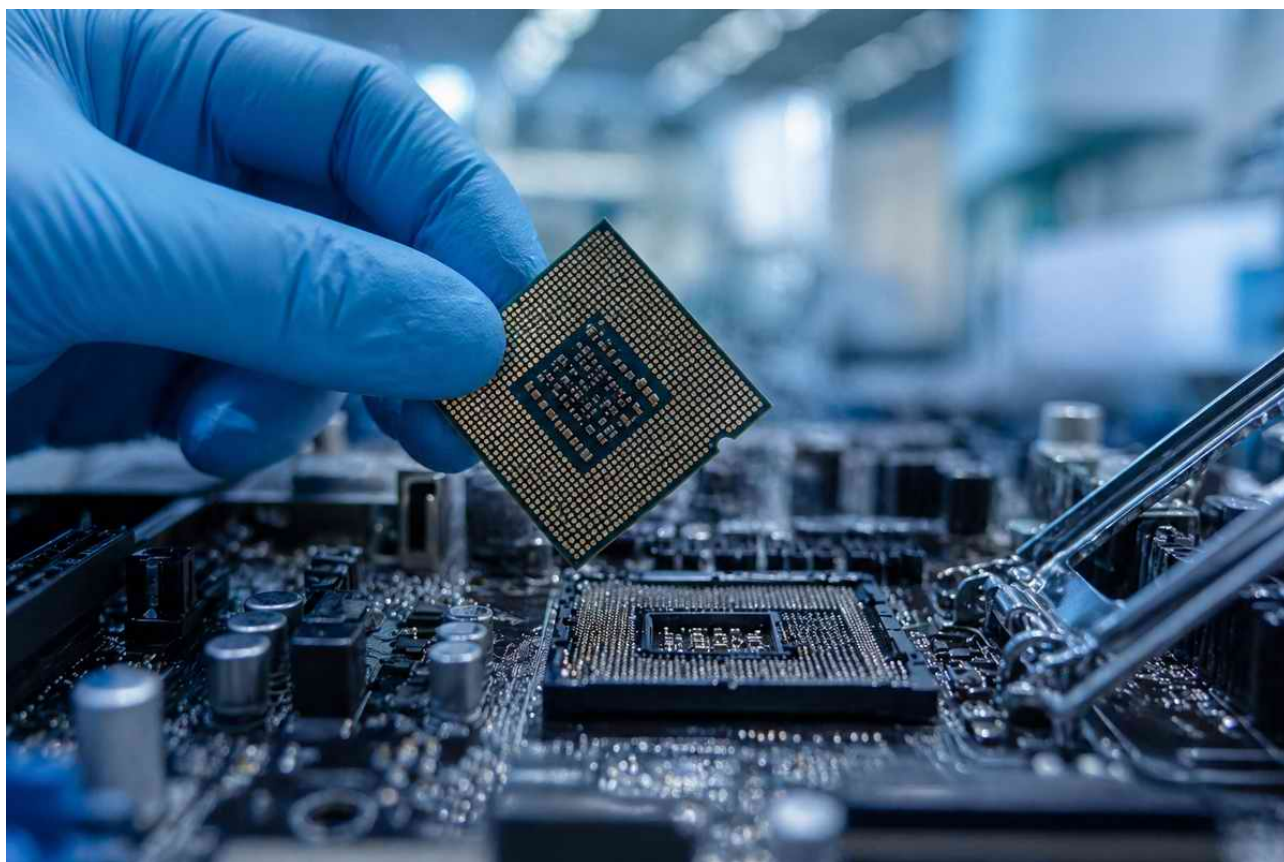


Атомный зазор, который может остановить миниатюризацию чипов



Дата публикации: 28.04.2026

Двумерные материалы уже много лет считаются одним из ключевых направлений развития микроэлектроники, способным продлить эпоху миниатюризации и повысить производительность вычислительных систем. Их уникальная структура — слой толщиной всего в один атом — обеспечивает выдающиеся электрические свойства, включая высокую подвижность носителей заряда и точный контроль проводимости. Однако последние исследования показывают, что фундаментальные ограничения могут скрываться не в самих материалах, а в их взаимодействии с окружающей средой на атомном уровне.

Инженеры и физики долгое время фокусировались на свойствах таких материалов, как графен и дисульфид молибдена, рассматривая их как основу будущих транзисторов. Но реальное электронное устройство — это не только активный слой, а сложная система, включающая также диэлектрик, контакты и управляющие элементы. Именно на границе между двумерным полупроводником и изолирующим слоем возникает критический фактор, который может свести на нет все преимущества новых материалов.

В основе проблемы лежит слабое взаимодействие между слоями. В большинстве случаев двумерный материал и диэлектрик удерживаются вместе за счёт ван-дер-ваальсовых сил — относительно слабых межмолекулярных взаимодействий. Это означает, что поверхности не прилегают друг к другу идеально, и между ними формируется микроскопический зазор. Его размер составляет порядка 0,14 нанометра, что значительно меньше размеров атомов большинства элементов, но даже такой масштаб оказывается достаточным, чтобы повлиять на работу устройства.

Этот атомный зазор нарушает электрическую связь между слоями, снижая ёмкостную эффективность и ухудшая управление каналом транзистора. В условиях, когда современные технологии стремятся к предельной плотности элементов, даже незначительное снижение эффективности приводит к существенным ограничениям. Чем меньше устройство, тем сильнее проявляется влияние этого зазора, превращая его в фундаментальный барьер для дальнейшего уменьшения размеров транзисторов.

Ключевые последствия наличия зазора можно описать следующим образом: снижение ёмкостной связи, ухудшение управления током, рост энергопотерь, ограничение масштабируемости, снижение общей эффективности устройств. Эти эффекты не зависят от качества самого материала и не могут быть устранены простым улучшением производственных процессов, поскольку связаны с базовыми физическими свойствами интерфейса.

Особую значимость этой проблемы подчёркивает тот факт, что она долгое время оставалась недооценённой. Основные усилия исследователей были направлены на синтез новых материалов и улучшение их характеристик, тогда как интерфейс между слоями рассматривался как второстепенный фактор. Новые данные показывают, что именно этот аспект может определить, какие технологии окажутся жизнеспособными, а какие — тупиковыми.

Решение проблемы требует изменения подхода к проектированию электронных устройств. Вместо выбора материалов по отдельности необходимо рассматривать их как единую систему, где свойства интерфейса играют ключевую роль. Одним из перспективных направлений является разработка так называемых «материалов-молний», в которых полупроводниковый и диэлектрический слои формируют более прочную химическую связь. Это позволяет устранить зазор и значительно улучшить электрические характеристики.

Перспективные стратегии включают: подбор материалов с сильным межслоевым взаимодействием, создание гибридных структур с ковалентными связями, оптимизацию интерфейсов на этапе проектирования, использование

новых типов диэлектриков, разработку методов контроля атомной сборки. Такой подход позволяет перейти от случайных комбинаций материалов к целенаправленной инженерии на уровне атомов.

Для полупроводниковой индустрии эти выводы имеют стратегическое значение. Разработка новых технологических платформ требует миллиардных инвестиций, и ошибка в выборе фундаментального направления может привести к серьёзным экономическим потерям. Возможность заранее предсказать поведение материалов и их совместимость открывает путь к более эффективному планированию и снижению рисков.

В более широком контексте исследование подчёркивает важность междисциплинарного подхода, объединяющего физику, химию и инженерные науки. Будущее электроники зависит не только от открытия новых материалов, но и от глубокого понимания их взаимодействий на самых малых масштабах. Именно на этом уровне формируются ограничения и возможности, которые определяют развитие технологий в ближайшие десятилетия.

Таким образом, атомный зазор на границе между двумерным материалом и изолятором становится одним из ключевых факторов, определяющих будущее микроэлектроники. Его учёт меняет представление о перспективах 2D-материалов и указывает на необходимость пересмотра стратегий их применения.

Ссылка: «Ограничения масштабирования устройств, накладываемые зазором Ван дер Ваальса, образующимся в двумерных материалах» DOI: [10.1126/science.aeb2271](https://doi.org/10.1126/science.aeb2271).