

06

Особенности наносекундных вольт-амперных характеристик массива углеродных нанотрубок

© А.В. Приходько, О.И. Коньков

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: aleks@tuexph.stu.neva.ru

Поступило в Редакцию 19 октября 2012 г.

Представлены результаты исследования наносекундных ВАХ массива углеродных многослойных и однослойных нанотрубок в условиях электрических полей, когда проявляются неустойчивости с отрицательной дифференциальной проводимостью. Установлено, что развитие электрической неустойчивости в таких структурах подчиняется классическому механизму протекания. Выявлены процессы в слабых электрических полях, аналогичные процессам в базовой сетке со встроенными неоднородностями.

Отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) одиночных квазиодномерных контактов в статическом электрическом поле ранее привлекла внимание в связи с возможностями применения нанодиодов в микроволновой технике [1]. Впервые исследования наносекундных ВАХ в режиме электрических неустойчивостей для массива квазиодномерных контактов были нами проведены на полимерной матрице с углеродными нанотрубкам [2], а также на образцах из массива углеродных многослойных (УМН) и однослойных нанотрубок (УОН) [3,4]. Предполагается, что под действием электрического поля реализуется ОДП в неоднородной трехмерной среде, состоящей из спутанных клубков нанотрубок. Возможно, что при электрических полях, близких к полю пробоя, в таких структурах происходит процесс перераспределения тока, аналогичный механизму, перколяции или самоорганизованной критичности [4]. О том, что в послепробойных полях, когда реализуется низкоомное состояние наносекундного переключения, существует объемная мозаика с путями протекания в виде разветвленной сети каналов/шнуров, хорошо известно для неупорядоченных макроструктур [5].

Цель данной работы заключается в экспериментальной проверке перколяционного механизма проводимости для массива углеродных нанотрубок, ответственного за возникновение электрической неустойчивости.

Исследовались образцы, состоящие из массива УОН диаметром 0.7–3 нм и длиной более 100 нм и УМН „Таунит“ диаметром 20–70 нм и длиной более 150 нм [4]. Гранулы образцов представляют наноклубки — одномерные нитевидные образования со структурой спутанных пучков однослойных и многослойных трубок.

Для исследований ВАХ использовалась наносекундная техника, описанная в [4]. Генератор на основе ртутного реле обеспечивал длительность импульса напряжения в интервале 1–100 нс, частотой следования 100 Гц. Порошкообразный образец, состоящий из гранул нанотрубок, помещался между двумя цилиндрическими электродами из стеклоуглерода, замыкая коаксиальную линию. Для регистрации падающего на образец и отраженного от него наносекундного импульса напряжения использовался стробоскопический осциллограф.

Для оценки критического индекса электропроводности t в перколяционной модели [6] нами ранее был проведен классический эксперимент для двумерной графитовой сетки, состоящей из симметричных 10×10 узлов [4]. Установлено, что зависимость нормированной проводимости R_0/R (сопротивление R_0 соответствует сетке со всеми узлами) от числа случайно убранных узлов n_i с показателем наклона кривой $B_1 = -1$ неплохо согласуется при $n_i > 10$ с критическим индексом $t = -(1.15 \pm 0.15)$. При меньших значениях n_i показатель наклона кривой уменьшается до величины $B_1 = -0.5$, что соответствует влиянию так называемых „мертвых концов“ [6]. Можно предположить, что при небольшом количестве убранных узлов влияние „мертвых концов“ на проводимость является определяющим.

В данной работе проводилось исследование ВАХ образцов УМН (рис. 1) при достаточно длинных наносекундных импульсах (20 нс). Установлено, что поведение проводимости (R_0/R) от величины электрического поля E (R_0 — соответствует сопротивлению образца в нулевом электрическом поле) при формировании электрической неустойчивости при электрических полях $E > E_c$, где E_c — поле пробоя, соответствует поведению для двумерной графитовой сетки при случайном изменении числа убранных узлов. Показатель наклона кривой после пробоя имеет значение $B = -1$, при дальнейшем увеличении поля составляет

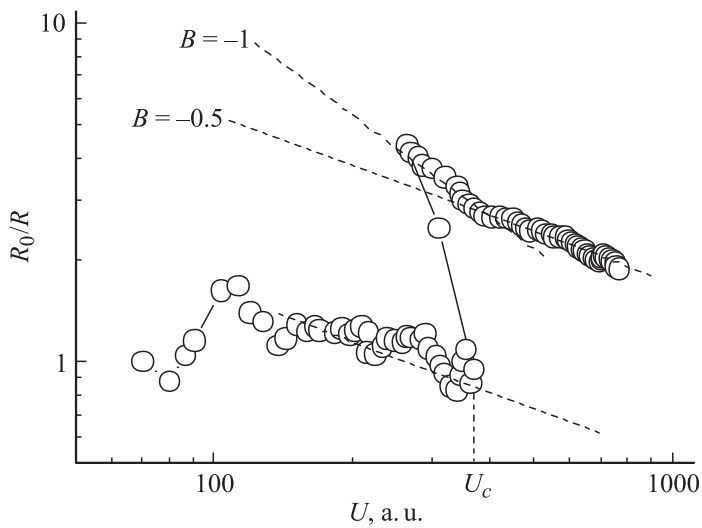


Рис. 1. Зависимость $R_0/R(U)$ для образцов УМН. Длительность импульса 20 ns.

величину $B = -0.5$, что соответствует величинам B_1 в эксперименте по протеканию [4].

Результат эксперимента свидетельствует, что критический индекс электропроводности, с одной стороны, отражает определенное изменение состояния проводимости при увеличении числа случайно убранных узлов в базисной сетке, что представлено в классическом эксперименте [6]. С другой стороны, данный индекс может отражать аналогичное изменение проводимости исследуемых образцов при развитии процесса протекания, соответственно при увеличении числа убранных токовых каналов. В этом случае поле пробоя имеет смысл порога протекания для базисной сетки.

Особенность наносекундного эксперимента состоит в управляемом контроле термического перегрева токовых каналов. Можно ожидать, что уменьшение длительности наносекундного импульса даст возможность проследить проявление деталей механизма проводимости в полях меньше порога протекания базисной сетки. Это может представлять интерес в том случае, если существуют встроенные сетки/неоднородности с меньшими, чем базисная сетка, размерами ячеек. Результат ком-

пьютерного эксперимента, проведенного в работе [7], свидетельствует, что критические индексы теории протекания прослеживают изменение линейного размера неоднородности. При уменьшении размера ячейки сетки (неоднородности), встроенной в базисную сетку, показатель наклона кривых B , эквивалентный критическому индексу электропроводности, должен уменьшаться. Не исключено, что при уменьшении длительности импульса будут регистрироваться только пороги протекания встроенных сеток, связанных с меньшими размерами ячеек.

Исследуемая структура представляет собой наноклубки с разными размерами длины контура самопересечений, следовательно, с разными размерами неоднородностей. Таким образом, при изменении электрического поля возможно выявление порогов протекания не только основной сетки, но и сеток, соответствующих таким неоднородностям. Можно предположить, что более „запутанный“ массив (УОН) из тонких нанотрубок [4] представляет более однородную протекательную сетку. Менее „запутанный“ массив из толстых нанотрубок (УМГ) менее однороден. Значит, он включает несколько неоднородностей в виде встроенных сеток с различными размерами ячеек. Действительно, представленная на рис. 2 зависимость $R_0/R(U)$ для длительностей импульса 5 ps иллюстрирует появление одного (для УОН) или нескольких пороговых напряжений (для УМН) со степенным характером поведения в допороговой области напряжений и соответственно с меньшим показателем наклона B . При увеличении длительности импульса возрастающий перегрев токовых каналов приводит к выделению базисной сетки с большим размером ячеек. Таким образом, возрастание критических порогов протекания, регистрируемое для образцов УМН и УОН, не противоречит выводам об увеличении порога протекания при введении в решетку неоднородности [7].

Таким образом, проведенные эксперименты для исследованных образцов отражают динамику возникновения неустойчивости в рамках формирования механизма протекания при различных длительностях наносекундного импульса напряжений. Для базисной сетки (в полях больше порогового) протекание осуществляется с использованием механизма, основанного как на самопересечении длинных цепочек, так и на влиянии „мертвых концов“. В полях меньше порогового протекание развивается в базисной сетке со встроенными сетками, играющими роль линейных неоднородностей с различными размерами. Представленные результаты свидетельствуют об универсальном характере протекания

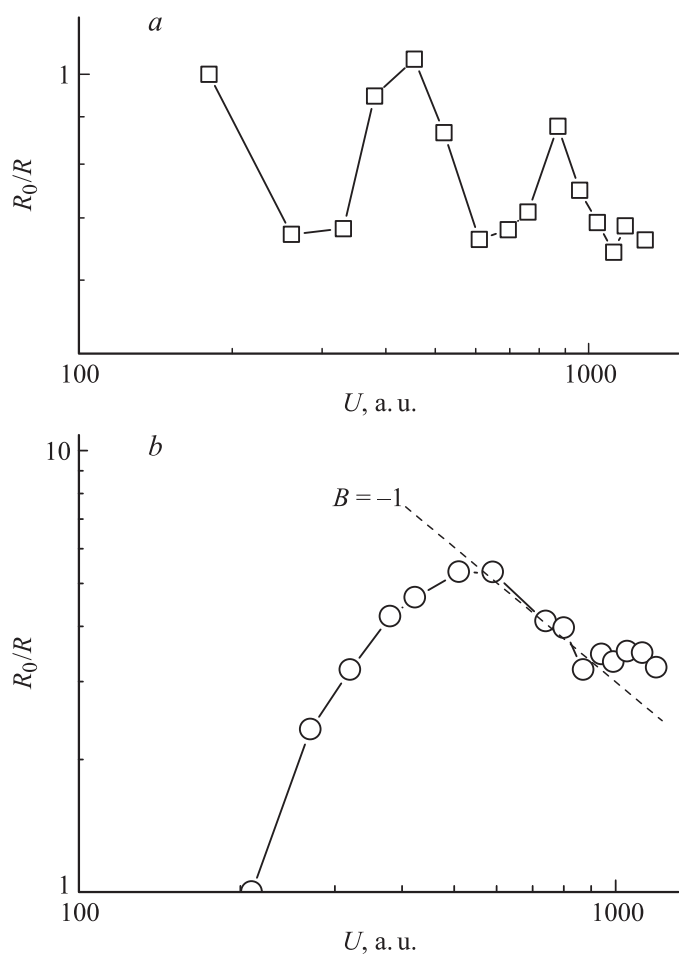


Рис. 2. Зависимость $R_0/R(U)$ для образцов УМН (а) и УОН (b). Длительность импульса 5 пс.

тока в наноструктурах со свойствами наноклубков. При этом развитие электрической неустойчивости в таких структурах подчиняется механизму протекания. Под действием электрического поля достигается порог протекания, аналогичный электрическому полю пробоя, и развива-

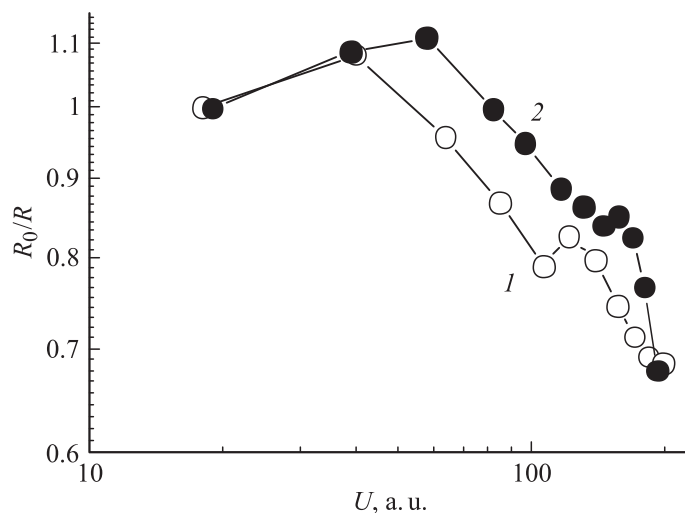


Рис. 3. Зависимость $R_0/R(U)$ для образцов УМН. Кривые 1, 2 соответствуют длительности импульса 5, 10 ns.

ется электрическая неустойчивость в сильно неоднородной трехмерной среде, состоящей из „запутанных“ клубков нанотрубок, по механизму протекания. О том, что сильные электрические поля могут трансформировать отдельные УМН, сообщалось ранее [8]. Не исключено, что наблюдаемые особенности ВАХ при малых длительностях импульса могут быть связаны с такой трансформацией многослойных нанотрубок, следовательно, и с появлением дополнительных сеток в массиве. Отметим, что возникновение электрических неустойчивостей в сильно неоднородных статистических структурах, например в аморфных полупроводниках [9], может быть также следствием образования порогов протекания. Данный механизм критичен к интервалу наносекундного воздействия. При достаточно больших длительностях импульсов напряжения неоднородная статистическая структура начинает переходить в практически однородную. Увеличивающийся с током сильный разогрев приводит к возникновению одиночного шнура, заполняющего весь образец. В предпробойном состоянии происходит сглаживание сеток. Это наблюдается и в нашем наносекундном эксперименте, когда при

увеличении длительности импульса наблюдаемые особенности ВАХ становятся практически неразличимы (рис. 3). Можно утверждать, что в идеальном массиве при отсутствии наноклубков, и для однослойных нанотрубок, эффекты, связанные с механизмом протекания, отсутствуют. Следовательно, предлагаемая методика исследований на основе формирования электрических неустойчивостей за наносекундные длительности импульсов напряжения и последующий анализ поведения в рамках модели протекания могут диагностировать состояние таких массивов.

Список литературы

- [1] *Неволин В.К.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 11. С. 40–44.
- [2] *Prikhodko A., Konkov O., Terukov E., Filippov A.* // Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. 2010. V. 19. N 1–2. P. 105–108.
- [3] *Коньков О.И., Приходько А.В.* // Сб. докладов VII Международной конференции „Аморфные и микрокристаллические полупроводники“. СПб., 28 июня–1 июля 2010. С. 161.
- [4] *Приходько А.В., Коньков О.И.* // ФТТ. 2012. Т. 54. В. 11. С. 170–173.
- [5] *Балявичюс С., Грузинскис В., Пошкус А.* // ФТП. 1982. Т. 16. В. 11. С. 1934–1937.
- [6] *Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.* // Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. 416 с.
- [7] *Багнич С.А., Конаш F.D.* // ФТТ. 2001. Т. 43. В. 12. С. 2215–2222.
- [8] *Huang J.Y., Chen S., Jo S.H., Wang Z., Han D.X., Chen G., Dresselhaus M.S., Ren Z.F.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 236 802.
- [9] *Приходько А.В., Чеснис А.А., Барейкис В.А.* // ФТП. 1981. Т. 15. В. 3. С. 536–541.