

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра ядерной физики

**ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО
ПУЧКА В УСЛОВИЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМОН-
ПОЛЯРИТОНА В ГРАФЕНЕ**

Дипломная работа

Студентка VI курса
Кожемякина И.Д.

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук, доцент
Батраков К.Г.

Допущена к защите
«10» января 2022г.
Зав. кафедрой ядерной физики
доктор физ.-мат. наук, доцент,
А.И. Тимошенко Тимошенко А.И.

МИНСК, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1 ГРАФЕН, ЕГО СВОЙСТВА, МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ЛЕГИРОВАНИЯ	9
1.1 Графен	9
1.1.1 Что такое графен	9
1.1.2 Атомная решетка и структура графена	10
1.1.3 Электронные свойства.....	11
1.1.4 Механические свойства.....	13
1.1.5 Оптические свойства	14
1.1.6 Химические свойства	14
1.2 Способы получения графена.....	15
1.2.1 Механический метод	15
1.2.2 Химический метод	16
1.2.3 Эпитаксиальный метод.....	17
1.2.4. Газофазное осаждение графена	18
1.3 Общие сведения про плазмон-поляритон.....	19
1.4 Терагерцовое излучение.....	19
1.5 Легирование графена.....	21
1.5.1 Замещающее легирование.....	22
1.5.2 Химическая модификация	23
1.5.3 Электростатическое допирование.....	24
ГЛАВА 2 НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ НАД ОДНОРОДНЫМ ГРАФЕНОМ.....	25
2.1 Постановка задачи	25
2.2 Дисперсионное уравнение для свободного электронного пучка.....	27
2.3 Вывод уравнения генерации	30
2.4 Получение инкремента неустойчивости.....	32
ГЛАВА 3 НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ НАД ПРОСТРАНСТВЕННО МОДУЛИРОВАННЫМ ГРАФЕНОМ	34
3.1 Постановка задачи	34
3.2 Вывод уравнения генерации	35

3.3 Предельный переход в случае отсутствия дифракции.....	40
3.4 Анализ зависимости инкрементов неустойчивости от физических параметров системы.....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	48

РЕФЕРАТ

Автор: Кожемякина Ирина Дмитриевна.

Тема: «Излучательная неустойчивость электронного пучка в условиях возбуждения плазмон-поляритона в графене».

Дипломная работа: 49 с., 9 рис., 0 табл., 24 источников, 0 прил.

Ключевые слова: ГРАФЕН, ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ, ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОН, ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ, ИНКРЕМЕНТ НЕУСТОЙЧИВОСТИ.

Объект исследования: пучок электронов, распространяющийся над слоем графена.

Цель исследования: теоретическое изучение излучательной неустойчивости электронного пучка в терагерцовой области спектра, приводящей к росту излучения, определение инкрементов неустойчивости, описывающих скорость развития неустойчивости.

Методы исследования: линеаризация самосогласованных уравнений Максвелла и уравнений движения электронов, вывод дисперсионного уравнения, соответствующего равенству нулю детерминанта полученной линейной системы и связывающего частоту излучения с волновым вектором, определение инкрементов неустойчивости путем решения полученного дисперсионного уравнения, анализ зависимости полученных инкрементов неустойчивости от физических параметров системы.

Полученные результаты и их новизна: результаты по неустойчивости электронного пучка в пространственно модулированном графене являются новыми.

Область возможного практического применения: результаты могут быть использованы в области фотоники и нано-фотоники при разработке перестраиваемых терагерцевых источников.

РЭФЕРАТ

Аўтар: Кажамякіна Ірына Дзмітрыеўна.

Тэма: "Радыяцыйная нестабільнасць электроннага пучка ва ўмовах плазмон-полярытоннага ўзбуджэння ў графене".

Дыпломная праца: 49 с., 9 мал., 0 табл., 24 крыніц, 0 прыкл.

Ключавыя словы: ГРАФЕН, ВЫПРАМЕНЬВАЛЬНАЯ НЯЎСТОЙЛІВАСЦЬ, ПЛАЗМОН-ПОЛЯРЫТОН, ДЫСПЕРСІЙНАЕ РАЎНАННЕ, ІНКРЭМЕНТ НЯЎСТОЙЛІВАСЦІ.

Аб'ект даследавання: пучок электронаў, які распаўсюджваецца над пластом графена.

Цэль даследавання: тэарэтычнае вывучэнне выпраменьвальнай няўстойлівасці электроннага пучка ў терагерцовой вобласці спектру, якая прыводзіць да росту выпраменьвання, вызначэнне інкрэментаў няўстойлівасці, якія апісваюць хуткасць развіцця няўстойлівасці.

Метады даследавання: лінеарызацыя самасагласаваных раўнанняў Максвелла і раўнанняў руху электронаў, выснова дысперсійнага ўраўнення, адпаведнага роўнасці нуля дэтэрмінанта атрыманай лінейнай сістэмы і злучае частату выпраменьвання з хвалевым вектарам, вызначэнне інкрэментаў няўстойлівасці шляхам вырашэння атрыманага дысперсійнага ўраўнення, аналіз залежнасці атрыманых інкрэментаў няўстойлівасці ад фізічных параметраў сістэмы.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: вынікі па няўстойлівасці электроннага пучка ў прасторава мадуляваным графене з'яўляюцца новымі.

Вобласць магчымага практычнага прымянення: вынікі могуць быць выкарыстаны ў галіне фатонікі і нанафатонікі пры распрацоўцы перабудаваных терагерцовых крыніц.

ANNOTATION

Author: Kozhemyakina Irina Dmitrievna.

Topic: "Radiative instability of an electron beam under conditions of plasmon-polariton excitation in graphene".

Degree paper: 49 p., 9 ill., 0 tab., 24 sources, 0 app.

Key words: GRAPHENE, RADIATIVE INSTABILITY, PLASMON-POLARITON, DISPERSION EQUATION, INSTABILITY INCREMENT.

Object of research: a beam of electrons propagating over a graphene layer.

Purpose of research: theoretical research of the radiative instability of an electron beam in the terahertz region of the spectrum, leading to an increase in emission, determination of instability increments describing the rate of instability development.

Research methods: linearization of the self-consistent Maxwell equations and equations of electron motion, derivation of the dispersion equation corresponding to the zero determinant of the resulting linear system and linking the radiation frequency with the wave vector, determination of instability increments by solving the obtained dispersion equation, analysis of the dependence of the obtained instability increments on the physical parameters of the system.

Obtained results and their novelty: the results on the instability of the electron beam in spatially modulated graphene are new.

Area of possible practical application: the results can be used in the field of photonics and nanophotonics in the development of tunable terahertz sources.