

ISSN - 1561-5405

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

Том 21

№ 6

2016

ноябрь - декабрь



Известия высших учебных заведений ЭЛЕКТРОНИКА

Том 21 № 6

2016 ноябрь–декабрь

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

Учредители:

Министерство
образования и науки
Российской Федерации

Национальный
исследовательский
университет «МИЭТ»

Главный редактор

Чаплыгин Ю.А., академик РАН,
д.т.н., проф.

Зам. главного редактора

Гаврилов С.А., д.т.н., проф.

Редакционная коллегия:

Бархоткин В.А., д.т.н., проф.

Бахтин А.А., канд. т.н., доц.

Быков Д.В., д.т.н., проф.

Горбачевич А.А., чл.-корр. РАН,
д.ф.-м.н., проф.

Грибов Б.Г., чл.-корр. РАН,
д.х.н., проф.

Казённых Г.Г., д.т.н., проф.

Коноплев Б.Г., д.т.н., проф.

Коркишко Ю.Н., д.ф.-м.н., проф.

Королёв М.А., д.т.н., проф.

Красников Г.Я., акад. РАН,
д.т.н., проф.

Кубарев Ю.В., д.ф.-м.н., проф.

Лабунюс В.А., акад. НАН Беларуси,
акад. РАН, д.т.н., проф.

Максимов И.А., PhD, проф.
Лундского университета
(Швеция)

Меликян В.Ш., чл.-корр. НАН Армении,
д.т.н., проф.

Неволин В.К., д.ф.-м.н., проф.

Неволин В.Н., д.ф.-м.н., проф.

Петросяцк К.О., д.т.н., проф.

Сазонов А.Ю., PhD, проф.
Университета Ватерлоо
(Канада)

Сауров А.Н., акад. РАН, д.т.н., проф.

Селищев С.В., д.ф.-м.н., проф.

Сигов А.С., акад. РАН,
д.ф.-м.н., проф.

Таиров Ю.М., д.т.н., проф.

Телец В.А., д.т.н., проф.

Тимошенко С.П., д.т.н., проф.

Тихонов А.Н., д.т.н., проф.

Усанов Д.А., д.ф.-м.н., проф.

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

Мороца А.К., Рожков А.С. О новых типах волн Стоунли и возможности их использования в интегральной акустозлектронике 493

Материалы электронной техники

Вигдорович Е.Н., Ермошин И.Г. Влияние структурного совершенства слоев квантовых ям гетероструктур на основе нитрида галлия на их излучательные характеристики 503

Костишко Б.Б., Светухин В.В., Явтушенко И.О. Модификация поверхности никеля фемтосекундными лазерными импульсами 510

Неустроев С.А. Влияние упаковки на воспроизводство сингонии кристалла кубического углерода 515

Технология микро- и нанoeлектроники

Солнышкин А.В., Кислова И.Л., Белов А.Н., Сыса А.В., Строганов А.А., Шевяков В.И., Силибин М.В., Михалчан А.А., Лысенко А.А. Электропроводность пленочных композитов на основе поливинилиденфторида с углеродными нанотрубками 520

Лисицын С.А., Коломийцев А.С., Ильин О.И., Ильина М.В., Коноплев Б.Г., Быков Ал.В., Агеев О.А. Исследование режимов ионно-стимулированного осаждения наноразмерных структур платины методом фокусированных ионных пучков 529

Заведующая редакцией
С.Г. Зверева

Редактор
А.В. Тихонова

Научный редактор
С.Г. Зверева

Корректор
И.В. Проскурякова

Верстка
А.Ю. Рыжков
С.Ю. Рыжков

Адрес редакции: 124498,
г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1, МИЭТ
Тел.: 8-499-734-6205
E-mail: magazine@mice.ru
http://www.miet.ru

Подписано в печать 09.12.2016.
Формат бумаги 60×84 1/8.
Цифровая печать.
Объем 13,48 усл.печ.л.,
12,372 уч.-изд.л.
Заказ 92.

Отпечатано
в типографии ИПК МИЭТ
124498, г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1, МИЭТ

Свидетельство о регистрации
№ 014134
выдано Комитетом РФ по печати
12.10.95.

Включен в Перечень рецензируе-
мых научных изданий, в которых
должны быть опубликованы основ-
ные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени канди-
дата наук, на соискание ученой степени
доктора наук.

Включен в Российский индекс
научного цитирования и в Рейтинг
Science Index.

Включен в Russian Science Citation
Index на базе Web of Science.

*Кольцов В.Е., Ларионов Н.М., Слесарев С.А.,
Баркинхоева Т.А.* Выделение галлия из многокомпо-
нентной эвтектики при утилизации технологических от-
ходов..... 537

Северюкова Е.А. Исследование механизмов образова-
ния и переноса поверхностных молекулярных загрязне-
ний 543

Микроэлектронные приборы и системы

Морозова Е.В., Шулежко В.В. Моделирование пере-
ходного тока в неоднородных органических полупро-
водниковых системах 551

Информационные технологии

Матюшкин И.В., Жемерикин А.В., Заплетина М.А.
Клеточно-автоматные алгоритмы сортировки строк и
умножения целых чисел по схеме Атрубина 557

Зо Вин Хтет, Колдаев В.Д. Агломеративные алгорит-
мы выделения инвариантных характеристик изображе-
ний 566

Интегральные радиоэлектронные устройства

Широ Г.Э., Романов С.П. Проектирование COS/SIN-
преобразователей в цифровых вычислительных устрой-
ствах синтеза радиолокационных сигналов 574

Краткие сообщения

Соловьев А.В., Крупкина Т.Ю., Романов А.А. Повы-
шение пробивного напряжения *n*-МОП-транзисторов
для радиационно стойких КНС КМОП БИС 583

Карташѐв С.С., Лосев В.В. Моделирование элемента
памяти с учетом дискретного зарядового состояния пла-
вающего затвора МОП-транзистора..... 586

Жаднов В.В., Иванов И.А., Королев П.С., Полесский С.Н.
Оценка уточненного ресурса оптических кабелей с уче-
том условий эксплуатации 589

От Российской академии наук 593

Юбилей

Таирову Юрию Михайловичу – 85 лет 594

Асееву Александру Леонидовичу – 70 лет 596

Конференции

2017 IEEE Conference of Russia Young Researchers
in Electrical and Electronic Engineering 3 стр. обложки

Тематический указатель статей, опубликованных в
2016 году 598

К сведению авторов 603

Proceedings of Universities. ELECTRONICS

Volume 21 N 6

2016 November–December

Founders:

The Ministry
of Education and Science
of the Russian Federation

The National
Research University
of Electronic Technology

Editor-in-Chief

Chaplygin Yu.A., Dr. Sci. (Tech.),
Prof., Acad. RAS

Deputy Editor-in-Chief

Gavrilov S.A., Dr. Sci. (Tech.),
Prof.

Editorial Board:

Barkhotkin V.A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Bakhin A.A., Cand. Sci. (Tech.)

Bykov D.V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Gorbatshevich A.A., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Prof., Cor. Mem. RAS

Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Prof.

Kazennov G.G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Konoplev B.G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Korkishko Yu.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Korolev M.A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Krasnikov G.Yu., Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
Acad. RAS

Kubarev Yu.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Labunov V.A. (Belorussia),

Dr. Sci. (Tech.), Prof.,

Acad. NAS, Acad. RAS

Maksimov I.A. (Sweden), PhD, Prof.

of Lund University

Melikyan V.Sh. (Armenia), Dr. Sci. (Tech.),

Prof., Cor. Mem. NAS

Nevolin V.K., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Nevolin V.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Petrosyanz K.O., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Sazonov A.Yu. (Canada), PhD,

Prof. of University of Waterloo

Saurov A.N., Dr. Sci. (Tech.), Prof.,

Acad. RAS

Selishchev S.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Sigov A.S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,

Acad. RAS

Tairov Yu.M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Telets V.A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Timoshenkov S.P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Tikhonov A.N., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Usanov D.A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

The scientific-technical journal

Published since 1996

Published 6 times per year

CONTENTS

Fundamental reseaches

Morocho A.K., Rozhkov A.C. On New Types of Stonely Waves and Opportunity to Apply Them in Integrated Electronics 493

Electronic engineering materials

Vigdorovich E.N., Ermoshin L.G. Impact of Structural Perfection of Layers of Quantum Wells of Heterostructures Based on Gallium Nitride on Their Radiative Characteristics 503

Kostishko B.B., Svetukhin V.V., Yavtushenko I.O. Modification of Nickel Surface Due to Femtosecond Laser Pulses 510

Neoustroev S.A. Influence of Packing on Reproduction of Singonia of c-C Crystal 515

Micro- and nanoelectronics technology

Solnyshkin A.V., Kislova I.L., Belov A.N., Syta A.V., Stroganov A.A., Shevjakov V.I., Silibin M.V., Mihalchan A.A., Lysenko A.A. Electrical Conductivity of the Composite Films Based on Polyvinylidene Fluoride and Carbon Nanotubes 520

Lisitsyn S.A., Kolomytsev A.S., Ilin O.I., Ilina M.V., Konoplev B.G., Bykov A.I.V., Ageev O.A. Research of Modes of Ion Beam Included Deposition of Platinum Nanostructures Using the Method of Focused Ion Beams 529

Head of editorial staff
Zvereva S.G.

Chief editors
Tikhonova A.V.,
Proskuryakova I.V.

Make-up
Ryzhkov S.Yu.
Ryzhkov A.Yu.

Address: 124498, Moscow, Zelenograd,
Bld. 1, Shokin Square, MIET, editorial
office of the Journal «Proceedings
of universities. Electronics»
Tel.: +7-499-734-62-05
E-mail: magazine@miec.ru
http://www.iniet.ru

The journal is printed at the printing
workshop of the MIET
124498, Moscow, Zelenograd,
Bld. 1, Shokin Square, MIET

The registration certificate No.014134
was given by RF Press Committee
on 12.10.95.

The journal is included into the List
of reviewed scientific publications,
in which the main scientific results
of thesis for candidate of science and
doctor degrees must be published.

The journal is included into the Rus-
sian index of scientific citing and into the
Rating Science Index.

The journal is included into the Rus-
sian Science Citation Index on the Web
of Science basis.

Koltsov V.B., Larionov N.M., Slesarev S.A.,
Barkinkhoeva T.A. Allocation of Gallium from a Multi-
component Eutectic Disposal Recycle of Technological 537
Sevryukova E.A. Investigation of Mechanisms of Forma-
tion and Transport of Surface Molecular Contamination 543

Microelectronic devices and systems

Morozova E.V., Shulezhko V.V. Simulation of Transient
Current in Nonhomogeneous Organic Semiconductor Sys- 551
tems

Information technologies

Matushkin I.V., Zhemerikin A.V., Zapletina M.A. Cellu-
lar Automata Algorithms for String Sorting
and Integer Multiplication by Atrubin's Scheme 557

Zaw Win Htet, Koldaev V.D. Agglomerative Algorithm of
Invariant Characteristics of Images 566

Integrated radioelectronic devices

Shiro G.E., Romanov S.P. Design of COS/SIN Generators
in Digital Computing Devices of Synthesis of Radar
Signals..... 574

Brief reports

Solovev A.V., Krupkina T.U., Romanov A.A. Increasing
Breakdown Voltage of N-MOS Transistors for Radiation-
Resistant CMOS LSI..... 583

Kartashev S.S., Losev V.V. Modeling of Memory Element
with Account of discrete State of MOS Transistors Floating
Gate 586

Zhadnov V.V., Ivanov I.A., Korolev P.S., Polesskiy S.N.
Estimation of specified operating life of fiber cables taking
into account operation conditions 589

Исследование механизмов образования и переноса поверхностных молекулярных загрязнений

Е.А. Севрюкова

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Investigation of Mechanisms of Formation and Transport of Surface Molecular Contamination

E.A. Sevryukova

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Исследована кинетическая модель формирования поверхностных молекулярных загрязнений в результате двумерного зародышеобразования. Получены решения для описания структурных характеристик растущих загрязнений через физические константы системы и параметров процесса роста в чистых помещениях индустрии высоких технологий.

Ключевые слова: кинетическая модель; чистые помещения; поверхностные молекулярные загрязнения.

The kinetic model of the surface molecular contamination, formed as a result of two-dimensional nucleation, has been investigated. The solutions to describe the structural characteristics of the growing pollution through a system of physical constants and the parameters of the growth process in the clean room technology industry have been obtained.

Keywords: kinetic model; clean rooms; surface molecular contamination; the study of mechanisms.

Введение. Для контроля эксплуатационных характеристик многофункциональных блоков с требуемыми параметрами, применяемых в чистых помещениях микро- и оптоэлектроники, аэрокосмической отрасли и других сферах индустрии высоких технологий, необходимо развитие детальной кинетической теории формирования и переноса поверхностных молекулярных загрязнений (ПМЗ). При исследовании коагуляции агломератов используется геометрико-вероятностная модель кристаллизации Колмогорова [1], применяемая в случае двумерного роста [2–4]. Теория полислоного роста ПМЗ базируется на модели кристаллизации, описанной в [5], и ее обобщениях [6]. Механизм формирования ПМЗ изучен с помощью компьютерного моделирования [7,8].

Цель настоящей работы – разработка кинетической модели формирования и роста ПМЗ, осаждаемых на поверхность твердого тела из газообразной фазы, позволяющая получить аппроксимации для структурных характеристик агломератов.

Теоретическая модель. Температура поверхности изделия T и скорость осаждения загрязняющих веществ V являются необходимыми условиями формирования ПМЗ. Эти параметры постоянны. Скорость осаждения на поверхность изделия измеряется в единицах монослоя в секунду. Тогда $V_S = \sigma J$, где σ – площадь, занимаемая атомом на поверхности, J – поток атомов, направленный на поверхность.

ПМЗ характеризуются такими параметрами, как критическая температура фазового перехода между разреженной и плотными фазами адсорбата T_c , активационные барьеры диффузии E_D и десорбции E_A адсорбционного атома, межфазовая энергия границы газ–поверхность на единицу длины γ . Тогда согласно [9] равновесная плотность адсорбционных атомов рассчитывается по формуле

$$n_{eq} = \frac{1}{\sigma} \exp\left(\frac{-\lambda}{k_B T}\right),$$

где $\lambda = 2k_B T_c$ – теплота фазового перехода; k_B – постоянная Больцмана.

Время жизни τ_A адсорбционного атома на поверхности определяется как

$$\tau_A = v_A^{-1} \exp\left(\frac{E_A}{k_B T}\right),$$

где v_A^{-1} – предэкспоненциальный множитель.

Аналогичным образом определяется диффузионное время:

$$t_D = v_D^{-1} \exp\left(\frac{E_D}{k_B T}\right),$$

где v_D^{-1} – предэкспоненциальный множитель.

Согласно [1] по механизму твердофазного спекания [6] в случае коалесценции [8] концентрация адсорбционных атомов на свободной части поверхности n определяется из уравнения баланса вещества на поверхности:

$$n(t) = \int_0^t dt' \left(J - \frac{n(t')}{\tau_A} \right) - \frac{g(t)}{\sigma}. \quad (1)$$

Здесь $g(t)$ – степень заполнения поверхности в момент времени t без учета коалесценции, определяемая выражением

$$g(t) = k_S \int_0^t dt' I(t') r^2(t', t), \quad (2)$$

где $I(t')$ – интенсивность (скорость) нуклеации; k_S – константа формы; $r(t', t)$ – линейный размер сформировавшегося в момент времени t' островка загрязнения

$$r(t', t) = \int_{t'}^t dt'' v(t''). \quad (3)$$

Поступление адсорбционного атома в островок ПМЗ за счет диффузии к ступени, образованной его границей, можно учесть, определив скорость латерального формирования ПМЗ:

$$v(t) = \frac{r_0}{\tau_D} \zeta(t), \quad (4)$$

где $r_0 = \frac{\sigma^{1/2}}{2}$, $\zeta = \frac{n}{n_{eq} - 1}$ – пересыщение по числу адсорбционных атомов;

$\tau_D = \frac{l_D}{\sigma^{1/2} l_D n_{eq}} \approx \frac{l_D}{\theta_{eq}}$ – характерное время роста; l_D – длина диффузионного прыжка;

$\theta_{eq} = \sigma n_{eq}$ – равновесная заполненность поверхности адсорбционными атомами.

Степень заполнения поверхности ПМЗ с учетом уравнения баланса [10] определяется формулой [11]:

$$\psi(t) = 1 - \exp[-g(t)]. \quad (5)$$

Скорость формирования ПМЗ определяется как [12]

$$I(\zeta) = \frac{n_{eq}}{\sigma} \frac{l_D^2}{2\sqrt{\pi t_D}} (\zeta + 1) \ln^{1/2}(\zeta + 1) \exp\left[-\frac{a}{\ln(\zeta + 1)}\right], \quad (6)$$

где $a \equiv 4\sigma \left(\frac{\gamma}{k_B T}\right)^2$ – квадрат безразмерной межфазовой энергии на границе газ – поверхность.

Время заполнения монослоя t_{ML} и скорость вертикального осаждения ПМЗ на поверхность V_S вычисляются по формулам [5]

$$g(t_{ML}) = 1, \quad v_S = \frac{1}{t_{ML}}. \quad (7)$$

Рассмотренные уравнения являются согласованной системой для определения структурных характеристик ПМЗ в зависимости от температуры T , потока J и физических констант λ , E_D и E_A .

Стадия зарождения островков загрязнений. Уравнение материального баланса системы (1) согласно [13] принимает следующий вид:

$$\zeta(t) + G(t) = \frac{1}{\tau_A} \int_0^t dt' [\Phi_{max} - \zeta(t')] - 1, \quad (8)$$

где $G(t) = \frac{g(t)}{\theta_{eq}}$ – количество атомов в агломерате на единицу площади поверхности,

выраженное в равновесной концентрации адсорбционных атомов.

Пересыщение Φ_{max} газообразной фазы определяется как

$$\Phi_{max} = \frac{J\tau_A}{n_{eq}} - 1 = \frac{V_S\tau_A}{\theta_{eq}} - 1 = \frac{v_S}{v_A} \exp\left(\frac{E_A + \lambda}{k_B T}\right) - 1, \quad (9)$$

где v_A – скорость осаждения, определяющая структуру и состав агломерата на поверхности.

Образование ПМЗ – результат процесса адсорбции. Уравнение для идеального пересыщения $\Phi(t)$ при условии $G = 0$ и отсутствии стадии образования имеет вид [14]

$$\Phi(t) = (\Phi_{max} + 1) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_A}\right) \right] - 1. \quad (10)$$

Скорость образования ПМЗ $I(\zeta)$ вблизи точки максимума пересыщения равна:

$$I(\zeta) = I(\Phi^*) \exp\left[-\frac{G_{FT}}{\Phi^*}(\Phi^* - \zeta)\right], \quad (11)$$

где G_{FT} – параметр, по порядку величины равный критическому числу частиц в агломерате i_c классической теории нуклеации при выполнении условия $\zeta = \Phi^*$, где Φ^* – максимальное пересыщение. При больших значениях Φ^* для образования и переноса ПМЗ из газовой среды параметр G_{FT} принимает вид

$$G_{FT} = \frac{\Phi^*}{\Phi^* + 1} \frac{a}{\ln^2(\Phi^* + 1)} = \frac{\Phi^*}{\Phi^* + 1} i_c(\Phi^*) \gg 1. \quad (12)$$

Тогда идеальное пересыщение $\Phi(t)$ из (10) выражается следующей зависимостью:

$$\Phi(t) = \Phi^* + \alpha(t - t^*), \quad \alpha = (\Phi_{\max} - \Phi^*)\tau_A^{-1}, \quad (13)$$

где t^* – среднее время образования агломерата.

Воспользовавшись уравнениями (3) и (4), можно определить размер $r(t', t)$:

$$r(t', t) = \frac{r_0 \Phi^*}{\tau_D} (t - t'). \quad (14)$$

Для области вблизи $t = t^*$ уравнение материального баланса (8) имеет вид

$$\Phi^* - \xi(t) = G(t) - \alpha(t - t^*). \quad (15)$$

Замкнутое интегральное уравнение для $G(t)$, учитывая, что $G(t) = \frac{g(t)}{\theta_{eq}}$, получим из (15), подставив (11) и (14) в выражение (2):

$$G(t) = \frac{I(\Phi^*)}{n_{eq}} \left(\frac{\Phi^*}{\tau_D}\right)^2 \int_{-\infty}^{t-t^*} dt' (t - t^* - t')^2 \exp\left[\frac{t'}{\Delta t} - \frac{G_{FT}}{\Phi^*} G(t')\right], \quad (16)$$

где $\Delta t \equiv \frac{\Phi^*}{G_{FT}\alpha}$.

Тогда выражение для $G(t)$ примет вид

$$G(t) = \frac{\Phi^*}{G_{FT}} \exp\left(\frac{t - t^*}{\Delta t}\right). \quad (17)$$

При определении нормировочной константы в уравнении (17) учтено, что в точке максимума пересыщения $G'(t^*) = \frac{(\Phi_{\max} - \Phi^*)}{\tau_A}$. Отсюда следует

$$\frac{2}{n_{eq}} \Phi^{*2} \frac{(\Delta t)^3}{\tau_D^2} I(\Phi^*) = \frac{\Phi^*}{G_{FT}}. \quad (18)$$

Воспользовавшись выражением (6) для $I(\Phi^*)$ с учетом определений для Δt и τ_D из (18), можно получить следующее уравнение для максимального пересыщения:

$$\frac{2\sqrt{\pi}a(\sqrt{\sigma}/l_D)^2}{\Phi^{*2}(\Phi^*+1)^3 \ln^{9/2}(\Phi^*+1)} \cdot \left(\frac{\Phi_{\max} - \Phi^*}{\Phi_{\max} + 1} \right)^3 \frac{(V_S t_D)^3}{\theta_{eq}^5} \exp\left[\frac{a}{\ln(\Phi^*+1)} \right] = 1. \quad (19)$$

При $a \gg 1$, $\Phi_{\max} \gg 1$ и $\Phi^* \sim 1$ сильно отличающимися по порядку величины от 1 сомножителями в (19) являются малая величина $\frac{(V_S t_D)^3}{\theta_{eq}^5}$ и большая величина экспонента от активационного барьера нуклеации. Первые два сомножителя с логарифмической точностью могут быть положены равными единице. Отсюда следует приближенное решение (19):

$$\Phi^* = \exp\left(\frac{a}{3 \ln Q} \right) - 1, \quad (20)$$

где Q – кинетический контрольный параметр [15], определяемый как

$$Q = \frac{1}{(\Phi_{\max} + 1) Q_{eq}^{1/3}} \frac{\tau_A}{\tau_D} = \frac{\theta_{eq}^{2/3}}{V_S \tau_D} = \frac{\theta_{eq}^{5/3}}{V_S t_D} = \frac{v_D}{V_S} \exp\left(\frac{-(5/3)\lambda - E_D}{k_B T} \right). \quad (21)$$

Областью применимости кинетической теории является выполнение неравенства $3 \ln Q \gg 1$ [15]. Типичные зависимости скорости зарождения и поверхностной плотности островков от времени представлены на рис.1.

Стадия независимого роста островков ПМЗ. В обозначениях размера $\rho = r/r_0 = t^{1/2}$ функция распределения имеет вид [15]

$$f(\rho, t) = cN \exp\left\{ c[\rho - \rho^*(t)] - e^{c[\rho - \rho^*(t)]} \right\}, \quad (22)$$

где $\rho^*(t)$ – средний размер островков, зародившихся при максимальном пересыщении:

$$\rho^*(t) = \frac{1}{\tau_D} \int_0^t dt' \xi(t'). \quad (23)$$

Константа c определяется из условия

$$\int_0^\infty d\rho f(\rho) = \int_0^t dt' I(t'), \quad (24)$$

$$c = \frac{\tau_D}{\Phi^* \Delta t} = (1 - \varepsilon) \frac{G_{FT}}{\Phi^{*2} \theta_{eq}^{1/3} Q}.$$

Тогда для $\Delta\rho$ запишем

$$\Delta\rho \approx \frac{2\sqrt{2}}{c} \propto \frac{1}{V_S} \exp\left(-\frac{2\lambda - E_D}{k_B T} \right). \quad (25)$$

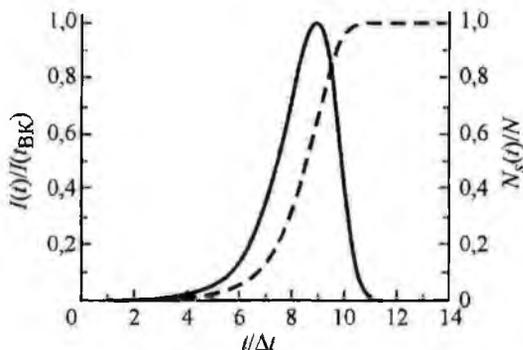


Рис.1. Зависимости скорости зарождения двумерных островков $I/I(\xi^*)$ (сплошная линия) и их поверхностной плотности N_s/N (пунктирная линия) от времени $t/\Delta t$ при $t^*/\Delta t = 9$

Таким образом, $G(t)$ описывается следующей зависимостью:

$$G(t) = \frac{N}{n_{eq}} \rho^{*2}(t). \quad (26)$$

Учитывая, что $\xi(t) \approx \Phi(t)$ при $t \leq t^*$, получаем уравнение для среднего размера агломератов с начальным условием $\rho(t^*) = 0$:

$$\tau_D \frac{d\rho^*}{dt} + \frac{N}{n_{eq}} \rho^{*2} + \frac{\tau_D}{\tau_A} \rho^* = \Phi^* + \frac{\Phi_{\max}}{\tau_A} (t - t^*). \quad (27)$$

Тогда решение уравнения (27) будет выглядеть следующим образом:

$$\rho^*(t) = \rho_0 [U(z) - \delta]. \quad (28)$$

Здесь параметры ρ_0 и δ определяются как

$$\rho_0 \equiv \left(\frac{n_{eq}}{N} \right)^{2/3} \left(\frac{\tau_D}{\tau_A} \Phi_{\max} \right)^{1/3}, \quad \delta = \frac{1}{2^{2/3} (1-\varepsilon)^{2/3} G_{FT}^{1/3}} \frac{\Phi^*}{\Phi_{\max}^{1/3} (\Phi_{\max} + 1)^{2/3}}. \quad (29)$$

Функция $U(z)$ в (27) является отношением линейных комбинаций функций Эйри $Ai(z)$, $Bi(z)$ и их производных и записывается в виде

$$U(z) = \frac{Bi'(z) - k Ai'(z)}{Bi(z) + k Ai(z)}, \quad k = \frac{Bi'(z_0) - \delta Bi(z_0)}{|Ai'(z_0)| + \delta Ai(z_0)}. \quad (30)$$

Переменная z линейно зависит от времени с коэффициентами β и μ :

$$z(t) = \beta \left(1 + \mu + \frac{\Phi_{\max}}{\Phi^*} \frac{(t - t^*)}{\tau_A} \right), \quad (31)$$

$$\beta = \left(\frac{G_{FT}}{2} \right)^{1/3} \left(\frac{\Phi_{\max} + 1}{\Phi_{\max}} \right)^{2/3} (1 - \varepsilon)^{2/3}, \quad \mu = \frac{\varepsilon^2}{2G_{FT}} \left(\frac{\Phi^*}{\Phi^* + 1} \right)^2 \frac{1}{(1 - \varepsilon)^2}. \quad (32)$$

Переменная $z_0 \equiv z(t=0) = \beta(1 + \mu)$.

Результаты решений (27)–(33) при различных параметрах представлены на рис.2.

На рис.3 четко прослеживается эволюция функции распределения островков по размерам на стадии независимого роста для модельной системы.

Трехмерный рост ПМЗ. Формула для степени заполнения поверхности в режиме полной конденсации с учетом $g = \theta_{eq} G$ следует из уравнений (5), (25):

$$\psi(x) = 1 - e^{-x}. \quad (33)$$

Тогда время формирования монослоя ПМЗ определяется как

$$t_{ML} = t^* + \frac{1}{(1 - D)V_S}, \quad (34)$$

где D – безразмерная величина, характеризующая форму агломерата.

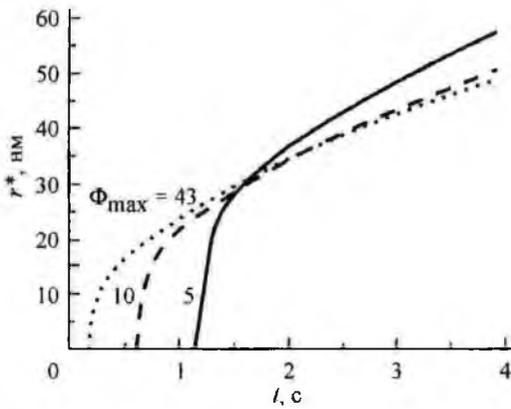


Рис.2. Зависимости от времени t среднего латерального размера агломератов r^* при трех значениях Φ_{\max} , соответствующих различным скоростям осаждения V_S при температуре поверхности $T = 580^\circ\text{C}$

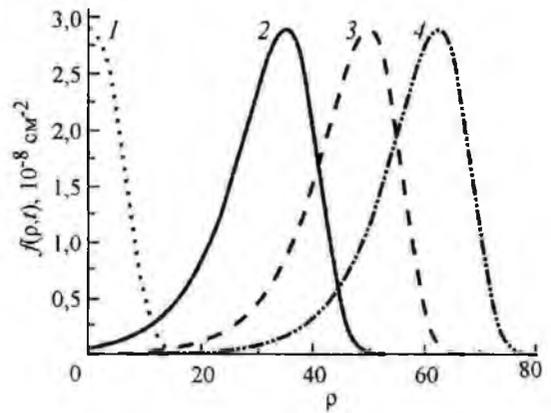


Рис.3. Функция распределения островков по размерам ρ при $t = t^*$ (1), $t^* + 0,5t_g$ (2), $t^* + t_g$ (3) и $t^* + 2t_g$ (4)

Скорость вертикального роста ПМЗ V_S для послойного высокотемпературного роста можно определить из уравнений (7) и (34):

$$V_S = \frac{(1-D)V_S}{1 + (1-D)V_S t^*} \quad (35)$$

При последовательном заполнении k монослоев в момент времени t вероятность обнаружения случайной точки ПМЗ $p_k(t)$ выражается зависимостью [12]:

$$p_k(t) = \psi_k(t) - \psi_{k+1}(t), \quad \psi_0 = 1, \quad (36)$$

где $\psi_k(t)$ – доля заполнения поверхности k -м слоем пленки в момент времени t .

Тогда шероховатость поверхности $R(t)$ агломерата и средняя толщина $H(t)$ определяются выражениями [15, 16]:

$$R^2(t) = \sum_{k \geq 1} k^2 p_k(t) - H^2(t), \quad H(t) = \sum_{k \geq 1} k p_k(t).$$

Два предельных случая показаны на рис.4.

Заключение. В результате развития теории ростового процесса ПМЗ можно сформулировать основные физические аспекты механизма зарождения и переноса ПМЗ.

На стадии нуклеации двумерных островков, проходящей в очень узком интервале времени, формируется функция распределения островков по размерам. Поверхностная плотность островков достигает своего максимума по окончании стадии нуклеации, остается неизменной на стадии изолированного роста островков и уменьшается лишь после начала коалес-

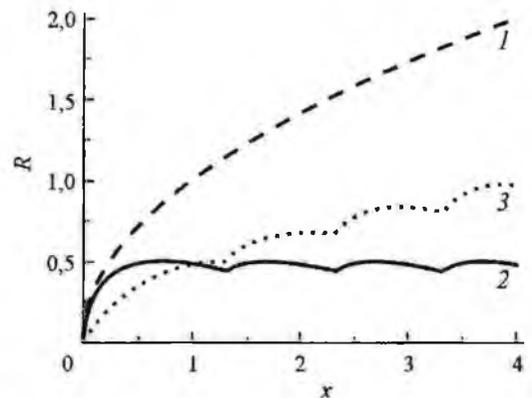


Рис.4. Зависимость шероховатости R от безразмерного времени x (в единицах времени роста монослоя): 1 – низкотемпературный полислойный рост; 2 – высокотемпературный послойный рост; 3 – промежуточный режим

ценции. Плотность островков увеличивается, а их размер уменьшается при понижении температуры поверхности и увеличении скорости осаждения. На стадии изолированного роста островков распределение островков по размерам не меняет своей формы, а как единое целое перемещается по оси размеров. Разброс по размерам уменьшается с увеличением скорости осаждения и с понижением температуры поверхности. При низкотемпературном полислоном росте формируется пуассоновский рельеф поверхности, для которого квадрат шероховатости равен средней высоте, и обе эти величины растут пропорционально времени осаждения. В промежуточном режиме шероховатость поверхности имеет вид функции, пропорциональной $t^{1/2}$ с наложенными на нее осцилляциями.

Литература

1. Колмогоров А.Н. К статистической теории кристаллизации металлов // Изв. АН СССР. Сер. матем. – 1937. – 1:3. – С. 355–359. – URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/izv/v1/i3/p355> (дата обращения 16.02.2016).
2. Куні F.M. The Kinetics of Condensation under the Dynamical Conditions // Preprint IPT-84-178E – Kiev, 1984 (Institute of Theoretical Physics).
3. Куні Ф.М., Гринин А.П. Кинетика гомогенной конденсации на этапе образования основной массы новой фазы // Коллоидный журнал. – 1984. – Т. 46. – № 3. – С. 460–465.
4. Binder K. Theory for the dynamics of «clusters.» II. Critical diffusion*in binary systems and the kinetics of phase separation // Phys. Rev. B. – 1977. – Vol. 15. – P. 4425–4447.
5. Kashchiev D. Growth kinetics of dislocation-free interfaces and growth mode of thin films // J. Cryst. Growth. – 1977. – Vol. 40. – P. 29–46.
6. Бельский В.З. Геометрико-вероятностные модели кристаллизации. – М.: Наука, 1980. – 80 с. – URL: <http://www.twirpx.com/file/624512> (дата обращения 16.02.2016).
7. Трофимов В.И., Осадченко В.А. Рост и морфология тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 271 с.
8. Dubrovskii V.G. Nucleation and Growth of Adsorbed Layer Self-Consistent Approach Based on Kolmogoroff-Avrami Model // Phys. Status Solidi B. – 1992. – Vol. 171. – P. 345.
9. Севрюкова Е.А. Моделирование коагуляции высокой концентрации аэрозолей // Сб. материалов 4-й Междунар. науч.-практической конф. «Европейская наука и технологии» (Мюнхен, Германия, 2013). – 2013. – С. 716–718.
10. Чернов А.А., Гиваргизов Е.И., Багдасаров Х.С. Современная кристаллография. Т3. Образование кристаллов. – М.: Наука, 1980. – 407 с.
11. Лившиц И.М., Слезов В.В. О кинетике диффузионного распада пересыщенных твердых растворов // ЖЭТФ. – 1958. – Т. 35. – №2. – С. 479–487.
12. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. – 1998. – Т. 32. – № 3. – С. 111.
13. Кукушкин С.А., Осипов А.В. Кинетика образования новой фазы на поверхностях твердых тел // ФТТ. – 1996. – Т.38. – N2. – С. 443–451.
14. Севрюкова Е.А. Модели коагуляции и механизм роста агломератов в чистых помещениях микроразработки // Прикладная физика. – 2012. – №5. – С. 37–41.
15. Дубровский В.Г., Цырлин Г.Э. Динамика роста однокомпонентной кристаллической тонкой пленки // ЖТФ. – 1997. – Т. 67. – Вып. 11. – С. 136–138.
16. Севрюкова Е.А., Кузьмишкин Г.С. Анализ влияния молекулярных аэрозольных загрязнений в чистых помещениях нано- и микроразработки // Инфраструктура объектов природно-технических геосистем: сб. научн. тр. / Под ред. Каракеяна В.И. – М.: МИЭТ. – 2013. – С. 53–60.

Статья поступила 16 февраля 2016 г.

Севрюкова Елена Александровна – кандидат технических наук, зав. кафедрой промышленной экологии МИЭТ. *Область научных интересов:* чистые помещения.
E-mail: melaly@ Rambler.ru

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

УДК 538.935

Моделирование переходного тока в неоднородных органических полупроводниковых системах

Е.В. Морозова, В.В. Шулежко

Ульяновский государственный университет

Simulation of Transient Current in Nonhomogeneous Organic Semiconductor Systems

E.V. Morozova, V.V. Shulezhko

Ulyanovsk State University

Исследовано влияние различных факторов на электронный транспорт в органических полупроводниковых системах в условиях времяпротлетного эксперимента. Для оценки влияния на кинетику фототока таких факторов, как плотность состояний, морфология областей перколяции, наличие дефектных слоев, неоднородность электрического поля и других, применяется эффективный алгоритм Монте-Карло. Алгоритм основан на интерпретации переходного тока в качестве плотности обобщенного случайного процесса восстановления. Выполнены пробные расчеты для некоторых многослойных структур.

Ключевые слова: органические полупроводники; переходный ток; времяпротлетный эксперимент; рекомбинация; алгоритм Монте-Карло.

The influence of many factors on the electronic transport in organic semiconductor systems in conditions of the time-spacing experiment has been studied. For estimating the influence on the photo current kinetics of such factors, as the density states, the morphology of the percolation regions, the existence of defect layers, the nonhomogeneity of electric field, etc., the efficient Monte-Carlo algorithm, based on the interpretation of transient current as a density of the generalized random recovery process, has been applied. The test calculations for some multilayer structures have been made.

Keywords: organic semiconductors; transient current; time-spacing experiment; recombination; Monte-Carlo algorithm.

Введение. Исследование переноса и рекомбинации в органических полупроводниковых системах актуально с точки зрения применения этих материалов в светоизлу-

чающих диодах, фотоэлементах, полевых транзисторах [1, 2]. В последние годы активно исследуются элементы на основе объемного гетероперехода, для реализации которых используется донорно-акцепторный композит полимера (донор) с акцепторным материалом, например поли[3-гексилтиофен] и высокорастворимый метанофуллерен C60 (РЗНТ:РСВМ) [1]. Несмотря на существенный прогресс в повышении КПД, ведутся активные дискуссии о корректности описания механизмов генерации носителей, рекомбинации и накопления заряда [2]. Рассматриваемые системы характеризуются электронным и структурным беспорядком, приводящим к распределению энергии состояний, доступных для неравновесных электронов и дырок. Перенос электронов и дырок осуществляется по разделенным областям трехмерного гетероперехода, рекомбинация происходит в основном на границах этих областей [3].

Для исследования электронного переноса в полупроводниках с низкой проводимостью применяется времяпролетный эксперимент (ВПЭ). Данный метод активно используется для изучения элементов на основе полимерных смесей [2]. С помощью ВПЭ исследуется отклик фототока после инжекции неравновесных носителей коротким импульсом света со стороны прозрачного электрода. Обычно к образцу прикладывается сильное электрическое поле (более 10^5 В/см), близкое к условиям диэлектрического пробоя, для того чтобы исключить эффекты объемного заряда и уменьшить вклад диффузии носителей в наблюдаемый отклик. В работе [4] предложена модификация ВПЭ для изучения переноса заряда в полимерных материалах с использованием пучка электронов высокой (настраиваемой) энергии для генерации неравновесных носителей заряда в объеме образца. Варьируя значениями энергии электронов, можно непрерывно изменять ширину области генерации. Авторы работы [5] использовали данный метод для анализа поверхностного слоя полимерного материала.

Актуальной остается правильная интерпретация результатов ВПЭ в неоднородных структурах, поскольку кинетику фототока определяет не только плотность состояний, но и морфология областей перколяции, наличие дефектных слоев, неоднородность электрического поля, рекомбинация и другие факторы. В настоящей работе для оценки влияния на кинетику фототока различных факторов используется эффективный алгоритм расчета переходного тока в неоднородных структурах – метод Монте-Карло.

Моделирование переходного тока. Вследствие неупорядоченности перенос в органических полупроводниках определяется широким разбросом темпов перехода между локализованными состояниями. Для описания дисперсионной диффузии-дрейфа электронов и дырок в работах [6, 7] рассматриваются уравнения типа

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t p(x, t - \tau) \Phi_p(\tau) e^{-\gamma_p \tau} d\tau + \frac{\partial}{\partial x} [\mu_p(x) E(x) p(x, t)] - \frac{\partial}{\partial x} \left[D(x) \frac{\partial}{\partial x} p(x, t) \right] = \\ & = [G(x) - \beta p(x, t) n(x, t)] \Phi_p(t), \\ & \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t n(x, t - \tau) \Phi_n(\tau) e^{-\gamma_n \tau} d\tau + \frac{\partial}{\partial x} [\mu_n(x) E(x) n(x, t)] - \frac{\partial}{\partial x} \left[D(x) \frac{\partial}{\partial x} n(x, t) \right] = \\ & = [G(x) - \beta p(x, t) n(x, t)] \Phi_n(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где n , p – соответственно концентрации электронов и дырок; $\Phi(t)$ – ядро запаздывания, вызванного распределением темпов перехода между локализованными состояниями; μ , D – соответственно подвижность и коэффициент диффузии вблизи транспортного уровня; $G(x)$ – функция генерации электронно-дырочных пар; γ – коэффициент

мономолекулярной рекомбинации локализованных носителей; β – коэффициент бимолекулярной рекомбинации (далее $\beta = 0$).

Механизм переноса определяет вид ядра $\Phi(t)$ интегрального уравнения, коэффициенты диффузии и адвекции. В модели случайных блужданий с непрерывным временем [8] образ Лапласа этого ядра связан с образами функции $\Psi(t)$ и плотности $\psi(t)$ распределения времен ожидания соотношением $\tilde{\Phi}(s) = \tilde{\Psi}(s) / \tilde{\psi}(s)$. При переносе, контролируемом захватом на распределенные по энергии локализованные состояния (модель многократного захвата – multiple trapping (MT)) [9], ядро имеет вид

$$\Phi_{MT}(t) = \delta(t) + \int_0^\infty \omega_\varepsilon \exp\left\{-\omega_\varepsilon t \frac{N_f}{N_t} e^{-\varepsilon/kT}\right\} \rho(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Здесь ω_ε – темп захвата; N_f и N_t – концентрации подвижных и локализованных состояний соответственно; $\rho(\varepsilon)$ – плотность локализованных состояний (ПЛС).

Для экспоненциальной ПЛС $\rho(\varepsilon) \propto e^{-\varepsilon/\varepsilon_0}$ в случае слабой зависимости ω_ε от ε ($\omega_\varepsilon \approx \omega_0$) ядро имеет степенной вид

$$\begin{aligned} \Phi_{MT}(t) &= \delta(t) + \omega_0 \frac{(c_\alpha t)^{-\alpha}}{\Gamma(1-\alpha)}, \\ c_\alpha &= \frac{\omega_0 N_f}{N_t} \left(\frac{\sin \pi \alpha}{\pi \alpha}\right)^{1/\alpha}, \quad \alpha = \frac{kT}{\varepsilon_0}. \end{aligned} \tag{2}$$

Уравнение (2) может быть получено в рамках модели случайных блужданий с непрерывным временем. В таких моделях решение в терминах преобразования Фурье–Лапласа имеет вид

$$\tilde{p}(k, s) = \frac{\tilde{\Psi}(s)\tilde{G}(k)}{1 - \tilde{\rho}(k)\tilde{\psi}(s)}.$$

Преобразование плотности тока проводимости определяется выражением

$$\tilde{j}(k, s) = e \frac{\tilde{\Psi}(s)}{\tilde{\Psi}(s)} [\omega_+ \tilde{\rho}_+(-ik) + \omega_- \tilde{\rho}_-(ik)] \tilde{p}(k, s) = e \frac{\tilde{\Psi}(s)}{\tilde{\Psi}(s)} [\omega_+ \tilde{\rho}_+(-ik) + \omega_- \tilde{\rho}_-(ik)] \frac{\tilde{\Psi}(s)\tilde{G}(k)}{1 - \tilde{\rho}(k)\tilde{\psi}(s)}$$

и удовлетворяет уравнению

$$[1 - \tilde{\rho}(k)\tilde{\psi}(s)] \tilde{j}(k, s) = e [\omega_+ \tilde{\rho}_+(-ik) + \omega_- \tilde{\rho}_-(ik)] \tilde{\psi}(s)\tilde{G}(k).$$

В асимптотике малых k полагаем $\tilde{\rho}(k) \sim 1 + i l k - \theta k^2/2$, где l и θ – соответственно первый и второй моменты смещения. Тогда

$$\tilde{j}(k, s) + [i l k + \theta k^2/2] \tilde{\psi}(s)\tilde{j}(k, s) = \tilde{\psi}(s)\tilde{j}(k, s) + e(l - i \theta k/2) \tilde{\psi}(s)\tilde{G}(k).$$

Обратное преобразование Фурье–Лапласа приводит к уравнению

$$j(x, t) + \int_0^t \psi(t-\tau) \left[l \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\theta}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] j(x, \tau) d\tau = \int_0^t \psi(t-\tau) j(x, \tau) d\tau + \psi(t) e l G(x) + \psi(t) e \frac{\theta}{2} \frac{\partial G(x)}{\partial x}.$$

Интегрируя по x от 0 до L (толщина образца), приходим к уравнению для переходного тока $I(t) = \frac{1}{L} \int_0^L j(x, t) dx$. Для более наглядной интерпретации положим $\theta = 0$ и $G(x) = \delta(x)$. В результате получим

$$I(t) + \frac{1}{L} \int_0^t \psi(t - \tau) [j(L, \tau) - j(0, \tau)] d\tau = \int_0^t \psi(t - \tau) \nu(\tau) d\tau + \frac{1}{L} \psi(t). \quad (3)$$

Если $L \rightarrow \infty$ и $l/L = 1$, получаем уравнение процесса восстановления:

$$I(t) = \int_0^t \psi(t - \tau) \nu(\tau) d\tau + \psi(t),$$

где переходный ток $I(t)$ можно интерпретировать как плотность процесса восстановления: $I(t)dt$ с точностью до множителя представляет собой вероятность того, что событие восстановления имело место в интервале времени $(t, t + dt)$.

Событие восстановления ассоциируется с переходом носителя из одного локализованного состояния в другое. Каждый такой переход дает вклад, пропорциональный дрейфовой скорости V , в плотность переходного тока в соответствующий интервал времени. Второе слагаемое в правой части уравнения (3) связано с инжекцией носителей и их выходом из образца.

Значение $V = \mu E$ в неоднородной структуре зависит от координаты, поэтому вес, приписываемый событию восстановления, зависит от слоя, в котором произошло это событие. Среднее число перескоков в каждом из слоев равно d_i/l_i , где d_i – толщина слоя, l_i – средняя длина пробега в нем, зависящая от концентрации ловушек ($V_i \propto l_i$). По сути вычисление тока сводится к моделированию одномерного неоднородного случайного блуждания. Кривые переходного тока, рассчитанные с помощью алгоритма, приведены на рис.1, сравнение аналитических решений с экспериментальными – на рис.2.

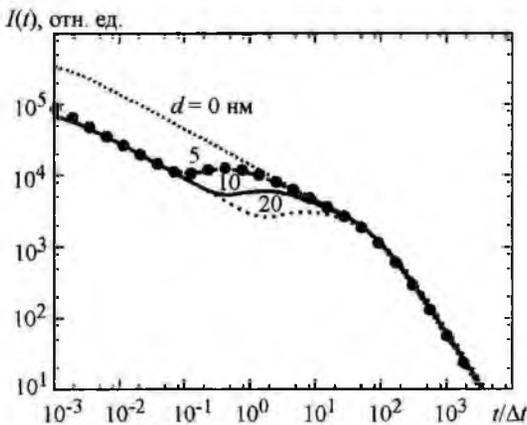


Рис.1. Зависимость $I(t)$ для разных значений d при $L = 500$ нм: точки – аналитическое решение (4); линии – результат алгоритма Монте-Карло

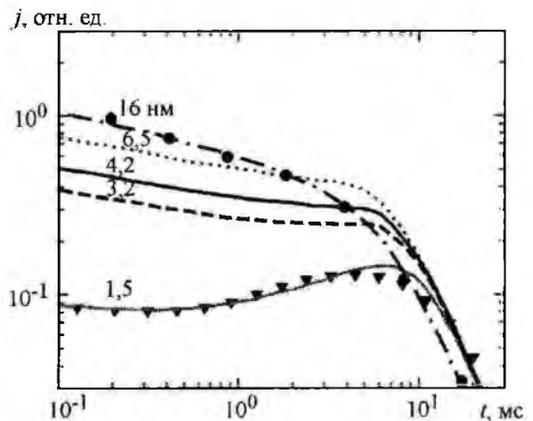


Рис.2. Зависимость $j(t)$ при разных значениях ширины области генерации при $L = 500$ нм: точки и треугольники – аналитическое решение; линии – экспериментальные данные [5]

Переходный ток в многослойных структурах. Перенос в многослойных структурах в условиях ВПЭ может быть рассмотрен с помощью решения уравнения (1) в каждом из слоев и сшивания решений на границах. В работе [9], пренебрегая барьерными эффектами и диффузионным слагаемым, получены выражения для переходного тока. В частном случае ПЛС экспоненциальная, дисперсионный параметр $\alpha = 1/2$, поверхностная инжекция $G(\xi) = N\delta(\xi)$. Выражение в элементарных функциях имеет вид

$$\tilde{I}(s) = \frac{a_1 N}{L\sqrt{\pi t}} \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{4a_1^2 t}\right) \right] + \frac{a_2 N}{L\sqrt{\pi t}} \left\{ \exp\left(-\frac{d^2}{4a_1^2 t}\right) - \exp\left[-\frac{1}{4t} \left(\frac{L-d}{a_2} + \frac{d}{a_1}\right)^2\right] \right\}, \quad (4)$$

где a_1, a_2 – константы для слоев, пропорциональные V_1 и V_2 ; d – толщина первого слоя; N – поверхностная концентрация инжектируемых неравновесных носителей. Два слагаемых соответствуют токам в первом и втором слоях.

График функции (4) в отличие от случая $d = 0$ может иметь пик (см. рис.1 и 2). Появление максимума связано с вкладом колоколообразной зависимости переходного тока $I_2(t)$ во втором слое. Аналогичное поведение переходного тока описано для структуры аморфный полупроводник – кристаллический полупроводник (a -Se₉₅As₅ – c -CdSe) в работе [10]. На рис.3 представлены расчетные кривые переходного тока для трехслойной и четырехслойной структур.

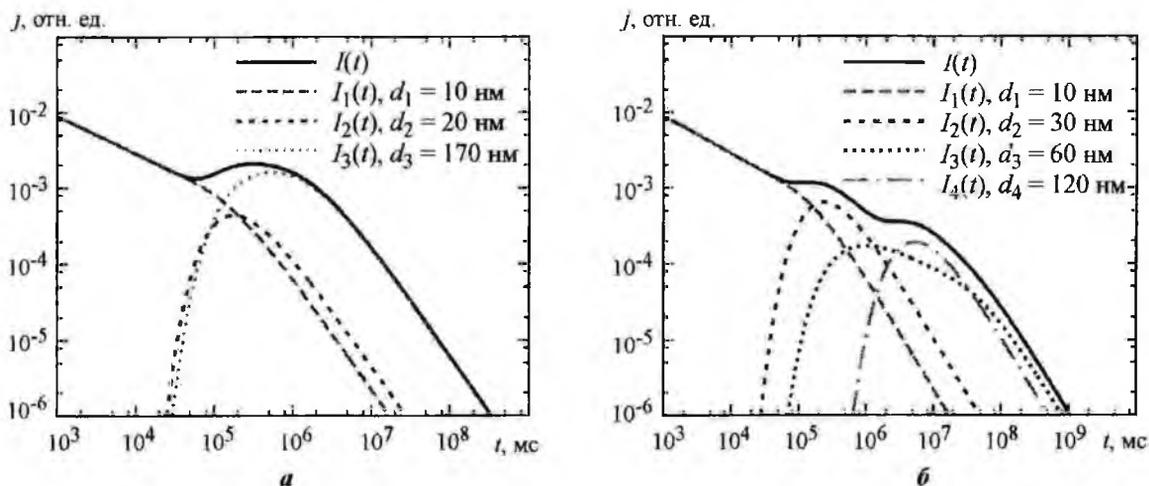


Рис.3. Кривые переходного тока в трехслойной (а) и четырехслойной (б) структурах с экспоненциальной ПЛС при $L = 200$ нм (I_i – ток в i -ом слое)

Заключение. С помощью эффективного алгоритма Монте-Карло, основанного на интерпретации тока смещения как плотности обобщенного случайного процесса восстановления, рассчитан переходный фототок в неоднородных структурах в условиях ВПЭ.

Выполненные пробные расчеты для некоторых многослойных структур подтверждают корректность алгоритма.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-01-99674А) и Минобрнауки РФ в рамках государственного задания 2014/296.

Литература

1. **Günes S., Neugebauer H., Sariciftci N. S.** Conjugated polymer-based organic solar cells // *Chemical Reviews*. – 2007. – Vol. 107. – N. 4. – P. 1324–1338.
2. **MacKenzie R. C., Shuttle C.G., Chabinyc M.L.** Extracting microscopic device parameters from transient photocurrent measurements of P3HT: PCBM solar cells // *Advanced Energy Materials*. – 2012. – Vol. 2. – N. 6. – P. 662–669.
3. **Street R. A.** Localized state distribution and its effect on recombination in organic solar cells // *Physical Review B*. – 2011. – Vol. 84. – N. 7. – P. 075208-1–075208-12.
4. **Tyutnev A.P., Saenko V.S., Pozhidaev E.D.** Verification of the dispersive charge transport in a hydrazone: polycarbonate molecularly doped polymer // *J. of Physics: Condensed Matter*. – 2009. – Vol. 21. – N. 11 – P. 115107-1–115107-7.
5. **Dunlap D.H., Schein L.B., Tyutnev A.P.** Two-layer multiple trapping model for universal current transients in molecularly doped polymers // *J. of Physical Chemistry C*. – 2010. – Vol. 114. – N. 19 – P. 9076–9088.
6. **Sibatov R. T., Uchaikin V. V.** Fractional differential kinetics of charge transport in unordered semiconductors // *Semiconductors*. – 2007. – Vol. 41. – N. 3. – P. 335–340.
7. **Sibatov R. T., Uchaikin V. V.** Dispersive transport of charge carriers in disordered nanostructured materials // *J. of Computational Physics*. – 2015. – N. 293. – P. 409–426.
8. **Scher H., Montroll E. W.** Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids // *Physical Review B*. – 1975. – Vol. 12. – N. 6. – P. 2455–2477.
9. **Sibatov R. T., Morozova E. V.** Multiple trapping on a comb structure as a model of electron transport in disordered nanostructured semiconductors // *J. of Experimental and Theoretical Physics*. – 2015. – Vol. 120. – N. 5. – P. 860–870.
10. **Казакова Л. П., Лебедев Э. А.** Переходный фототок в структурах аморфный, пористый полупроводник – кристаллический полупроводник // *ФТП*. – 1998. – Т. 32. – № 2. – С. 187–191.

Статья поступила
25 мая 2016 г.

Морозова Екатерина Владимировна – аспирант кафедры теоретической физики Ульяновского государственного университета (УлГУ). *Область научных интересов:* теория аномальной диффузии, моделирование методом Монте-Карло, перенос в неупорядоченных консолидированных полупроводниковых системах.

Шулежко Вадим Владимирович – аспирант кафедры теоретической физики УлГУ. *Область научных интересов:* теория аномальной диффузии, моделирование методом Монте-Карло, перенос в неупорядоченных полупроводниковых материалах. E-mail: vadim_uln@mail.ru

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2013 гг. доступны на сайте
Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru