48}$. , Скорость дрейфа электронов в зависимости от электрического поля для обычных полупроводников ( $\mathrm{Si}$, $\mathrm{GaAs}$, $\mathrm{In}\_{0,53} \mathrm{Ga} \mathrm{a}\_{0,47 } \mathrm{As}$ ), углеродная нанотрубка $\left(\right.$ моделирование $^{57}$ ) и графен большой площади (моделирование ${ }^{63,64}$ ).

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-06(1)}

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-06(2)}

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-06(3)}

Задняя дверь Задняя дверь

$\mathbf{b}$\\

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-06(4)}

Запись частоты среза:

Графеновый полевой транзистор $100 \mathrm{GHz}$ (ссылка 73)

CNT FET $80 \mathrm{GHz}$ (ссылка 78)

Рисунок 6 | Структура и эволюция графеновых МОП-транзисторов. а, схемы различных типов графеновых полевых МОП-транзисторов: полевой МОП-транзистор с обратным затвором (слева); полевой МОП-транзистор с верхним затвором и каналом из расслоенного графена или графена, выращенного на металле и перенесенного на покрытую $\mathrm{SiO}\_{2}$ Si-пластину (в центре); MOSFET с верхним затвором и эпитаксиально-графеновым каналом (справа). Канал, показанный красным цветом, может состоять либо из графена большой площади, либо из графеновых нанолент. б, Прогресс в разработке графеновых МОП-транзисторов ${ }^{1,52,69,73}$ по сравнению с развитием полевых транзисторов с нанотрубками $78,98-100$.

определения подвижности канала MOSFET, и они сложны для емкости затвора, $C\_{\mathrm{G}}$. Часто $C\_{\mathrm{G}}$ аппроксимируется оксидом для сравнения ${ }^{66}$. Кроме того, методы, используемые для измерения подвижной емкости на единицу площади, как $C\_{\mathrm{ox}}=\varepsilon\_{\mathrm{ox}} / t\_{\mathrm{ox}}, где {ox}}$ — диэлектрическая плотность, в некоторых статьях описаны лишь смутно. Чаще всего это толщина верхнего затворного диэлектрика, а $t\_{\mathrm{ox}}$ - толщина этого диэлектрика. измеряется полевая подвижность $\mu\_{\mathrm{FE}}$ (табл. 1). Однако эффект Однако, когда $t\_{\mathrm{ox}}$ мал, квантовая емкость, $C\_{\mathrm{q}}$, должна быть взята из последовательных сопротивлений истока и стока. счет ${ }^{67,68}$, так как он соединен последовательно с $C\_{\mathrm{ox}}$, что позволяет определить эту величину по измеренным характеристикам, а не суммарной емкостью затвора $C\_{\ mathrm {G}} = C \_ {\ mathrm {ox}} C \_ {\ mathrm {q}} /\ left (C \_ {\ mathrm {ox}} + C \_ {\ mathrm {q}} \ right) $. По габаритным воротам всегда ясно, что это было сделано. может быть значительно меньше, чем $C\_{o x}$, особенно близко к точке. Дополнительная сложность заключается в интерпретации данных из точки Дирака (точки минимального тока стока), поэтому пренебрежение графеновыми полевыми МОП-транзисторами с верхним затвором, которое предполагает прибытие при значении эффекта $C\_{\mathrm{q}}$ приведет к занижению полевой подвижности.

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-07}

$a$

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-07(1)}

Напряжение сток-исток

Рисунок 7 | Поведение графеновых МОП-транзисторов с графеновым каналом большой площади при постоянном токе. а, Типичные передаточные характеристики для двух полевых МОП-транзисторов с графеновыми каналами большой площади ${ }^{23,71}$. Коэффициенты включения-выключения составляют около 3 (MOSFET 1) и 7 (MOSFET 2), что намного ниже того, что необходимо для приложений в логических схемах. В отличие от обычных кремниевых МОП-транзисторов ток течет как при положительном, так и при отрицательном напряжении на верхнем затворе. б, Качественная форма выходных характеристик (ток стока, $I\_{D}$, в зависимости от напряжения сток-исток, $V\_{D S}$ ) полевого МОП-транзистора с графеновым каналом большой площади n-типа для различных значений напряжения на верхнем затворе, $V\_{G S \text { s.top}}$. Можно увидеть поведение насыщения. При достаточно больших значениях $V\_{D S}$ выходные характеристики для разных значений $V\_{GS \text { стоп }}$ могут пересекать ${ }^{75}$, что приводит к нулевой или даже отрицательной крутизне, т. е. что ворота фактически потеряли контроль над током.

**\section{Современные графеновые транзисторы}**

(рис. 7б). Наше нынешнее понимание происхождения этого поведения состоит в следующем. При малых значениях $V\_{\mathrm{DS}}$ транзистор работает согласно отчету Манчестерской группы в 2004 г. (ссылка 1). На 300-$\mathrm{nm} \mathrm{SiO}\_{2}$ линейная область и весь канал имеют тип $\mathrm{n}$ (область I). По мере того, как слой $V\_{\mathrm{DS}}$ под графеном служил диэлектриком обратного затвора и увеличивался, ток стока начинал насыщаться до тех пор, пока кремниевая подложка, легированная инфлекой, не действовала как задний затвор (рис. 6а). Такая точка возврата при $V\_{\mathrm{DS}}=V\_{\mathrm{DS}, \text{crit}}$ достигается (область II). На этом этапе затворные устройства были очень полезны для проверки концепции, потенциальные условия на стоковом конце канала соответствуют, но они страдают от недопустимо больших паразитных емкостей и точки Дирака. Как только $V\_{\mathrm{DS}}$ превышает $V\_{\mathrm{DS}, \text {критичность}}$, тип проводимости не может быть интегрирован с другими компонентами. Поэтому практические на стоковом конце канала переключатели с n-типа на p-тип $\mathrm{e}^{70,76}$ не могут быть интегрированы с другими компонентами. Следовательно, практически транзистор входит во вторую линейную область (область III). В 2007 г. сообщалось об аттрибуте с верхним затвором (ссылка 52), представляющем достаточно большие значения $V\_{\mathrm{DS}}$, выходных характеристик для важного этапа, и с тех пор прогресс был очень быстрым. напряжения могут $\operatorname{пересекать}^{75}$, приводя к нулю или даже к отрицательным значениям (рис. 6б). Хотя исследования графена все еще находятся в зачаточном состоянии, транскондуктивность — крайне нежелательная ситуация. Эти специфические графеновые полевые МОП-транзисторы могут конкурировать с устройствами, которые имеют улучшенное поведение, что является следствием того, что эти устройства имеют непрерывный чан в результате десятилетий исследований и инвестиций. nels и не возникает в полевых транзисторах с полупроводниковыми каналами. Графеновые полевые МОП-транзисторы с верхним затвором были изготовлены с расслоением Недавно графеновые полевые МОП-транзисторы с гигагерцовыми возможностями имели графен ${ }^{52-55,69,70}$, графен, выращенный на таких металлах, как никель и копин. Эти транзисторы имеют каналы большой площади per ${ }^{71,72}$ и эпитаксиальный графен ${ }^{23,73,74} ; \mathrm{SiO}\_{2}, \mathrm{Al}\_{2} \mathrm{O}\_{3}$ и $\mathrm{HfO}\_{2}$ отслоились ${ }^{53 ,55,69,77}$ и эпитаксиальный графен ${ }^{73,74}$. Самый быстрый графен использовался для диэлектрика с верхним затвором. Каналы этого топ-транзистора в настоящее время представляют собой полевой МОП-транзистор с затвором $240-\mathrm{nm}$, который имеет вентилируемые графеновые транзисторы, изготовленные с использованием частоты графена большой площади $f\_{\mathrm{T}}=100 \ mathrm{GHz}$ (ссылка 73 ), что выше, чем у ene, у которого нет запрещенной зоны, поэтому они не могут сравниться с лучшими кремниевыми полевыми МОП-транзисторами с аналогичной длиной затвора (поскольку выключение является отсечкой). частота отключения $53 \mathrm{ГГц}$, указанная для устройства с графеновыми транзисторами большой площади, имеет уникальный затвор с током-напряжением $550-\mathrm{нм}$, также в ссылке 73). Слабое место всей радиочастотной передаточной характеристики (рис. 7а). Плотность носителей и тип графеновых полевых МОП-транзисторов, о которых до сих пор сообщалось, - это неудовлетворительные носители насыщения (электроны или дырки) в канале, регулируются потенциальным поведением (только слабое насыщение или второй линейный режим), начальными различиями между каналом и затворами ( верхний затвор и/или который отрицательно влияет на частоту среза, внутренний задний затвор). Большие положительные напряжения на затворе способствуют усилению электронов и другим достоинствам радиочастотных устройств. модуляция в канале (канал n-типа) и большой отрицательный затвор. Однако превосходство кремниевых полевых МОП-транзисторов при работе с напряжениями приводит к каналу p-типа. Такое поведение порождает только слабое текущее насыщение ${ }^{73}$, что, безусловно, впечатляет. две ветви передаточной характеристики, разделенные диаграммой Дирака. На рис. 8 показаны граничные частоты для различных устройств точки (рис. 7а). Положение точки Дирака зависит от нескольких факторов, в том числе от графеновых полевых МОП-транзисторов, полевых транзисторов с нанотрубками, а также от различных факторов: разницы между работой выхода затвора и радиочастотных полевых транзисторов. Для обычных радиочастотных полевых транзисторов с графеном тип и плотность зарядов на интерфейсах с длиной затвора более $0,2 \mu \mathrm{m}$, данные $f\_{\mathrm{T}}$ для каждого типа транзистора при верхней и нижней части канала (рис. 6), а любое легирование имеет зависимость $L^{-1}$, где $L$ — длина затвора. Кроме того, $f\_{\mathrm{T}}$ графен. Коэффициенты включения-выключения, указанные для устройств MOSFET, увеличиваются с увеличением мобильности ${ }^{9}$. Кремниевые полевые МОП-транзисторы показывают, что число каналов подвижных графеновых каналов с большой площадью находится в диапазоне 2–20. связи на несколько $100 \mathrm{~cm}^{2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^{-1}$ по сравнению с примерно $6000 \mathrm{~cm}^{ 2} \mathrm{~V}^{-1} \mathrm{~s}^{-1}$ Выходные характеристики многих графеновых MOSFET как для GaAs pHEMT, так и более

**\includegraphics**[max width=\textwidth]{2022\_05\_16\_ff1bcf836d9aed7f722dg-08}

крутизна $3,2 \mathrm{mS} \mu \mathrm{m}^{-1}$ (что выше, чем крутизна, указанная для современных кремниевых MOSFET и III-V HEMT).

Двухслойные графеновые МОП-транзисторы были исследованы экспериментально ${ }^{83}$ и с помощью моделирования устройства ${ }^{84}$. Хотя коэффициенты включения-выключения, о которых сообщалось до сих пор (100 при комнатной температуре и 2000 при низкой температуре $\left.{ }^{83}\right)$, слишком малы для логических приложений, они отмечают значительное улучшение (примерно в 1 раз). 10) над МОП-транзисторами, в которых канал выполнен из бесщелевого графена большой площади.

Следует кратко упомянуть контактное сопротивление между металлическими контактами истока и стока и графеновым каналом. До сих пор самые низкие контактные сопротивления металл-графен находились в диапазоне $500-1000 \Omega \mathrm{cm}$ (ссылки 85,86), что примерно в десять раз превышает контактное сопротивление кремниевых MOSFET и III-V HEMT. $^{8,13}$. Примечательно, что, несмотря на важность контактов (особенно для устройств с коротким каналом), было опубликовано лишь несколько исследований, посвященных контактам металл-графен ${ }^{85-87}$, и требуется дополнительная работа, чтобы понять контактные свойства. Рисунок 8 | Сравнение частот среза для разных полевых транзисторов. Отсечение Теперь я возвращаюсь к двумерной природе графена. частота в зависимости от длины затвора для графеновых МОП-транзисторов, полевых транзисторов с нанотрубками Согласно теории масштабирования, как отмечалось ранее, тонкоканальные и три типа радиочастотных полевых транзисторов; символы в экспериментальной области позволяют подавить эффекты короткого канала и, таким образом, делают точки данных, а линии служат ориентиром для глаза для типа A (InP HEMT можно масштабировать полевые МОП-транзисторы до очень коротких длин затвора. Два и GaAs mHEMT), Устройства B (Si MOSFET) и C (GaAs pHEMT) (поскольку размерная природа графена означает, что он предлагает нам самое тонкое указанное). Полевой транзистор A с самой высокой граничной частотой $(660 \mathrm{GHz})$ представляет собой возможный канал, поэтому графеновые полевые МОП-транзисторы должны быть более масштабируемыми, чем $\mathrm{GaAs}$ метаморфные HEMT (mHEMT) с 20-нм ворота (М. Шлехтвег, их конкуренты. Следует отметить, однако, что масштабирование теории личной связи). Полевой транзистор B с самой высокой граничной частотой действителен только для транзисторов с полупроводниковым каналом и не является (485 ГГц) Si MOSFET с затвором 29 нм ${ }^{101}$. Полевой транзистор C не применяется к графеновым полевым МОП-транзисторам с каналами без зазоров. Таким образом, самая высокая частота отсечки $(152 \mathrm{GHz})$ является GaAs псевдоморфным HEMT. Теория масштабирования действительно описывает наноленточные MOSFET, которые имеют (pHEMT) с затвором 100 нм 102 . Самое быстрое устройство на основе нанотрубок (CNT FET) имеет $f\_{T}=80 \mathrm{ГГц}$ и $L=300 \mathrm{~нм}$ (ссылка 78), а также самую быструю ширину запрещенной зоны, о которой сообщается, но которые имеют значительно меньшую подвижности больше, чем у крупнографенового полевого МОП-транзистора с $f\_{T}=100 \mathrm{ГГц}$ и $L=240 \mathrm{~нм}$ (ссылка 73). области графена, как обсуждалось. Учитывая, что высокие опубликованные значения подвижности относятся к графену большой площади без зазоров, наиболее привлекательной характеристикой графена для использования в полевых МОП-транзисторах, в частности, в лучших обычных радиочастотных полевых транзисторах, но которые в последнее время требуют выключения, может быть его способность масштабирование на более короткие каналы обогнало лучшие кремниевые полевые МОП-транзисторы с длиной затвора выше и более высокими скоростями, а не по своей мобильности. $200 \mathrm{~nm}$ и приближаются к характеристикам GaAs pHEMT. (См. ссылку 78 для получения подробной информации о нанотрубке с самым высоким значением $f\_{\mathrm{T}}$, о котором сообщалось.