

УДК 537.311.322

© 1990

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНУЮ ПРОВОДИМОСТЬ ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ПЛЕНОК ПОЛИИМИДА

А. Н. Алешин, А. В. Суворов

Исследованы электрические свойства пленок термостойкого полимера — полиимида, облученного комбинацией ионов Ag^+ и Ga^+ . Показано, что проводимость облученного слоя увеличивается более чем на 17 порядков и достигает $10^3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$. Установлено, что для облученных слоев полиимида с проводимостью вблизи перехода металл—диэлектрик на диэлектрической стороне исхода для описания проводимости в области низких температур необходимо учитывать электрон-электронное взаимодействие. Определены значения радиуса локализации, диэлектрической постоянной, плотности локализованных состояний.

Ионное облучение является одним из эффективных методов получения высокопроводящих полимерных материалов [1]. В последнее время в ряде работ [2-4] было показано, что при облучении ионами пленок термостойкого полимера — полиимида (ПМ) (Каптон) — на его поверхности образуется проводящий слой, свойства которого зависят от дозы энергии облучения. В работе [4] нами были исследованы свойства пленок ПМ, облученных ионами Ag^+ , N^+ , в которых в области низких температур наблюдался эффект магнитного упорядочения в системе локализованных спинов. Однако характер проводимости облученных слоев ПМ в области температур, где существенно электрон-электронное взаимодействие, в этой работе был исследован недостаточно. Представляло интерес исследовать и влияние облучения различными типами ионов на характер низкотемпературной проводимости слоев ПМ в области проявления электрон-электронного взаимодействия.

В настоящей работе исследовались низкотемпературная проводимость пленок ПМ, облученных ионами Ga^+ , влияние на нее электрических, магнитных полей.

Объектами исследования являлись пленки ПМ, подвергнутые облучению ионами Ga^+ с энергией 90 кэВ и дозами $D = 10^{15} \div 10^{17} \text{ см}^{-2}$; поверхность ряда образцов перед облучением Ga^+ бомбардировалась ионами Ag^+ . Разогрев образцов в процессе облучения не превышал 300 °С. Глубина модифицированного ионами Ga^+ слоя ПМ оценивалась на основе данных по ионной имплантации полупроводников [5] и для энергии 90 кэВ составляла порядка 500 Å. Контакты формировались напылением золота на облученную поверхность, измерения проводимости велись в планарной геометрии.

1. Экспериментальные результаты

Как следует из рис. 1, в результате облучения ПМ комбинацией ионов Ag^+ и Ga^+ были получены полимерные слои с проводимостью при комнатной температуре $\sigma_{300} = [\rho_{300}]^{-1}$, достигающей $1.1 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$,

что превосходит значение σ_{300} для слоев ПМ, полученных простым облучением ионами Ag^+ ($\sigma_{300}^{\text{max}} \approx 200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [4]) или Ga^+ ($\sigma_{300}^{\text{max}} \approx 10 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$), а также значения σ_{300} , полученные при облучении ПМ другими типами ионов [3].

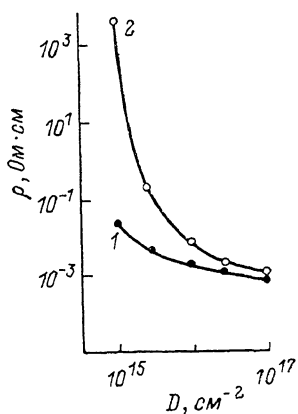


Рис. 1. Дозовая зависимость удельного сопротивления слоев полимера, облученных Ga^+ (ПМ: Ag^+ , Ga^+), измеренная при $T=300$ (1), 4.2 К (2).

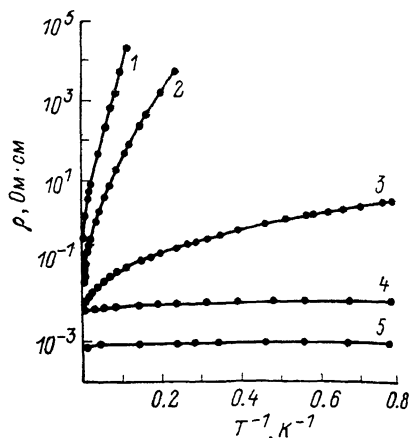


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления слоев ПМ: Ag^+ ; Ca^+ .

Цифры у кривых — номера образцов. Дозы облучения Ga^+ (см^{-2}): 1 — $3 \cdot 10^{16}$, 2 — 10^{17} , 3 — $3 \cdot 10^{15}$, 4 — 10^{16} , 5 — 10^{17} .

Измерения термоэдс показали, что облученные слои имеют проводимость n -типа. Для проводящих слоев, полученных облучением ПМ ионами Ga^+ , как и в случае облучения Ag^+ [4], была характерна высокая стабильность электрических параметров. Изменение проводимости при

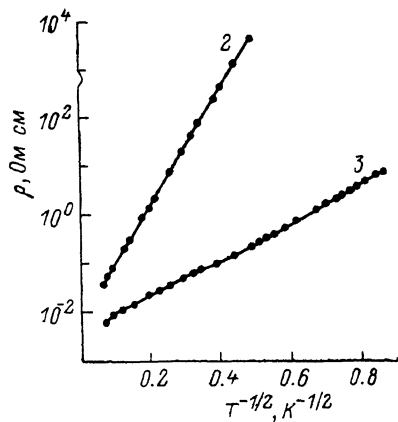


Рис. 3. Зависимость $\lg \rho$ от $T^{-1/2}$ для образцов ПМ: Ag^+ ; Ga^+ № 2 и 3.

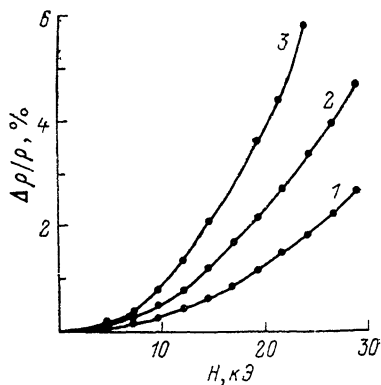


Рис. 4. Магнитосопротивление образца ПМ: Ag^+ ; Ga^+ № 3 при $T=$ = 4.2 (1), 3.0 (2), 1.57 К (3).

комнатной температуре при хранении на воздухе в течение двух месяцев для образцов с максимальной проводимостью не превышало 5—10 %.

На рис. 2 приведены результаты исследования температурной зависимости удельного сопротивления $\rho(T) = \sigma(T)^{-1}$ пленок ПМ, облученных Ga^+ (ПМ: Ga^+). Видно, что на диэлектрической стороне перехода металл-диэлектрик (ПМД) проводимость имеет активационный характер и описывается выражением

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp [-(T_0/T)^m]. \quad (1)$$

Для образца, полученного облучением Ga^+ исходного ПМ ($D=3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$), наблюдается проводимость с постоянной энергией активации (рис. 2, 1), описываемая формулой (1) с $m=1$, $T_0=\varepsilon_0$. Резкая активационная зависимость для образца № 1 свидетельствует о слабой эффективности такого «легирования» по сравнению, например, с облучением Ag^+ .

В случае пленок ПМ: Ga^+ , предварительно облученных Ag^+ (ПМ: $Ag^+ : Ga^+$), характер $\sigma(T)$ существенно меняется: в области низких температур $T < 10 \text{ К}$ в таких образцах наблюдается $\sigma(T)$ с переменной энергией активации, описываемая законом (1) с $m=0.5$ (рис. 3). Анализ температурной зависимости безразмерной энергии активации $\varepsilon(T)/kT$ подтверждает этот вывод (для образцов № 2, 3 при $T < 10 \text{ К}$ в области, где $\varepsilon(T) > kT$, $m \approx 0.5$).

В исследуемых пленках ПМ: $Ag^+ : Ga^+$ в области низких температур, где выполняется закон (1) с $m=0.5$, наблюдается положительное магнитосопротивление (ПМС). Зависимость ПМС от магнитного поля имеет квадратичный характер (рис. 4) и хорошо описывается выражением $\ln[\rho(H)/\rho(0)] \sim H^2$.

Анализ низкотемпературной проводимости облученных слоев полиимида ПМ: $Ag^+ : Ga^+$ в промежуточных (до 100 В/см) электрических полях показал, что в области неомичности $\sigma(E, T)$ может быть описана выражением $\ln[\sigma(E)/\sigma(0)] \sim eEL/kT$, где величина L , имеющая размерность длины, растет с понижением температуры как $L \sim T^{-1}$ (рис. 5).

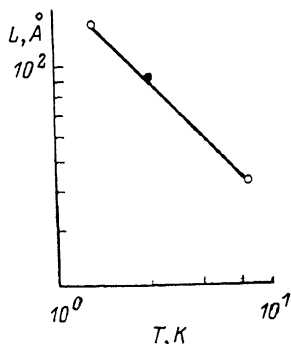


Рис. 5. Температурная зависимость корреляционной длины для образца ПМ: $Ag^+ : Ga^+$ № 3.

2. Обсуждение

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что перенос носителей заряда в пленках ПМ: $Ag^+ : Ga^+$ на диэлектрической стороне ПМД осуществляется посредством прыжков электронов по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми при наличии в спектре плотности состояний параболической квазищели, обусловленной электрон-электронным, кулоновским взаимодействием [6]. При этом парамагнитные центры, образующиеся при облучении пленки ПМ ионами Ag^+ и приводящие, как было показано в работе [4], при низких температурах к эффекту магнитного упорядочения в системе локализованных спинов, в значительной степени нейтрализуются и рекомбинируют при облучении той же пленки ионами Ga^+ . Это позволило наблюдать кулоновскую квазищель в более широком по сравнению с [4] интервале температур.

В рамках этой модели можно определить ряд параметров пленок ПМ: $Ag^+ : Ga^+$, такие как a — радиус локализации, κ — диэлектрическая постоянная, g_0 — плотность локализованных состояний вне щели.

Как следует из теории [6], в области моттовской прыжковой проводимости с переменной энергией активации при учете электрон-электронного взаимодействия параметр T_0 в законе (1) с $m=0.5$ имеет вид

$$T_0 = (1/k) (\beta e^2 / \kappa a), \quad (2)$$

а магнитосопротивление описывается выражением [7]

$$\ln[\rho(H)/\rho(0)] = t(a/\lambda)^4 (T_0/T)^{3/2}, \quad (3)$$

где $t=0.015$, $\lambda = (\hbar^2 / eH)^{1/2}$ — магнитная длина. Это позволило, как в случае кристаллических [8] и аморфных [9] полупроводников, оценить a и κ для пленок ПМ: $Ag^+ : Ga^+$ вблизи ПМД, которые для образца № 3 составили 107 \AA и 98 соответственно.

Аналогично [8, 9] можно оценить и величину квазищели Δ , обусловленную электрон-электронным взаимодействием, а также плотность локализованных состояний вне щели

$$\Delta = \frac{\hbar}{2} (T_0 T^*)^{1/2}, \quad g_0 = \frac{\hbar^2}{16} \frac{z^3}{e^6} (T_0 T^*), \quad (4), (5)$$

где T^* — температура начала выполнения закона (1) с $m=0.5$. Эти параметры для образца № 3 ($T_0=47$, $T^*=8.5$ К) составили $\Delta=10$ К (0.859 мэВ) и $g_0=5.85 \cdot 10^{19}$ эВ⁻¹.см⁻³.

Характер температурной зависимости корреляционной длины $L(T)$, определенный из исследования $\sigma(E, T)$, также указывает на влияние электрон-электронного взаимодействия на низкотемпературную проводимость пленок ПМ: $\text{Ag}^+ : \text{Ga}^+$ в области промежуточных электрических полей [10], а величина L , составившая при 1.33 К 138 Å, коррелирует с данными, полученными из исследования $\sigma(T)$ и ПМС.

Полученные значения a для ПМ: $\text{Ag}^+ : \text{Ga}^+$ вблизи ПМД значительно превышают величину a , найденную для пленок ПМ вдали от ПМД из дозовой зависимости проводимости [4]. Такое увеличение объясняется, согласно теории [11], расходимостью радиуса локализации при приближении к ПМД вследствие электрон-электронного взаимодействия.

1. Облучение пленок ПМ комбинацией ионов Ag^+ и Ga^+ дает возможность получить слои с более высокой проводимостью по сравнению с простым облучением Ag^+ или Ga^+ .

2. В облученных слоях ПМ: $\text{Ag}^+ : \text{Ga}^+$ наблюдается низкотемпературная проводимость вида $\ln \sigma \sim T^{-1}$: в отличие от пленок ПМ: Ag^+ [4] и ПМ: Ga^+ , в которых наблюдается переход к постоянной энергии активации.

3. Низкотемпературные свойства слоев ПМ: $\text{Ag}^+ : \text{Ga}^+$, в том числе и в электрических, и магнитных полях, аналогичны низкотемпературной проводимости как кристаллических [8], так и аморфных [9, 10] полупроводников и определяются эффектами электрон-электронного взаимодействия.

В заключение авторы выражают благодарность И. С. Шлимаку за полезное обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] Venkatesan T., Forrest S. R., Kaplan M. L., Murrey C. A., Schmidt R. H., Wilkens V. I. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 6. P. 3150—3153.
- [2] Hioki T., Noda S., Sugiura M., Kakeno M., Yamada K., Kawamoto J. // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. N 1. P. 30—32.
- [3] Davenas J., Boiteux G., Xu X. L., Adem E. // Nucl. Instr. a. Methods Phys. Res. 1988. V. B 33. N 1—4. P. 136—141.
- [4] Алешин А. Н., Грибанов А. В., Добродумов А. В., Суворов А. В., Шлимак И. С. // ФТП. 1989. Т. 31. № 1. С. 12—18.
- [5] Jonson W. S., Gibbons J. F. Projected Range Statistics in Semiconductors. Stanford University, 1969. 217 p.
- [6] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979. 416 с.
- [7] Шлимак И. С., Ионов А. Н., Шкловский Б. И. // ФТП. 1983. Т. 17. № 3. С. 503—506.
- [8] Ionov A. N., Shlimak I. S., Matveev M. N. // Sol. St. Comm. 1983. V. 47. N 10. P. 763—766.
- [9] Алешин А. Н., Двуреченский А. В., Ионов А. Н., Рязанцев И. А., Шлимак И. С. // ФТП. 1985. Т. 19. № 7. С. 1240—1244.
- [10] Алешин А. Н., Шлимак И. С. // ФТП. 1987. Т. 21. № 3. С. 466—471.
- [11] McMillan W. L. // Phys. Rev. 1981. V. B 24. N 5. P. 2733—2743.