

# Исследования гибкой электроники

**Итальянские ученые разрабатывают рекомендации для оптимизации геометрии и процесса изготовления гибкой электроники. Исследователи основываются на данных проводимой конфокальной сканирующей микроскопии, благодаря которым получена информация о поведении изделия при механическом воздействии.**

**Маркус Фабич  
(Markus Fabich)**

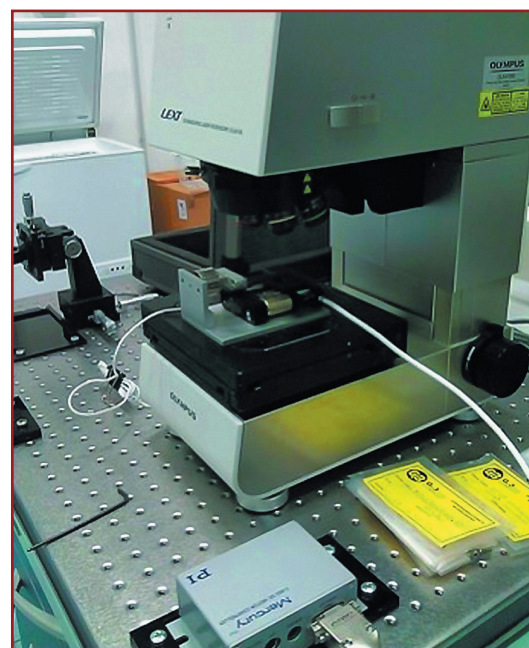
**Перевод: Николай Павлов**

**А**ктивные научно-исследовательские работы приближают наступление эры гибкой электроники. В одном из предложенных решений электронные компоненты размещены на гибком деформируемом основании, на котором находятся и проводники, соединяющие их в единую электрическую схему. Проектирование таких проводников — сложная задача, ведь они должны сохранить свою геометрию и остаться целыми при сложной деформации основания. Для дальнейшего развития гибкой электроники требуется четкое понимание, какие напряжения возникают в структуре в целом и в каждом отдельном элементе при приложении деформационных воздействий. В идеале подобное тестирование должно проводиться в конкретных местах испытываемой структуры и отображать возникающие механические напряжения с высокой точностью и разрешением, в зависимости от приложенных воздействий. Это поможет оптимизировать оба компонента (основание и наносимый материал) и процесс изготовления, но восприятие данной информации будет сильно зависеть от метода ее отображения. При проведении таких экспериментов обычно используется сканирующая электронная микроскопия (SEM), однако на сегодня и световая микроскопия приблизилась к возможностям SEM. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия (CLSM) обладает высокой скоростью, простотой применения и достаточностью получаемой информации.

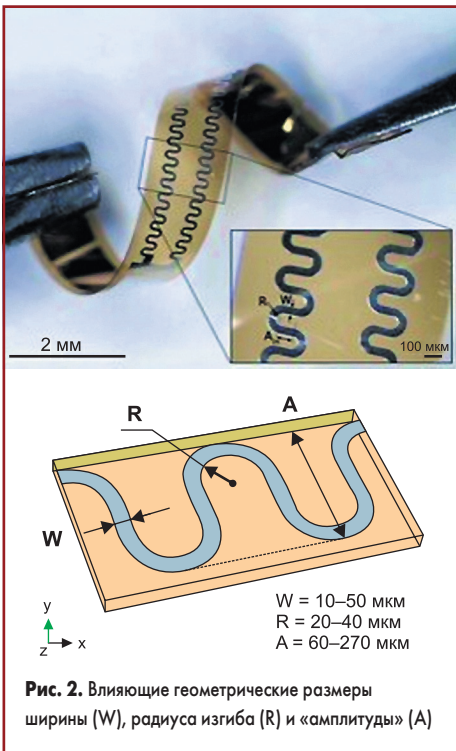
В Политехническом институте Милана (Politecnico di Milano, Милан, Италия) исследовательская группа доктора Дарио Гастальди воспользовалась для исследования и оптимизации гибкой электроники технологией CLSM. Микрорастягиваемое устройство было размещено на конфокальном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS4100 и растягивалось с шагом 5%, при этом были сделаны снимки каждого этапа (рис. 1). При работе с этой установкой группа профессора Гастальди ставила задачу охарактеризовать два основных фактора, воздействующих на адгезию проводника к полимеру основания, — геометрические размеры и влияние производственного процесса.

## Проводники с идеальной геометрией

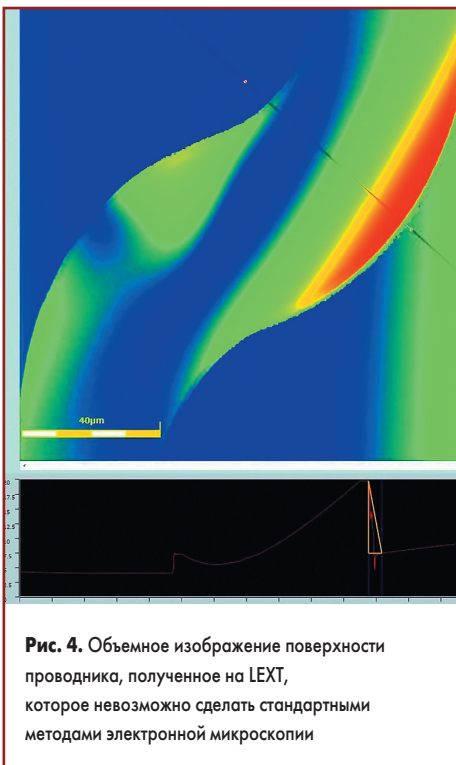
Изменения в геометрии проводников определялись измерением ширины и радиусов большого количества образцов. Ранее для анализа использовался SEM-микроскоп, но, несмотря даже на большую разрешающую способность в сравнении с CLSM, такой метод не позволял точно определить величину деформации. «Нам был необходим такой метод анализа, поскольку получаемая ранее информация не устраивала нас на качественном уровне, — говорит доктор Гастальди. — Изучая первые растровые изображения, я отметил их схожесть со снимками с SEM. Я был впечатлен качеством изображения, не говоря уже о количественных показателях». Исследования гибкой электроники с измерениями конкретных геометрических размеров и параметров, изменяющихся при механических воздействиях, очень важны для



**Рис. 1.** Размещение устройства микрорастяжений на конфокальном сканирующем микроскопе



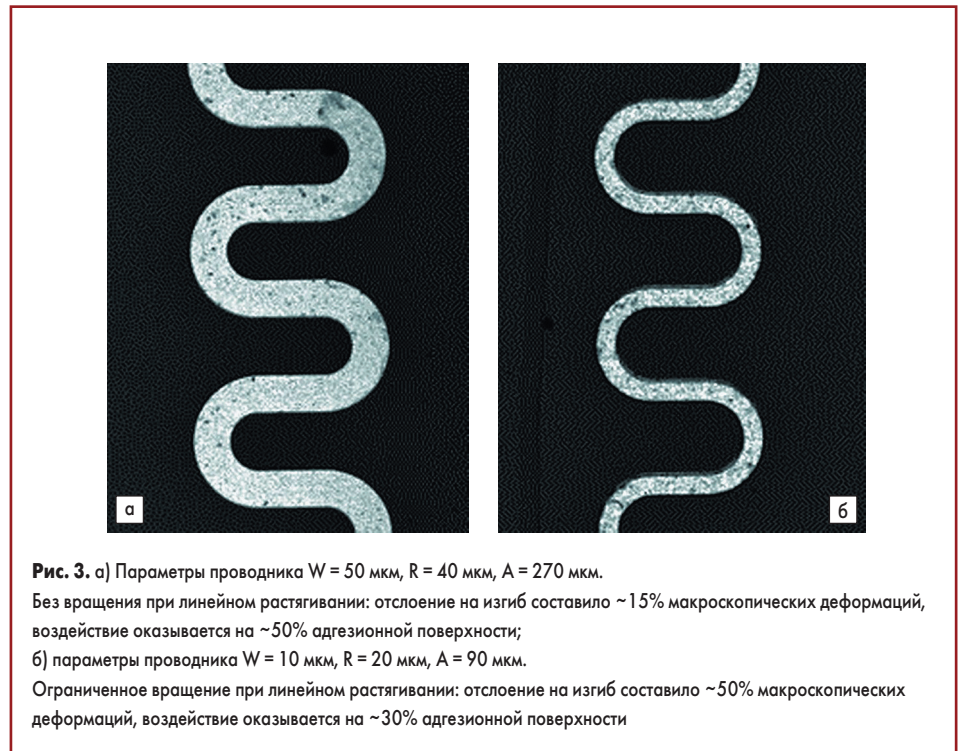
**Рис. 2.** Влияющие геометрические размеры ширины (W), радиуса изгиба (R) и «амплитуды» (A)



**Рис. 4.** Объемное изображение поверхности проводника, полученное на LEXT, которое невозможно сделать стандартными методами электронной микроскопии

отработки числовых моделей и оценки полного цикла создания и производства изделий. Такие исследования стали возможны за счет применения функции объемного сканирования, и, как говорит доктор Гастальди, «качество измерения 3D-структуры со столь высокой точностью превзошло все наши ожидания».

В ходе исследования было определено, что ключевым параметром для исследуемой структуры являются петли волнообразного проводника, его «амплитуда» (рис. 2). CLSM позволил провести исследование кинематики проводника (геометрии его движения) во время механического воздействия с целью подтверждения данного предположения. Механические напряжения накапливаются в поперечном



**Рис. 3.** а) Параметры проводника  $W = 50 \text{ мкм}$ ,  $R = 40 \text{ мкм}$ ,  $A = 270 \text{ мкм}$ . Без вращения при линейном растягивании: отслоение на изгиб составило  $\sim 15\%$  макроскопических деформаций, воздействие оказывается на  $\sim 50\%$  адгезионной поверхности; б) параметры проводника  $W = 10 \text{ мкм}$ ,  $R = 20 \text{ мкм}$ ,  $A = 90 \text{ мкм}$ . Ограниченное вращение при линейном растягивании: отслоение на изгиб составило  $\sim 50\%$  макроскопических деформаций, воздействие оказывается на  $\sim 30\%$  адгезионной поверхности

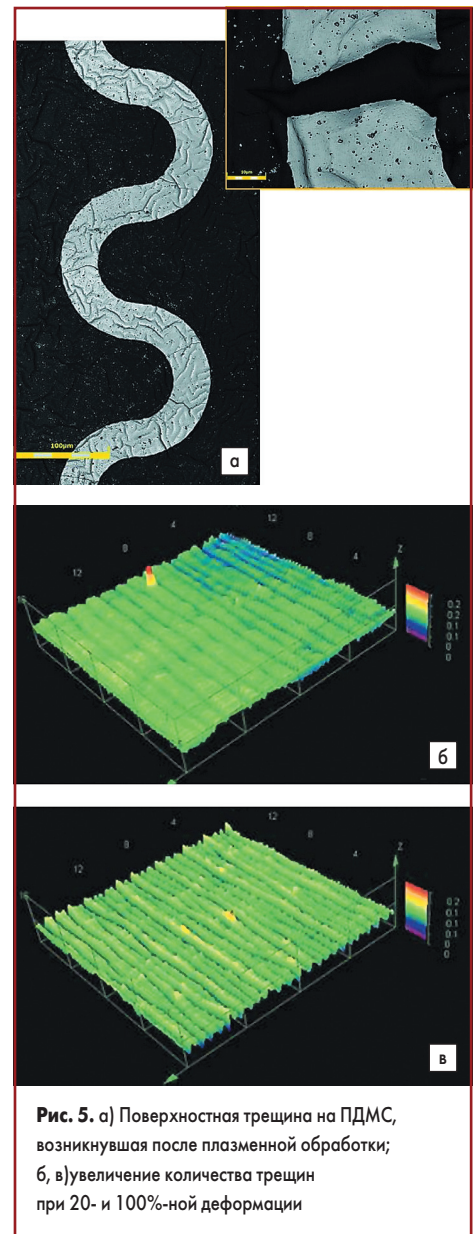
направлении, что сжимает петлю при деформации и приводит к отслаиванию структуры от основания. Более короткие петли (рис. 3, 4) менее подвержены вращению при изгибающей деформации. Соответственно, они менее склонны к образованию дефектов, и такие структуры могут выдерживать большие механические нагрузки. Однако поведение данных структур определяется не только их геометрическими особенностями, но и параметрами адгезии токопроводящих материалов к основанию.

### Улучшение уровня адгезии токопроводящего рисунка к основанию

Производственный процесс определяет уровень адгезии токопроводящей структуры к полимерному основанию. Именно адгезия является основным параметром, определяющим дальнейшую функциональность и надежность структуры с точки зрения устойчивости к механическим воздействиям.

К примеру, при нанесении золота на полидиметилосан (ПДМС) обязательно используется предварительная плазменная обработка поверхности основания. Главный вопрос, возникающий при обработке поверхности полимера, — каково влияние плазменной обработки на дальнейшее «восприятие» деформации (рис. 5).

Как было обнаружено в ходе исследований, такая обработка увеличивает поверхностные трещины, что приводит к уменьшению устойчивости к деформации ПДМС. Однако процесс управляем за счет изменения параметров длительности и подаваемого рабочего напряжения. Удалось определить оптимальные значения управляющего напря-



**Рис. 5.** а) Поверхностная трещина на ПДМС, возникшая после плазменной обработки; б, в) увеличение количества трещин при 20- и 100%-ной деформации

жения плазменной обработки, позволяющего достичь наилучшей адгезии материала к основанию, с одной стороны, и не нарушить структуры материала с точки зрения устойчивости материала к деформации, с другой стороны.

Кроме того, группа доктора Гастальди смогла выяснить, что поверхностные трещины появлялись на материале до процесса металлизации, а это косвенно подтверждает опасность плазменной обработки. Было обнаружено увеличение количества трещин при определенном напряжении плазменной обработки. Данная информация будет полезной коллегам, занимающимся производством гибкой электроники. Полученные результаты подтверждают предположение, что причиной уменьшения стойкости к механическому воздействию является именно плазменная обработка, а не процесс металлизации.

### Заключение

Работа группы доктора Гастальди фокусировалась на формировании рекомендаций для оптимизации геометрии и процесса изготовления гибкой электроники на основании деформационного теста с целью получения информации о поведении изделия при механическом воздействии. Исследование проводилось с помощью конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS4100, и это позволило узнать новую информацию, влияющую на проектирование гибких электронных устройств. Проанализированные данные подтверждают версию о том, что волнообразные проводники с минимальной «амплитудой» наиболее стойки к отслаиванию, что, в свою очередь, помогает усовершенствовать числовую систему моделирования, используемую

при проектировании таких структур. Новые сведения подтвердили положительное влияние плазменной обработки на уровень адгезии токопроводящих структур к полимерному основанию и одновременно продемонстрировали прямую связь величины рабочего напряжения плазменной очистки с устойчивостью конечной структуры к изгибанию (излому). Доктор Гастальди говорит: «Для производителей, использующих в своих изделиях изгибаемые структуры и применяющих механические испытания, 3D оптическая профилометрия является новой возможностью для получения дополнительной информации. CLSM представляется шагом вперед, и нам еще предстоит оценить, как его можно использовать в комбинации с другими испытательными и контрольными методами для дальнейшего развития гибкой электроники».