

Ученые Института физики полупроводников усовершенствовали пленки хай-кей диэлектрика на основе диоксида гафния

Результаты работы могут пригодиться для создания энергонезависимой памяти и мобильной связи нового поколения

Аспирант Института полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН) представил сообщение на Международной конференции «Атомно-слоевое осаждение: Россия-2026». Доклад посвящен исследованию сверхтонких плёнок хай-кей (high-k) диэлектриков на основе диоксида гафния внутри кремния. Сообщение признано лучшим среди докладов молодых учёных конференции

«High-k означает высокую диэлектрическую проницаемость. То есть при приложении электрического поля такой диэлектрик сильнее поляризуется и почти не уменьшает электрический потенциал. Это позволяет увеличить толщину подзатворного диэлектрика, снизить утечки и открывать токовый канал в полевом транзисторе при более низких напряжениях. И, в итоге, создавать полупроводниковые устройства с более низким напряжением питания и электропотреблением.

Кроме того, исследуемый вариант диэлектрика обладает сегнетоэлектрическими свойствами, то есть может сохранять поляризацию при выключении внешнего электрического поля. Этот эффект может применяться при создании ячеек памяти или транзисторов с регулируемым порогом открытия», — объясняет аспирант ИФП СО РАН Владимир Евгеньевич Жилицкий.

Молодой ученый работает под руководством заведующего лабораторией института, доктора физико-математических наук Владимира Павловича Попова.

Обычно в затворах транзисторов почти всей кремниевой электроники в качестве диэлектрика используется диоксид кремния (SiO_2). Идея состоит в том, чтобы заменить его на high-k диэлектрик. Один из них — диоксид гафния (HfO_2). Именно это соединение исследует Владимир Жилицкий.

У диоксида кремния диэлектрическая проницаемость около 3,9, а у диоксида гафния в наиболее перспективной — орторомбической — кристаллической фазе она достигает порядка 25. Эта же фаза обладает сегнетоэлектрическими свойствами: способна сохранять поляризацию после снятия напряжения.

Проблема в том, что орторомбическая фаза метастабильна и легко перекристаллизуется в другие фазы диоксида гафния (чаще всего – в моноклинную). Обычно её стабилизируют легированием (добавлением) цирконием. Но лаборатория, в которой работает Владимир, пошла другим путём — легировала диоксид гафния оксидом алюминия в соотношении 15 к 1, чередуя монослои из двух диэлектриков.

Плёнки диэлектрика выращивались методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения (PEALD) в Департаменте Физико-технологических исследований имени К.А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт», а затем в лаборатории ИФП СО РАН переносились с тонким слоем кремния на кремниевую же подложку методом, подобным SmartCut. Так получается «захороненная» high-k структура, где слой диэлектрика изолирован кремнием с обеих сторон.

Владимир занимался измерениями образцов, прошедших быстрый 30-секундный отжиг в диапазоне температур от 700 до 950°C, методом импеданс-спектроскопии — быстрым и недорогим способом исследования, который позволяет оперативно проводить большое количество измерений на разных контактных площадках у различных образцов. Это позволяет усреднить результаты по большому количеству измерений и быстро получить ответ на вопрос о происходящих при отжиге изменениях.

«Мы выяснили, что небольшие участки орторомбической фазы диоксида гафния, легированного алюминием, сохраняются вплоть до температуры отжига 900 градусов

Цельсия. Мы не нашли работ, где это было бы показано для такой высокой температуры, вероятно это особенность легирования алюминием. Однако большая часть диоксида гафния переходит в моноклинную фазу. При этом мы обнаружили, что кремний “вытягивает” кислород из диоксида гафния, и на границе образуются межслойный диэлектрик SiO_x с низкой диэлектрической проницаемостью. И рост SiO_x значительно ускоряется при температуре отжига выше 800 градусов Цельсия. Из-за этого эффективная проницаемость всей структуры оказывается порядка 12–13 вместо ожидаемых 20–25», — пояснил Владимир.

Молодой ученый добавляет, что скорее всего, можно достичь эффективной диэлектрической проницаемости порядка 20 для всей структуры в целом, если ограничить температуру быстрого отжига 750 градусами Цельсия. Но, помимо этого, потребуется создать барьеры для диффузии, например, тонкие слои нитрида кремния или бора, чтобы препятствовать выходу кислорода в кремний.

То, что тонкий слой диоксида гафния окружен кремнием с обеих сторон, позволяет применять такие пластины для создания двухзатворных транзисторов с регулируемым порогом срабатывания: один затвор с high-k диэлектриком управляет порогом срабатывания другого. Это открывает возможность настраивать электронику на энергоэффективную работу при низких напряжениях или на работу на высоких частотах. Сегнетоэлектрические свойства диоксида гафния также позволяют использовать такие структуры, как ячейки энергонезависимой памяти — потенциально более быстродействующие и износостойкие, чем флэш-память. У флэш-памяти ресурс порядка 10 000 циклов записи, а у памяти на основе диоксида гафния он может быть на много порядков выше.

Высокая рабочая частота переключений таких транзисторов делает перспективным их применение не только в качестве памяти, но и для мобильной связи нового поколения. Но пока исследование носит фундаментальный характер.

Работа выполняется при поддержке грантов Российского научного фонда (№ 25-19-20049) и правительства Новосибирской области (№ 30-2025-000924).

Пресс-служба ИФП СО РАН
<https://disk.yandex.ru/d/rQBteNyCIVZPFw>