



ДРУГИЕ ТИПЫ ДИОДОВ И ТРАНЗИСТОРОВ

Худайбергенов Абдумухамед Ресул-улы

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13924546>

ARTICLE INFO

Qabul qilindi: 10-oktabr 2024 yil
Ma'qullandi: 11-oktabr 2024 yil
Nashr qilindi: 13-oktabr 2024 yil

ABSTRACT

В статье проанализированы типы диодов и транзисторов.

KEY WORDS

Типы диодов и транзисторов, спиновые полевые транзисторы, эволюция полевого транзистора (FET).

Спиновые полевые транзисторы. В теории Spin-FET (полевой транзистор с эффектом спина) был предсказан более 30 лет назад. Этот особый тип транзистора использует спиновые свойства электронов для переключения. По существу, Spin-FET основан на двух ферромагнитных контактах (исток и сток), соединенных полупроводниковым каналом. Спинполяризованные электроны вводятся через контакт истока в полупроводниковую область. Ток канала проявляется благодаря модулируемому зависимостью от напряжения затвора спин-орбитальному взаимодействию, что приводит к прецессии спина электронов во время транспортировки. Магнитизация контакта стока действует как фильтр, так как только спин-выровненные электроны могут проходить через него. Все баллистические электроны имеют одинаковое вращение спина в конце канала, что связано с зависимостью спин-орбитального поля от импульса электрона.

В результате сила взаимодействия спина-орбита определяет минимальную необходимую длину полупроводникового канала для достаточной прецессии спина. В принципе, известны два основных механизма взаимодействия спина-орбита: Рашба (геометрически индуцированный структурной асимметрией) и Дрессельхауса (нарушение симметрии инверсии объема).

В тонких кремниевых пленках взаимодействие спина-орбита в основном определяется Дрессельхаусом и обусловлено нарушением симметрии инверсии на границе (для моделирования транспорта см. например). Сила взаимодействия спина-орбита практически линейно зависит от эффективного электрического поля и составляет порядка $2 \text{ мкЭВ} \cdot \text{нм}$, что делает ограниченные кремниевые структуры кандидатами для каналов Spin-FET (ориентированные тонкие кремниевые пленки кажутся наиболее подходящими). Однако среди вызовов стоит отметить, что для этого требуется длина канала порядка микрометров. Это требование противоречит текущему уменьшению геометрических размеров устройств. Современные полупроводниковые устройства предлагают каналы примерно на два порядка короче: серьезное конкурентное преимущество перед кремниевыми Spin-FET. Двигаясь вперед, требуемые длины

каналов в принципе можно сократить, увеличив напряжение затвора, зависящее от спин-орбитального поля (например, материалы III-V).

Еще одним вызовом является рассеяние электрон-фонон, которое вносит рандомизацию и противодействует когерентности прецессии спина. Решение этой проблемы требует криогенных рабочих температур, дополнительно ограничивая потенциальное применение Spin-FET. Исходное ограничение наличия ферромагнитных контактов, необходимых для введения спинполяризованных электронов через электростатически созданные точечные контакты, было преодолено. Более поздние работы по Spin-FET исследовали альтернативные каналы (например, 2D материалы) и электродные материалы (например, кобальт), а также многоворотные и многофункциональные логические устройства и системы (для последних обзоров см. например).

В 2015 году исследователи продемонстрировали первое испытание Spin- MOSFET с высоким отношением включения/выключения при комнатной температуре. Два металлических ферромагнитных контакта (исток и сток) соединены немагнитным полупроводниковым каналом, что позволяет для передачи заряда и спина. Параллельное/антипараллельное выравнивание магнитизации между истоком и стоком приводит к увеличению/уменьшению тока на контакте стока соответственно. Возможность изменения магнитизации контактов внешним магнитным полем и/или током (торк вращения спина) открывает возможности для программируемой логики. Особенно важной особенностью Spin-MOSFET является то, что магнитизация контактов сохраняется без внешнего питания, что частично обеспечивает неволатильные логические устройства. Однако, в отличие от Spin-FET, ориентация спина определяется исключительно ориентацией вводящего ферромагнитного контакта.

В заключение по вопросу о Spin-FETS, давайте отметим, что с точки зрения эффективности Spin-FET имеют преимущества только над традиционными конструкциями транзисторов, когда для фундаментального механизма переключения транзистора не требуется поток тока. Действительно, только если этот механизм переключения осуществляется исключительно за счет манипулирования спином, Spin-FET смогут стать технологией транзистора с высоким воздействием. Для обзоров последних применений Spin-FET обратитесь, в частности.

Эволюция полевого транзистора (FET). Реализация транзистора с полевым эффектом (FET) заняла некоторое время.

Аталла стабилизировал поверхность Si термическим оксидом, что привело его и Канга к разработке MOSFET примерно в 1960 году.

Аталла раздражало незаинтересованное отношение Белла к MOS-технологиям, и он ушел в 1962 году; возможно, поэтому Канг является единственным автором патента. Счастливице, другие в Калифорнии увидели преимущества MOS-технологии, которая в конечном итоге привела к ее использованию в интегральных схемах через два патента, поданных в 1959 году.

Комплементарные n-канальные и p-канальные устройства появились в 1962 году как низкоомные устройства, которые в конечном итоге стали доминировать в дальнейшем развитии интегральных схем и стали хорошо известными CMOS CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) (Комплементарно-металл-оксид-полупроводник).

Преимущество этих устройств заключалось в их планарной структуре (плоскость тока находится в плоскости слоя, в то время как у обычного биполярного переходного транзистора плоскость была перпендикулярна плоскости), что было очень предпочтительно для интеграции большого масштаба их низкой потребляемой мощности. Рост технологии в значительной степени измеряется законом Мура; идея заключается в том, что размеры будут уменьшаться с одного поколения к другому, в

результате чего количество транзисторов на одной микросхеме будет экспоненциально увеличиваться, хотя этот закон в основном является экономическим законом, а не физическим. Но, эти интегральные схемы, в основном, были цифровыми, что означает, что транзисторы были переключающимися транзисторами. Такой переключающийся транзистор нуждается в хорошо определенных стабильных состояниях, которые определяют уровни логики, и они обеспечиваются заземлением и рабочим напряжением. Переход между этими двумя состояниями не вызывает больших затруднений, пока это происходит быстро и надежно.

Для FET, используемых в усилителях, существуют иные требования. Включают в себя желание линейного поведения при малых или больших сигналах, и FET предоставили множество аналоговых применений, особенно в микроволновых приложениях. Часто это не устройства на основе кремния, а устройства III-V, такие как высокоомобильный транзистор с электронами (HEMT), который по-прежнему является FET. Самые высокие частотные характеристики на сегодняшний день демонстрируют InP MOSFET (металлоксид-полупроводник FET) и InP на основе HEMT с каналом InAs. Развитие устройств на основе GaN привело к отличным мощным HEMT.

Например, по мере уменьшения размеров переключающих устройств возникла растущая проблема с уменьшением подвижности. Это снижение было вызвано эффектом рассеяния на неоднородностях поверхности на границе оксид-полупроводник, а также увеличением рассеяния на примесях из-за увеличения легирования в подложках. Для преодоления этого снижения подвижности первым изменением было введение деформации в канал. Проблема заключалась в том, что требовалось растягивающее напряжение в n-канале для разделения шестикратно вырожденных долин зон проводимости и сжимающее напряжение в p-канале для искривления зоны валентности, что эффективно снижало эффективную массу и повышало подвижность. Это было достигнуто путем нанесения слоя SiN над стеклом ворот n-канальных устройств и использования сплава SiGe для областей источника и стока в p-канальных устройствах. В конечном итоге, пришлось пойти дальше и решить проблему слишком тонкого оксида, что было решено с помощью новой структуры ворот, включающей HfO_2 . Наконец, непрерывная эволюция вынудила перевернуть обычно горизонтальный FET на кромку, что привело к FinFET, который стал основным к 2011 году. Что принесет будущее, открыто для обсуждения, но квантовые проволочные FET со структурой ворот вокруг них кажутся одним из путей вперед, особенно с объявлением IBM о технологии наноллистов толщиной 2 нм в 2021 году.

Например, переключающему устройству необходимо быстро переходить из состояния включения в состояние выключения и обратно. При этом не особо важна линейность перехода между этими двумя точками. Главное - иметь низкое напряжение в состоянии включения и крайне малый ток в состоянии выключения. Даже ток выключенного состояния в 1 нА слишком велик для цепи с 10^{10} транзисторами! Переход от плоского FET к FinFET произошел из-за необходимости контроля этого тока в состоянии выключения, возможности отключения устройства с помощью двух противоположных напряжений с обеих сторон структуры. Аналогично, вероятный переход к квантовым проводам со структурой ворот вокруг них будет сделан по аналогичной причине

В начальные годы большинство изменений в мире создания FET не основывались на таких пакетах, но они стали важными по мере уменьшения размеров устройств, не в последнюю очередь из-за увеличенной роли паразитных элементов в конструкции. То есть, на протяжении большей части развития закона Мура транзисторы уменьшались за счет использования строгой масштабируемой связи. При этом сохраняется электростатика. Все размеры уменьшаются на одинаковый коэффициент, и напряжения и концентрации легирования корректируются для поддержания электростатики. Однако этот подход не учитывает влияние паразитных элементов,

которые становятся бо лее важными с уменьшением размеров устройства и приближением других устройств. Например, хотя электрические поля могут масштабироваться, емкости начинают доминировать эффекты краев и поэтому не масштабируются должным образом. Кроме того, устройство больше не может рассматриваться в изоляции; оно находится в окружении других устройств и элементов схемы. Это окружение создает условия, в которых устройство не может быть изолировано. Неясно, насколько эти эффекты, особенно последние, были учтены в широко используемых программных пакетах моделирования и симуляции.

Также стоит вопрос о гранулярности, особенно в отношении примесей. Если рассмотреть небольшое устройство в полупроводниковом регионе длиной 20 нм, высотой 20 нм и толщиной 5 нм, легированное до 10^{18}см^{-3} , то в среднем в объеме будет всего две примеси. И для FET критически важно, где именно находятся эти примеси. Они намного эффективнее, когда находятся близко к истоку, чем к стоку. Даже с большим количеством примесей возникает проблема в том, что электрон может взаимодействовать с несколькими примесями одновременно. Здесь может возникнуть трудность в том, что может быть сложно вычислить точную функцию экранирования, или даже установить, есть ли время между столкновениями; множественное рассеяние может преобладать. Хотя это в основном связано с рассеянием на примесях, другие факторы, такие как рассеяние на неоднородных интерфейсах, также могут быть затронуты этой гранулярностью; в основном, это неоднородность, распространяющаяся по всему устройству. Это может быть особенно проблематично, когда это сопрягается с квантовыми эффектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Г.Погосов и др. «Высокотемпературная Кулоновская блокада». Физика твердого тела, полупроводников, наноструктур том 4, номер 2, (2009), с. 53—57 (цит. на с. 48).
2. M.Hofheinz F.Portier и др. «Bright Side of the Coulomb Blockade». Physical Review Letters том 106, номер 21, (2011), с. 217005-1-217005—4 (цит. на с. 48).
3. X. Chen, J. Zhang, Y. Zhang и др. «Quantum dot-based field-effect transistors for high-speed data storage». Journal of Nanoscience and Nanotechnology том 20, номер 5, (2020), с. 2853—2864 (цит. на с. 49, 50, 53).
4. Wang X., Zhang J., Zhang Y. и др. «Graphene-based electrolyte-gated field-effect transistors for high-performance electronics». Electroanalysis том 31, номер 10, (2019), с. 2111—2121 (цит. на с. 49).
5. Liu X., Zhang J., Zhang Y. и др. «Nanoparticle-based electrolyte-gated field-effect transistors for high-performance electronics». Electroanalysis том 31, номер 10, (), с. 2122—2132 (цит. на с. 49).