

10;11;12

## Влияние высоких доз имплантации и плотности ионного тока на свойства пленок полиимида

© В.Н. Попок,<sup>1</sup> И.И. Азарко,<sup>1</sup> Р.И. Хайбуллин<sup>2</sup><sup>1</sup> Белорусский государственный университет,  
220050 Минск, Белоруссия

e-mail: popok@bsu.by

<sup>2</sup> Казанский физико-технический институт Российской академии наук,  
420029 Казань, Россия

e-mail: rik@kfti.knc.ru

(Поступило в Редакцию 17 сентября 2001 г.)

Тонкие пленки полиимида были имплантированы ионами  $\text{Ar}^+$  и  $\text{Ar}^{2+}$  с энергиями 40 и 80 keV соответственно в широком интервале доз  $2.5 \cdot 10^{14} - 1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  и плотностей ионного тока  $1 - 16 \mu\text{A/cm}^2$ . Изучено влияние режимов ионной имплантации на электрические, парамагнитные и оптические характеристики приповерхностного слоя полимера, модифицированного ионным облучением. Показано, что эффект радиационно-стимулированного термолита полиимида и особенности его химического строения обуславливают монотонный рост электропроводности облученного слоя с увеличением плотности ионного тока при заданной дозе имплантации. Напротив, при неизменной плотности ионного тока с увеличением дозы имплантации наблюдается скачкообразный характер роста электропроводности, а также снижение концентрации парамагнитных центров и оптического пропускания модифицированного слоя полиимида. Наблюдаемые зависимости электрофизических характеристик полимера от дозы имплантации и плотности тока интерпретируются в рамках модели структурной перестройки карбонизированной фазы полимера, формируемой в условиях ионного облучения.

### Введение

В последнее время для решения ряда научных и прикладных задач микро- и оптоэлектроники в качестве базового материала все шире используются электропроводящие полимеры [1]. Внимание к этому классу материалов постоянно растет, что обусловлено как успехами в синтезе новых проводящих полимеров, так и расширением диапазона их практического применения. Полимерные пленки с металлическим типом проводимости уже нашли применение в качестве ингибиторов коррозии, компактных конденсаторов, антистатических покрытий для фотографических пленок и экранов мониторов. С другой стороны, открытие в начале 70-х годов и последующее развитие методики синтеза полисопряженных систем, при легировании которых можно получать полимерные материалы с *n*- или *p*-типом проводимости, послужили основой для создания функциональных элементов электроники на органической основе, таких как светодиоды, транзисторы, солнечные элементы, аккумуляторные батареи и т.п. [1,2].

Одним из перспективных способов получения проводящих полимеров является ионная имплантация [3–5]. В основе метода лежит процесс формирования в имплантированном слое полимера наноструктурированной системы сопряжения атомов углерода в результате радиационного воздействия [6]. С увеличением дозы имплантации наблюдается монотонный рост электропроводности имплантированного слоя, значение которой может меняться на 10–15 порядков величины [3,7,8]. Использование высоких доз имплантации для получения

высокопроводящих слоев полимера предполагает проведение облучения при повышенных значениях плотности ионного тока с целью сокращения времени ионной обработки и увеличения эффективности процесса. Однако величина плотности ионного тока неразрывно связана с мощностью, выделяемой в облучаемом слое полимера, и является зачастую критическим параметром для органических материалов в силу их низкой радиационной и термической стойкости. С другой стороны, было показано, что увеличение плотности ионного тока при неизменной дозе ведет к росту проводимости имплантированного слоя полимера [9]. Таким образом, оптимизация параметров и режимов ионной имплантации для формирования проводящих слоев с заданными электрофизическими характеристиками является одной из насущных задач технологии ионно-лучевой модификации полимеров.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния режимов имплантации ионов аргона в полиимид на модификацию его электрических, парамагнитных и оптических свойств. Полиимид является одним из представителей наиболее термостойких полимеров, что позволяет варьировать плотность ионного тока при облучении в широких пределах, вплоть до величины  $16 \mu\text{A/cm}^2$ , которая не встречалась ранее в научной литературе по имплантации полимеров. С другой стороны, использование аргона позволяет исключить легирующее воздействие примеси на проводимость и исследовать в основном радиационное воздействие ионов на полимер. Кроме этого, наличие литературных данных по имплантации ионов  $\text{Ar}^+$  в

полиимид при других параметрах ионного пучка [9–11] позволяет проводить сравнительный анализ влияния режимов ионного облучения на модификацию свойств материала.

## Объекты исследования и техника эксперимента

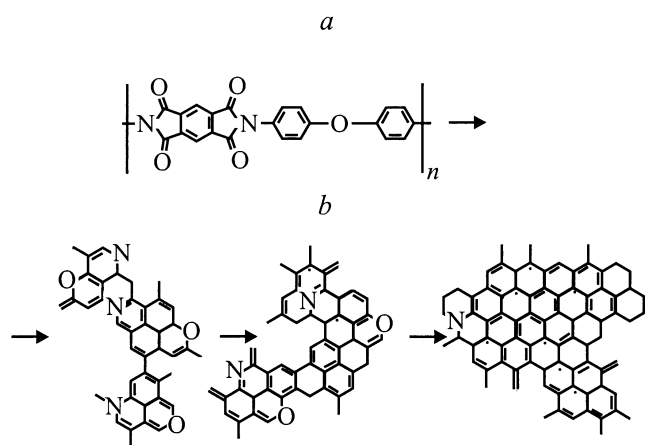
В настоящей работе использовались пленки полиимида (рис. 1, *a*) толщиной  $40 \mu\text{m}$  и плотностью  $1.43 \text{ g/cm}^3$ . Преимуществом данного полимера является отсутствие как такового структурного перехода в вязкоэластичное состояние при повышении температуры. Температура размягчения зависит от степени имидизации (содержания имидных групп)  $s$ , при максимальном значении  $s = 1$  она превышает  $500 \text{ K}$ ; температура стеклования составляет  $590 \text{ K}$  [12], что позволяет рассматривать полиимид как материал достаточно устойчивый к радиационно-стимулированной термодеструкции. Имплантация пленок осуществлялась ионами  $\text{Ag}^+$  и  $\text{Ag}^{2+}$  с энергиями  $40$  и  $80 \text{ keV}$  соответственно дозами  $D = 2.5 \cdot 10^{14} - 1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  при плотностях ионного тока  $j = 1 - 16 \mu\text{A/cm}^2$  на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3 при комнатной температуре в остаточном вакууме  $10^{-5} \text{ Torr}$ . Во избежание перегрева и разрушения образцов во время ионного облучения была разработана специальная кассета, обеспечивающая эффективный сток ионного заряда с поверхности полимера и плотный контакт пленок с металлическим основанием, охлаждаемым проточной водой. Визуальный контроль имплантированных пленок показал отсутствие каких-либо серьезных термических повреждений (обугливания, гофрирования поверхности и т.п.) при всех экспериментальных режимах ионного облучения. Однако было обнаружено, что ионная имплантация полиимида при некоторой критической величине плотности ионного тока (в нашем

случае  $18 \mu\text{A/cm}^2$  для дозы  $1.0 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) ведет к локальным очагам оплавления на поверхности и вздутию образцов.

Исследования методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) проводились на спектрометре Varian E112 в X-диапазоне ( $9.3 \text{ GHz}$ ) при комнатной температуре. Концентрация парамагнитных центров  $N_{PC}$  в имплантированном слое была рассчитана по стандартной методике [13] с учетом толщины радиационно-поврежденного слоя. Согласно расчетам по программе SRIM-2000 [14] и анализу данных резерфордского обратного рассеяния [15], толщина модифицированного слоя полимера составила  $80 \pm 10$  и  $150 \pm 10 \text{ nm}$  для ионов аргона с энергией  $40$  и  $80 \text{ keV}$  соответственно. Измерения поверхностного электрического сопротивления имплантированных образцов полимера проводились по стандартной двухзондовой методике [8] измерителем эмиттанса E7-14. Электроды наносились на поверхность полимера мелкодисперсной серебряной пастой, обеспечивая линейность контактов. Спектры оптического пропускания имплантированных полимерных пленок регистрировались в видимой области спектра на спектрофотометре Hitachi-330 при комнатной температуре.

## Модификация структуры полимера ионным пучком

Для понимания полученных в данной работе экспериментальных результатов кратко изложим основы концепции структурной модификации полимеров при ионном воздействии, общепринятой к настоящему моменту времени [4,6–8]. Вследствие процессов электронного и ядерного торможения ионов в полимере вдоль траектории их движения формируется пространственная область радиационных повреждений молекулярной структуры органической мишени. Заметим, что в отличие от неорганических материалов разрыв химических связей в полимере происходит не только при ядерном, но и при электронном торможении внедряемых ионов [16]. Влияние электронного торможения на структурную модификацию полимера значительно возрастает при имплантации ионов в гетерополицепные соединения, в нашем случае в полиимид. А именно разрушение электронных оболочек атомов и разрыв химических связей носят селективный характер и направлены в первую очередь на деструкцию более слабых поперечных (мостиковых) связей между макромолекулами и трансформацию функциональных химических групп, характеризующихся высоким уровнем делокализации электронов. Однако стержень поврежденной области полимера (латентный трек), характеризующийся наиболее высокой концентрацией радиационных дефектов, формируется в основном в результате ядерных столкновений внедряемого иона. При используемых в данной работе дозах имплантации латентные треки перекрываются [4], что



**Рис. 1.** Химическая формула элементарного звена полиимида (*a*) и схема трансформации структуры полимера при имплантации (*b*).

наряду с развитием каскадов электронного возбуждения и ионизации полимерной системы, так называемых пенамбр [17], приводит к масштабной фрагментации полимерных цепей с последующей радиационно-стимулированной сшивкой. Процесс торможения ионов в полимере сопровождается потерей облученным слоем легколетучих химических компонент, причем латентные треки являются каналами, обеспечивающими процесс диффузии газов к поверхности полимера. В результате дегазации происходит обогащение приповерхностного слоя атомами углерода и наблюдается формирование углеродных кластеров. Зарождение наноразмерных углеродных кластеров в полимерах при имплантации было подтверждено анализом экспериментальных данных по нейтронному рассеянию [18], электронной микроскопией [19], оптической спектроскопией [20] и ЭПР [21] и считается общепризнанным фактом. С увеличением дозы имплантации обычно наблюдаются рост размеров углеродных кластеров, образование связей между ними и их коагуляция вплоть до формирования квазисплошного карбонизированного слоя [22], характер электропроводности которого может меняться в зависимости от режимов облучения от полупроводникового к металлическому типу.

### Зависимость электрофизических, оптических и парамагнитных параметров полиимида от плотности ионного тока

Изменение электрических, оптических и магнитных свойств облученного слоя полиимида в зависимости от плотности ионного тока при фиксированной дозе имплантации  $1.0 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  однозарядных ионов  $\text{Ar}^+$  представлено на рис. 2–4. Из рис. 2 и 3 видно, что с ростом величины  $j$  происходит как линейный спад величины удельного поверхностного сопротивления  $\rho$ , так и монотонное снижение оптического пропускания модифицированного слоя полиимида. Наблюдаемая тенденция к увеличению проводимости с ростом  $j$  хорошо согласуется с данными, приведенными в работе [9], однако не представляется возможным точное сопоставление абсолютных значений сопротивления, поскольку в указанной работе они приведены в величинах  $\Omega/\square$ . Далее, для всех исследуемых образцов полиимида обнаружена синглетная изотропная линия ЭПР с  $g$ -фактором  $2.0025 \pm 0.0005$ , близким к  $g$ -фактору свободного электрона. Наблюдаемый сигнал ЭПР обусловлен неспаренными  $\pi$ -электронами, входящими в состав электронной системы углеродных кластеров, образующихся при имплантации полимера [21]. На рис. 4 представлено влияние плотности ионного тока на параметры сигналов ЭПР, а именно величина  $N_{PC}$  монотонно падает, а ширина линии  $\Delta H$  возрастает с увеличением  $j$ .

Явления роста проводимости, снижения оптического пропускания и концентрации парамагнитных центров,

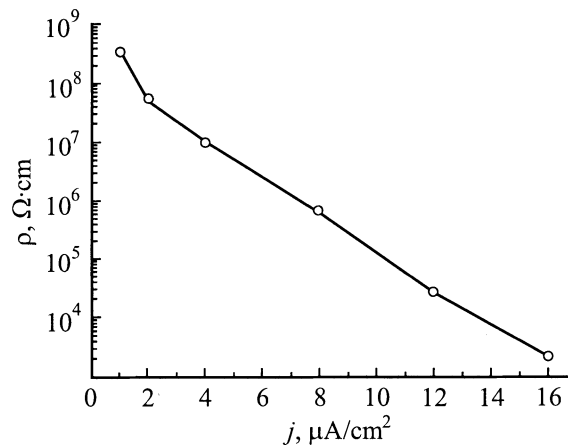


Рис. 2. Зависимость удельного поверхностного сопротивления от плотности ионного тока для образцов, имплантированных ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 40 keV и постоянной дозой  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ .

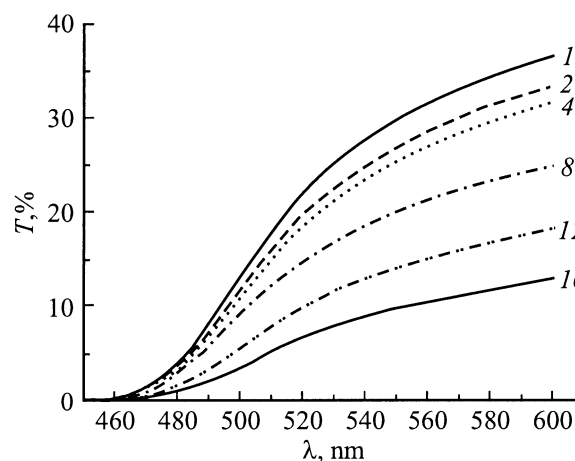


Рис. 3. Зависимость спектров оптического пропускания от плотности ионного тока при тех же условиях, что и на рис. 2. Цифры у кривых — величина плотности ионного тока в  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

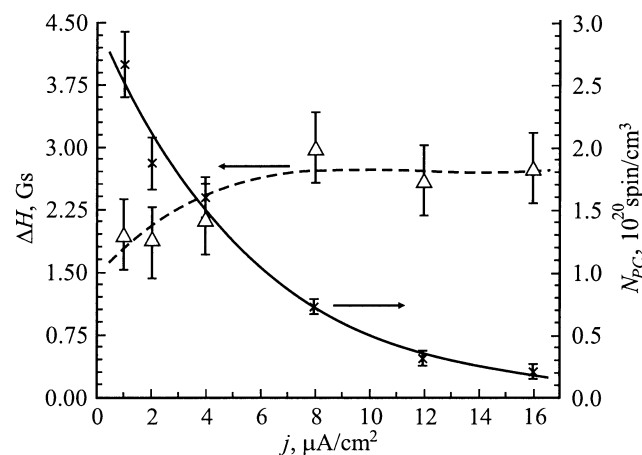


Рис. 4. Зависимость ширины линии ЭПР и концентрации парамагнитных центров от плотности ионного тока при тех же условиях, что и на рис. 2.

а также уширение линии ЭПР в имплантированном полиимиде с увеличением плотности ионного тока при фиксированной дозе имплантации предполагают возможность структурной перестройки карбонизированной фазы полиимида в условиях возрастающего энергетического воздействия. С ростом плотности ионного тока влияние на состав и структуру поверхностного слоя полимера оказывают не только радиационные эффекты (фракционирование, сшивка, смещение атомов полимерных молекул и т.п.), но и локальный разогрев полимера вблизи латентного трека вследствие передачи кинетической энергии иона атомам полимерной матрицы (эффект теплового клина) [23]. Происходит единый в результате ионного воздействия процесс радиационного термоллиза. Характеристические времена этого процесса составляют  $\sim 10^{-12} - 10^{-10}$  с после столкновения иона с мишенью и пространственная область вокруг трека оказывается разогретой до температур свыше 1000 К [24]. Известно, что при имплантации полиимида в первую очередь деградируют эфирные связи между ароматическими циклами, при этом происходит дегазация молекул водорода и окиси углерода [8,25]. В условиях термоллиза полимера имидные группы могут превращаться в иминные и амидные [11]. С увеличением плотности ионного тока, когда выделяемая мощность в полимере возрастает, логично предположить принципиальную возможность формирования пространственно протяженных поликонденсированных ароматических структур (рис. 1, *b*) по аналогии со структурными превращениями полиимида при пиролизе (1000–1200 К) [26]. Рост карбонизированной фазы, характеризующейся системами сопряженных связей, в имплантированном слое полиимида с увеличением  $j$  обуславливает соответственно рост его электропроводности, снижение оптического пропускания и числа парамагнитных центров.

## Изменение параметров полиимида с ростом дозы имплантации

Экспериментальные зависимости электрических, оптических и парамагнитных параметров облученного полиимида от дозы имплантации при постоянной мощности ионного пучка  $P = E \cdot j = 0.32$  Вт для случаев торможения однозарядных ( $E = 40$  кэВ,  $j = 8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) и двухзарядных ( $E = 80$  кэВ,  $j = 4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) ионов аргона, представленные на рис. 5–8, носят немонотонный характер. Для доз  $5.0 \cdot 10^{14} - 2.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  наблюдается: незначительное уменьшение  $\rho$  (рис. 5), рост  $N_{\text{PC}}$  (рис. 6) при практически неизменной величине  $\Delta H$ , 2.5–3.0 Г для ионов  $\text{Ar}^+$  и 1.5–2.0 Г для ионов  $\text{Ar}^{2+}$ , снижение оптического пропускания с выходом на постоянную величину (рис. 7). При превышении дозой величины  $2.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  для образцов, имплантированных как однозарядными, так и двухзарядными ионами аргона, характерен скачкообразный рост электропроводности, который сопровождается резким снижением оптического

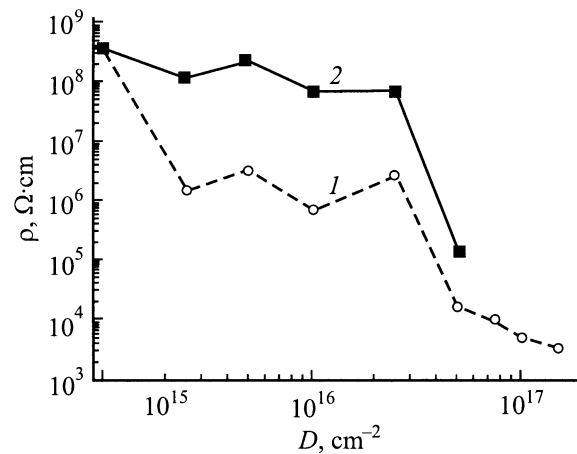


Рис. 5. Зависимость удельного поверхностного сопротивления от дозы для образцов, имплантированных однозарядными (1)  $E = 40$  кэВ,  $j = 8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  и двухзарядными (2)  $E = 80$  кэВ,  $j = 4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ионами аргона.

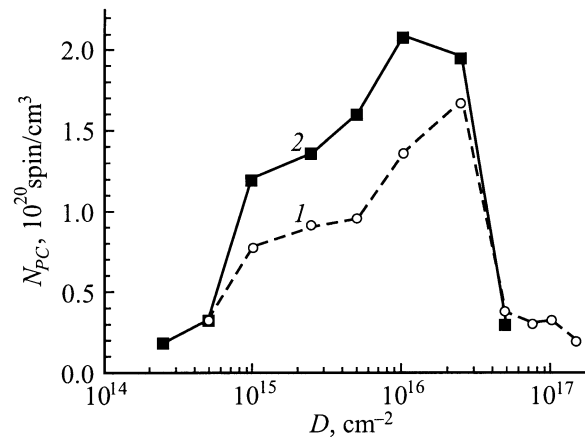


Рис. 6. Зависимость концентрации парамагнитных центров от дозы имплантации для тех же условий, что и на рис. 5.

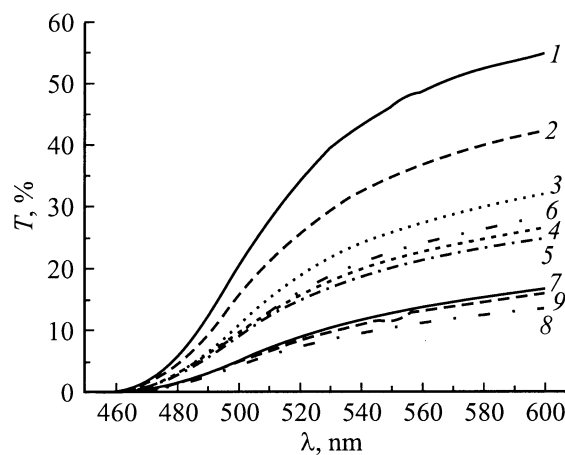


Рис. 7. Зависимость спектров пропускания от дозы для образцов, имплантированных ионами  $\text{Ar}^+$  энергией 40 кэВ при  $j = 8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Доза  $D, \text{cm}^{-2}$ : 1 —  $5 \cdot 10^{14}$ , 2 —  $1 \cdot 10^{15}$ , 3 —  $2.5 \cdot 10^{15}$ , 4 —  $5 \cdot 10^{15}$ , 5 —  $1 \cdot 10^{16}$ , 6 —  $2.5 \cdot 10^{16}$ , 7 —  $5 \cdot 10^{16}$ , 8 —  $7.5 \cdot 10^{16}$ , 9 —  $1.5 \cdot 10^{17}$ .

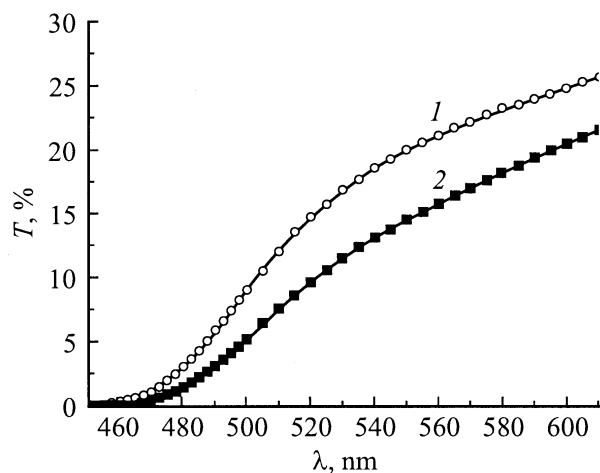


Рис. 8. Спектры пропускания полиимида, имплантированного дозой  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  при тех же условиях, что и на рис. 5 и 6.

пропускания, уменьшением концентрации парамагнитных центров (рис. 5–7) и уширением линии ЭПР до 4.0 G в случае ионов  $\text{Ar}^+$  и до 2.5 G для ионов  $\text{Ar}^{2+}$ . Аналогичное поведение параметров спектров ЭПР с дозой имплантации для полиимида, облученного близкими по энергии (40–90 keV) ионами аргона, было отмечено в работе [10].

Наблюдаемые экспериментальные зависимости параметров полиимида от дозы облучения могут быть легко поняты в рамках изложенной выше концепции структурной модификации полимеров ионной имплантацией. А именно, увеличение концентрации парамагнитных центров с ростом дозы в интервале  $5.0 \cdot 10^{14} - 2.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  (рис. 6) свидетельствует о росте углеродных кластеров, формируемых в облученном полимере. Постоянство ширины линии ЭПР в этом интервале доз предполагает отсутствие качественных изменений в электронной системе формирующейся карбонизированной фазы. Этот факт подтверждается наличием лишь незначительных изменений  $\rho$  для указанных выше доз (рис. 5). Снижение оптического пропускания с увеличением дозы имплантации также предполагает рост размеров углеродных кластеров, которые являются основными центрами поглощения в имплантированном слое полимера, а выход величины пропускания на насыщение (кривые 4–6 на рис. 7) указывает на стабилизацию процессов радиационно-индуцированной сшивки и агломерации углеродных кластеров.

Скачкообразное изменение сопротивления, парамагнитных и оптических параметров образцов при дозе  $> 2.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  может быть объяснено переходом карбонизированного слоя полимера из фазы, характеризующейся наличием протяженных агломератов углеродных кластеров и сопряженных макроциклов в полимероподобной структуре, в фазу, представляющую собой аморфный углерод либо графитоподобный ма-

териал с отдельными фрагментами полимерных цепей. Данное заключение хорошо согласуется с результатами работы [10], где для полиимида, имплантированного ионами  $\text{Ar}^+$  и  $\text{N}^+$ , на основе анализа температурной зависимости проводимости сделан вывод о переходе от полупроводникового характера проводимости к металлической при дозах, превышающих  $3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , что соответствует предполагаемому фазовому изменению. Необходимо отметить, что аналогичный перколяционный переход в характере проводимости наблюдался также и для других полимеров, например при имплантации легких ионов дозами свыше  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  и низких плотностях ионного тока ( $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) [22]. Это позволяет заключить, что эффект обусловлен в основном дозой имплантации, а не ионным током.

Таким образом, демонстрируемая в настоящей работе корреляция в изменении параметров спектров ЭПР и электрического сопротивления позволяет сделать вывод о тесной взаимосвязи электрических и парамагнитных характеристик имплантированных органических полупроводников.

Между тем наблюдаются различия в значениях электрических, парамагнитных и оптических параметров образцов полиимида для случаев имплантации однозарядных и двухзарядных ионов аргона (рис. 5, 6, 8). Данные различия могут быть объяснены как вкладом электронного торможения в модификацию структуры полимера для ионов с различным зарядом и энергией, так и усилением роли эффекта радиационно-стимулированного термолита. Как мы уже указывали раньше, влияние электронного торможения на молекулярную структуру полиимида является значительным в силу наличия слабых эфирных связей между ароматическими циклами [8]. Обладающие энергией 80 keV двухзарядные ионы  $\text{Ar}^{2+}$  при торможении обеспечивают сравнительно высокую степень ионизации полимера, которая в свою очередь приводит к более существенным радиационным изменениям структуры материала в сравнении со случаем имплантации полиимида однозарядными ионами аргона. Это находит отражение в более высоких значениях  $N_{PC}$  (рис. 6), в снижении оптического пропускания (рис. 8) и в ухудшении проводимости (рис. 5) вследствие увеличения числа радиационных дефектов. Однако не исключено, что наблюдаемое снижение оптического пропускания для случая двухзарядных ионов  $\text{Ar}^{2+}$  может быть также обусловлено ростом толщины модифицированного слоя полимера вследствие увеличения проецированного пробега ионов (см. экспериментальную часть). При имплантации полимерных образцов однозарядными ионами  $\text{Ar}^+$  более высокое значение  $j$  стимулирует эффекты термолита, приводящие, как уже упоминалось выше, к реструктурированию карбонизированной фазы и, как следствие, к уменьшению концентрации парамагнитных центров и росту электропроводности модифицированного слоя по сравнению со случаем двухзарядных ионов.

## Заключение

В работе представлены результаты комплексного исследования электрофизических параметров пленок полиимида в зависимости от режимов и параметров имплантации ионов аргона. Показано, что увеличение плотности ионного тока с 1 до  $16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  при фиксированной высокой ( $1.0 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-2}$ ) дозе имплантации ведет к возрастанию электропроводности полиимида на пять порядков величины без радиационно- или термически-индуцированного разрушения полимера, что позволяет сделать заключение о возможности эффективного использования имплантации высокими токами для практических целей модификации электропроводности данного полимера. Выявлена корреляция в поведении величин электрических параметров имплантированного полиимида с его парамагнитными и оптическими характеристиками. Это позволило развить представления о процессах изменения структуры полимера и формирования карбонизированной фазы под воздействием мощных энергетических ионных пучков на основе эффекта теплового клина и особенностей химической структуры полиимида. Обнаружено скачкообразное изменение электрофизических параметров полимерных пленок с ростом дозы имплантации при превышении определенной величины (в нашем случае  $\sim 2.5 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-2}$ ), которое находит объяснение в рамках предложенной модели реструктуризации карбонизированной фазы модифицированного слоя полимера. Показано, что изменение заряда имплантируемых ионов аргона при постоянной мощности ионного пучка приводит только к количественному различию в характеристиках облученного слоя полимера вследствие эффектов ионизации и радиационного термолитиза, но качественно не меняет поведение экспериментальных зависимостей параметров полиимида с увеличением дозы имплантации.

Авторы выражают признательность И.А. Карповичу за помощь в проведении электрических измерений. Р.И. Хайбуллин благодарит РФФИ (грант № 99-03-32548) и "Ведущие научные школы России" (грант № 00-15-96615) за финансовую поддержку настоящего исследования.

## Список литературы

- [1] The 2000 Nobel Prize in Chemistry (for the Discovery and Development of Conductive Polymers). Press Release. [www.nobel.se/chemistry/laureates/2000/press.html](http://www.nobel.se/chemistry/laureates/2000/press.html).
- [2] Chiang C.K., Fisher C.R., Park Y.W. et al. // Phys. Rev. Lett. 1977. Vol. 39. N 17. P. 1098–1101.
- [3] Venkatesan T., Calcagno L., Elman B.S. et al. // Ion Beam Modification of Insulators / Ed. P. Mazzoldi, G.W. Arnold. Amsterdam: Elsevier, 1987. P. 301–379.
- [4] Marletta G., Iacona F. // Materials and Processes for Surface and Interface Engineering / Ed. Y. Pauleau. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1995. P. 597–640.
- [5] Gied R.E., Moss M.G., Kaufmann J. et al. // Electrical and Optical Polymer Systems / Ed. D.L. Wise, G.E. Wnek, D.J. Trantolo et al. New York: Marcel Dekker, 1998. P. 1011–1030.
- [6] Попок В.Н. // Поверхность. 1998. Вып. 6. С. 103–118.
- [7] Lee E.H. // Nucl. Instr. and Meth. B. 1999. Vol. 151. P. 29–41.
- [8] Оджаяев В.Б., Козлов И.П., Попок В.Н. и др. Ионная имплантация полимеров. Минск: БГУ, 1998. 197 с.
- [9] Iwaki M. // Nucl. Instr. and Meth. B. 2001. Vol. 175–177. P. 368–374.
- [10] Алешин А.Н., Грибанов А.В., Добродумов А.В. и др. // ФТТ. 1989. Т. 31. Вып. 1. С. 12–18.
- [11] De Bonis A., Bearzotti A., Marletta G. // Nucl. Instr. and Meth. B. 1999. Vol. 151. P. 101–108.
- [12] Feger C., Khojasteh M.M., McGrath J.E. Polyimides, Chemistry and Characterization. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- [13] Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР. М.: Мир, 1975. 548 с.
- [14] Ziegler J.F. The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM-2000). [www.research.ibm.com/ionbeams](http://www.research.ibm.com/ionbeams).
- [15] Popok V.N., Azarko I.I., Khaibullin R.I. et al. // Appl. Phys. A. In Press.
- [16] Davenas J., Xu X.L., Boiteux G. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. 1989. Vol. 39. P. 754–763.
- [17] Magee J.L., Chattejee A. // J. Phys. Chem. 1980. Vol. 84. P. 3529–3536.
- [18] Fink D., Ibel K., Goppelt P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. 1990. Vol. 46. P. 342–346.
- [19] Rao G.R., Wang Z.L., Lee E.H. // J. Mater. Res. 1993. Vol. 8. P. 927–933.
- [20] Козлов И.П., Оджаяев В.Б., Карпович И.А. и др. // ЖПС. 1998. Т. 65. Вып. 3. С. 377–381.
- [21] Козлов И.П., Оджаяев В.Б., Попок В.Н. и др. // ЖПС. 1998. Т. 65. Вып. 4. С. 562–567.
- [22] Popok V.N., Karpovich I.A., Odzhaev V.B. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. 1999. Vol. 48. P. 1106–1110.
- [23] Miotello A., Kelly R. // Nucl. Instr. and Meth. B. 1997. Vol. 122. P. 458–469.
- [24] De Cicco H., Saint-Martin G., Alurralde M. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. 2001. Vol. 173. P. 455–462.
- [25] Švorčík V., Endršt R., Rybka V. et al. // Eur. Polym. J. 1995. Vol. 31. N 2. P. 189–191.
- [26] Hu C.Z., De Vries K.L., Andrade J.D. // Polymer. 1987. Vol. 28. P. 663–667.