

П.А. Корнев, В.И. Шведунов

**РЕЗОНАНСНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В
ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ
СТРУКТУРЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2009 – 13/857

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

П.А. Корнев, В.И. Шведунов

**РЕЗОНАНСНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В
ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ
СТРУКТУРЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2009 – 13/857

E-mail addresses: shved@depni.sinp.msu.ru

P.A. Korenev, V.I. Shvedunov

**RESONANCE STORING OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD ENERGY IN
DIFFRACTION ACCELERATING STRUCTURE**

Preprint INP MSU – 2009 – 13/857

Abstract

We describe experimental results for the resonance storing of electromagnetic field energy in the diffraction accelerating structure which can be used for relativistic electrons acceleration with high gradient in mm and sub-mm wavelength ranges.

П.А. Корнев, В.И. Шведунов

**РЕЗОНАНСНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ПОЛЯ В ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2009 – 13/857

Аннотация

В работе описаны результаты экспериментального исследования резонансного накопления энергии электромагнитного поля в дифракционной ускоряющей структуре, которая может быть использована для ускорения релятивистских электронов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн с высоким ускоряющим градиентом.

© Корнев П.А., 2009

© Шведунов В.И., 2009

© НИИЯФ МГУ, 2009 <http://www.sinp.msu.ru>

Введение¹

Одной из центральных задач современной ускорительной физики является увеличение темпа набора энергии заряженных частиц с целью достижения более высоких энергий в более компактных установках. Одним из методов решения этой задачи является уменьшение длины волны электромагнитного поля, используемого для ускорения частиц, вплоть до оптического диапазона, в котором существуют источники поля – лазеры с мощностью превышающей десятки тераватт и создание ускоряющих структур, способных работать в этом диапазоне длин волн.

Исследуемая в настоящей работе дифракционная ускоряющая структура была предложена для диапазона длин волн инфракрасного излучения [1]. Однако, выполненные ранее теоретические и экспериментальные исследования показали перспективность ее использования и в миллиметровом диапазоне длин волн [2], где традиционные ускоряющие структуры типа диафрагмированного волновода или цепочки связанных закрытых резонаторов неприменимы.

Поскольку мощность источников электромагнитного поля в миллиметровом диапазоне длин волн существенно меньше мощности лазеров, достижение высокой конечной энергии и повышение эффективности ускорения возможно за счет накопления энергии электромагнитного поля в открытом резонаторе, образованном дифракционной структурой.

В работе представлены результаты экспериментального исследования эффекта накопления энергии электромагнитного поля в дифракционной ускоряющей структуре. Описана экспериментальная установка и методика измерения распределения поля и оценки фактора накопления поля, представлены результаты измерений.

¹ Работа поддержана грантом РФФИ 08-02-00273

1. Свойства дифракционной ускоряющей структуры

Схематический вид дифракционной ускоряющей структуры показан на Рис.1. Структура состоит из двух параллельных проводящих дифракционных решеток, погруженных в слой диэлектрика. Структура с двух сторон симметрично облучается плоскими линейно поляризованными волнами с вектором электрического поля перпендикулярным полосам решетки. Длина волны падающего на структуру излучения равна периоду дифракционных решеток. Ось пучка ускоряемых электронов расположена в медианной плоскости структуры и перпендикулярна полосам дифракционных решеток.

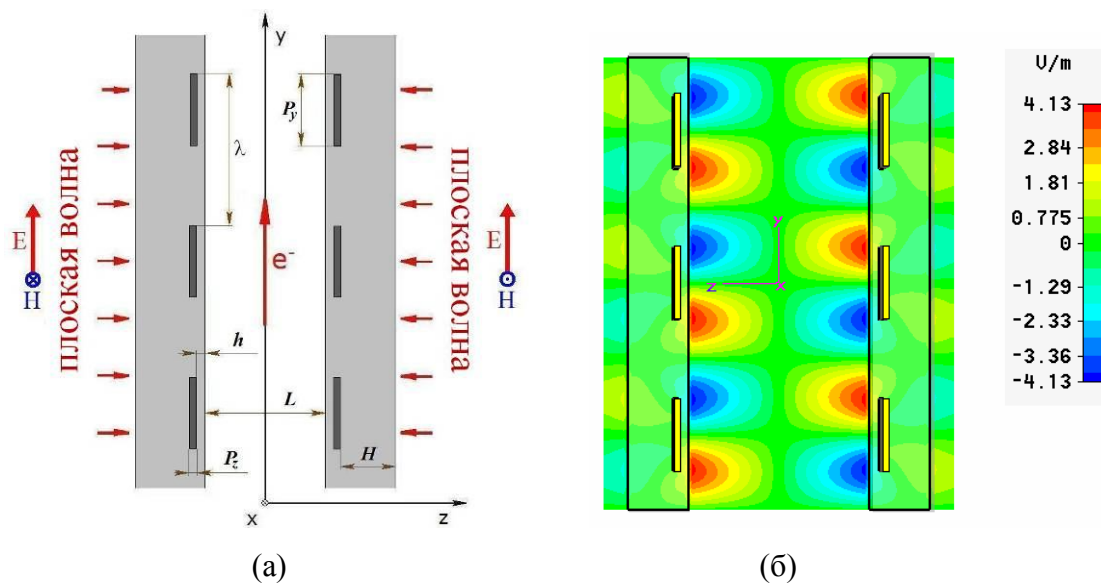


Рис. 1. Дифракционная ускоряющая структура (а) и электрическое поле при одностороннем облучении в некоторый момент времени (б).

При определенных параметрах ускоряющей структуры, таких как ширина и толщина проводящих полос, толщины внутреннего и внешнего слоев диэлектрика, возможно получение распределения электромагнитного поля внутри структуры, обеспечивающего ускорение частиц вдоль оси y в каждом полупериоде структуры [1-3] (Рис. 2), при этом, амплитуды поля в соседних полупериодах близки по абсолютной величине, а сдвиг фазы поля между полупериодами составляет 180° . Особенностью структуры является то, что ее рабочая апертура практически равна расстоянию между решетками, т.е. близка к длине волны электромагнитного поля, в то время как в классических ускоряющих структурах рабочая апертура составляет лишь около $1/10$ длины волны.

Первоначально параметры дифракционной ускоряющей структуры были оптимизированы для работы в диапазоне длины волны 10.2 мкм (CO_2 лазер) с использованием селенида цинка в качестве диэлектрика. В исследованиях на

высокочастотном аналоге [2] параметры структуры были масштабированы с учетом различия диэлектрической проницаемости используемого в аналоге оргстекла и селенида цинка.

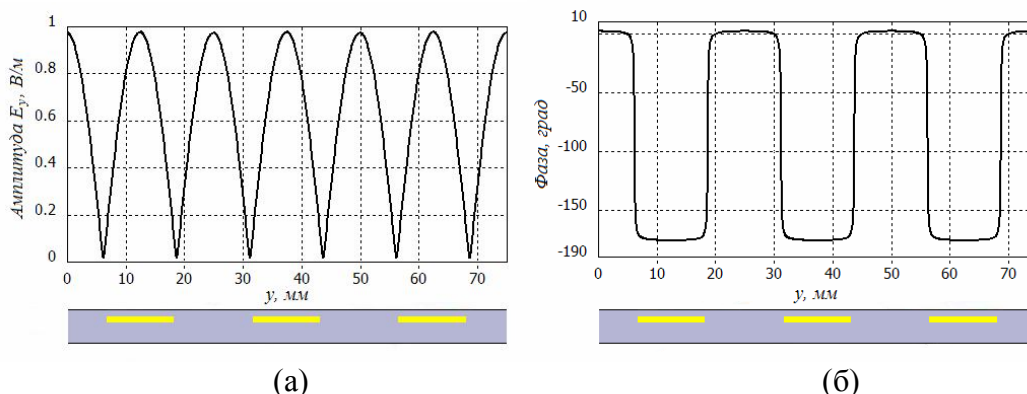


Рис.2. Распределение ускоряющей компоненты поля (а) и ее фазы (б).

Дифракционная ускоряющая структура фактически представляет собой открытый резонатор типа резонатора Фабри-Перо, частотная характеристика которого существенно усложнена специфической зависимостью от частоты комплексного коэффициента отражения решеток. Особенностью структуры, описанной в [1-2], является то, что рабочее распределение ускоряющего поля достигается вдали от резонанса открытого резонатора, при этом время установления рабочего распределения поля близко к времени распространения электромагнитной волны внутри резонатора. Данное обстоятельство весьма важно при работе с мощным излучением лазера, поскольку лучевая стойкость структуры существенно ухудшается с увеличением длительности лазерного импульса свыше 10 пс в связи с изменением механизма разрушения поверхности [4].

При работе вне резонанса амплитудное значение напряженности ускоряющего поля в структуре близко к напряженности поля падающей волны, что в диапазоне длин волн 1-10 мкм может позволить достичь ускоряющего градиента около 1 ГэВ/м, ограничиваемого лишь лучевой прочностью структуры. Однако при переходе в миллиметровый диапазон длин волн, где отсутствуют источники электромагнитного поля, сопоставимые по мощности с лазерами, достижимые ускоряющие градиенты становятся весьма низкими. Например, при длине волны 1 мм, длине ускоряющей структуры 10 см и мощности источника электромагнитного поля 1 ГВт ускоряющий градиент составит около 60 МэВ/м. Следует учесть, что классические ускоряющие структуры типа диафрагмированного волновода или цепочки связанных закрытых резонаторов вообще неприменимы в этом диапазоне длин волн.

Одним из способов увеличения ускоряющего градиента дифракционной ускоряющей структуры при фиксированной мощности источника является работа вблизи резонанса открытого резонатора, т.е. использование эффекта накопления энергии электромагнитного поля. Безусловно, характер распределения электромагнитного поля при этом должен соответствовать требованию эффективного ускорения частиц. Возможность достижения требуемого распределения поля при работе вблизи резонанса не очевидна.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 3, и методика измерений детально описаны в [2]. Дифракционные решетки A и B укреплены на подвижных платформах, обеспечивающих их взаимное перемещение вдоль оси x в диапазоне до 100 мм с сохранением положения медианной плоскости относительно излучающей (1) и приемной (2) рупорных антенн. Рупорная антенна (1) излучает поляризованную вдоль оси y волну в направлении перпендикулярном полосам дифракционных решеток A и B . Дополнительная рупорная антенна (3) расположена перпендикулярно оси x . Измерение коэффициентов S -матрицы S_{11} и S_{21} осуществляется с помощью сетевого анализатора Agilent 8719ES (4), связанного через GPIB порт с управляющим компьютером (5).

Измерения распределения поля проводится с помощью пробного тела (6), представляющего собой диск из поглощающего материала, укрепленный на тонкой леске и перемещаемый вдоль оси y шаговым двигателем. На каждом шаге сетевым анализатором измеряется коэффициент переходного ослабления S_{21} , изменение которого пропорционально напряженности электрического поля в месте положения пробного тела вследствие рассеяния на нем электромагнитного поля.

Относительное (нормированное на амплитуду падающей волны) распределение электрического поля может быть оценено с помощью следующего соотношения [2]:

$$|e(y)| \approx \frac{10^{\frac{S_{21}^0}{20}} [S_{21}^0 - S_{21}(y)]}{20\chi}, \quad (1)$$

где χ - параметр, определяемый геометрией пробного тела и его комплексной диэлектрической проницаемостью, S_{21}^0 - переходное ослабление в отсутствии

пробного тела.

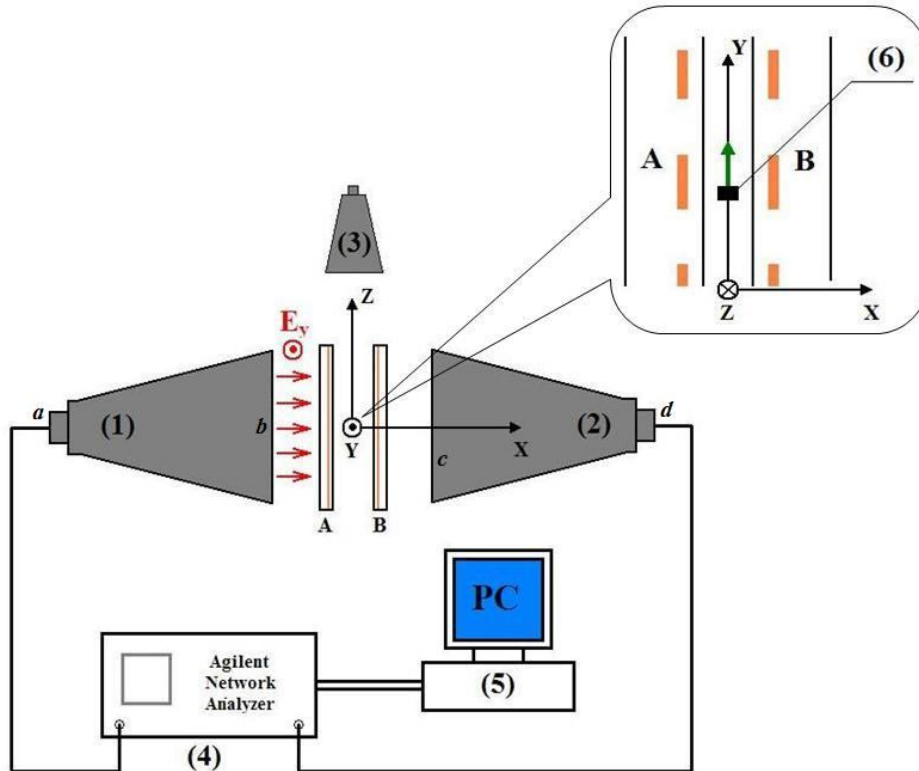


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

Измерение переходного ослабления между рупорными антеннами (1) и (3), $S_{21}(3)$, позволяет определить соотношение фаз поля в соседних полупериодах ускоряющей структуры [2].

3. Результаты измерений

Измерения проводились с решетками, изготовленными из пластин оргстекла толщиной 10 мм, шириной и длиной 400 мм. На поверхности пластины фрезерованы двенадцать канавок глубиной 1 мм и шириной 12 мм, следующие с периодом 25 мм. В канавки вклеены алюминиевые полосы толщиной 1 мм, шириной 12 мм, длиной 400 мм и покрыты сверху тонкой пластиной из оргстекла толщиной 1.5 мм.

Для выявления тех расстояний между решетками, при которых возможно резонансное накопление энергии электромагнитного поля, были выполнены измерения коэффициентов S-матрицы S_{11} , S_{21} и $S_{21}(3)$ в зависимости от расстояния между решетками. Измерения проводились на частоте 12 ГГц, (длина волны 25 мм равна периоду решетки). Результаты представлены на Рис. 4. Коэффициент S_{11} нормирован таким образом, что $S_{11}=0$ соответствует полному отражению электромагнитной волны от структуры. Для такой нормировки

измерялось значение S_{11} при установке проводящей пластины из алюминия вместо решетки A (рис. 3), полученное значение вычиталось из результатов измерений. Для нормировки коэффициента S_{21} его значение, измеренное при отсутствии структуры, вычиталось из данных, полученных со структурой. Нормировка коэффициента $S_{21}(3)$ произвольна, средний уровень для данного коэффициента зависит от положения рупора (3). Отметим, что зависимости S_{11} и S_{21} от расстояния между решетками измерялись на данной установке и ранее с различными расстояниями между рупорами и различным качеством изготовления решеток, при этом все наблюдаемые особенности хорошо воспроизводятся, т.е. они не носят случайный характер.

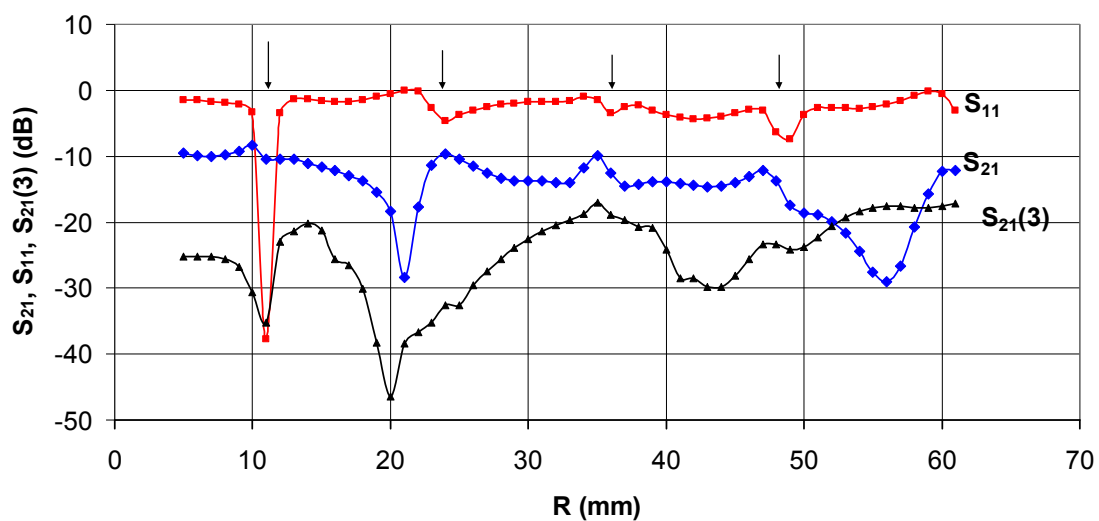


Рис. 4. Графики зависимостей коэффициентов S_{11} , S_{21} и $S_{21}(3)$ от расстояния между решетками.

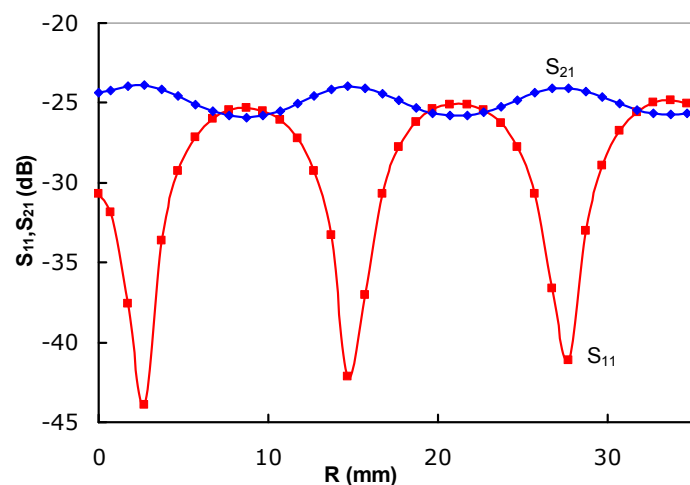


Рис. 5. Зависимости коэффициентов S_{11} и S_{21} от расстояния между пластинами для классического резонатора Фабри-Перо [5]

Сопоставим эти результаты с результатами измерений для классического резонатора Фабри-Перо, выполненных ранее на данной установке с пластинами из оргстекла без проводящих полос на частоте 12 ГГц [5] (Рис. 5). Данные представлены без калибровки.

В классическом резонаторе Фабри-Перо в области резонансов, расположенных на расстоянии половины длины волны (12.5 мм в данном случае), наблюдаются минимум коэффициента отражения (S_{11}) и максимум коэффициента пропускания (S_{21}). Положение первого резонанса определяется положением эффективных отражающих плоскостей.

Как видно из Рис. 4, проводящие полосы дифракционных решеток существенно усложняют структуру резонансов. Возможное положение резонансов, аналогичных резонансам резонатора Фабри-Перо, отмечено стрелками. Эти резонансы, следующие с периодом в половину длины волны, отчетливо видны как минимумы на кривой коэффициента отражения. Соответствующие максимумы коэффициента пропускания при этом сдвинуты в область меньших расстояний между решетками. Наряду с резонансами резонатора Фабри-Перо в кривой пропускания наблюдаются два глубоких резонанса, при 21 мм и 56 мм.

Интенсивность сигнала, регистрируемого рупором №3, содержит информацию о накоплении энергии в резонаторе и ее утечке в окружающее пространство через открытые боковые стороны. Например, резонанс при $R = 11$ мм, характеризующийся слабым отражением сигнала от структуры, достаточно высоким пропусканием и слабой утечкой излучения является классическим резонансом резонатора Фабри-Перо. Резонанс в кривой пропускания области 21 мм, по-видимому, связан с отражением сигнала от входной решетки, поле при этом внутри резонатора не возбуждается. Наконец, резонанс при 56 мм может быть обусловлен накоплением энергии в резонаторе, из-за взаимодействия проводящих полос решеток, и ее значительной утечке через боковые стороны.

С помощью описанной выше методики были выполнены измерения распределения поля для каждого из резонансов в некотором диапазоне расстояний между решетками. Отметим, что ранее распределение поля, пригодное для ускорения частиц, было найдено вне резонанса для расстояния 32 мм (Рис. 6) [2]. Эффект накопления энергии электромагнитного поля был обнаружен в области резонанса, расположенного около $R = 56$ мм. Распределения поля для данного

расстояния между решетками показано на Рис. 6. Данные в обоих случаях представлены без поправки на калибровку.

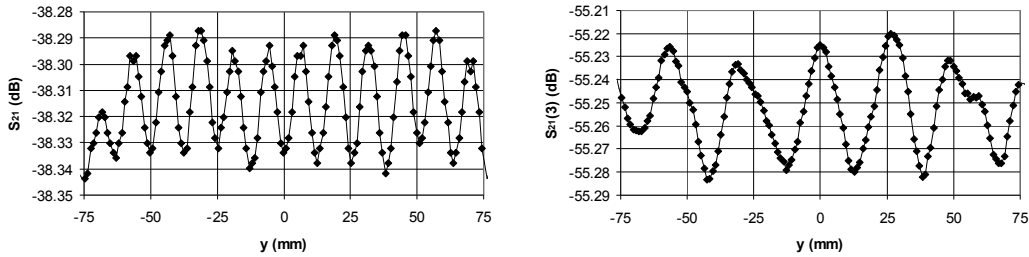


Рис. 5. Переходное ослабление S_{21} (а) и $S_{21(3)}$ (б) при перемещении пробного тела для расстояния между решетками 32 мм [2].

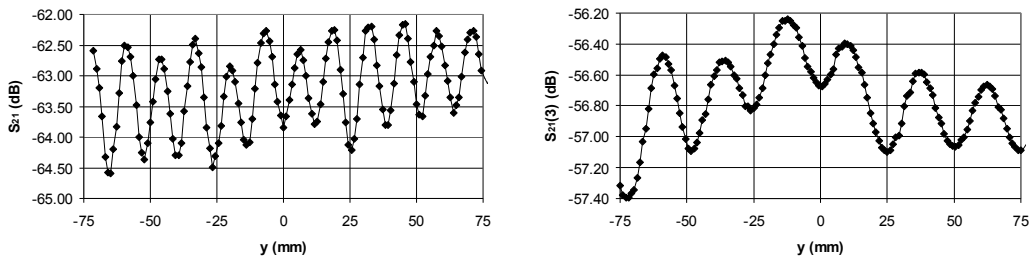


Рис. 6. Переходное ослабление S_{21} (а) и $S_{21(3)}$ (б) при перемещении пробного тела для расстояния между решетками 56 мм.

Эффект накопления поля проявляется в увеличении глубины модуляции коэффициента пропускания структуры при протягивании пробного тела. Фактор увеличения относительной амплитуды ускоряющего поля для двух расстояний между решетками может быть оценен в результате сравнения максимальных амплитуд относительного распределения поля для этих двух случаев:

$$\kappa = \frac{\max |e(y)|_{(1)}}{\max |e(y)|_{(2)}} \approx 10^{\frac{[S_{21}^0]_1 - [S_{21}^0]_2}{20}} \frac{\max [S_{21}^0 - S_{21}(y)]_{(1)}}{\max [S_{21}^0 - S_{21}(y)]_{(2)}}, \quad (2)$$

Анализируя данные для расстояний между решетками 56 мм и 32 мм получаем: $[S_{21}^0]_{(56mm)} \approx -63.5$ дБ, $[S_{21}^0]_{(32mm)} \approx -38.3$ дБ, $\max [S_{21}^0 - S_{21}(y)]_{(56mm)} \approx 2$ дБ, $\max [S_{21}^0 - S_{21}(y)]_{(32mm)} \approx 0.04$ дБ получаем оценку фактора увеличения относительной амплитуды ускоряющего поля равной 2.7.

4. Заключение

Обнаруженный эффект накопления поля имеет место в области резонанса в кривой пропускания вне области резонансов типа резонанса резонатора Фабри-Перо. Распределения поля, полученные в области указанных резонансов, не соответствуют требованиям, предъявляемым к ускоряющему полю. Следует учесть, что параметры дифракционной структуры, изученной в данной работе,

были оптимизированы для работы в нерезонансных условиях. Таким образом, необходимо провести оптимизацию структуры с целью получения требуемого распределения поля в области резонанса типа резонанса резонатора Фабри-Перо.

Литература

1. С.В.Абрамов, Ю.К.Алексеев, Д.А.Заярный, Б.С.Ишханов, В.И.Шведун. Дифракционная ускоряющая структура π -вида. Письма в ЖТФ, том 30, вып. 12 (2004), стр. 44-49.
2. А.А. Ветров, Д.А. Заярный, Б.С. Ишханов, А.Н. Каманин, Н.И. Пахомов, В.И. Шведун, Высокочастотный аналог дифракционной ускоряющей структуры, Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 22/821, 17 стр.
3. A.Yu. Baranov, A.N. Kamanin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, Diffraction Accelerating Structure Field Distribution Measurements, Труды XXI Российской конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2008, стр. 209
4. В.И.Шведун, Ю.К.Алексеев, А.А.Ветров, Д.А.Заярный, Б.С.Ишханов, А.А.Косарев, А.В.Лукин, А.К.Лукашевич, Т.А.Миронова, Н.И.Пахомов, А.В.Посеряев, Линейный дифракционный ускоритель заряженных частиц, Препринт НИИЯФ МГУ-2004-25/764, 50 стр.
5. А.Ю. Баранов, Теоретическое и экспериментальное исследования дифракционной ускоряющей структуры, Дипломная работа, физический факультет МГУ, Москва, 2008

Пётр Александрович Корнев¹
Василий Иванович Шведунов²

¹Физический факультет МГУ, 119992, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр 2

²Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, 119991, Москва, Ленинские горы,
д. 1, стр 2

**РЕЗОНАНСНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В
ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2009 – 13/857

Работа поступила в ОНТИ 24 декабря 2009 г.