

**Расчет вторичной плазмы**

Плотность газа $\rho_{газ}$ 0.17846	Вероятность появления ионов вторичной плазмы $\alpha_i$ 0.6	Вероятность рекомбинации вторичной плазмы $\alpha_p$ 0.6	Вероятность рекомбинации электронов первичной плазмы $\alpha_{пк}$ 0.4
Коэффициент инжекции электронов из катода $k$ 1	Коэффициент пропорциональности скорости выбиваемых электронов из катода от $\beta$ 1	Начальная концентрация электронов первичной плазмы $n_0$ 1000000000000000000	Начальная скорость ионов первичной плазмы $V_0$ 10000
Начальный потенциал первичной плазмы $\phi_{пк}$ 200	Напряжение на катоде $\phi_{кат}$ 100	Напряжение на аноде $\phi_{ан}$ 10	Начальное ускоряющее напряжение $U_0$ 30000
Радиус выходного отверстия $R_{от}$ 0.0005	Длина выходного отверстия $L_{от}$ 0.001	Расстояние от центра (оси) потока первичной плазмы до стенки цилиндра с газом $R_{пр}$ 0.005	Расстояние между анодом и катодом $R_{пр}$ 0.01
Длительность фронта импульса $\tau_0$ 0.00001	Длительность потока $\tau$ 0.00001	Момент времени (итерации) $t$ 0	<b>Расчитать</b>

**Рисунок 2 – Графический интерфейс пользователя**

Благодаря разработке такой модели существует возможность без проведения большого объема экспериментальных работ оценить влияние изменения входных условий на параметры формируемой эмитирующей плазмы и формируемого пучка электронов в подобных конструкциях, а также проанализировать полученные результаты.

**Заключение.** Данный подход к разработке программного обеспечения показал высокую эффективность и удобство. Он может применяться как для крупных разработок ведущихся большими группами ученых, так и для точечных проектов, разрабатываемых командами из 2–3 человек.

Работы по дополнению разрабатываемой модели электронно-оптической системы источника электронов с плазменным эмиттером будут продолжены, в перспективе планируется дополнить разработанную модель возможностью получения выходных зависимостей формируемых электронных пучков при изменении элементов конструкции источника электронов с плазменным эмиттером.

1. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко [и др.], под общ. ред. В.Т. Барченко // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
2. Plasma emission systems for electron- and ion-beam technologies / D. Antonovich, V. Gruzdev, V. Zalesski, I. Pobol & P. Soldatenko // High Temperature Material Processes 21(2):143–159 (2017)
3. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом / Е.М. Окс. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
4. Плазменный источник заряженных частиц для формирования совмещенных ионно-электронных пучков / Д. А. Антонович [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. науки. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 285–291.

## **СИСТЕМА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ ДЛЯ ПРИЕМА ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Ю.И. Бохан  
Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова*

*Витебский филиал УО «Белорусская государственная академия связи»*  
В настоящее время для детектирования слабых потоков электромагнитного излучения используются элементы, принцип работы которых основыва-

ется на возбуждении квантовых состояний в структурных элементах материалов. В тоже время, для детектирования электромагнитных полей сверхвысоко-частотного диапазона используются макроскопические свойства материалов, которые изменяют свои параметры под воздействием внешнего поля. Для детектирования слабых полей требуется система усиления сигнала, которая, часто, представляет собой сложную систему полупроводниковых элементов с большим уровнем шума. В этой связи особый интерес представляет регулярная структура на основе углеродных нанотрубок, позволяющая за счет резонансного переноса заряда резко усилить сигнал без искажения формы.

**Материал и методы.** Фактологическую основу составили материалы ранее проведенных работ по исследованию материалов с регулярной структурой резонансно туннельных диодов для детектирования и распознавания слабых электромагнитных потоков. Основными методами исследований являлись сравнительно-аналитический анализ и моделирование.

**Результаты и их обсуждение.** Применение углеродных нанотрубок для целей генерации/приема электромагнитного излучения терагерцевого диапазона привлекает все большее внимание ввиду высокой степени миниатюризации и возможности создания высокочувствительных приемных устройств [1–3]. Это связано, в первую очередь, возможностью приема слабых сигналов с высоким отношением сигнал/шум из-за отсутствия паразитных помех в виду избирательности приемного устройства.

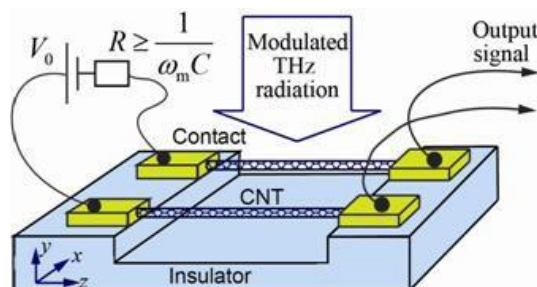


Рисунок 1 – Модель приемной антенны на двух нанотрубках [2]

В тоже время резонансное туннелирование и эффект отрицательной дифференциальной проводимости в наноструктурах, которые вызваны чисто квантовыми явлениями пространственного квантования, приводящего к возникновению резонансных энергетических уровней, может служить механизмом детектирования слабых полей [4,5]. Генераторы на резонансно-туннельных диодах (РТД) занимают промежуточное положение между «классическими» генераторами и лазерами. В их основе лежит «квазирезонансное» взаимодействие электронов с электрическим полем. Имеется в виду, что излучательные переходы идут между состояниями вблизи одного резонансного уровня (а не между двумя уровнями, как в лазере). Следует отметить, что если частота поля  $\omega$  мала по сравнению с шириной резонансного уровня  $\gamma$ , то применимо «квазиклассическое» описание.

В тоже время немалый интерес представляет и обратный процесс, квазирезонансное поглощение внешнего поля в такой структуре. Такое поглощение приводит к изменению условий прохождения барьера и, соответственно, изменение величины тока и электрического поля [5].

Как было показано ранее [6,7], в потенциальном барьере, имеющем цилиндрическую симметрию, возникает система не эквидистантных состояний. Причём энергия состояний зависит от двух квантовых чисел, которые определяются как решения на функции Бесселя:

$$E_{km} = \frac{\hbar^2 \lambda_{km}^2}{2Ma^2}, \quad \psi(\rho, \varphi) = CJ_m \left( \sqrt{\frac{2ME}{\hbar^2}} \rho \right) e^{im\varphi}. \quad (1)$$

Поэтому, включение магнитного поля величиной  $B$  позволяет снять вырождение по «магнитному» квантовому числу и расширить количество резонансных состояний в туннельном барьере. Такое расширение приводит к появлению дополнительных пиков на зависимости амплитуды переменного тока от частоты внешнего поля [5].

Появление дополнительных пиков протекающего тока служит указанием на возбуждение туннельной системы внешним полем. Поэтому, изменяя величину магнитного поля можно осуществлять резонансную настройку системы нанотрубок (рисунок) на определённую частоту внешнего поля. Оценки показывают, что для величин магнитного поля порядка нескольких тысяч гаусс, возможно получить резонансное усиление сигнала на частоте 15–37 ТГц.

В реальной ситуации появляется потребность учета влияния всегда присутствующего взаимодействия между электронами на процессы квантовой интерференции и резонансного туннелирования. Это тем более необходимо, потому что такая система нанотрубок обладает высокой чувствительностью резонансного туннелирования к величине магнитного поля. Последнее следует из того, что сдвиг резонансного уровня за счет взаимодействия на величину малую по сравнению с энергией электрона  $\epsilon_R$ , но сопоставимую с шириной резонансного уровня  $\delta$ , резко изменяет резонансный ток. Такой сдвиг может быть обусловлен приложением внешнего магнитного поля, причём низкой частоты.

**Заключение.** Создание регулярной решетки из РТД позволит разработать приборы, отображающие падающие электромагнитные волны с частотой до сотен гигагерц. Такие решётки могут найти широкое применение не только в приёмных устройствах, но и для чувствительных сенсоров медицинского назначения.

1. Дьячков, П.Н. Электронные свойства и применение нанотрубок / П.Н. Дьячков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2011. – 488 с.
2. Семенов, В.Л. Система из двух углеродных нанотрубок как антенна и детектор терагерцевого излучения / В.Л. Семенов, В.Г. Лейман, А.В. Арсенин, Ю.В. Стебунов, В.И. Рыжий // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – №6. – С. 2–15.
3. Запорожкова, И.В. Сенсорные свойства углеродных нанотрубок / И.В. Запорожкова, Н.П. Борозина, Ю.Н. Пархоменко, Л.В. Кожитов // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2017. – Т. 20. – №1. – С.5–21. DOI: 10.17073/1609-3577-2017-1-5-21.

4. Елесин, В.Ф. Высокочастотный нелинейный отклик двухъямных наноструктур / В.Ф. Елесин, И.Ю. Катеев // ФТП. – 2006. – Т. 39. – Вып. 9. – С. 1106–1110.
5. Razavy, M. Quantum Theory of Tunneling / M. Razavy. – 2nd Edition. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014. – 792 p.
6. Bokhan, Yu.I. Quantum states in a cylindrical quantum hole and a barrier / Yu.I. Bokhan // Actual problems of solid-state physics: proceedings of the IX International Scientific Conference, Minsk, 22–26 November, 2021: in two books / Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus; editorial board: V.M. Fedosyuk (chairman) [et al.]. – Minsk, 2021. Book of abstract. – P. 226–227.
7. Бокхан, Ю.И. Регулярная система резонансно туннельных диодов для анализа сигналов / Ю.И. Бокхан // Современные средства связи: матер. XXVII междунар. конф., Минск, 27–28 октября 2022 г. / Белорус. гос. акад. связи; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск: Белорусская государственная академия связи, 2022. – С. 158–160.

## О $\sigma$ -РАЗРЕШИМЫХ ФИТТИНГОВЫХ ФУНКТОРАХ, УДОВЛЕТВОРЯЮЩИХ АРГУМЕНТУ ФРАТТИНИ

*Е.А. Витько*  
*Витебск, ВГУ имени П. М. Машерова*

Понятие подгруппового функтора как функции, согласованной с изоморфизмами групп, которая выделяет в группах некоторые системы подгрупп, восходит к известным работам А.Г. Куроша [1] и Амицура [2; 3] по теории радикала. В связи с выходом основополагающих работ Бэра [4] и Б.И. Плоткина [5], подгрупповые функторы стали изучать как самостоятельные объекты. Основная цель настоящей работы – описание нового свойства фиттинговых функторов, заданных на множестве  $\sigma$ -разрешимых групп.

**Материал и методы.** В работе используются терминология и методы доказательства абстрактной теории групп, в частности, методы теории классов Фиттинга конечных групп и фиттинговых функторов.

### **Результаты и их обсуждение.**

В определениях и обозначениях мы следуем [6; 7].

Все рассматриваемые в работе группы конечны.

Обозначим  $\pi(n)$  – множество всех простых делителей натурального числа  $n$ ,  $\pi(G) = \pi(|G|)$  – множество всех простых делителей порядка группы  $G$ .

Пусть  $\sigma = \{\sigma_i \mid i \in I\}$  – разбиение множества всех простых чисел  $\mathbf{P}$  такое, что  $\mathbf{P} = \cup_{i \in I} \sigma_i$  и  $\sigma_i \cap \sigma_j = \emptyset$  для любых  $i \neq j$ . Пусть  $\sigma(n) = \{\sigma_i \mid \sigma_i \cap \pi(n) \neq \emptyset\}$ ,  $\sigma(G) = \sigma(|G|)$ . Группу  $G$  называют [6]  $\sigma$ -примарной, если  $G$  – единичная группа или  $|\sigma(G)| = 1$ .

Группу  $G$  называют [6]  $\sigma$ -разрешимой, если каждый главный фактор группы  $G$  является  $\sigma$ -примарным. Класс всех  $\sigma$ -разрешимых групп обозначают  $\mathfrak{S}_\sigma$ .

Напомним, что классом Фиттинга называется класс групп  $\mathfrak{X}$ , замкнутый относительно взятия нормальных подгрупп и произведений нормальных  $\mathfrak{X}$ -подгрупп.

Пусть  $\mathfrak{X}$  – непустой класс Фиттинга. Отображение  $f$ , которое каждой группе  $G \in \mathfrak{X}$  ставит в соответствие некоторое непустое множество ее под-