

О транзисторном эффекте в вертикальной структуре с несопряженным полимером в качестве транспортного слоя

© А.Р. Юсупов, А.Н. Лачинов*, Р.Б. Салихов, Р.Г. Рахмеев*, Р.М. Гадиев*

Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы,
Уфа, Россия

* Институт физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук,
Уфа, Россия

E-mail: Azat.yusupov@bk.ru

(Поступила в Редакцию 18 февраля 2009 г.)

Исследован транспорт носителей заряда в многослойной пленочной структуре на основе несопряженного полимера. Установлены условия, при которых возможно управление транспортом зарядов электрическим полем за счет изменения потенциала на управляющем электроде. Полученные результаты обсуждаются в рамках модели прохождения заряженных частиц через многобарьерную систему.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 08-02-12042, 08-03-99008.

PACS: 73.21.Ac, 73.40.Qv, 73.61.Ph

Тонкопленочные транзисторы, в которых в качестве проводящих слоев используются органические материалы, открывают большие возможности для создания гибких OLED-дисплеев и электронных устройств малого размера с использованием простой и недорогой технологии производства. В полевых транзисторах, имеющих плоскостную структуру, важной характеристикой является подвижность заряда вдоль органической пленки. Существенный вклад в характеристики полевого транзистора вносят структура и конфигурация электродов. До сих пор остается нерешенным вопрос о минимизации длины канала проводимости, соответствующей расстоянию между электродами стока и истока. Развитие технологии молекулярной электроники с повышенным быстродействием требует уменьшения всех основных размеров транзистора по меньшей мере на порядок. Выходом из этой ситуации может служить вертикальная структура, в которой перенос заряда осуществляется поперек пленки. Это позволяет свести длину канала проводимости до толщины органической пленки.

Вертикальный тонкопленочный транзистор представляет собой трехэлектродную структуру металл/полимер/металл/полимер/металл (рис. 1), в которой управление переносом заряда поперек полимерной пленки осуществляется средним электродом. В настоящее время идет поиск различных полимерных материалов для улучшения таких параметров транзисторных структур, как рабочее напряжение, отношение токов во включенном и выключенном состоянии и т. п.

Особое внимание уделяется конфигурации среднего (управляющего) электрода. Это может быть сетчатый электрод [1,2] или сплошной [3]. В зависимости от свойств материала, используемого в вертикальной структуре в качестве транспортного слоя, средний электрод может управлять туннельной инжекцией, как в работе [2], либо подвижностью носителей заряда, как в работах [1,3,4]. Для изготовления среднего электрода

могут использоваться металлы или самоорганизующиеся полупроводниковые материалы [4].

При выборе органического материала определяющими являются его электрофизические свойства (концентрация, подвижность носителей заряда), а также технологические характеристики. Как правило, в качестве транспортного слоя используют π -сопряженные соединения [5]. Однако в последнее время появились сообщения о возможности достижения хороших транспортных свойств в несопряженных полимерах, например, класса полиарилефталидов [6]. В частности, в тонких пленках полидифенилефталид (PDP) обнаружена возможность достижения высоких значений проводимости в широком интервале значений вплоть до металлической [7].

Ранее в работе [8] была показана возможность плавного управления величиной выходного тока в вертикальной структуре на основе полидифенилефталид со встроенным управляющим электродом. В качестве нижнего (инжектирующего) электрода, использовался кремний p -типа с естественно образованным слоем SiO_2 . Однако использование в одной и той же экспериментальной структуре органического и неорганического полупроводников, металлических электродов сильно усложняет понимание физических механизмов, протекающих в многослойной системе. Кроме того, наличие высокоомного полупроводника [8] приводило к сильному ограничению рабочих токов.

Целью настоящей работы явилось исследование особенностей транспорта носителей заряда в многослойной трехэлектродной вертикальной структуре, содержащей транспортные слои из несопряженного (диэлектрического) полимера и металлические электроды.

В качестве несопряженного полимера использовался полимер из класса полиарилефталидов — полидифенилефталид. Полиарилефталиды обладают высокой тепло- и термостойкостью, что делает их особенно привлекательными для различных электронных устройств.

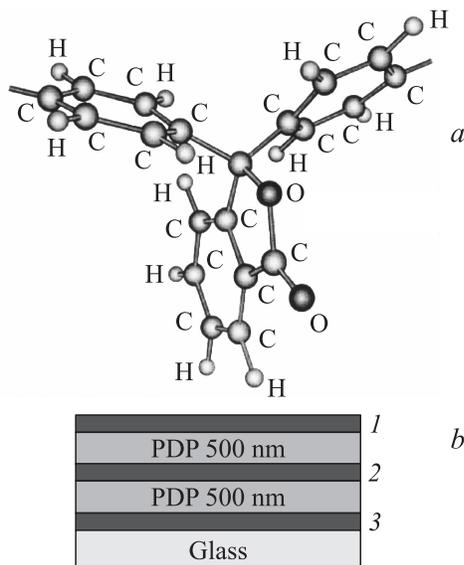


Рис. 1. Модельное трехмерное изображение полидифениленфталата (PDP) (a) и структура исследуемого образца (b). 1 — верхний электрод, 2 — средний электрод, 3 — нижний электрод.

Так, температура деструкции (T_g — температура потери 1% веса) в аргоне и в воздухе равна 440°C . PDP не имеет никаких температурных особенностей в поведении удельной проводимости вплоть до температуры размягчения (360° на воздухе). Кроме того, это хорошо растворимый в органических растворителях полимер с хорошими пленкообразующими свойствами. Было показано [9], что при определенных технологических условиях можно формировать непрерывные и однородные пленки толщиной $0.03\text{--}10\ \mu\text{m}$ методом центрифугирования из раствора полимера.

Структура экспериментального образца схематично представлена на рис. 1. Образцы изготавливались в следующей последовательности. На стеклянную подложку методом вакуумного термодиффузионного напыления через теньевую маску наносился нижний медный электрод в виде полоски шириной $\sim 1\ \text{mm}$ и длиной $\sim 10\ \text{mm}$. Полимерная пленка отливалась методом центрифугирования из 5% раствора в циклогексане. Скорость вращения центрифуги составляла $1000\ \text{rpm}$. Далее структура выдерживалась на воздухе (30 min) и отжигалась в печи при температуре 150°C (45 min) для полного удаления растворителя. Средний и верхний медные электроды наносились под углом друг к другу и формировали область пересечения с первым электродом, площадь проекции которой составляла $\sim 1\ \text{mm}^2$. Второй полимерный слой, расположенный между вторым и третьим электродом, изготавливался по технологии, аналогичной первому органическому слою. Толщины полимерных слоев составляли — $500\ \text{nm}$, толщина металлических электродов не превышала $100\ \text{nm}$.

Контроль толщины полимерных пленок производился при помощи микроинтерферометра МИИ-4М, а толщины металлических слоев — атомно-силовым микроскопом.

Серьезной проблемой органических транзисторов вертикальной структуры является минимизация токов утечек через средний электрод. Предлагаются различные варианты ее решения, в частности путем изоляции среднего электрода тонким слоем изолятора (к примеру, может использоваться нанесенный или естественно образованный слой окисла) [1–3]. В настоящей работе для минимизации токов утечек на постоянном токе средний электрод был гальванически развязан с остальной электрической схемой через конденсатор.

На рис. 2 представлены зависимости выходного тока I от напряжения между верхним и нижним электродом U при различных значениях потенциала на среднем элек-

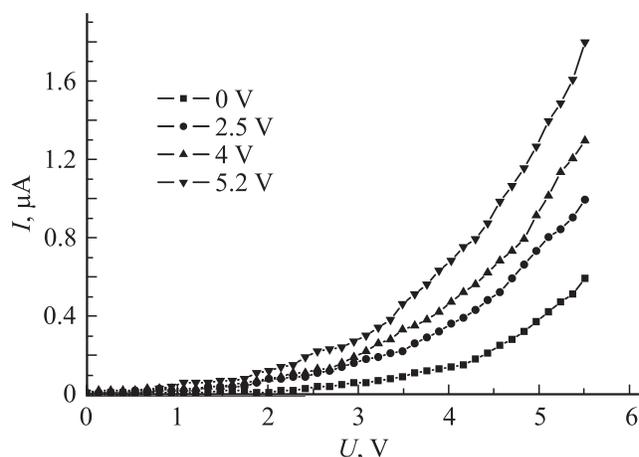


Рис. 2. Зависимость выходного тока от напряжения между верхним и нижним электродами в структуре металл–полимер–металл–полимер–металл при различных напряжениях на среднем электроде.

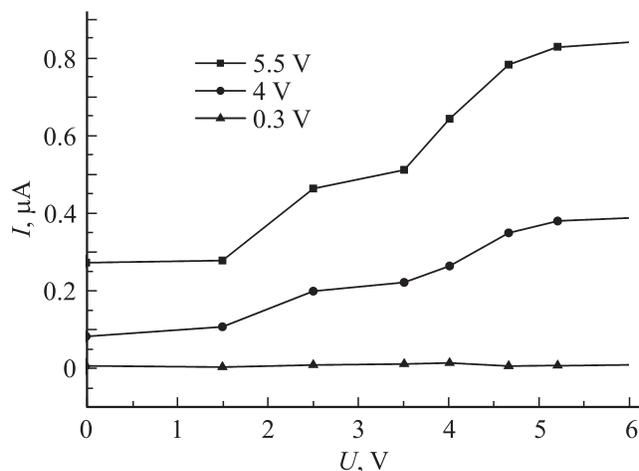


Рис. 3. Зависимость выходного тока от потенциала на среднем электроде при различном напряжении, приложенном между верхним и нижним электродами.

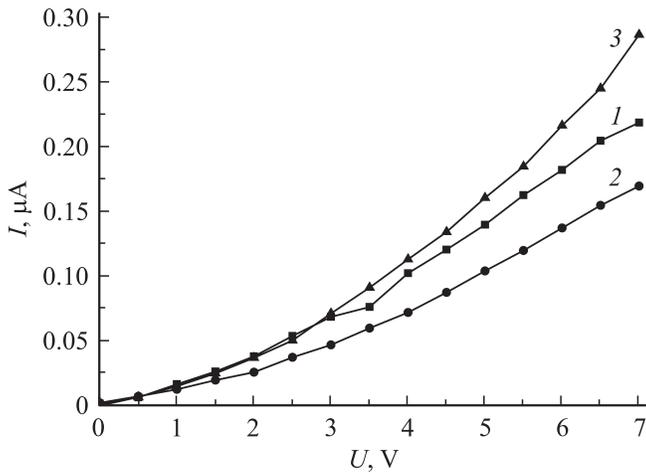


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика многослойной структуры (рис. 4) и элементов ее составляющих. 1 — ВАХ всей структуры, 2 — ВАХ полимерного слоя, заключенного между верхним и средним электродами, 3 — ВАХ полимерного слоя, заключенного между средним и нижним электродами.

троде. Как видно, кривые имеют ярко выраженную нелинейную зависимость. Токи сильно зависят от потенциала на среднем электроде. Так, при нулевом напряжении на среднем электроде выходной ток в 3 раза меньше, чем при 5 V.

На рис. 3 представлены зависимости выходного тока I от потенциала на среднем электроде U при фиксированном значении напряжения между верхним и нижним электродами. Зависимости $I(U)$ показывают, как напряжение на среднем электроде управляет выходным током I . По этим кривым можно определить, с каких значений напряжений между верхним и нижним электродами начинается изменение проводимости системы. Необходимо отметить, что в данной конфигурации при малых напряжениях вплоть до 0.3 V управление выходным током отсутствует.

Механизм управления транспортом носителей заряда через исследованную структуру не совсем ясен, так как средний электрод является барьером для носителей заряда. В настоящее время существует несколько гипотез, предложенных для объяснения данного противоречия.

Например, согласно работе [3], тонкий средний металлический электрод содержит микротрещины или микродиафрагмы, через которые возможно образование непрерывных линий тока. Поэтому средний электрод в этом случае должен исполнять роль управляющей сетки.

Для оценки применимости данной гипотезы была исследована поверхность среднего медного электрода методом атомно-силовой микроскопии. Согласно данным исследования, металлическая пленка толщиной ~ 100 nm не содержала дефектов и микротрещин. Были изготовлены также образцы со средним электродом в виде металлической сетки. Но существенного влияния на протекающий через экспериментальную

структуру ток при изменении потенциала на среднем электроде замечено не было.

Однако было установлено, что возможность управления током появляется при существенной разнице в проводимости полимерных слоев. По аналогии с вакуумным триодом проводящий слой с повышенной концентрацией носителей заряда может соответствовать электронному облаку между сеткой и катодом, инжекция электронов из которого управляется потенциалом на среднем электроде — сетке. Подтверждением этого предположения могут служить зависимости, представленные на рис. 3. Видно, что с повышением напряжения на среднем электроде ток I выходит на насыщение. Причем величины тока насыщения для разных напряжений между верхним и нижним электродами неодинаковы. Большему напряжению соответствует больший ток насыщения.

Кроме того, установлен факт нарушения аддитивности общего сопротивления исследуемой многослойной структуры; в частности, сумма сопротивлений каждого из полимерных слоев не равна общему сопротивлению экспериментальной структуры.

На рис. 4 показаны три последовательно измеренные вольт-амперные характеристики (ВАХ) для разных комбинаций слоев исследуемого образца. Были измерены ВАХ между верхним—нижним, верхним—средним и нижним—средним электродами. Из данных, представленных на рис. 4, следует, что сумма сопротивлений каждого слоя ($R_2 + R_3$) больше сопротивления всей структуры R_1 . Ранее аналогичный эффект отмечался в работе [10] на многослойной структуре с окислами кремния. Однако объяснения этому факту дано не было.

В настоящей работе, также как и в [10], исследовалась структура, содержащая тонкие диэлектрические слои, разделенные металлическими электродами. Очевидно, что на границах раздела металл—полимер должны возникать потенциальные барьеры, высота которых, согласно [11], равна разнице работ выхода электрона из металла и из полимера. Можно предположить, что от параметров этих барьеров будет зависеть транспорт заряда через многослойную структуру. Тем более что известны случаи, когда коэффициент прохождения заряженных частиц через многобарьерную систему может стать больше коэффициента прохождения через любой барьер этой системы [12]. Увеличение коэффициента прохождения заряженных частиц приводит к увеличению проводимости структуры. Данный эффект связан с интерференцией волн де Бройля и может служить примером появления размерных эффектов. Возможно, что этим и объясняются результаты, представленные на рис. 4. Влиянием „барьерного эффекта“ можно, по-видимому, объяснить упомянутый выше факт наличия пороговой разности потенциалов между электродами (1—3), ниже которой управления сквозным током не происходит.

Анализ полученных результатов измерений позволяет сделать вывод, что действительно возможно управление проводимостью тонких полимерных пленок, входящих в транзисторную структуру, путем изменения потенциала

на среднем электроде. Тем самым показана возможность использования несопряженного полимера из класса полиариленфталидов в устройствах типа тонкопленочного вертикального транзистора.

Список литературы

- [1] M. Baldo, P. Peumans, S. Forrest, C. Kim. US Patent N 6.884.093 B2 (2005).
- [2] K. Nakayama, S. Fujimoto, M. Yakoyama. Appl. Phys. Lett. **82**, 4584 (2003).
- [3] S. Fujimoto, K. Nakayama, M. Yakoyama. Appl. Phys. Lett. **87**, 133 503 (2005).
- [4] Y. Yang, A. Heeger. J. Appl. Phys. **80**, 4755 (1996).
- [5] Ж. Симон, Ж.-Ж. Андре. Молекулярные полупроводники. Мир, М. (1988). 344 с.
- [6] А.Н. Лачинов, Н.В. Воробьева. УФН **176**, 1249 (2006).
- [7] A.Yu. Zherebov, A.N. Lachinov, J. Genoe, A.R. Tameev. Appl. Phys. Lett. **92**, 193 302 (2008).
- [8] Р.Б. Салихов, А.Н. Лачинов, А.А. Бунаков. Нанотехника **2**, 14, 43 (2008).
- [9] С.Н. Салазкин. Высокомолекуляр. соединения Б **46**, 1244 (2004).
- [10] T.W. Hickmott. J. Appl. Phys. **35**, 2679 (1964).
- [11] Р.Б. Салихов, А.Н. Лачинов, Р.Г. Рахмеев. ФТП **41**, 1182 (2007).
- [12] В.П. Драгунов, И.Г. Незвестный, В.А. Гридчин. Основы наноэлектроники. Физматкнига, М. (2006). 496 с.