

# Квантовая модификация

## Использование ускорителей частиц для имплантации отдельных атомов в целях биозондирования

Джоанн Лю

В сфере квантовых технологий ускорители частиц активно используются в течение последнего десятилетия для изменения и определения характеристик материалов. С помощью методов, основанных на использовании ускорителей, высокоэнергетические ионы воздействуют на атомные структуры материалов, что позволяет ученым контролировать поведение отдельных атомов. Основное применение ускорителей связано с ионной имплантацией, которая широко используется в полупроводниковой промышленности и существует уже несколько десятилетий.

«В случае полупроводников большое число ионов имплантируется для изменения электрических свойств, например, кремния, — поясняет Эндрю Беттиол, доцент Национального университета Сингапура. — В случае квантовых технологий цель совершенно другая. Мы хотим контролировать ионы на уровне одного иона. Мы не имплантируем миллионы или миллиарды ионов; мы имплантируем ровно один ион».

Трудности, связанные с имплантацией одного иона, заключаются в определении того, когда и где имплантирован ион и имплантирован ли он вообще. «И даже если ион имплантирован в материал, это не значит, что он работает так, как должен работать в качестве кубита или центра окраски», — отмечает Беттиол. Кубиты, или квантовые биты, — это сложные версии несущих информацию битов, используемых в обычных вычислениях, а центры окраски — это дефекты, которые излучают свет, позволяющий осуществлять квантовое зондирование.

В мае 2021 года МАГАТЭ провело четырехдневный обучающий семинар-практикум по созданию материалов с помощью ионных пучков. В ходе семинара-практикума была представлена базовая информация о работе аппаратуры, обеспечивающей использование направленного ионного пучка, и об обнаружении отдельных ионов. В виртуальном семинаре-практикуме, который проводился в рамках проекта координированных исследований и был направлен на углубление понимания и привлечение новых участников в квантовую область, приняли участие более 80 человек, причем половина из них — из развивающихся стран. Проведение семинара-практикума также совпало с запуском курса электронного обучения МАГАТЭ «Разработка материалов с использованием ионных пучков для квантовых технологий», который направлен на вовлечение нового поколения экспертов в квантовой области.

«МАГАТЭ занимает лидирующие позиции в координации международного сотрудничества, исследований и разработок в области квантовых технологий в соответствии с национальными и международными инициативами, — говорит Ализ Шимон, ядерный физик, занимающийся ускорителями в МАГАТЭ. — МАГАТЭ продолжает свои усилия по проведению координированных исследований для реализации преимуществ квантовых технологий на благо общества». Новый проект МАГАТЭ, запуск которого ожидается позднее в этом году, будет способствовать развитию и оптимизации платформы биозондирования, основанной на использовании центров окраски в алмазе, что позволит исследовать субклеточные механизмы. В квантовой области алмазы используются в качестве полупроводников

для последовательного распознавания электрических и магнитных полей в отдельных живых клетках.

## Использование центров окраски в целях квантового зондирования

Алмаз в чистом виде представляет собой решетку из атомов углерода с более чем 500 задокументированными дефектами, которые излучают свет. Один из этих известных дефектов — это азотозамещенная вакансия (NV-центр окраски). NV-центр окраски возникает, когда один атом углерода удаляется, образуя вакансию, а соседний атом углерода замещается атомом азота. «NV-центры окраски могут возникать в природе и распределяться случайным образом. С помощью ускорителей мы можем искусственно создавать эти дефекты методом ионной имплантации и располагать их в определенных областях внутри наноразмерных кристаллов алмаза», — говорит Беттиол. Из известных дефектов алмаза NV-центр может быть интегрирован в наноразмерные кристаллы алмаза, и его можно контролировать при комнатной температуре. Кроме того, он является биосовместимым, то есть не вредным и не токсичным для живых систем.

NV-центры в алмазах обладают способностью определять магнитное поле с помощью метода, называемого оптически детектируемым магнитным резонансом, или ОДМР. Способность получать изображения магнитных полей имеет значение как для биологии, так и для материаловедения. «Это оптический способ изучения светового излучения и обнаружения очень маленьких

магнитных полей, возникающих в ходе биологических процессов, — поясняет Беттиол. — Этот метод квантового биозондирования может использоваться для визуализации или измерения процессов, протекающих на клеточном уровне и имеющих очень маленькое магнитное поле, как, например, магнитные поля, возникающие при работе нейронов в нашем мозге».

Текущий исследовательский проект Беттиола связан с применением метода ОДМР в целях выявления малярии. «Красные кровяные тельца, зараженные малярией, содержат крошечные магнитные частицы, которые можно обнаружить с помощью ОДМР, — отмечает он. — В принципе с помощью этого метода можно выявлять все, что создает электромагнитное поле».

В рамках предстоящего проекта МАГАТЭ будут продолжены исследования квантового зондирования с использованием ОДМР, а также определение характеристик и оптимизация устройств для зондирования. В основе нового проекта, который объединит исследователей, имеющих общие интересы в области биозондирования, лежит предыдущий проект, который был более масштабным и был направлен на развитие инструментов ионного пучка на базе ускорителей. «МАГАТЭ — отличная площадка для сотрудничества, вокруг которой сложилось сообщество экспертов, что позволяет обмениваться информацией и учиться друг у друга», — говорит Беттиол.

**Новый проект МАГАТЭ будет способствовать развитию и оптимизации платформы биозондирования, что позволит исследовать субклеточные механизмы.**

(Фото: Adobe Stock)