

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Выпуск посвящен памяти Карла Фридриха Гаусса
(150 лет со дня смерти)

Учредитель

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
"Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
360004, Нальчик, ул. Чернышевского, 173*

*Журнал зарегистрирован
в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций в 2003 г.
(свидетельство ПИ №77-16938 от 28 ноября 2003 г.)*

Редакционная коллегия:

Главный редактор: Хапачев Ю.П. – доктор физ.-мат. наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик

Зам. главного редактора: Дышеков А.А. – доктор физ.-мат. наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик

- Абрамов А.М. – чл.-корр. Российской академии образования, Московский институт развития образования, г. Москва
- Аристов В.В. – чл.-корр. РАН, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, г. Москва
- Бахмин В.И. – исполнительный директор Института Открытое общество, г. Москва
- Григорьев М.С. – доктор химических наук, Институт физической химии РАН, г. Москва
- Ивахненко Е.Н. – доктор философских наук, профессор, РГГУ, г. Москва
- Ильяшенко Ю.С. – доктор физ.-мат. наук, профессор, МИРАН, г. Москва
- Карамурзов Б.С. – доктор технических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Кетенчиев Х.А. – доктор биологических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Кочесоков Р.Х. – доктор философских наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Крайzman В.Л. – доктор физ.-мат. наук, профессор, Ростовский госуниверситет, г. Ростов-на-Дону
- Лисичкин Г.В. – доктор химических наук, профессор, МГУ, г. Москва
- Лю Цзо И – доктор технических наук, профессор, Технологический университет, г. Гуанджоу, Китай
- Молодкин В.Б. – чл.-корр. НАН Украины, профессор, Институт металлофизики НАН Украины, г. Киев
- Оранова Т.И. – доктор химических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Ошхунов М.М. – доктор технических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Савин Г.И. – академик РАН, профессор, Отдел информатики и вычислительной техники РАН, г. Москва
- Скворцов Н.Г. – доктор социологических наук, профессор, С.-Пб. госуниверситет, г. Санкт-Петербург
- Ткачук В.А. – чл.-корр. РАН, академик АМН, профессор, МГУ, г. Москва
- Тлибеков А.Х. – доктор технических наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик
- Филатов В.П. – доктор философских наук, профессор, Российский государственный гуманитарный университет, г. Москва
- Шустова Т.И. – доктор биологических наук, профессор, С.-Пб. НИИ уха, горла, носа и речи, г. Санкт-Петербург
- Шхануков М.Х. – доктор физ.-мат. наук, профессор, КБГУ, г. Нальчик

PERSONALIA

К 150-летию со дня смерти Карла Фридриха Гаусса

Первые два выпуска нашего журнала "Актуальные вопросы современного естествознания" были посвящены, соответственно, 100-летию со дня рождения академика А.Н. Колмогорова (25.04.1903 – 20.10.1987) и 150-летию со дня рождения члена Парижской Академии Наук Жюля Анри Пуанкаре (29.04.1854 – 17.07.1912). В этом году исполнилось 150 лет со дня смерти величайшего математика первой половины XIX века Карла Фридриха Гаусса.

Гаусс родился 30 апреля 1777 года в Брауншвейге. Школьные учителя были так поражены его математическими и лингвистическими способностями, что обратились к герцогу Брауншвейгскому с просьбой о поддержке, и герцог дал деньги на продолжение обучения в школе и в Геттингенском университете (в 1795 – 98 гг.). Степень доктора Гаусс получил в 1799 году в университете Хельмштедта. Еще при жизни Гаусс был удостоен почетного титула "король математиков".

Для творчества Гаусса характерна непосредственная связь между теоретической и прикладной математикой, широта проблематики. Труды Гаусса оказали большое влияние на развитие теории чисел, алгебры, математической физики, дифференциальной геометрии, теории электричества и магнетизма, геодезии и многих разделов астрономии. Остановимся на некоторых первостепенных результатах, имеющих непреходящее значение.

Арифметические исследования.

Первое же обширное сочинение Гаусса "Арифметические исследования" (1801 г.) на многие годы определило последующее развитие двух важных разделов математики – теории чисел и высшей алгебры. Из множества важных и тонких результатов, приведенных в "Арифметических исследованиях", следует отметить подробную теорию квадратичных форм и первое доказательство квадратичного закона взаимности. В конце сочинения Гаусс приводит полную теорию уравнений деления круга и, указывая их связь с задачей построения правильных многоугольников, решает стоявшую с античных времен проблему о возможности построения циркулем и линейкой правильного многоугольника с заданным числом сторон. Гаусс указал все числа, при которых построение правильного многоугольника с помощью циркуля и линейки возможно. Это пять так называемых гауссовых простых чисел: 3, 5, 17, 257 и 65537, а также умноженные на любую степень двойки произведения различных (не повторяющихся) гауссовых чисел. Например, построить с помощью циркуля и линейки правильный $3 \times 5 \times 17$ -угольник можно, а правильный 7-угольник нельзя, так как семерка не гауссово простое число. Разумеется, доказанный Гауссом результат – пример так называемой чистой теоремы существования; утверждается, что построить с помощью циркуля и линейки правильный многоугольник с "допустимым" числом сторон можно, но ничего не говорится о том, как это сделать. Гаусс предложил также явный способ построения с помощью циркуля и линейки правильного 17-угольника. Этот результат Гаусс посчитал столь значительным, что отметил его в "Дневнике" (запись от 30 марта 1796 года) и завещал высечь правильный 17-угольник на своем надгробии, что и было исполнено.

Алгебра.

С именем Гаусса также связана основная теорема алгебры, согласно которой число корней многочлена (действительных и комплексных) равно степени многочлена (при подсчете числа корней кратный корень учитывается столько раз, какова его степень). Первое доказательство основной теоремы алгебры Гаусс дал в 1799 году, а позднее предложил еще несколько доказательств.

Математика и астрономия.

Гаусс живо интересовался не только "чистой математикой", но и ее приложениями. В области прикладной математики он не только получил ряд важных результатов, но и создал новые направления в науке.

Занимая с 1807 года кафедру математики и астрономии Геттингенского университета и возглавляя астрономическую обсерваторию того же университета, Гаусс на протяжении более двух десятилетий занимается изучением орбит малых планет и их возмущений. Мировую известность обрел разработанный Гауссом метод определения эллиптической орбиты по трем наблюдениям. Применение этого метода к малой планете Церера позволило вновь найти ее на небе после того, как она была утеряна вскоре после ее открытия астрономом Дж. Пиацци (1801 г.). Не меньший успех сопутствовал применению метода Гаусса к другой малой планете, Палладе (1802 г.).

В 1809 году выходит фундаментальный труд Гаусса "Теория движения небесных тел", в котором изложены методы вычисления планетных орбит, используемые (с незначительными усовершенствованиями) и поныне.

В 1812 году Гаусс познакомил математический мир со своей гипергеометрической функцией, частным случаем которой являются многие из так называемых специальных функций математической физики. В той же работе он рассматривает и вопросы сходимости бесконечных рядов, важные для астрономических вычислений.

Высшая геодезия. Неевклидова геометрия.

В 1818 году Гаусс одним из первых начинает размышлять над созданием неевклидовой геометрии, но от публикации полученных результатов воздерживается, опасаясь, по собственному признанию, "криков беотийцев" (т.е. возражений и насмешек невежд).

Десятилетие 1820 – 1830 гг. Гаусс посвятил проведению геодезической съемки Ганноверского королевства и составлению его подробной карты. Гаусс не только проделывает огромную организационную работу и руководит измерением длины дуги меридиана от Геттингена до Альтоны, но и создает основы "высшей геодезии", занимающейся описанием действительной формы земной поверхности. Обобщающий труд "Исследования о предметах высшей геодезии" Гаусс создает в 1842 – 47 годах. В основе этого фундаментального труда лежат также принадлежащие Гауссу идеи так называемой внутренней геометрии поверхности, изложенной им в сочинении "Общие исследования о кривых поверхностях" (1827 г.). Локальные (т.е. характеризующие малую окрестность точки) свойства поверхности, по мысли Гаусса, естественнее связывать не с "посторонними", введенными извне, а с внутренними криволинейными координатами и выражать через дифференциальную форму от внутренних координат. Если поверхность изгибать, не растягивая, то ее внутренние свойства остаются неизменными. Впоследствии по образу и подобию внутренней геометрии поверхностей Гаусса была создана многомерная риманова геометрия.

Обработка наблюдений.

Непреходящее значение для всех наук, имеющих дело с обработкой наблюдений, имеют разработанные Гауссом методы получения наиболее вероятных значений измеряемых величин. Особенно широкую известность получил созданный Гауссом в 1821 – 23 годах метод наименьших квадратов. Гауссом заложены также и основы теории ошибок.

Физика.

В 1830 – 1840 гг. Гаусс много внимания уделяет проблемам физики. В 1832 году он создает так называемую абсолютную систему единиц, приняв за основные три единицы: единицу

времени – 1 с, единицу длины – 1 см и единицу массы – 1 г. В 1833 году в тесном сотрудничестве с Вильгельмом Вебером Гаусс строит первый в Германии электромагнитный телеграф. В 1839 году выходит сочинение Гаусса "Общая теория сил притяжения и отталкивания, действующих обратно пропорционально квадрату расстояния", в которой излагает основные положения теории потенциала и доказывает знаменитую теорему Гаусса – Остроградского. Его работа "Диоптрические исследования" (1840 г.) посвящена теории построения изображений в сложных оптических системах.

Многие исследования Гаусс не публиковал при жизни. Они сохранились в виде очерков, набросков, переписки с друзьями. Изучением этих трудов до Второй мировой войны занималось Геттингенское научное общество, которому удалось издать 12 томов сочинений Гаусса. Наиболее интересную часть наследия составляет уже упоминавшийся дневник.

Научное творчество Гаусса наглядно показывает надуманность деления наук на "чистые" и "прикладные". "Король математиков" находил практические применения результатам своих фундаментальных исследований и из конкретных задач прикладных областей умел извлекать проблемы, представляющие интерес для фундаментальной науки.

Умер Гаусс 23 февраля 1855 года в Геттингене.

УДК 548.732

Исследование наноструктур на основе InGaN методом синхротронного рассеяния

В.И. Пунегов

Отдел математики КНЦ УрО РАН, Сыктывкар

Сыктывкарский государственный университет, Сыктывкар

Д.В. Казаков, Д.Н. Семенюк

Сыктывкарский государственный университет, Сыктывкар

К.М. Павлов, S. Mudie

School of Physics and Materials Engineering, Monash University, Victoria, Australia

Y. Takeda, M. Tabuchi

Department of Materials Science and Engineering, Nagoya University, Nagoya, Japan

Для анализа когерентного и диффузного рассеяния синхротронного излучения от многослойных систем с наноразмерными слоями InGaN применяется статистическая динамическая теория дифракции. Проведено численное моделирование кривых дифракционного отражения и карт распределения интенсивностей диффузного рассеяния в обратном пространстве. В рамках модели мозаичного кристалла исследованы структурные характеристики гетероструктуры с ультратонким слоем $\text{In}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{N}$.

Введение

Методы высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии используются для определения структурных характеристик кристаллических подложек и тонких пленок. В частности, с их помощью могут быть определены неразрушающим материалом способом и с достаточно высокой точностью такие параметры структуры, как период кристаллической решетки, толщина эпитаксиального слоя и наличие решеточных деформаций. Кроме того, следует отметить, что из всех методов высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии наиболее информационным является анализ распределения интенсивности рассеяния в обратном пространстве (Reciprocal Space Mapping, (RSM)) [1, 2], поскольку он позволяет получать информацию о структурных дефектах.

Нитриды третьей группы GaN, AlN и InN, а также структуры, создаваемые в результате изоморфного замещения химических элементов, относятся к широкозонным полупроводникам. Такие материалы используются для изготовления фотоэмиссионных приборов и лазерных диодов, работающих в широком диапазоне оптического спектра, включая ультрафиолетовую часть. Поэтому рентгеновские исследования структуры нитридов в зависимости от композиционного состава и толщины слоя являются весьма актуальной задачей [3-13].

Настоящая работа посвящена анализу структурных особенностей ультратонких InGaN пленок исходя из экспериментальных данных синхротронного рассеяния. Для этой цели использовалась статистическая теория рассеяния рентгеновских лучей применительно к трехкристалльной дифрактометрии.

Теория

Статистическая теория дифракции наиболее полно описывает рассеяния рентгеновского излучения на неидеальных гетероструктурах [14]. Формализм этой теории нами используется для анализа синхротронного рассеяния на структуре, содержащей относительно толстый слой GaN и нанослой InGaN. Будем исходить из уравнений Такаги, записанных в декартовой системе координат

$$\begin{cases} (\text{ctg}\theta_1 \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z})E_0(x, z) = ia_0 E_0(x, z) + ia_{-h} \phi(x, z) E_h(x, z) \\ (\text{ctg}\theta_2 \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z})E_h(x, z) = i(ba_0 + \eta) E_h(x, z) + ia_h \phi^*(x, z) E_0(x, z) \end{cases}, \quad (1)$$

где в стандартных терминах обозначений $a_0 = \pi\chi_0/\lambda\gamma_0$, $a_{h,-h} = \pi C\chi_{h,-h}/\lambda\gamma_{0,h}$, $\eta = 2\pi\omega\sin(2\theta_B)/\lambda\gamma_h$, $\gamma_{0,h} = \sin\theta_{1,2}$, $\theta = \theta_B \mp \varphi$, $b = \gamma_0/\gamma_h$, $\phi(x, z) = \exp(i\mathbf{h}\mathbf{u}(x, z))$.

Перейдем от исходных амплитуд $E_{0,h}(x, z)$ к их Фурье-образам $E_{0,h}(q_x, z)$ через преобразование

$$E_{0,h}(q_x, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-iq_x x) E_{0,h}(x, z) dx. \quad (2)$$

Далее, применим обычную процедуру статистического усреднения для получения когерентных и диффузных волновых полей. При этом отметим, что при наличии дефектов кристаллической структуры функция атомных смещений $\mathbf{u}(x, z)$ и, следовательно, фазовая функция $\phi(x, z)$ представляются в виде усредненной и флуктуационной части $\mathbf{u}(x, z) = \langle \mathbf{u}(x, z) \rangle + \delta\mathbf{u}(x, z)$; $\phi(x, z) = \langle \phi(x, z) \rangle + \delta\phi(x, z)$.

Проводя статистическое усреднение уравнений по различным конфигурациям дефектов, для амплитуд когерентных полей получим

$$\begin{cases} \frac{\partial E_0^c(q_x, z)}{\partial z} = i[a_0 - q_x \text{ctg}\theta_1] E_0^c(q_x, z) + i \frac{a_{-h}}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{\phi}(x, z) \exp(-iq_x x) f(x, z) E_h^c(x, z) dx \\ - \frac{\partial E_h^c(q_x, z)}{\partial z} = i[ba_0 + \eta - q_x \text{ctg}\theta_2] E_h^c(q_x, z) + i \frac{a_h}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{\phi}^*(x, z) \exp(-iq_x x) f(x, z) E_0^c(x, z) dx \end{cases}, \quad (3)$$

где $\bar{\phi}(x, z) = \exp(i\mathbf{h}\langle \mathbf{u}(x, z) \rangle)$, $f(x, z) = \langle \tilde{\phi}(x, z) \rangle$ – статический фактор Дебая-Валлера, $\tilde{\phi}(x, z) = \exp(i\mathbf{h}\delta\mathbf{u}(x, z))$. В силу того, что мы исследуем структуру с толщинами слоев, меньшими, чем длина экстинкции и рассматриваем случай брэгговской геометрии, ограничимся описанием диффузного рассеяния в кинематическом приближении. В результате приходим к следующему выражению для интенсивности диффузного рассеяния

$$I_h^d(q_x, q_z) = |a_h|^2 \int_0^l dz' \int dx \exp(-[1+b]\mu z') (1 - f^2(x, z')) \tau(q_x; q_x; x, z') I_0^c(x - \text{ctg}\theta_1 z', z'), \quad (4)$$

где l – толщина кристалла, μ – линейный коэффициент поглощения, $I_0^c(x - \text{ctg}\theta_1 z', z')$ – интенсивность проходящего рентгеновского пучка. Здесь введены в рассмотрение площадь корреляции [15,16]

$$\tau(q_x; q_x; x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\rho_x \int_{-\infty}^{+\infty} d\rho_z \exp(-i[q_x \rho_x + q_z \rho_z]) C(x, z; \rho_x, \rho_z) G(x, z; \rho_x, \rho_z). \quad (5)$$

В качестве сомножителей под интегралом присутствуют корреляционная функция

$$G(x, z; \rho_x, \rho_z) = \left[\langle \tilde{\phi}^*(x + \rho_x, z + \rho_z) \tilde{\phi}(x, z) \rangle - f^2(x, z) \right] / [1 - f^2(x, z)], \quad (6)$$

характеризующая тип структурных дефектов и коррелятор усредненных (статических) атомных смещений $C(x, z; \rho_x, \rho_z) = \bar{\Phi}^*(x + \rho_x, z + \rho_z) \bar{\Phi}(x, z)$.

Будем считать, что в пределах одного слоя кристаллическая структура и химический состав однородны. В таком приближении в приведенных выше параметрах снимется зависимость от пространственных координат. При этом усредненная фазовая функция может быть записана в виде

$$\mathbf{h}\langle \mathbf{u} \rangle = -h(\langle u_x \rangle \sin \varphi + \langle u_z \rangle \cos \varphi) = -(\Delta q_x x + \Delta q_z z), \quad (7)$$

где $\Delta q_x = h(\Delta a/a) \sin \varphi$ и $\Delta q_z = h(\Delta c/c) \cos \varphi$, a и c – постоянные решетки гексагональной системы, Δa и Δc – рассогласования параметров решетки верхнего и нижнего слоев, d_{hkl} – межплоскостное расстояние, $h = 2\pi/d_{hkl}$. Угол φ для гексагональной структуры находится из соотношения $\cos \varphi = d_{hkl} l / c$.

С учетом (7), уравнения, описывающие дифракцию когерентно рассеянных волн (3) преобразуются к виду

$$\begin{cases} \frac{\partial E_0^c(q_x, z)}{\partial z} = i[a_0 - q_x \operatorname{ctg} \theta_1] E_0^c(q_x, z) + ia_{-h} f \exp(-i\Delta q_z z) E_h^c(q_x + \Delta q_x, z) \\ -\frac{\partial E_h^c(q_x, z)}{\partial z} = i[ba_0 + \eta - q_x \operatorname{ctg} \theta_2] E_h^c(q_x, z) + ia_h f \exp(i\Delta q_z z) E_0^c(q_x - \Delta q_x, z) \end{cases}. \quad (8)$$

Выражения для диффузной компоненты также упростятся:

$$I_h^d(q_x, q_z) = |a_h|^2 (1 - f^2) \tau(q_x; q_x) \cdot L_x \int_0^l dz' \exp(-[1 + b] \mu z') I_0^c(z'), \quad (9)$$

где L_x – ширина засветки поверхности образца. При однородном распределении дефектов параметры, характеризующие кристаллическое строение не зависят от пространственных координат. Поэтому площадь корреляции и корреляционная функция соответственно запишутся в виде

$$\begin{aligned} \tau(q_x, q_x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} d\rho_x \int_{-\infty}^{+\infty} d\rho_z \exp(-i[(q_x + \Delta q_x)\rho_x + (q_z + \Delta q_z)\rho_z]) G(\rho_x, \rho_z), \\ G(\rho_x, \rho_z) &= \left[\langle \tilde{\Phi}^*(\rho_x, \rho_z) \tilde{\Phi}(0, 0) \rangle - f^2 \right] / [1 - f^2]. \end{aligned}$$

Эксперимент

Исследовались образцы InGaN/GaN/AlN/Al₂O₃ (sapphire) с наномасштабным активным слоем InGaN (20 нм). Для приготовления образцов использовалась металлоорганическая газофазная эпитаксия. Все образцы были выращены на сапфировой (0001) подложке. Тонкий низкотемпературный AlN (30 нм) и относительно толстый GaN (2 мкм) слои служили в качестве буферной структуры между оптоэлектронным слоем InGaN и достаточно сильно рассогласованной по параметру решетки сапфировой подложкой. Образцы отличались разной концентрацией индия x в нанослое In_xGa_{1-x}N.

Измерения RSM для жесткого рентгеновского синхротронного рассеяния на гетероструктурах InGaN/GaN/AlN/Al₂O₃ выполнены на канале BL20B (Australian National Beamline Facility) Фотонной фабрики в Цукубе (Япония). Длина волны рентгеновского излучения 0,154 нм выделялась стандартным двухкристалльным Si(111) монокроматором. Измерения RSM производилось в режиме обычной трёхкристалльной дифракционной схемы со сцинтилляционным детектором. Характер распределения интенсивности в обратном пространстве для исследованных образцов позволил также использовать в качестве детектора вос-

производящую изображение пластинку (imaging plate, (IP)) размерами 400×200 мм. Угловое разрешение для 2θ -сканирования составляло $0,01^\circ$.

В ходе эксперимента были измерены RSM от образцов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (sapphire) с разной концентрацией индия x в ультратонком слое InGaN. Измерения проводились для двух симметричных отражений (0002) и (0004) на длине волны $\lambda = 0,154$ нм.

Численные расчеты

В процессе численного моделирования RSM использована модель мозаичной структуры, предложенная в [15]. Кроме этого, мы учитывали также шероховатость поверхности исследуемой структуры в рамках модели [2].

В качестве примера приведем результаты эксперимента и численного моделирования для образца с концентрацией индия $x = 0,28$. Сравнение экспериментально измеренных (*a*) и расчетных (*b*) карт распределения интенсивности в обратном пространстве для отражения (0004) демонстрирует рис. 1. Одновременно решалась обратная задача дифракции в режиме

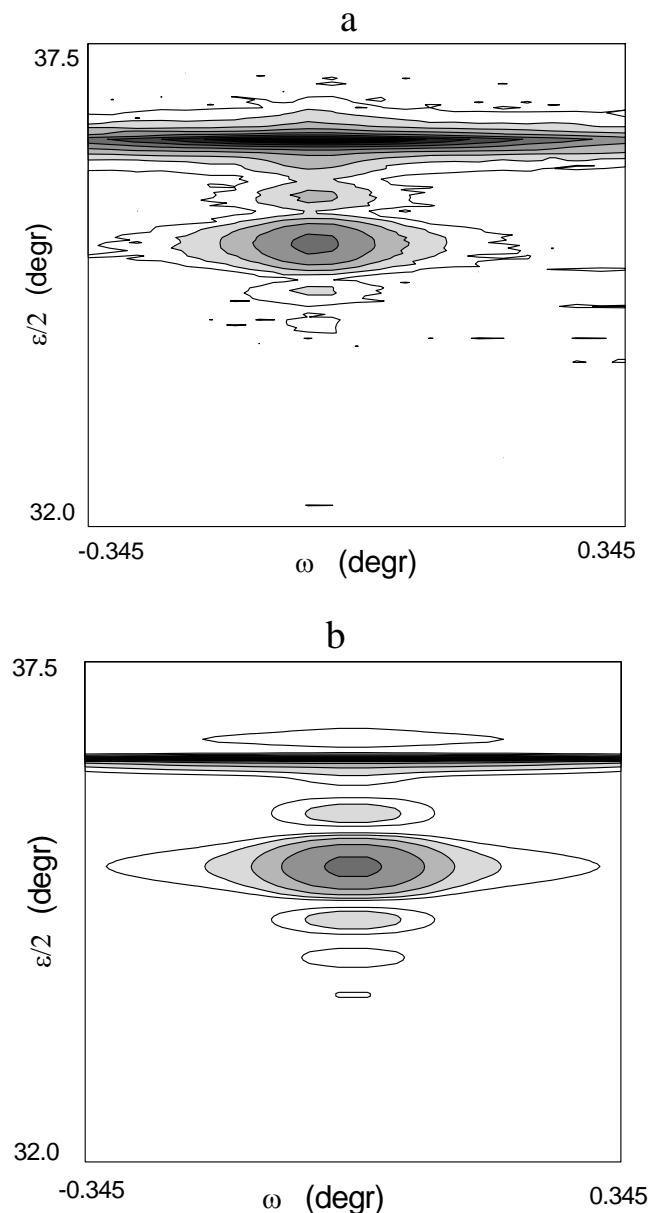


Рис. 1. Измеренная (*a*) и вычисленная (*b*) RSM от системы $\text{In}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$, (0004)-отражение.

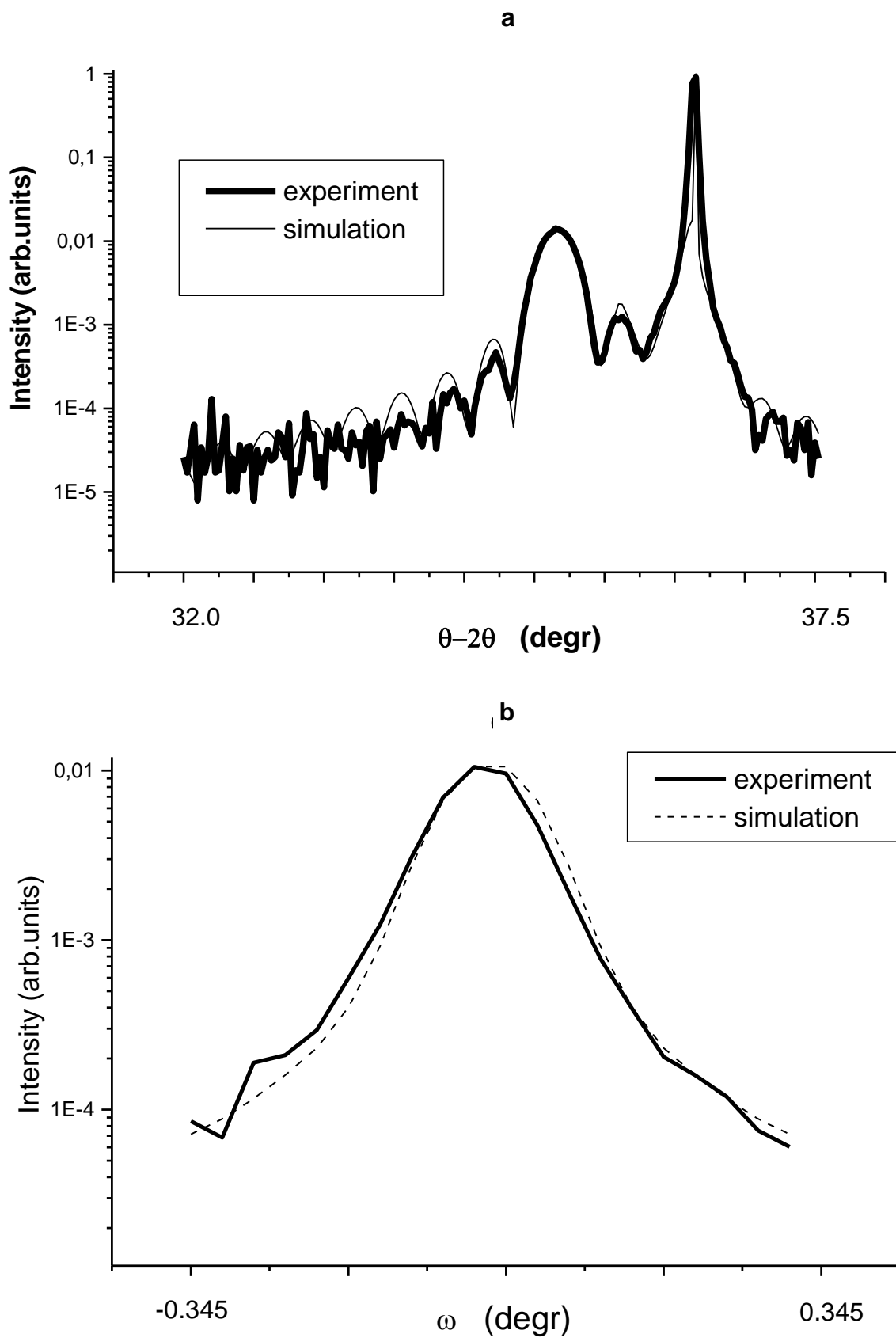


Рис. 2. Дифракционные (0004) кривые отражения для θ - 2θ -сканирования (a) и ω -сканирования (b).

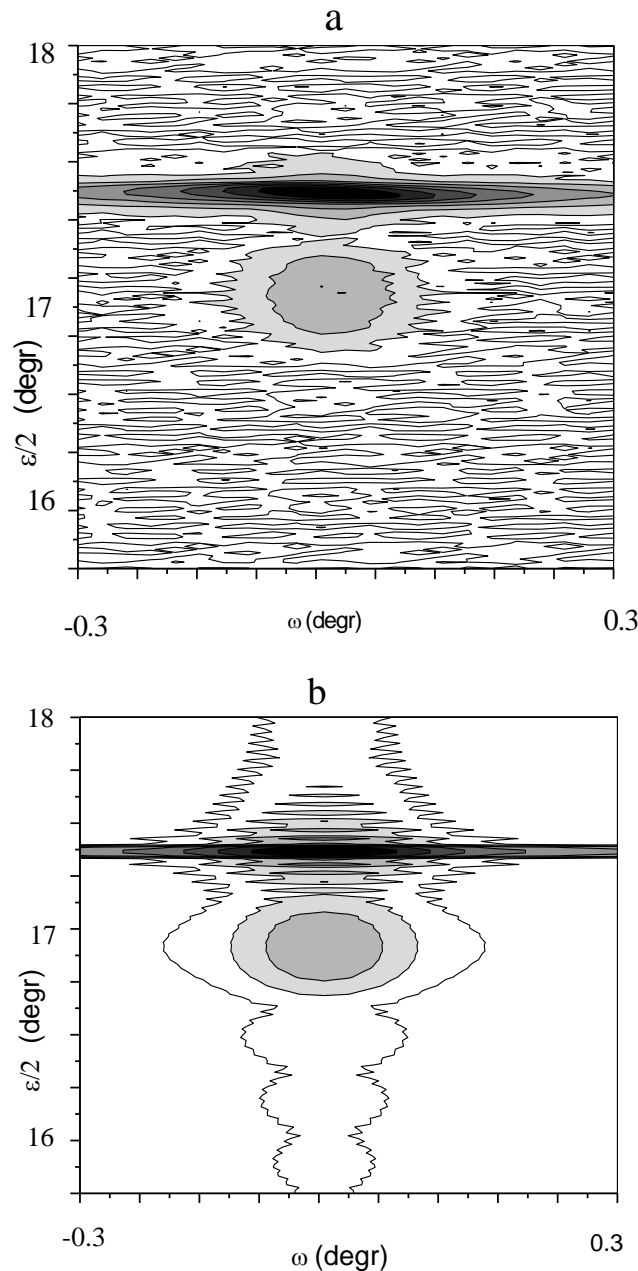


Рис. 3. Измеренная (a) и вычисленная (b) RSM от системы $\text{In}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$, (0002)-отражение.

θ - 2θ - и ω -сканирования (см. рис. 2a и 2b, соответственно). Аналогичные картины для отражения (0002) приведены на рис. 3 и 4.

Наилучшее совпадение экспериментальных и смоделированных RSM было достигнуто при следующих параметрах: вертикальный размер блоков слоя InGaN составляет 14,5 нм, латеральный размер равен 200 нм. Средняя угловая разориентация блоков слоя оценивалась в 150 угловых секунд. Для буферного слоя GaN получены следующие структурные параметры: вертикальный размер блока – 1990 нм, латеральный – 250 нм, разориентация блоков – 250 угловых секунд. Шероховатость поверхности соответствовала среднеквадратичной дисперсии высоты шероховатости $\sigma = 0,4$ нм и латеральной корреляционной длине $\Lambda = 0,01$ мкм.

Таким образом, предложенное в работе численное моделирование RSM позволило получить структурные параметры образцов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}/\text{AlN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (sapphire) с разной концен-

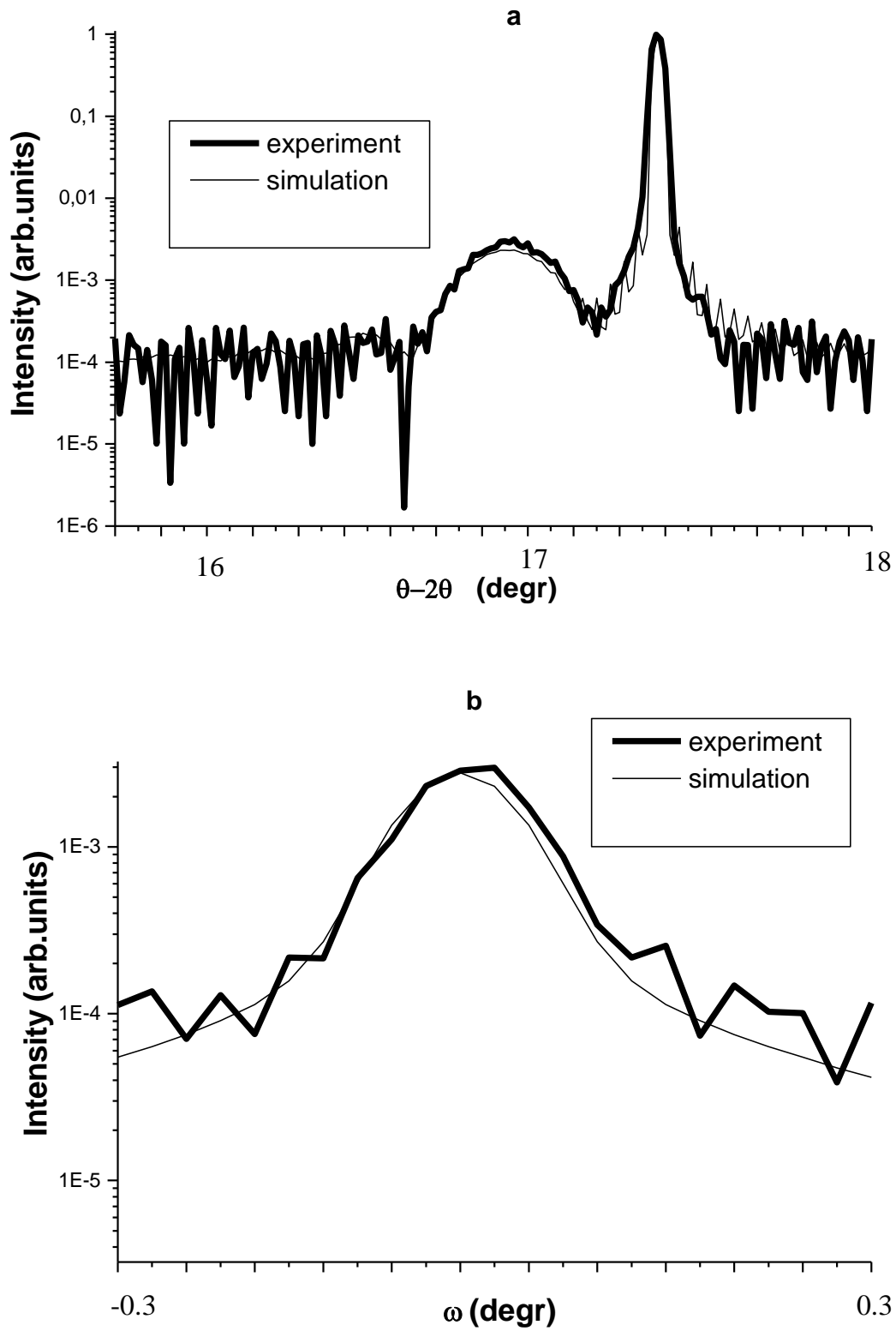


Рис. 4. Дифракционные (0002) кривые отражения для θ - 2θ -сканирования (a) и ω -сканирования (b).

трацией индия в ультратонком поверхностном слое. Наилучшее совпадение экспериментальных и теоретических данных для двух отражений от одного и того же образца отличалось в пределах 5-7 процентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 03-02-16239). Экспериментальная часть работы была выполнена при поддержке Австралийской Синхротронной Исследовательской Программы, финансируемой правительством Австралии. Авторы выражают также благодарность проф. Н. Amano и I. Akasaki (Department of Materials Science and Engineering, Meijo University, Japan) за предоставленные образцы.

Литература

1. Lomov A.A., Zaumseil P. & Winter U. // Acta Cryst. A., 1985. V.41. P.223.
2. Holy V., Kubena J., Abramof E. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys., 1993. V.26. P.A146.
3. Brandt O., Walterate P., Ploog K.H. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V.35. P.577.
4. Berkowicz E., Gershoni D., Bahir G., et al. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61, P.10994.
5. Herres N., Kirste L., Obloh H., et al. // Mater. Sci. Eng.B., 2002. V.91-92. P.425.
6. Schuster M., Gervais P.O., Jobst B., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. V.32. P. A56.
7. Moon Y.-T., Kim D.-J., Song K.-M., et al. // Phys. Status Solidi, B. 1999. V.216. P.167.
8. Rudloff D., Blasing J., Riemann T., et al. // Phys. Status Solidi, B. 1999. V.216. P.315.
9. Zielinska-Rohozinska E., Gronkowski J., Regulaska M., et al. // Cryst. Res. Technol. 2001. V.36. P.903.
10. Lilienthal-Weber Z., Benamara M., Washburn J., et al. // J. Electron. Mater. 2001. V.30. P.439.
11. Pereira S., Correia M.R., Pereira E., et al. // Phys. Status Solidi, B. 2001. V.228. P.59.
12. Pereira S., Correia M.R., Pereira E., et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V.80. P.3913.
13. Pereira S., Correia M.R.O, Pereira E., et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V.81. P.1207.
14. Павлов К.М., Пунегов В.И., Фалеев Н.Н. // ЖЭТФ. 1995. Т.106. №6. P.1967.
15. Nesterets Ya.I, Punegov V.I. // Acta Cryst. A. 2000. V.56. N.6. P.540.
16. Pavlov K.M., Punegov V.I. // Acta Cryst. A. 2000. V.56. N.2. P.227.

The study of InGaN nanostructures by synchrotron X-ray scattering

V.I. Punegov, D.V. Kazakov, D.N. Semenyuk

Syktvykar State University, Syktvykar

K.M. Pavlov, S. Mudie

School of Physics and Materials Engineering, Monash University, Victoria, Australia

Y. Takeda, M. Tabuchi

Department of Materials Science and Engineering, Nagoya University, Nagoya, Japan

Abstract. We have applied the statistical dynamical diffraction theory to analyses coherent and diffuse X-ray synchrotron scattering from multilayer systems with ultrathin InGaN layers. The numerical calculations of diffraction curves and reciprocal space maps are carried out. Within the framework of a mosaic crystal model the structural characteristics of heterostructure with ultrathin $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}$ layer are investigated.

УДК 541.64

Закономерности формирования структуры и свойств смесей дивиниловых эластомеров

М.Х. Лигидов

Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик

Методом радиотермолюминесценции исследованы смеси дивиниловых эластомеров при различных соотношениях компонентов. Показано, что данные полимеры являются термодинамически совместимыми. В высокоэластическом состоянии обнаружена интегральная кривая свечения, обусловленная аннигиляцией активных центров при разрушении упорядоченных микрообластей (кластеров) с повышением температуры.

При изготовлении полимерных материалов на основе многокомпонентных высокомолекулярных систем приходится сталкиваться с проблемой так называемой «совместимости» полимеров друг с другом. К решению вопроса о факторах, обуславливающих совместимость полимеров, может быть два подхода: термодинамический и молекулярно-кинетический. С точки зрения первого подхода образование термодинамически устойчивой системы должно сопровождаться уменьшением изобарно-изотермического потенциала G [1]. Если бы существовал простой способ определения величины ΔG при смешении полимеров, то можно было бы сразу определить, совместимы ли данные полимеры или нет. Если $\Delta G < 0$, то полимеры совмещаются, если $\Delta G > 0$, то не совмещаются. Но так как такого способа нет, используют упрощенные подходы. Изменение изобарно-изотермического потенциала в процессе смешения полимеров обусловлено изменением энтальпии ΔH и энтропии ΔS [1] соотношением

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура.

Изменение энтропии, отнесенное к 1 г смеси, будет весьма малым, вследствие большой молекулярной массы смешиваемых полимеров и малого отличия молекул двух сортов по своим размерам.

Таким образом, можно считать [2-4], что возможность взаимного растворения полимеров должна определяться знаком теплового эффекта при смешении, так как при $\Delta S = 0$ $\Delta G = \Delta H$.

Экспериментальное определение изменения энтальпии при смешении полимера является очень сложным. Эта величина численно равна теплоте смешения двух полимеров, взятой с противоположным знаком. Впервые измерение теплового эффекта смешения широкого класса полимеров было проведено в [1].

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что некоторые пары полимеров смешиваются экзотермически, а некоторые – эндотермически. В большинстве случаев экзотермическое смешение ($\Delta H < 0$) отвечает совместимости полимеров в растворах. Однако имеются исключения, указывающие на то, что изменение энтальпии не всегда является критерием смешиваемости полимеров. По-видимому, в ряде случаев играет роль и энтропия смешения, которая, как известно, связана с изменением формы макромолекул.

Таким образом, совместимость полимеров с термодинамической точки зрения есть не что иное, как взаиморастворимость, т.е. способность к образованию истинного раствора одного полимера в другом. При этом взаиморастворимые системы образуют однородную (гомогенную) однофазную систему, а несовместимые – многофазную неоднородную (гетерогенную) систему.

Следовательно, все существующие смеси полимеров можно разделить на три класса: взаиморастворимые системы ($\Delta G < 0$); взаимонерастворимые системы ($\Delta G > 0$); частично-растворимые системы, т.е. системы, у которых гомогенность возможна лишь до определенной концентрации, а при повышении концентрации образуется гетерогенная смесь [5, 6].

Различные физические свойства полимерных материалов, такие как температура стеклования, диэлектрические потери и проницаемость, проявление высокой эластичности полимеров или их хрупкость при низких температурах определяются кинетическими особенностями макромолекулы, т.е. зависят от гибкости полимерных цепей.

Особенности молекулярного движения полимеров, находящихся в стеклообразном и высокоэластическом физическом состояниях и в растворах связаны с цепочечной структурой их молекул. Молекулярная подвижность полимеров и их смесей может быть изучена с помощью методов, регистрирующих проявление процессов релаксации атомных группировок, движущихся в первом приближении независимо, и образующих независимые кинетические единицы соответствующего вида. Время, требуемое кинетической единице, чтобы занять статически равновесное состояние после воздействия на нее некоторой силы (внешнее электрическое, механическое поле и т.п.) зависит от подвижности данной кинетической единицы и обычно определяется ее временем релаксации. Температурно-временные или температурно-частотные зависимости таких физических величин, как, например, модуль потерь не только определяют свойства полимера, но и дают информацию о строении полимеров, тепловом движении и характере молекулярных взаимодействий [7-10].

Так же как и в случае диэлектрических измерений, на температурной зависимости какой-либо физической величины, характеризующей внутреннее трение (коэффициент механических потерь, логарифмический декремент затухания и т.п.) при постоянной частоте наблюдается один или несколько максимумов, что свидетельствует о проявлении в этой области какого-либо релаксационного перехода. Наличие в смеси двух главных областей релаксации, совпадающих с таковыми для каждого компонента, говорит о существовании гетерогенной (взаимонерастворимой) системы, в то время как существование единственного главного максимума механических потерь, сдвинутого относительно температур механического стеклования компонентов, говорит о наличии гомогенной смеси (раствора) [11-16].

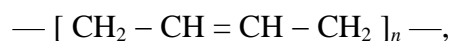
Для установления совместимости смесей в последнее время находит широкое применение метод радиотермолюминесценции (РТЛ) [17].

Этот метод состоит в облучении полимеров и их смесей ионизирующей радиацией при температуре много ниже температуры стеклования (T_g). Возникающие при этом активные центры практически не аннигилируют со временем и оказываются стойкими при нагревании вплоть до температуры, близкой к T_g . При достижении T_g активные центры реагируют и запасенная ими энергия превращается в световую. Зависимость свечения от температуры выражается кривой с максимумом в точке стеклования. Для многих полимеров и их смесей максимум оказывается очень отчетливым и T_g может определяться с большой точностью, причем высота максимума в ряде случаев столь высока, что позволяет определить присутствие данного полимера в смеси, когда его содержание не превышает 1-2% [17].

Нами методом РТЛ исследована совместимость смесей каучуков СКД (синтетический каучук дивиниловый) и СКБ (синтетический каучук бутадиеновый) при различных соотношениях компонентов. Смеси готовились перемешиванием на вальцах при температуре 293 К.

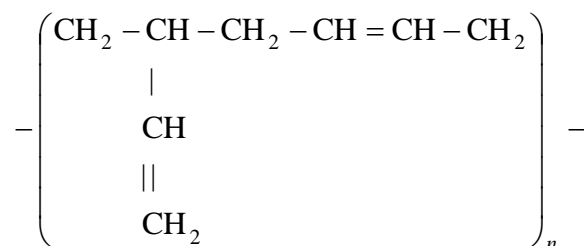
Каучуки СКД и СКБ продукты полимеризации бутадиена, отличающиеся регулярностью цепей.

Стереорегулярный СКД, структурная формула которого



синтезирован с применением никелевого катализатора и содержит звеньев бутадиена конфигурации 1,4-цис – 95 %, 1,4-транс – \approx 3% и 1,2 – \approx 2%.

Нестереорегулярный натрий-бутадиеновый каучук (СКБ) со структурной формулой



содержит звеньев бутадиена конфигурации 1,4 – \approx 34% и 1,2 – \approx 66%.

Молекулярно-массовое распределение у СКБ более широкое, чем у стереорегулярного СКД. Среднечисленная молекулярная масса каучуков лежит в пределах 80000–135000 (для СКД) и 85000–200000 (для СКБ).

Низкая молекулярная когезия (4,19 кДж/моль) и относительно высокая гибкость макромолекул обуславливает высокую подвижность молекулярных цепей стереорегулярных каучуков СКД в широком интервале температур и пониженные значения температуры стеклования (153 К – 176 К). Для нерегулярного каучука СКБ T_g лежит в пределах 213 К – 233 К.

Облучение образцов проводили при температуре жидкого азота (77 К). Кривые высвечивания РТЛ снимали при скорости нагрева 10–12 град/мин.

На температурной зависимости интенсивностей свечения (см. рис.) для каучуков СКД и СКБ и их смесей наблюдаются пять четких максимумов. Пики 1 и 5 соответствуют кривым высвечивания для СКД и СКБ соответственно, а пики 2, 3 и 4 – их смесям в соотношении компонентов соответственно 80:20, 50:50 и 20:80, причем положение пиков соответствует их температурам стеклования (таблица). Смещение температур стеклования при изменении содержания каучука СКБ в смеси от 0 до 100 % можно оценить исходя из формулы Фокса [17]

$$T_{gm} = T_{g1}T_{g2}/(W_1T_{g1} + W_2T_{g2}), \quad (2)$$

где T_{g1} , T_{g2} и T_{gm} – температуры стеклования соответственно первого, второго компонентов и их смеси; W_1 и W_2 – объемные доли компонентов в смеси.

Кроме главных максимумов на кривой РТЛ наблюдаются относительно слабо выраженные максимумы выше 273 К (см. рис.). Полуширины этих максимумов гораздо больше полуширин соответствующих α -максимумов. Изменение содержания каучука СКБ в смеси от 0 до 100 % приводит к уширению и увеличению высот вторичных максимумов, но температурное положение их не меняется. Последнее замечание говорит о том, что ловушки или активные центры, аннигилирующие в этой области температур мало, чем отличаются друг от друга, т.е. вторичные максимумы можно отнести к подвижности одних и тех же структурных единиц, энергии активации которых практически не отличаются.

Как известно, свойства эластомеров описываются моделью, в которой эластомер предполагается состоящим из упорядоченной и неупорядоченной частей и представляет собой совокупность элементов надмолекулярной структуры (упорядоченных микроблоков, связанных в единую пространственную структуру) и свободных полимерных цепей и сегментов. Причем, в микроблоках (кластерах) сегменты находятся как бы в «связанном» состоянии.

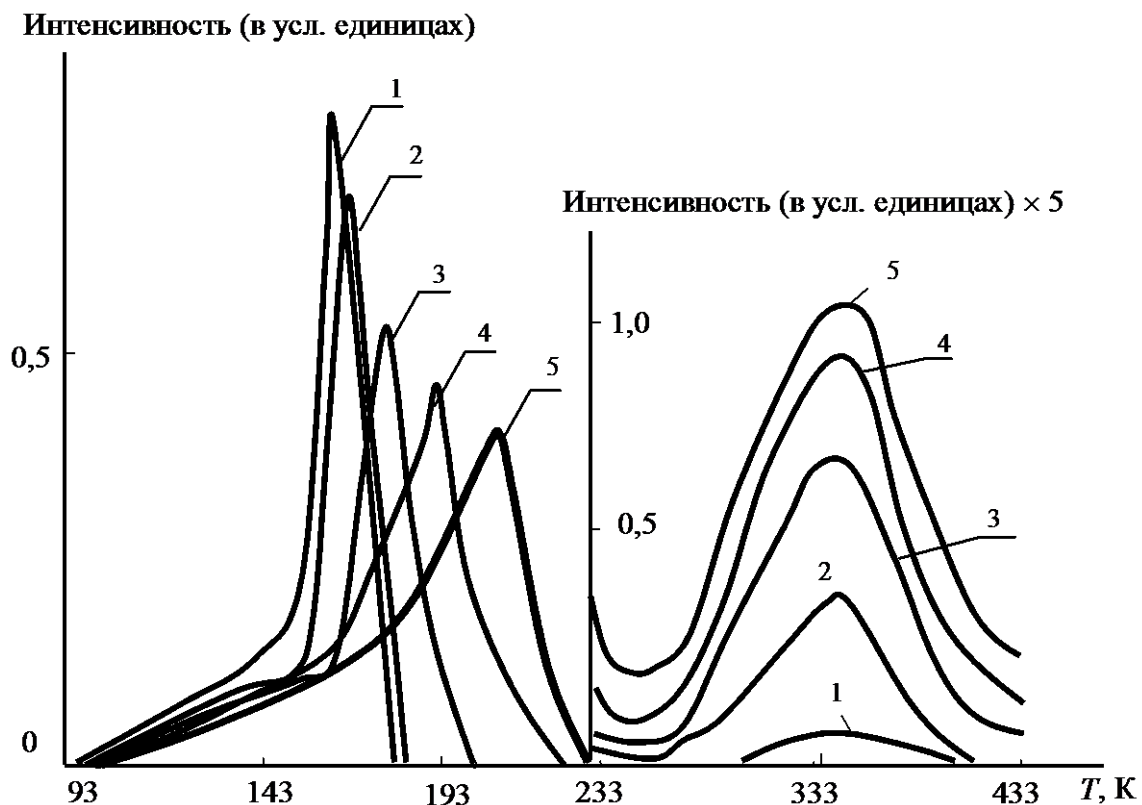


Рис. Кривые РТЛ каучуков СКД (1), СКБ (5) и их смесей при соотношении компонентов по массе 80:20 (2), 50:50 (3) и 20:80 (4).

При низкотемпературном (ниже T_g каучука) облучении ловушками для захвата электронов могут быть как свободные, так и «связанные» сегменты. При постепенном разогреве сначала происходит размораживание сегментов в неупорядоченной части каучука (α -процесс), затем распад кластеров при температурах выше 273 К. В обоих случаях происходит высвобождение захваченных электронов, т.е. свечение. Но содержание (об. %) упорядоченных микроблоков незначительно по сравнению с неупорядоченной частью каучука. Поэтому максимумы на кривых РТЛ, связанные с α -процессами выражены намного ярче вторичных максимумов.

Сравнение α -максимумов каучуков СКД и СКБ (см. рис., кривые 1 и 5) показывает, что «свободные» сегменты стереорегулярного СКД более однородны (полуширина соответствующего пика меньше), объем, в котором происходит релаксация, больше (высота пика больше) и их количество (сегментов) больше (площадь под максимумом больше), нежели для нестереорегулярного СКБ. Поэтому, с увеличением содержания в смеси каучука СКБ, происходит уширение и одновременное уменьшение высоты α -максимумов. Так как содержание в единице объема неупорядоченной части больше у СКД, чем у СКБ, соответственно, упорядоченная часть у СКБ больше, нежели у СКД. Поэтому и высота, и полуширина, и площадь под максимумом вторичных релаксационных переходов (см. рис., кривые 1 и 5) у СКД меньше, чем у СКБ. С увеличением содержания каучука СКБ в смеси происходит рост всех этих параметров. Кластеры носят, как известно, флуктуационный характер. И у каучука СКБ, имеющего более широкое распределение сегментов по размерам и степени кооперативности, больше возможностей для образования широкого спектра (по размерам, и, может быть по степени порядка) надмолекулярных структур (кластеров).

Существование одного α -максимума на кривых РТЛ для изученных смесей эластомеров СКБ и СКД, положение которого определяется соотношением компонентов [17], свидетельствует о термодинамической совместимости нерегулярного эластомера СКБ и стереорегулярного эластомера СКД.

Интегральная кривая свечения, регистрируемая в высокоэластическом состоянии, связана с проявлением процессов медленной стадии физической релаксации смесей эластомеров СКБ и СКД, характеризующихся одной и той же энергией активации, совпадающей с энергией активации аналогичных процессов в исходных эластомерах [18, 19]. Это говорит о том, что в случае совместимых смесей образуется единая молекулярная сетка, пронизывающая весь объем смеси. Узлами этой флуктуационной сетки служат микроблоки (кластеры) надмолекулярной структуры смеси, образованные сегментами исходных эластомеров.

Так как разрушение и образование кластеров, являющихся узлами флуктуационной молекулярной сетки происходит путем посегментального прилипания и отрыва их друг от друга в процессе теплового движения, энергия активации этих процессов имеет одинаковое значение. Различие во временах релаксации процессов, протекающих в высокоэластическом состоянии при одинаковости их энергии активации, говорит о существовании в смесях полимеров кластеров, отличающихся своими размерами или временами жизни.

Таблиц

Температуры стеклования и энергии активации смесей СКД и СКБ

Состав	СКД	80 : 20	50 : 50	20 : 80	СКБ
T_{gm} , К	167	171	180	193	210
U , кДж/моль	29	32,8	33,5	38,8	45,9

Литература

1. Струминский Г.В., Слонимский Г.Л. О взаимной растворимости полимеров // Жур. физ.-хим. 1956. Т. 30, № 9. С. 1941-1947.
2. Томас Д., Сперлинг Л. Полимерные смеси. Т 2. / Под ред. Д. Пола и С. М. Ньюмена. М.: Мир, 1981. С. 26.
3. Тагер А.А., Блинов В.С. Термодинамическая совместимость полимеров // Успехи химии. 1987. Т.56, № 6. С. 1004-1023.
4. Кулезнев В.Н. Смеси полимеров. М.: Химия, 1980. 304 с.
5. Тагер А.А., Шолохович Т.И., Цилопоткина М.В. Оценка термодинамической устойчивости систем полимер-полимер // Высокомолек. соед. А. 1972. Т. 14, № 6. С. 1423-1424.
6. Нестеров А.Е., Липатов Ю.С. Термодинамика растворов и смесей полимеров. Киев.: Наук. думка, 1984.
7. Михайлов Г.П., Лобанов А.М. О молекулярной релаксации в полимерах значительно выше температуры стеклования // Физика твердого тела. 1963. Т. 5, № 7. С. 1917-1923.
8. Яновский Ю.Г., Виноградов Г.В. Динамические свойства полимеров в текучем состоянии // Мех. полим. 1965. № 4. С. 106-116.
9. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Температурно-частотные зависимости деформации и механических потерь каучукоподобных полимеров при периодическом режиме нагружения // Высокомолек. соед. 1962. Т. 4, № 1. С. 66-73.
10. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Низкотемпературные релаксационные процессы в каучукоподобных полимерах // Докл. АН СССР. Физич.хим. 1964. Т. 154, № 3. С. 661-664.
11. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций: Пер. с англ. / Под ред. П.Г.Бабаевского. М.: Химия, 1978. 312 с.
12. Мэнсон Дж., Сперлинг Л. Полимерные смеси и композиты: Пер. с англ. / Под ред. Ю.К. Годовского. М.: Химия, 1979. 440 с. ил. Нью-Йорк. Пленум Пресс, 1976.
13. Вшивков С.А., Адамова Л.В., Русинова Е.В., Гурьев А.А., Севенард Е.В. Термодинамика смесей и растворов изопренового и бутадиенового каучуков // Высокомолек. соед. Б. 2001. Т. 43, № 12. С. 2185-2189.
14. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов / В.П. Привалко, В.В. Новиков, Ю.Г. Яновский. Киев.: Наук. думка, 1991. 232 с.
15. Бартенев Г.М., Алигулиев Р.М., Хитеева Д.М. Релаксационные переходы в полиэтилене // Высокомолек. соед. А. 1981. Т. 23, № 9. С. 2003-2012.
16. Woodvard A.E., Saner I.A. Mechanical relaxation phenomena // Phys. And Chem. Organ solid state. New-York. London-Sydney. Interscience, 1965. P. 637-723.
17. Zlatkevich L.Yu., Nikolskii V.G. Dependence of the glass transition temperature on the composition of elastomer mixtures // Rubber Chem. And Technol, 1973. В. 46, № 5. S. 1210-1217.
18. Лигидов М.Х., Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В., Айвазов А.Б. Тонкая структура релаксационных спектров нерегулярных эластомеров // Высокомолек. соед. Б. 1982. Т. 24, № 8. С. 573-576.
19. Лигидов М.Х., Айвазов А.Б., Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Тонкая структура релаксационных спектров стереорегулярных эластомеров // Высокомолек. соед. А. 1982. Т. 24, №1. С. 73-76.

Laws of forming of structure and properties of divinil elastomer mixtures

M.Kh. Ligidov

Kabardino-Balkarian State University, Nalchik

Abstract. The compound of divinil elastomers at different correlations of components by method of radiothermoluminescent were investigated. It was shown, that polymers are thermodynamics compatible. In high elastic condition the integral curve of lightning was found, which is conditioned by annihilation of active centre by destruction of well regulated microfields (clusters) with increase of temperature.

УДК 519.633.6

О сходимости разностных схем для нагруженных дифференциальных уравнений

М.Х. Шхануков-Лафишев, А.М. Березгов

Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик

Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, Нальчик

В работе получены априорные оценки в дифференциальной и разностной трактовках для решения некоторых классов нагруженных дифференциальных уравнений, откуда следует устойчивость и сходимость разностных схем.

1. Обыкновенные дифференциальные уравнения

Рассмотрим первую краевую задачу для стационарного нагруженного уравнения диффузии

$$Lu = \frac{d}{dx} \left[k(x) \frac{du}{dx} \right] - q(x)u(x_0) = -f(x), \quad 0 < x < 1, \quad (1)$$

$$u(0) = u(1) = 0, \quad k(x) \geq c_1 > 0, \quad q(x) \geq 0, \quad (2)$$

где x_0 – фиксированная точка интервала $(0,1)$.

Будем считать, что коэффициенты уравнения (1) удовлетворяют условиям гладкости, $k(x) \in C^{(3)}[0,1]$, $q(x), f(x) \in C^{(2)}[0,1]$ где $C^{(n)}[0,1]$ – класс функций, имеющих непрерывные на $[0,1]$ производные до порядка n включительно. Сначала получим априорную оценку для решения задачи (1)-(2). Для чего умножим уравнение (1) скалярно на u :

$$-((ku_x)_x, u) + u(x_0)(q, u) = (f, u), \quad (3)$$

$$(u, v) = \int_0^1 u \cdot v dx, \quad (u, u) = \|u\|_0^2.$$

Из тождества (3), с учетом граничных условий (2), легко получаем

$$c_1 \|u_x\|_0^2 + u(x_0)(q, u) \leq \frac{1}{4\varepsilon} \|f\|_0^2 + \varepsilon \|u\|_0^2. \quad (4)$$

Так как

$$\|u\|_0^2 \leq \frac{1}{2} \|u_x\|_0^2, \quad u(x_0)(q, u) \leq \frac{c_2}{2} \left(\frac{1}{4\varepsilon} u^2(x_0) + \varepsilon \|u\|_0^2 \right),$$

то из неравенства (4) находим

$$\left(c_1 - \frac{(1+c_2)\varepsilon}{2} \right) \|u_x\|_0^2 \leq \frac{1}{4\varepsilon} \|f\|_0^2 + \frac{c_2}{4\varepsilon} u^2(x_0), \quad 0 \leq q(x) \leq c_2$$

или при $\varepsilon \leq \varepsilon_0 = \frac{c_1}{1+c_2}$

$$c_1 \|u_x\|_0^2 \leq \frac{1+c_2}{2c_1} \|f\|_0^2 + \frac{c_2(1+c_2)}{2c_1} u^2(x_0). \quad (5)$$

Чтобы оценить $u^2(x_0)$ через L_2 норму $\|f\|_0^2$, запишем представление

$$u(x) = -\int_0^1 G(x, \xi) q(\xi) u(x_0) d\xi + \int_0^1 G(x, \xi) f(\xi) d\xi, \quad (6)$$

где $G(x, \xi)$ – функция Грина оператора $L^0 u = -(ku_x)_x$, $u(0) = u(1) = 0$.

Из представления (6) находим

$$u(x_0) = \frac{\int_0^1 G(x_0, \xi) f(\xi) d\xi}{1 + \int_0^1 G(x_0, \xi) q(\xi) d\xi}. \quad (7)$$

В силу того, что $G(x, \xi) \geq 0$, $q(x) \geq 0$ из (7) получаем

$$|u(x_0)|^2 \leq c_3 \|f\|_0^2, \quad \int_0^1 G^2(x, \xi) d\xi \leq c_3. \quad (8)$$

Из оценок (5) и (8) очевидно следует оценка

$$\|u_x\|_0^2 \leq M \|f\|_0^2, \quad (9)$$

где $M(c_1, c_2, c_3)$ – известное число.

Аналогично, методом энергетических неравенств, используя оценки (8) и (9), легко получить априорную оценку

$$\|u\|_{W_2^2(0,1)} \leq M \|f\|_0, \quad (10)$$

где $\|u\|_{W_2^2(0,1)} = \|u\|_0^2 + \|u_x\|_0^2 + \|u_{xx}\|_0^2$.

2. Разностная схема

На отрезке $[0,1]$ введем равномерную сетку $\bar{\omega}_h = \{x_i = ih, i = 0, 1, \dots, N\}$, $h = 1/N$. Дифференциальной задаче (1)-(2) поставим в соответствие разностную схему (см. [1], [2])

$$L^h y_i = (ay_{\bar{x}})_{x_i} - d_i \left(y_{i_0} \frac{x_{i_0+1} - x_0}{h} + y_{i_0+1} \frac{x_0 - x_{i_0}}{h} \right) = -\varphi_i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (11)$$

$$y_0 = y_N = 0, \quad x_{i_0} \leq x_0 \leq x_{i_0+1}, \quad a_i = k_{i-1/2}, \quad d_i = q(x_i), \quad \varphi_i = f(x_i). \quad (12)$$

Умножим уравнение (11) скалярно на y :

$$-\left((ay_{\bar{x}})_x, y \right) + \left(y_{i_0} \frac{x_{i_0+1} - x_0}{h} + y_{i_0+1} \frac{x_0 - x_{i_0}}{h} \right) (d, y) = (\varphi, y), \quad (13)$$

$$(u, v) = \sum_{i=1}^{N-1} u_i v_i h, \quad \|u\|_0^2 = (u, u).$$

Оценим слагаемые, входящие в тождество (13):

$$-\left((ay_{\bar{x}})_x, y\right) = (a, y_{\bar{x}}^2) \geq c_1 \|y_{\bar{x}}\|_0^2, \quad \|y\|_0^2 = \sum_{i=1}^N y_i^2 h, \quad (14)$$

$$\left(y_{i_0} \frac{x_{i_0+1} - x_0}{h} + y_{i_0+1} \frac{x_0 - x_{i_0}}{h}\right)(d, y) \leq \frac{1}{4\varepsilon} (y_{i_0}^2 + y_{i_0+1}^2) + 2\varepsilon \|y\|_0^2, \quad \varepsilon > 0,$$

$$(\varphi, y) \leq \frac{1}{4\varepsilon} \|\varphi\| + \varepsilon \|y\|_0^2.$$

Запишем представление

$$y_i = - \sum_{j=1}^{N-1} G_{ij}^h d_j \left[y(x_{i_0}) \frac{x_{i_0+1} - x_0}{h} + y(x_{i_0+1}) \frac{x_0 - x_{i_0}}{h} \right] h + \sum_{j=1}^{N-1} G_{ij}^h \varphi_j h, \quad (15)$$

где G_{ij}^h – разностная функция Грина (см. [1]).

С помощью представления (15) получаем систему алгебраических уравнений относительно неизвестных y_{i_0}, y_{i_0+1} :

$$\begin{cases} \left(1 + \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0j} d_j h\right) y_{i_0} + \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0j} d_j h \cdot y_{i_0+1} = \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0j} \varphi_j h, \\ \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0+1,j} d_j h \cdot y_{i_0} + \left(1 + \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0+1,j} d_j h\right) y_{i_0+1} = \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0+1,j} \varphi_j h. \end{cases} \quad (16)$$

Из системы (15) находим

$$y_{i_0} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0j} \varphi_j h \cdot \left(1 + \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0+1,j} d_j h\right) - \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0j} d_j h \cdot \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0+1,j} \varphi_j h}{1 + \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0j} d_j h + \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0+1,j} d_j h}, \quad (17)$$

$$y_{i_0+1} = \frac{\left(1 + \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0j} d_j h\right) \cdot \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0+1,j} \varphi_j h - \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0+1,j} d_j h \cdot \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0j} \varphi_j h}{1 + \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0j} d_j h + \sum_{j=1}^{N-1} G_{i_0+1,j} d_j h}. \quad (18)$$

Так как $0 \leq d \leq c_2$, $G_{ij} \leq \frac{1}{c_1}$ (см. [1]), то из (17), (18) следует

$$|y_{i_0}|^2 \leq M \|\varphi\|_0^2, \quad |y_{i_0+1}|^2 \leq M \|\varphi\|_0^2, \quad (19)$$

где M зависит от c_1, c_2 .

Подставляя (14), (19) в тождество (13), при соответствующем выборе $\varepsilon > 0$, находим

$$\|y_{\bar{x}}\| \leq M \|\varphi\|_0. \quad (20)$$

Умножая уравнение (11) скалярно на $y_{\bar{x}\bar{x}}$ и используя уже полученную оценку $\|y_{\bar{x}}\| \leq M \|\varphi\|_0$, находим

$$\|y_{\bar{x}\bar{x}}\| \leq M \|\varphi\|. \quad (21)$$

Обозначим через $z = y - u$. Тогда для погрешности z имеем задачу

$$L^h z = -\psi, \quad z_0 = z_N = 0, \quad \psi = O(h^2). \quad (22)$$

Применяя оценку (20), (21) к решению задачи (22), получаем $\|z_{\bar{x}}\|_0 = O(h^2)$, $\|z_{\bar{x}\bar{x}}\|_0 = O(h^2)$.

3. Уравнение диффузии с конвекцией

В замкнутой области $Q_T = \{(x,t): 0 \leq x \leq l, 0 \leq t \leq T\}$ для параболического уравнения рассмотрим задачу

$$c(x,t) \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(x,t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + r(x,t) \frac{\partial u}{\partial x} + \sum_{k=1}^m \alpha_k(x,t) u(\xi_k, t) - q(x,t) u + f(x,t), \quad (23)$$

$$u(0,t) = u(l,t) = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (24)$$

$$u(x,0) = u_0(x), \quad 0 \leq x \leq l, \quad (25)$$

где $0 < c_1 \leq k(x,t) \leq c_2$, $c(x,t) \geq c_0 > 0$, $|c_t|, |q|, |r|, |r_x| \leq c_3$, $\sum_{k=1}^m \alpha_k^2 \leq c_4$, ξ_k – фиксированные точки $(0, l): 0 < \xi_1 < \dots < \xi_m < l$.

Задачи вида (23)-(25) возникают при изучении движения подземных вод [3], в задачах управления качеством водных ресурсов и нормирования антропогенных воздействий [4].

Предполагая существование решения задачи (23)-(25), сначала получим для её решения априорную оценку. Для чего умножим уравнение (23) скалярно на u :

$$(cu_t, u) - ((ku_x)_x, u) - (ru_x, u) - \left(\sum_{k=1}^m \alpha_k(x,t) u(\xi_k, t), u \right) + (q, u^2) = (f, u), \quad (26)$$

$$(u, v) = \int_0^l u \cdot v \, dx, \quad (u, u) = \|u\|_0^2.$$

Преобразуем каждое слагаемое тождества (26) с учетом граничных условий (24):

$$(c(x,t)u_t, u) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \int_0^l c(x,t) u^2 dx - \frac{1}{2} \int_0^l c_t u^2 dx,$$

$$((ku_x)_x, u) = - \int_0^l k u_x^2 dx,$$

$$\int_0^l r u_x \cdot u \, dx = - \frac{1}{2} \int_0^l r_x u^2 dx, \quad (27)$$

$$\int_0^l \sum_{k=1}^m \alpha_k u(\xi_k, t) u(x,t) dx \leq \frac{m}{2} \left(\varepsilon \|u_x\|_0^2 + c_\varepsilon \|u\|_0^2 \right) + \frac{lc_4}{2} \|u\|_0^2,$$

$$(f, u) \leq \frac{1}{2} \|f\|_0^2 + \frac{1}{2} \|u\|_0^2.$$

Подставляя (27) в тождество (26), находим

$$\frac{d}{dt} \int_0^l cu^2 dx + c_1 \|u_x\|_0^2 \leq \int_0^l c_t u^2 dx + \int_0^l r_x u^2 dx + m \left(\varepsilon \|u_x\|_0^2 + c_\varepsilon \|u\|_0^2 \right) + (1 + c_4 l) \|u\|_0^2 + c_3 \|u\|_0^2 + \|f\|_0^2, \quad (28)$$

где $\varepsilon > 0$, c_ε - некоторое положительное число, зависящее от ε . Проинтегрируем (28) по τ от 0 до t , затем к полученному неравенству применим известную лемму 1.1 из [5]. Тогда при малом $\varepsilon > 0$ получим оценку

$$\|u\|_0^2 + \|u_x\|_{2, Q_t}^2 \leq M(t) \left(\|f\|_{2, Q_t}^2 + \|u_0(x)\|_0^2 \right), \quad (29)$$

где $\|u\|_{2, Q_t}^2 = \int_0^t \|u(x, \tau)\|_0^2 d\tau$, $M(t) > 0$ - некоторая постоянная зависящая от c_1, \dots, c_4, l . Из оценки (29) следует единственность решения задачи (23)-(25) и непрерывная зависимость от правой части и начальных данных в норме $\|u\|_1 = \left(\|u\|_0^2 + \|u_x\|_{2, Q_t}^2 \right)^{1/2}$.

4. Построение разностной схемы

Построим в \bar{Q}_T сетку $\bar{\omega}_{h\tau} = \bar{\omega}_h \times \bar{\omega}_\tau$, $\bar{\omega}_h = \{x_i = ih : i = 0, 1, \dots, N, h = l/N\}$,

$$\bar{\omega}_\tau = \{t_j = j\tau : j = 0, 1, \dots, j_0, \tau = T/j_0\}.$$

Будем считать, что шаг сетки h меньше половины длины наименьшего из сегментов $[0, \xi_1], [\xi_1, \xi_2], \dots, [\xi_m, 1]$ (см. [2]).

Начально-краевой задаче (23)–(25) поставим в соответствие разностную схему с направленными разностями [1]:

$$\rho(x, \bar{t}) y_t = 0, 5\tilde{\Lambda}(\bar{t})(\hat{y} + y) + \varphi, \quad (30)$$

$$\hat{y}_0 = \hat{y}_N = 0, \quad y(x, 0) = u_0(x), \quad (31)$$

где $\tilde{\Lambda}(\bar{t}) y_i = \eta (ay_{\bar{x}})_{x,i} + b_i^+ a_{i+1} y_{x,i} + b^- a_i y_{\bar{x},i} + \sum_{k=1}^m \alpha_k(\bar{t}) \left[y_{i_k} \frac{x_{i_k+1} - \xi_k}{h} + y_{i_k+1} \frac{\xi_k - x_{i_k}}{h} \right] - d_i y_i$,

$\eta = \frac{1}{1+R}$, $R = \frac{0,5h|r|}{K}$ - разностное число Рейнольдса, $x_{i_k} \leq \xi_k \leq x_{i_k+1}$, $a_i = k_{i-1/2}(\bar{t})$,

$\bar{t} = t_{j+1/2}$, $b^\pm = F[\tilde{r}^\pm(x+sh), \bar{t}]$, $\tilde{r}^\pm = r^\pm/k$, $r^- = 0,5(r-|r|) \leq 0$, $d_i = q(x_i, \bar{t})$, $\hat{y} = y^{j+1}$, $y = y^j$,

$y_t = (\hat{y} - y)/\tau$, $(ay_{\bar{x}})_x = \frac{1}{h^2} (a_{i+1}(y_{i+1} - y_i) - a_i(y_i - y_{i-1}))$, τ, h - шаги сетки по временной и пространственной координатам.

Погрешность аппроксимации в классе достаточно гладких коэффициентов, в силу построения оператора $\tilde{\Lambda}$, равна $O(h^2 + \tau^2)$ (см. [1]).

5. Устойчивость и сходимость разностной схемы

Для схемы (30)–(31) не справедлив принцип максимума, поэтому получить априорную оценку для ее решения в равномерной метрике не удастся. Здесь мы будем пользоваться методом энергетических неравенств. Умножим уравнение (31) скалярно на $Y = \hat{y} + y$:

$$\begin{aligned}
& (\rho y_t, \widehat{y} + y) - 0,5(\eta(aY_{\bar{x}})_x, Y) = 0,5(b^+ a^{(+1)} Y_x, Y) + 0,5(b^- a Y_{\bar{x}}, Y) + \\
& + 0,5 \left(\sum_{k=1}^m \alpha_k(\bar{t}) \left[Y_{i_k} \frac{x_{i_k+1} - \xi_k}{h} + Y_{i_k+1} \frac{\xi_k - x_{i_k}}{h} \right], Y \right) - 0,5(dY, Y) + 0,5(\varphi, Y), \quad (32)
\end{aligned}$$

$$(u, v) = \sum_{i=1}^{N-1} u_i v_i h, \quad (u, u) = \|u\|^2.$$

Преобразуем суммы, входящие в тождество (32):

$$(\rho y_t, Y) = (\rho y^2, 1)_t - (\rho_t, \widehat{y}^2), \quad \left(\eta(aY_{\bar{x}})_x, Y \right) = - \left(aY_{\bar{x}}, (\eta Y)_{\bar{x}} \right) = - (a\eta_{\bar{x}}, Y_x Y) - (a\eta^{(-1)}, Y_x^2),$$

$$\eta^{(-1)} = \eta_{i-1}, \quad (u, v) = \sum_{i=1}^N u_i v_i h, \quad \|u\|_0^2 = (1, u^2),$$

$$(b^+ a^{(+1)} Y_x, Y) \leq c_4 \|Y_{\bar{x}}\| \cdot \|Y\|_0 \leq c_4 \left(\frac{\varepsilon}{2} \|Y_{\bar{x}}\|_0^2 + \frac{1}{2\varepsilon} \|Y\|_0^2 \|Y\|^2 \right), \quad (33)$$

$$(b^- a Y_{\bar{x}}, Y) \leq c_4 \left(\frac{\varepsilon}{2} \|Y_{\bar{x}}\|_0^2 + \frac{1}{2\varepsilon} \|Y\|_0^2 \right), \quad (\varphi, Y) \leq \frac{1}{2} \|\varphi\|^2 + \frac{1}{2} \|Y\|^2,$$

$$(aY, Y) \leq c_3 \|Y\|^2, \quad b^+ = r^+ / k, \quad b^- = r^- / k,$$

$$b^+ a^{(+1)} = \frac{r^+ a_{i+1}}{k} = \frac{0,5(r^+ + |r^-|) a_{i+1}}{k} \leq \frac{c_2 c_3}{c_1} = c_4, \quad |b^- a| \leq c_4,$$

$$\left(\sum_{k=1}^m \alpha_k(\bar{t}) \left[Y_{i_k} \frac{x_{i_k+1} - \xi_k}{h} + Y_{i_k+1}^j \frac{\xi_k - x_{i_k}}{h} \right], Y \right) \leq \frac{c_5}{2} \left(\varepsilon \|Y_{\bar{x}}\|_0^2 + c(\varepsilon) \|Y\|^2 \right) + \frac{l}{2} \|Y\|^2, \quad \sum_{k=1}^m |\alpha_k(\bar{t})| \leq c_5.$$

Подставляя оценки (33) в тождество (32), при малом ε находим

$$\left(\|y\|^2 \right)_t + \frac{c_1}{2} \|Y_{\bar{x}}\|_0^2 \leq \frac{1}{2} \|\varphi\|^2 + c_6(\varepsilon) \|Y\|^2, \quad (34)$$

где $c_6(\varepsilon) > 0$ - постоянная зависящая от ε , c_1, \dots, c_5 .

Просуммируем (34) по j' от 0 до j :

$$\|y^{j+1}\|^2 + \frac{c_1}{2} \sum_{j'=0}^j \|Y_{\bar{x}}^{j'}\|_0^2 \tau \leq \frac{1}{2} \sum_{j'=0}^j \|\varphi^{j'}\|^2 \tau + c_6(\varepsilon) \sum_{j'=0}^j \|Y^{j'}\|^2 \tau + \|y^0\|^2. \quad (35)$$

Из оценки (35) при достаточно малом $\tau \leq \tau_0 = 1/4c_6(\varepsilon)$, находим априорную оценку

$$\|y^{j+1}\|^2 + \sum_{j'=0}^j \|(y^{j'+1} + y^{j'})_{\bar{x}}\|_0^2 \tau \leq M \left(\sum_{j'=0}^j \|\varphi^{j'}\| \tau + \|u_0(x)\|^2 \right), \quad (36)$$

где $M > 0$ - постоянная, не зависящая от h и τ .

Из оценки (36) следует

Теорема. Пусть выполнены условия $0 < c_1 \leq k(x, t) \leq c_2$, $c(x, t) \geq c_0 > 0$, $|c_t|$, $|q|$, $|r|$, $|r_x| \leq c_3$, $\sum_{k=1}^m |\alpha_k(\bar{t})| \leq c_5$. Тогда, если решение задачи (23)-(25) достаточно гладкое, то при ма-

лом $\tau \leq \tau_0$ решение разностной задачи (30)-(31) сходится к решению задачи (30)-(31) в

смысле нормы $\|\hat{y}\|_1 = \left(\|\hat{y}\|^2 + \sum_{j'=0}^j \|Y_{\bar{x}}\|^2 \tau \right)^{1/2}$, $Y = \hat{y} + y$ на слое со скоростью $O(h^2 + \tau^2)$.

6. Нагруженные уравнения диффузии в многомерной области

В цилиндре $\bar{Q}_T = \bar{G} \times [0, T]$, основанием которого служит p -мерный параллелепипед $\bar{G} = \{x = (x_1, \dots, x_p) : 0 \leq x_\alpha \leq l_\alpha, \alpha = 1, 2, \dots, p\}$, с границей Γ рассматривается задача

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Lu + f(x, t), \quad (37)$$

$$u|_\Gamma = 0, \quad t \geq 0, \quad (38)$$

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad x \in \bar{G}, \quad (39)$$

где $Lu = \sum_{\alpha=1}^p L_\alpha u$, $L_\alpha u = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(k_\alpha(x, t) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} \right) + r_\alpha(x, t) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} + \sum_{k=1}^{m_\alpha} \beta_k^{(\alpha)}(x, t) u(x_1, \dots, x_{\alpha-1}, \xi_\alpha^{(k)}, x_{\alpha+1}, \dots, x_p, t)$

$\xi_\alpha^{(k)}$, $k = 1, 2, \dots, m_\alpha$ – фиксированные точки интервала $(0, l_\alpha)$,

$$0 < \xi_\alpha^{(1)} < \dots < \xi_\alpha^{(m_\alpha)} < l_\alpha, \quad 0 < c_1 < k_\alpha(x, t) < c_2,$$

$$|r_\alpha|, |r_{\alpha x_\alpha}|, \sum_{k=1}^{m_\alpha} |\beta_k^{(\alpha)}(x, t)|^2 \leq c_3, \quad \alpha = 1, 2, \dots, p.$$

С помощью выбора коэффициентов $\beta_k^{(\alpha)}$ можно регулировать интенсивность источников (стоков) в точках $\xi_\alpha^{(k)}$.

Сначала для решения задачи (37)-(39) получим априорную оценку. Введем скалярное произведение $(u, v) = \int_G uv dx$, $(u, u) = \|u\|_0^2$.

Умножим уравнение (1) скалярно на u :

$$(u_t, u) - \left(\sum_{\alpha=1}^p (k_\alpha u_{x_\alpha})_{x_\alpha}, u \right) - \left(\sum_{\alpha=1}^p r_\alpha u_{x_\alpha}, u \right) - \sum_{\alpha=1}^p \left(\sum_{k=1}^{m_\alpha} \beta_k^{(\alpha)} u(x_1, \dots, \xi_\alpha^{(k)}, \dots, x_p, t), u \right) = (f, u). \quad (40)$$

Преобразуем интегралы, входящие в тождество (40):

$$(u_t, u) = \int_G u_t u dx = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \|u\|_0^2, \quad (41)$$

$$\left(\sum_{\alpha=1}^p (k_\alpha u_{x_\alpha})_{x_\alpha}, u \right) = - \sum_{\alpha=1}^p (k_\alpha u_{x_\alpha}^2), \quad (42)$$

$$\left(\sum_{\alpha=1}^p r_\alpha u_{x_\alpha}, u \right) = \sum_{\alpha=1}^p (r_\alpha u_{x_\alpha}, u) = - \frac{1}{2} \sum_{\alpha=1}^p \int_G r_{\alpha x_\alpha} u^2 dx, \quad (43)$$

$$\sum_{\alpha=1}^p \left(\sum_{k=1}^{m_\alpha} \beta_k^{(\alpha)} u(x_1, \dots, \xi_\alpha^{(k)}, \dots, x_p, t), u \right) = \sum_{k=1}^{m_\alpha} \int_G \beta_k^{(\alpha)} u(x_1, \dots, \xi_\alpha^{(k)}, \dots, x_p, t) u dx =$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{k=1}^{m_\alpha} \int_0^1 \dots \int_0^{l_p} \beta_k^{(\alpha)} u(x_1, \dots, \xi_\alpha^{(k)}, \dots, x_p, t) dx_1 \dots dx_p = \\
&= \sum_{k=1}^{m_\alpha} \int_{G'} \left(\int_0^{l_\alpha} \beta_k^{(\alpha)} u(x_1, \dots, \xi_\alpha^{(k)}, \dots, x_p, t) dx_\alpha \right) dx',
\end{aligned} \tag{44}$$

где $G' = \{x' = (x_1, \dots, x_{\alpha-1}, x_{\alpha+1}, \dots, x_p) : 0 < x_k < l_k, k = 1, 2, \dots, \alpha-1, \alpha+1, \dots, p\}$,

$$dx' = dx_1 \dots dx_{\alpha-1} dx_{\alpha+1} \dots dx_p.$$

Интеграл в правой части (44) оценим с помощью теоремы вложения (см. например, [5])

$$\sum_{k=1}^{m_\alpha} \int_0^{l_\alpha} \beta_k^{(\alpha)} u(x_1, \dots, \xi_k^{(\alpha)}, \dots, x_p, t) u dx_\alpha \leq \frac{m}{2} \left(\varepsilon \|u_{x_\alpha}\|_{L_2(0, l_\alpha)}^2 + C_\varepsilon \|u\|_{L_2(0, l_\alpha)}^2 \right) + \frac{c_3 l_\alpha}{2} \|u\|_{L_2(0, l_\alpha)}^2, \tag{45}$$

где $\varepsilon > 0, c_3 > 0$ - некоторая постоянная, зависящая от ε , $\|u\|_{L_2(0, l_\alpha)}^2 = \int_0^{l_\alpha} u^2(x, t) dx_\alpha$.

После интегрирования (45) по области G' и суммирования по α от 1 до p будем иметь

$$\sum_{\alpha=1}^p \left(\sum_{k=1}^{m_\alpha} \beta_k^{(\alpha)} u(x_1, \dots, \xi_\alpha^{(k)}, \dots, x_p, t), u \right) \leq \frac{1}{2} \sum_{\alpha=1}^p m_\alpha \varepsilon \|u_x\|_0^2 + \left(c_{\varepsilon p} + \frac{c_3}{2} \sum_{\alpha=1}^p l_\alpha \right) \|u\|_0^2, \tag{46}$$

$$(f, u) \leq \frac{1}{2} \|f\|_0^2 + \frac{1}{2} \|u\|_0^2. \tag{47}$$

Подставляя (41)-(43), (46), (47) в тождестве (40), находим

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \|u\|_0^2 + c_1 \|u_x\|_0^2 \leq \frac{1}{2} \sum_{\alpha=1}^p m_\alpha \varepsilon \|u_x\|_0^2 + \bar{n}_\varepsilon \|u\|_0^2 + \frac{1}{2} \|f\|_0^2, \tag{48}$$

$$\bar{n}_\varepsilon = \bar{n}_\varepsilon + \bar{n}_3 \sum_{\alpha=1}^p \frac{l_\alpha}{2} + \frac{1}{2}.$$

Выберем $\varepsilon \leq \varepsilon_0 = c_1 / \sum_{\alpha=1}^p m_\alpha$, тогда из (48) получаем

$$\frac{d}{dt} \|u\|_0^2 + c_1 \|u_x\|_0^2 \leq 2\bar{n}_\varepsilon \|u\|_0^2 + \frac{1}{2} \|f\|_0^2. \tag{49}$$

Проинтегрируем (49) по τ от 0 до t :

$$\|u\|_0^2 + c_1 \int_0^t \|u_x\|_0^2 d\tau \leq 2\bar{n}_\varepsilon \int_0^t \|u\|_0^2 d\tau + \int_0^t \|f\|_0^2 d\tau + \|u_0(x)\|_0^2. \tag{50}$$

Применяя лемму 1.1, из [1] получаем априорную оценку

$$\|u\|_0^2 + c_1 \int_0^t \|u_x\|_0^2 d\tau \leq M(t) \left(\int_0^t \|f\|_0^2 d\tau + \|u_0(x)\|_0^2 \right). \tag{51}$$

Из оценки (51) следует единственность решения задачи (37)-(39).

Разобьем p - мерное пространство переменных x_1, x_2, \dots, x_p ($p-1$)-мерными гиперплоскостями $x_\alpha^{(i_\alpha)} = i_\alpha h_\alpha$, $\alpha = 1, 2, \dots, p$, $h_\alpha = l_\alpha / N_\alpha$, на p -мерные параллелепипеды. Вершины этих параллелепипедов будем называть узлами сетки. Множество узлов, принадлежащих откры-

той области $G = \bar{G} \setminus \Gamma$ назовём внутренними узлами и обозначим через $\omega_p = \{x_i = (x_1^{(i)} \dots x_p^{(i)}), 0 < l_\alpha < N_\alpha\}$.

Множество узлов, принадлежащих границе Γ , назовём граничными узлами $\gamma_h = \{x_i \in \Gamma\}$.

Краевой задаче (37)-(39) поставим в соответствие разностную схему с направленными разностями (см. [1], [2], [7])

$$y_t = 0.5\tilde{\Lambda}(\bar{t})(\hat{y} + y) + \varphi, \quad (52)$$

$$y|_{\gamma_h} = 0, \quad y(x, 0) = u_0(x), \quad (53)$$

где $\tilde{\Lambda}(\bar{t}) = \sum_{\alpha=1}^p \tilde{\Lambda}_\alpha(\bar{t})$,

$$\begin{aligned} \tilde{\Lambda}_\alpha(\bar{t})y = & \eta_\alpha(a_\alpha y_{\bar{x}_\alpha})_{x_\alpha} + b_\alpha^+ a_\alpha^{(+1_\alpha)} y_{x_\alpha} + b_\alpha^- a_\alpha y_{x_\alpha} + \\ & + \sum_{k=1}^{m_\alpha} \beta_k^{(\alpha)}(\bar{t}) \left(y_{i_{\alpha_k}} \frac{x_\alpha^{(i_{\alpha_k}+1)} - \xi_\alpha^{(k)}}{h_\alpha} + y_{i_{\alpha_k}+1} \frac{\xi_\alpha^{(k)} - x_\alpha^{(i_{\alpha_k})}}{h_\alpha} \right). \end{aligned}$$

При аппроксимации нагруженной части уравнения (37) мы воспользовались результатами работы [2].

Устойчивость и сходимость схемы будем доказывать методом энергетических неравенств. Умножим уравнение (52) скалярно на $Y = \hat{y} + y$:

$$(y_t, Y) - 0.5(\tilde{\Lambda}(\bar{t})Y, Y) = (\varphi, Y), \quad (54)$$

где $(u, v)_\alpha = \sum_{i_1=1}^{N_1-1} \sum_{i_2=1}^{N_2-1} \dots \sum_{i_p=1}^{N_p-1} u(i_1 h_1, \dots, i_p h_p) v(i_1 h_1, \dots, i_p h_p) h_1 h_2 \dots h_p$.

Преобразуем суммы, входящие в тождество (54), с учётом условий (53):

$$\begin{aligned} (y_t, Y) &= \left(\|y\|^2 \right)_t, \quad \left((a_\alpha Y_{\bar{x}_\alpha})_{x_\alpha}, Y \right) = - \left(a_\alpha, Y_{\bar{x}_\alpha}^2 \right)_\alpha, \\ (u, v)_\alpha &= \sum_{i_1=1}^{N_1-1} \sum_{i_2=1}^{N_2-1} \dots \sum_{i_p=1}^{N_p-1} u_{i_1 \dots i_p} v_{i_1 \dots i_p} h_1 h_2 \dots h_p, \\ (b_\alpha^+ a_\alpha^{(+1_\alpha)} Y_{x_\alpha}, Y) &\leq c_4 \|Y_{\bar{x}_\alpha}\|_\alpha \|Y\| \leq c_4 \left(\frac{\varepsilon}{2} \|Y_{\bar{x}_\alpha}\|_\alpha^2 + \frac{1}{2\varepsilon} \|Y\|^2 \right), \\ (b_\alpha^- a_\alpha Y_{\bar{x}_\alpha}, Y) &\leq c_4 \|Y_{\bar{x}_\alpha}\|_\alpha \|Y\| \leq c_4 \left(\frac{\varepsilon}{2} \|Y_{\bar{x}_\alpha}\|_\alpha^2 + \frac{1}{2\varepsilon} \|Y\|^2 \right), \\ \left(\sum_{k=1}^{m_\alpha} \beta_k^{(\alpha)}(\bar{t}) \left\{ Y_{i_{\alpha_k}} \frac{x_\alpha^{(i_{\alpha_k}+1)} - \xi_\alpha^{(k)}}{h_\alpha} + Y_{i_{\alpha_k}+1} \frac{\xi_\alpha^{(k)} - x_\alpha^{(i_{\alpha_k})}}{h_\alpha} \right\}, Y \right) &\leq \\ &\leq \frac{\tilde{n}_5}{2} \left(\varepsilon \|Y_{\bar{x}_\alpha}\|_\alpha^2 + c(\varepsilon) \|Y\|^2 \right) + \frac{l}{2} \|Y\|^2, \quad l = \prod_{\alpha=1}^p l_\alpha, \end{aligned} \quad (55)$$

$$(\varphi, Y) \leq \frac{1}{2} \|\varphi\| + \frac{1}{2} \|Y\|, \quad \|u\|_\alpha^2 = (u, u)_\alpha.$$

Подставляя оценки (55) в тождество (54), после суммирования по α от 1 до p , находим

$$\left(\|y\|^2\right)_t + c_1 \|Y_{\bar{x}}\|^2 \leq \varepsilon(c_4 + c_5/2) \|Y_{\bar{x}}\|^2 + \tilde{c}(\varepsilon) \|Y\|^2 + \frac{1}{2} \|\Phi\|^2, \quad (56)$$

где $\tilde{n}(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon} \tilde{n}_4 + \frac{\tilde{n}_5}{2} \tilde{n}(\varepsilon) + \frac{1}{2} + \frac{l}{2}$, $\|Y_{\bar{x}}\|^2 = \sum_{\alpha=1}^p \|Y_{\bar{x}_\alpha}\|^2$.

Выберем $\varepsilon \leq \varepsilon_0 = \tilde{n}_1 / 2(\tilde{n}_4 + \tilde{n}_5/2)$, тогда из (56) получаем

$$\left(\|y\|^2\right)_t + \frac{c_1}{2} \|Y_{\bar{x}}\|^2 \leq \tilde{c}(\varepsilon) \|Y\|^2 + \frac{1}{2} \|\Phi\|^2. \quad (57)$$

Просуммируем (57) по j' от 0 до j :

$$\|y^{j+1}\|^2 + \frac{c_1}{2} \sum_{j'=0}^j \|Y_{\bar{x}}^{j'}\|^2 \tau \leq \tilde{c}(\varepsilon) \|Y^{j'}\|^2 \tau + \frac{1}{2} \sum_{j'=0}^j \|\Phi^{j'}\|^2 \tau + \|y^0\|^2. \quad (58)$$

Применяя лемму 4 из [6] к неравенству (58), находим при малом $\tau \leq \tau_0$ оценку

$$\|y^{j+1}\|^2 + \sum_{j'=0}^j \|Y_{\bar{x}}^{j'}\|^2 \tau \leq M \left(\sum_{j'=0}^j \|\Phi^{j'}\|^2 \tau + \|y^0\|^2 \right), \quad (59)$$

где M – положительная постоянная, не зависящая от $|h|, \tau$.

Из априорной оценки (59) следует

Теорема. Пусть выполнены условия

$$0 < c_1 \leq k_\alpha \leq c_2, \quad |r_\alpha|, |r_{\alpha x_\alpha}| \leq \tilde{n}_3, \quad |\beta_\alpha^{(\pm)} a_\alpha| \leq c_4, \quad \sum_{k=1}^m |\beta_k^{(\alpha)}| \leq c_5,$$

тогда для решения задачи (52)-(53) при всех $\tau \leq \tau_0(\tilde{n}_1, \dots, c_5)$ справедлива априорная оценка

$$\|y^{j+1}\|_1^2 \leq M \left(\sum_{j'=0}^j \|\Phi^{j'}\|^2 \tau + \|u_0(x)\|^2 \right),$$

где $\|y^{j+1}\|_1^2 = \|y^{j+1}\|^2 + \sum_{j'=0}^j \|Y_{\bar{x}}^{j'}\|^2 \tau$.

Из оценки (59) следует сходимость схемы (52)-(53) со скоростью $O(|h|^2 + \tau^2)$, $|h|^2 = h_1^2 + \dots + h_p^2$.

Работа поддержана РФФИ (проект №03-01-96746).

Литература

1. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977.
2. Ильин В.А., Моисеев Е.И. Нелокальная задача для оператора Штурма-Лиувилля в дифференциальной и разностной трактовках. // ДАН СССР. 1986. Т.291, №3. С.534-540.
3. Нахушев А.М. Нагруженные уравнения. // Дифференциальные уравнения. 1983. Т.19, №1. С.86-94.
4. Анохин Ю.А., Горстко А.Б., Дамешек Л.Ю. и др. Математические модели и методы управления крупномасштабным водным объектом. Новосибирск: Наука, 1987.
5. Ладыженская О.А. Краевые задачи математической физики. М.: Наука, 1973.
6. Самарский А.А. Однородные разностные схемы на неравномерных сетках для уравнения параболического типа. // ЖВМ и МФ. 1963. Т.3, №2. С.266-298.

7. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.:УРСС, 2003.

Convergence of difference schemes for loaded differential equations

M.Kh. Shkhanukov-Lafishev, A.M. Berezgov

Kabardino-Balkarian State University, Nalchik

Abstract. The *a priory* estimation in differential and difference form for solution of some class of loaded differential equations are presented. This estimation give the stability and convergence of difference schemes.

УДК 165; 501

Квантовая механика как раздел теоретической физики. Формулировка системы исходных понятий и постулатов¹

А.И. Липкин

Московский физико-технический институт, Москва

"Если вы хотите кое-что выяснить у физиков-теоретиков о методах, которые они применяют, я советую вам твердо придерживаться одного принципа: не слушайте, что они говорят, а лучше изучайте их действия..."

А.Эйнштейн "О методе теоретической физики", 1933

Исходя из постулатов Гейзенберга, Борна, Бора, Шредингера, дана свободная от "парадоксов" формулировка базовой системы исходных понятий и постулатов квантовой механики, в центре которой находится понятие "квантовой частицы", обладающей как корпускулярными, так и волновыми свойствами, и вероятностным типом поведения. При этом состояние физической системы существует независимо от каких бы то ни было измерений, а состояния в разные моменты времени однозначно связаны уравнением движения (уравнением Шредингера). Главная особенность этих состояний состоит в том, что они определяются не значениями, а распределениями вероятности значений соответствующих измеримых величин. Утверждается, что физика (подобно геометрии) с конца XIX в. перешла к более сложной процедуре введения исходных понятий, что привело к формированию "теоретической физики". Дана общая структура базовой системы исходных понятий и постулатов раздела физики. Указана особая роль процедур приготовления и измерения, в этой структуре, неучет которой ведет к появлению псевдопарадоксов в квантовой механике.

1. Введение

Эйнштейн мечтал об изложении оснований квантовой механики столь же четком и стройном, как в его теории относительности [19, с. 137]. Я собираюсь показать что все, что необходимо для реализации этой мечты Эйнштейна, было сделано в 1925-27 гг., когда и бы-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 03-06-80091.

ли созданы основания современной квантовой механики². Только это осталось неотрефлексированным должным образом³.

Вследствие этого возникло несколько конкурирующих “интерпретаций” квантовой механики. Во-первых, это наиболее популярная “боровская” или “копенгагенская” интерпретация. Во-вторых, – “эйнштейновская” позиция, вокруг которой объединился ряд отцов квантовой механики недовольных своим детищем. Главными претензиями Эйнштейна к “копенгагенцам” были, во-первых, копенгагенское решение вопроса о соотношении между состоянием физической системы и измерением: “Состояние системы в момент времени t , когда не производится никаких наблюдений, не может служить предметом рассмотрения” – говорит “копенгагенец” М. Борн [5, 171] (т.е. до измерения нет состояния). Во-вторых, – вероятностный тип описания. Свою позицию они выразили в виде ряда “парадоксов”, якобы возникающих в формулировке квантовой механики и говорящих о ее неполноте и незаконченности (классический набор состоит из парадоксов “кота Шредингера”, “редукции (коллапса) волновой функции” и мысленного эксперимента Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР) [1]). В попытках решения этих парадоксов сегодня доходят до “шизометрии” (от греч. *schizo* – расщепляю) “многомировой интерпретации” или введения сознания в основания квантовой механики [17]⁴. В-третьих, это, так называемая, “минимальная” феноменалистическая интерпретация, в которой ограничиваются математическим формализмом и возможностью вычислять результаты. Ее часто приписывают работающим в квантовой механике физикам, которые не обращают внимание на споры первых двух групп и упомянутые “парадоксы” (о них они часто просто не знают)⁵.

Ниже представлена четкая формулировка постулатов квантовой механики, в которой не возникает никаких “парадоксов” и из которой вытекает положительный ответ на первую претензию Эйнштейна и отрицательный – на вторую. Эта формулировка оправдывает третью позицию в плане игнорирования проблемы “парадоксов”, но выстраивает модели квантовой частицы и образуемых с ее помощью квантовых систем.

Она основана на осознании существенного изменения в построении оснований физики, которое произошло с появлением электродинамики Фарадея-Максвелла в последней трети XIX в. Эти изменения в построении оснований физики были связаны с введением более сложных и менее наглядных понятий (электромагнитное поле). Не случайно именно это

² Последнюю следует отличать от “старой квантовой теории”, основанной на искусстве использования постоянной Планка для получения выражений для описания ряда явлений: формулы Планка для спектра теплового излучения черного тела, формулы Бора для спектральных линий атома водорода и ряда других явлений. “До 1925 г. квантовая теория..., при всей пышности названия и многочисленных примерах успешного решения задач атомной физики, с методологической точки зрения представляла собой скорее внушающее жалость скопление гипотез, принципов, теорем и вычислительных рецептов, чем логически последовательную теорию... Фактически квантовая теория стала полем действия неких специальных изошренных или даже артистических приемов”. Это “было делом искусных догадок и интуиции, а не процессом дедуктивных и последовательных рассуждений”. “Старая квантовая теория по существу была всего лишь модификацией классической физики” [10, с. 196, 217].

³ Это было связано, с одной стороны, со сложным процессом формирования основных положений квантовой механики, который шел параллельно несколькими путями и начинался с математических выражений – “математического формализма” и его интерпретаций. С другой стороны, при осмыслении этого процесса использовались механицистские (в духе П. Лапласа) и позитивистские (в духе Э. Маха или логических эмпиристов) философские конструкции, в рамках которых этот процесс адекватно осмыслить нельзя.

⁴ В результате этого квантовую механику используют как “темный чулан”, куда можно спрятать концы бредовых или недоделанных теоретических псевдонаучных построений.

⁵ Эти темы в более развернутом виде неплохо освещены в [1].

время ознаменовано “рождением профессии теоретика, появлением кафедр теоретической физики” [6, с. 9].

Именно теоретическая физика стала адекватной формой построения новых физических сущностей, причем, используемый при этом более сложный математический аппарат (то, чем занималась “математическая физика”) носил подчиненную, служебную функцию.

2. Подход “теоретической физики”

Понимание, в чем состоит новый более сложный тип задания исходных (“первичных”) понятий, облегчается тем, что ситуация в физике во многом аналогична имевшей место в то же время в геометрии, которая более проста. В геометрии есть исходные (первичные) понятия (точка, прямая, плоскость, ...), с помощью которых образуются (и определяются) остальные “вторичные” понятия (фигуры). Вторые определяются через первые явным образом (треугольник – это фигура, образованная пересечением трех прямых), но как определить первые (“первичные”)? До второй половины XIX в. эти первичные понятия считались “неопределимыми понятиями”, которые интуитивно ясны (очевидны). Но после появления неевклидовых геометрий стало сложно говорить об интуитивной ясности, скажем, понятия “прямая”. В 1899 г. великий математик Давид Гильберт для решения этой проблемы ввел новый “*неявный*” тип совместного определения исходных понятий геометрии с помощью аксиом геометрии. В аксиомах геометрии фигурирует несколько понятий (например, “через две точки можно провести *прямую* и только одну”). Эти понятия нельзя явным образом вывести друг через друга, используя определения типа “прямая – это...”. Но “неявно” и “совместно”, не значит “нечетко”. Если аксиом достаточно количество, то все исходные понятия оказываются определенными четко и однозначно.

Аналогичный процесс имел место и в физике. Многие из основных понятий классической механики Ньютона до последней трети XIX в. имели статус неопределяемых интуитивно ясных понятий (которые можно получить путем абстрагирования, например, абстрагируясь от размеров тела получить механическую частицу или “математический маятник”). Но в связи с появлением электродинамики Максвелла и на фоне повышения уровня строгости определений в математике, эта “интуитивная ясность” перестала срабатывать⁶. В итоге физика фактически пошла по тому же пути, что и геометрия – исходные понятия стали задаваться неявным образом в рамках системы понятий и постулатов, образовавших основания различных *разделов физики*. Т.е. целостной единицей становится “зрелый” “раздел физики”, который уже сформировал свои основания и исходные (“первичные”) понятия и состоит из этой *базовой системы исходных понятий и постулатов* (в [15] она называется “ядро раздела науки”) и различных теорий, которые строятся с помощью “первичных” понятий типа механической частицы или электромагнитного поля (в [15] они называются “первичные идеальные объекты”). Это и отложилось в структуре теоретической физики, которая распадается на отдельные разделы⁷. Центральными понятиями раздела при этом оказываются указанные “первичные” понятия, а не “законы”, которые превращаются в атрибуты этих “первичных” понятий.

Важной особенностью, отличающей физику от математики, является то, что теоретические объекты физики (например, механические частицы, движущиеся с определенной скоростью) должны воплощаться в материальные эмпирические частицы. Поэтому в физике, наряду с теоретическими объектами (Т) входят *процедуры приготовления* (<П|) физической

⁶ В результате в конце XIX в. возник так называемый “гносеологический кризис в физике”.

⁷ Это совпадает с разделами, выделяемыми в теоретической физике (механика (классическая), электродинамика, специальная теория относительности, общая теория относительности, квантовая механика (нерелятивистская),...)[13].

системы в исходном состоянии и *процедуры измерения* ($|I\rangle$), суть которых состоит в процедуре сравнения с эталоном. Все вместе они образуют структуру эксперимента $\langle\P|T|I\rangle$ (близкое нашему различие на процедуры приготовления и измерения, с одной стороны, и теоретическую часть – с другой, можно найти у Фока [21]).⁸

Хочу подчеркнуть, что *процедуры приготовления и измерения* входят как элементы особого типа в базовую систему исходных понятий и постулатов раздела теоретической физики, и в курсах теоретической физики эти элементы присутствуют наряду с теоретическими элементами (особенно четко процедуры измерения фиксируются в специальной теории относительности⁹). *То есть теоретическая физика оперирует как теоретическими, так и нетеоретическими (процедуры) элементами.*

Наличие процедур в базовой системе исходных понятий и постулатов составляет одно из важных отличий физики от математики. В математике аксиоматизация оставляет содержание в стороне. В физике благодаря процедурам приготовления и измерения происходит фиксация содержания таких понятий как “частица” (классическая или квантовая), электромагнитное поле и т.п., превращающая их в объекты, из которых строятся объектные (физические) модели явлений.

В теоретической части надо отличать *физическую модель* и ее математическое описание (представление). Основу физической теории составляет физическая *модель* явления (или объекта)¹⁰. *Понимание* физической теории наступает после создания (выделения и понимания) соответствующей физической модели¹¹. Основными элементами физической модели являются “*физическая система*” (A) – то, что не меняется (в классической механике – механические частицы), и ее “*состояния*” (S_{A_j}) – то, что меняется (в классической механике – положения и скорости механических частиц). Физический процесс (движение) представляется в физике как переход физической системы из одного состояния в другое:

$$S_{A1} \rightarrow S_{A2} .$$

⁸ Это структура “осмысленного” эксперимента, когда есть теория (или гипотеза), которая определяет, что в эксперименте приготовить и что измерять. В “слепом” эксперименте (без теории), часто имеющем место на ранних стадиях развития науки, ведущими являются крайние члены этой триады $\langle\P|O|I\rangle$, где O – исследуемый объект. “Наблюдению”, характерному, например, для астрофизики, отвечает неполная структура – без левой части (“приготовления”).

⁹ Одним из важнейших изменений произошедших при переходе от ньютоновской механики к эйнштейновской СТО было изменение в процедурах измерения ($|I\rangle$): если главным эталоном классической механики был эталон метра, т.е. длины твердого тела, которая считалась не меняющейся при перемещении с места на место и не зависящей от скорости, то у Эйнштейна такой неизменностью наделяется скорость света.

¹⁰ Ее построение основывается на особом навыке схематизации-моделирования, который приобретает при изучении курсов “общей физики”. После того, как модель составлена, в соответствии с ней составляется уравнение движения, которое затем решается. Основной областью физической работы является построение самой модели явления (особо следует рассматривать “научные революции” типа создания новой базовой системы исходных понятий и постулатов [15]). Характерный для математики дедуктивный вывод (например, вывод “соотношения неопределенностей” из постулатов Борна и Шредингера в квантовой механике) – в физике явление не столь уж частое.

¹¹ В статье “Что такое “понимание” в теоретической физике?” [7], В.Гейзенберг, ссылаясь на пример теории Птолемея с ее высокой “предсказательной ценностью” подчеркивал, что, несмотря на это, “большинство физиков согласятся, что лишь после Ньютона удалось добиться “реального понимания” динамики движения планет”. Приводимые им примеры теории турбулентного движения в жидкости, сверхпроводимость показывают, что ощущение “понятности” возникает у физиков после построения соответствующих моделей. Более развернуто эта тема обсуждается в [12; 15].

При этом связь между состояниями физической системы задается с помощью “уравнения движения” (например – уравнения Ньютона), для чего вводится “математическое представление”, состоящее из математических образов физической системы (\underline{A}) (принадлежность математическому слою будем обозначать подчеркиванием), внешних воздействий (сил и т.п.), состояний физической системы (\underline{S}_A) и самого “уравнения движения”. Без математического описания нельзя работать, в частности, нельзя предсказывать поведение физической системы.

То, что центральное место в физике занимает физическая модель, проявляется в том, что *одна и та же физическая модель* может обслуживаться *разными эквивалентными “математическими представлениями”* (в классической механике – это представления Ньютона, Лагранжа, Гамильтона). Выбор математического представления в физике во многом аналогичен выбору разных систем координат (декартовой, цилиндрической, сферической и т.п.) в аналитической геометрии. В обоих случаях этот выбор исходит из соображений удобства. Физическая модель составляет центральную часть физической теории. Она, с одной стороны, связана с математическим представлением, а с другой – с процедурами приготовления и измерения¹².

В результате для различных разделов физики мы получаем единую *структуру (1) базовой системы исходных понятий и постулатов раздела физики* [15]:

$$\begin{array}{ccc}
 & \text{Теор. часть (Т)} & \\
 \text{Мат: } \underline{S}_{A1} & \xrightarrow{\text{-УД}} & \underline{S}_{A2} \\
 \uparrow & & \downarrow \\
 \text{Мод: } S_{A1} & & S_{A2}
 \end{array}
 \quad \begin{array}{l}
 \langle\Pi| \\
 |И\rangle
 \end{array}
 \quad (1)$$

Все элементы структуры (1) взаимосвязаны и определяются (как и основные понятия геометрии) совместно¹³. Так, уравнение движения (а, следовательно, и весь математический слой) влияет на то, что представляет собой состояние физической системы (то, что в классической механике состояние частицы описывается ее положением и скоростью, связано с тем, что уравнение Ньютона – дифференциальное уравнение 2-го порядка).

Уравнение движения определяет не только связь между состояниями (диахронический или динамический аспект), но и сам набор (спектр) возможных состояний физической системы (синхронический аспект). *Состояние физической системы* – одно из центральных понятий физики (хотя в курсе общей физики и в школе этого понятия избегают). Знание состояния задает полную возможную информацию о системе в данный момент времени, а посредством уравнения движения – и в другие моменты времени. Так, в классической механике, где уравнением движения является уравнение Ньютона, для случая физической системы, состоящей из одной частицы, зная положение и скорость частицы с помощью уравнения движения, можно ответить на любой вопрос о движении частицы, как в этот момент време-

¹² Многие физики в своих мировоззренческих (идеологических) высказываниях следуют идущим из позитивизма второй четверти XX в. представлениям, в которых нет модельного слоя, а есть только уравнения, содержащие величины, которые имеют физический смысл и измеряются. Но это противоречит существованию в теоретической физике таких теоретических объектов, как электрон, атом, и другие.

¹³ Правда, часто (но не всегда) процедуры приготовления и измерения определяются отдельно от теоретической части.

ни, так и в любой другой. Поэтому знание положения и скорости частицы и задает состояние частицы в классической механике.

Понятия *физической системы и ее состояний* задаются совместно в рамках базовой системы исходных понятий и постулатов. Этих двух понятий – физическая система и ее состояния – достаточно, чтобы описать физический процесс. Процесс движения частицы (и классической, и квантовой) в физике представляется как переход во времени физической системы (A) из одного состояния ($S_A(t_1)$) в другое ($S_A(t_2)$), а набор возможных состояний является важнейшей характеристикой физической системы.

*Итак, понятия физики, возникшие начиная с электродинамики Максвелла, нельзя адекватно воспринять, не используя явно или неявно структуру базовой системы исходных понятий и постулатов раздела физики (1), т.е. структуру оснований раздела физики, которая естественным образом возникает в теоретической, а не “общей” физике. Причем речь идет об основных **модельных** понятиях, которые можно отделить от сложной математики. В центре оказывается физическая система, состоящая из “первичных” объектов, в механике – частиц.*

3. Основания квантовой механики

В разных разделах физики речь идет о разных процессах и физических системах (объектах), и в них будет разным содержательное наполнение структуры (1). Нас интересует раздел физики под названием “квантовая механика” (в нерелятивистском варианте), которая была создана в 1925–27 гг. “Квантовая частица” – базовое (“первичное”) понятие этого раздела физики, которое определяется базовой системой исходных понятий и постулатов квантовой механики. Последнюю можно представить как совокупность постулатов Э. Шредингера, М. Борна, “процедуры квантования затравочной классической системы” (Гейзенберга-Бора) и “принципа тождественности” квантовых частиц для многочастичных систем.

*Постулаты Шредингера*¹⁴ вводят математический образ состояния квантовой системы в виде “волновой функции” $\Psi_A(t)$ (ее часто называют Ψ -функцией) и *уравнение Шредингера в качестве* уравнение движения, куда входит оператор Гамильтона $H_{кв}$, являющийся математическим образом квантовомеханической системы (включая внешние условия).

То есть в (1) надо математический образ \underline{S}_{Aj} поменять на $\Psi_A(t_j)$ и вместо уравнения движения подставить уравнение Шредингера. В постулаты Шредингера следует включить и *принцип суперпозиции*, утверждающий, что если есть два состояния, описываемые волновыми функциями Ψ_1 и Ψ_2 , то есть и состояния, описываемые волновыми функциями $(a\Psi_1 + b\Psi_2)$ с любыми коэффициентами a и b . В силу того, что уравнение Шредингера – уравнение волнового типа, эти постулаты ответственны за *волновые свойства* распространения состояний. При этом связь состояний здесь, как и в классической физике, абсолютно детерминистична.

Постулаты Борна, которые часто называют “вероятностной интерпретацией волновой функции”, ответственны за появление в квантовой механике вероятности и за сочетание корпускулярных и волновых свойств. Это центральные постулаты квантовой механики. Именно из-за нечеткости их формулировки и существует множество “интерпретаций” квантовой механики. Предлагаемая здесь формулировка звучит так: 1) в квантовой механике состояние физической системы определяется не значениями, а распределениями вероятности значений соответствующих измеримых величин (это естественное обобщение понятия состояния в физике); 2) из этого следует, что одно измерение ничего не говорит о состоянии системы, и чтобы определить распределение вероятности, требуется достаточно длинная се-

¹⁴ Можно исходить из постулатов Гейзенберга, которые эквивалентны постулатам Шредингера. Но в представлении (математическом представлении) Шредингера излагать проще.

рия измерений¹⁵; 3) задаются правила, позволяющие по математическому образу состояния $\Psi_A(t)$, определить распределения вероятности соответствующих измеримых величин¹⁶. *Измерение* в квантовой механике, как и в других разделах физики, *проявляет, а не создает существующее состояние*. Оно ничего не говорит о том, что будет с системой или ее состоянием после измерения (это прерогатива процедур приготовления, использующих фильтры и другие приборы). И, как и в классической физике, не надо сюда примешивать ни сознание, ни многомировые интерпретации, ни довольно мутное (когда оно используется в расширительном смысле) понятие информации (в физике это понятие вводить не надо).

Постулаты Шредингера и Борна определяют основные свойства квантовых систем: вероятностный тип поведения и корпускулярно-волновой дуализм¹⁷. Сочетание корпускулярных и волновых свойств здесь хорошо иллюстрируется на примере известного двухщелевого эксперимента: микрочастицы падают на экран с двумя щелями, за которым стоит фотопластинка, которая эти частицы поглощает. В соответствии с постулатами Борна каждое отдельное измерение даст локальную точку на втором экране-фотопластинке (корпускулярное свойство), но если провести достаточно много измерений, то проявится дифракционно-интерференционная картина (волновые свойства), соответствующая прохождению *волны* через две щели (при этом вопрос “через какую щель проходит частица?” на самом деле оказывается неадекватным, у микрочастицы, как и у волны, нет локализованной траектории).

Однако чтобы задать квантовомеханическую систему, состоящую из одной или многих квантовых частиц, надо указать способ построения математического образа физической системы – квантовый оператор Гамильтона $H_{кв}$, который входит в “уравнение движения”. Стандартную процедуру его построения можно представить в виде “*процедуры квантования затравочной классической системы*”.

Эта общая процедура состоит в следующем. *Исходной* точкой здесь является классическая модель системы (например, планетарная модель атома). Для нее строится классический математический образ – классический гамильтониан $H(x,p)$ в декартовой системе координат (являющийся функцией от положений (x) и импульсов (p) частиц). Затем проводится *процедура квантования* в виде замены импульсов на соответствующие операторы (например, компоненту импульса частицы p_x меняют на оператор $(-i\hbar/4\pi)\partial/\partial x$). В результате этого получают квантовый гамильтониан $H_{кв}$, т.е. математический образ квантовой системы, отвечающий квантовомеханической физической модели (так получается квантовомеханическая модель атома с делокализованными состояниями (“орбитами”) электронов в атоме)¹⁸. Эта про-

¹⁵ Значения же этих величин в отдельном акте измерения сопоставить с состоянием системы (если оно не приготовлено в особом “собственном” состоянии) нельзя ни до, ни после этого акта измерения.

¹⁶ Часто постулаты Борна сводят к третьему из перечисленных выше пунктов. По Л. де Бройлю, чья формулировка “вероятностной интерпретации волновой функции” Борна наиболее адекватна действиям современного физика-теоретика, она сводится к “принципу квантования” (не путать с “условиями (правилами) квантования” в “старой квантовой теории”) – “точное измерение какой-либо механической величины может дать в качестве значения этой величины лишь одно из собственных значений соответствующего оператора”, дополненному “принципом спектрального разложения”, утверждающим, что “вероятности различных возможных значений некоторой механической величины, характеризующей частицу, полная Ψ -функция которой известна, пропорциональны квадратам (точнее квадратам модуля – *А.Л.*) амплитуд соответствующих компонент спектрального разложения Ψ -функции по собственным функциям рассматриваемой величины” [9, с. 173-174].

¹⁷ В “старой” квантовой теории акцент делался на дискретность характеристик (энергии, момента количества движения и др.) квантовых объектов (систем), но квантовая система в “новой квантовой теории” может обладать и непрерывными характеристиками.

¹⁸ Эта процедура, которую мы назвали “квантованием затравочной классической модели”, может быть проведена с разной степенью полноты. Ею, в частности, определяется выбор квазиклассического

цедура постоянно используется в современной физике. Она в этой форме, но без такого особого названия (например, у Луи де Бройля она существует под именем “автоматический вывод волнового уравнения” [8, с. 45]) была сформулирована в фундаментальных работах 1927-30 гг. Джона фон Неймана и Поля Дирака [18; 11, с. 156]. По сути, она появляется уже в первых основополагающих работах Гейзенберга (1925). В 1949 г. Бор излагает дело так: “Гейзенберг (1925) заложил основы рациональной квантовой механики, которая получила быстрое развитие благодаря важным вкладам Борна и Иордана, а также Дирака. Теория вводит формальный аппарат, в котором кинематические и динамические переменные классической механики заменяются абстрактными символами, подчиняющимися некоммутативной алгебре” [4, т.2, с. 404-405]. Последние есть не что иное, как операторы в современной терминологии. При этом, по утверждению Джеммера, “фундаментальной особенностью, характерной для подхода Гейзенберга, был способ использования принципа соответствия Бора... Гейзенберг... рассмотрел... возможность “угадать” – в согласии с принципом соответствия – не решение частной квантовомеханической задачи, а математическую схему новой механики” [10, с. 199]. Поэтому рассматриваемую “процедуру квантования затравочной классической системы” в “новой квантовой теории” можно считать гейзенберговским обобщением боровского “принципа соответствия” “старой квантовой теории”¹⁹. В предлагаемой в данной работе формулировке указанная процедура возводится в ранг теоретического постулата, входящего в базовую систему исходных понятий и постулатов квантовой механики, подобно тому, как Бор возводил в ранг “чисто теоретического закона” свой “принцип соответствия” в старой квантовой теории” [4, т.1, с. 505]²⁰.

или последовательного квантовомеханического описания электромагнитного поля или фильтров (типа экрана с щелью). Так, часто некоторые явления описываются с помощью сочетания “первичных идеальных объектов” квантовой механики и классической электродинамики. В этом случае говорят о квазиклассическом приближении. По такой схеме вводится спин квантовой частицы (в первую очередь у электрона) в нерелятивистской квантовой механике: квантовой частице приписывается классический механический и магнитный моменты, которым затем приписываются квантовые характеристики по аналогии с орбитальным моментом. Так поступают в опыте Штерна и Герлаха и эффекте Зеемана, где сталкиваются с взаимодействием электрона с магнитным полем. Электрон со спином здесь не является новым “первичным” объектом по сравнению с электроном без спина, поскольку здесь спин добавляется по квазиклассической логике. Другое дело электрон со спином в последовательной релятивистской квантовой механике Дирака. Там речь идет об электроном со спином как новом по сравнению с электроном в нерелятивистской квантовой механике Шредингера – Борна – Бора “первичном” объекте. “Метод затравочной классической модели”, широко используется в физике XX в. Аналогичная процедура имела место и в теории относительности [15].

¹⁹ “Принцип соответствия” Бора заключался в “требовании непосредственного перехода квантово-теоретического описания в обычное в тех случаях, когда можно пренебречь квантом действия” [4, т. 2, с. 66]. За счет этого определялись неизвестные параметры в формулах “старой” квантовой теории.

²⁰ Отметим, что в формулировке П. Дирака (1930) обсуждаемая процедура содержит ряд дополнительных оговорок (мы их выделяем подчеркиванием): “Обычно можно предполагать, что гамильтониан в классической и квантовой механике является одной и той же функцией канонических координат и импульсов (... в декартовой системе координат...). При этом *могло бы возникнуть затруднение*, если бы классический гамильтониан содержал произведение множителей, квантовые аналоги которых не коммутируют между собой, ибо тогда было бы неизвестно, в каком порядке расположить эти множители в квантовом гамильтониане. Однако для большинства простейших динамических систем, изучение которых важно в атомной физике, такое затруднение не возникает” [10, с. 156]. Указанное “затруднение” решается введением соответствующего оператора (типа оператора временного упорядочения в представлении чисел заполнения). Что касается осторожного “обычно”, то никаких других общих процедур построения гамильтониана для квантовомеханических систем выдвинуто не было. В

Так, затравочной классической моделью квантовой частицы является классическая механическая частица. Именно поэтому “первичным” объектом квантовой механики является “квантовая *частица*”, обладающая волновыми свойствами (а в квантовой теории поля – квантованная *волна*, обладающая корпускулярными свойствами)²¹. Таким образом,

благодаря процедуре квантования затравочной классической системы *классическая физика оказалась встроена в основания квантовой физики*²².

“Квантовая частица” – новый “первичный” физический объект, определяемый базовой системой исходных понятий и постулатов квантовой механики, созданной в 1925-27 гг. Естественно, что ее свойства существенно отличаются от свойств классической частицы. Наиболее яркое отличие, являющееся проявлением ее волновых свойств, является “*соотношение неопределенностей*” Гейзенберга, которое утверждает, что для двух “взаимодополнительных” величин (например, компонент положения x и импульса p_x) произведение их неопределенностей (квадратных корней дисперсий соответствующих функций распределения) отвечает условию $\Delta x \Delta p_x \geq h/4\pi$. “*Взаимодополнительность*” – новое для физики свойство, утверждающее, что измеримые величины, отвечающие затравочной классической модели системы, содержат пары взаимодополнительных величин. Математическим выражением этого свойства является некоммутативность математических образов (так называемых операторов) измеримых величин (т.е. $ab \neq ba$), а *физическим выражением свойства взаимодополнительности* является само “*соотношение неопределенностей*”, которое представляет собой не дополнительный постулат (принцип), а *следствие* постулатов Шредингера и Борна: оно теоретически выводится из них [10, с. 324-325] (это редкий в физике пример дедуктивного вывода). Соответственно соотношение неопределенностей *есть свойство состояния, а не измерения* (якобы “*меря одну величину, возмущаем другую*”). Состояние, полностью описываемое волновой функцией, определяет распределение вероятностей для всех измеримых величин, включая взаимодополнительные. Измерения (по определению, по своему функциональному месту в (1)) проявляют состояние, а не изменяют его (это делают процедуры приготовления, используя различные фильтры и т.п.). Соотношение неопределенностей является следствием волновых свойств квантовых частиц (состояние с заданным положением частицы можно приготовить с помощью экрана с маленькой щелью, но в силу дифракции после прохождения щели будет большая неопределенность по направлению импульса; состоянию с определенным импульсом отвечает плоская волна, характеризующаяся полной нелокализированностью в пространстве).

Модель физической системы в квантовой механике строится, во-первых, путем конкретизации измеримых величин, характеризующих квантовую частицу и ее состояния. В ре-

моем варианте формулировки оснований квантовой механики указанная процедура возводится в ранг теоретического постулата, и, соответственно, слово “обычно” становится неуместным (оно заменяется на “всегда”).

²¹ “Вследствие этого, - говорит Дирак о рассматриваемой процедуре, - мы можем в большинстве случаев употреблять для описания динамических систем в квантовой теории тот же язык, что и в классической теории (например, можем говорить о частицах с определенными массами, движущихся в заданном поле сил), и если нам дана система в классической механике, то обычно можно придать смысл понятию “той же самой” системы в квантовой механике” [11, с. 156].

²² Квантовая механика, как и теория относительности, как бы надстраиваются над классической физикой, существенным образом используя ее физические модели, изменяя их. В более ранний “классический” период этот прием не использовался. Новые разделы физики создавали свои собственные модели.

зультате этого квантовая частица превращается в электрон со спином или без спина – протон, фотон и т.д. Во-вторых, в квантовой механике, как и в классической, возможно построение многочастичных систем.

В последнем случае требуется добавить к перечисленным выше постулатам *принцип тождественности квантовых частиц*, который определяет правила сборки многочастичных систем в квантовой механике. Из него следует “принцип Паули” для заполнения орбит электронов в атоме. Из него также следует наличие двух типов частиц – бозонов (фотон) и фермионов (электрон, протон, нейтрон), обладающих разными коллективными свойствами (“статистиками”). Это холистский²³ принцип. Из-за него система частиц не сводится к совокупности частиц²⁴. Без него нельзя описать явления сверхпроводимости и сверхтекучести при низких температурах и многие другие квантовые эффекты.

Такова предлагаемая в данной работе формулировка базовых понятий и постулатов квантовой механики. Основная новизна ее состоит во введении в формулировку постулатов Борна *понятия состояния, которое объективно существует независимо от каких бы то ни было измерений, но определяется не значениями, а распределениями вероятности значений соответствующих измеримых величин*. Эти состояния, как и в классической физике, однозначно связаны уравнением движения и существуют независимо от измерения и наблюдателя. Поэтому, по-прежнему, вопреки тому, что утверждал Бор, речь в квантовой механике идет о причинном и объективном описании явлений²⁵. Однако, в силу той путаницы²⁶, которая с легкой руки Бора, образовалась вокруг вопроса о месте измерения в квантовой механике, этот вопрос требует отдельного обсуждения.

4. Место измерений в структуре оснований квантовой механики

Из места “затравочной классической модели” в базовой системе исходных понятий и постулатов квантовой механики вытекает, что в нерелятивистской квантовой механике фигурируют те же измеримые величины, а, вследствие этого, и те же типы процедур измерения, что и в классической физике (то же можно сказать и про “процедуры приготовления”). Так измерение положения квантовой частицы (микрочастицы) осуществляется с помощью фильтра или фотопластинки и метра (микрометра). Приготовление частиц с определенным импульсом, состояния которых описываются волновой функцией типа плоской волны, осуществляется с помощью нагретой спирали, их излучающей, и соответствующего фильтра (в рамках классической модели). Именно из этого использования “затравочной классической модели”, а не из психологической сущности наблюдения, как полагал Бор, вытекает спра-

²³ От слова “*whole*” – целый. В противоположность атомизму (или элементаризму), утверждающему, что свойства целого вытекают из свойств его элементов (включая взаимодействие), холизм утверждает, что есть существенные свойства целого, которые не вытекают из свойств его элементов.

²⁴ Ярким примером этого являются введенные в рассмотрение Эйнштейном, Подольским и Розеном “перепутанные” состояния двух частиц, корреляция в состоянии которых не меняется при разлете их на сколь угодно большое расстояние (этому есть классический аналог: разность фаз двух лучей света, полученных разделением одного луча полупрозрачным зеркалом и фазовой пластинкой, не будет меняться, как бы далеко лучи не ушли друг от друга). Это свойство легло в основу разрабатываемых последние десятилетия проектов квантовой криптографии (шифрования) и квантового компьютера. В многочастичных системах квантовой теории поля этот принцип проявляется в процедуре “временного упорядочения” в математическом слое.

²⁵ Появление вероятностного описания не означает, что в квантовой механике появляется место для “свободной воли” и т.п., как думают некоторые нефизики.

²⁶ Степень нечеткости формулировок этого спора характеризует то, что Эйнштейн в 1949 г., после четверти века споров с Бором, писал, что “несмотря на многочисленные попытки” он “так и не смог... уяснить” “точной формулировки” “боровского принципа дополненности” [23, р. 674].

ведливость для нерелятивистской квантовой механики боровского утверждения о том, что результаты наблюдения “окончательно должны выражаться с помощью классических понятий” [4, т.2, с.57].

“Принципиальная разница” в месте, занимаемом измерением в квантовой механике, – миф, созданный “копенгагенцами” в ходе попыток ответить на критику Эйнштейна. Отцами этого мифа являются Бор и фон Нейман. Бор рассматривает измерение не как особую процедуру (процедуру сравнения с эталоном), а как физическое явление, как взаимодействие “между предметом и средством наблюдения”: “каждое наблюдение этих явлений связано с взаимодействием, которым нельзя пренебречь” [4, т.2, с. 56]. К этому Бор добавляет неадекватное прочтение “соотношения неопределенностей” Гейзенберга. Применяя его к измерению, он утверждает существование “неизбежного влияния на атомные явления при их наблюдении” [4, т.2, с. 60] (т.е., измеряя одну величину, мы возмущаем другую). Однако о чем было сказано выше “соотношения неопределенностей” Гейзенберга, вытекающее из постулатов Шредингера и Борна, описывает свойства состояния квантовой системы, а не измерение.

Фон Нейман в [18], “руководствуясь статьей Бора о кванте действия и описании природы (1929 г.), - говорит Джеммер, - ... развил свою идею о том, что в каждом квантовомеханическом измерении наличествует неанализируемый элемент. Он *постулировал*, что волновая функция, помимо непрерывного каузального изменения, подчиняющегося уравнению Шредингера, при измерении претерпевает прерывное, акаузальное (т.е. не подчиняющееся уравнению Шредингера – А.Л.) и мгновенное изменение, обусловленное вмешательством наблюдателя, его воздействием на объект” [10, с.357]. Последнее есть не что иное, как проблема “редукции” (коллапса) волновой функции. В связи с попытками решения этой “проблемы” создается так называемая “квантовая теория измерения”, отцом которой является опять же фон Нейман. Она состоит из решения различных вариантов стандартной квантовомеханической задачи о составной системе, состоящей из исследуемой квантовомеханической системы и части измерительного прибора, которые рассматриваются в рамках обычной квантовой механики. И здесь нет проблем. Но после этого в конце добавляется скачок “коллапса волновой функции” (то же можно сказать и про “микроскоп Гейзенберга”, который, по сути, описывает эффект Комптона).

В основе этой картины лежит недостаточно обоснованное, философское по своей сути утверждение Дж. фон Неймана, Д. Бома и др., что “если квантовая теория способна дать полное описание всего, что может произойти во вселенной, то она должна иметь возможность описать также сам процесс наблюдения через волновые функции измерительной аппаратуры и исследуемой системы. Кроме того, в принципе, квантовая теория должна описать и *самого исследователя*, наблюдающего явления при помощи соответствующей аппаратуры и изучающего результаты эксперимента ... через волновые функции различных атомов, составляющих этого исследователя” [3, с. 668] (то же найдем в [18, с. 307-308]). Отсюда возникает миф о “невозможности строгого разделения явлений и средств наблюдения” и о том, что “нельзя строго разграничить объект и субъект” [4, т.2, с. 58].

Подобные утверждения являются безусловными с точки зрения Лапласа (или Шредингера с его кошкой [14]), согласно которой, “поскольку все, включая человека, состоит из атомов, а атомы описываются механикой, то все действия и мысли человека можно описать с помощью механических законов”. На этот мировоззренческий, а не физический довод нечего возразить, кроме того, что системный подход выдвинул противоположный тезис, утверждающий, что система обладает свойствами, которые не сводятся к свойствам ее элементов, вследствие чего ни жизнь, ни поступки людей, в том числе *процедуры* измерения, включающие процедуру сравнения с эталоном, не могут быть сведены к физическим явлениям.

Неверность введенной Бором и фон Нейманом постановки вопроса связана с игнорированием зафиксированной на схеме (1) принципиальной разницы между процедурами измерения (и приготовления) как элементами (“строительным материалом”), используемыми в теоретической физике, и явлением (взаимодействием) как объектом теоретического модели-

рования. Эта особая функция измерения серьезно обсуждалась Галилеем (в связи с использованием подзорной трубы), потом потеряла актуальность и была забыта, и снова всплыла в теории относительности и, особенно, в квантовой механике, но в неадекватном виде: как противопоставление *макроскопического* (прибора) и *микроскопического* (частицы) объектов [1, с. 84]. Дело не в макроскопичности прибора (в теории элементарных частиц стабильные микрочастицы являются “приборами” для измерения нестабильных микрочастиц), а в том, что это – прибор, т.е. он осуществляет процедуры (подробнее см. [12; 15, 16]).

При представленной выше формулировке квантовой механики процедуры измерения – это особый строительный материал теоретической физики, а не явление. Поэтому в этой формулировке нет места для явления “акаузального и мгновенного изменения, обусловленного вмешательством наблюдателя”, а, следовательно, нет места ни для “коллапса волновой функции” и других “парадоксов”, ни для связанной с ними “квантовой теории измерений”.

Истинная “теория измерений”, что для квантовой, что для классической физики, относится к “зазору” между идеальными процедурами в (1) и реальными процедурами. Она изучает вопросы точности реальных измерений и анализирует конструкции *приборов* с этой точки зрения. При этом и там, и там возможно рассмотрение составной системы из объекта и части прибора (выступающего при этом аналогом “пробного тела”). В классической физике теория измерений рассматривает, например, степень гладкости наклонной плоскости и влияние температуры на длину метра в опыте Галилея, а не измерение (или приготовление) как таковое, в которое входит человек (или машина!?), подносящий этот метр. То же имеет место и в квантовой механике.

Таким образом, утверждение о принципиальном отличии измерений в квантовой механике – миф [12]. Именно поэтому, как справедливо отмечено в [1], большинство физиков, работающих в квантовой механике, игнорируют эти проблемы²⁷. Этот миф связан отчасти с неадекватным прочтением “соотношения неопределенностей Гейзенберга”, отчасти – с “копенгагенскими” попытками с помощью этой “особости” выйти из-под эйнштейновской критики.

Итак, я совершенно не согласен с утверждением Р. Фейнмана “что квантовую механику никто *не понимает*, хотя многие считают, что в ней все “чисто” и очень хорошо” [2, с. 168]. Причина непонимания, о котором говорит Р. Фейнман и другие – это, в первую очередь, применение неадекватных для этого случая классических понятий. Так непонятность, даже парадоксальность “дуализма волна-частица” возникает при попытке понять квантовомеханическое явление (типа поведения электрона) в логике классических понятий, где понятия частицы и волны являются альтернативными. Но с той же ситуацией мы столкнемся, если в понятиях классической ньютоновской механики попытаемся описать электромагнитную волну (с ее поперечным характером колебаний, требующим чрезвычайно твердого эфира, который мы почему-то не ощущаем) или при описании поведения тел, движущихся с околосветовыми скоростями. И это естественно: *если бы в старых понятиях можно было описать новые явления, то не надо было бы создавать новые разделы физики.*

“Непонятность” – это исходное состояние, которое в ходе сложной работы преобразуется в новые “первичные” объекты и разделы физики. Для квантовой механики такой исходной непонятностью стал сформулированный А. Эйнштейном, Луи де Бройлем и другими “корпускулярно-волновой дуализм”, который в 1925-1927 гг. трудами Шредингера, Гейзенберга, Борна, Бора, Дирака привел к созданию “первичного” идеального объекта квантовой механики – “квантовой частицы”, которая распространяется сразу через две щели и описывается вероятностно (но в рамках точных уравнений). Такой объект трудно наглядно представить (но то же можно сказать и про электромагнитную волну, и про прямую в неевклидовой гео-

²⁷ Сам я услышал о них уже после окончания МФТИ и защиты диссертации по квантовой механике.

метрии). Его нельзя адекватно подать в рамках курса “общей физики”, идущего от “атомных явлений” (и потому называющегося “атомной физикой”, а не “квантовой механикой”), не используя (явно или неявно) характерную для теоретической физики структуру базовых понятий и постулатов (1). Что делать, с конца XIX в. физики стали работать со сложными объектами, но из этих объектов *строят физические модели* явлений (и объектов) так же, как это делают в классической механике или гидродинамике. То есть теоретическая модель явления в квантовой механике, как и в классической, это, в первую очередь, совокупность (система) физических объектов (частиц), а не уравнений, и эти модели обладают физическим, а не условным смыслом. И этот смысл можно понять.

Литература

1. Аккарди Л. Диалоги о квантовой механике. М. 2004.
2. Алексеев И.С. Деятельностная концепция познания и реальности. Избранные труды по методологии физики. М.: "РУССО", 1995.
3. Бом Д. Квантовая теория. М.: Наука, 1965.
4. Бор Н. Избранные научные труды. В 2 т. М., 1971.
5. Борн М. Размышления и воспоминания физика. М., 1977.
6. Визгин В.П. Математика в классической физике. // Физика XIX-XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах. Физика XIX века. М., 1995.
7. Гейзенберг В. Что такое «понимание» в теоретической физике. Природа, N 4 (1971).
8. Де Бройль Луи. Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. М., 1986.
9. Революция в физике (Новая физика и кванты). М., 1965.
10. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. М., 1985.
11. Дирак П. Принципы квантовой механики. М., 1979.
12. Клышко Д.Н., Липкин А.И. "О "коллапсе волновой функции", "квантовой теории измерений" и "непонимаемости" квантовой механики". Электронный журнал "Исследовано в России", 53, стр. 736-785, 2000 г. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/053.pdf>.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М., 1974.
14. Легетт А.Дж. Шредингеровская кошка и ее лабораторные сородичи. Успехи физических наук, 1986, т. 148, в. 4, с. 671-688.
15. Липкин А.И. Основания современного естествознания. Модельный взгляд на физику, синергетику, химию. М.: "Вузовская книга", 2001.
16. Липкин А.И. Существует ли явление "редукции волновой функции"? // Успехи физических наук, 2001, т.171, N4, с. 437-441.
17. Менский Б.М. Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения, и новые формулировки старых вопросов. Успехи физических наук, 2000, т. 170, с.631.
18. Нейман фон И. Математические основы квантовой механики. М.: Наука, 1964.
19. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, 1989.
20. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 5. Атомная и ядерная физика М., 2002.
21. Фок В.А. Критика взглядов Бора на квантовую механику. // Философские вопросы современной физики. М., 1958.
22. Шредингер Э. Новые пути в физике. Статьи и речи. М.: Наука, 1971.
23. Einstein A. In: Albert Einstein: Philosopher-Scientist, Evanson, 1949.

Quantum mechanics as the branch of theoretical physics. Formulation of the system of initial concepts and postulates

A.I. Lipkin

Moscow Institute of Physics & Technology, Moscow

Abstract. Formulation of the system of initial concepts and postulates of quantum mechanics free of “paradoxes” is represented with the help of postulates of Heisenberg, Born, Bohr, Schrödinger. The central concept of this system of ideas is the “quantum particle”, which has corpuscle as well as wave properties, and probabilistic type of behavior. The state of quantum system exists independently of any measurements. The states are unambiguously connected by motion equation (Schrödinger's equation).

These states are defined by probability distribution of values, not of values themselves. It is the particular feature of these states. The statement is made, that physics (as geometry) turned to more complex procedure of definition of initial concepts and it lead to formation of «theoretical physics». The general structure of the system of initial concepts and postulates of branch of physics is done. The particular role of procedures of preparing and measurement in this structure is pointed out. It is shown that its miscalculation results in appearance of “paradoxes” (The ignorance of it lead to appearance of “paradoxes”).

УДК 612.013

Нейровегетативная регуляция трофического состояния слизистой оболочки глотки и гортани

Т.И. Шустова, А.Ю. Юрков

Санкт-Петербургский НИИ уха, горла, носа и речи, С.-Петербург

Нарушения трофического состояния слизистой оболочки гортани и глотки существенно изменяют качество жизни, вызывая парестезии, ухудшение голоса за счет гиперпластических изменений и снижения тонуса голосовых складок, что особенно значимо для людей, профессиональная деятельность которых связана с использованием голосового аппарата.

Полученные данные дают основание полагать, что одной из эндогенных причин гипертрофических и атрофических процессов, сопровождающихся гиперчувствительностью слизистой оболочки глотки и гортани, является нарушение адаптационно-трофической функции ВНС.

Нарушения трофического состояния слизистой оболочки гортани и глотки существенно изменяют качество жизни, вызывая необычные, часто болевые ощущения – парестезии, а также ухудшение голоса за счет гиперпластических изменений и снижения тонуса голосовых складок, что особенно значимо для людей, профессиональная деятельность которых связана с использованием голосового аппарата (преподавателей, адвокатов, дикторов телевидения и радио, артистов и др.). Такие нарушения характеризуются длительным течением, трудностью лечения, возможностью рецидивирования [3, 4, 10]. Обусловлено это тем, что в основе трофических нарушений лежат не столько экзогенные факторы, сколько патология различных систем организма, диагностика и лечение которых часто вызывает затруднения [11]. При обсуждении причинно-следственных связей между патологическими изменениями в различных органах и тканях и изменениями слизистой оболочки глотки и гортани почти не рассматривается вопрос об участии нейровегетативных расстройств в их развитии [34], хотя еще Л.А. Орбели считал, что одной из важнейших функций вегетативной нервной системы (ВНС) является «сдерживание» и подавление чрезмерной активности клеточных элементов исполнительных тканей [21]. Выходя из-под нервного контроля, ткань становится гиперактивной, что особенно наглядно демонстрируется на примере феномена тканевой «денервационной гиперчувствительности», возникающей после снятия управляющего влияния нервной системы [16, 20].

Взаимодействие организма с внешней средой и его гомеостаз, как в норме, так и при патологии обеспечивается наличием нервных окончаний во всех тканях и органах, а также тесной функциональной и анатомической связью нервной системы со многими другими системами организма (иммунной, эндокринной, сердечно-сосудистой), которые осуществляют регуляцию его деятельности, выступая в роли "регулируемых регуляторов" [18, 21, 23, 25, 26].

Система поддержания организмом гомеостаза исключительно сложна по своим механизмам и строится на практически бесконечном разнообразии его адаптивных, компенсаторно-приспособительных и защитных реакций. Их рассматривают под различными углами зрения – физиологическим, иммунологическим, генетическим, морфологическим. Разработка морфологического аспекта проблемы гомеостаза до недавнего времени отставала от изучения других аспектов, и в представлениях о структурных основах компенсаторно-приспособитель-

ных и защитных реакций организма исходили, в основном, из тех фактических данных и их теоретических обобщений, которые остались с начала XX века. В последние 40–50 лет в связи со значительным прогрессом методов структурного анализа процессов жизнедеятельности (гистохимическими, электронно-микроскопическими, иммунологическими и др.) учение о компенсаторно-приспособительных и защитных реакциях стало значительно меняться, все более наполняясь конкретным содержанием и «утрачивая свой былой функциональный характер» [25].

Согласно современным представлениям, основным средством передачи импульсов с нервного волокна на эффекторную клетку являются химические вещества – нейромедиаторы, которые выделяются из нервных волокон, вступают в реакцию со специфическими рецепторами постсинаптических образований и таким образом передают нервный стимул от нейрона к нейрону или от нейрона к эффекторным тканям и органам. Обнаружены различные типы синапсов, структура и функция которых определяется не только видом нервного волокна, но и генетическими особенностями рабочей клетки. Этот, так называемый, транссинаптический аксессуарный способ передачи возбуждения при помощи химических веществ дополняется другим способом. В его основе лежит выделение медиаторов из синапса в межклеточную жидкость и диффузия их к близлежащим эффекторным клеткам, не имеющим прямых контактов с нервными волокнами, но вступающими, благодаря наличию специальных внесинаптических рецепторов, во взаимодействие с медиаторами. К настоящему времени хорошо изучено внесинаптическое действие таких медиаторов как катехоламины, ацетилхолин, серотонин, гистамин и ряд нейропептидов [1, 9, 19]. Показано, что, контактируя со специфическими не синаптическими рецепторами клеток, они вызывают эффекты, аналогичные эффектам влияния соответствующих нервных волокон, из окончаний которых выделяются те же вещества. При этом, как транссинаптические, так и внесинаптические контакты с эффекторными клетками в зависимости от концентрации медиаторов могут вызывать разные физиологические и патологические реакции, связанные с изменениями тканевого и клеточного метаболизма. От различных параметров метаболических реакций зависит трофическое состояние исполнительных органов. Способность нейромедиаторов менять трофическое состояние структуры – мишени принято называть нервной трофикой. Развитие учения о нервной трофике, нервных и нейрогенных дистрофиях завершилось установлением того факта, что регуляция трофики тканей и органов, так же как и ее нарушение, осуществляется рефлекторным путем. При определенных условиях (раздражение или повреждение участков ЦНС или периферических нервов) в механизмах нарушения нервно-трофического обеспечения морфофункционального состояния тканевых образований основную роль могут играть эфферентные звенья трофического рефлекса, в том числе ВНС [5, 22, 24].

Из научно-исследовательских разработок известно, что ВНС активно участвует в обеспечении трофического состояния структурных элементов глотки и гортани [17, 27, 29], важная роль принадлежит ВНС в заживлении поврежденных тканей и формировании рубцового стеноза гортани [28], а также в развитии гиперпластического процесса при её полипозных и опухолевых заболеваниях [30, 31, 32].

Комплексное клинико-физиологическое обследование 60 пациентов (27 мужчин и 33 женщин) в возрасте от 18 до 64 лет, поступивших в фониатрическое отделение СПб НИИ ЛОР для удаления опухолеподобных образований гортани показало, что у них морфофункциональные перестройки голосовых складок сочетались с нарушениями адаптационно-трофической функции ВНС, направленной на обеспечение адекватного тканевого и клеточного метаболизма. При повышенных голосовых нагрузках или действии повреждающих факторов внешней и внутренней среды дисфункция ВНС являлась одним из условий, способствующих неадекватным изменениям гемодинамики и трофического состояния тканей, составляя нейровегетативный патологический компонент гиперпластических изменений голосовых складок. У большинства больных со сниженным общим вегетативным тонусом (ВТ), а в некоторых случаях и недостаточным вегетативным обеспечением деятельности

(ВОД) были обнаружены полипы и узелки голосовых складок отечного типа. Вместе с тем на ранних стадиях заболевания при вегетативных показателях, приближающихся к физиологической норме, так же встречались полиповидные образования отечного или отечно-фиброзного типа.

В случаях, когда у больных на ранних стадиях заболевания низкий ВТ сочетался со слабой реактивностью (ВР), процесс созревания полиповидного образования тоже происходил по типу гипертрофии, но мог развиваться в 2-х направлениях: либо образование голосовой складки оставалось длительное время отечным с разрастанием поверхностного эпителия, его метаплазией, большим количеством неоформленной грануляционной ткани и представляло собой полип отечного или отечно-фиброзного типа, либо происходило быстрое бесконтрольное разрастание плотной соединительной ткани с образованием полипа фиброзного типа. Фиброзирование полипов голосовых складок наблюдалось и у больных с показателями функционального состояния ВНС, близкими к физиологической норме или несколько превышающим её. По-видимому, процесс фиброзирования в таких случаях является компенсаторно-приспособительной реакцией и происходит на фоне увеличения функциональной активности ВНС, направленной на стабилизацию патологического процесса и коррекцию функционального состояния голосовых складок.

В целом проведенное исследование показало, что у больных с адекватным вегетативным обеспечением деятельности морфологический тип полиповидных образований отражает, в основном, гиперпластические процессы и зависит от продолжительности заболевания, что позволяет выделять «юные» (отечные), «переходные» (отечно-фиброзные) и «зрелые» (фиброзные) полипы и узелки.

У больных с неадекватным вегетативным обеспечением деятельности, обусловленным низким вегетативным тонусом и слабой или извращенной вегетативной реактивностью, нарушаются темпы и характер формирования полипов и узелков. Их морфологические типы отражают гиперпластически-дистрофические процессы и включают в себя аденоматозную, миксоидную, железисто-кистозную или ангио- и гранулематозную формы с очагами фиброза и перестройками эпителиального слоя (метаплазия, кератоз).

При папилломатозах гортани обследовано 20 пациентов (6 мужчин и 14 женщин) в возрасте от 21 до 54 лет. Установлено, что морфофункциональные перестройки голосовых складок у этих больных во всех случаях сочетались с неадекватным вегетативным обеспечением деятельности.

У 8 человек функциональное состояние ВНС характеризовалось недостаточным ВОД за счет сниженной ВР. При микроскопическом исследовании многослойного плоского эпителия папилломы были обнаружены клетки в состоянии митотического деления. В целом митозов было немного, они встречались, главным образом, в базальном слое эпителия. На поверхности эпителия они наблюдались не часто, однако у 1-го больного в поверхностных слоях папиллом отмечалась повышенная митотическая активность. В большинстве случаев гиперплазия эпителия сопровождалась ороговением и явлениями паракератоза. У 2-х пациентов была выраженная дисплазия эпителия. Строма опухолей состояла из плотной соединительной ткани с небольшим количеством клеток и сосудов.

У 5 человек отмечался сниженный общий вегетативный тонус, гипореактивность и недостаточное вегетативное обеспечение деятельности. Удаленные у них папилломы отличались следующими особенностями микроскопического строения: в эпителии таких папиллом встречалось больше митозов, а строма их, хотя и была представлена плотной соединительной тканью, содержала большое количество кровеносных сосудов, что чаще бывает у детей и подростков. Помимо этого в соединительной ткани чаще отмечались явления склероза и хронической воспалительной инфильтрации.

Функциональное состояние ВНС у 4 пациентов характеризовалось избыточным ВОД за счет гиперреактивности. Основным отличием микроскопического строения папиллом у этих больных была выраженная дисплазия эпителия.

При повышенной чувствительности слизистой оболочки глотки и гортани у 45 пациентов (36 женщин и 9 мужчин) в возрасте от 21 до 74 лет вегетативная дистония наблюдалась в 43% случаев, вегетативная дисфункция – в 71%, что свидетельствовало о нарушениях деятельности эфферентного звена регуляции трофического состояния и функциональной активности исполнительных тканей и органов. У таких больных недостаточное ВОД отмечалось в 54% случаев, избыточное – в 17%, а при адекватном ВОД во всех случаях имела место вегетативная гиперреактивность, указывающая на состояние напряжения компенсаторно-приспособительных регуляторных механизмов.

В литературе высказывается мнение, что способность ткани резко повышать свою чувствительность к обычным раздражителям внешней среды после ослабления или нарушения деятельности механизмов иннервационного контроля имеет серьезное биологическое значение в качестве своеобразной приспособительной реакции, направленной на активацию восстановительных и компенсаторных процессов в зоне повреждения. Изучение этой способности с позиций нервной трофики необходимо для развития таких проблем медицины как регенерация, метаплазия и дисплазия, особенно с учетом того, что предраковые изменения часто характеризуются как стойкие очаговые пролифераты, развивающиеся и длительно существующие в условиях нарушенной трофики, причем под "трофикой" подразумевается регулирующее воздействие нервной системы на обмен веществ, строение и функцию тканей [5, 16, 20].

На современном этапе выделяют два аспекта регуляторной деятельности ВНС. Один из них заключается в том, что ВНС индуцирует быстрое, иногда практически мгновенное, изменение функциональной активности той или иной структуры-мишени через изменение в ней гемодинамики и скорости протекания обменных и пролиферативных процессов (эрготропное влияние ВНС). При этом нарушается исходное равновесие различных физиологических систем организма, однако обеспечивается оптимальная компенсаторно-приспособительная реакция на любое экстремальное воздействие (непредвиденные изменения внешней и внутренней среды, действие патогенного фактора или повреждающего агента). Другой аспект деятельности ВНС состоит в определении меры (модуля) ответной реакции и возвращении физиологических систем, выведенных из состояния динамического равновесия к исходным параметрам или стабилизации их на том уровне гомеостаза, который наиболее адекватен новым условиям (трофотропное влияние ВНС). Существенно важным является тот факт, что значительная часть проявлений ответной реакции организма на любые изменения внешней или внутренней среды является следствием метаболических биохимических превращений, индуцируемых ВНС [6, 17, 27]. В этом и заключается ее адаптационно-трофическая функция.

Для объяснения механизмов влияния ВНС на трофическое состояние тканей гортани и глотки существенно важное значение имеет знание особенностей тканевой иннервации.

Современные представления об иннервации гортани и глотки сложились на основе многочисленных клинических и экспериментальных исследований, позволивших получить достоверные данные о морфологии ее рецепторных и эффекторных нервных структур [12, 14, 15, 35, 36, 37, 38]. Схематическое изображение иннервации гортани и глотки представлено на рис. 1.

В мышцах и слизистой оболочке ротоглотки и гортаноглотки локализуются рецепторные окончания дендритов первых чувствительных нейронов, тела которых лежат в краниальных немозговых узлах: в узле тройничного нерва (*g. semilunare*) или гассеровом, в яремном узле (*g. jugulare*), который является общим для языкоглоточного и блуждающего нервов, и в узле блуждающего нерва (*g. nodosum*). Аfferентные чувствительные волокна подходят к этим ганглиям в составе гортанно-глоточных ветвей тройничного, языкоглоточного и блуждающего нервов (верхнечелюстной и нижнечелюстной нервы содержат аfferентные волокна от слизистой оболочки и мышц глотки; верхнегортанный – от щитоперстневидной мышцы, слизистой оболочки надгортанника и слизистой оболочки гортани выше голосовой щели;

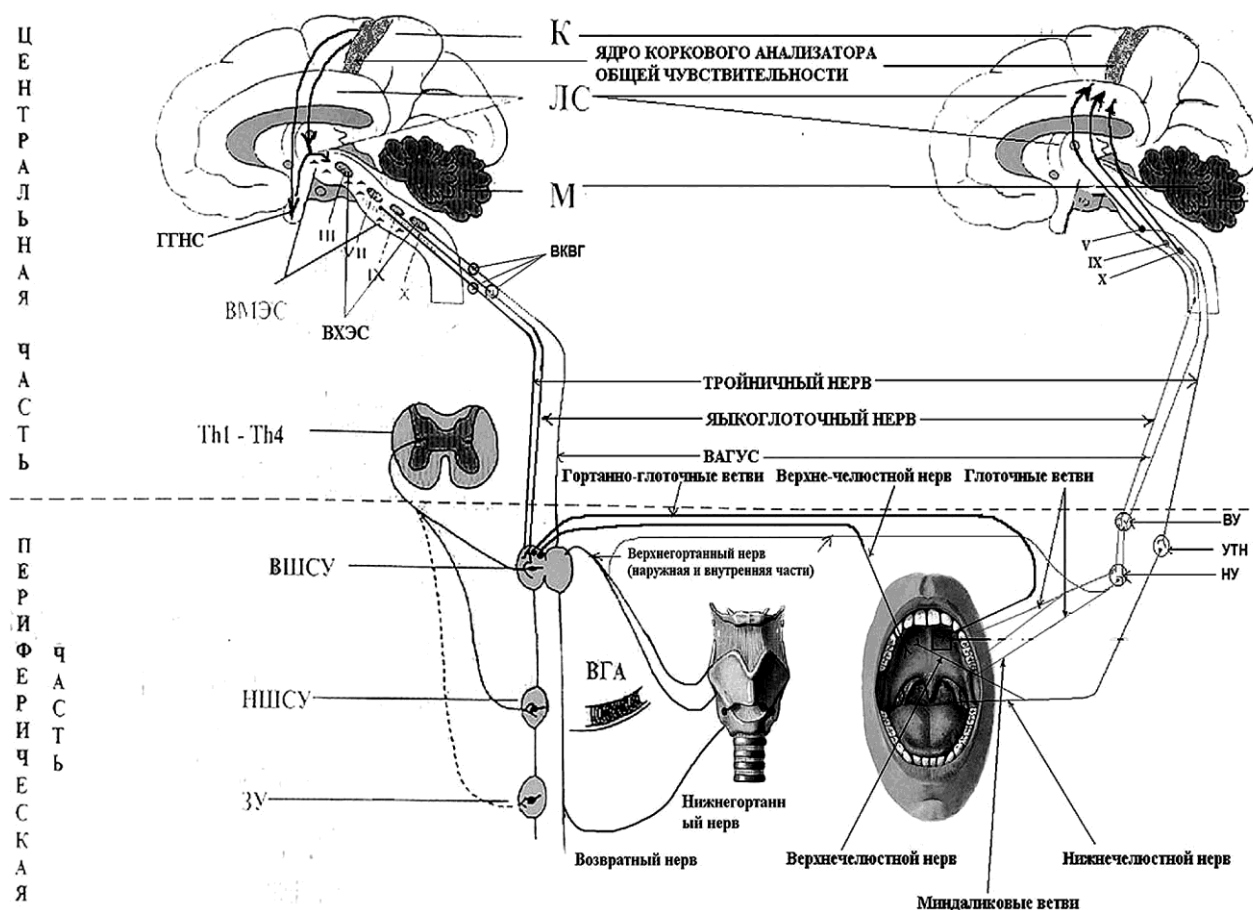


Рис. 1. Схема иннервации гортани и глотки.

Надсегментарные вегетативные центры:

К – новая кора большого мозга; ЛС – структурные образования лимбической системы (старая кора); ГГНС – гипоталамо-гипофизарная нейросекреторная система; М – мозжечок.

Сегментарные вегетативные центры: ствольные вегетативные ядра и группы кл еток:

ВМЭС – группы моноаминсодержащих нейронов ствола головного мозга; ВХЭС – группы АХ-содержащих нейронов ствола головного мозга;

внечерепные краниальные вегетативные ганглии (ВКВГ) ;

вегетативные ядра боковых рогов спинного мозга (Th1 – Th4);

вегетативные ганглии симпатической цепи:

ВШСУ – верхний шейный симпатический узел; НШСУ – нижний шейный симпатический узел; ЗУ – звездчатый узел.

ВГА – верхнегортанная артерия.

Чувствительные ганглии черепных нервов: НУ – нижний узел (g. nodosum); ВУ – верхний узел (g. jugulare); УТН – узел тройничного нерва (g. semilunare).

Стволовые чувствительные ядра черепных нервов: V – ядро тройничного нерва; IX – ядро языкоглоточного нерва; X – ядро блуждающего нерва.

нишнегортанный нерв, который является концевой частью возвратного нерва – от остальных мышц гортани и слизистой оболочки гортани ниже голосовой щели). Аксоны ганглионарных нейронов, составляющие восходящие волокна черепных нервов, направляются в головной мозг.

Тела вторых чувствительных нейронов, принимающих афферентные импульсы от гортани и глотки по волокнам языкоглоточного и блуждающего нервов, лежат в продолговатом мозге. Отростки псевдоуниполярных клеток g. jugulare и g. nodosum, войдя в продолговатый мозг, образуют одиночный пучок, который заканчивается в чувствительных бульбарных ядрах обоих нервов. Тела чувствительных нейронов, принимающих афферентацию по воло-

нам тройничного нерва, лежат в заднем мозге на уровне моста. Отростки чувствительных нейронов полулунного (Гассерова) узла проходят транзитом продолговатый мозг и заканчиваются в чувствительном ядре тройничного нерва. Тела третьих чувствительных нейронов лежат в латеральном таламусе, где происходит переключение афферентных путей, следующих от глотки и гортани к первичным проекционным полям коркового анализатора общей чувствительности, ответственным за формирование ощущений (кора постцентральной извилины и верхней теменной доли). Основными передатчиками импульсов в сенсорных путях служат нейропептиды.

Эфферентную иннервацию тканей и органов условно разделяют на две тесно взаимосвязанные между собой системы: соматическую двигательную и вегетативную. Обе системы являются эффекторным звеном в механизмах регуляции функций и трофического состояния структурных образований глотки и гортани. Вегетативные нервные волокна иннервируют все составные элементы органов (слизистую оболочку, кровеносные сосуды, железы, мышцы), а двигательные – только поперечно-полосатую мускулатуру. Двигательные соматические нервные волокна имеют хорошо выраженную миелиновую оболочку и их диаметр доходит до 12-14 мкм. Регуляция двигательной активности мышц глотки и гортани осуществляется контактным способом с помощью нервно-мышечных синапсов (т. н. “моторных бляшек”). Основным нейромедиатором, выделяющимся из пресинаптических окончаний двигательных волокон является ацетилхолин. Главными чертами, отличающими вегетативную иннервацию от соматической, является отсутствие выраженной сегментарности, дивергентный характер нервных путей, переключение импульсов, поступающих от центральных нейронов, на нейроны вегетативных узлов и их аналогов с помощью синаптических контактов. Вегетативные нервные волокна либо лишены миелиновой оболочки, либо она очень тонка, поэтому диаметр таких волокон равен 5-6 мкм. Характерной чертой внутритканевых вегетативных нервных волокон является наличие т. н. “варикозных расширений” (ВР), локализующихся на всём протяжении волокна и по-существу представляющих собой пресинаптические окончания. Из ВР выделяются нейромедиаторы (в основном моноамины и ацетилхолин), которые диффундируют к структурам-мишеням и регулируют их деятельность дистантным способом. Нейромедиаторы оказывают на структуру-мишень трофическое воздействие, которое приводит к изменению скорости и характера метаболических реакций и, соответственно, к изменению функциональной активности ткани или органа в целом. Тела первых центральных нейронов ВНС располагаются в висцеральной коре, таламусе, гипоталамусе, в коре мозжечка, в вегетативных ядрах ствола головного мозга и боковых рогов спинного мозга. Многочисленные группы стволовых нейромедиаторных нейронов (внутристволовая моноаминергическая система – ВМЭС и внутристволовая холинергическая система – ВХЭС) многие авторы считают внутримозговыми аналогами периферических вегетативных узлов, где лежат тела вторых эфферентных нейронов [7]. Моноаминергические (адренергические, серотонинергические, дофаминергические) и холинергические нейроны, объединенные в группы, лежат на всём протяжении ствола головного мозга – от базальных ганглиев до продолговатого мозга [8]. Аксоны вегетативных нейронов выходят из ЦНС в составе смешанных тройничного, языкоглоточного и блуждающего черепных нервов на уровне моста и продолговатого мозга, а также в составе передних корешков спинальных нервов на протяжении тораколумбальных и крестцовых сегментов спинного мозга. На этом основании и с учётом влияния вегетативных нервных волокон на деятельность внутренних органов периферическую часть ВНС традиционно делят на симпатический и парасимпатический отделы. Волокна, выходящие из центров, расположенных на протяжении от 1 грудного до 3 поясничного сегментов (Th1-L3) относят к симпатическому отделу, а волокна, которые являются отростками нейронов, расположенных в среднем и продолговатом мозге, а также в крестцовом отделе спинного мозга на протяжении 2-4 сегментов (S2-4) – к парасимпатическому. Эти волокна являются преганглионарными вегетативными волокнами. Они подходят ко вторым (периферическим) нейронам вегетативного эфферентного пути и заканчиваются на них, вступая в синаптические

контакты. К рабочим структурам-мишеням направляются постганглионарные волокна - аксоны вторых вегетативных нейронов, тела которых в краниальном отделе входят в состав ВМЭС, ВХЭС и внесозговых вегетативных узлов (подчелюстного – *g. submaxillare*, ресничного – *g. ciliare*, ушного – *g. oticum* и клиновидно-небного – *g. sphenopalatinum*), а в шейном и нижележащих отделах располагаются по сторонам позвоночного столба (паравертебральные ганглии) на всем его протяжении от шейных до тазовых сегментов, впереди позвоночного столба (превертебральные ганглии) и в стенках внутренних органов (интрамуральные ганглии). Кроме того в состав блуждающего нерва входят не только афферентные и эфферентные проводящие пути в соотношении 5:1 соответственно, но и вегетативные нейроны, поэтому этот нерв также относится к системе элементов, включающих тела вторых вегетативных нейронов, на которых заканчиваются преганглионарные волокна. Преганглионарные волокна центральных нейронов имеют многочисленные разветвления и могут одновременно заканчиваться на многих последних нейронах эфферентного пути на разных его уровнях. Число постганглионарных волокон существенно превышает число преганглионарных (так, например, в верхнем шейном симпатическом узле – ВШСУ их соотношение составляет 1:32). Постганглионарные волокна выделяют нейромедиаторы, которые непосредственно влияют на структуру – мишень, изменяя тканевую и клеточный метаболизм. Эффект действия нейромедиаторов имеет условный характер, т. к. зависит от конкретной ситуации, концентрации вещества, выделяемого из пресинаптических окончаний, и чувствительности тканевых рецепторов к нему. Поэтому в современной литературе учитывается не столько анатомическая принадлежность нервного волокна к тому или иному отделу ВНС, сколько его нейромедиаторная природа: чувствительные нервные волокна являются пептидергическими, вегетативные – моноаминергическими и холинергическими. Симпатические волокна, иннервирующие все ткани и органы, содержат в качестве основных нейромедиаторов моноамины, а парасимпатические – ацетилхолин и гистамин.

В настоящее время установлено, что нервные импульсы влияют на синтез и содержание медиаторов внутри нейрона. Достигая синаптического окончания, они изменяют не только количество передатчиков, контактирующих с постсинаптической мембраной, но и их концентрацию в межклеточной жидкости и крови. Тем самым расширяется физиологическая значимость биологически активных веществ, освобождающихся из синапсов [5]. Известно, что высокая чувствительность гортани обусловлена наличием в ней нервных рецепторных приборов, особенно густо сконцентрированных в трех рефлексогенных зонах: в области гортанной поверхности надгортанника и на краях черпалонадгортанных складок, на передней поверхности черпаловидных хрящей и в межчерпаловидном пространстве, и, наконец, в подвязочном пространстве гортани и внутренней поверхности перстневидного хряща [13]. При активации рецепторов гортани осуществляются дыхательная, защитная и голосообразовательная функции, связанные с вовлечением в процесс межреберных мышц и диафрагмы [35]. Афферентные пути, входящие в состав блуждающего нерва, передают возбуждение соответствующим отделам ствола головного мозга, откуда по эфферентным соматическим путям направляются к мышцам гортани двигательные импульсы, а эфферентные вегетативные волокна регулируют их трофическое состояние [15, 37]. Изучение влияния ВНС на мышечную систему гортани особенно важно для клиницистов, так как гипотонусная дисфония часто сопровождается тканевыми микроциркуляторными перестройками, которые при длительном течении заболевания структурно закрепляются и могут проявляться, например, в виде полипозных изменений слизистой оболочки голосовых складок [2, 4].

Клиницисты, физиологи и морфологи, указывая на большую ранимость гортанных мышц, объясняют ее особенностями их иннервации [14, 15, 28, 38]. Тесный контакт между хрящевой, эластической и мышечной тканями голосового отдела гортани, обеспечивающий сложный механизм голосообразования, предполагает и тесную взаимосвязь с нервной тканью. Собственные исследования показали, что характерной чертой нервного аппарата гортани является обилие эффекторных структур, объединяющих разные ткани в единый морфо-

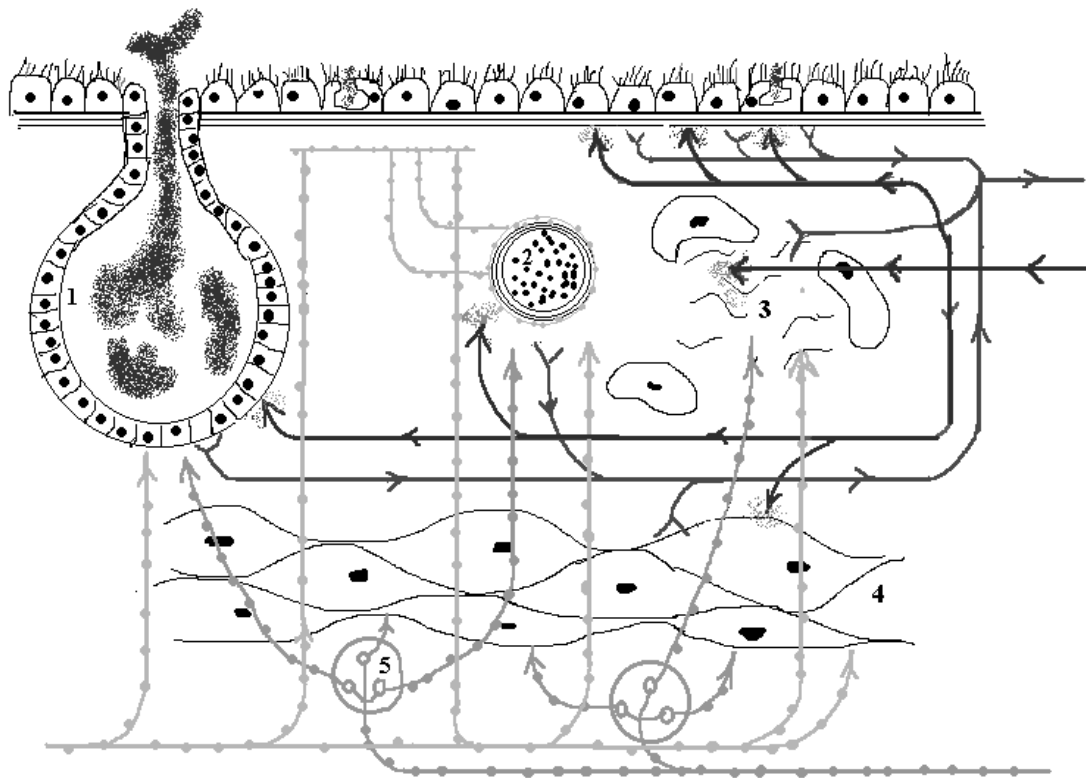


Рис.2. Схема иннервации слизистой оболочки гортани и глотки.

- | | |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| ➤ — дендритная терминаль сенсорного волокна | 1 - железа |
| ← — аксонная терминаль сенсорного волокна | 2 - сосуд |
| ⬅ — адренергические нервные волокна | 3 - межтканевая ткань |
| ⬅ — холинергические нервные волокна | 4 - мышца |
| ☼ — выброс нейрпептидов из сенсорных волокон | 5 - интрамуральный парасимпатический ганглий (холинергические нейроны) |

функциональный комплекс (рис. 2). Отличительной особенностью иннервации внутренних мышц гортани, по сравнению со скелетной мускулатурой, является наличие свободных нервных терминалей, локализованных непосредственно среди мышечных волокон, и очаговость расположения моторных бляшек. Здесь часто встречаются перивазальные крупнопетлистые

адренергические нервные сплетения, от которых отходят тонкие нервные волокна. В голосовой складке выявляются упорядоченные нервные сплетения с варикозными расширениями. Волокна достигают подэпителиального пространства и располагаются параллельно базальной мембране эпителия. Отдельные нервные волокна сплетений ответвляются от них и приближаются к эпителиальным клеткам [33].

Имеющиеся данные дают основание полагать, что одной из эндогенных причин гипертрофических и атрофических процессов, сопровождающихся гиперчувствительностью слизистой оболочки глотки и гортани, является нарушение адапционно-трофической функции ВНС. Патологический процесс в таких случаях может развиваться по следующей схеме: дисфункция ВНС ⇒ неадекватная деятельность иннервационных механизмов эфферентного звена регуляции функций и трофического состояния слизистой оболочки глотки и гортани ⇒ гиперпластически-дистрофические тканевые изменения ⇒ гиперактивность клеточных элементов слизистой оболочки ⇒ усиление импульсации по чувствительным волокнам ⇒ активация корковых проекционных зон ⇒ появление необычных ощущений – парестезий.

Литература

1. Авакян О.М. Симпатоадреналовая система. Л.: Наука, 1977. 183 с.
2. Алекперов Ф.М. Стойкая гипотонусная дисфония (диагностика, клиника и лечение): Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 1993. 23 с.
3. Алекперов Ф.М., Быкова В.П., Иванченко Г.Ф. Стойкая дисфония. Клиноморфологическая оценка краевых утолщений голосовых складок. // Вестн. оторинолар. 1993. N4. С.22-26.
4. Алиматов Л.А., Загидулина Р.А., Рауков М.П. Узелки голосовых складок и функциональные дисфонии. // Казан, мед. журн. 1995. N1. С.44-45.
5. Ажипа А.Я. Трофическая функция нервной системы. М.: Наука, 1990. 673 с.
6. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984. 221 с.
7. Белова Т.И., Голубева Е.Л., Пальцев М.И. Синее пятно, морфофункциональная характеристика. // Успехи физиол. наук. – 1978. – Т.9, №4. С. 25-44.
8. Буданцев А.Ю. Моноаминэргические системы мозга. М.: Наука, 1976. 193 с.
9. Бузников Г.А. Нейротрансмиттеры в эмбриогенезе. М.: Наука, 1987. 210 с.
10. Василенко Ю.С., Быкова В.П., Антонова Н.А. и др. Клиноморфологическая характеристика доброкачественных опухолеподобных образований голосовых складок. // Вестн. оторинолар. 1999. N1. С.24-27.
11. Гаджимирзаев Г.А., Джамалутдинов Ю.А. Клиника, диагностика и лечение парестезий глотки. // Журн. ушн., нос. и горл. бол. 1985. №4. С. 10-13.
12. Грачева М.С. Симпатическая иннервация гортани. // Вестн. оторинолар. 1951. N3. С.37-41.
13. Грачева М.С. Морфология и функциональное значение нервного аппарата гортани. М.: Медгиз, 1956. 163 с.
14. Гуллыева А.М. Макромикроскопическая анатомия и миелоархитектоника нервов мышц гортани: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Симферополь, 1990. 24 с.
15. Крылов Б.С., Фельбербаум Р.А., Акимова Г.М. Физиология нервномышечного аппарата гортани. Л.: Наука, 1984. 216 с.
16. Крыжановский Г.Н. Патологическая физиология нервной системы. // Патологическая физиология / Ред.: А.Д. Адо, В.В. Новицкий. Томск, 1994. С. 414-450.
17. Лазарев В.Н., Суздальцев А.Е. Состояние вегетативной нервной системы при хронических воспалительных заболеваниях ЛОР-органов у детей. // Вестн. оторинолар. 1994. N1. С. 27-30.
18. Марченко В.Н., Лотоцкий А.Ю., Ловицкий С.В. Участие нервной системы в формировании воспаления бронхов и легких. // Механизмы воспаления бронхов и легких и противовоспалительная терапия. / Ред. Г.Б. Федосеев. СПб.: Нордмед Издат, 1998. С.410-428.
19. Ноздрачев А.Д., Пушкарев Ю.П. Характеристика медиаторных превращений. Л.: Наука, 1980. 230 с.
20. Никифоров А.Ф. Афферентный нейрон и нейродистрофический процесс. М.: Медицина, 1973. 191 с.
21. Орбели Л.А. Обзор учения о симпатической иннервации скелетных мышц, органов чувств и центральной нервной системы. // Физиол. журн., 1932. №15. С.1-21.
22. Острый О.Я. Проблемы нервной трофики в теории и практике медицины. / Ред. В.В. Парин. М., 1963. С.212-235.
23. Павлов И.П. Двадцатилетний опыт изучения высшей нервной деятельности (поведения) животных. // Полн. собр. соч. Т.3, Кн. 2. М.; Л., 1951. 391 с.
24. Плечкова Е.К. Реакция нервной системы организма на хроническое повреждение периферического нерва. М.: Медгиз, 1961. 258 с.
25. Саркисов Д.С. Структурные основы адаптации и компенсации нарушенных функций: Руководство / АМН СССР. М.: Медицина, 1987. 448 с.
26. Сперанский А.Д. Избранные труды. М., 1955. 374 с.
27. Хиллов К.Л. О роли симпатической нервной системы в функции и патологии ЛОР-органов: Сб. тр. / Ленингр. НИИ по бол. уха, горла, носа и речи. Л.: Медгиз, 1944. Т.7. С.101-110.
28. Швалев Н.В. Роль вегетативной иннервации в заживлении поврежденных тканей гортани и формировании ее рубцового стеноза: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. СПб., 1997. 24 с.

29. Шустова Т.И., Науменко Н.Н., Самотокин М.Б., Шкабарова Е.В., Юрков А.Ю. Нейровегетативная составляющая патогенеза заболеваний верхних дыхательных путей. // Рос. оторинолар. 2004. №1(8). С. 13-16.
30. Юрков А.Ю., Шустова Т.И. Степанова Ю.Е. Функциональное состояние вегетативной нервной системы у больных с полипами голосовых складок. // Вестн. оторинолар. 2000. №3. С.52-54.
31. Юрков А.Ю., Шустова Т.И. Особенности развития полиповидных образований голосовых складок у больных с различным функциональным состоянием вегетативной нервной системы // Рос. оторинолар. 2003. №4(7). С. 15-18.
32. Юрков А.Ю., Шустова Т.И. Функциональное состояние вегетативной нервной системы у больных с папилломатозом гортани. // Там же 2004. №2(9). С. 137-140.
33. Юрков А.Ю., Шустова Т.И., Пуговкин А.П. Характеристика адренергической иннервации соматических мышц. // Морфология. 2004. Т.125, №1. С. 33-36.
34. Borde. Societe' d'otorhinolaryngologie de Bordeaux et du Sud Ouest. // Rev. Laryngol. 1956, №9-10. P.93-99.
35. Hauser-Kronberger C., Hacker G.W., Albegger K. et al. Die Autonome und peptiderge Innervation des menschlichen Kehlkopfes. // HNO. 1994. Bd.42, N2. S.89-98.
36. Nunez-Abades P.A., Pasaro K., Biandi A.L. Study of the topographical distribution of different populations of motoneurons within rat's nucleus ambiguus, by means of four different fluorochromes // Neurosc. Lett. 1992. Vol.135, N1. P.103-107.
37. Sanders I., Wu B.L., Mu L. et al. The innervation of the human larynx. // Arch. Otolaryng. Head Neck Surg. 1993. Vol.119, N9. P.934-939.
38. Sunder-Plassman P. Uber den Nervenapparat des Muscles Vocalis. // Zschr. HNO. 1933. Bd.32. S.324-393.

Neurovegetative regulation of the pharyngeal and laryngeal mucosa trophism

T.I. Shustova, A.Yu. Yurkov

S.-Peterburg research institute of ear, speech, nose, and throat

Abstract. Pharyngeal and laryngeal mucosa trophopathy considerably alter the quality of life causing paresthesiae and voice worsening because of hyperplastic changes and tone loss of the vocal cords. This is of particular importance for voice professionals.

The evidence obtained is the reason to believe that the impairment of adaptation and trophic functions of the vegetative [involuntary] nervous system is one of endogenous causes of hypertrophic and atrophic conditions accompanied with pharyngeal and laryngeal mucosa hypersensitivity.

УДК 666.11.01+539.27

Исследование поверхностных слоев восстановленного свинцовосиликатного стекла

И.Б. Ашхотова

Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик

В данной работе проведен литературный анализ изучения поверхности стекол (систем $\text{SiO}_2\text{-PbO}$) различными методами (оптическими, спектрометрическими, рентгенографическими и др.). Авторами работ показано, что состав эмитирующего и проводящего восстановленного слоя свинцовосиликатных стекол изменяется по глубине вплоть до 1500-2000 Å и для ряда оксидов их распределение не монотонно.

Введение

Свинцовосиликатные стекла (ССС) являются основным материалом для изготовления различных изделий электронной вакуумной техники, таких как электронно-оптические преобразователи, детекторы, многоканальные вторично-электронные умножители потоков заряженных частиц и излучений. Параметры этих изделий во многом определяются состоянием, структурой и составом поверхностных слоев стекла. Многостадийная обработка стекла приводит к формированию слоистой структуры стекла [1, 2], которая, согласно современным представлениям, оказывает огромное влияние на вторично-эмиссионные характеристики.

Электрические, вторично-эмиссионные параметры поверхностного слоя (ПС) свинцовосиликатного стекла находятся в прямой зависимости от структурных преобразований, происходящих в стекле в ходе термоводородного восстановления (ТВВ) [1, 3, 4-15], поэтому представляет интерес комплексное исследование и анализ поверхностных слоев стекла, влияющих на эксплуатационные параметры.

Восстанавливающиеся свинцовосодержащие силикатные стекла хорошо известны по ряду исследований [1, 4, 6, 12-16], им посвящены обзоры [2, 17]. Эти стекла характеризуются тем, что их поверхностный слой претерпевает значительные изменения в процессе восстановления – выдержки стекла в атмосфере водорода при температурах выше 350-400°C. Структура, электрические и оптические свойства поверхностного слоя восстановленного и невосстановленного (исходного) стекла оказываются существенно различными. Главным различием является присутствие в восстановленном ПС агрегатов металлического свинца [1, 12, 17]. Концентрация этих агрегатов и их распределение по глубине зависят от режима восстановления и определяют структуру и свойства слоя. Известно, что как металлические включения, так и компоненты стекла распределены неравномерно по толщине ПС [13-15]. Однако, различия в составе стекол, режимах восстановления и методах анализа поверхности существенно затрудняют сопоставление данных разных авторов и интерпретацию свойств и строения ПС. Так, значения толщины восстановленного слоя, по данным [1, 4, 6, 12-16], лежат в пределах от 200 до 2500 нм. Прямое исследование очень тонких поверхностных слоев стекла стало возможным лишь благодаря развитию методов электронной и ионной спектроскопии с высокой разрешающей способностью по глубине – порядка нескольких ангстрем.

Анализ поверхностных слоев оптическими методами

Для более полного и всестороннего изучения изменений состава и структуры ПС много-свинцовых стекол при их термоводородной обработке необходим анализ на базе различных методов широкого комплекса свойств, в частности, таких фундаментальных характеристик, как оптические постоянные вещества.

В [17] приводятся спектры отражения в неполяризованном свете при угле отражения, близком к прямому, для восстановленного свинцовосиликатного стекла (ВССС) (система BaO-PbO-SiO_2 с добавками Na_2O , Al_2O_3 , Bi_2O_3). На рис. 1 показаны спектры отражения от образцов стекла в зависимости от длительности и температуры восстановления. Наиболее характерной для этих спектров является расположение наиболее интенсивной полосы ($\sim 1000 \text{ см}^{-1}$) при увеличении температуры (до 450°C) и времени восстановления. Сравнение этих данных со спектрами отражения стекол систем $\text{SiO}_2\text{-PbO}$ [18] показывает, что первая полоса характерна для высококремнистых структур и ее можно отнести к колебаниям связей Si-O-Si . Вторую полосу авторы относят к структурным группировкам, обогащенным свинцом. Восстановление ионов свинца при этом происходит до образования в конечном этапе металлического свинца [1, 4, 12], дающего характерные пики на рентгенограммах.

ИК-спектроскопия. В [19] изучены оптические и геометрические параметры ПС в зависимости от режима восстановления стекла методами инфракрасной спектроскопии внешнего отражения (ВО) и нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Эти методы позволяют решить поставленную задачу и в [20, 21]. В работе [19] исследовались образцы стекла натриевосвинцовосиликатной системы с концентрацией 17,5 мол. % PbO и добавками оксидов алюминия, бария, висмута. Полученные здесь данные показывают, что термоводородная обработка свинцовосиликатных стекол изменяет химический состав и структуру поверхности и приводит к формированию двойного слоя, оптические параметры и толщина которого зависят от длительности режима восстановления. Смещение к большим волновым числам полосы валентных колебаний связи Si-O-Si позволяет сделать вывод об изменении состояния свинца на поверхностном слое. Отсутствие характеристического поглощения свинца в инфракрасной области спектра затрудняет его идентификацию, однако, применяя расчетные данные для нахождения оптических параметров и толщины поверхностного слоя системы металл-стекло, можно на базе инфракрасных спектров оценить по неселективному отражению содержание металла в ПС. Зависимость оптических постоянных ПС от времени обработки стекла является следствием изменения концентрации металлической фазы.

Методами ИК-спектроскопии отражения в [19] выполнены количественные исследования оптических и геометрических параметров слоя, образующегося на поверхности свинцовосиликатного стекла при его термической обработке в водороде. Значения оптических постоянных (показателя преломления и показателя поглощения) плавно уменьшаются от максимальных значений величины у поверхности до минимальных в объеме стекла (невосстановленное стекло). Оптические постоянные и толщина поверхностного слоя зависят от режима восстановления. При многочасовых длительностях обработки на глубине 1500-2000 нм формируется слой со стабильными оптическими свойствами. Положение полос в спектрах и значения оптических постоянных этих полос подтверждают вывод об образовании металлического свинца в поверхностном слое. Методы ИК-спектроскопии отражения позволяют обнаружить в исследуемом поверхностном слое толщиной около 2000 нм еще более тонкий (~ 20 нм) граничащий с воздухом слой, обогащенный кремнеземом. Развитый в [22] общий модельный метод обработки спектров отражения позволил получить более детальные сведения о ПС.

По данным [19] в [23] для тех же стекол изучен состав ПС и определено содержание металлического свинца по ИК-спектрам пропускания и НПВО. Для описания оптических свойств слоя была проверена возможность использования теории Максвелла-Гарнетта [24], которая рассматривает взаимодействие света с гетерофазной системой, представляющей со-

бой диэлектрик с хаотически распределенными в его объеме частицами металла сферической формы. Полученные экспериментальные данные объемной концентрации Рb составляют $20 \pm 25\%$. Если пересчитать содержание свинца в невосстановленном стекле на свинец в металлической фазе, то его объемная концентрация равна 13%, т.е. в ПС восстановленного стекла содержание Рb в 2 раза больше, чем в исходном стекле. Величина расхождения между количественными и расчетными данными оптических параметров ПС колеблется в зависимости от режима восстановления ССС, особенно для начальных этапов восстановления, когда свинец находится в атомарно-диспергированном состоянии.

В [25] даны оценки толщины ПС ВССС, полученные теми же методами, что и в [23]. Эти оценки в 1,8-2 раза ниже данных, полученных в [19] при аналогичных режимах восстановления. Расчет по двуслойной модели [21] дает значения толщин ПС в пределах 1,3-2,0 мкм. Таким образом, с одной стороны, вероятно, следует сопоставлять значения толщины ПС, получаемых из оптических измерений, с толщинами, которые отвечают выравниванию концентрации элементов для восстановленных и невосстановленных образцов. С другой стороны, данные ИК-спектроскопии, следует обрабатывать с учетом двуслойной модели ПС, использовавшейся в [6, 21]. Измерения ИК-спектров пропускания и НПВО, проведенных в [25], показали, что в ПС глубиной 2 мкм объемное содержание свинца в среднем в 1,3-1,6 раза выше, чем в невосстановленном исходном образце. Это значение близко к тем оценкам, которые получены в [26], что свидетельствует о достоверности этих данных.

Эллипсометрия. Полученные оптическими методами данные были также использованы в [25] для проверки правильности эллипсометрических оценок толщины начальных участков восстановленных образцов до 0,10-0,15 мкм, связанных с резким возрастанием концентрации Рb. Для указанных выше глубин оказалась пригодной двуслойная модель, где первому слою приписывается минимальная концентрация Рb (обогащен кремнеземом), а второй слой является гетерогенным с некоторой средней концентрацией Рb [27]. Наилучшее согласие с экспериментальными данными получено в предположении, что толщина слоя минимальной концентрации Рb составляет 0,020 мкм. При этом толщина области возрастания концентрации с ростом времени ТВВ увеличивалась от 0,080 мкм до 0,100 мкм. Ширина зоны минимальной концентрации Рb в [25] получилась приблизительно в 2 раза больше, чем в [14], где не приводится концентрационный профиль Рb на глубины более 0,016 мкм. Поэтому, для выводов о концентрации Рb в районе нулевой глубины (0-0,02 мкм) требуются дополнитель-

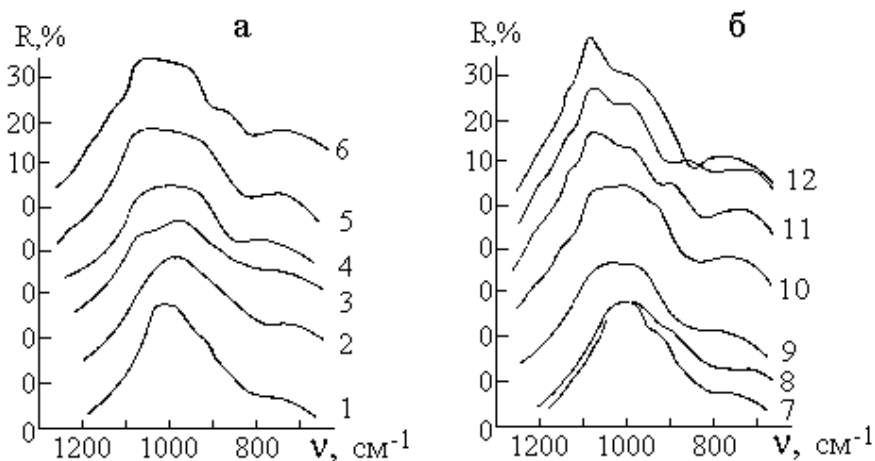


Рис. 1. Влияние длительности (а) и температуры (б) восстановления на спектр отражения стекол (система $\text{SiO}_2\text{-PbO}$). Продолжительность восстановления (ч.) при постоянной температуре 380°C : 1 - 0, 2 - 4, 3 - 6, 4 - 24, 5 - 40; температура восстановления ($^\circ\text{C}$) при длительности 4 ч.: 7 - 380, 8 - 410, 9 - 450, 10 - 480, 11 - 500, 12 - 540.

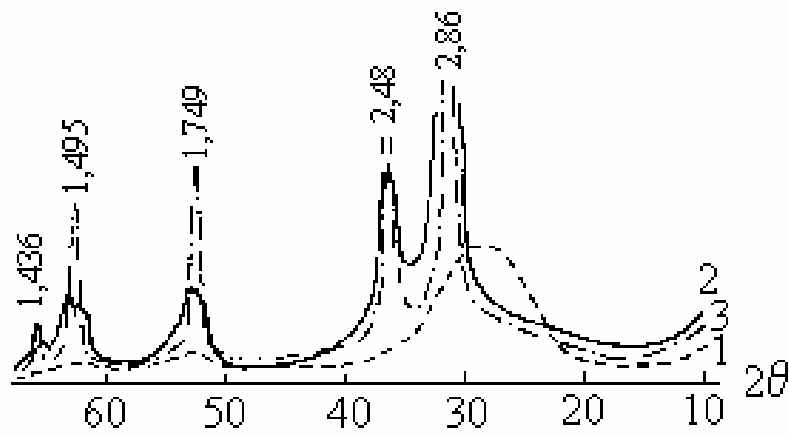


Рис. 2. Рентгенограммы полированных образцов стекла состава SiO_2 – 40 мас.%, PbO – 45 мас.%. Температура восстановления ($^{\circ}\text{C}$): 1 – 380, 2 – 450, 3 – 540; время восстановления (ч.): 1 – 6, 2 и 3 – 4.

ные исследования.

Из эллипсометрических измерений в [28] установлено различие структурного и химического строения поверхности и объема. Показано изменение показателя преломления в зависимости от глубины слоя для различных литиево-силикатных стекол. В каждом случае показатель преломления на поверхности заметно выше, чем в глубине. Он уменьшается с удалением от поверхности до значения, равного объемному. Такое же поведение показателя преломления характерно и для кварцевого стекла, но при этом разница в значениях показателя преломления меньше. Это можно объяснить тем, что указанное изменение и ширина профиля увеличиваются с уменьшением содержания в стекле щелочи. Причину появления профиля можно объяснить рядом факторов, таких как

- действие поверхностных дефектов;
- влияние концентрационных градиентов главных компонентов стекла;
- влияние влажности или ионообменной реакции (щелочные ионы H_3O^+);
- изменение поляризационного состояния ионов в области поверхности.

Рентгенографическое исследование

Рентгенографическое исследование ПС ВССС позволяет взглянуть на проблему под другим углом зрения.

Так, рентгенограмма восстановленного свинцовосиликатного стекла (состава SiO_2 – 40 масс. %, PbO – 45 масс. %), прошедшего разные режимы ТВВ, показана на рис. 2 [17]. Рентгенограмма ВССС, восстановленного по первому режиму (кривая 1), не показывает наличия металлического свинца. Аналогичные результаты получены в [29]. Можно предположить, что содержание металла на поверхности образца недостаточно для того, чтобы он мог быть обнаружен рентгенографически. При увеличении температуры восстановления (кривые 2, 3) на рентгенограммах наблюдаются характерные для металлического свинца пики (на кривых 2, 3 показаны рефлекссы и соответствующие им межплоскостные расстояния), и чем выше температура восстановления, тем больше интенсивность линий, острее и уже пики.

Микроспектральный анализ, проведенный после отделения восстановленного слоя, показывает, что состав приповерхностного слоя образца состоит в основном из SiO_2 (до 75-85%); под ним находится второй подслой, который содержит значительно больше свинца, чем исходный невосстановленный образец. При этом содержание щелочной компоненты, по данным микроспектрального анализа, в первом слое в 3,5 раза выше, чем во втором.

Метод спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния заряженных частиц

Большой интерес представляют данные о распределении элементов по глубине приповерхностного слоя восстановленных свинцовосиликатных стекол. В [25] методами спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния заряженных частиц проведено неразрушающее исследование распределения свинца по глубине от поверхности до 1,5-2 мкм для стекла натриевосвинцовосиликатной системы ($PbO - 17,5$ мол. % с добавками оксидов алюминия, бария, висмута) того же состава, что и в [19], восстановленного в атмосфере водорода.

В изученной области концентрационный профиль Pb в невосстановленном образце является равномерным. Профили концентрации Pb для слоев, сформировавшихся при температурах 450, 475 и 490°C, имеют характерные максимумы и минимумы в рассмотренном интервале глубин, в то время как для образцов, восстановленных при температуре 430°C, распределение Pb по глубине является сравнительно плавным. Также в [25] показано увеличение концентрации Pb в поверхностном слое толщиной до 1,5 мкм и обнаружены приповерхностные зоны обеднения, существование которых предполагалось еще в [4]. Положение минимума обедненной зоны является одной из характеристик процесса восстановления – оно смещается вглубь с увеличением времени восстановления при постоянной температуре и, как правило, с повышением температуры восстановления при постоянном времени.

Одним из возможных объяснений наблюдаемых концентрационных профилей Pb и полученных временных и температурных зависимостей положения минимума обедненной Pb зоны может быть следующее. Как известно из ряда ранних работ, например [1, 4, 12], восстановление свинца в поверхностном слое свинцовосиликатных стекол сопровождается агрегацией ионов Pb в микрочастицы. По мере развития процессов агрегации растут размеры частиц и расстояние между ними. Следовательно, с увеличением температуры и времени восстановления можно ожидать смещения границы зоны интенсивной агрегации в глубину образца. Если предположить, что наличие обедненных зон связано с интенсивной агрегацией, то становится понятным сам факт их существования. Действительно, поскольку в предполагаемых зонах агрегации концентрация Pb мало меняется в зависимости от глубины и времени восстановления, то это может означать, что ионы свинца, идущие с глубины к поверхности, интенсивно захватываются в агрегаты уже на границе зоны. При этом обедняется наиболее близкая к зоне агрегации область. Часть ионов свинца все же минует границу зоны и мигрирует к поверхности образца, в связи с чем, концентрация свинца в зоне агрегации медленно растет. У самой поверхности (нулевая глубина) она вначале растет, но со временем начинает уменьшаться – свинец испаряется с поверхности. Это было также отмечено в [12]. Изменение ширины зоны, согласно [31], пропорционально отвечает диффузионной стадии процесса агрегации.

Количественная оже-спектроскопия

Наиболее точные данные об относительной концентрации отдельных компонентов стекла и о структуре ПС дает метод оже-спектроскопии, но он связан с послойным разрушением образца ионным или кислотным травлением.

Количественный оже-анализ поверхности образцов многокомпонентных стекол затруднителен. Это вызвано трудностями, связанными с перекрытием оже-пиков элементов, с непостоянством коэффициента выхода оже-электронов одного и того же элемента, находящегося в различных химических соединениях, со сложностью калибровки [32]. В [33] для количественного анализа многокомпонентных веществ предложен метод расчета по известным из калибровочных измерений коэффициентам выхода оже-электронов.

Типичный оже-спектр восстановленного свинцовосиликатного стекла представлен на рис. 3 [34]. Интенсивности отдельных пиков различаются более чем на порядок, и поэтому отдельные участки спектра регистрируются при разном усилении сигнала. Восста-

новление свинцовосиликатных стекол в водороде приводит к существенному перераспределению элементов в поверхностном слое [14].

Для исследования свойств ВССС полезно установить это распределение. Для этого используется оже-спектроскопия в сочетании с ионным травлением. Оже-спектр после глубокого травления приведен на рис. 3 (кривая 4). Видно, что оже-пик восстановленного стекла разрешается относительно пика окисленного кремния. Атомные концентрации элементов в глубине восстановленного слоя и в невосстановленном стекле примерно одинаковы. Диссоциация окиси кремния при ионном травлении не происходит, однако пик натрия в оже-спектре после даже неглубокого травления пропадает.

Профили концентрации элементов стекла, содержащего Si – 23 ат. %, Pb – 9 ат. %, приведены на рис. 4 [35]. Поверхностный слой стекла, кроме основных элементов (кремния, кислорода, калия и бария), содержит относительно высокое количество углерода – 47 ат.%, однако его концентрация быстро падает в глубину образца. Вблизи точки 20 нм обнаруживается пик, соответствующий свинцу. Концентрация кислорода и кремния стабилизируется на глубине 20 нм, что связано с удалением углерода (поверхностный углерод не находится в составе оксида). Основной максимум концентрации свинца во всех стеклах локализуется на одной глубине. Это означает, что механизм восстановления свинца в стекле не зависит от его начальной концентрации. Концентрация калия во всех стеклах резко повышается к поверхности. Возможно, калий подобно натрию удаляется с поверхности ионной и электронной бомбардировками, но не до конца.

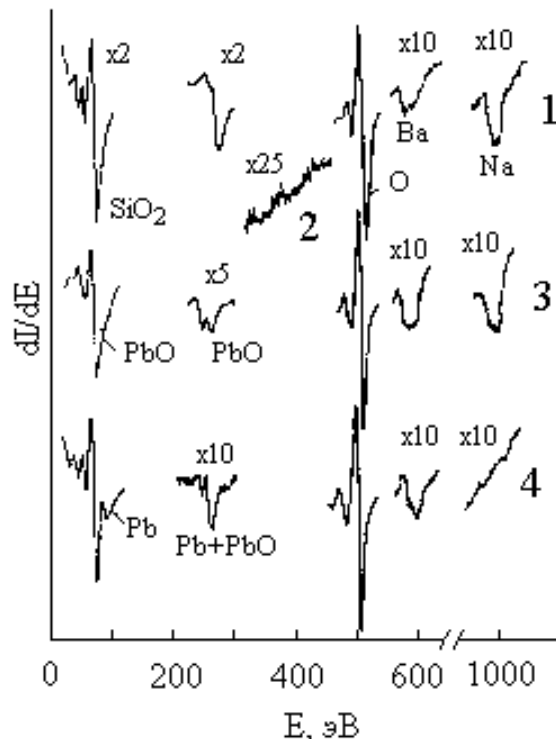


Рис. 3. Оже-спектры различных образцов свинцовосиликатных стекол: 1 – восстановленное стекло – "свежая" поверхность, 2 – уровень шума, 3 – поверхность скола стекла, 4 – после ионного травления на глубину ≈ 100 нм.

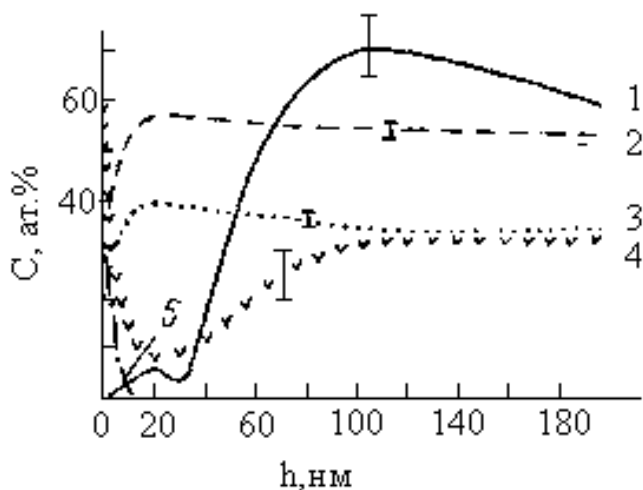


Рис. 4. Профиль концентрации элементов в поверхностном слое ВССС: 1 – свинец ($\times 10$), 2 – кислород, 3 – кремний, 4 – калий ($\times 10$), 5 – углерод ($\times 10$) (масштаб увеличен в 10 раз).

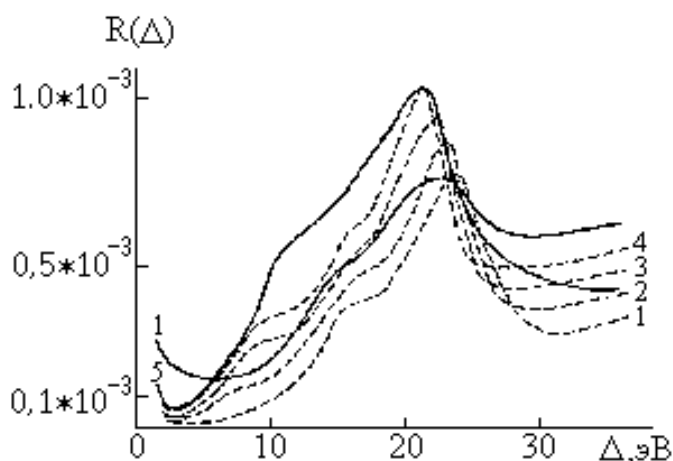


Рис. 5. Энергетический спектр характеристических потерь энергии при отражении потока электронов от свинцовосиликатного стекла состава $x\text{PbO} \cdot (1-x)\text{SiO}_2$. Сплошные кривые – экспериментальные, штриховые – расчетные данные x : 1 – 0, 2 – 0,2, 3 – 0,4, 4, 5 – 0,6.

Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами

Чувствительным методом исследования свойств стекол является электронная спектроскопия характеристических потерь энергии (ХПЭ): она позволяет получать информацию о плотности состояний и коллективных возбуждениях, которым являются эмиссионные свойства стекол.

В [36] впервые рассчитан спектр ХПЭ при отражении электронов от поверхности свинцовосиликатных стекол состава $x\text{PbO} \cdot (1-x)\text{SiO}_2$ в зависимости от молярной концентрации окиси свинца x . Для описания ХПЭ использовалась методика решения кинетического уравнения, основанная на обобщении метода решения задачи [37] с учетом энергетической релаксации электронного потока. При этом энергетический спектр рассеянных назад электронов представлялся в виде ряда по функциям распределения энергии, потерянной электроном при рассеянии. Результаты расчета и экспериментальные данные приведены на рис. 5 [36]. Максимум ($\Delta E \approx 22$ эВ) связан с потерями на генерацию объемных плазмонов. Введение окиси свинца приводит к появлению потери в области 5-7 эВ. Как положение всех максимумов, так и их интенсивность, связано с изменением x . Изменение состава стекла приводит к изменению его зонной структуры. Именно с возбуждением электронов из примесной зоны, образованной $6s$ -состояниями свинца, в зону проводимости связаны потери с энергией 5-7 эВ. Появление примесной зоны также уменьшает эффективную энергию межзонного перехода ΔE . Потери на генерацию объемных плазмонов не приводят к изотропизации импульса электрона. Поэтому отражение вторичного электрона, потерявшего энергию на возбуждение плазменного колебания, возможно только после дополнительного рассеяния, сопровождающегося изотропизацией импульса электрона.

Таким рассеянием является либо квазиупругое рассеяние на дефектах и примесях и (или) фонах, либо ионизационные потери – межэлектронное рассеяние. Это означает, что формирование плазменных максимумов связано с возбуждением валентных электронов, и смещение этих максимумов с изменениями. Сравнение этих результатов расчета с экспериментальными данными (см. рис. 5) показывает, что предложенная в [36] модель энергетической структуры стекла правильно описывает общее поведение спектра ХПЭ. Однако энергия плазменного максимума, измеренная экспериментально, остается примерно постоянной. Такое поведение может быть обусловлено не учитывавшейся зависимостью частоты от x [38], и более медленным, чем предполагалось, изменением ΔE .

Электронная спектроскопия для химического анализа

В дополнение к методам спектроскопии потерь энергии электронами и оже-спектроскопии в [39, 40] применена электронная спектроскопия для химического анализа

(ЭСХА) с целью определения состава эмитирующей поверхности и ее изменение в зависимости от различных воздействий, моделирующих работу приборов из ВССС. Расчет относительных концентраций проводился с учетом вероятности ионизации [41]. Предварительные исследования методом ЭСХА показали, что исходная поверхность сильно загрязнена углеродом, концентрация которого превышала концентрацию кремния в 7-18 раз на различных образцах. Стравливание слоя толщиной 25 Å снижало концентрацию углерода в 4-10 раз. Анализ поверхности ВССС после пятиминутной очистки ионным пучком показал, что относительные концентрации свинца и бария в эмитирующем слое (примерно 3 нм) слабо меняются в зависимости от режима восстановления. При этом концентрация натрия на поверхности больше объемной, а свинца, бария и кислорода – меньше объемной, определенной из расчета состава по синтезу. Эти результаты хорошо коррелируют с [2, 14, 15]. Спектры, полученные методом ЭСХА в [39], подтверждают результаты исследований [1], в которых показано, что свинец восстанавливается до металла. На рис. 6 [39] представлены спектры восстановленного и невосстановленного стекла.

Поверхностный состав образцов восстановленных свинцовосиликатных стекол, определяющий их вторично-эмиссионную эффективность, слабо меняется в зависимости от режима восстановления в водороде. Это может служить объяснением малых различий максимальных значений коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ), получаемых на этих стеклах [15].

Разная энергия первичных электронов позволяет анализировать различную глубину структуры стекла. Увеличение относительной интенсивности потери энергии при большей энергии первичных электронов можно трактовать как увеличение концентрации свинца с глубиной. Электронная бомбардировка и нагрев в вакууме при давлении 10^{-9} Тор, как правило, приводят к увеличению концентрации углерода на поверхности образцов ВССС.

Вторичная электронная эмиссия

Особый интерес представляет исследование влияния состава стекол и режима их восстановления на вторично-эмиссионные и проводящие свойства, т.е. на параметры, в значительной степени определяющие возможность применения указанных материалов [42] в различных приборах. Такие данные необходимы для отыскания режимов восстановления, оптимальных для формирования требуемых свойств стекла с минимальным влиянием на них термической предыстории и неконтролируемых нарушений параметров режима восстановления [3].

В [15] исследовался состав эмитирующего слоя стекол при варьировании режима их восстановления. Изучались простое двухкомпонентное стекло, содержащее около 70% оксида свинца, и сложное многокомпонентное, в состав которого входят около 40% окиси свинца и добавки окислов бария, натрия, алюминия и др. Проведенный анализ показал, что восстановление существенно изменяет распределение окислов в этом дефектном слое. Окись свинца восстанавливается в поверхностном слое до свинца, и последний, либо испаряется с другими продуктами процесса восстановления, либо диффундирует внутрь эмиттера, образуя

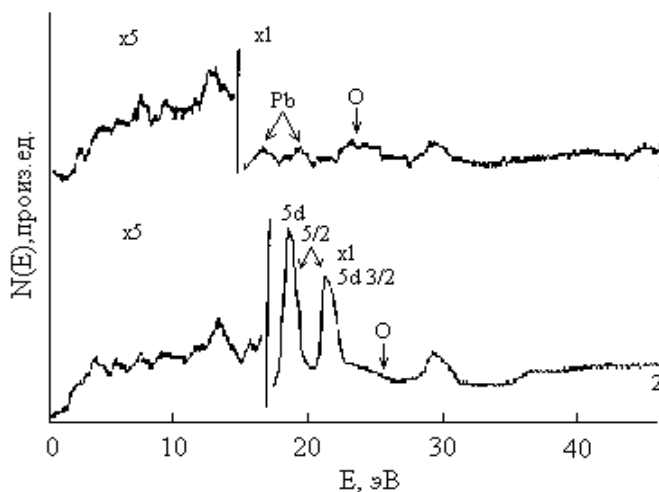


Рис. 6. Спектры ЭСХА валентных состояний восстановленного (1) и невосстановленного (2) стекла.

максимум содержания окиси свинца на глубине 700 Å. Щелочные и отчасти щелочноземельные металлы стремятся к диффузии по образовавшимся в слое дефектам к поверхности и снижают ее энергию [50], в результате чего имеет место максимальное содержание этих окислов на поверхности и минимальное – в пределах дефектного слоя.

По данным [15], глубина выхода вторичных электронов из стекла равна 150-300 Å. Поэтому сопоставить со вторично-эмиссионными свойствами можно лишь состав слоя, усредненный в пределах этой величины. Результаты такого сопоставления для слоев несколько большей толщины (500-700 Å) приведены в [15]. Эта толщина является оптимальной, так как при меньших ее значениях (100-300 Å) количество анализируемого вещества мало и результаты анализа невоспроизводимы, а при больших (>1000 Å) сглаживается зависимость состава от режима восстановления. В [15] изменение режима восстановления сопровождается изменением состава приповерхностного эмитирующего слоя. Так, при увеличении температуры восстановления простого стекла содержание свинца в эмитирующем слое проходит через минимум ($\approx 400^\circ\text{C}$). Повышение температуры восстановления увеличивает количество восстановленного свинца, который в основном диффундирует к поверхности и испаряется с нее. Небольшая его часть, пропорциональная общему количеству восстановленного свинца, коагулирует в коллоидные частицы и окрашивает слой, а часть остается в атомарном состоянии. В целом концентрация Pb в слое снижается из-за уменьшения концентрации PbO [43].

Однако при повышении температуры скорость коагуляции свинца начинает преобладать над скоростью его диффузии к поверхности и испарения с нее. В результате концентрация свинца в эмитирующем слое вновь начинает возрастать, причем уже в виде коллоидных частиц или соединений, более богатых свинцом, а содержание атомарного свинца уменьшается.

В [44] исследована зависимость эмиссионных, электрических и некоторых оптических свойств стекол не только от их состава, но и от структуры матрицы стекла, а также более тщательно изучено влияние состава и структуры на результаты восстановления поверхностного слоя стекла. Объектом исследования была выбрана хорошо изученная система двойных свинцовосиликатных стекол при содержании окиси свинца от 20 до 70 мол. %. В этой системе структурная сетка стекла должна изменяться при приближении содержания окиси свинца к 50 мол. %. При содержании PbO менее 50 мол. % матрица стекла формируется связанными тетраэдрами SiO₄, а свинец внедряется в нее как модификатор [45]. При содержании же окиси свинца свыше 50 мол. % сетка кремнекислородных тетраэдров разрушается, и окись свинца начинает участвовать в построении матрицы [45, 46].

Из [44] следует, что зависимость КВЭЭ невосстановленного стекла от содержания в нем окиси свинца подчиняется закону аддитивности до введения приблизительно 45-50 мол. % PbO. Однако, при большем содержании окиси свинца закон изменения КВЭЭ с составом уже другой. Перегиб зависимости свойства от состава при содержании окиси свинца порядка 45 мол. % наблюдается также для показателя преломления и для молекулярной рефракции [47], что лишний раз свидетельствует об изменении структуры матрицы стекла, происходящей в районе этой точки.

КВЭЭ стекол одного и того же исходного состава, но обработанных разным образом, могут различаться после восстановления в водороде. Возможно, это связано с формированием в результате обработки в ликвирующем стекле разной микроструктуры. В [47] выявлена связь КВЭЭ с инфраструктурой стекла. Микроструктура поверхности стекол изучалась по микрофотографиям реплик с исследуемых поверхностей, полученных в электронном микроскопе. Разница в степени ликвации и микроструктуре достигалась изменением времени отжига. Согласно [47] существует оптимальное время термообработки, обеспечивающее максимальное значение КВЭЭ. Термообработка сопровождается четким изменением микроструктуры стекла, при этом максимальному значению КВЭЭ соответствует "мелкочешуйчатая" структура. Схожая картина наблюдается и для тех же стекол, когда изменение микро-

структуры и степени ликвации достигалось ступенчатым изменением температуры. И в этом случае существует оптимальный режим обработки, обеспечивающий максимальное значение КВЭЭ. Микроструктура стекла с максимальным КВЭЭ также "мелкочешуйчатая". В случае отсутствия заметной микроструктуры КВЭЭ имеет самое резкое значение.

Таким образом, при одинаковом химическом составе исходного стекла вторично-эмиссионные свойства восстановленных стекол существенно зависят от их микроструктуры, причем имеется некая оптимальная микроструктура, обеспечивающая стеклу максимум КВЭЭ после высокотемпературного восстановления в водороде. Восстановление "проявляет" зависимость КВЭЭ от микроструктуры: если до восстановления разница в КВЭЭ для стекол с различной микроструктурой составляет 0,2-0,3, то после восстановления эта разница увеличивается до 0,8-1,5, т. е. отнести ее только за счет разной микроструктуры поверхности нельзя. Здесь следует учесть проанализированные выше факторы – в частности, связь КВЭЭ с составом стекол, обусловленной различием в микроструктуре, нарушение стехиометрии, разные парциальные КВЭЭ окислов, а также наличие на эмитирующей поверхности натрия, калия и углерода [14, 15]. Поскольку распределение элементов по глубине после восстановления происходит в результате конкуренции процессов диффузии различных элементов из объема стекла к поверхности, диффузии водорода от поверхности в объем, процесса испарения элементов с поверхности, то можно предположить, что различные скорости диффузии элементов обуславливаются, по-видимому, различием в микроструктуре для стекол с малым и большим КВЭЭ.

Углеродсодержащие соединения на поверхности стекол

В ряде публикаций последнего времени отмечается, что присутствие углерода на поверхности образцов восстановленных свинцовосиликатных стекол и приборов из них может влиять на эмиссионную активность. В [16, 48, 49] показано, что углерод присутствует на поверхности образцов ВССС в значительных концентрациях, изменяющихся при различных воздействиях на поверхность. В [16] обнаружено увеличение парциального давления СО и СН₄ в вакуумном объеме в начале работы изделия из ССС. При этом происходит постепенное увеличение коэффициента усиления, которое связывается с десорбцией углеродных соединений. В [50] подробно исследуется поведение углерода на ВССС и делается вывод, что источником углерода может служить объем стекла. Эти результаты свидетельствуют, что углерод на эмитирующей поверхности приборов из свинцовосиликатного стекла играет существенную роль в их работе. Поэтому исследование его поведения в зависимости от различных воздействий является важной научно-технической задачей.

В [51] снижение коэффициента усиления каналового умножителя связывают с ростом толщины углеродного покрытия в результате электронной бомбардировки. В [52] исследовалось происхождение углерода, распределение его вдоль поверхности и на глубину от поверхности, влияние прогревов и электронного облучения на концентрацию углерода, влияние углерода на основное качество поверхности – КВЭЭ. У неочищенной поверхности стекла концентрация углерода достигает 40-80 ат. % [39]. Ионное травление поверхности уменьшает количество углерода, но прогрев или электронная бомбардировка снова приводят к росту его концентрации. Есть предположение, что углерод, как и некоторые щелочные элементы, может диффундировать из объема к поверхности [39, 50]. Исследование сколов стекла, сделанных на воздухе перед установкой в вакуумную камеру, не опровергло это предположение, так как углерод был обнаружен и на них [39]. С целью выяснения объемных концентраций элементов свинцовосиликатного стекла, в том числе и углерода, в [52] были исследованы сколы, сделанные в высоком вакууме методом оже-спектроскопии. Результаты эксперимента показали, что углерод на поверхность попадает извне (с точностью определения 0,2 ат. %). Глубина его проникновения в поверхность составляет в среднем 0,7 нм. Возможные источники углерода: органические связки и растворители, применяемые при полировке, примеси в ат-

мосфере водорода при восстановлении, адсорбция из атмосферы при хранении, адсорбция остаточных газов в вакуумной камере. Там же исследовалось распределение углерода по глубине от поверхности при послойном травлении поверхности ионным пучком. Было установлено, что концентрация углерода быстро падает в глубину образца. Средняя глубина, на которой интенсивность оже-пика углерода составляла 10% от начальной, равна ~7 нм, диапазон изменений: 4-15 нм. Возможно, что присутствие углерода на некоторой глубине от поверхности является свойством только модельных образцов ВССС, так как они подвергаются механической полировке. Не исключена диффузия углерода на поверхность при прогреве или электронной бомбардировке [50, 39].

Углерод, распределенный в приповерхностном слое образца недоступен органическим растворителям [52]. Промывка этиловым спиртом эффективно уменьшает поверхностное углеродное загрязнение и снижает неравномерность его распределения вдоль поверхности, не внося других существенных изменений в состав поверхности, однако не удаляет углерод из всего приповерхностного слоя. Полностью углерод удаляется с поверхности ионным травлением, однако КВЭЭ даже после неглубокого травления снижается в 1,5-2 раза. Этот эффект не позволяет применять травление для очистки поверхности от углерода.

Поведение углерода при прогреве и электронной бомбардировке исследовалось в [39]. В [52] эти исследования были продолжены. Выводы [39] полностью подтвердились. Углерод на поверхности ВССС находится в двух формах: первая десорбируется при прогреве и электронной бомбардировке, вторая – адсорбируется. Электронное облучение стимулирует адсорбцию второй формы. Поэтому результаты работы [53] можно объяснить десорбцией первой формы, а результаты [50, 51] – адсорбцией второй формы углерода. Первой формой скорее всего являются молекулы СО и СО₂; второй – СН₄, которые способны полимеризоваться под действием электронного облучения. Анализ оже-спектров подтверждает это предположение: концентрация кислорода уменьшается как при десорбции углерода, так и при его адсорбции.

Выводы

При одинаковом химическом составе исходного стекла вторично-эмиссионные свойства восстановленных стекол существенно зависят от их микроструктуры, причем имеется некая оптимальная микроструктура, обеспечивающая стеклу максимум КВЭЭ после высокотемпературного восстановления в водороде. Однородность проводящего слоя нарушается после восстановления стекла, прогревая его на воздухе или в кислороде. При этом часть атомарного металла окисляется, причем в тонком приповерхностном слое окисление более интенсивно и сопротивление становится более высоким, чем по всей толщине. В процессе восстановления оксид свинца восстанавливается в поверхностном слое до свинца, и последний, либо испаряется с другими продуктами процесса восстановления, либо диффундирует внутрь эмиттера, образуя максимум содержания оксида свинца на глубине 700 Å. Щелочные и отчасти щелочноземельные металлы стремятся к диффузии по образовавшимся в слое дефектам к поверхности и снижают ее энергию, в результате чего имеет место максимальное содержание этих оксидов на поверхности и минимальное – в пределах дефектного слоя. Таким образом, состав эмитирующего и проводящего восстановленного слоя свинцовосиликатных стекол изменяется по глубине вплоть до 1500-2000 Å и для ряда оксидов их распределение не монотонно.

Также следует отметить, что углерод присутствует на поверхности образцов ВССС в значительных концентрациях. Углерод на поверхности ВССС находится в двух формах: первая десорбируется при прогреве и электронной бомбардировке (молекулы СО и СО₂), а вторая – адсорбируется на поверхности в виде молекул СН₄.

Литература

1. Файнберг Е.Л. Химический состав фазы, восстанавливающейся на поверхности высокосвинцовых стекол в процессе их термообработки в водороде. // ЖПХ, 1965, т. 38, № 10, с. 2192-2196.
2. Артамонов О.М., Саттаров Д.К., Смирнов О.М. и др. Исследование восстанавливающихся свинцовосиликатных стекол методом спектроскопии медленных электронов. // Физ. и хим. стекла, 1981, т. 7, № 4, с. 450-476.
3. Тютиков А.М. О режиме восстановления некоторых свинцовосиликатных стекол, используемых для изготовления микроканальных пластин. // ОМП, 1974, № 9, с. 41-45.
4. Blodgett K.B. Surface conductivity of lead silicate glass after hydrogen treatment. // J. Amer. Ceram. Soc., 1951, v. 34, N 1, p. 14-27.
5. Чуйко Г.А., Файнберг Е.А., Сиприков И.В., Гречаник Л.А. Вторичная электронная эмиссия восстановленных в водороде свинцовосиликатных стекол с повышенной поверхностной электропроводностью. // Изв. АН СССР, сер. физ., 1964, т. 28, № 9, с. 1516-1521.
6. Файнберг Е.А., Гречаник Л.А. Электрофизические свойства восстановленных в водороде свинцовосиликатных стекол. – В кн.: Электрофизические свойства и строение стекла. М.-Л., 1964, с. 115-117.
7. Genco J.I., Almaula B.C. Surface reduction of lead glass tubes. // J. Amer. Ceram. Soc. Bull., 1969, v.48, N 9, p. 846-849.
8. Об изменении электропроводности поверхностного слоя свинцовосиликатного стекла в процессе термообработки в водороде. // Изв. АН СССР, Неорган. матер., 1966, т. 2, № 6, с. 1154-1156.
9. Улько Ю.Н., Фаинберг Е.А. О влиянии термообработки свинцовосиликатных стекол в водороде на коэффициент вторичной электронной эмиссии. // Изв. АН СССР. Неорган. матер., 1967, т. 3, № 2, с. 345-346.
10. Саттаров Д.К., Канчиев З.И., Конаева Г.Я. и др. Исследование пропускания свинцовосиликатных стекол, подвергнутых термоводородному восстановлению. // ЖПХ, 1978, т. 51, № 4, с. 933-935.
11. Саттаров Д.К., Канчиев З.И., Конаева Г.Я. и др. Исследование влияния термоводородного восстановления на электрические параметры микроканальных пластин. // ЖПХ, 1978, т. 58, № 9, с. 1981-1986.
12. Шелюбский В.И. Исследование процесса восстановления свинца при обработке свинцового стекла в восстановленном пламени. // ДАН СССР, 1954, т. 96, №4, с. 745-747.
13. Файнберг Е.А. Об изменении электропроводности поверхностного слоя свинцовосиликатного стекла в процессе термической обработки в водороде. // Изв. АН СССР, Неорган. матер., 1966, т.2, с.1154-1156.
14. Hill G.E. Secondary electron emission and compositional studies on chanel plate glass surface. // Adv. Electron. Electr. Phys., 1976, v.40A, p.153-165.
15. Тютиков А.М., Королев Н.В., Тоисева М.Н., Петухова Л.В., Харин А.С. Исследование состава поверхностного слоя и коэффициента вторичной электронной эмиссии свинцовосиликатных стекол. // Оптико-механ.пром.,1980, №4, с.11-13.
16. Authinarayanan A., Dudding R.W. Changes in secondary electron yield from reduced lead glasses. // Adv. Electron. Electr. Phys., 1976, v.40A, p.167-181.
17. Петровский Г.Т., Саттаров Д.К., Канчиев З.И. Структура и свойства восстановленных слоев на поверхности свинцовосиликатных стекол. // Физ. и хим. стекла, 1981, т. 7, № 4, с. 457-469.
18. Власов А.Г., Флоринская В.А., Венедиктов А.А. и др. Инфракрасные спектры неорганических стекол и кристаллов. Л., 1972, с. 126-219.
19. Капитонова Л.Н., Харьюзов В.А., Никитин В.А., Золотарев В.М. Спектроскопическое исследование оптических параметров и толщины поверхностного слоя восстанавливающегося свинцовосиликатного стекла. // Физ. и хим. стекла, т.11, №2, 1985, с. 193-197
20. Золотарев В.М. Исследование свойств материалов в объеме и поверхностном слое методами спектроскопии внутреннего отражения. Автореф. докт. дис., Л., 1981, с. 25.
21. Технология изготовления элементов нарушенного полного внутреннего отражения. // Проспект Т-03596. М., 1983, 7 с.

22. Минков И.М., Велицкая Е.Л., Золотарев В.М., Капитонова Л.Н. Определение показателя преломления неоднородного слоя по спектрам отражения. // Оптика и спектр, 1985, т. 58, № 3, с. 689-693.
23. Капитонова Л.Н., Харьюзов В.А., Золотарев В.М. Определение концентрации металлического свинца в поверхностном слое восстановленного свинцовосиликатного стекла по ИК-спектрам пропускания и НПВО. // Физ. и хим. стекла, 1985, 11, №2, с.232-233.
24. Maxwell-Gernett J.C. Colours in metal glasses and metallic films. // Phyl. Trans.Roy.Soc., 1906, v.205A, p.237-288.
25. Гусинский Г.М., Осетинский Г.М., Пестрикова М.В. и др. Влияние термоводородной обработки на концентрационный профиль свинца в свинцовосиликатном стекле. // Физ. и хим. стекла, 1987, т. 13, № 5, с.733-739.
26. Сидоров Т.А. Инфракрасные и ультрафиолетовые спектры и структура свинцовосиликатных стекол. // ЖПХ, 1967, т. 6, № 1, с. 98-101.
27. Основы эллипсометрии. // Под ред. А. В. Ржанова. -Новосибирск, 1979. 422 с.
28. Хэнэрт М., Раушенбах Б. Исследование поверхностных слоев силикатных стекол. // Физ. и хим. стекла, 1983, т. 9, № 6, с. 696-703.
29. Wiley H.C. Glass article. // Patent USA N 2314804, 07.12.1938 (cl. 49-92).
30. Chu W.K., Mayer J.W., Nicolet M.A. // Backscattering spectrometry. -N.Y., 1978, 384 p.
31. Филипович В. Н. Теоретическая схема процесса ликвации в растворах и стеклах. II. Диффузионная стадия фазового распада. // Изв. АН СССР, Неорган. матер., 1967, т. 3, № 7, с. 1192-1201.
32. Иоши А., Дэвис Л., Палмберг П. Электронная оже-спектроскопия. IV. Количественный анализ. В кн.: Методы анализа поверхностей. М., 1979, с. 221-232.
33. Davis L.E., MacDonald N.C., Palmberg P.W., Riach G.E., Weber R.E. Hand of Auger electron spectroscopy. Minnesota, 1976. 253 p.
34. Елисеев С.А., Новолодский В.А., Смирнов О.М., Харьюзов В.А. Применение оже-спектроскопии для изучения распределения элементов в поверхностном слое восстановленных свинцовосиликатных стекол. // Физ. и хим. стекла, 1985, т. 11, № 4, с. 600-602.
35. Елисеев С.А., Новолодский В.А., Полухин В.Н. и др. Профили распределения элементов в поверхностном слое восстановленных свинцовосиликатных стекол. // Физ. и хим. стекла, 1985, т. 11, № 5, с. 603-604.
36. Гусаров А.Я., Машков В.А., Пронин В.П. и др. Характеристические потери энергии электронов при отражении от свинцовосиликатных стекол. // Физ. и хим. стекла. 1986, №4, с. 488-490.
37. Нейз К. М., Цвайфель Я. Ф. Линейная теория переноса. М., 1972. 381с.
38. Машков В. А. Расчет диэлектрической проницаемости свинцовосиликатных стекол. // Физ. и хим. стекла, 1984, т. 10, № 2, с. 167-173.
39. Артамонов О.М., Костиков Ю.П., Новолодский В.А. и др. Исследование эмиссионными методами поверхности восстановленных свинцовосиликатных стекол. // Физ. и хим. стекла, 1985, т. 11, № 3, с. 326-330.
40. Зигбан К., Нордлинг К., Фальман А. и др. Электронная спектроскопия М., 1971, 493 с.
41. Scofield J.H. Hartree-Slater subshell photoionisation cross-sections at 1254 1487 eV. // J. Electron Spectr. and Related Phenom., 1976, v. 8, N 2, p. 129.
42. Ruggieri D.J. // IEEE Trans. Nucl. Sci., 1972, 19, № 3, p. 74.
43. Trap J.L. // Venes et refractaires, 1969, F-23, № 1, p. 28-42.
44. Тютиков А.М., Лобанова Н.В., Тоисева М.Н. и др. Исследование связи эмиссионных свойств свинцовосиликатных стекол с их составом и структурой. // Физ. и хим. стекла, 1979, т. 5, № 5, с.628-631.
45. Королев Н.В., Меньшикова Е.М., Гинзбург С.К. и др. Послойный спектральный анализ изломов литой стали. // ДАН СССР, 1975, № 5, с. 1082-1084.
46. Бацанов С.С. Структурная рефрактометрия. М., 1959, 223 с.
47. Леонов Н.Б., Волков Ф.С., Мурашов С.В. и др. Влияние структуры свинцовосиликатных стекол на их коэффициент вторичной электронной эмиссии. // Физ. и хим. стекла, 1988, т. 14, № 5, с. 686-690.

48. Броздниченко А.Н., Пронин В.П., Тютиков А.М. и др. Вторично-эмиссионная эффективность свинцовосиликатных стекол. // Тез. докл. по ЭОС и эффективным фотоэмиттерам. IV Всес. симп. по ВЭЭ и ФЭЭ. Л., 1981, с. 32-33.
49. Костиков Ю.П., Новолодский В.А., Редина И. В. и др. Вторично-электронная эмиссия восстанавливающихся свинцовосиликатных стекол для МКП – исследования методами электронной спектроскопии. // Тез. докл. по ЭОС и эффективным фотоэмиттерам. IV Всес. симп. по ВЭЭ и ФЭЭ. -Л., 1981, с. 22-23.
50. Гравель Л.А., Леонов Н.Б., Новиков Ю.Б. и др. Об изменении состояния поверхности восстановленных свинцовосиликатных стекол при их термообработке. // Физ. и хим. стекла, 1984, т. 10, № 1, с. 75-79.
51. Sakai J., Mogami A. Studi of gain fatigue mechanism in chanel electron tipliers. // Surface Sci., 1979, v. 86, p.359.
52. Елисеев С.А., Новолодский В.А., Смирнов О.М. и др. Углерод на поверхности восстановленных свинцовосиликатных стекол. // Физ. и хим. стекла, 1986, т. 12, № 4, с. 461-466.
53. Леонов Н.Б., Тоисева М.Н., Новиков Ю.Б. и др. Измерение шумов микроканальных пластин. // ОМП, 1981, № 12, с. 39-44.

Research of superficial layers restored leaden-silicate glasses

I.B. Ashkhotova

Kabardino-Balkarian State University, Nalchik

Abstract. In the given work the literary analysis of study of a surface of glasses (systems SiO₂-PbO) various methods (optical, spectrometer, roentgenographic etc.) is carried out. By the authors of works is shown, that the compound emitting and conducting restored layer leaden-silicate glasses changes in depth to 1500-2000Å and for a line oxides their distributing not monotonously.

УДК 621.382.2.029.64

Проблемы в технологии особо мощных СВЧ диодов миллиметрового диапазона

А.А. Дышеков, А.С. Ташилов, М.Н. Барашев, А.Н. Багов

Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик

E-mail: rsa@kbsu.ru

Представлены результаты исследований, направленных на значительное уменьшение тепловых ограничений генераторных лавинно-пролетных диодов миллиметрового диапазона с целью улучшения выходных параметров и надежности. Комплекс оригинальных конструктивно технологических приемов позволил решить задачу создания мультимезовых структур миллиметрового диапазона, в которых тепловое сопротивление можно уменьшать обратно пропорционально \sqrt{n} , где n – число мезаструктур. Данная технология имеет универсальный характер и применима к самым сложным материалам, в частности к гетероструктурам и всем типам изготавливаемых на их основе СВЧ диодов, содержащих мезаструктуру.

Достижения в области получения современных материалов микроэлектроники особенно эффективны, когда технология изготовления конкретного прибора позволяет максимально реализовывать заложенные в активной структуре ресурсы. Все предельные выходные параметры для Si и GaAs генераторных СВЧ диодов миллиметрового диапазона, таких как лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и диоды Ганна, достигаются за счет использования в конструкции прибора алмазного теплоотвода. Такая конструкция является базовой для этих приборов и на основе более совершенных материалов.

В то же время на частотах свыше 60 ГГц выигрыш в использовании алмазного теплоотвода начинает снижаться из-за уменьшения размеров мезакристалла менее 30-40 мкм в диаметре. Дальнейшее эффективное снижение теплового сопротивления возможно только за счет изменения геометрии кристалла и придания ему формы структуры с сильно развитой периферией, что увеличивает отдачу тепла в боковом направлении. Это позволяет максимально использовать возможности материала теплоотвода. Однако создание таких структур сильно затруднено чрезвычайно малыми рабочими размерами мезакристаллов и особенностями их монтажа на теплоотвод.

Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку технологии изготовления мультимезакристаллов, в которых тепловое сопротивление уменьшается обратно пропорционально \sqrt{n} , где n – число мезаструктур. Данная технология имеет универсальный характер и применима к самым сложным материалам, в частности к гетероструктурам и всем типам изготавливаемых на их основе СВЧ-диодов, содержащих мезаструктуру.

Комплекс оригинальных конструктивно-технологических приемов был апробирован на кремниевых ЛПД миллиметрового диапазона. В качестве опытных образцов были реализованы кремниевые ЛПД, имеющие форму активной структуры в виде кольца, 6-мезаструктур, 8-мезаструктур. На рис. 1 представлен фрагмент 8-мезового ЛПД на этапе задания на исходной пластине рабочей геометрии для работы в 5 мм диапазоне.

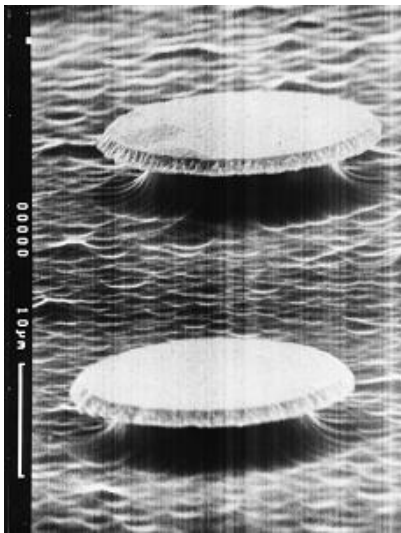


Рис. 1.



Рис. 2.

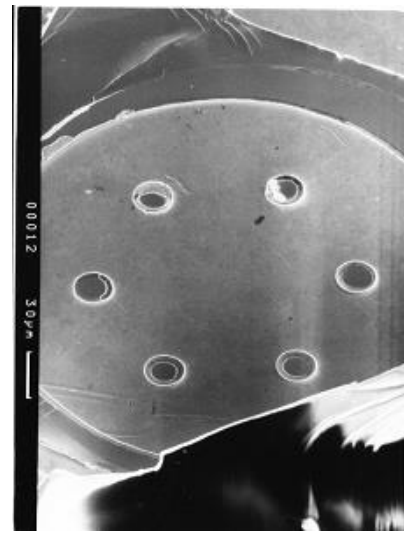


Рис. 3.

Диаметр кремниевой единичной структуры у основания $p-n$ -перехода около 16 мкм при высоте мезоструктуры около 4 мкм. Суммарная площадь $p-n$ -переходов всех восьми мезоструктур составляет $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$, что соответствует диаметру одномезовой структуры около 45 мкм. На рис. 2 представлена эта же 8-мезовая структура после ее монтажа на золоченный медный теплоотвод. Для сравнения, кремниевый ЛПД фирмы NEC ND8L60W-1T 5 мм диапазона на алмазном теплоотводе имеет величину теплового сопротивления $40^\circ\text{C}/\text{Вт}$, в то время как представленная на рис. 1 структура позволяет получить на обычном медном теплоотводе $20^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Комбинация же указанной структуры с алмазным теплоотводом позволила бы уменьшить величину теплового сопротивления еще в два раза.

Выходные СВЧ характеристики были получены для кремниевой двухпролетной p^+pnn^+ 6-мезовой структуры 5 мм диапазона, которые приведены в табл. 1.

В этой таблице ΔT_1 – температура перегрева $p-n$ -перехода в случае отсутствия СВЧ генерации, ΔT_2 – температура перегрева $p-n$ -перехода с учетом того, что часть входной мощности не рассеивается в виде тепла, а трансформируется в выходную мощность СВЧ.

На рис. 3 представлена эта структура после ее монтажа на золоченный медный теплоотвод.

Особенностью данной технологии являются более высокие удельные механические

Таблица 1

Пробивное напряжение $U_{пр}$, В	Емкость диода при нулевом смещении, $C(0)$, пФ	Тепловое сопротивление R_T , $^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Ток диода, I , мА	Выходная непрерывная мощность $P_{вых}$, мВт	Частота генерации f , ГГц	ΔT_1 , $^\circ\text{C}$	ΔT_2 , $^\circ\text{C}$	КПД, %
23,7	1,4	21	200	450	65,8	124	114	7,67
			290	850	65,3	191	174	8,5
			325	1040	65,9	218	196	10
23,7	1,25	22	175	340	66,8	112	104	6,7
			250	720	-	170	155	9,3
			300	980	68,3	212	190	9,8

Таблица 2

Образцы № партии	$\Delta\varepsilon/h,$ 10^{-4} мкм^{-1}	$\varepsilon_0, 10^{-4}$	$h,$ мкм	Процент выхода годных приборов	
				После сборки	После испытаний
1 p^+nn^+	-33,9	-12,0	0,35	48	23
	-34,4	-11,9	0,35	50	18
2 p^+nn^+	-26,13	-14,4	0,55	34	60
	-25,9	-14,0	0,54	36	57
3 p^+pnn^+	-65,2	-9,78	0,15	73	23
	-96,4	-9,64	0,10	74	20

нагрузки при сборке приборов, поэтому с целью повышения надежности и процента выхода годных приборов, разработана и опробована рентгенодифракционная методика [2], позволяющая контролировать на исходных пластинах амплитуду и градиент деформации в активной области, что особенно важно для мезодиодов на основе гетероструктур.

В табл. 2 приведены результаты по проценту выхода годных 8-структурных ЛПД p^+nn^+ и p^+pnn^+ типа с разными значениями градиента деформации $\Delta\varepsilon/h$, амплитуды деформации ε_0 и толщины пленки h на операциях сборки и электротермотренировка.

Образцы с большими значениями деформации в p^+ слое дают меньший процент выхода на операции сборки. Образцы с большим значением градиента деформации дают меньший процент выхода годных на операции электротермотренировка. Таким образом, использованный РД метод показал корреляцию между величиной деформации и ее градиентом и процентом выхода годных приборов. Используемая методика РД анализа позволила в итоге с одной стороны, скорректировать конструктивные размеры монтируемых при сборке прибора кристаллов, с другой стороны, привела к определенным технологическим требованиям к классу поверхности теплоотвода. В итоге удалось осуществить характеристики многомезовых ЛПД миллиметрового диапазона, приведенные в таблице 1 при большей надежности работы приборов и большем их проценте выхода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-02-16137.

Литература

1. Потапов Ю. Новинки СВЧ-технологий с лондонской выставки EuMW 2001. // Электронные компоненты. 2001. № 6. С.11-16.
2. Ташилов А.С., Барашев М.Н., Хапачев Ю.П. Связь структурных параметров с процентом выхода и качеством многомезовых кремниевых лавинопролетных диодов миллиметрового диапазона. Электронный журнал. "Исследовано в России", 168, стр. 1808-1814, 2004. [Http://zhurnal.apec.relern.ru/articles/2004/168.pdf](http://zhurnal.apec.relern.ru/articles/2004/168.pdf)

The problems in a process engineering high power microwaves diodes millimeter wave band

A.A. Dyshekov, A.S. Tashilov, M.N. Barashev, A.N. Bagov

Kabardino-Balkarian State University, Nalchik

E-mail: rsa@kbsu.ru

Abstract. In the paper the outcomes of results directional on a considerable diminution of thermal restrictions generating impatt diodes millimeter (mm) wave band are submitted with the purpose of improving exit pupils and reliability. The complex of original design technological receptions has allowed to solve a problem of making multimesa mm wave band structures, in which the thermal resistance is possible to reduce in inverse proportion , where n – number of mesa structures. The sectional process engineering has generalpurpose character and is applicable to the most composite materials in particular to heterostrucructures and all types of made on their bases microwaves diodes containing a mesa structure.

The work is supported of the RFFI grant 05-02-16137.

СОДЕРЖАНИЕ

PERSONALIA. К 150-летию со дня смерти Карла Фридриха Гаусса	– 3
<i>Пунегов В.И., Казаков Д.В., Семенюк Д.Н., Павлов К.М., Mudie S., Takeda Y., Tabuchi M.</i>	
Исследование наноструктур на основе InGaN методом синхротронного рассеяния	– 6
<i>Лигидов М.Х.</i>	
Закономерности формирования структуры и свойств смесей дивиниловых эластомеров	– 14
<i>Шхануков-Лафишев М.Х., Березгов А.М.</i>	
О сходимости разностных схем для нагруженных дифференциальных уравнений	– 20
<i>Липкин А.И.</i>	
Квантовая механика как раздел теоретической физики. Формулировка системы исходных понятий и постулатов	– 31
<i>Шустова Т.И., Юрков А.Ю.</i>	
Нейровегетативная регуляция трофического состояния слизистой оболочки глотки и гортани	– 44
<i>Аихотова И.Б.</i>	
Исследование поверхностных слоев восстановленного свинцовосиликатного стекла	– 54
<i>Дышеков А.А., Ташилов А.С., Барашев М.Н., Багов А.Н.</i>	
Проблемы в технологии особо мощных СВЧ диодов миллиметрового диапазона	– 68

CONTENTS

PERSONALIA. To the 150-anniversary from the date of Carl Friedrich Gauss's death	– 3
<i>Punegov V.I., Kazakov D.V., Semenyuk D.N., Pavlov K.M., Mudie S., Takeda Y., Tabuchi M.</i> The study of InGaN nanostructures by synchrotron X-ray scattering	– 6
<i>Ligidov M.Kh.</i> Laws of forming of structure and properties of divinyl elastomer mixtures	– 14
<i>Shkhanukov-Lafishev M.Kh., Berezgov A.M.</i> Convergence of difference schemes for loaded differential equations	– 20
<i>Lipkin A.I.</i> Quantum mechanics as the branch of theoretical physics. Formulation of the system of initial concepts and postulates	– 31
<i>Shustova T.I., Yurkov A.Yu.</i> Neurovegetative regulation of the pharyngeal and laryngeal mucosa trophism	– 44
<i>Ashkhotova I.B.</i> Research of superficial layers restored leaden-silicate glasses	– 54
<i>Dyshekov A.A., Tashilov A.S., Barashev M.N., Bagov A.N.</i> The problems in a process engineering high power microwaves diodes millimeter wave band	– 68

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция просит авторов руководствоваться изложенными ниже правилами

1. Статья, предоставленная для публикации, должна иметь направление экспертное заключение от учреждения, в котором выполнена работа.
2. Рукопись должна быть отпечатана на компьютере или машинке (размер шрифта – 12 кегль) через два машинописных интервала (полуторный межстрочный интервал в редакторе Word), на белой бумаге формата А4 (297x210 мм) с одной стороны листа, левое поле – 25 мм. Все листы в статье должны быть пронумерованы.
3. Статья должна быть подписана авторами и представлена в двух экземплярах.
4. Рисунки, таблицы и фотографии в текст рукописи не размещаются, а прилагаются на отдельных листах в конце статьи.
5. Начало статьи оформляется по образцу: индекс статьи по универсальной десятичной классификации (УДК), название, авторы, полное название учреждений, в которых выполнялось исследование, краткая аннотация (объем – не более половины страницы), текст статьи. Далее на отдельных листах:
 - список литературы,
 - таблицы,
 - рисунки,
 - подписи к рисункам,
 - на английском языке: название, авторы, полное название учреждений, в которых выполнялось исследование, краткая аннотация,
 - адреса для переписки, телефоны, fax, e-mail.
6. В статье должны использоваться единицы и обозначения в международной системе единиц СИ и относительные атомные массы элементов по шкале ^{12}C . В расчетных работах необходимо указывать авторов используемых программ. При названии различных соединений необходимо использовать терминологию ИЮПАК.
7. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.
8. При упоминании в тексте иностранных фамилий в скобках необходимо давать их оригинальное написание, за исключением общеизвестных, а также в случае, если на эти фамилии даются ссылки в списке литературы.
9. При упоминании иностранных учебных заведений, фирм, фирменных продуктов и т.д. в скобках должны быть даны их названия в оригинальном написании.
10. Оформление формул должно соответствовать следующим требованиям.
 - a. Все формулы и буквенные обозначения должны быть напечатаны на компьютере, или впечатаны на машинке с латинским шрифтом, или вписаны от руки черными чернилами, с четкой разметкой всех особенностей текста (индексов, полужирного и курсивного начертаний и т.д.).
 - b. При разметке формул необходимо прописные и строчные буквы всех алфавитов, имеющих одинаковое начертание (P, S) подчеркивать простым карандашом: большие – двумя чертами снизу, маленькие – двумя чертами сверху.
 - c. Показатели степени и индексы выделять простым карандашом дугой: верхние – снизу, нижние – сверху.
 - d. Для полужирных символов (векторов) использовать подчеркивание синим карандашом.

11. Таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать название таблицы. Все графы в таблицах и сами таблицы должны иметь заголовки.
12. Рисунки предоставляются размером не менее 5х6 см и не более 17х24 см, с указанием низа и верха. Рисунки должны быть выполнены на белой бумаге черной тушью или распечатаны на лазерном или струйном принтере качеством не менее 300 dpi. Использовать другие цвета кроме черного не допускается.
13. Фотографии предоставляются на не тисненной глянцевой бумаге размером не более 9х12 см.
14. На обратной стороне рисунков и фотографий указывают фамилию первого автора, порядковый номер, верх, низ.
15. В тексте необходимо дать ссылки на все приводимые рисунки и таблицы, на полях рукописи слева должно быть отмечено, где приводимый рисунок или таблица встречаются впервые.

Требования к рукописям, предоставляемым в электронном виде.

1. В целях сокращения сроков подготовки материалов к публикации желательно предоставление материалов в электронном виде. Электронная версия материалов сдается в дополнение к бумажной и должна быть максимально ей идентична.
2. Электронная версия предоставляется на 3,5" дискетах, форматированных для IBM PC, либо на CD- или DVD-дисках. На диске должны быть обозначены имена файлов, название статьи и фамилия и инициалы автора(ов).
3. Основной текст статьи и таблицы предоставляются в формате MS Word for Windows (версии 6.0 и старше). Шрифт – Times New Roman, 12 кегль. Строки в пределах абзаца не должны разделяться тем же символом, что и абзацы.
4. Формулы, если это необходимо, должны быть набраны в формате MS Equation. Как в тексте, так и в MS Equation следует соблюдать следующие стили и размеры:
 - a. Стил: текст, функция, числа – Times New Roman Обычный, переменная – Times New Roman Наклонный (Курсив), матрица-вектор Times New Roman Полужирный, греческие и символы – Symbol Обычный.
 - b. Размер: обычный, мелкий символ – 12 пт, крупный индекс – 8 пт, мелкий индекс – 6 пт, крупный символ – 18 пт.
 - c. Формат-интервал: высота/глубина индексов – 30%, все остальное – по умолчанию.
 - d. В числах следует использовать десятичную запятую, а не точку.
5. Штриховые и полутоновые иллюстрации должны быть представлены в форматах TIFF, JPEG, GIF с разрешением не менее 300 dpi. Цветовая палитра: grayscale. Каждый графический файл должен содержать один рисунок.
6. Допускается (но не желательно) сжатие графических файлов архиваторами WinRAR или WinZIP. Каждый файл должен быть помещен в отдельный архив.

Научное издание

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

Компьютерная верстка *Д.А. Тарасова*
Корректор *В.В. Вакулина*

Изд. лиц. Серия ИД 06202 от 01.11.2001
В печать **.**.2004. Формат 60x84 ¹/₁₆. Печать трафаретная
Бумага газетная. *.** усл.п.л. **. * уч.-изд.л
Тираж 10001 экз. Заказ № _____
Кабардино-Балкарский государственный университет
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Полиграфическое подразделение КБГУ
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173