

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И СИГНАЛОВ

УДК 51-73

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЫСОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОСТА ТОНКИХ ПЛЕНОК НА ПОДЛОЖКАХ

Тарасенко Е.О., Гладков А.В.

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, РФ

E-mail: galail@mail.ru

В работе рассмотрены вопросы математического моделирования диффузионного роста тонких пленок на подложках. Особое внимание уделено решению обратных задач, возникающих в рамках исследуемой модели. Представлено аналитическое и численное решение краевой задачи о восстановлении высоты расположения источника атомов пленки, оседающих на подложку. Проведенное исследование имеет большое практическое значение и может быть применено в микроэлектронике, создании сверхбольших интегральных схем.

Ключевые слова: Тонкая пленка, подложка, диффузия, высота источника, математическое моделирование.

Процесс роста тонких пленок на подложках представляет собой сложное физическое явление, подробно не изученное до настоящего времени, несмотря на многочисленные исследования российских и зарубежных ученых на протяжении последних десятилетий. Для описания данного процесса используются дифференциальные и интегральные уравнения, теория функций комплексного переменного, операционное исчисление, теория случайных процессов, математическая статистика, численные методы. Изучение процесса роста тонких пленок на подложках требует постановки и исследования различных прямых и обратных задач. В статье представлено аналитическое и численное решение краевой задачи о восстановлении высоты расположения источника атомов пленки, порождаемой диффузионной моделью роста тонких пленок на подложках.

Основу прикладных математических моделей очень часто составляют дифференциальные уравнения с частными производными. Наиболее важными для приложений являются уравнения второго порядка. Краевая задача для уравнения с частными производными состоит в том, чтобы найти функцию или систему функций, удовлетворяющих в заданной области некоторому дифференциальному уравнению или системе уравнений, а на границе области и в начальный момент времени – заданным условиям [3]. Таким образом, краевая задача характеризуется заданием самого уравнения, области определения решения, граничных и начальных условий. Модели такого вида появились в математике в конце XVIII века и связаны с именами Л. Эйлера и П. Лапласа.

При описании процесса диффузии атомов пленки используется уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x_1} + w \frac{\partial q}{\partial x_3} + \alpha q = \\ = \frac{\partial}{\partial x_1} K_{x_1} \frac{\partial q}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} K_{x_2} \frac{\partial q}{\partial x_2} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_3} K_{x_3} \frac{\partial q}{\partial x_3} + f, \end{aligned} \quad (1)$$

где q – концентрация атомов пленки; u – скорость горизонтального переноса (направленная вдоль оси Ox_1); K_{x_1} , K_{x_2} , K_{x_3} – коэффициенты диффузии; w – скорость гравитационного оседания атомов пленки на подстилающую поверхность; α – коэффициент, характеризующий взаимодействие частиц атомов пленки с окружающей средой; f – мощность источника атомов пленки.

Так как вектор горизонтального переноса и коэффициенты диффузии задаются в виде эмпирических формул, то уравнение (1) принято называть полуэмпирическим уравнением диффузии. Это уравнение, согласно классификации линейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, относится к уравнениям параболического типа.

Для описания процесса диффузии атомов вещества при адсорбционно-десорбционном процессе от мгновенного точечного источника на подложку предлагается использовать начально-граничную задачу [2]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} + \alpha q + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} K_{ij} \frac{\partial q}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

$$q(t_0, x_1, x_2, x_3) = Q \delta(x_1 - x_1^0) \times \delta(x_2 - x_2^0) \delta(x_3 - x_3^0); \quad (3)$$

$$t \in [t_0, T], \quad K_{33} \frac{\partial q}{\partial x_3} \Big|_{x_3=x_3^0} = 0, \quad t > t_0, \quad (4)$$

если атомы вещества отражаются от подложки, находящейся на высоте x_3^0 ;

или начально-граничную задачу (2)-(3):

$$q(t, x_1, x_2, x_3) \Big|_{x_3=x_3^0} = 0, \quad t > t_0, \quad (5)$$

если вещество полностью поглощается подложкой;

а также начально-граничную задачу (2)-(3):

$$\left\{ K_{33} \frac{\partial q}{\partial x_3} + \varpi q \right\} \Big|_{x_3=x_3^0} = \{ \nu_s q \} \Big|_{x_3=x_3^0}, \quad (6)$$

если вещество частично отражается и частично поглощается подложкой. Здесь Q – мощность мгновенного источника атомов пленки, действовавшего в момент времени t_0 в точке (x_0, y_0, z_0) (то есть количество вещества, выброшенного источником в момент времени t_0); δ – дельта-функция Дирака; ϖ – скорость гравитационного оседания атомов пленки на подстилающую поверхность; ν_s – результирующая скорость осаждения атомов пленки на подложку.

Равенство (6) показывает, что поток примеси на подложку складывается из двух составляющих: диффузионного потока $\left\{ K_{33} \frac{\partial q}{\partial x_3} \right\} \Big|_{x_3=x_3^0}$ и гравитационного потока $\{ \varpi q \} \Big|_{x_3=x_3^0}$. Граничное условие (4) означает, что граница полностью отражает вещество, (5) – полностью его поглощает, а (6) – частично отражает и частично поглощает.

Средние значения концентрации атомов пленки на подложке от мгновенного точечного источника при условиях полного отражения атомов пленки от подложки $z = 0$ можно задать формулой

$$\frac{\partial q(t, x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (7)$$

(в этом случае пленочная структура на подложке не образуется) или полного поглощения (в этом случае пленка образуется на подложке),

$$q(t, x, y, 0) = 0 \quad (8)$$

атомов пленки подложкой. Они имеют соответственно вид:

$$q_2(t, x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z t^3} \times \exp \left\{ - \left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t} \right) \right\} \times \quad (9)$$

$$\times \left[\exp \left\{ - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} + \exp \left\{ - \frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} \right],$$

$$q_3(t, x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z t^3} \times \exp \left\{ - \left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t} \right) \right\} \times \quad (10)$$

$$\times \left[\exp \left\{ - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} - \exp \left\{ - \frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} \right].$$

Интегрируя равенства (9)-(10) по t в пределах от 0 до ∞ , получим формулы для расчета $q_2(x, y, z)$, $q_3(x, y, z)$ от стационарного точечного источника непрерывного действия, расположенного в точке $(0, 0, H)$:

$$q_i(x, y, z) = \int_0^\infty q_i(t, x, y, z) dt, \quad i = 2, 3.$$

Соотношения (9)-(10) используются для решения обратных задач в рамках математических моделей образования тонких пленок на подложках от мгновенного точечного источника (2)-(4); (2)-(3), (5).

Рассмотрим краевую задачу о восстановлении высоты расположения источника в рамках математической модели роста тонкой пленки на подложке.

Задача. По известным средним значениям концентрации $q_2(t, x, y, z)$ атомов пленки на подложке от мгновенного точечного источника при условии их полного отражения от подложки или по известным средним значениям концентрации $q_3(t, x, y, z)$ атомов пленки на подложке от мгновенного точечного источника при условии полного поглощения атомов пленки подложкой, а также по заданной мощности источника атомов пленки Q и известным $\sigma_x^2(t)$, $\sigma_y^2(t)$, $\sigma_z^2(t)$ – дисперсиям координат атомов пленки соответственно вдоль осей Ox , Oy , Oz в момент времени t , определить неизвестную высоту источника атомов пленки H .

Методами решения трансцендентных уравнений, например методом простой итерации [1], построим решение поставленной задачи.

А) Приближенный способ решения задачи (в случае полного отражения атомов пленки

подложкой) основан на использовании метода простой итерации. Предполагаем, что известен интервал $[a, b]$ (a и b находим, например методом подбора), в котором находится требуемый корень H уравнения как (10). В случае анизотропной среды (при условии полного отражения атомов пленки от подложки) равенство (9) перепишем как (11). Последовательные

приближения к искомому корню будем находить по итерационной формуле (12). В случае изотропной среды (при условии полного отражения атомов пленки от подложки) полагают $\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x$, тогда из (9) получим (13). Последовательные приближения к искомому корню в этом случае будем находить по итерационной формуле (14).

$$q_2(t, x, y, z) - \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z t^3} \exp\left\{-\left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)\right\} \left[\exp\left\{-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\} \right] = 0. \quad (10)$$

$$H = \sigma_z \sqrt{-2t \times \ln \left(\frac{\left(\frac{q_2(t, x, y, z)(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z t^3}{Q} \right) \times \exp\left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)}{-\exp\left\{-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}} \right)} - z. \quad (11)$$

$$H^{(n+1)} = \sigma_z \sqrt{-2t \times \ln \left(\frac{\left(\frac{q_2(t, x, y, z)(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z t^3}{Q} \right) \times \exp\left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)}{-\exp\left\{-\frac{(z - H^{(n)})^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}} \right)} - z. \quad (12)$$

$$H = \sigma_z \sqrt{-2t \times \ln \left(\frac{\left(\frac{q_2(t, x, y, z)(2\pi)^{3/2} \sigma_z^3 t^3}{Q} \right) \times \exp\left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_z^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)}{-\exp\left\{-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}} \right)} - z. \quad (13)$$

$$H^{(n+1)} = \sigma_z \sqrt{-2t \times \ln \left(\frac{\left(\frac{q_2(t, x, y, z)(2\pi)^{3/2} \sigma_z^3 t^3}{Q} \right) \times \exp\left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_z^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t}\right)}{-\exp\left\{-\frac{(z - H^{(n)})^2}{2\sigma_z^2 t}\right\}} \right)} - z. \quad (14)$$

В качестве первого приближения $H^{(1)}$ к искомому корню (первая итерация) можно принять любое значение H из отрезка изоляции корня $[a, b]$. Критерий окончания процесса вычислений – выполнение неравенства $|H^{(n)} - H^{(n-1)}| < \varepsilon$, где ε – желаемая погрешность.

Б) Приближенный способ решения задачи (в случае полного поглощения атомов пленки подложкой) основан на использовании метода простой итерации. Предполагаем, что известен интервал $[a, b]$ (a и b находим, например методом подбора), в котором находится требуемый корень H уравнения (15). В случае анизотропной среды (при условии полного поглощения атомов пленки подложкой) равенство (10) перепишем в виде (16).

Последовательные приближения к искомому корню будем находить по итерационной формуле (17).

В случае изотропной среды (при условии полного поглощения атомов пленки подложкой) полагают $\sigma_z = \sigma_y = \sigma_x$, тогда из (10) получим выражение (18). Последовательные приближения к искомому корню в этом случае будем находить по итерационной формуле (19). В качестве первого приближения $H^{(1)}$ к искомому корню (первая итерация) можно принять любое значение H из отрезка изоляции корня $[a, b]$. Критерий окончания процесса вычислений – выполнение неравенства

$$|H^{(n)} - H^{(n-1)}| < \varepsilon,$$

где ε – желаемая погрешность.

$$q_3(t, x, y, z) - \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z t^3} \exp \left\{ - \left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t} \right) \right\} \left[\exp \left\{ - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} - \exp \left\{ - \frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} \right] = 0. \quad (15)$$

$$H = \sigma_z \sqrt{ - 2t \times \ln \left(\frac{q_3(t, x, y, z) (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z t^3}{Q} \right) \times \exp \left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t} \right) + \exp \left\{ - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} } - z. \quad (16)$$

$$H^{(n+1)} = \sigma_z \sqrt{ - 2t \times \ln \left(\frac{q_3(t, x, y, z) (2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z t^3}{Q} \right) \times \exp \left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t} \right) + \exp \left\{ - \frac{(z - H^{(n)})^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} } - z. \quad (17)$$

$$H = \sigma_z \sqrt{ - 2t \times \ln \left(\frac{q_3(t, x, y, z) (2\pi)^{3/2} \sigma_z^3 t^3}{Q} \right) \times \exp \left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t} \right) + \exp \left\{ - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} } - z. \quad (18)$$

$$H^{(n+1)} = \sigma_z \sqrt{ - 2t \times \ln \left(\frac{q_3(t, x, y, z) (2\pi)^{3/2} \sigma_z^3 t^3}{Q} \right) \times \exp \left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t} \right) + \exp \left\{ - \frac{(z - H^{(n)})^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} } - z. \quad (19)$$

$$H = \sigma_z \sqrt{ - 2t \times \ln \left(\frac{q_3(t, x, y, z) (2\pi)^{3/2} \sigma_z^3 t^3}{Q} \right) \times \exp \left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t} \right) + \exp \left\{ - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} } - z. \quad (20)$$

$$H^{(n+1)} = \sigma_z \sqrt{ - 2t \times \ln \left(\frac{q_3(t, x, y, z) (2\pi)^{3/2} \sigma_z^3 t^3}{Q} \right) \times \exp \left(\frac{(x - \bar{U}t)^2}{2\sigma_x^2 t} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2 t} \right) + \exp \left\{ - \frac{(z - H^{(n)})^2}{2\sigma_z^2 t} \right\} } - z. \quad (21)$$

Пример. Экспериментальные данные, взятые из официального сайта ООО НПФ «Микротехнология» [4] и содержащие информацию о росте пленки висмута на алюминиевой подложке, количестве атомов пленки, мощности источника атомов пленки в точке (2; 2; 3) в моменты времени $t \in [0, 60]$ с, значения дисперсии координат атомов пленки $\sigma_z = 2,658234846$ вдоль оси Oz , приведены в таблице 1.

Средняя скорость вектора горизонтального переноса $\vec{u}(t) = 0,5$, среда изотропна, атомы пленки полностью поглощаются подложкой (образуется пленка висмута на алюминиевой подложке). Вычислить высоту источника атомов пленки H .

Учитывая, что среда изотропна из (10), получим (20). Последовательные приближения к искомому корню в этом случае будем находить по итерационной формуле (21).

Таблица 1. Количество атомов висмута на алюминиевой подложке и мощности источника атомов пленки в точке (2, 2, 3) в моменты времени $t \in [0, 60]$ с

$t, \text{с}$	$q, 1/\text{см}^3$	$Q(t), 1/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$
0	0	0
5	$0,186978 \cdot 10^4$	0,788888
10	$0,850842 \cdot 10^6$	0,901052
15	$0,252913 \cdot 10^7$	0,925270
20	$0,453681 \cdot 10^8$	0,933428
25	$0,622814 \cdot 10^9$	0,948164
30	$0,753651 \cdot 10^{10}$	0,950087
35	$0,158437 \cdot 10^{11}$	0,959165
40	$0,579420 \cdot 10^{12}$	0,962743
45	$0,768428 \cdot 10^{13}$	0,975482
50	$0,778513 \cdot 10^{14}$	0,980274
55	$0,548329 \cdot 10^{15}$	0,986513
60	$0,845235 \cdot 10^{16}$	0,990021

Таблица 2. Экспериментальные и вычисленные значения высоты источника висмута H в моменты времени $t \in [0, 60]$ с

$t, \text{с}$	H , экспериментальная	H , вычисленная
0	0,3	0,287456
5	0,3	0,295852
10	0,3	0,319714
15	0,3	0,301548
20	0,3	0,300001
25	0,3	0,300204
30	0,3	0,302487
35	0,3	0,300022
40	0,3	0,307504
45	0,3	0,300009
50	0,3	0,318978
55	0,3	0,294257
60	0,3	0,300045

В таблице 2 представлены экспериментальные и вычисленные с помощью разработанной программы ОЗ_ММ_Г значения высоты располо-

жения источника атомов висмута на алюминиевой подложке. Графическая реализация экспериментальных и вычисленных значений высоты H в моменты времени $t \in [0, 60]$ с представлены на рис. 1.

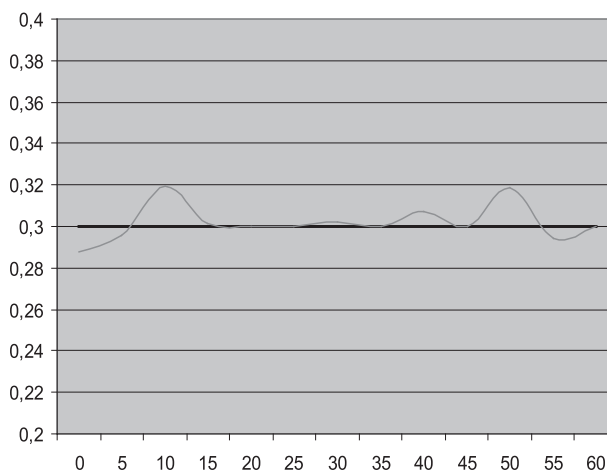


Рис. 1. Экспериментальные (прямая линия) и вычисленные (ломаная линия) значения H в моменты времени $t \in [0, 60]$ с

Анализ полученных результатов показал, что численное значение высоты расположения атомов пленки H в моменты времени $t \in [0, 60]$ с, полученное с помощью программного продукта ОЗ_ММ_Г, хорошо согласуется с экспериментальным значением. При этом абсолютная погрешность вычислений не превышает 2%. Таким образом, построены аналитические решения и приведено численное решение обратной задачи о восстановлении мощности источника атомов пленки, возникающей в рамках математической модели роста тонких пленок на подложках. Полученные результаты могут быть использованы в технологических процессах роста тонких пленок на подложках.

Литература

1. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1973. – 614 с.
2. Галай Е.О. Математическая модель образования пленок на подложках // Обзорение прикладной и промышленной математики. Т.12. Вып. 4, 2005. – С. 932.
3. Денисов А.М. Введение в теорию обратных задач. М.: Изд-во МГУ, 1994. – 208 с.
4. Сайт ООО НПФ «Микротехнология». URL: <http://microtechnologia.ru>

Получено 29.10.2014

Тарасенко Елена Олеговна, к.т.н., доцент Кафедры прикладной математики и математического моделирования (ПМ и ММ) Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ). Тел. 8-865-295-68-00, доб. 49-32; E-mail: galail@mail.ru

Гладков Андрей Владимирович, старший преподаватель Кафедры ПМ и ММ СКФУ. Тел. 8-928-313-02-82; E-mail: gavandrew@mail.ru

RESTORATION OF SOURCE ARRANGEMENT HEIGHT IN MATHEMATICAL MODEL OF THIN FILMS GROWTH ON SUBSTRATES

Tarasenko E.O., Gladkov A.V.

Current research in the field of applied mathematics and computer science at the present time is the study of this little-studied physical process as a diffusion growth of thin spat-hella on substrates. Many domestic and foreign scientists have conducted research by decision analytical and numerical methods of initial-boundary value problems, which originally explicitly or implicitly assumed that the solution of the problem exists and is unique. In mathematical modeling there is often a question of solution of inverse problems arising in the research of the diffusion growth of thin spat-hella on substrates. This paper focuses on the solution of inverse problems encountered in the study of the mathematical model. The aim of the study is to develop analytical and numerical solution of the problem of recovering the height of the source atoms spat-hella. Achievement of this goal is based on the intended use of the results and methods of mathematical physics equations, integral equations, mathematical analysis, partial differential equations, solid-state physics, crystallography. An analytical solution of the inverse problem of recovering the height of the source of the atoms of the spat-hella deposited on the substrate. The numerical experiment by the growth of bismuth spat-hella on an aluminum substrate. Analysis of the results of the numerical experiment showed that the results presented in the article are consistent with experimental data. The absolute error of calculation does not exceed 2%. It should be noted that this research is of great practical value and can be used in microelectronics, creating large scale integrated circuits, etc.

Keywords: *thin film, substrate, diffusion, source height, mathematical modeling.*

Tarasenko Elena Olegovna, PhD in Technical Science, Associated Professor of Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation. Tel. +7 865 295 68 00. E-mail: galail@mail.ru

Gladkov Andrei, a senior assistant of Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation. Tel. +7 928 313 02 82. E-mail: gavandrew@mail.ru

References

1. Bahvalov N.S. *Chislennye metody* (Calculus of approximations). Moscow, Nauka Publ., 1973, 614 p.
2. Galaj E.O. Matematicheskaja model' obrazovaniya plenok na podlozhkah [Mathematical model of films formation on substrates]. *Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj matematiki*, 2005, vol. 12, no. 4, p. 932.
3. Denisov A.M. *Vvedenie v teoriju obratnyh zadach* (Introduction to Inverse Problems). Moscow, MGU Publ., 1994, 208 p.
4. Oficial'nyj sajt OOO NPF «Mikrotehnologija». Available at: <http://microtechnologia.ru> (In Russ.)

Received 29.10.2014

УДК 533.9.01

СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАЗМЫ

Панин Д.Н., Адамович Л.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: lva9@yandex.ru

Статья посвящена исследованию с помощью численных методов частотно-избирательных свойств полупроводникового слоя плазмы с неоднородной концентрацией частиц.

Ключевые слова: фильтр, ослабление, полупроводниковая плазма, неоднородный слой, метод дифференциальной прогонки, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, полоса пропускания фильтра, полоса задерживания фильтра, переходная область.