

УДК 541.64:537.3

ОБ ЭФФЕКТАХ И МЕХАНИЗМЕ КОЛЛЕКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУР В ПЛЕНКАХ НЕКОТОРЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ¹

© 1996 г. Е. И. Шклярова, А. Е. Борщев, А. В. Краев,
Т. В. Дорофеева, О. В. Демичева, Л. Н. Григоров

Институт синтетических полимерных материалов Российской академии наук
117393 Москва, Профсоюзная ул., 70

Поступила в редакцию 17.10.95 г.

С помощью одновременных диэлектрических и прецизионных механо-дилатометрических измерений обнаружен спонтанный эффект коллективной структурной перестройки системы проводящих каналов в пленках полидиметилсилоксана, а также окисленных полигексена и атактического полипропилена. Эксперименты с сильными импульсами тока показали, что синхронность коллективного поведения каналов обусловлена их способностью к эффективному взаимодействию путем обмена радиоволнами.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы обнаружено [1–5], что в тонких пленках некоторых диэлектрических полимеров, преимущественно находящихся в высокоЭластическом состоянии, возможно образование локально проводящих микроскопических каналов с размерами $L \sim 1\text{--}10$ мкм. Их электропроводность имеет электронную природу и, по оценкам разных авторов, лежит в диапазоне от металлической [4, 5] до проводимости сверхпроводников [1–3, 6, 7]. Эти каналы (названные суперполяронами в квантовой теории [8], объяснившей их природу) детектируются в пленке как обычными электрическими [2–7], так и бесконтактными магнитными методами [2]. В тех же случаях, когда толщина пленки эластомера d заметно превосходит длину каналов L , электрические методы не применимы, но становятся весьма эффективными диэлектрические методы обнаружения суперполяронов благодаря их высокой поляризуемости [9].

В предыдущих исследованиях нами неоднократно замечалась способность суперполяронов к спонтанным структурным изменениям, вызванным как тепловым движением эластомерной матрицы [10], так и какими-то иными, пока не до конца ясными причинами. В частности, при измерениях вольтамперных характеристик спонтанные скачки сопротивления происходят не только при сканировании напряжения [11], но и в результате включения или выключения посторонней аппаратуры, находящейся вблизи от места проведения эксперимента. Наиболее ярко способность к

спонтанным изменениям суперполяронарной структуры проявилась в работе [12], где в ходе бесконтактных магнитных измерений внезапно появлялось сильное выталкивание образцов из постоянного магнитного поля, сохранявшееся в течение многих минут и затем столь же внезапно исчезавшее.

Простые расчеты, проделанные нами уже после публикации [12], показали, что единственным возможным объяснением такого выталкивания является спонтанное появление в полимере незатухающего колышевого тока диаметром ~ 1 мм и более, что намного превосходит типичные размеры L индивидуальных суперполяронов. Это привело нас к предположению о возможности кооперативного поведения, в ходе которого одновременно изменяется структура множества суперполяронов и могут возникать высокопроводящие надструктуры макроскопических размеров. Проверка данного предположения, а также поиск возможного механизма такого кооперативного поведения являются целью настоящей работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментах использовались тонкие (8–15 мкм) пленки атактического ПП, полигексена (ПГ) и ПДМС. В исходном состоянии все три полимера являются хорошими диэлектриками. Атактический ПП и изотактический ПГ с $M \sim 7 \times 10^4$ и 7×10^6 соответственно были синтезированы в лаборатории Ф.С. Дьячковского в ИХФ РАН, а ПДМС со средней массой $\sim 10^5$ синтезирован в ГНИИХТЭОС Е.И. Алексеевой. По данным атомно-адсорбционного анализа содержание примесных немагнитных металлов в указанных

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Международного научного фонда (грант M8N 000).

полимерах не превышало 10^{-5} ат. %, а концентрация ферромагнитных металлов была ниже порога обнаружения (10^{15} см $^{-3}$).

Пленки заданной толщины готовили методом напыления аэрозоля раствора полимера в гептане на хорошо полированные металлические подложки. По методике [2] осуществляли начальную активацию ПП и ПГ, инициирующую появление в них суперполяронов. Она включала в себя частичное окисление полимера и его УФ-облучение. Обработку ПДМС проводили по методике [13], причем в результате УФ-облучения каучук частично сшивался. В связи с тем что концентрация и размер суперполяронов сравнительно медленно нарастают в объеме пленки [7], электрические и диэлектрические измерения начинали спустя 1–2 недели после начальной активации пленок. По результатам бесконтактных магнитных измерений, к данному моменту средняя концентрация свободных электронов в ПП, ПГ и ПДМС составляла 3×10^{17} – 3×10^{18} см $^{-3}$. Это на несколько порядков выше содержания примесей и показывает, что основным источником свободных электронов являются макромолекулы полимера.

В настоящей работе мы использовали специальную установку для прецизионных электрических и диэлектрических измерений, позволяющую измерять толщину пленки с высокой точностью непосредственно в ходе эксперимента (рис. 1). На четырехгранный шток 1, уравновешенный на пружинах и перемещающийся строго вертикально в направляющих роликах (сила трения менее 0.1 Н), может подаваться заданная нагрузка. На конце штока жестко закреплен кварцевый стержень 2, заканчивающийся небольшим постоянным магнитом 3. В центре верхнего электрода 4 диаметром 4–6 мм припаян стальной шарик, который притягивается магнитом и удерживает электрод на весу. Такая “плавающая” конструкция передает усилие с штока на полимер точно по центру электрода 4, контактная поверхность которого при этом сама устанавливается строго параллельно нижнему электроду 5 с диаметром 20 мм и толщиной 2 мм ± 1 мкм. Оба электрода изготовлены из полированной меди (шероховатости поверхности менее 0.1 мкм). Для создания химически инертного контакта полимерной пленки 6 и электродов 4, 5 на последние напылялся тонкий слой золота.

Любое изменение толщины пленки вызывает перемещение штока, которое измеряется емкостным датчиком с подвижной изолированной пластиной 7, параллельной неподвижной пластине 8. Расстояние между плоскостями 7, 8 влияет на частоту колебаний LC-генератора с чувствительностью до 3 кГц/мкм, что позволяет измерять текущую толщину полимерного слоя с точностью не хуже 0.05–0.1 мкм. При относительно же бы-

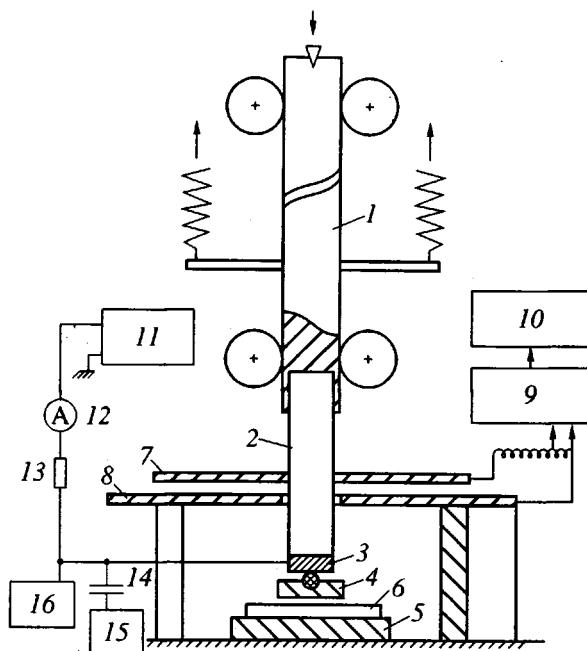


Рис. 1. Установка для прецизионных электроизмерений тонких полимерных пленок в условиях контролируемого давления и толщины. 1 – шток, 2 – кварцевый стержень, 3 – магнит, 4 – электрод с впаянным стальным шариком, 5 – нижний электрод, 6 – слой полимера, 7 – подвижная пластина емкостного измерителя толщины, 8 – неподвижная пластина, 9 – LC-генератор, 10 – частотомер, 11 – стабилизированный источник напряжения, 12 – микроамперметр РВ7-22А, 13 – балластное сопротивление и фильтр высокой частоты, 14 – эталонный воздушный разделятельный конденсатор, 15 – прецизионный генератор Г3-117, 16 – мостовая схема измерения емкости образца.

трех смещениях штока, в течение которых можно пренебречь медленным дрейфом частоты генератора, чувствительность прибора к изменению толщины пленки превышает 0.01 мкм.

Через упругую электромеханическую развязку, не влияющую на движение штока, верхний электрод подключен к комбинации приборов, позволяющих одновременно измерять как проводимость пленки по постоянному току, так и ее диэлектрическую проницаемость ϵ в диапазоне частот 10 Гц–100 кГц. Величина ϵ определяется по формуле плоского конденсатора из значений толщины пленки d и величины емкости C между электродами, причем, как видно из рис. 1, обе эти физические величины измеряются одновременно и независимо.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее уже сообщалось [14, 15], что непосредственно перед появлением аномально высокой

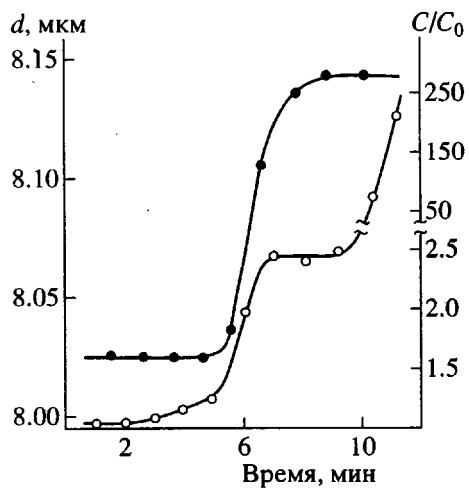


Рис. 2. Кинетика спонтанно возникающего процесса синхронного роста емкости образца ПДМС (светлые точки) и толщины пленки (темные точки). Заключительный участок роста емкости в диапазоне $C/C_0 > 50$ соответствует появлению проводимости пленки. Давление прижима электродов 71 кПа, емкость перед началом процесса $C_0 = 225$ пФ (измерение на частоте 10 кГц).

проводимости полимерных пленок заметно возрастает формальное значение их ϵ , свидетельствуя о приближении суперполяронов к поверхности электродов. Такое состояние, когда расстояние между суперполяроном и электродами еще слишком велико для начала появления проводимости (более 1–1.5 нм), но уже достаточно (менее 10 нм) для заметного вклада суперполярных структур в общую межэлектродную емкость C , фактически является предпроводящим состоянием, со временем переходящим в состояние истинной проводимости [15]. В этом предпроводящем состоянии измеряемая емкость C зависит не столько от ϵ полимерной матрицы, сколько от расстояния между проводящими суперполяронами и поверхностью электродов [9].

Если исходить из представлений [16] о том, что структура каждого из локализованных суперполяронов формируется в полимерной матрице независимо от остальных, то следовало бы ожидать весьма постепенного возрастания C во времени. Действительно, даже при максимальных линейных размерах суперполярона $L \approx 10$ мкм и расстоянии до электрода ~ 10 нм вклад его одного в общую емкость не может превышать 0.1 пФ, т.е. $\sim 0.1\%$ от типичной емкости образца в условиях нашего эксперимента. Поэтому большие изменения C (на десятки процентов и выше) должны были бы накапливаться постепенно как результат медленных некоррелированных перемещений суперполяронов.

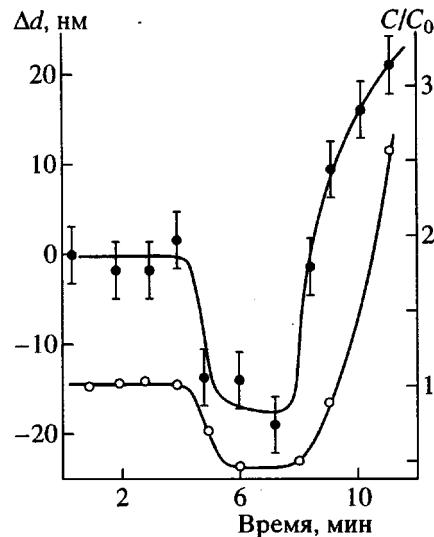


Рис. 3. Синхронная кинетика спонтанных изменений (сначала снижение, а затем рост) емкости образца ПДМС (светлые точки) и его толщины (темные точки). Давление прижима электродов 14 кПа, средняя толщина пленки 8.1 мкм, емкость перед началом процесса $C_0 = 112$ пФ (измерение на частоте 120 Гц).

Однако наши измерения показали, что в предпроводящем состоянии возможно и иное развитие событий, при котором первоначально медленное движение суперполярнов внезапно приобретает быстрый и заметно коррелированный характер. Рисунки 2–4 демонстрируют несколько примеров, полученных на различных образцах пленок ПДМС при одновременном измерении C и d . Давление прижима электродов к образцу оставалось постоянным в ходе каждого эксперимента и составляло соответственно 71 (рис. 2) и 14 кПа (рис. 3, 4). Установлено, что существует несколько характерных особенностей этого эффекта.

1. Измеряемая емкость сандвича электрод–пленка–электрод меняется очень сильно (на 50–150%) в течение короткого времени порядка нескольких минут. (За единицу на всех рисунках приняты значения емкости сандвича C_0 непосредственно перед моментом начала эффекта.)

2. Стого синхронно со скачком емкости изменяется и толщина пленки (на 0.12, 0.016 и 1.8 мкм соответственно) с различными вариантами этого изменения: необратимое возрастание d (рис. 2); первоначальное снижение и последующее возрастание d (рис. 3); необратимое снижение d (рис. 4).

3. Во всех случаях эффект возник на внезапно при неизменных внешних условиях – слабом давлении на пленку и низком (не более 0.2 В) измерительном напряжении, используемом для регистрации величины емкости C . Это позволяет считать данный эффект спонтанным и не зависящим от внешних условий.

Важно подчеркнуть, что полная синхронность изменений величин C и d , каждая из которых измеряется совершенно независимым комплексом аппаратуры, исключает возможность случайных приборных флюктуаций. Кроме того, рис. 2–4 дают строгое доказательство того, что скачки d не могут быть связаны со случайными смещениями штока прибора из-за внешних механических толчков, а вызываются именно спонтанным изменением внутреннего состояния пленок, которое можно характеризовать формальным коэффициентом емкости k_{int} .

Действительно, во-первых, механические толчки слишком кратковременны и не могут имитировать плавное изменение d в течение нескольких минут. Во-вторых, если при постоянном состоянии пленки (т.е. при $k_{int} = \text{const}$) произойдет (по любой внешней причине) смещение штока прибора вниз на величину Δ , то толщина эластичной пленки должна на столько же снизиться, и измеряемая емкость $C = k_{int}C_0/(d - \Delta)$ должна возрасти. Напротив, при случайном смещении штока вверх величина емкости должна упасть. Эксперименты же показывают прямо противоположную картину – емкость растет одновременно со сдвигом штока вверх либо падает одновременно с его сдвигом вниз. Это доказывает, что на самом деле первичным является изменение k_{int} , которое уже в свою очередь вызывает вторичный процесс изменения d .

Большие изменения d пленок на 15–16% от первоначальной толщины, связанные с тем или иным изменением внутреннего состояния суперполярной системы, обнаружены и для остальных исследованных полимеров. Так, например, для пленки ПГ, находившейся в предпроводящем состоянии (сопротивление $R > 12 \text{ М}\Omega$, давление прижима электродов 160 кПа), переход в проводящее состояние с $R = 5 \text{ Ом}$ вызвал синхронное снижение толщины с 11.5 до 9.6 мкм. Аналогичный обратимый эффект обнаружен и на высокопроводящем ПП толщиной 12 мкм, в котором мгновенное разрушение проводящих каналов сильным импульсом тока вызывало немедленное увеличение толщины пленки до 13.6–14 мкм. (Ниже мы рассмотрим эти эксперименты подробнее).

Таким образом, полученные факты позволяют поставить вопрос: действительно ли наблюдаемый эффект является кооперативным, или же его можно объяснить какими-либо трансформациями одного-единственного суперполярона?

Имеется несколько аргументов, свидетельствующих в пользу кооперативного эффекта. Во-первых, регистрируемые изменения емкости ($\sim 10^2$ – 10^3 пФ) на 3–4 порядка выше величины, которую, как показано выше, можно было бы приписать индивидуальному суперполярому. Во-вторых, обращает на себя внимание, что при увели-

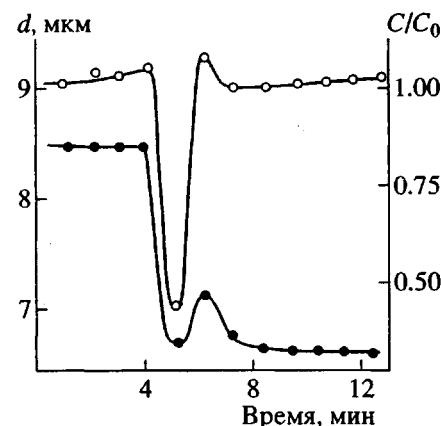


Рис. 4. Кинетика синхронных изменений емкости образца ПДМС (светлые точки) и его толщины (темные точки) типа затухающих колебаний. Процесс закончился почти точным восстановлением исходной величины C и необратимым снижением толщины пленки на 21%. Давление прижима электродов 14 кПа, емкость перед началом процесса $C_0 = 64$ пФ (измерение на частоте 1 кГц).

чении d образец полимера поднимает шток, совершая при этом работу против внешней силы. Для рис. 2 эта сила составляла 2 Н и совершаемая образцом работа равнялась 2.4×10^{-7} Дж. Чтобы такой эффект мог вызывать один суперполярон с характерными размерами $L \sim 10$ мкм, он должен обладать избыточной энергией с плотностью 240 Дж/см³ и развивать локальное давление на электроды порядка 2×10^4 МПа. Обе цифры чрезвычайно велики и заставляют сомневаться в гипотезе структурных изменений одного-единственного суперполярона.

Напротив, можно количественно объяснить величину регистрируемых изменений C , если предположить, что в этом процессе участвуют одновременно $\sim 10^4$ или более суперполяронов, распределенных по всему объему пленки. В таком случае требования к локальному давлению, создаваемому в эластомере каждым суперполяроном, снижается до разумной величины 2 МПа, сопоставимой с характерным модулем Юнга сшитых каучуков. Одновременно избыточная плотность энергии, приходящаяся на каждый суперполярон, снижается до 0.024 Дж/см³. Эта величина уже относительно мала по сравнению с плотностью энергии теплового движения сегментов эластомера (~ 40 Дж/см³), что позволяет считать изменения d результатом синхронной конформационной перестройки в матрице.

Способность суперполяронов к коллективной структурной трансформации демонстрируют также эксперименты, в которых с помощью техники микроэлектродного зондирования [2] сначала исследовалась концентрация проводящих каналов

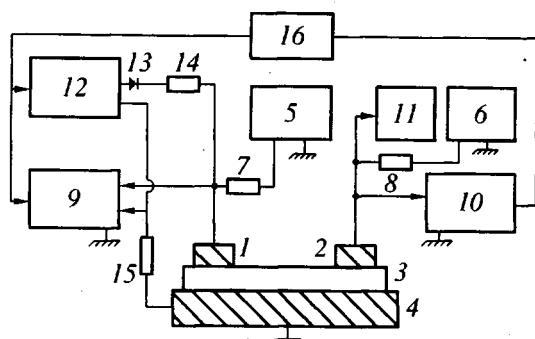


Рис. 5. Блок-схема эксперимента по измерению скорости передачи сигналов от одного проводящего канала к другому: 1, 2 – электроды с диаметром 4 мм и расстоянием 10 мм между ними, 3 – пленка ПДМС толщиной 10 мкм, 4 – общий электрод, 5, 6 – независимые источники постоянного тока, 7, 8 – балластные сопротивления 910 Ом и 13.7 кОм соответственно, 9, 10 – двухканальные цифровые запоминающие осциллографы, 11 – самопищущий потенциометр ЛКС4-003, 12 – генератор мощных коротких импульсов тока, 13 – разделительный диод, 14 – балластное сопротивление 1 Ом импульсного генератора, 15 – токосъемное сопротивление 0.016 Ом, 16 – блок синхронизации.

на поверхности пленок ПП, а затем один из этих каналов разрушался коротким (~ 2 мкс) одиночным импульсом критического тока (эта методика подробно описана в работе [6]). После такого разрушения затрагивающего лишь локальный участок диаметром ~ 100 – 200 мкм, вновь измерялась концентрация проводящих каналов на неповрежденных участках пленки. Было замечено, что в случае достаточно большой амплитуды критического тока (70–80 А) проводимость мгновенно исчезает не только в зоне разрушения, но и на всей площади пленки около 1 – 2 см 2 , а ее толщина возрастает, как уже отмечалось выше. Одновременно исчезают и магнитные особенности, характерные для высокопроводящего ПП [2, 17]. Это показывает, что сильный импульс тока, пропущенный через один проводящий канал, может резко менять структуру других каналов вплоть до их разрушения.

Для контроля производился обычный электрический пробой тех же образцов ПП в диэлектрических участках пленки (т.е. в промежутках между суперполяронами). Существенно, что такой диэлектрический пробой происходил при напряжении 240–260 В, т.е. на 2 порядка больше, чем на проводящем канале в момент критического тока. При этом в точке пробоя выделяется электрическая мощность никак не ниже, чем при разрушении проводящего канала критическим током. Тем не менее пробой диэлектрических участков

не приводил к каким-либо изменениям толщины пленки или ее проводимости на других участках.

Совокупность полученных результатов показывает, что при изменении состояния даже одного проводящего канала (спонтанном или вызванном внешним воздействием) он способен “подавать сигналы”, вызывающие ответную коллективную реакцию соседей. В принципе можно представить себе два возможных механизма взаимосвязи соседних суперполяронов.

1. Акустический механизм, при котором быстрая структурная трансформация проводящего канала вызывает “ударную” волну деформации эластомерной матрицы. Распространяясь по объему полимера, такая волна может индуцировать аналогичную трансформацию в тех участках пленки, которых достиг фронт волны.

2. Электромагнитный механизм, основанный на представлении о суперполароне как системе с пространственно разделенными ионным и движимым электронным зарядами [8, 18], причем локальная концентрация электронного заряда в суперполароне может достигать 10^{21} см $^{-3}$. При внезапных изменениях структуры такая система обязана испускать радиоволны, поскольку по законам электродинамики любое ускорение зарядов должно сопровождаться электромагнитным излучением.

С другой стороны, в силу обратимости квантовых переходов, связанных с взаимодействием заряда и излучения, каждый суперполарон можно рассматривать как приемную антенну, поглощающую радиоволны. В этом случае структурная трансформация в коллективе суперполяронов может индуцироваться поглощением радиоволн, испускаемых в результате первичной перестройки одного из них.

Безусловно, оба потенциально возможных механизма коллективной трансформации представлены здесь достаточно схематически. Однако еще до их детализации необходимо было выяснить, какой из них реализуется в действительности. Для этого можно использовать тот факт, что акустические сигналы распространяются со скоростью звука, а радиоволны – со скоростью света, в связи с чем в описываемых ниже экспериментах измерялась скорость передачи “сигналов” структурной перестройки от одного суперполярона к другому.

На рис. 5 представлена блок-схема эксперимента, являющаяся дальнейшим развитием техники воздействия короткими импульсами, описанной в работе [6]. В измерениях использовались два независимых полированных электрода 1 и 2 малого диаметра 4 мм, а также защищенные пленки ПДМС толщиной 12–4 мкм с такой концентрацией проводящих каналов, что в площади каждого

из электродов находится не более одного проводящего канала. Электроды устанавливались на поверхность пленки ПДМС так, чтобы кратчайшее расстояние между ними составляло 10 мм.

Электрод 1 подключен к источнику постоянного тока 10 мА и через разделительный диод 13 к генератору сильных импульсов тока 12. Регистрация кинетических кривых тока и напряжения на образце 1 в момент прохождения мощного импульса тока осуществляется двухлучевым запоминающим осциллографом 9 с разрешением во времени 0.1 мкс. Это позволяет проследить за поведением сопротивления R_1 , представляющего собой сумму сопротивлений первого канала и пары электродов 1 и 3.

Электрод 2 подключен к источнику постоянного тока 1 мА и запоминающему цифровому осциллографу 10. Последний с разрешением во времени 0.1 мкс регистрирует напряжение на втором канале, пропорциональное величине его сопротивления R_2 . Запуск генератора 12 и осциллографов 9, 10 синхронизирован блоком 16. Контрольные измерения показали, что импульсные радиопомехи от первого канала практически не влияют на канал регистрации R_2 (погрешность измерения в самых неблагоприятных условиях менее 0.2 кОм). Медленные изменения R_2 во времени регистрируются самопищущим потенциометром 11.

В начале эксперимента в обоих каналах устанавливается малый измерительный ток, а затем через электрод 1 первого канала начинали периодически пропускать одиночные импульсы тока, постепенно увеличивая их амплитуду. (Период 15–20 с, амплитуда первого импульса 0.1 А с последующим приростом каждого импульса на 0.1–0.15 А). До тех пор, пока амплитуда импульса не достигала критической величины, никакого влияния канала 1 на канал 2 не отмечено.

Однако картина резко изменяется в тот момент, когда амплитуда импульса достигает критической величины, способной резко изменить проводимость канала в ПДМС (см. осциллограммы на рис. 6). Качественно это явление аналогично сообщавшемуся для ПП [6], однако в случае ПДМС величина критического тока оказывается на 1–1.5 порядка ниже, в связи с чем критический ток не вызывает эффекта глобальной потери проводимости всего образца. Как видно из рис. 6, при достижении критического значения тока в первом канале его сопротивление R_1 скачком обращается в бесконечность, а ток падает до нуля. При этом в отличие от работы [6] газового разряда не возникает, так как в случае ПДМС импульсное напряжение первого канала не превышало 2–3 В. Тем не менее скачок R_1 обычно необратим, что указывает на очень существенные структурные изменения суперполярона, исследуемого в первом канале.

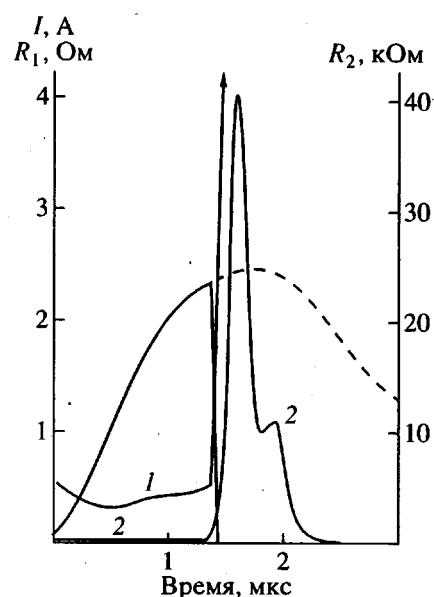


Рис. 6. Влияние мощных импульсов тока, пропускаемых через первый проводящий канал с сопротивлением R_1 , на сопротивление R_2 второго канала. Штриховая линия – форма импульса тока в отсутствие разрушения проводимости первого канала, сплошные кривые – при его разрушении критическим током. Пояснения в тексте.

Наиболее интересно то, что на образцах ПДМС удалось наблюдать явление “передачи сигнала” от одного канала к другому. Как видно из кривой 2 на рис. 6, вызванный критическим током скачок R_1 индуцирует резкое возрастание величины R_2 на десятки кОм. Как правило, такие изменения обратимы и сопротивление R_2 возвращается к своему начальному значению через 0.7–0.9 мкс. Это показывает, что полученный от первого канала “сигнал” в данных условиях сравнительно слаб и вызывает не разрушение, а лишь кратковременное изменение структуры второго канала.

Обращает на себя внимание, что с точностью до разрешающей способности аппаратуры (0.1 мкс) оба скачка R_1 и R_2 совпадают во времени. Из этого следует, что скорость распространения сигнала по образцу ПДМС составляет не менее 10^7 см/с, что по крайней мере на 2 порядка выше типичной скорости звука в полимерах. Тем самым мы приходим к выводу, что из двух возможных механизмов передачи информации, рассмотренных выше, реальным может являться только механизм радиообмена между проводящими каналами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все результаты, рассмотренные выше, на качественном уровне укладываются в теорию суперполярной модели [8], одним из следствий

которой является весьма сильное электростатическое притяжение между электронным шнуром суперполярона и окружающей его поляризованной матрицей. Это взаимодействие обязано вызывать значительную локальную деформацию эластомера в окрестности каждого суперполярона, приводя к изменению толщины пленок синхронно с коллективным изменением электронной структуры каналов. В то же время само явление коллективного поведения суперполяронов и их способность к обмену радиосигналами выходит за рамки простой модели [8] и требует своего дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григоров Л.Н., Смирнова С.Г. // М., 1988. – Деп. в ВИНТИ 23.03.88, № 3281.
2. Ениколопян Н.С., Григоров Л.Н., Смирнова С.Г. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. С. 326.
3. Архангородский В.М., Ионов А.Н., Тучкович В.М., Шлимак И.С. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. № 1. С. 56.
4. Скальдин О.А., Жеребов А.Ю., Лачинов А.Н., Чувыров А.Н., Делев В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. № 3. С. 141.
5. Лачинов А.Н., Жеребов А.Ю., Корнилов В.М. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52. № 2. С. 742.
6. Demicheva O.V., Rogachev D.N., Smirnova S.G., Schklyarova E.I., Yablokov M.Yu., Andreev V.M., Grigorov L.N. // JETP Lett. 1990. V. 51. № 4. P. 258.
7. Григоров Л.Н., Смирнова С.Г., Демичева О.В. // Сверхпроводимость: ФХТ. 1991. Т. 4. № 2. С. 399.
8. Григоров Л.Н. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 10. С. 45.
9. Шклярова Е.И., Смирнова С.Г., Григоров Л.Н. // Высокомолек. соед. Б. 1990. Т. 32. № 12. С. 885.
10. Смирнова С.Г., Шклярова Е.И., Григоров Л.Н. // Высокомолек. соед. Б. 1989. Т. 31. № 9. С. 667.
11. Краев А.В., Смирнова С.Г., Григоров Л.Н. // Высокомолек. соед. А. 1993. Т. 35. № 8. С. 1308.
12. Григоров Л.Н., Рогачев Д.Н., Краев А.В. // Высокомолек. соед. А. 1993. Т. 35. № 11. С. 1921.
13. Демичева О.В., Смирнова С.Г., Андреев В.М., Григоров Л.Н. // Высокомолек. соед. Б. 1990. Т. 32. № 1. С. 3.
14. Демичева О.В., Шклярова Е.И., Волкова А.В., Смирнова С.Г., Андреев В.М., Рогачев Д.Н., Григоров Л.Н. // Высокомолек. соед. Б. 1990. Т. 32. № 9. С. 659.
15. Шклярова Е.И., Смирнова С.Г., Галашина Н.М., Григоров Л.Н. // Высокомолек. соед. Б. 1991. Т. 33. № 4. С. 315.
16. Григоров Л.Н. // Высокомолек. соед. А. 1992. Т. 34. № 9. С. 74.
17. Смирнова С.Г., Демичева О.В., Григоров Л.Н. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. № 4. С. 212.
18. Grigorov L.N., Andreev V.M., Smirnova S.G. // Makromol. Chem., Macromol. Symp. 1990. V. 37. P. 177.

Effects and Mechanisms of the Collective Behavior of Highly-Conducting Structures in Films of Some Elastomers

E. I. Shklyarova, A. E. Borshchev, A. V. Kraev, T. V. Dorofeeva,
O. V. Demicheva, and L. N. Grigorov,

*Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Sciences,
Profsoyuznaya ul. 70, Moscow, 117393 Russia*

Abstract—Simultaneous dielectric and high-precision mechano-dilatometric measurements revealed a spontaneous effect of collective structural rearrangement in a system of conducting channels in the films of polydimethylsiloxane, oxidized polyhexene, and oxidized atactic polypropylene. Experiments with strong current pulses showed that synchronism in the collective behavior of the conducting channels is caused by their ability to effectively interact by mechanism of a microwave exchange.