

# VI СТУДЕНЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ АЛФЁРОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



## Сборник тезисов



16 октября 2025 г.  
г. Санкт-Петербург

# **Двухмагнонные моды антиферромагнетика MnF<sub>2</sub>**

Даниил Сенчук<sup>1, 2</sup>

<sup>1)</sup>Академический университет им. Ж. И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2)</sup>ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

\*email: host.hus@list.ru

**Спиновые волны** — это коллективные колебания ориентации спинов в магнитном материале.

**Двухмагнонная мода** — возбуждение в антиферромагнетиках двух связанных магнонов, с противоположными волновыми векторами.

**Метод “накачка-зондирование”** — спектроскопическая техника для исследования когерентной оптической динамики путем возбуждения и детектирования сверхкороткими оптическими импульсами.

**MnF<sub>2</sub>** — антиферромагнетик, обладающий тетрагональной структурой.

**Константа обменного взаимодействия** — это физическая величина, характеризующая силу и знак обменного взаимодействия между частиц.

**Фемтосекундные импульсы** — ультракороткие световые импульсы, длительность которых составляет фемтосекунды ( $1 \text{ фс} = 10^{-15}$  секунды).

**Пространственные спиновые корреляции** — ожидаемые значения скалярных произведений операторов спина для различных узлов решетки.

**Рамановский тензор** — тензор, связывающий электрическое поле падающего света и электрическое поле, полученного путем комбинационного рассеяния.

**Диэлектрическая проницаемость** — это коэффициент пропорциональности, определяющий, как сильно электрическое поле в среде отличается от поля в вакууме из-за поляризации вещества.

В настоящее время ведется активное изучение спиновых волн, полученных при помощи фемтосекундных ( $1 \text{ фс} = 10^{-15}$  секунды) оптических импульсов [1]. В ферромагнетиках оптические методики позволяют возбуждать только магноны с малыми волновыми векторами и, соответственно, относительно низкими частотами. С другой стороны, в антиферромагнетиках присутствуют двухмагнонные моды, суммарный момент которой равен нулю, что позволяет возбуждать оптически магнитную динамику даже на границе зоны Бриллюэна [3]. Схема “накачка-зондирование” — один из способов для возбуждения и детектирования двухмагнонной моды антиферромагнетиках, позволяющий получить временные зависимости диэлектрической проницаемости, что было показано на примере кубических антиферромагнетиков, таких как RbMnF<sub>3</sub> и KNiF<sub>3</sub> [2]. Однако в тетрагональных материалах правила отбора значительно усложняются и требуют отдельного анализа.

Используя формализм псевдовекторов пространственных спиновых корреляций [4] было получено выражение для рамановского тензора в тетрагональных структурах, а также был получен отклик системы на возбуждение оптическим импульсом накачки. На основе чего была определена динамика диэлектрической проницаемости и эллиптичность зондирующего импульса.

В рамках данной работы был рассмотрен MnF<sub>2</sub>, получены функции Грина двухмагнонных мод и рассчитаны изменения диэлектрической проницаемости.

**Список литературы:**

1. Flebus B. et al. The 2024 magnonics roadmap //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2024. – Т. 36. – №. 36. – С. 363501. DOI: 10.1088/1361-648X/ad399c.
2. Fedianin A. E., Kalashnikova A. M., Mentink J. H. Selection rules for ultrafast laser excitation and detection of spin correlation dynamics in a cubic antiferromagnet //Physical Review B. – 2023. – Т. 107. – №. 14. – С. 144430. DOI: 10.1103/PhysRevB.107.144430
3. Zhao J. et al. Magnon squeezing in antiferromagnetic MnF<sub>2</sub> and FeF<sub>2</sub> //Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics. – 2006. – Т. 73. – №. 18. – С. 184434. DOI: 10.1103/PhysRevB.73.184434.
4. Fedianin A. E., Kalashnikova A. M., Mentink J. H. Spontaneous and impulsive stimulated Raman scattering from two-magnon modes in a cubic antiferromagnet //Physical Review B. – 2024. – Т. 110. – №. 17. – С. 174439. DOI: 10.1103/PhysRevB.110.174439.

## **Реализация инструмента анализа ВАХ полупроводниковых полевых катодов**

**А.С. Шигарова<sup>1)</sup>, М.С. Нечаев<sup>2), 3)</sup>, С.А. Соков<sup>2), 3)</sup>**

<sup>1)</sup>*СПбПУ им. Петра Великого*

<sup>2)</sup>*ФТИ им. А.Ф. Иоффе*

<sup>3)</sup>*СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. Ульянова (Ленина)*

**Полевая эмиссия** — испускание электронов из твёрдого или жидкого тела под действием сильного внешнего электрического поля (свыше  $10^7$  В/см). Основным механизмом испускания является туннельный эффект (просачивание электронов через потенциальный барьер).

**Полевой катод** — электрод, который испускает электроны при приложении поля высокой напряженности к поверхности эмиттера благодаря эффекту полевой эмиссии.

**Терагерцевая электроника** — раздел электроники, занимающийся генерацией, детектированием и применением электромагнитного излучения в терагерцевом диапазоне частот, расположенному между инфракрасным и микроволновым диапазонами.

**Микротехнология** — совокупность технологических процессов (литография, травление, напыление), предназначенных для создания структур и устройств с характерными размерами элементов в микрометровом диапазоне.

**Субмикронная электронно-лучевая литография** — метод прямого формирования структур на подложке с разрешением выше 1 мкм с помощью сфокусированного пучка электронов.

**Полевые эмиссионные структуры** — конструкции (острия, рёбра, массивы наноструктур), обеспечивающие фокусировку электрического поля у поверхности для испускания электронов в вакуум под воздействием внешнего поля.

**Полулогарифмические координаты** — система координат, в которой одна ось (обычно Y) имеет логарифмический масштаб, а другая (X) — линейный. Используются для построения линейного тренда, в частности, для определения параметров полевой эмиссии (коэффициента усиления поля и площади эмиссии).

**Диаграмма "наклон-отсечка"** — график, где по осям откладываются коэффициенты  $a$  и  $b$  линейного тренда (уравнения прямой).

**ВАХ** (вольт-амперная характеристика) — зависимость силы тока, протекающего через участок цепи или электронное устройство, от приложенного к нему напряжения.

В настоящие времена ведутся активные исследования полевой эмиссии и разработка полевых катодов, которые находят широкое применение в качестве источников свободных электронов.

Полевые катоды являются компонентами в таких устройствах, как рентгеновские трубы, приборы терагерцовой электроники, источники глубокого ультрафиолетового излучения и электронные микроскопы [1].

При производстве полевых катодов среди прочих материалов представляют особый интерес полупроводники, как один из наиболее перспективных материалов для создания структур с высокой эмиссионной способностью. Причина заключается в развитии методов изготовления полевых эмиттеров и применении производственных процессов микротехнологии. К ним относится, например, субмикронная электронно-лучевая литография. Эта технология даёт возможность создавать на полупроводниковых подложках многоострийные структуры, которые обеспечивают высокую эффективность эмиссии [2].

Широко известны две основные теории, описывающие полевую эмиссию: теория Фаулера-Нордгейма для металлов [3] и теория Моргулиса-Стрэттона для полупроводников [4]. Модель

Моргулиса-Стрэттона учитывает физические эффекты, характерные для полупроводников, такие как искривление энергетических зон у поверхности эмиттера под действием электрического поля и эффект насыщения тока, который возникает из-за ограниченной концентрации свободных носителей заряда в зоне проводимости и конечной скорости их движения.

Математическое описание этих процессов приводит к сложной зависимости плотности тока от поля, которая не является линейной в стандартных полулогарифмических координатах (т.н. координаты Фаулера-Нордгейма, FN). Эта проблема делает уравнение Моргулиса-Стрэттона неприменимым для точного анализа экспериментальных характеристик полупроводникового катода. Поэтому на практике для обработки экспериментальных ВАХ полупроводниковых катодов часто вынужденно используют теорию для металлов, несмотря на её ограниченную точность для таких материалов [5].

Нами разработана программа, которая применяет теорию для полупроводников и реализует построение теоретической зависимости плотности тока от поля, пригодной для анализа экспериментальных ВАХ в FN-координатах.

Программа численно решает дифференциальное уравнение Пуассона совместно с аналитическим решением уравнения Моргулиса-Стрэттона (система уравнений Баскина-Фурсея [6]). По пересечению решений двух уравнений строится ВАХ, которая переводится в FN-координаты и аппроксимируется прямой. По её коэффициентам вычисляются эффективные параметры полевого катода: коэффициент усиления поля и площадь эмиссии. Это параметры классической оценки качества полевого катода, позволяющие проводить сравнение различных катодов.

В работе представлен анализ экспериментальной ВАХ полупроводникового катода из кремния. Получены эффективные параметры и проведено их сравнение с теоретическими оценками на основе геометрии катода.

#### ***Список литературы:***

- [1] Patra A., More M.A., Late D.J., & Rout, C.S. (2021). Field emission applications of graphene-analogous two-dimensional materials: recent developments and future perspectives. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(34), 11059-11078. (<https://doi.org/10.1039/DTC02054D>)
- [2] Ghotbi S., & Mohammadi S. (2023, April). Low-power field emission arrays with sharp emitters. In 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). (DOI: 10.1109/IVEC56627.2023.10157710)
- [3] Fowler R.H., & Nordheim L. (1928). Electron emission in intense electric fields. *Proceedings of the royal society of London. Series A*, 119(781), 173-181. (DOI: 10.1098/rspa.1928.0091)
- [4] Stratton R. (1962). Theory of field emission from semiconductors. *Physical Review*, 125(1), 67. (DOI: 10.1103/PhysRev.125.67)
- [5] Huang, Y., Chen, Y., Huang, Z., Zeng, M., Gu, Z., Yang, W., ... & Deng, S. (2022). P-type Si-tips with integrated nanochannels for stable nonsaturated high current density field electron emission. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 69(7), 3908-3913. (DOI: 10.1109/TED.2022.3172046)
- [6] Baskin L.M., Lvov O.I., & Fursey G.N. (1971). General features of field emission from semiconductors. *physica status solidi (b)*, 47(1), 49-62. (DOI: 10.1002/pssb.2220470105)

# Гравитационная неустойчивость в протопланетных дисках

С.А. Дробчик,<sup>1,\*</sup> С.А. Хайбрахманов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*email: s.a.drobchik@gmail.com

**Гравитационная неустойчивость** – процесс в дисковых системах, при котором самогравитация вещества преобладает над стабилизирующими силами, приводя к фрагментации диска и формированию планет.

**Протопланетный диск** – вращающийся диск из газа и пыли вокруг молодой звезды, в котором происходит формирование планет.

**Параметр Тоомре** – безразмерный параметр, определяющий устойчивость диска к гравитационному коллапсу;  $Q < 1$  указывает на неустойчивость.

**Самогравитация** – гравитационное притяжение, обусловленное массой самого диска.

**Фрагментация диска** – процесс распада диска на отдельные сгустки под действием самогравитации.

**Аккреция** – процесс падения вещества на центральное тело под действием гравитации.

**Молекулярное облако** – область межзвездной среды с повышенной плотностью, где происходит звездообразование.

**Звездообразование** – процесс формирования звезд из молекулярных облаков.

**Планетообразование** – процесс формирования планет из протопланетного диска.

**Классы ППД** – классификация протопланетных дисков по наклону спектральной энергетической распределения в инфракрасном диапазоне, отражающая эволюционный статус системы: класс 0/I – ранние стадии с плотными оболочками и активной аккрецией, класс II – классические протопланетные диски с оптически толстым излучением, класс III – поздние стадии с внутренними просветами или сильно истощенные диски.

**ALMA** – Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, радиоинтерферометрический комплекс для наблюдений в миллиметровом диапазоне.

**VLA** – Very Large Array, радиоинтерферометрическая обсерватория в США.

**ППД** – протопланетный диск.

Гравитационная неустойчивость является ключевым механизмом формирования массивных планет-гигантов на периферии протопланетных дисков. Этот процесс возникает, когда гравитационное притяжение вещества диска преобладает над стабилизирующими силами газового давления и центробежными силами. Критическим параметром, определяющим устойчивость диска, служит параметр Тоомре  $Q$ .

В рамках доклада будет представлен статистический анализ гравитационной устойчивости протопланетных дисков на основе обширной выборки наблюдательных данных. Исследование охватывает 1046 объектов из различных регионов звездообразования. Основное внимание уделяется расчету параметра Тоомре и классификации дисков по степени устойчивости.

Будут рассмотрены следующие вопросы:

- Физические основы гравитационной неустойчивости и условия её возникновения
- Методы оценки параметра Тоомре по наблюдательным данным
- Статистическое распределение дисков по критерию устойчивости
- Зависимость между параметром  $Q$  и другими характеристиками систем
- Обсуждение систематических неопределенностей в определении массы пыли, газа.

Результаты показывают, что около 1.3% дисков в выборке формально являются гравитационно неустойчивыми ( $Q < 1$ ), а 2.3% находятся в состоянии нейтральной устойчивости ( $1 \leq Q \leq 2$ ). Выявлена зависимость между низкими значениями  $Q$  и высокими отношениями массы диска к массе звезды: медианное значение  $M_{\text{диск}}/M_*$  составляет  $5.6 \times 10^{-3}$  для устойчивых дисков ( $Q > 2$ ),  $8.6 \times 10^{-2}$  для нейтральных и 0.26 для неустойчивых систем, что согласуется с теоретическими предсказаниями ( $Q < 1$  требует  $M_{\text{диск}}/M_* \approx 0.1$ ).

Большинство неустойчивых дисков сосредоточено в областях активного звездообразования (Облако Ориона, NGC2024), тогда как устойчивые системы преобладают в Верхнем Скорпионе, Змее. В обсуждении рассмотрены систематические неопределённости, связанные с оптической толщиной вещества и вариациями соотношения газ/пыль на разных эволюционных стадиях. Учёт этих факторов позволяет предположить, что реальная распространённость гравитационно неустойчивых дисков может значительно превышать полученную оценку.

### *Список литературы*

- [1] “*Gravitational Instabilities in Circumstellar Disks*”. K. Kratter, G. Lodato. Annual Review of Astronomy and Astrophysics **54**, 271 (2016). DOI: 10.1146/annurev-astro-081915-023307.
- [2] “*On the gravitational stability of a disk of stars*”. A. Toomre. The Astrophysical Journal **139**, 1217 (1964). DOI: 10.1086/147861.
- [3] “*Mass constraints for 15 protoplanetary discs from HD 1–0*”. M. Kama et al. Astronomy and Astrophysics **634**, A88 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/201937124.
- [4] “*Demographics of Young Stars and their Protoplanetary Disks*”. C. F. Manara et al. arXiv e-prints, 2203.09930 (2023). DOI: 10.48550/arXiv.2203.09930.

# Влияние шероховатости стенок на протекание жидкости в каналах микрофлюидных МЭМС ячеек

\*Поплевка А.В.<sup>1)</sup>, Карасев П.А.<sup>2)</sup>, Копаничук И.В.<sup>3),4)</sup> Кондратьева А.С.<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup> Академический университет им. Ж.И. Алферова. Россия;

<sup>2)</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия;

<sup>3)</sup> Московский физико-технический институт. Россия;

<sup>4)</sup> Научно-исследовательский институт искусственного интеллекта, Москва, Россия:

\*email: poplevkaanna@mail.ru

**Шероховатость поверхности** – совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине.

**Топология поверхности** – геометрическое строение поверхности, включая её рельеф и шероховатость.

**МФУ** – микрофлюидное устройство, предназначенное для управления малыми объемами жидкости (от нанолитров до микролитров) в микроканалах.

**МЭМС** – микроэлектромеханические системы; устройства, объединяющие в себе взаимосвязанные механические и электрические компоненты микронных размеров.

**RMS** – среднеквадратичная шероховатость; определяет среднеквадратичное значение пиков и впадин поверхности.

Микрофлюидные устройства (МФУ) на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) представляют широкие возможности для исследований в различных областях науки. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность работы МФУ, является поведение жидкости внутри микроканалов [1]. В данной работе было исследовано влияние топологии поверхности стенок микроканала, а также среднеквадратичного отклонения (RMS) как количественной меры шероховатости, на скорость потока и взаимодействие жидкости со стенкой.

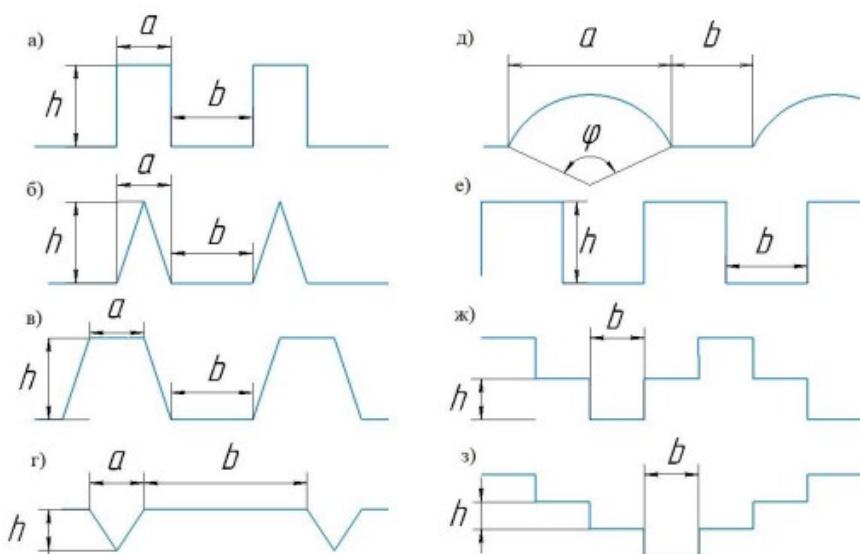


Рис. 1 – Виды геометрии стенок микрофлюидной МЭМС ячейки:  
а) ступенчатая, б) пилообразная, в) трапециевидная, г) V-образная,  
д) полуциркульная, е) квадратная, ж) и з) – лестничная; где  $a$  –  
ширина выступа,  $h$  – высота выступа,  $b$  – ширина впадины,  $\varphi$  –  
угол наклона

Предложена классификация типов шероховатости поверхности (рис. 1) [2-3] и показано, что выбор определенной топологии позволяет увеличить скорость потока и повлиять на взаимодействие жидкости со стенкой.

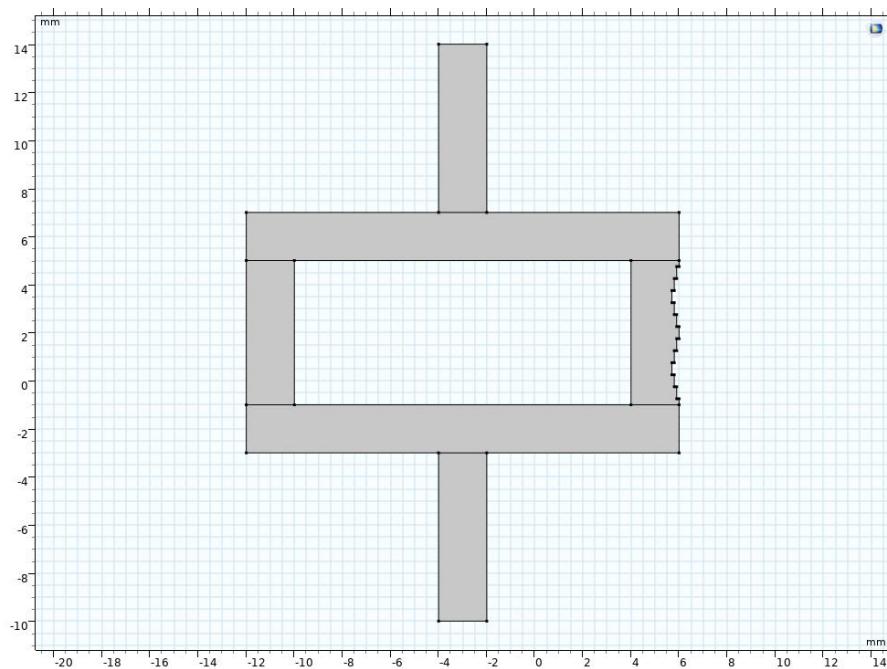


Рис. 2 – Модель микрофлюидной МЭМС ячейки с заданной лестничной шероховатостью стенки

**Список литературы:**

- [1] Pelusi, F., Filippi, D., Derzsi, L., Pierno, M., Sbragaglia, M.: Emulsions in microfluidic channels with asymmetric boundary conditions and directional surface roughness: stress and rheology. *Soft Matter* 20(26), 5203–5211 (2024). DOI: 10.1039/D4SM00041B.
- [2] Han, S., Yang, R., Li, C., Yang, L.: The wettability and numerical model of different silicon microstructural surfaces. *Applied Sciences* 9(3), 566 (2019). DOI: 10.3390/app9030566.
- [3] Gong, Y., Zhou, G.: Numerical simulation of structured surface roughness effects on flow boiling characteristics in microchannel. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification* 216, 110439 (2025). DOI: 10.1016/j.cep.2025.110439

# **Диагностическая классификация данных ЭКГ сверхвысокого разрешения при помощи нейронной сети**

Е.А. Денисова

*Институт аналитического приборостроения Российской академии наук,  
Санкт-Петербург, Россия  
email: tiranderel@yandex.ru*

**Ишемическая болезнь сердца** – состояние, вызванное недостатком кислорода и питательных веществ в сердечной мышце из-за снижения кровоснабжения.

**Электрокардиография** – метод исследования состояния сердца, основанный на регистрации электрических импульсов, возникающих при его сокращениях.

**Электрокардиосигнал** – электрический сигнал, который возникает в результате деятельности сердца, регистрируемый с помощью электрокардиографии.

**Нейронная сеть** – модель, состоящая из связанных друг с другом элементов, которые имитируют работу мозга и используются для обработки больших объемов информации.

**Паттерн** — набор данных или характеристик, которые нейронная сеть использует для распознавания и обработки информации.

**ИБС** – ишемическая болезнь сердца.

**ЭКГ С** – стандартная электрокардиография. Метод, позволяющий анализировать электрическую активность сердечной мышцы в частотном диапазоне от 0 до 100.

**ЭКГ СВР** – электрокардиография сверхвысокого разрешения. Метод, позволяющий анализировать электрическую активность сердечной мышцы в частотном диапазоне от 0 до 2000 Гц и амплитудном диапазоне от 100 мкВ до 10 мВ.

**ЭКС** – электрокардиосигнал.

**НС** – нейронная сеть.

**ОИМ** – острый инфаркт миокарда. Острая форма ишемической болезни сердца, при которой полностью или частично прекращается кровоснабжение миокарда (основной части массы сердца).

Одной из самых распространенных причин смерти людей во всем мире является ишемическая болезнь сердца (ИБС). Основным методом выявления маркеров данной патологии является стандартная электрокардиография (ЭКГ С), однако его диагностическая чувствительность составляет всего 56 % [1]. В связи с этим коллективом лаборатории «Радиоэлектронные и оптоэлектронные приборы ранней диагностики заболеваний человека» института аналитического приборостроения Российской академии наук разрабатывается новый метод электрокардиографии сверхвысокого разрешения (ЭКГ СВР). Целью исследований являются выявление и фиксация патологических изменений, связанных с развитием ИБС, не только в классических областях обработки электрокардиосигналов (ЭКС), но также и в областях, которые считаются помехами [2].

Апробация ЭКГ СВР осуществляется в ходе экспериментов по моделированию сердечной непроходимости у подопытных животных (крыс) в Институте экспериментальной медицины имени В. А. Алмазова [3]. Каждый эксперимент включает три этапа: «стабилизация», «ишемия» и «реперфузия». На первом этапе происходит регистрация ЭКС СВР крыс в состоянии «норма» — без патологий, на втором — в состоянии острого инфаркта миокарда (ОИМ), а на третьем — в состоянии обратного притока крови. Ключевой задачей в анализе ЭКС СВР является автоматическая классификация полу-

ченных данных. И для ее решения могут использоваться нейронные сети (НС), так как они обладают способностью анализировать большие объемы данных для выявления паттернов, связанных с ИБС. Кроме того, НС применяются для анализа последовательностей данных, что позволяет мониторить изменения состояния исследуемого организма с течением времени и обнаруживать признаки патологических процессов [4].

Маркером начала этапа «ишемия» является резкое падение средней мощности спектра высокочастотных микропотенциалов, регистрируемых с помощью метода ЭКГ СВР. Их возникновение связано с активностью ионных натриевых ( $\text{Na}^+$ ) и калиевых ( $\text{K}^+$ ) каналов, так как постоянное движение ионов через мембрану клеток сердечной мышцы создает локальные изменения электрического поля. Однако спектральный анализ ЭКС представляет собой непростую задачу из-за влияния негативных внешних факторов и значительного объема обрабатываемых данных. Поэтому перед обучением НС было решено воспользоваться аппроксимацией. Этот научный метод позволяет исследовать характеристики и свойства объектов, упрощая задачу до изучения более удобных объектов, для которых характеристики легко определяются или уже известны. В данном исследовании был применён алгоритм аппроксимации с использованием полинома [5].

Для классификации применяется 15-слойная НС на основе архитектуры AlexNet [4]. Данная модель обладает высокой мощностью для обработки и анализа сложных структур ЭКС, что способствует более точной диагностике. Набор данных, состоящий из 89 записей экспериментов, был разделен на тестовую и обучающую выборку в соотношении 80% на 20% соответственно. Итоговая точность классификации составила 0.914 для этапа «стабилизация», 0.871 для «ишемии» и 0.934 для «реперфузии». Таким образом, использование НС для автоматической классификации данных, полученных при экспериментах по моделированию ИБС, значительно увеличивает точность диагностики, что подтверждается высокими результатами классификации, достигнутыми в различных стадиях исследования. Применение алгоритма аппроксимации данных перед обучением НС упростило процесс анализа и повысило эффективность извлечения ключевых паттернов, связанных с заболеваниями сердца.

#### **Список литературы:**

- [1] Ultra-high resolution electrocardiography. Tasks. Problems. The prospects. Y.V. Gulyaev, K.V. Zaichenko, Biomedical radioelectronics. P. 5–15, 9 (2013). DOI:10.17586/2226-1494-2022-22-5-839-845.
- [2] Application of Modern Methods of Determining Characteristic Points of an Electrocardiogram for Ultra-high Resolution Electrocardiosignals. K.V. Zaichenko, A.A. Afanasenko, E.A. Denisova, D.O. Shevakov, E.P. Logachev Proceedings of the 2024 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). P. 1–4, 2024. DOI: 10.1109/ITNT60778.2024.10582322.
- [3] Cardiocycle Scaling for Ultra-high Resolution Electrocadiography. K. V. Zaichenko, A.A. Afanasenko, A.A. Kordyukova, D.O. Shevakov, E.A. Denisova. Proceedings of the 2023 Conference on Systems and Technologies of the Digital HealthCare (STDH). P. 138–141, 2024. DOI: 10.1109/STDH59314.2023.10490926.
- [4] Utilizing the convolutional neural network AlexNet to classify ultra-high resolution Electrocadiosignals. K. V. Zaichenko, A. S. Afanasenko, E. A. Denisova, A. A. Kordyukova, D. O. Shevyakov . St. Petersburg state polytechnical university journal Physics and Mathematics. P. 292-296, 3.2 (2024). DOI: 10.18721/JPM.173.259.
- [5] Исследование аппроксимирующего полинома для электрокардиосигналов сверхвысокого разрешения. Е.А. Денисова, А.А. Кордюкова. Тезисы докладов Третьей ежегодной всероссийской молодежной конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов. С. 96-100, 2024. DOI: 10.52565/9785911553333.

# **Нанесение металлических слоёв на подложки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

И.С. Тetenъкин<sup>1,2\*</sup>, П.Н. Бутенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*СПбГЭТУ «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*

\*email: tetenkinilya@yandex.ru

**Подложечный кристалл** — кристалл, используемый для выращивания и формирования полупроводниковых структур на его поверхности

**Метод Чохральского** — метод выращивания монокристаллов путём медленного вытягивания их из расплава с помощью заранее полученного затравочного кристалла

**BAX** — Вольт-амперная характеристика

**Омический контакт** — контакт между двумя веществами, электрофизические свойства которого с высокой точностью описываются законом Ома.

**Диодный контакт** — контакт между двумя веществами, имеющий низкое сопротивление в одном направлении и высокое в противоположном

**Вакуумное термическое напыление** — способ нанесения слоёв вещества, при котором наносимое вещество испаряется и осаждается на подложке при отсутствии атмосферы.

**Адгезия** — способность материала прилипать к поверхности другого материала.

**Работа выхода** — это работа, которую должен совершить электрон, чтобы выйти из металла.

Оксид галлия (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) является перспективным ультраширокозонным ( $\Delta E_g = 4,6\text{--}4,9$  эВ) полупроводником нового поколения. Данный материал имеет ряд выдающихся характеристик, включая очень высокое значение напряжения пробоя ( $E_c = 8$  МВ/см)<sup>[1]</sup>. Уникальным свойством Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является возможность получения объёмных кристаллов из собственного расплава методами Чохральского, Степанова, Бриджмана и др. Для исследования электрофизических свойств выращенных подложек и создания на их основе приборных структур, на их поверхность наносят металлические слои, которые могут существенно различаться структурой и свойствами.

В работе демонстрируется возможность напыления металлических контактов на подложки Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ориентации [100]. Описан процесс нанесения слоёв и контактов методом вакуумного термического напыления. Анализируется структура полученных металлических слоёв. Рассмотрены электрофизические свойства контактов и описывается дальнейшая возможность улучшения метода для получения контактов с высокой кристалличностью.

В качестве подложек использовались пластины (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выколотые из кристалла, выращенного в ФТИ А.Ф. Иоффе РАН методом Чохральского. Перед нанесением контактов поверхность пластин была очищена в ультразвуковой ванне последовательно с применением ацетона, спирта и дистиллированной воды. Напыление производилось с использованием усовершенствованного вакуумного универсального поста ВУП-2 через Mo маски. На разные группы образцов были нанесены Ti/Al и Ti/Ni контакты. Затем подложечные кристаллы с Ti/Ni контактами отжигались на воздухе при температурах 600 °C в течение 1 часа, а Ti/Al контакты при 250 °C в течение 30 минут, для улучшения адгезии контактов. Двухкомпонентная структура контактов предполагает использование титана в

качестве защиты Al и Ni от кислорода атмосферы. В итоге, на образцах были сформированы круглые контакты диаметром 1 мм и толщиной 6,5 мкм для Ti/Ni и 1,5 мкм для Ti/Al контактов, с расстоянием между контактами 3 мм. Рельеф поверхности и толщина контактов исследовались с помощью профилометра «Mahr Marsurf PS10». Поверхность контактов в обоих случаях повторяла морфологию поверхности подложки (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которая является плоскостью спайности и характеризуется присутствием протяженных прямоугольных террас. Контакты обоих типов показали высокую устойчивость к механическому воздействию, обладая хорошей адгезией.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) были измерены с помощью осциллографа С1-65А с использованием схемы «ВАХ»-метра. В такой схеме, фигура Лиссажу получаемая в XY режиме отражает ВАХ. Измеренные ВАХ продемонстрировали, что образцы с Ti/Al контактами проявляют омические характеристики, тогда как Ti/Ni контакт показывает диодное поведение. Данные результаты подтверждаются предыдущими исследованиями<sup>[3]</sup>, в которых отмечается, что использование алюминия приводит к образованию Ti-Al фазы с низкой работой выхода, что способствует генерации кислородных вакансий на границе раздела. В  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, проявляющий n-тип проводимости, эти вакансии действуют как доноры, усиливая поток электронов и обеспечивая омический контакт. Формирование диодного контакта с Ti/Ni связано с высокой работой выхода никеля, что приводит к образованию барьера Шоттки и, как следствие, диодному поведению контакта.

Кроме того, предложен подход, позволяющий повысить кристаллическое совершенство напыляемых контактов. В рабочей зоне установки ВУП-2 была сконструирована резистивная печка, позволяющая подогревать подложку во время нанесения слоя. Нагрев приведет к повышению подвижности атомов напыляемого металла на подложке, что увеличит размер зерна получаемых контактов. В итоге была получена серия из пяти образцов с контактами из Al на подложках (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, напыленными при температурах подложки в диапазоне 200...500°C. Толщины контактов были оценены на основе данных, получаемых при помощи BSE-детектора, используемого в методе EDS установки SEM Phenom ... с ускоряющим напряжением 15кВ. Для этого была определена массовая доля атомов в исследованной области контакта, после чего с помощью ПО Casino были смоделированы образцы с таким же массовым распределением атомов, взаимодействующие с электронным пучком SEM. Полученные таким образом толщины контактов составляли 50...200 нм. На данный момент производится анализ структурного совершенства контактов методом рентгеноструктурной дифракции. Предварительный анализ кривой  $\theta$ -2 $\theta$  показал, что увеличение температуры подложки при напылении Al- контактов сужает пики, соответствующие отражениям от кристаллических плоскостей {100} Al. Данный факт указывает на повышение кристаллического совершенства исследуемых контактов.

#### **Список литературы:**

1. K. Sasaki. Prospects for  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: now and into the future.:Appl. Phys. Express 17 090101 (2024) doi:10.35848/1882-0786/ad6b73
2. Z. Galazka. Growth of bulk  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals by the Czochralski Method.: J. Appl. Phys. 131, 031103 (2022) doi:10.1063/5.0076962
3. Chen, J.; Li, X.; Ma, H.; Huang, W.; Ji, Z.; Xia, C.; Lu, H.; Zhang, W. Investigation of the mechanism for Ohmic contact formation in Ti/Al/Ni/Au contacts to  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanobelt field-effect transistors.: ACS Appl. Mater. Interfaces 2019, 11, 32127–32134 doi: 10.1063/1.3661167

# **Откуда берётся ошибка в два порядка при квантовомеханическом туннелировании при измерениях в макромире**

Н.В. Ченцова, <sup>1)</sup> С.А. Соков <sup>2),3)</sup>, М.С. Нечаев <sup>2),3)</sup>

<sup>1)</sup> СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2)</sup> ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3)</sup> СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, Санкт-Петербург, Россия

\*chentsova.nv@edu.spbstu.ru

**Туннелирование Фаулера-Нордгейма** – квантово-механический процесс, при котором электроны проходят через потенциальный барьер за счет сильного электрического поля, даже если энергия электрона ниже высоты барьера

**Полевая (автоэлектронная эмиссия)** – эффект испускания электронов проводящими телами под действием сильного электрического поля без дополнительных затрат энергии.

**Полевой эмиттер** – элемент полевого катода, который непосредственно испускает электроны.

**Полевой катод** – источник свободных электронов, то есть электронов, оказавшихся в вакууме.

**Элементарный треугольный потенциальный барьер** – одномерная модель в квантовой механике, где потенциальная энергия с увеличением координаты сначала линейно возрастает, а после почти линейно уменьшается

**SN** – Барьер Шоттки-Нордгейма, учитывающий силы изображения

**Взрывная эмиссия** – эффект термического взрыва полевого катода вследствие возникновения на поверхности катода эктона

**Эктон** – единичный вакуумный разряд, локализованный в пространстве, и зарождающийся на поверхности плоского электрода.

Сейчас активно исследуются источники свободных электронов на основе наноматериалов. В подобных катодах за счёт большой кривизны поверхности возникают квантовые явления, например, туннелирование Фаулера-Нордгейма. При воздействии на эмиттер относительно высоких температур (1000 К), заметен рост эмиссионного тока: возникает термополевая эмиссия. Однако поведение полупроводниковых многоострийных катодов в условиях повышенных температур требует изучения законов эмиссии.

Основополагающей для полевой эмиссии стала теория Фаулера-Нордгейма, разработанная в 1928 году и представляющая барьер металл-вакуум как элементарный потенциальный барьер [1]. Данная модель использовалась широко и повсеместно, несмотря на некоторые математические неточности, грубое представление формы барьера и отсутствие учёта влияния температуры. Частично ошибки были исправлены самим Нордгеймом, предложившим использовать новую форму барьера – SN [2]. Однако теория всё ещё была далека от истины, до тех пор, пока в 1956 году Мёрфи и Гуд не представили свою теорию, также учитывающую температурный вклад [3]. Наиболее современной теорией является «расширенная» концепция, предложенная Р. Форбсом в 2019 году [4], которая, в отличие от предыдущих предложенных законов, учитывает ещё и атомарную поверхность эмиттера, но применима исключительно к холодной автоэлектронной эмиссии. Важно также учитывать границы применимости всех законов полевой и термополевой эмиссии, так как при малых полях эмиссия не возникает, а при очень высоких происходит разрушение эмиттера вследствие взрывной эмиссии [5]. Несмотря на

все улучшения, большинство экспериментаторов до сих пор используют начальную модель с элементарным барьером, что приводит к разнице между прямым экспериментом и обработанными данными в два порядка. Между тем, в случае использования более современных теорий при обработке вольтамперных характеристик эта разница значительно сокращается. При этом теории для термополевой эмиссии в полупроводниках слишком сложны в обработке, поэтому исследователи нуждаются в разработке более совершенных методик проведения эксперимента.

В нашей работе рассматривались вольтамперные характеристики, полученные из эксперимента. В ходе эксперимента эмиттер, помещённый в вакуум, подвергался воздействию сильного электрического поля и нагревался до желаемой температуры, регулируемой подаваемым на нагревательную систему напряжением. Регистрация температуры велась при помощи пирометра и подключённого к нему радиочастотного модуля в целях безопасности ввиду высоких напряжений на исследуемом образце. Полученные значения эмиссионного тока передавались на плату сбора данных и отображались в программе в среде LabVIEW.

#### ***Список литературы:***

1. “Electron emission in intense electric fields” by Ralph Howard Fowler and L. Nordheim, 1928 (doi: 10.1098/rspa.1928.0091)
2. “The effect of the image force on the emission and reflexion of electrons by metals” L. W. Nordhiem, 1928 (doi: 10.1098/rspa.1928.0222)
3. “Thermionic Emission, Field Emission, and the Transition Region”, by E. L. Murphy and R. H. Good, Jr. , 1956 (doi: 10.1103/PhysRev.102.1464)
4. “The Murphy–Good plot: a better method of analysing field emission data”, by Richard G. Forbes, 2019 (doi: 10.1098/rsos.190912)
5. “Electrical field admissible values for the classical field emitter regime in the study of large area emitter”, by E.O. Popov, A.G. Kolosko, and S.V. Filippov, 2019 (doi: 10.1063/1.5080439)

## **Моделирование вольт-амперных характеристик и оптимизация фотоэлектрических преобразователей с точечным тыльным контактом**

А.Д. Малевская<sup>1), 2)\*</sup>, М.А. Минтаиров<sup>1)</sup>, В.В. Евстропов<sup>1)</sup>, Д.А. Малевский<sup>1)</sup>, А.В. Малевская<sup>1)</sup>, Н.А. Калюжный<sup>1)</sup>, С.А. Минтаиров<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2)</sup> Академический университет им. Ж.И. Алферова РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*email: anmalevskaya@mail.ioffe.ru

**ФЭП** – фотоэлектрический преобразователь. Устройство, преобразующее энергию падающего излучения непосредственно в электрическую энергию.

**ВАХ** – вольт-амперная характеристика. Зависимость тока от приложенного напряжения.

**Точечный тыльный контакт** – конструкция, при которой тыльный электрод ФЭП выполнен в виде массива изолированных металлических точек малого диаметра.

**Ток насыщения** – максимальный обратный ток через р-п переход, вызванный тепловым дрейфом неосновных носителей заряда.

**Спектральная чувствительность** – величина характеризующая способность ФЭП генерировать электрический ток под действием света определенной длины волны. Определяется как зависимость выходного сигнала фотопреобразователя от длины волны падающего излучения, нормированная на единицу падающей оптической мощности.

**Ток короткого замыкания** – ток, протекающий через ФЭП в режиме короткого замыкания (при нулевом внешнем напряжении).

**Генераторная ВАХ** – ВАХ р-п перехода ФЭП.

**Эффективность преобразования** – основной показатель ФЭП, определяется как отношение максимальной выходной электрической мощности к мощности падающего излучения.

**Латеральное сопротивление** – сопротивление слоёв ФЭП, по которым происходит растекание тока к металлическим контактам в перпендикулярных плоскости р-п перехода направлениях

Разработка высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) сопряжена с необходимостью поиска компромисса между минимизацией оптических потерь и снижением электрических сопротивлений в контактной системе [1]. Перспективным направлением является использование точечных тыльных контактов, которые, в отличие от сплошного металлического слоя, позволяют значительной части света, прошедшего через активную область, отражаться от тыльной поверхности ФЭП и повторно поглощаться. Этот эффект приводит к увеличению фототока. Однако переход к точечной контактной структуре вносит изменения в процессы растекания тока, что приводит к увеличению последовательного сопротивления, связанного с растеканием тока к отдельным контактам (латеральное сопротивление). На данный момент отсутствует методика, позволяющая количественно оценить влияние геометрии контакта на итоговые вольт-амперные характеристики (ВАХ) устройства, и как следствие на выходные характеристики ФЭП, включая эффективность.

Целью данной работы является разработка методики, объединяющей расчет оптических и электрических параметров для поиска оптимальной конструкции тыльного точечного контакта (диаметр точек контакта и расстояние между ними). Методика основана на последовательном применении модифицированной трубковой модели [2-4].

Замена сплошного тыльного контакта на точечный изменяет ток насыщения и спектральную чувствительность. Расчёт изменения указанных параметров был выполнен на основе линейной интерполяции между экспериментальными данными, полученными для образцов с различной конструкцией точечного контакта.

На основе скорректированных параметров рассчитывается генераторная ВАХ, описывающая зависимость тока от напряжения на ФЭП без учета омических потерь. Далее эта характеристика используется для моделирования полной ВАХ ФЭП (с учётом резистивных потерь в контактной системе). Сначала учитывается влияние фронтальной контактной сетки с помощью трехпараметрической трубковой модели [2].

Далее к полученной ВАХ применяется новая двухпараметрическая модель, в которой рассчитывается латеральное сопротивление, обусловленное радиальным стеканием тока к точечным контактам. Это сопротивление является функцией расстояния от центра трубы до контакта, диаметра точек и удельного сопротивления нижнего контактного слоя. Результат расчёта позволяет получить полную ВАХ ФЭП.

Для оптимизации геометрии контакта предложенная методика реализуется итерационно. Проводится серия расчетов для массива значений диаметра точечного контакта. Для каждого варианта определяется максимальная выходная мощность и эффективность преобразования. Анализ полученной зависимости эффективности от диаметра и расстояния между контактами позволяет выявить оптимальное значение, при котором достигается баланс между оптическими и электрическими потерями: с одной стороны, уменьшение диаметра контакта и увеличение расстояния между ними снижает оптические потери на затенение, а с другой – увеличение диаметра и уменьшение расстояния снижает электрические потери на латеральном сопротивлении. Таким образом, представленная методика предоставляет инструмент для комплексного проектирования высокоеффективных ФЭП с точечным тыльным контактом.

#### ***Список литературы:***

- [1] Steiner M., Philipps S.P., Hermle M., Bett A.W. and Dimroth F, Prog. Photovolt: Res. Appl. (1) (2011) p.73–83. DOI: 10.1016/j.eegypro.2012.11.159
- [2] Полупроводниковые солнечные элементы с внутренней спектральной конверсией. М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный. Полупроводниковые солнечные элементы с внутренней спектральной конверсией. Физика и техника полупроводников 50, 987 (2016). DOI: 10.1134/S1063782616070162.
- [3] Растекание тока в солнечных элементах: трёхпараметрическая трубковая модель. А.Д. Малевская. В сб.: Углеродные и ван-дер-ваальсовы наноструктуры, 82 (2024).
- [4] Трёхпараметрическая трубковая модель растекания тока в солнечных элементах. А.Д. Малевская, М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский, Н.А. Калюжный. Физика и техника полупроводников 58, 573 (2024). DOI: 10.61011/FTP.2024.10.59384.6619A.

# Разработка программы для моделирования звёздного ядра

Пономарев Д. А.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» им. Ж. И. Алфёрова, Санкт-Петербург, Россия  
dany-rptm@yandex.ru

**Эволюция звезды**—совокупность процессов изменения химического состава и структуры звезды в течение её жизненного цикла.

**Термоядерная реакция** – процесс слияния нескольких атомных ядер в одно, сопровождающийся большим выбросом энергии.

**Сечение реакции** – статистический параметр, определяющий вероятность протекания конкретной термоядерной реакции и имеющий размерность м<sup>2</sup>.

**Эффективная температура** – температура абсолютно чёрного тела, имеющего такие же размеры и светимость, как и изучаемое тело.

**Изотропность** – однородность свойств изучаемого объекта по всем пространственным направлениям.

**Главная последовательность** – стадия эволюции звёзд, следующая за протозвездой, на которой единственным источником энергии звезды становятся термоядерные реакции превращения водорода в гелий.

**Протон-протонный цикл (p-p цикл)** – цикл термоядерных реакций, напрямую превращающий водород в гелий.

**CNO-цикл** – цикл термоядерных реакций, использующий изотопы углерода, азота и кислорода в качестве катализаторов для превращения водорода в гелий.

**Тройной альфа-процесс** – реакция одновременного слияния трёх альфа-частиц (ядер атомов гелия) в ядро атома углерода.

Звёзды являются главным источником энергии во вселенной, благодаря термоядерным реакциям, протекающим в их недрах. Изучение их эволюции является одним из важнейших направлений космологии, в котором кроме астрономических наблюдений часто необходимо моделировать процессы, происходящие в звёздной плазме с помощью симуляций. Именно поэтому, когда мы заинтересовались этой темой, мы поставили перед собой задачу разработать программу, которая позволяет предсказывать эволюцию плазмы звёздного ядра путём численного решения дифференциальных уравнений, описывающих изменения параметров плазмы с течением времени.

Разработанная нами программа написана на языке программирования Python и позволяет моделировать эволюцию массовых долей элементов, концентрации электронов и температуры ядра, а также предсказывать нейтринный спектр звезды в течение её жизни. Для сохранения разумной требовательности кода к вычислительным ресурсам нами не учитывались динамика плазмы, конвекция звёздного вещества, а также эффекты гравитационного и магнитного полей звезды.

Для определения сечений реакций слияния ядер программа использует аппроксимации из [1]. Кроме них также были учтены процессы распада нестабильных ядер, аннигиляции электронов и позитронов и излучения нейтрино.

Звезда описана упрощённой моделью, состоящей из однородного изотропного ядра, в котором сосредоточена подавляющая часть всей её массы, а также сферической поверхности звезды, излучающей энергию по модели абсолютного чёрного тела с фиксированной эффективной температурой.

Выбранная нами модель позволяет сохранить разумное потребление вычислительных ресурсов, при этом всё ещё хорошо подходит для описания звёзд главной последовательности.

Написанная нами программа была валидирована при помощи воспроизведения расчётов из [2].

Например, для однородной плазмы с начальными массовыми долями: H1 – 0,70, He4 – 0,28 и C12 – 0,02, а также с постоянными температурой 25000000 К и плотностью 100 г/см<sup>3</sup> произведённые нами расчёты полностью совпали с приведёнными в пособии (график 5.13).

*Список литературы:*

[1] C. Angulo, M. Arnould, M. Rayet, P. Descouvemont, D. Baye, C. Leclercq-Willain, A. Coc, S. Barhoumi, P. Auger, C. Rolfs, R. Kunz, J.W. Hammer, A. Mayer, T. Paradellis, S. Kossionides, C. Chronidou, K. Spyrou, S. Degl'Innocenti, G. Fiorentini, B. Ricci, S. Zavatarelli, C. Providencia, H. Wolters, J. Soares, C. Grama, J. Rahighi, A. Shotter, M. Lamehi Rachti. Nuclear Physics A, 1999, 656, 3–183. DOI: 10.1016/S0375-9474(99)00030-5.

[2] “Nuclear Physics of Stars” by Christian Iliadis, 2015

# **Исследование и оптимизация процесса подготовки катализатора для выращивания углеродных нанотрубок**

К.А. Балашова<sup>1)\*</sup>, Л.А. Филатов<sup>1)</sup>

1)Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

\*сеняа050711@gmail.com

**Углеродные нанотрубки (УНТ)** – одна из аллотропных наноформ углерода, частицы которой представляют собой свёрнутый в трубочку графен.

**Химическое осаждение из газовой фазы (ХОГФ)** – метод получения твердофазного продукта в результате химического взаимодействия газообразных реагентов.

**Механизм пар-жидкость-твердое** – механизм роста нитевидных кристаллов, основанный на непрерывном растворении газообразного источника в капле выбранного растворителя, размещенной на положке, и кристаллизацией твердой фазы с другой стороны капли вследствие пересыщения получаемого раствора-расплава.

**Атомно-слоевое осаждение** – метод осаждения тонких пленок, основанный на поочередном наслаживании продуктов взаимодействия газообразных реагентов с поверхностью подложки.

**Графен** – вещество, состоящее из единичной сетки или пакета атомных сеток графита (001).

**Пиролиз** – термическое разложение химических соединений.

**Катализатор для углеродных нанотрубок** – наночастицы металла, на которых в особой среде могут формироваться углеродные трубы.

**Конформные покрытия** – однородные по толщине покрытия на рассматриваемом участке поверхности.

**Диспергирование** – это процесс тонкого измельчения вещества.

**Металлы подгруппы железа** – так объединяют соседние в периодической системе элементы: железо, кобальт, никель; близкие атомная масса и электронное строение делают металлы тождественными по большинству свойств.

В нанотехнологии одним из приоритетных направлений исследований является разработка методов создания наноматериалов, состоящих из углерода. Особый научный и практический интерес представляют углеродные нанотрубки (УНТ). УНТ благодаря своим уникальным механическими, электрическим и термическим свойствам находят широкое применение в различных областях, включая композитные материалы, вакуумную электронику, энергетику и сенсорику [1].

Для получения УНТ можно использовать метод химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ). Активация этого процесса может быть термической или плазменной. Использование плазмы позволяет снизить температуру процесса. Для получения УНТ методом ХОГФ необходимо использовать наночастицы катализатора. Чаще всего используют островковые пленки металла из подгруппы железа. При выборе метода их со-

здания необходимо учитывать, что размер и форма частиц непосредственно влияют на диаметр и высоту получаемых трубок. Для создания островковой пленки катализатора используют литографические и нелитографические методы. К последним относится поверхностное диспергирование исходно сплошной тонкой пленки металла. Диспергирование происходит за счет поверхностных сил при температуре меньшей, чем температура плавления. Для никеля эта температура около 300 °С [2].

Рост УНТ лучше всего описывается с точки зрения ПЖТ механизма. В ходе процесса в реакционную камеру напускается углеродсодержащий газ, например ацетилен. На лицевой поверхности частицы металла происходит каталитический пиролиз ацетилена, вследствие которого выделяется углерод. Полученный углерод растворяется в частице катализатора. При формировании градиента температуры в частице металла и вследствие различия в растворимости углерода при разных температурах на ее тыльной стороне происходит выделение углерода в форме УНТ. При этом частица она приподнимается от подложки растущей нанотрубкой [3].

В данной работе УНТ получали методом ХОГФ с плазменной активацией. Для получения катализатора был выбран метод атомно-слоевого осаждения, так как он позволяет получать конформные покрытия с прецизионной точностью по толщине. В качестве катализатора был использован оксид никеля, который в ходе экспериментов восстанавливался до никеля путем термообработки в аммиачной атмосфере. Температура осаждения УНТ методом ХОГФ составила 680 °С, рабочее давление – 300 Па, расход ацетилена – 45 мл/мин., расход аммиака – 135 мл/мин. Было исследовано влияние толщины катализатора на рост УНТ. Его толщина повлияла на диаметр и высоту получаемых УНТ. Например, при толщине исходного оксида никеля 1,8 нм высота трубок составила 85 нм, а при толщине 3,5 нм – 160 нм. Помимо влияния на характеристики получаемых УНТ толщины катализатора исследована роль его термохимической обработки. В работе показано, что использование предварительной обработки может привести к значительным изменениям длины УНТ. Например, при использовании дополнительной низкотемпературной обработки в среде ацетилена исходного оксида никеля толщиной 1,8 нм длина нанотрубок может быть увеличена с 85 нм до 4 мкм, а для толщины 2,4 нм – с 140 нм до 10 мкм.

#### ***Список литературы:***

1. Industrial Applications of Carbon Nanotubes. Huisheng Peng, Qingwen Li, Tao Chen. (ed.). Micro and Nano Technologies (2016)
2. Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition. Chhowalla M. [et al.]. Journal of applied physics (2001). DOI:10.1063/1.1410322.
3. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. Гиваргизов Е.И. - 1 изд. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", 1977. – С. 304

## **Неаффинные деформации в аморфных материалах**

**Д.В. Бабин,<sup>1), 2)\*</sup> Д.А. Конюх, И.О. Райков, Я.М. Бельтюков<sup>2)</sup>**

**<sup>1)</sup> СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия**

**<sup>2)</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Город, Россия**

**\*email:** babin.2002@bk.ru

**Аморфный материал** – это твердое вещество без кристаллической структуры, в котором атомы и молекулы расположены неупорядоченно.

**Неаффинные деформации** – это тип деформации, при котором отдельные частицы или компоненты материала движутся таким образом, который не совместим с простым, равномерным преобразованием всего тела.

**Полимер** – это высокомолекулярное соединение, состоящее из множества повторяющихся звеньев (мономеров), соединенных между собой химическими связями.

**Флуктуация** – это случайное отклонение случайной величины от ее среднего значения.

**Бозонный пик** – это избыточная по сравнению с дебаевской плотность колебательных состояний.

**Метастабильное положение равновесия** – это состояние квазистабильного равновесия физической системы, в котором она может находиться длительное время, но которое не является полностью устойчивым.

**Корреляция** – это статистическая взаимосвязь между двумя или более переменными, показывающая, насколько изменения в одной из них сопровождаются изменениями в другой.

**Матрица силовых констант** – это матрица, определяемая как вторая производная потенциальной энергии по смещениям соответствующих атомов.

**Масштаб неоднородности** – это масштаб, на котором еще сохраняется упорядоченное расположение атомов.

**Молекулярно-динамическое моделирование** – это метод компьютерного моделирования, который изучает движение атомов и молекул, решая их уравнения движения.

Изучение аморфных тел в настоящее время является предметом интенсивных исследований, в связи с распространением различных устройств на их основе. Распространено применение аморфных материалов в полупроводниковых приборах: солнечные батареи, тонкопленочные транзисторы, и органические светодиоды. Другим примером аморфной структуры являются полимеры, которые, например, используются в медицине при производстве лекарств. Также изучение аморфных систем представляет большой теоретический интерес, поскольку в таких системах беспорядок не может рассматриваться как малое возмущение. При этом наблюдаются существенные флуктуации на масштабе нескольких нанометров, в частности, упругих свойств.

Микроскопическая структура играет важную роль при описании свойств аморфных тел [1]. Так в аморфных материалах наблюдается избыточная плотность колебательных состояний — бозонный пик, отличные от кристаллов законы теплопроводности от температуры и плотности колебательных состояний от частоты. Наглядным проявлением неупорядоченной структуры аморфных тел являются

неаффинные деформации, представляющие собой дополнительное смещение атомов, возникающее в результате нескомпенсированных из-за беспорядка сил, и играющие важную роль в определении упругих свойств [2]. Теоретическое изучение аморфных тел осложнено тем, что они находятся в метастабильном положении равновесия, обладающее существенной корреляцией констант связей, описывающих взаимодействие.

Для описания аморфных тел на микроскопическом уровне нами была применена теория коррелированных случайных матриц. Данный метод показал свою эффективность при описании критерия Иоффе-Регеля и других наиболее общих колебательных свойств аморфных твердых тел [3]. Подход заключается в рассмотрении взаимодействия ближайших соседей вблизи устойчивого положения равновесия, где система может описываться квадратичной формой по смещениям частиц. В этом приближении мы описали линейный отклик системы на внешнюю силу с помощью матрицы силовых констант  $\Phi$ , которая, в случае сильного беспорядка, присущего аморфным телам, наилучшим образом описывается коррелированным ансамблем Вишарта  $\Phi = AA^T$ , где  $A$  — вещественная случайная матрица. Коррелированность беспорядка приводит к тому, что  $\langle A_{ik}A_{jl} \rangle \neq 0$ . Мы показали, что характерный масштаб корреляций атомов совпадает с масштабом неоднородности аморфной структуры. Результаты исследований мы проверили при помощи молекулярно-динамического моделирования, где показали совпадение с теоретическими предсказаниями [4].

**Список литературы:**

1. В.К. Малиновский, ФТТ **41** 805 (1999)
2. T.C. Hufnagel, C.A. Schuh, M.L. Falk. Acta Materialia **109** 375 (2016) (doi: 10.1016/j.actamat.2016.01.049)
3. Y.M. Beltukov, V.I. Kozub, D.A. Parshin, Phys. Rev. B. **87**, 134203 (2013) (doi: 10.1103/PhysRevB.87.134203)
4. D. A. Conyuh, D. V. Babin, I. O. Raikov and Y. M. Beltukov, arXiv:2505.04554, (2025) (doi: 10.48550/arXiv.2505.04554)

# Астрофотография в городе

Наталья Ионова<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*email: nionova2005@gmail.com

**Астрофотография** – съёмка объектов глубокого космоса (галактик, туманностей, шаровых скоплений), планет, Солнца, Луны, комет, с помощью камеры (матрицы), телескопа (объектива) и фильтров.

**Deep Sky Objects (DSO)** – объекты глубокого космоса.

**Монтировка** – устройство для крепления телескопа (объектива), позволяющее находиться на объекты и следить за ними (компенсирует вращение Земли).

**Светофильтр** – оптическое устройство (стекло), устанавливающееся перед объективом фотоаппарата, телескопа для подавления или выделения части спектра электромагнитного излучения (света).

**Экспозиция** – время съёмки одного кадра или всех вместе.

**Относительное отверстие  $f$**  – светосила телескопа или объектива.

**ISO** – светочувствительность матрицы.

**Ligth** – световой кадр – снимок самого изображения.

**Калибровочные кадры** – вспомогательные кадры, которые снимаются дополнительно перед или после основной съемки, предназначены для исправления тех или иных дефектов изображения связанных с оборудованием.

**Dark** – кадр теплового шума матрицы, снятый с теми же параметрами как и light, но с закрытой крышкой телескопа (объектива).

**Bias** – «шум считывания» – кадр шума матрицы, снимается на минимальной экспозиции при закрытом объективе.

**Flat** – кадр плоского поля, который компенсирует неравномерность чувствительности матрицы (устраняет виньетирование, различие в чувствительности отдельных пикселей, соринки, пыль на матрице и т.п.).

Многие из нас видели в интернете красивые изображения космических объектов. Чаще всего их получают с помощью орбитальных телескопов, однако снимать можно и с поверхности Земли.

Используя специальное оборудование – телескоп или объектив с матрицей, – можно запечатлеть объекты дальнего космоса (DSO). К сожалению, они очень тусклые, и без применения специальных фильтров получить чёткое и красивое изображение чаще всего не удается.

Основная проблема астрофотографии – городская засвета. Фонари, которые используются для освещения улиц, загрязняют небо. Поэтому, например, мы не можем увидеть Млечный Путь в городе. Для выделения определенной части спектра используют астрономические светофильтры, позволяющие увеличить контраст между самим объектом и небом. Однако, некоторые яркие галактики и туманности всё-таки можно снять без них, даже в городе.

После съёмки серии кадров мы их объединяем в специальных программах: Siril, Deep Sky Staker, что позволяет накопить сигнал и снизить шум. Затем следует постобработка – чаще всего в графических редакторах, таких как Photoshop или Gimp, чтобы в конечном счёте получить хорошее изображение внегалактических объектов.

Астрофотография не преследует прямых научных целей, но даёт возможность увидеть то, что недоступно человеческому глазу. Однако, стоит сказать, что именно любители чаще всего находят тусклые кометы, которые приближаются к Земле, потому что повернуть маленький телескоп куда проще, чем большой, настроенный специально под определённую область неба.

### *Список литературы*

- [1] <https://dsastro.ru/2019/02/04/dark-bias-flat/> — информация о типах кадров.
- [2] <https://siril.readthedocs.io/ru/stable/> — документация Siril.
- [3] *Deep Sky Stacker Tutorial & Troubleshooting Guide* ([nightskypix.com](http://nightskypix.com)) — инструкция по обработки астрофотографий в DSS.

Вы можете оставить  
анонимный отзыв,  
предложения по улучшению,  
свои впечатления  
от докладов и организации

