

АНОМАЛЬНО НИЗКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИЭЛЕКТРИКОВ

Н.С.Ениколопян, Ю.А.Берлин, С.И.Бешенко,
В.А.Жорин

Обнаружено, что при одноосном сжатии тонких пленок полимерных диэлектриков происходит резкое уменьшение их электрического сопротивления на несколько порядков. Обнаруженный эффект не связан с переходом "металл – диэлектрик" в условиях высокого давления.

Исследование электрических явлений в диэлектрических пленках, толщина которых не превышает несколько десятков микрон, представляют значительный интерес как для выяснения механизма их электропроводности, так и для решения ряда прикладных задач. Механизм переноса зарядов в таких системах может существенно отличаться от установившегося для массивных материалов [1]. Поэтому в тонких пленках возможны эффекты вовсе отсутствующие в толстых образцах.

В настоящей работе сообщается об обнаружении скачкообразного уменьшения электрического сопротивления R тонких пленок полимерных диэлектриков, а также композиций "полимерный изолятор – металл" в ходе их одноосного сжатия. При давлении $P = 10$ кбар и комнатной температуре наименьшие значения R некоторых исследованных систем не превышали сопротивления, которым должен был бы обладать при обычных условиях идентичный по геометрическим размерам образец металла, например Ti , с удельной электропроводностью $10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

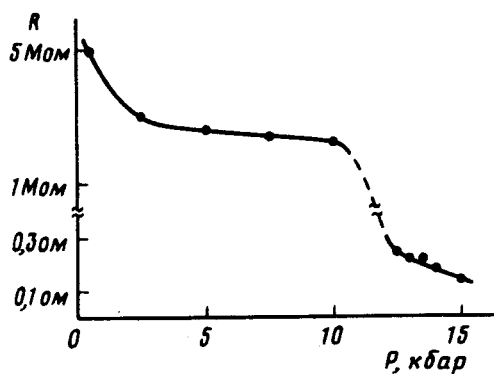
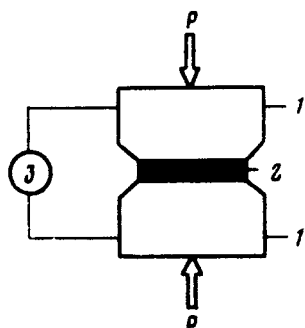


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения сопротивления образцов диэлектрических пленок в ходе их одноосного сжатия: 1 – наковальни Бриджмена; 2 – образец; 3 – измерительный прибор. Стрелкой указано направление сжатия

Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления R пленки полипропилена толщиной 12 мкм от давления P

Однако, зависимость R от толщины пленки l и температуры T указывают на то, что обнаруженный эффект, по-видимому, нельзя интерпретировать как хорошо известный фазовый переход типа "изолятор — металл" (см., например [2]).

Увеличение проводимости тонких слоев диэлектриков наблюдали при воздействии одноосного давления на пленки лавсана, полиимида, полипропилена и тефлона ($l = 2 - 30$ мкм). Аналогичное явление обнаружено при сжатии систем полипропилен — медь, тефлон — медь и ряда других полимерных композиций ($l = 70 - 200$ мкм). Для одноосного сжатия образцов применяли аппаратуру высокого давления типа наковален Бриджмена, позволяющую изменять величину P в наших опытах от нескольких сотен бар до 30 кбар. После шлифовки и обработки наковален алмазной пастой высота микронеровностей на их плоских поверхностях, соприкасающихся с исследуемыми образцами, не превышала 1 мкм. Схема, иллюстрирующая методику измерения электрического сопротивления в условиях одноосного сжатия, изображена на рис. 1. Величину R определяли тремя независимыми методами — по показаниям автоматического Омметра Ш-34 с мостовой схемой на постоянном токе, мостом переменного тока, работающим на частоте 1547 Гц, и по тангенсу угла наклона линейных вольт-амперных характеристик, снятых в интервале напряжений 0 — 10 мВ, к оси абсцисс. Результаты измерений перечисленными методами совпадали с точностью 5 — 12%.

На рис. 2 приведена зависимость электрического сопротивления пленки полипропилена толщиной $l = 12$ мкм от давления. Как следует из полученных данных, при увеличении P от 500 бар до определенного критического значения $P_{кр}$, равного для указанной пленки 13 кбар, величина R уменьшается незначительно. При $P = P_{кр}$ происходит резкое падение сопротивления на семь порядков. В области $P > P_{кр}$ вновь наблюдалось слабое уменьшение R по мере сжатия образцов. Описанные изменения обратимы — после сброса давления сопротивление возвратилось до исходного, найденного при 500 бар.

Минимальное сопротивление R_{min} , достигаемое при одноосном сжатии диэлектриков, определить не удалось, поскольку оно оказалось меньше сопротивления подводющих проводов. Однако можно утверждать, что $R_{min} < 10^{-3}$ Ом даже для таких полимерных систем, которые позволяли проводить надежные измерения в условиях, когда отношение l к площади образца S составляло 10 см^{-1} .

Величина $P_{кр}$ при прочих равных условиях зависит от материала пленки. Так при комнатной температуре и $l = 20$ мкм переход полиимида в состояние с малым R происходит при $P_{кр} = 10$ кбар, тогда как пленка полипропилена указанной толщины во всем исследованном интервале давлений обладает высоким сопротивлением ($\sim 10^8$ Ом). Кроме того $P_{кр}$ падает с ростом T и возрастает с увеличением l . Интересно, что для слоистого образца, состоящего из семи одинаковых полиимидных пленок ($l = 20$ мкм), разделенных алюминиевой или медной фольгой, $P_{кр}$ с точностью 15% совпадает с найденным для однослойного образца полиимида толщиной 20 мкм. С другой стороны, скачок сопротивления пленки полиимида с $l = 140$ мкм в исследованном интер-

вале давлений вообще не обнаружен. Аналогичный результат получен для других диэлектриков¹⁾.

Пленки исследованных полимеров, подвергнутые одноосному сжатию, обладают при $P > P_{кр}$ не только аномально малым сопротивлением, но и рядом других особенностей. В частности, величина R , измеренная при постоянном давлении выше критического, слабо зависит от температуры в интервале от 77 до 330 – 340 К, а затем падает по обычному для диэлектриков и полупроводников экспоненциальному закону (см. рис. 3), причем энергия активации уменьшается с ростом P .

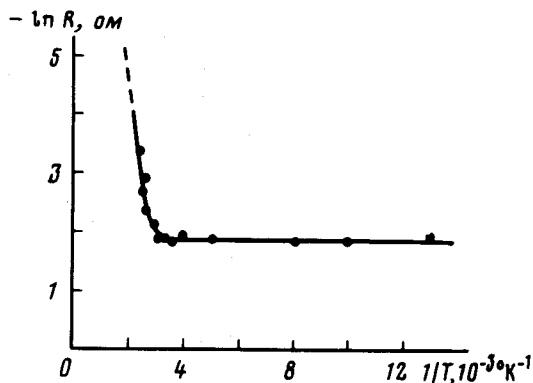


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления полиимидной пленки толщиной 8 мкм, измеренная при постоянном давлении $P = 1$ кбар

Отметим также, что при постоянном давлении и комнатной температуре сопротивление пленки нелинейно зависит от ее толщины. Экспериментально найдено, что

$$R = \frac{A}{S} \exp(l^2/l_0^2),$$

где l_0 и A – эмпирические параметры. Для пленок лавсана толщиной 2 – 10 мкм значения l_0 и A при $P = 5$ кбар равны $2,1 \cdot 10^{-4}$ см и $0,15 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, соответственно.

Резкое уменьшение сопротивления тонких пленок полимерных диэлектриков под давлением не связано с изменением толщины образцов при сжатии, поскольку относительное изменение объема исследованных систем $P \leq 40$ кбар не превышает 15 – 20% [3]. В образцах не было найдено макроскопических дефектов, ответственных за наблюдавшийся эффект.

Можно было бы предположить, что скачок сопротивления при сжатии диэлектриков вызван другой тривиальной причиной – касанием наковален при $P = P_{кр}$. Для проверки этого предположения были проведены опыты с ограничительными шайбами. Нами установлено, что сопротивление самой ограничительной шайбы не меняется под давлением. Такой же результат получен и в том случае, когда вместо ограничительной шайбы в центр наковален помещали ограничительный диск. Это оз-

¹⁾ В том случае, когда измерительные электроды из металлической фольги, изолированные от наковален, в плане не перекрывались, переход диэлектрической пленки в проводящее состояние не наблюдали.

начает, что микронеровности поверхности наковален не образуют проводящих перемычек ни в центральной, ни в краевой части межэлектродного зазора. Тем не менее, если в отверстии ограничительной шайбы находится пленка исследуемого вещества, переход в состояние с малым сопротивлением полностью воспроизводится. Скачок сопротивления наблюдался также и для образца, который состоял из ограничительного диска и окружавшего его кольца изучаемой диэлектрической пленки. Таким образом, изложенные факты позволяют исключить прямое касание наковален как одно из возможных объяснений эффекта.

В заключение следует подчеркнуть, что обнаруженное нами резкое уменьшение сопротивления тонких диэлектрических пленок и полимерных композиций нельзя рассматривать как переход "изолятор – металл", поскольку вид зависимости R от T отличается при $P > P_{кр}$ от известного для веществ с металлическим характером проводимости. По-видимому, аномально низкие значения сопротивления изученных систем обусловлены принципиально иным чем в обычных условиях механизмом электропроводности полимерных диэлектриков при их одноосном сжатии.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
31 марта 1981 г.

Литература

- [1] К.Л.Чопра. Электрические явления в тонких пленках. М., изд. Мир, 1972 г.
 - [2] Н.Мотт, Э.Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах. М., изд. Мир, 1974 г.
 - [3] Т.С.Бhadra. Indian J. Phys. 49. 746, 1975.
-