

ՔԵՆՂԼ Սինքրոտրոնային Հետազոտությունների Ինստիտուտ

Զաքարյան Սամվել Վարդանի

ԷԼԵԿՏՐՈՄԱԳՆԻՍՏԱԿԱՆ ԱԼԻՔՆԵՐԸ ՇԵՐՏԱՎՈՐ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ և  
ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԽՄԲԱՎՈՐՈՒՄԸ

Ա.04.20 - «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

**ՄԵՂՄԱԳԻՐ**

ԵՐԵՎԱՆ-2017

---

---

КЕНДЛІ Институт Синхротронных Исследований

Закарян Самвел Варданович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ЛАМИНИРОВАННЫХ СТРУКТУРАХ И  
БАНЧИРОВКА ЧАСТИЦ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – “Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника”.

ЕРЕВАН-2017

Ատենախոսության թեման հաստատված է ՔԵՆԴԼ ՍՀԻ-ում

Գիտական ղեկավար՝	Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր Մ. Ի. Իվանյան (ՔԵՆԴԼ ՍՀԻ)
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Է. Մ. Լազիև (ՔԵՆԴԼ ՍՀԻ) Ֆիզ.մաթ. գիտ. թեկնածու Գ. Հ. Հովհաննիսյան (ԵՊՀ)
Առաջատար կազմակերպություն՝	Երևանի Պետական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2017թ. մայիսի 25-ին ժամը 11.00-ին ՔԵՆԴԼ Սինքրոտրոնային Հետազոտությունների Ինստիտուտում գործող «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» ԲՈՀ-ի 021 մասնագիտական խորհրդի նիստում (0040, Երևան, Աճառյան 31):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՔԵՆԴԼ ՍՀԻ-ի գրադարանում:

Մեղմագիրն առաքված է 2017թ. ապրիլի 21-ին:

021 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար, ֆիզ.մաթ. գիտ. թեկնածու



Գ. Ա. Ամատունի

---

Тема диссертации утверждена в КЕНДЛ ИСИ

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук

М. И. Иванян (КЕНДЛ ИСИ)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор

Э. М. Лазиев (КЕНДЛ ИСИ)

кандидат физ.-мат. наук

Г. О. Оганесян (ЕГУ)

Ведущая организация:

Ереванский Государственный Университет

Защита диссертации состоится 25 мая 2017г. в 11.00 часов на заседании специализированного совета ВАК 021 действующей при КЕНДЛ ИСИ (0040, Ереван, ул. Ачаряна 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КЕНДЛ ИСИ.

Автореферат разослан 21 апреля 2017г.

Ученый секретарь спец. совета 021, к.ф.м.н.



Г. А. Аматуни

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Тема диссертационной работы посвящена разработке и исследованию ускоряющих устройств нового типа, обладающих узкополосными резонансными свойствами в высокочастотном диапазоне, обеспечивающих одномодовый режим ускорения и, к тому же, потенциальными источниками мощного узкополосного и узконаправленного излучения.

Имеющие сложную конфигурацию диафрагмированные структуры, используемые в настоящее время в основном для замедления волны, помимо генерации основной ускоряющей медленной моды возбуждают также моды высших типов, искажающих картину поля и ухудшающих характеристики пучка. Гладкие диэлектрические волноводы, работающие на базе черенковского излучения, обладают тем же побочным эффектом: генерируемое в них поле имеет многорезонансную структуру.

Рассматриваемые в диссертации однорезонансные двухслойные цилиндрические и плоские структуры лишены упомянутых недостатков, просты в изготовлении, их расчетные формулы просты и наглядны.

### Цель работы

Целью диссертационной работы является:

- Исследование характеристик медленно бегущей волны в ламинированных структурах.
- Исследование электродинамических свойств многослойных параллельных пластин.
- Вычисление резонансных частот горизонтально-двухслойных прямоугольных резонаторов.
- Исследование банчировки сгустков, следствий взаимодействия сгустков с одномодовыми структурами.

### Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Впервые исследованы электродинамические характеристики двухслойных параллельных пластин в которых движущаяся заряженная частица

генерирует узкополосное излучение с ярко выраженными резонансными свойствами.

- Получено явное выражение для коэффициента затухания медленно бегущей  $TM_{01}$  волны в цилиндрическом двухслойном волноводе.
- Получено явное матричное представление поля излучения точечного заряда в пространстве между многослойными параллельными пластинами с произвольным количеством и расположением слоев.
- Получены дисперсионные соотношения для резонатора с горизонтальными двухслойными металлическими стенками и проведено сравнение с дисперсионными соотношениями для параллельных пластин.
- Показано, что возможна генерация микросгустков вследствие взаимодействия сгустка с ондомодовой структурой.

#### Практическая ценность

- Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы для разработки ускоряющих одномодовых структур на высоких частотах.
- Результаты расчетов использовались при планировании эксперимента с прямоугольным резонатором с двухслойными горизонтальными стенками и при обработке результатов эксперимента.
- Полученные результаты могут лечь в основу для генерации ультракоротких сгустков как источники высокочастотного когерентного излучения.

#### Основные положения, выносимые на защиту

- Исследованы характеристики медленно распространяющейся моды в ламинированных структурах.
- Получены дисперсионные соотношения, продольный импеданс и продольное кильватерное поле для плоской двухслойной структуры.
- Исследованы особенности импеданса в плоской двухслойной структуре и получена связь между параметрами структуры и импедансом.

- Получены резонансные частоты горизонтально-двухслойных металлических резонаторов.
- Исследованы компрессия гауссовых и микробанчировка не-гауссовых пучков вследствие их взаимодействия с одномодовыми структурами.

### **Апробация работы**

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах в ЕГУ и КЕНДЛ ИСИ.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 101 страниц, в том числе 44 рисунков, 6 таблиц и списка литературы из 104 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сделан обзор по тематике диссертации, сформулированы основные задачи, обоснована их актуальность и научная новизна, а также приведено краткое содержание работы.

**В первой главе** диссертационной работы исследована единственная, медленно распространяющаяся мода в ламинированных структурах. В первой части главы показана, что в ламинированной цилиндрической структуре существует только одна мода ( $TM_{01}$ ) с фазовой скоростью меньше скорости света в вакууме. Для этой структуры уравнение собственных частот принимает следующий вид:

$$\frac{\varepsilon_0 J_1(v_{0n} a)}{\varepsilon_1 J_0(v_{0n} a)} = \frac{v_{0n} J_1(\lambda_{0n} a) H_0^{(1)}(\lambda_{0n} b) - J_0(\lambda_{0n} b) H_1^{(1)}(\lambda_{0n} a)}{\lambda_{0n} J_0(\lambda_{0n} a) H_0^{(1)}(\lambda_{0n} b) - J_0(\lambda_{0n} b) H_0^{(1)}(\lambda_{0n} a)}$$

где  $J_{0,1}(x)$  и  $H_{0,1}^{(1)}(x)$  являются функциями Бесселя и Ханкеля нулевого и первого порядка,  $a$  внутренний радиус структуры и  $b = a + d$  радиус внешнего слоя структуры.

В диапазоне частот, представляющих особый интерес (ТГц) и для толщины внутреннего металлического слоя меньшей скин-слоя материала ( $d \ll \delta$ ) уравнение принимает следующий вид:

$$\frac{1}{v_{0n} a J_0(v_{0n} a)} = \frac{1}{k^2 a d}$$

Анализ этого уравнения показывает, что радиальная постоянная распространения  $v_{0n}$  является чисто действительной для мод  $TM_{0n}$  с  $n > 1$ , откуда следует, что фазовая скорость мод высокого порядка больше скорости света в вакууме. Для фундаментальной моды  $TM_{01}$ ,  $v_{01}$  чисто действительна для частот  $k < k_0$  ( $v_{ph} > c$ ) и чисто мнимая для частот  $k > k_0$  ( $v_{ph} < c$ ). На рис. 1 показаны дисперсионные кривые фундаментальной моды и мод высшего порядка.

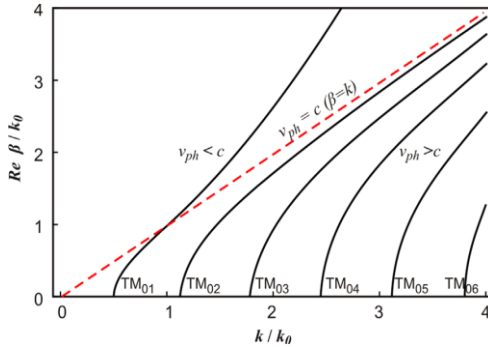


Рис. 1: Дисперсионные кривые фундаментальной  $TM_{01}$  моды и мод высшего порядка  $TM_{0n}$  ( $n > 1$ ) цилиндрического волновода.

Из рисунка видно, что только фундаментальная мода пересекает синхронную линию  $\beta = k$  ( $v_{ph} = c$ ) на резонансной частоте  $k = k_0 = \sqrt{2/ad}$ .

Во второй части главы изучен параметр затухания  $TM_{01}$  моды. Для тонкого внутреннего слоя ( $d \ll \delta$ ) и малых аргументов функций Бесселя ( $|v_{01}|a \ll 1$ ) уравнение собственных мод принимает следующий вид:

$$v_{01}^2 \approx \frac{16}{a^2} \left( -\frac{1}{2} + \frac{k_0^2}{2k^2} - j \frac{\eta}{ka} \right)$$

На резонансной частоте реальная и мнимая части поперечной постоянной распространения связаны соотношением

$$Re(v_{01}) = -Im(v_{01}) = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{8\eta}{k_0 a}}$$

Для высоких частот ( $k \gg |v_{01}|$ ) продольная постоянная распространения принимает вид

$$\beta \approx k + \frac{4}{k^3 a^2} (k^2 - k_0^2) + \frac{8\eta}{a(ka)^2}$$

и для параметра затухания на резонансной частоте имеем:  $\alpha_{01} = Im(\beta_{01}) = 4d\eta/a^2$ .

В финальной части главы получены и проанализированы дисперсионные соотношения для двухслойных параллельных пластин. Дисперсионные соотношения для свободных колебаний этой структуры определяются равенством нулю произведения  $\prod_{i=1}^4 T_i$ , где

$$\begin{aligned} T_1 &= k_y^{(1)} \text{Ch}(dk_y^{(1)}) \text{Sh}(ak_x) + k_x \text{Sh}(dk_y^{(1)}) \text{Ch}(ak_x) \\ T_2 &= k_y^{(1)} \text{Ch}(dk_y^{(1)}) \text{Ch}(ak_x) + k_x \text{Sh}(dk_y^{(1)}) \text{Sh}(ak_x) \\ T_3 &= -k_x k^2 \varepsilon'_i \mu'_i \text{Ch}(dk_y^{(1)}) \text{Sh}(ak_x) - k_y^{(1)} k^2 \text{Sh}(dk_y^{(1)}) \text{Ch}(ak_x) \\ T_4 &= -k_x k^2 \varepsilon'_i \mu'_i \text{Ch}(dk_y^{(1)}) \text{Ch}(ak_x) - k_y^{(1)} k^2 \text{Sh}(dk_y^{(1)}) \text{Sh}(ak_x) \end{aligned}$$

Здесь подлежащей определению для синхронных (с движением частицы) собственных волн является переменная  $k_x = k_y$ . При фиксированной частоте  $k$  каждое из четырех уравнений имеет бесконечное множество решений. Примеры решений для  $T_2 = 0$  и  $T_4 = 0$  приведены ниже.

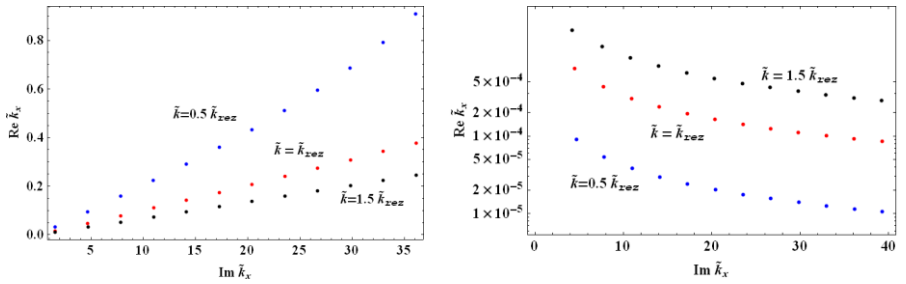


Рис. 2: Собственные значения двухслойных параллельных пластин. Решения уравнения  $T_2 = 0$  (слева) и  $T_4 = 0$  (справа).  $\tilde{k}_{rez} = k_{rez}d = \sqrt{d/a}$ ;  $\tilde{k}_x = ak_x$

Установлено однозначное соответствие медленных колебаний с продольным импедансом.

**Во второй главе** диссертационной работы исследованы электромагнитные свойства многослойных параллельных пластин.

В первой части главы разработан матричный формализм для получения поля, излучаемого релятивистским точечным зарядом, движущимся в пространстве между двумя многослойными параллельными пластинами с вертикальным смещением  $\Delta$  относительно плоскости симметрии. Получены выражения для компонент полей излучения в матричной форме. Приведены примеры частных случаев для симметричного и асимметричного расположения слоев в пластинах.

Во второй части этой главы рассмотрены поля, излучаемые частицей, движущейся между двухслойными параллельными пластинами. Для упрощения расчетов была рассмотрена модель с идеально проводящим внешним слоем. Схематическое изображение этой структуры дано на рис. 3.

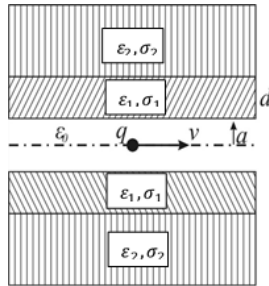


Рис. 3: Геометрия и электромагнитные параметры двухслойной структуры.

Ниже приводятся амплитуды полей излучения электромагнитного поля ультрарелятивистской частицы между двухслойными пластинами с идеально проводящим внешним слоем:



$$A_C = j \frac{qk_z k_y^{(1)} (k_x^2 - k_y^{(1)2}) \sinh(2k_y^{(1)} d)}{16\pi^2 \epsilon_0 R_1^C R_2^C}, \quad A_S = j \frac{qk_z k_y^{(1)} (k_x^2 - k_y^{(1)2}) \sinh(2k_y^{(1)} d)}{16\pi^2 \epsilon_0 R_1^S R_2^S}$$

где

$$R_1^C = \left\{ \begin{matrix} k_y^{(1)} \\ k_x k_x^2 \end{matrix} \right\} Ch(k_y^{(1)} d) Ch(k_x a_1) \pm \left\{ \begin{matrix} k_x \\ k_y^{(1)} k_x^2 \end{matrix} \right\} Sh(k_y^{(1)} d) Sh(k_x a_1)$$

$$R_2^S = \left\{ \begin{matrix} k_y^{(1)} \\ k_x k_x^2 \end{matrix} \right\} Ch(k_y^{(1)} d) Sh(k_x a_1) \pm \left\{ \begin{matrix} k_x \\ k_y^{(1)} k_x^2 \end{matrix} \right\} Sh(k_y^{(1)} d) Ch(k_x a_1)$$

В третьей части главы вычислены и проанализированы продольный импеданс и продольное кильватерное поле частицы между двухслойными параллельными пластинами (рис.3). Дано приближенное аналитическое представление продольного импеданса.

Для двухслойных параллельных пластин с низкопроводящим тонким внутренним слоем получен узкополосный высокочастотный пик на импедансной кривой. На рис. 4 показан продольный импеданс структуры с расстоянием между пластинами 2 см и с проводимостью внутреннего слоя  $\sigma = 2 * 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  при различных толщинах внутреннего слоя.

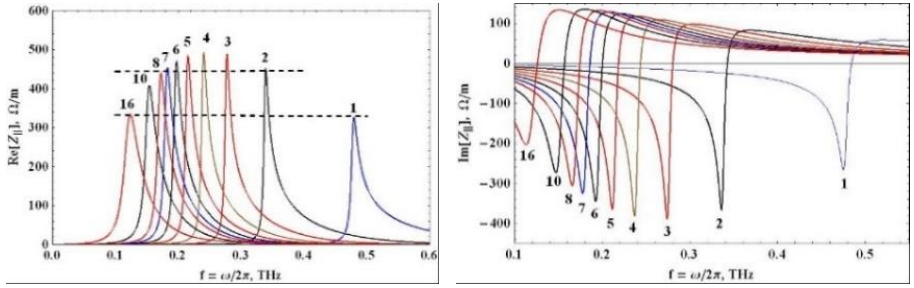


Рис. 4: Действительные (слева) и мнимые (справа) части продольного импеданса ламинированных параллельных пластин. Метки на рисунках показывают толщину внутреннего слоя в микрометрах.

С помощью анализа импедансных кривых получено выражение для резонансной частоты:

$$f_{rez} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{ad}}$$

Резонансная частота зависит от геометрических размеров пластин и не зависит от проводимости внутреннего слоя. Резонансная частота аналогичной цилиндрической структуры в  $\sqrt{2}$  раза больше:  $f_{rez,cyl} = \sqrt{2} f_{rez}$ .

Из анализа импедансных кривых также получена связь между максимумом импеданса и параметрами пластин. Исследования показали, что при фиксированной проводимости материала внутреннего слоя пик импеданса достигает максимального значения, когда параметр  $\zeta = \frac{1}{3} Z_0 \sigma d$  близок к единице.

Кроме того, пики импедансов с параметрами  $\zeta_1 * \zeta_2 = 1$  совпадают (на рис. 4 кривые для толщин {1 мкм, 16 мкм} и {2 мкм, 8 мкм}).

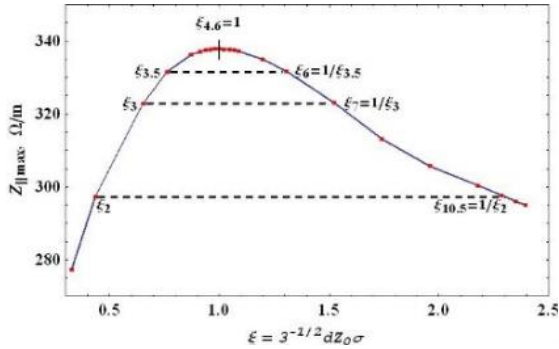


Рис. 5: Распределение пиков импеданса ламинированных параллельных пластин с фиксированными геометрическими параметрами ( $a = 1\text{ см}$ ,  $d = 1\text{ мкм}$ ) как функция от проводимости  $\sigma$ .

Исследования импедансных кривых с фиксированными толщинами внутреннего слоя показывают, что пик импеданса достигает своего максимума когда параметр  $\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} Z_0 \sigma d$  близок к единице (рис. 5).

Получены продольные кильватерные поля, возбуждаемые ультра-релятивистским зарядом, пролетающим вдоль плоскости симметрии двухслойных параллельных пластин ( $\Delta = 0$ ). На рис. 6 показаны кильватерные поля для различных толщин внутреннего слоя.

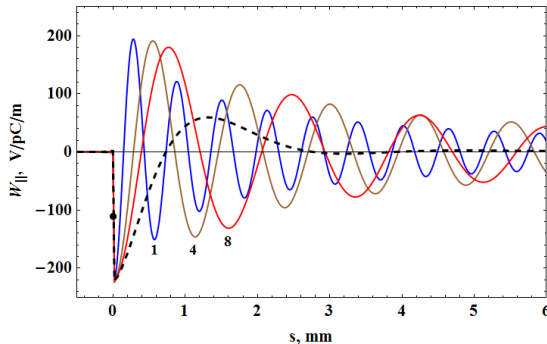


Рис. 6: Продольное кильватерное поле в ламинированных параллельных пластинках с расстоянием между пластинами  $a = 2\text{ см}$  и с проводимостью внутреннего слоя  $\sigma = 2 \times 10^3\text{ Ом}^{-1}\text{ м}^{-1}$ . Метки на рисунке показывают толщину внутреннего слоя.

Кильватерное поле является квазипериодической функцией с убывающей амплитудой и с периодом

$$\Delta s = c/f_{rez}, f_{rez} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{ad'}}$$

что свидетельствует о квазимонохроматичном характере излучения.

**В третьей главе** диссертации исследованы резонансные свойства горизонтально-двухслойных металлических резонаторов. На рис. 7 приведено схематическое изображение рассматриваемой структуры.

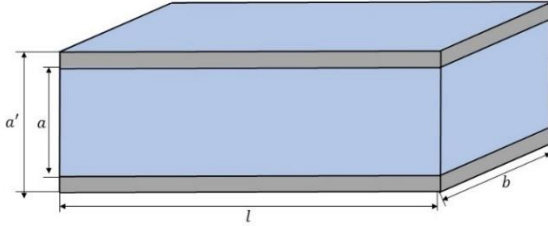


Рис. 7: Горизонтально-двухслойный металлический резонатор.

В первой части главы рассмотрена аналитическая модель резонатора: все наружные стенки резонатора считаются идеально проводящими, а верхние и нижние стенки с внутренней стороны покрыты тонким низкопроводящим материалом. Получены дисперсионные соотношения резонатора и рассчитаны его собственные частоты.

Далее сравнивались резонансные частоты теоретической модели горизонтально-двухслойного резонатора, экспериментальные результаты (предоставленные группой, проводившей эксперимент) и резонансные частоты продольного импеданса двух симметричных двухслойных параллельных пластин. Экспериментальный резонатор является медным горизонтально-двухслойным металлическим резонатором, с внутренним материалом германий (Ge) и горизонтальными размерами 30 см и 6 см. Во всех трех случаях толщина германиевого слоя – 1 мм. Проводимость германия -  $2 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , относительная статическая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon' = 16$ .

На рис. 8 показано сравнение импедансной кривой двухслойных параллельных пластин с главными резонансами экспериментального резонатора (метки на рисунке показывают расстояние между пластинами).

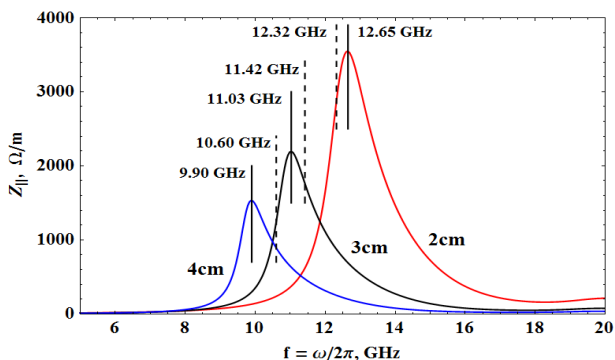


Рис. 8: Продольный импеданс параллельных пластин с идеально проводник-германий материалами (сплошные линии) и измеренные резонансные частоты медного резонатора с Ge внутренним слоем. Толщина Ge слоя 1 мм.

Из сравнения видно, что при уменьшении вертикального размера резонатора, его резонансные характеристики приближаются к характеристикам параллельных пластин.

Также сделано сравнение основных резонансов модели резонатора и экспериментального резонатора. На табл. 1 показаны основные резонансы структур при различных вертикальных апертурах.

Апертура	Экспериментальный	Теорический
2 см	12.32 ГГц	12.29 ГГц
3 см	11.42 ГГц	11.36 ГГц
4 см	10.6 ГГц	10.49 ГГц

Табл. 1: Основные резонансы экспериментального резонатора и модели резонатора.

Из таблицы видно, что теорическая модель резонатора хорошо описывает реальный резонатор. Относительная разница между резонансами: 0.2% (2 см), 0.5% (3 см), 1% (4 см).

**В четвертой главе** диссертационной работы исследована банчировка гауссовых и не-гауссовых пучков в одномодовых структурах. Проходя через одномодовую структуру, благодаря генерированным в структуре кильватерным полям, в пучке создается энергетический разброс. Если энергия пучка не ультрарелятивистская (~10 МэВ), то в открытом пространстве энергетический разброс превращается в модуляцию плотности заряда (баллистическая банчировка). Схема баллистической банчировки дана на рис. 9.

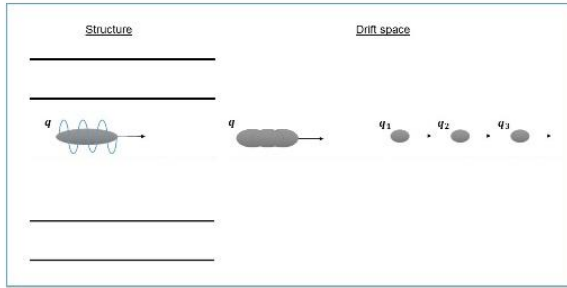


Рис. 9: Геометрия баллистической банчировки.

В первой части этой главы приведено описание методов расчета кильватерных полей, энергетического разброса в пучках и получения формы пучков после пересечения открытого пространства.

Во второй части главы исследована банчировка пучков после их прохождения через холодную, нейтральную плазму и двухслойный цилиндрический волновод. Исследованы пучки с тремя начальными формами: гауссовы, параболические и прямоугольные. Исследования были проведены для пучков с зарядом 100 пКл и энергией 10 МэВ.

Результаты исследований для гауссовых пучков даны в Табл. 2, где  $q_0$  - начальный заряд,  $U_0$  - начальная энергия,  $\sigma_0$  - начальный среднеквадратический размер пучка,  $\sigma_p$  и  $q_p$  - среднеквадратический размер и заряд сжатого пучка после прохождения сквозь плазму и  $\sigma_t$  и  $q_t$  - среднеквадратический размер и заряд сжатого пучка после пролета вдоль оси цилиндрического волновода.

$q_0$	$U_0$	$\sigma_0$	$\sigma_p, q_p$	$\sigma_t, q_t$
100 пКл	10МэВ	100 мкм	12 мкм, 70 пКл	8.02 мкм, 70 пКл

Табл. 2: Параметры Гауссового пучка до и после взаимодействия с плазмой и с цилиндрическим волноводом.

Из таблицы видно, что гауссовый пучок может быть сжат в 8 раз после взаимодействия с плазмой и в 12 раз после взаимодействия с цилиндрическим волноводом.

В случае параболических и прямоугольных пучков, после взаимодействия с ондомодовыми структурами наблюдается микробанчировка пучков. Результаты для этих пучков даны в Табл. 3. В таблице  $a_0$  означает полную ширину на полувысоте.

Форма пучка	Плазма		Цилиндрический волновод		
	$a_{0,p}$	$a_p, q_p$	$a_{0,t}$	$a_t, q_t$	$a_t, q_t$
Прямоугольный	2 мм	40 мкм, 14 пКл	0.6 мм	8 мкм, 7.8 пКл	16 мкм, 6 пКл
Параболичный	2 мм	20 мкм, 10 пКл	0.6 мм	7.5 мкм, 1.8 пКл	3 мкм, 1.5 пКл

Табл. 3: Параметры прямоугольных и параболических пучков до и после взаимодействия с плазмой и с цилиндрическим волноводом.

После взаимодействия прямоугольного пучка с плазмой формируются три микросгустка с полной шириной на полувысоте (FWHM) 40 мкм и с зарядом 14 пКл. После взаимодействия прямоугольного пучка с двухслойной цилиндрической структурой формируются микросгусток с 8 мкм FWHM и с зарядом 7.8 пКл и микросгусток с 16 мкм FWHM и с зарядом 5.94 пКл. Взаимодействие параболического пучка с плазмой формирует три микросгустка с 20 мкм FWHM и с зарядом 10 пКл. Взаимодействие параболического пучка с двухслойным цилиндрическим волноводом формирует микросгусток с 7.5 мкм FWHM и с зарядом 1.8 пКл и микросгусток с 3 мкм FWHM и с зарядом 1.5 пКл.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

- Описаны основные особенности распространения медленных волн в двухслойных цилиндрических и плоских структурах. Получены и проанализированы дисперсионные соотношения для обеих структур. Установлена связь дисперсионных соотношений с продольными импедансами.
- Исследованы многослойные структуры, состоящие из двух параллельных ламинированных пластин. Получен матричный формализм построения электромагнитных полей, возбуждаемых нерелятивистским точечным зарядом, пролетающим между пластинами.
- Исследованы двухслойные параллельные пластины. Получены продольный импеданс, кильватерные поля и дисперсионные соотношения двухслойных параллельных пластин. Показано наличие высокочастотного узкополосного резонанса в структурах с низкопроводящим тонким внутренним слоем и высокопроводящим внешним слоем.

- Исследована зависимость резонансных свойств двухслойных параллельных пластин от параметров структуры. Выявлены основные параметры структуры, при которых амплитуда продольного импеданса достигает своего максимума.
- Исследован прямоугольный резонатор с горизонтальными двухслойными стенками. Получены уравнения для собственных частот структуры.
- Исследована банчировка сгустков, взаимодействующих с одномодовыми структурами. Показана возможность компрессии гауссовых сгустков до  $\sim 10$  мкм и микробанчировка не-гауссовых сгустков с генерацией 3 мкм – 40 мкм.

#### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. S. Zakaryan, “Electron Bunch Compression and Microbunching in Single-Mode Structure”, Armenian Journal of Physics 9 (3), (2016) pp. 220-224.
2. V. M. Tsakanov, S. Zakaryan et al., “AREAL test facility for advanced accelerator and radiation source concepts”, Nucl. Instrum. Meth. A 829, (2016) pp. 284-290.
3. M. I. Ivanyan, S. Zakaryan et al., “High frequency single mode traveling wave structure for particle acceleration”, Nucl. Instrum. Meth. A 829, (2016) pp. 187-189.
4. M. I. Ivanyan, A. Grigoryan, S. Zakaryan, A. V. Tsakanian, “Impedance and wake of two-layer metallic flat structure”, Armenian Journal of Physics 10 (1), (2017) pp. 36-41.
5. M. I. Ivanyan, S. Zakaryan et al., “On the resonant behavior of laminated accelerating structures”, Journal of Instrumentation 12, (2017) P03019.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկայի և արագացուցչային տեխնիկայի բնագավառի ժամանակակից հետազոտությունների կարևորագույն ուղղություններից է նոր արագացնող համակարգերի և բարձր հաճախականային կոհերենտ ճառագայթման աղբյուրների ստացումը: Բարձր հաճախականային կոհերենտ ճառագայթում ստանալու համար անհրաժեշտ են գերկարձ փնջեր: Գերկարձ փնջերի ուղիղ գեներացումը ֆոտոկատոդից սահմանփակված է ֆոտոկատոդի և լազերի տեխնիկական բնութագրերի պատճառով, այդ իսկ պատճառով գերկարձ փնջերի ստացման հիմնական եղանակը երկար փնջերի կարճեցումն է: Հիմնականում, փնջերի կարճեցման համար նրանցում ստեղծվում է էներգիայի մոդուլյացիա, որը հետագայում փոխակերպվում է տարածական մոդուլյացիայի: Փնջերում էներգիական մոդուլյացիա կարելի է ստանալ փնջերի և իրնեց առաջացրած կիլվատերային դաշտերի փոխազդեցության հետևանքով: Այս գործընթացի համար լայնորեն օգտագործվում են դիաֆրագմային կամ դիէլեկտրիկով լցված ալիքատարերը: Այս ալիքատարերը բնութագրվում են անվերջ քանակությամբ դանդաղ տարածվող սեփական մոդերով, որոնք գրգռում են լիցքավորված մասնիկը նրանցով անցնելուց: Այս բարձր մոդերը խոտորում են մասնիկների առաջացրած կիլվատերային դաշտերը: Այսպիսով միամոդ ալիքատարերի ուսումնասիրությունը հանդիսանում է կարևորագույն խնդիր ինչպես արագացուցչային ֆիզիկայի զարգացման, այնպես էլ բարձր հաճախականային կոհերենտ ճառագայթման աղբյուրների ստացման համար:

Ատենախոսության առաջին գլխում ուսումնասիրված են երկշերտ գլանային և հարթ ալիքատարերում դանդաղ ալիքների տարածման առանձնահատկությունները: Այս երկու ալիքատարերի համար ստացվել և հետազոտվել են դիսպերսիոն առնչությունները: Ստացվել է գլանային ալիքատարում հիմնական  $TM_{01}$  մոդի մարման գործակցի բացահայտ տեսքը: Գտնվել է կապը դիսպերսիոն առնչությունների և երկայնական իմպեդանսի միջև:

Երկրորդ գլխում ուսումնասիրվել են երկու զուգահեռ բազմաշերտ սալիկների էլեկտրամագնիսական հատկությունները: Մշակվել է մատրիցական ֆորմալիզմ և դուրս է բերվել բազմաշերտ սալիկների միջև կետային լիցքի շարժմամբ պայմանավորված էլեկտրամագնիսական դաշտերի տեսքերը: Ստացվել են երկշերտ զուգահեռ սալիկների երկայնական իմպեդանսի և երկայնական կիլվատերային դաշտերի տեսքերը: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ շերտերի համապատասխան հաստությունների և հաղորդականությունների դեպքում սալիկների միջև շարժվող լիցքը ճառագայթում է բարձր հաճախականային նեղ սպեկտրով: Ցույց է տրվել, որ միակ ռեզոնանսային հաճախականությունը կախված է միայն ալիքատարի երկրաչափական չափերից:

Երրորդ գլխում ուսումնասիրվել է երկշերտ հորիզոնական պատերով ուղղանկյուն ռեզոնատորի ռեզոնանսային հատկությունները: Դիտարկվել է ռեզոնատորի մոդել, որի պատերը իդեալական հաղորդիչ են և միայն



հորիզոնական պատերը ներսից պատված են ցածր հաղորդականությամբ շերտով: Այս մոդելի համար դուրս են բերվել դիսպերսիոն առնչությունները: Կատարվել է ռեզոնատորի էլեկտրամագնիսական հատկությունների համեմատություն երկշերտ զուգահեռ սալիկների հատկությունների և փորձնական ռեզոնատորի հետ: Ցույց է տրվել, որ երբ ռեզոնատորի բարձրությունը փոքր է նրա երկայնական չափսերից, նրա էլեկտրամագնիսական հատկությունները մոտենում են երկշերտ զուգահեռ սալիկների հատկություններին:

Չորրորդ գլխում ուսումնասիրվել է միամոդ կառուցվածքներում փնջերի կարճեցումը: Ուսումնասիրված են Գաուսյան, պարաբոլիկ և ուղղանկյուն բաշխվածությամբ փնջերի կարճեցումը և փնջավորումը սառը պլազմայում և երկշերտ զլանային ալիքատարում: Ցույց է տրվել, որ հնարավոր է Գաուսյան փնջերի կարճեցում մինչ 10 մկմ և պարաբոլիկ և ուղղանկյուն փնջերի փնջավորում մինչ 3 մկմ - 40 մկմ.

Ատենախոսությունում ստացված արդյունքները կարող են օգտագործվել բարձր հաճախականային նոր արագացնող համակարգերի նախագծման, կոհերենտ մոնոքրոմատիկ ճառագայթման աղբյուրների նախագծման համար: Արդյունքները կարող են օգտագործվել նաև գերկարճ փնջերի ստացման համար: Ատենախոսության արդյունքները օգտագործվել են ՔԵՆԴԼ ՍՀԻ-ում երկշերտ ուղղանկյուն ռեզոնատորի նախագծման և պատրաստման համար:

## SUMMARY

The investigation of new acceleration structures and high frequency, high brightness coherent radiation sources is one of the main research areas in beam physics and accelerator technology. To emit the THz radiation, ultrashort bunches are needed. The direct generation of ultrashort bunches in RF guns is limited due to technical characteristics of photocathodes and lasers, so ultrashort bunches are usually formed by shortening of initial long bunches. The main principle to generate ultrashort bunches is to obtain energy modulation within the bunch and convert it into charge density modulation. Energy modulation within the bunch can be obtained via bunch interaction with its own radiated wakefields. For such a process disc loaded or dielectric loaded structures are widely used. Both structure types are characterized by the high order modes, excited during the beam passage through them. These high order modes play parasitic role in wakefields. So, the study of single-mode waveguides is an important issue for the development of accelerator physics and for the sources of coherence high frequency radiation sources.

The first chapter of the thesis presents features of propagation of slow waves in circular and plane waveguides. For these two waveguides, the dispersion relations are obtained and investigated. For the cylindrical waveguide, an explicit expression for the damping coefficient of the fundamental  $TM_{01}$  mode is obtained. A correspondence is established between the dispersion relations and the impedance.

In the second chapter, the electromagnetic properties of two parallel multilayered plates are investigated. Matrix formalism has been developed and formulas have been derived for fields that arise when a point charge moves between plates. Explicit expressions for the longitudinal impedance and the wake function of two two-layered plates are obtained. The obtained results show that at the appropriate thicknesses and conductivities of the layers, a particle moving between the plates emits a narrow frequency spectrum. It is shown that the single resonant frequency depends only on the geometric dimensions of the structure.

In the third chapter resonance properties of a rectangular resonator with two-layer horizontal walls are investigated. The model of an ideal resonator was considered, only the horizontal walls of which are covered from the inside with a thin layer of low-conductivity material. Dispersion relations are derived for this model. A comparison was made of the electromagnetic properties of this resonator with the resonance properties of two parallel plates and with the resonance properties of the test cavity. It is shown that, when the height of the resonator is small compared with its longitudinal dimensions, its electromagnetic properties approach the properties of two infinite two-layer plates.

In the fourth chapter, the phenomenon of bunches shortening in single-mode structures was investigated. A study was made of the phenomenon of shortening and

bunching of Gaussian, parabolic and rectangular beams in cold plasma and in a two-layer cylindrical waveguide. The possibility of narrowing Gaussian beams to  $10 \mu m$  and bunching of parabolic and rectangular beams up to  $3 \mu m - 40 \mu m$  was shown.

The results obtained in the thesis can be used in the design of new accelerating structures as well as coherent monochromatic sources of radiation. The results can also be used to produce ultrashort bunches. The results of the dissertation were used in CANDLE SRI in the design and fabrication of a two-layer rectangular resonator.

