

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Кузнецов Данил Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение основных параметров резонаторного детектора малого заряда
одиночных коротких сгустков.**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19301

Научный руководитель:

к.т.н. К.В.Губин

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

А.В.Судников

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация.

Целью работы являлось измерение добротности и первой резонансной частоты пролетного СВЧ резонатора. Эти параметры были измерены по амплитудно-частотной характеристике резонатора, полученной с помощью измерителя S-параметров цепей. На основе полученных данных были рассчитаны характеристики сигнала, снимаемого с резонатора при его ударном возбуждении. В результате измерений, помимо всего прочего, было обнаружено, что резонатор обладает несколькими резонансными частотами. Для проверки измеренных данных производилось моделирование ударного возбуждения резонатора, для чего была собрана измерительная цепь с исследуемым резонатором и генератором испытательных импульсов. В ходе моделирования, были записаны осциллограммы сигналов с измерительной антенны резонатора. По полученным данным были определены характеристики снимаемого сигнала, которые с хорошей точностью совпали с расчетными.

Ключевые слова: Резонатор, резонансная частота, добротность, свободные колебания.

Оглавление

1.Введение.....	4
2.Теория.....	4
3.Описание установки.....	6
4.Результаты.....	8
4.1.Исследование частотных характеристик резонатора.....	8
4.2.Моделирование ударного возбуждения колебаний в резонаторе.....	10
5.Обработка результатов.....	11
6.Заключение.....	12
7.Благодарности.....	13
8.Литература.....	13

1. Введение.

Для измерения различных характеристик сгустков заряженных частиц существуют диагностики на основе пролетных СВЧ резонаторов (например [1, 2], см рис. 1). В том числе в настоящее время в ИЯФ ведется разработка диагностики заряда одиночных ультракоротких сгустков электронов на основе объемного пролетного СВЧ резонатора. Данная работа посвящена измерениям его основных характеристик – значений собственных резонансных частот и добротности.

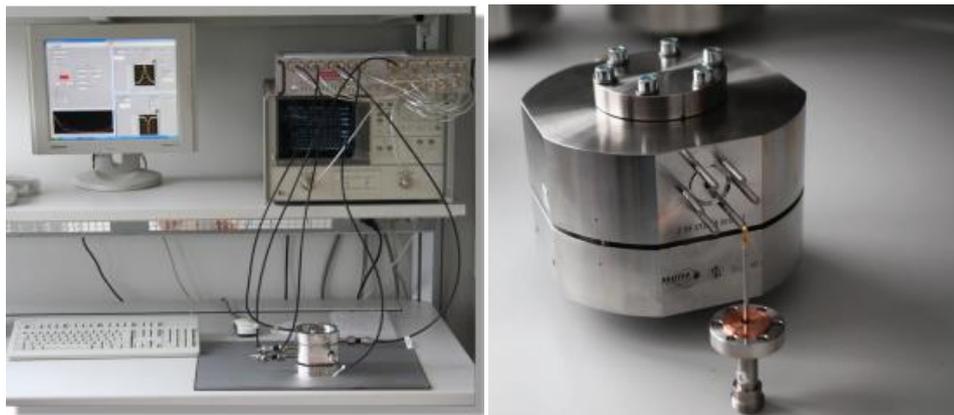


Рисунок 1 (слева) - датчик положения пучка на комплексе XFEL [1].
(справа) – резонатор для измерения заряда [2].

2. Теория.

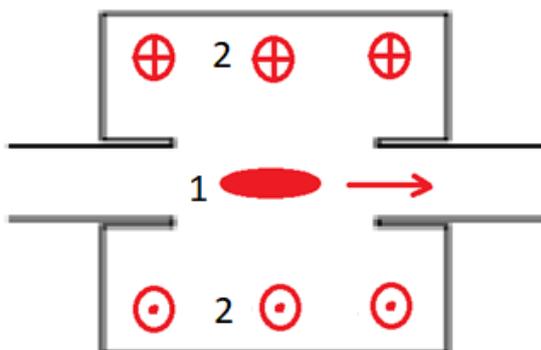


Рисунок 2 Принцип диагностики с использованием пролетного резонатора. 1 – сгусток. 2 – наведенное магнитное поле.

Метод измерения заряда пучков основан на следующем эффекте (см.рис 2). При пролете достаточно короткого сгустка заряженных частиц через резонатор, в нем возбуждаются свободные затухающие электромагнитные колебания на **собственных частотах**, которые можно измерить и зафиксировать.

Собственные частоты - это частоты, на которых происходят свободные колебания системы. Они определяются внутренними параметрами системы и не зависят от условий возбуждения колебаний.

Энергия колебаний при пролете пропорциональна квадрату заряда сгустка. Амплитуда поля излучения, наведенного в резонаторе после пролета заряженного сгустка с зарядом q равна $V = k \cdot q$ [3], здесь q – заряд пучка, k – параметр потерь или коэффициент, связывающий наведенное напряжение на резонаторе V с зарядом q (размерность параметра потерь - $[k] = \frac{\text{вольт}}{\text{кулон}}$), причем каждая резонансная частота имеет свой параметр потерь. Эта зависимость позволяет определять заряд пучка по амплитуде СВЧ колебаний вызываемых им в резонаторе. Амплитуда колебаний на первой резонансной частоте линейно зависит от заряда пучка и слабо зависит от других параметров сгустка, таких как диаметр пучка, отклонение от оси и т.д. Амплитуды колебаний на других собственных частотах сильнее зависят от высших моментов. Зависимости от более высоких моментов можно использовать для определения координат центра пучка и его диаметра. В этой работе колебания на высших резонансных частотах будут отсекаются измерительной цепью(см.далее).

Резонатор в данном случае можно рассматривать как колебательный контур с распределенными параметрами. В общем случае затухающие колебания в колебательном контуре описываются формулой [4]: $x = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \Phi_0)$ (1), где A_0 -амплитуда колебаний, δ - декремент затухания (см.далее), ω - частота свободных колебаний, Φ_0 - фаза колебаний. На рисунке 3 приведена типичная форма сигнала свободных затухающих колебаний в резонаторе при его ударном возбуждении. Для использования резонатора, прежде всего, необходимо знать его основные параметры - значения основной резонансной частоты и добротности затухающих колебаний на этой частоте, поскольку именно они определяют характеристики получаемого сигнала.

Добротность резонатора это умноженное на 2π отношение полной энергии запасенной в резонаторе к мощности потерь за период колебаний. [5]

$$Q = 2\pi f_r \frac{W}{P_l} \quad (3)$$

f - резонансная частота, W - энергия запасенная в колебаниях, P - мощность потерь, Q - добротность. Для определения добротности колебаний по амплитудно-частотной

характеристике можно использовать формулу [6] $Q = \frac{\Delta\omega\tau}{2\Delta\omega_{3db}}$ (4). Интервал $\pm\Delta\omega_{3db}$ называется **полосой пропускания контура**.

Полоса пропускания контура - это диапазон частот, на краях которого мощность потерь уменьшается в два раза по сравнению с потерями на резонансной частоте.

Зная резонансную частоту и добротность можно найти декремент затухания

[7] $\delta = \omega_r / (2Q)$ (5), который характеризует скорость затухания энергии в резонаторе, т.е. $\tau = \frac{1}{\delta}$ - **время релаксации, время за которое амплитуда колебаний уменьшается в e раз**. Знание этой величины необходимо для дальнейшей работы с резонатором, так как она характеризует длительность фиксируемых сигналов, что нужно для подбора измерительного оборудования.

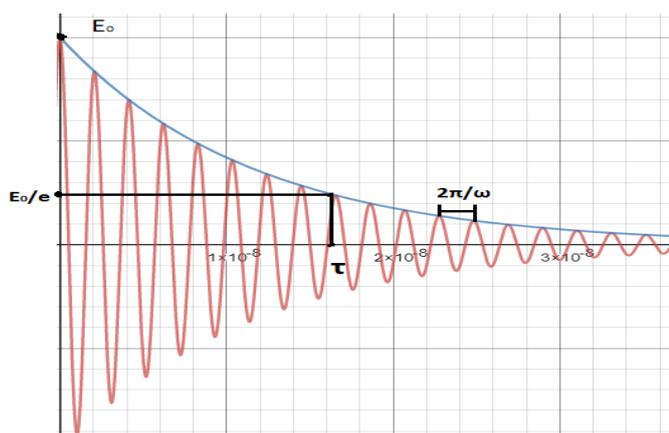


Рисунок 3 Типичная зависимость напряженности поля от времени для колебаний на собственной резонансной частоте.

3. Описание установки.

В работе был использован резонатор с простой цилиндрической геометрией, размеры и форма которого приведены на рисунке 4.

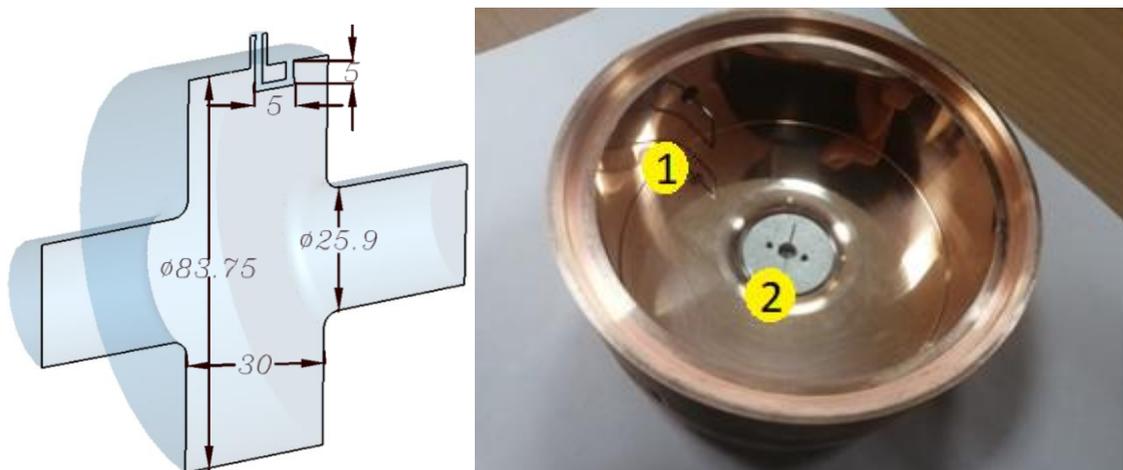


Рисунок 4 Дизайн и внешний вид резонатора. 1 – петлевая антенна. 2 – штыревая антенна.

Сигнал с него снимается петлевой антенной, размещенной на внутренней стороне боковой стенки цилиндра. Выбор типа и места расположения антенны обусловлен тем, что при возникновении СВЧ колебаний электрическая составляющая поля принимает наибольшее значение на оси симметрии резонатора, а, значит, и величина магнитного поля, проходящего через контур петлевой антенны, будет наибольшей у боковых стенок. Штыревая антенна, расположенная по оси резонатора, служит для возбуждения в нем СВЧ колебаний при наших измерениях.

Работа проводилась в два этапа. На первом этапе характеристики резонатора измерялись с помощью измерителя S – параметров [8] PNA-L Network Analyzer. Измеритель возбуждает в резонаторе вынужденные электромагнитные колебания в заданном диапазоне частот и с их помощью определяет его различные характеристики, в том числе добротность и резонансные частоты. Измеритель с подключенным к нему резонатором представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 измерителя S – параметров цепей с подключенным резонатором и СВЧ фильтром. 1 - Анализатор цепей PNA-L Network Analyzer. 2 - Резонатор. 3 - СВЧ фильтр для подавления высоких частот

На втором этапе работы проводилось моделирование возбуждения колебаний в резонаторе. Для этого через штыревую антенну (рис. 4), расположенную на оси резонатора, подавались импульсы с генератора испытательных импульсов. Общая схема измерений и вид установки представлены на рисунке 6, а, б.

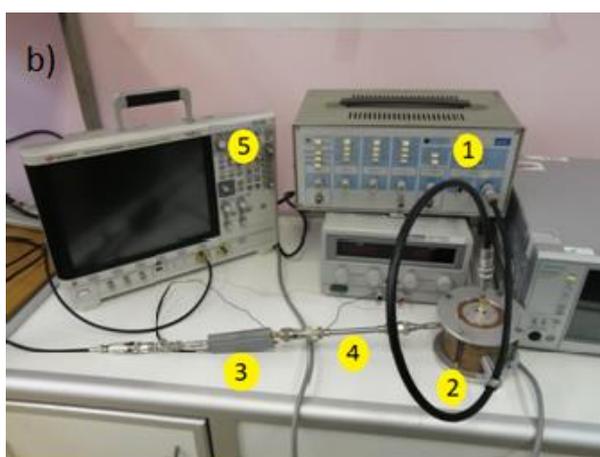
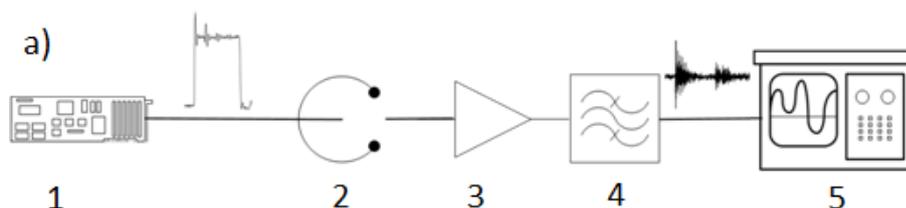


Рисунок 6 а) Схема измерений. б) вид установки. 1 - Генератор испытательных импульсов И1-15[10], 2 - Резонатор, 3 - Усилитель М42164-2[11], 4 - СВЧ Фильтр сигнала, 5 - Осциллограф KEYSIGHT DSOX6002A[9].

Так как амплитуда возбуждаемых колебаний мала (порядка мВ), для их усиления используется СВЧ усилитель М42164-2 с коэффициентом усиления

30dB и рабочим диапазоном частот 1-4 ГГц, включающим первую резонансную частоту резонатора. Для отсекания части сигнала, соответствующей колебаниям на старших резонансных частотах, используется СВЧ фильтр (рассматривается далее). Усиленный сигнал подается на осциллограф KEYSIGHT DSOX6002A с полосой пропускания 6 ГГц, который способен фиксировать ВЧ сигнал в нашем диапазоне.

4. Результаты.

4.1. Исследование частотных характеристик резонатора.

Результаты измерений с помощью измерителя S – параметров приведены на рис 7.

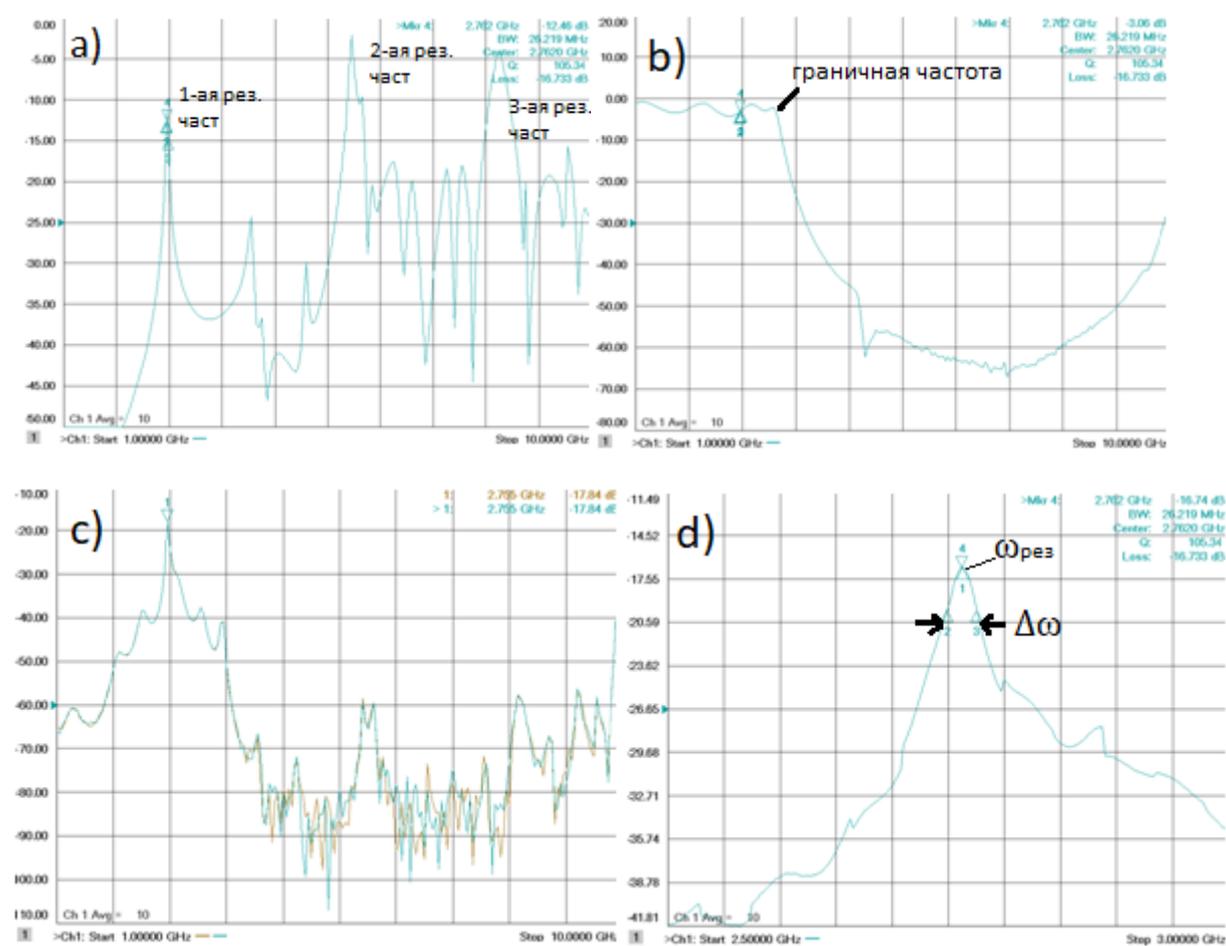


Рисунок 7 а - Амплитудно-частотная характеристика резонатора. б – амплитудно-частотная характеристика СВЧ фильтра. с - амплитудно-частотная характеристика резонатора с фильтром. d - Первая резонансная частота резонатора на АЧХ.

На АЧХ резонатора (рис 7.а) видны три пика соответствующие трем собственным частотам резонатора. Левый пик соответствует интересующей

меня первой резонансной частоте. Наличие еще двух пиков подтверждает то предположение, что в резонаторе при возбуждении могут возникать колебания на разных собственных частотах, что при использовании резонаторного детектора может привести к зашумлению получаемого сигнала. Для уменьшения зашумления было принято решение использовать СВЧ фильтр для отсекаания сигналов на старших собственных частотах, который значительно уменьшает амплитуду колебаний с высокими частотами. На АЧХ фильтра (рис 7.б) видно, что граничная частота фильтра позволяет эффективно давить сигналы соответствующие колебаниям на высших резонансных частотах. На рисунке маркером обозначена первая резонансная частота. Видно, что сигналы с частотой выше 3,5 ГГц гасятся фильтром, что подтверждает рисунок 7.с. При подключении СВЧ фильтра, амплитуда колебаний на высших собственных частотах значительно уменьшилась.

Дальше по полученным данным была измерена добротность и первая резонансная частота резонатора (см.рис. 7.d). Измеренная добротность составила $Q = 105$. Измеренное значение первой резонансной частоты - $f_0 = 2,762$ ГГц, она же несущая частота сигнала.

Используя формулы (1),(4) и полученные значения добротности и резонансной частоты были рассчитаны время релаксации колебаний $T_p = 1.21 \cdot 10^{-8}$ с. Параметры резонатора Q и f_0 определяют характеристики сигнала с измерительной антенны (1) представленную на рисунке 8.

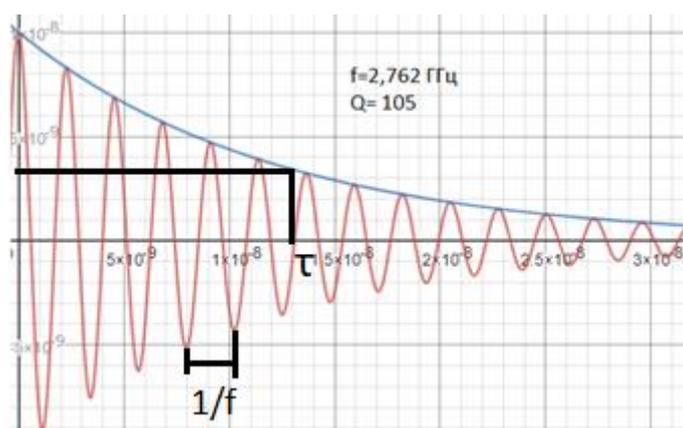


Рисунок 8 Расчетная форма сигнала с резонатора.

4.2. Моделирование ударного возбуждения колебаний в резонаторе.

На втором этапе работы мы убедились, что характеристики сигнала с резонатора при его ударном возбуждении совпадают с рассчитанными на

первом этапе. Для этого было проведено моделирование возбуждения резонатора короткими импульсами (см. рис. 6) с генератора испытательных импульсов И1-15, подаваемыми на центральную штыревую антенну. В данном эксперименте была важна длина переднего фронта импульса. Она должна быть достаточно малой (порядка 1 нс) для того чтобы в спектре возбуждающего импульса были частоты, близкие к резонансным. Форма сигнала с генератора и передний фронт сигнала представлены на рисунке 9.1,2. Измеренный сигнал с антенны показан на рис 10.

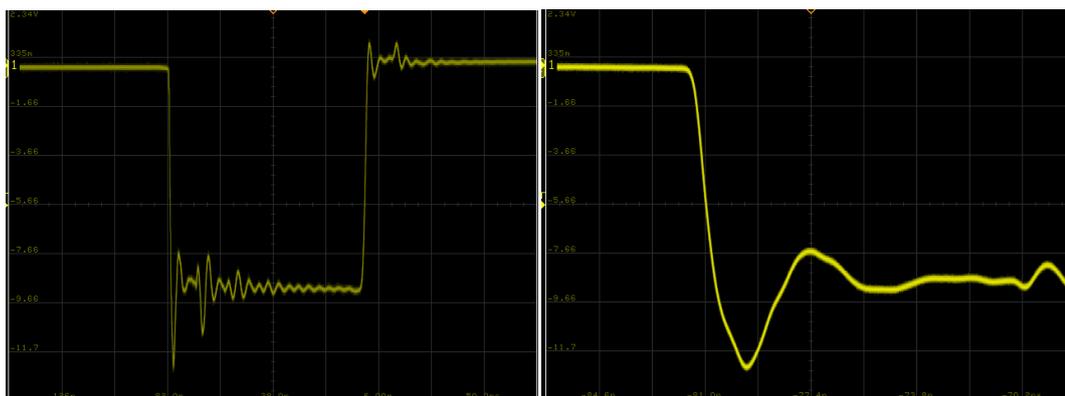


Рисунок 9 1.Форма сигнала с генератора(слева), 2.Передний фронт сигнала(справа)

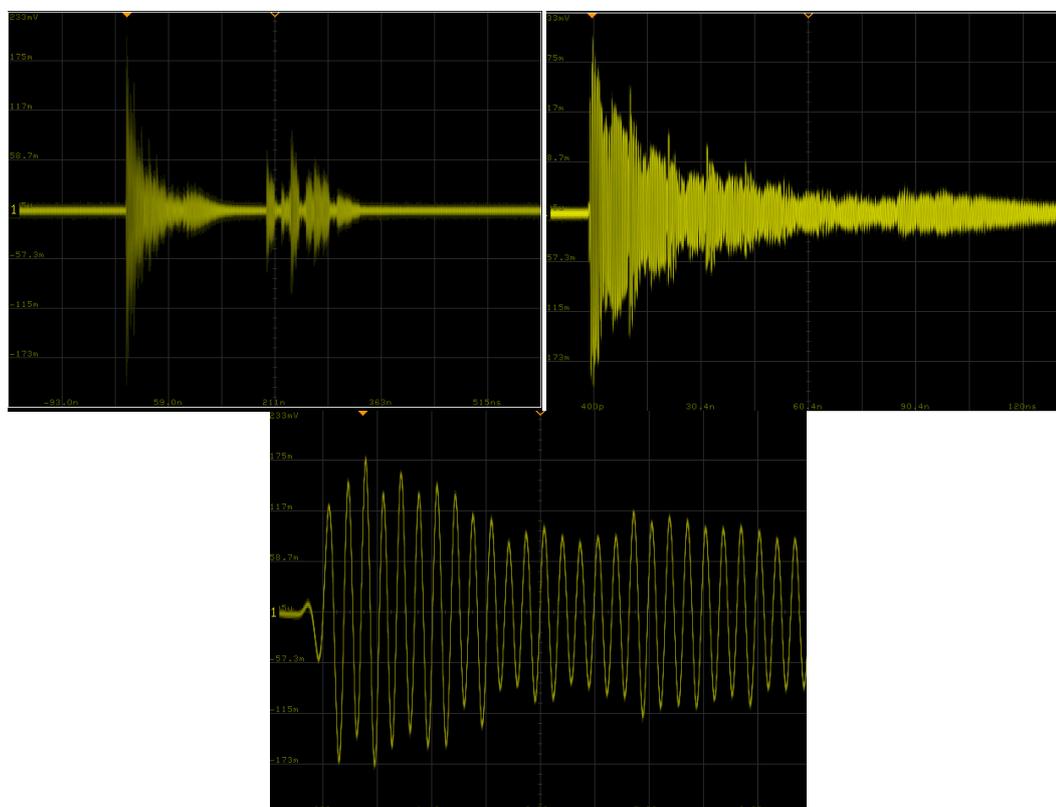


Рисунок 10 Показания осциллографа с различным временным разрешением.

5. Обработка результатов.

Из анализа графиков сигналов, были получены, значения времени затухания и несущей частоты. Данные измерений представлены в таблицах 1,2.

Таблица.1 измеренное время релаксации колебаний. N – номер измерения. T – измеренное время релаксации.

N	1	2	3
$T \cdot 10^{-8}$	1,40	1,30	1,25

$$T_{\text{н}} = \frac{1,4+1,3+1,25}{3} = 1,31 \cdot 10^{-8} \text{C}$$

Измеренное время релаксации на 8% отличается от рассчитанного на первом этапе $T_p = 1.21 \cdot 10^{-8} \text{C}$, и кроме того колеблется при измерениях. Это вызвано тем, что в резонаторе имеются отверстия, через которые идет активное излучение, из-за чего на добротность резонатора неконтролируемым образом влияли внешние условия.

Таблица.2 измеренный период колебаний на несущей частоте. N – номер измерения. T - координата пика на графике сигнала. dt – расстояние между соседними пиками(период колебаний).

N	1	2	3	4	5	6
$T \cdot 10^{-10} \text{C}$	0,422	4,03	7,64	11,3	14,9	18,9
$dt \cdot 10^{-10} \text{C}$	-	3,61	3,61	3,66	3,6	3,6

$$T = \frac{3,61+3,61+3,66+3,6+3,6}{5} \cdot 10^{-10} = 3,615 \cdot 10^{-10} \text{C}$$

Тогда частота $f = \frac{1}{T} = 2,765 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ совпадает с резонансной частотой резонатора $f_0 = 2,762 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ определенной на первом этапе работы.

6. Заключение.

В результате работы:

- 1) Были измерены основные параметры пролетного резонатора - добротность и первая резонансная частота. Они составили $Q = 105$, $f_0 = 2,762 \text{ ГГц}$.
- 2) На основе измеренных данных предсказаны временные характеристики сигнала снимаемого с резонатора при его ударом возбуждении и последующем затухании. Время релаксации $T_p = 1.21 \cdot 10^{-8} \text{C}$.

3) Экспериментально промоделировано ударное возбуждение резонатора. Зафиксирован сигнал с боковой антенны. Временные характеристики полученного сигнала $f = 2,765$ ГГц и $T_{и} = 1,31 \cdot 10^{-8}$ с с хорошей точностью совпадают с расчетными.

7. Благодарности.

Я искренне благодарен моему научному руководителю Константину Владимировичу Губину за ознакомление с предметом исследования и за объяснение общей логики проведения измерений, и особенно благодарен за замечания и важнейшие советы при оформлении данной работы. Также я выражаю благодарность Сергею Леонидовичу Самойлову за объяснения множества тонкостей работы с СВЧ цепями и измерительными приборами.

8. Литература.

- [1] Lipka, D., and S. Vilcins. "BPMs from Design to real Measurement." *Development* 1.2 (2014): 2-2.
- [2] Lipka, Dirk, Jorgen Lund-Nielsen, and Michael Seebach. "Resonator for charge measurement at REGAE." *Proceedings of IBIC* (2013): 872.
- [3] Левичев, А. Е., and В. М. Павлов. "Линейные СВЧ ускорители: электродинамика ускоряющих структур. Учебное пособие." *Н.: ИЯФ_НГТУ* 158 (2014).46.c
- [4] https://www.webmath.ru/poleznoe/fizika/fizika_46_zatuhajushhie_kolebanija.php
- [5] [6] [7] bog5.in.ua/lection/labrab/vibration/lr59.html
- [8] <https://www.keysight.com/main/techSupport.jsp?pid=1350041&cc=RU&lc=rus>
- [9] <https://vostok-nsk.ru/vostok/ostsillografy/dsox6002a-ostsillograf-tsifrovoy/>
- [10] printsip.ru/kalibratory-dlya-impulsnykh-izmerenij-i1-i2/item/i1-15
- [11] https://www.etalonpribor.ru/catalog/usiliteli_izmeritelnie/product/m42164-2_maloshumyashchiy_shirokopolosnyy_tranzistorniy_usilitel_/