

**А.А. Ветров, Д.А. Заярный, Б.С. Ишханов, А.Н. Каманин,
Н.И. Пахомов, В.И. Шведунов**

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ АНАЛОГ
ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ
СТРУКТУРЫ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 22/821

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

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

**А.А. Ветров, Д.А. Заярный, Б.С. Ишханов, А.Н. Каманин,
Н.И. Пахомов, В.И. Шведунов**

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ АНАЛОГ
ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ
СТРУКТУРЫ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 22/821

УДК 621.039

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

**A.A. Vetrov, D.A. Zayarny, B.S. Ishkhanov, A.N. Kamanin, N.I. Pakhomov,
V.I. Shvedunov**

**MICROWAVE ANALOG OF THE DIFFRACTION ACCELERATING
STRUCTURE**

Preprint INP MSU – 2006 – 22/821

Abstract

We describe experimental set-up and results of characteristic measurements for microwave analog of the diffraction accelerating structure.

**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

Аннотация

В работе описана экспериментальная установка и результаты измерения характеристик высокочастотного аналога дифракционной ускоряющей структуры.

© Ветров А.А., 2006

© Заярный Д.А., 2006

© Ишханов Б.С., 2006

© Каманин А.Н., 2006

© Пахомов Н.И., 2006

© Шведун В.И., 2006

© НИИЯФ МГУ, 2006 <http://www.sinp.msu.ru>

Введение¹

Использование высокочастотных аналогов является мощным методом экспериментального исследования оптических систем, позволяющим, в ряде случаев, изучать характеристики, недоступные в оптических методах, достигать большей точности измерений и в большем диапазоне изменять параметры системы. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования высокочастотного аналога дифракционной структуры, предложенной в работе [1] для ускорения электронов в вакууме в ближней зоне на длине волны 10.6 мкм с целью достижения ускоряющего градиента до 1 ГэВ/м. Схематический вид структуры показан на Рис. 1. Структура, состоящая из двух погруженных в диэлектрик проводящих дифракционных решеток, облучается с двух сторон плоскими линейно поляризованными волнами с вектором электрического поля, направленным перпендикулярно полосам решеток. Период решетки равен рабочей длине волны электромагнитного поля. Фазы волн подобраны таким образом, что в медианной плоскости образуется модулированное вдоль оси z поле, обеспечивающее эффективное ускорение релятивистских частиц. Основные параметры структуры приведены в работе [2]. Для экспериментального подтверждения требуемого характера распределения ускоряющего поля, определения допусков на точность изготовления и установки элементов структуры нами был рассчитан и изготовлен макет ускоряющей структуры в СВЧ диапазоне. Была создана автоматизированная установка и проведены измерения распределения электромагнитного поля и других характеристик ускоряющей структуры. Результаты измерений подтверждают возможность использования дифракционной структуры для ускорения заряженных частиц.

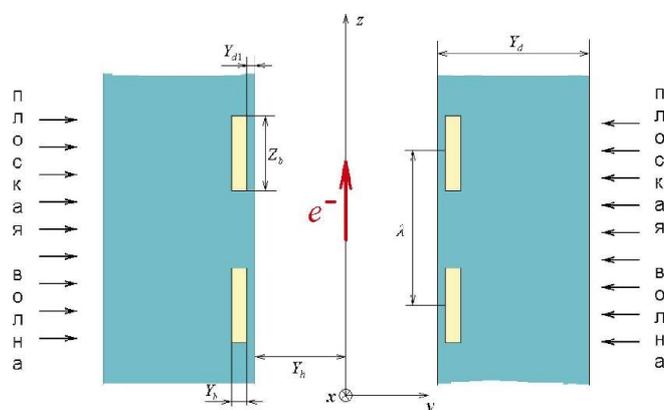


Рисунок 1. Дифракционная ускоряющая структура.

¹ Работа поддержана грантом РФФИ 05-02-16351

1. Параметры высокочастотного аналога

Выбор рабочей длины волны высокочастотного аналога дифракционной ускоряющей структуры определялся, в первую очередь, комплектом имеющегося СВЧ оборудования: сетевым анализатором Agilent 8719ES (диапазон частот 50 МГц – 13.6 ГГц) [3] и рупорными антеннами П6-23А (диапазон частот 1-12 ГГц) [4]. Для получения достоверной информации о распределении поля дифракционные решетки должны содержать достаточное число полос в пределах пространственной области с малыми фазовыми искажениями фронта волны рупорной антенны. В этой связи, нами была выбрана минимально возможная длина волны $\lambda_0=25$ мм ($f_0=11.991$ ГГц), лежащая на границе рабочего диапазона частот рупорной антенны.

Были выполнены численные расчеты основных характеристик дифракционной решетки, в которой в качестве диэлектрика использовалось оргстекло. Расчеты проводились при одностороннем облучении решетки плоской волной. Критерием оптимальных характеристик структуры являлось получение требуемого распределения компоненты ускоряющего поля E_z в медианной плоскости вдоль оси z : близкие по абсолютной величине амплитуды поля в соседних полупериодах решетки со сдвигом фазы поля между полупериодами 180° . Результирующее распределение модуля E_z компоненты поля показано на Рис. 2. Основные параметры решетки, в соответствии с обозначениями Рис. 1, приведены в Таблице 1.

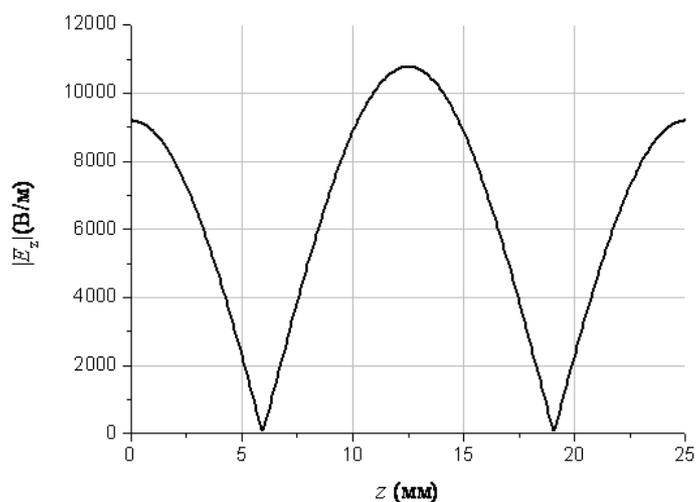


Рисунок 2. Распределение модуля E_z компоненты поля в медианной плоскости.

На Рис. 3 показаны распределения E_z и E_y компонент поля, рассчитанные при одностороннем облучении структуры плоской волной. Отметим, что экстремумы компоненты E_z в медианной плоскости располагаются напротив

центров проводящих полос и центров свободных участков, при этом знак компоненты поля в соседних полупериодах противоположен. Экстремумы компоненты E_y в медианной плоскости располагаются вблизи краев проводящих полос, знак компоненты поля также противоположен в соседних полупериодах. При двухстороннем облучении структуры компоненты поля E_z от двух волн складываются, а компоненты E_y и H_x вычитаются, благодаря чему в медианной плоскости отсутствуют поперечные силы, действующие на ускоряемую частицу.

Таблица 1. Основные параметры решетки.

$Y_b, \text{мм}$	1
$Y_{d1}, \text{мм}$	1.5
$Y_d, \text{мм}$	10
$Z_b, \text{мм}$	12
$\lambda_0, \text{мм}$	25

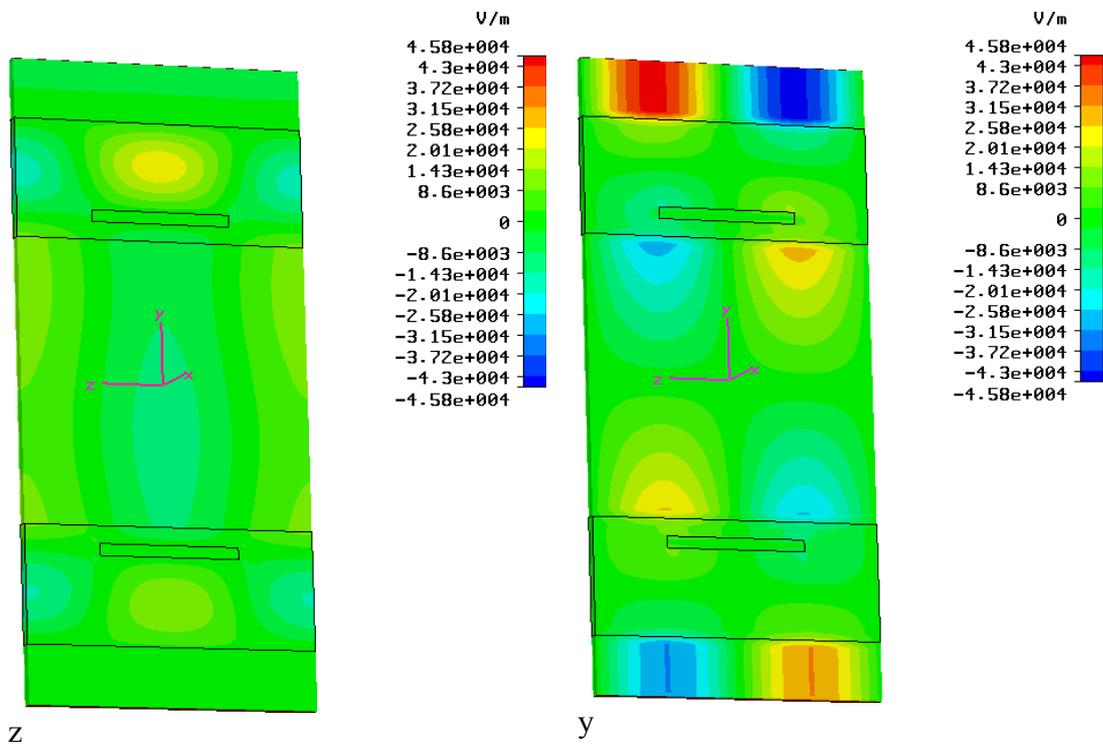


Рисунок 3. Распределение E_z и E_y компонент поля.

На основании результатов расчетов нами были изготовлены две дифракционные решетки, схематический вид которых приведен на Рис. 4. Решетки изготавливались посредством фрезерования девяти канавок шириной 12 мм и глубиной 1 мм с периодом 25 мм в основании из оргстекла толщиной 10 мм, шириной 340 мм и высотой 260 мм, последующей вклейки в них алюминиевых полос толщиной 1 мм и длиной 250 мм и покрытия их пластиной из оргстекла толщиной 1.5 мм.

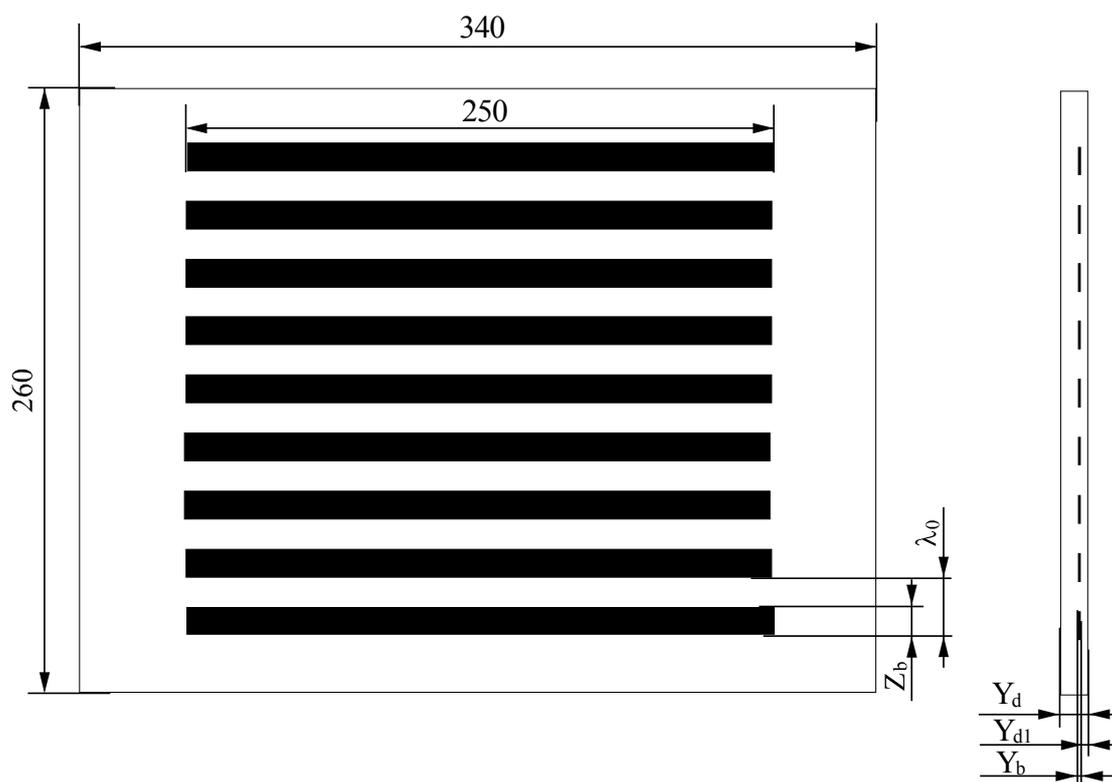


Рисунок 4 Схематический вид дифракционной решетки.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

На Рис. 5 приведена блок-схема, а на Рис. 6 фотография экспериментальной установки для измерения распределения электромагнитного поля и других характеристик дифракционной ускоряющей структуры. Дифракционные решетки (1а) и (1б) укреплены на подвижных платформах, обеспечивающих их взаимное перемещение вдоль оси y в диапазоне до 100 мм. Излучающая (2) и приемная (3) рупорные антенны типа Пб-23А закреплены неподвижно на расстоянии 240 мм между выходными плоскостями. Дополнительная рупорная антенна (4) с рабочим диапазоном частот 11.6-18 ГГц расположена под углом 90° на расстоянии 500 мм от бокового края решеток. Измерение коэффициентов S -матрицы S_{11} и S_{21} осуществлялось с помощью сетевого анализатора (5) типа Agilent 8719ES, связанного через GPIB порт с управляющим компьютером (6). Измерения распределения поля проводились с помощью пробного тела (7), укрепленного на тонкой леске и перемещаемого вдоль оси z шаговым двигателем (8). В качестве материала пробного тела использовались латунь, феррооксид, вода в пластиковой капсуле. Пробные тела имели форму цилиндра с различным соотношением высоты и диаметра.

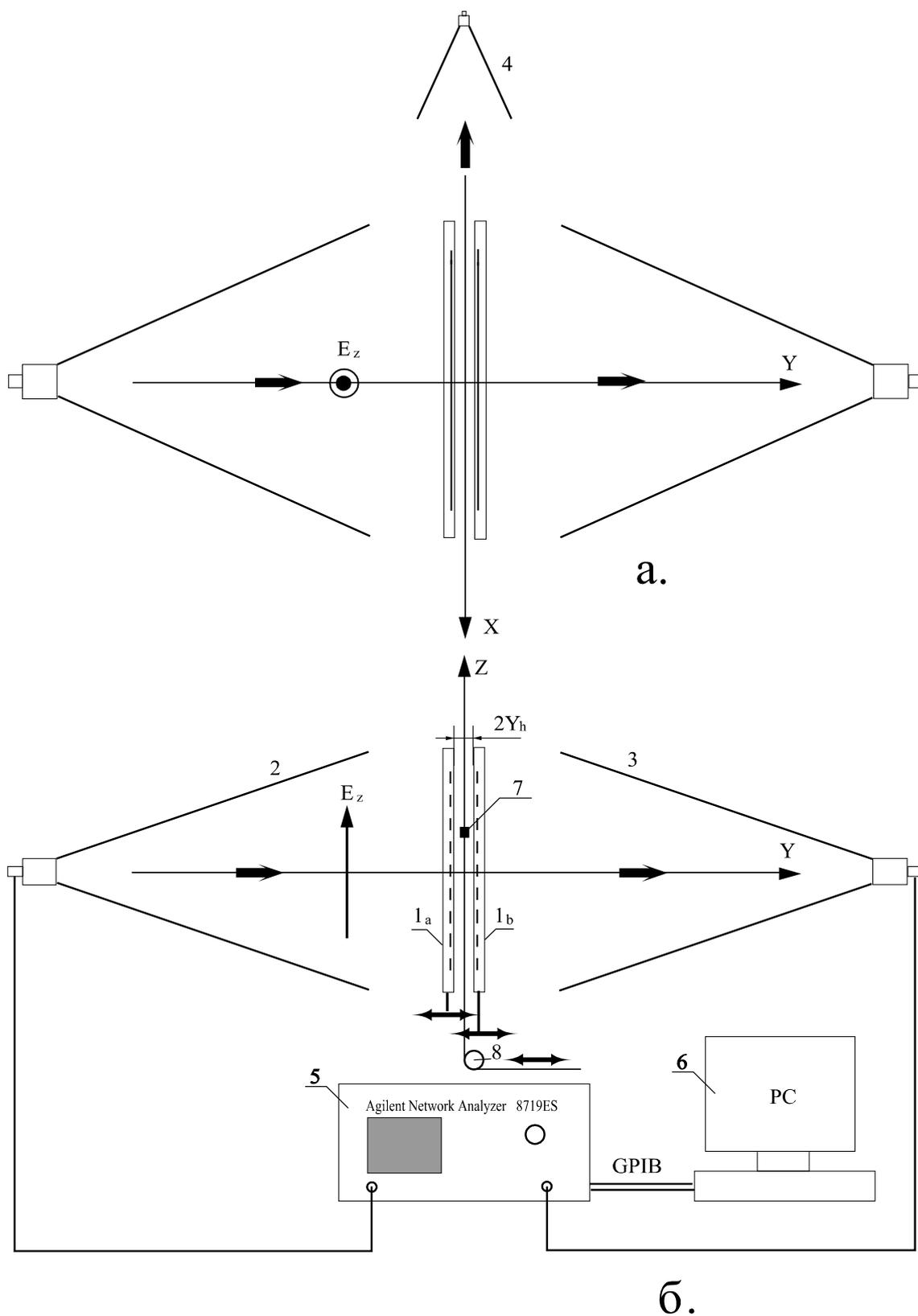


Рисунок 5. Схема экспериментальной установки. (а) – вид сверху, (б) – вид сбоку.



Рисунок 6. Фотография экспериментальной установки.

Оценки однородности распределения компоненты электрического поля E_z падающей волны и постоянства фазы ее фронта вдоль оси z в месте положения медианной плоскости ускоряющей структуры были получены с помощью дополнительной антенны с сечением входного окна 8×8 см². Измерения проводились на частоте 12 ГГц. На Рис. 7(а) приведена зависимость переходного ослабления, а на Рис. 7(б) фазы фронта волны от координаты z . С учетом результатов измерений для анализа распределения поля ускоряющей структуры нами использовался участок -75 мм $< z < 75$ мм.

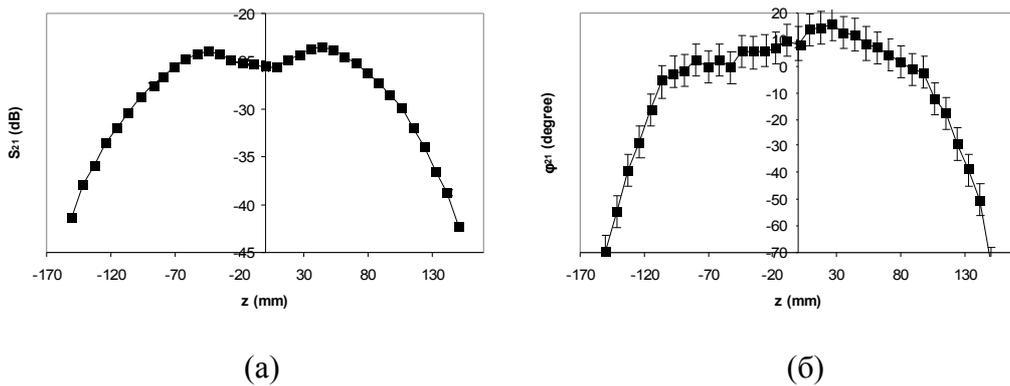


Рисунок 7. Переходное ослабление между антенной П6-23А и дополнительной антенной, перемещаемой вдоль оси z (а); фаза фронта волны - (б).

Для снижения влияния отражений от различных неоднородностей СВЧ тракта на результаты измерений нами использовалась возможность временной селекции сигнала от исследуемого участка тракта, заложенная в сетевом анализаторе Agilent 8719ES [3]. На Рис. 8(а) показана зависимость от времени амплитуды сигнала отраженного от различных элементов исследуемого тракта.

Синей линией показан сигнал, полученный при наличии ускоряющей структуры в тракте, красной – в ее отсутствие. В увеличенном масштабе сигналы показаны на Рис. 8 (б,в). На основе данных измерений нами было выбрано положение временных ворот для селекции исследуемой пространственной области в интервале 20.9 – 21.6 нс.

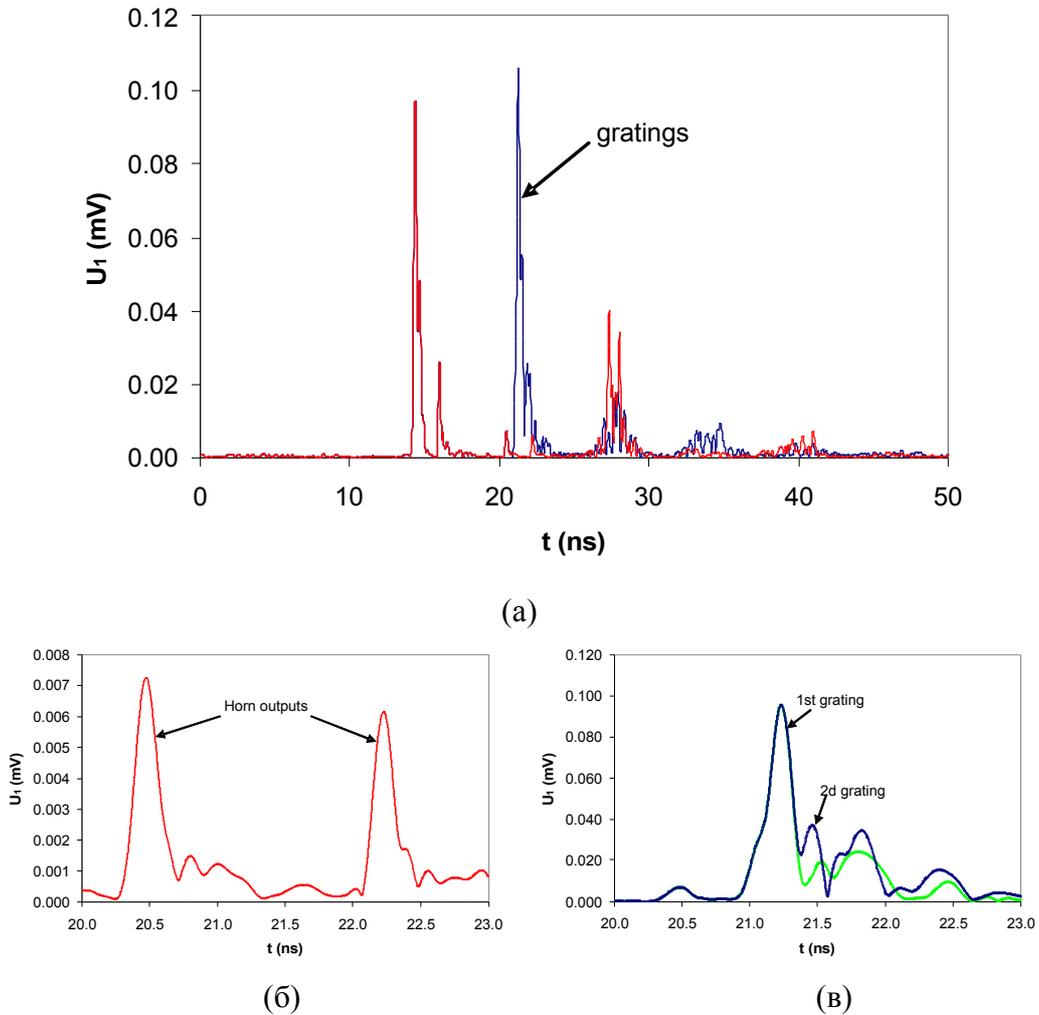


Рисунок 8. Временная зависимость амплитуды сигнала, отраженного от элементов СВЧ тракта. (а) Красная кривая – в отсутствие ускоряющей структуры, синяя – при ее наличии; (б) в отсутствие ускоряющей структуры в увеличенном масштабе; (в) зеленая линия - одна решетка, синяя – две решетки.

3. Результаты измерений

3.1 Одна решетка

На Рис. 9 показана зависимость от частоты переходного ослабления, вносимого одной дифракционной решеткой. При проведении измерений осуществлялась калибровка измерительного тракта “на проход” в отсутствие решетки. На частоте 8.7 ГГц наблюдается резонансный рост переходного ослабления. Данный эффект, по-видимому, аналогичен эффекту аномального

поглощения при дифракции света [5] и может объясняться возбуждением поверхностных волн (плазмонов) [6]. Более широкий резонанс наблюдается в диапазоне 11.5-12 ГГц.

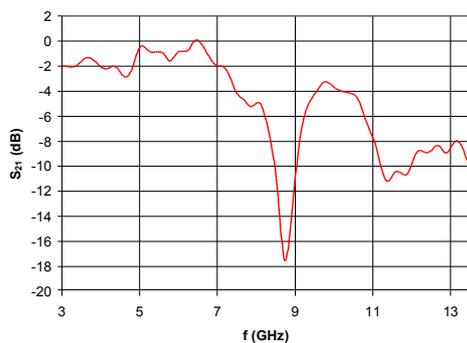


Рисунок 9. Переходное ослабление для одной решетки.

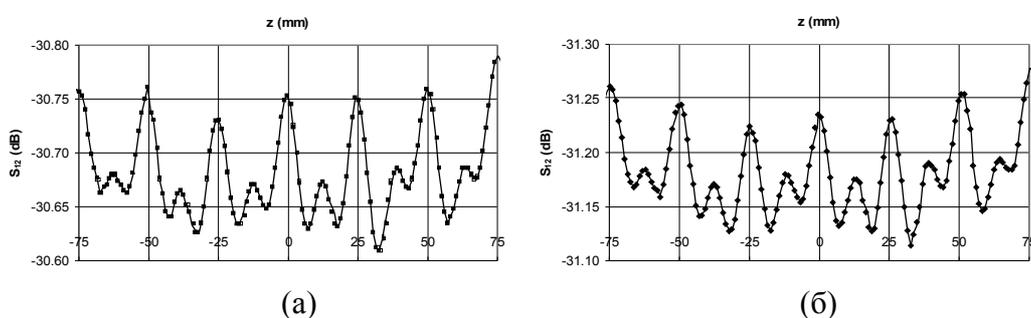


Рисунок 10. Изменение переходного ослабления при перемещении пробного тела на расстоянии 12 мм от поверхности решеток. (а) – установлена только решетка 1 а (Рис. 5); (б) - только решетка 1 б.

На Рис. 10 показана измеренная на частоте 12 ГГц (т.е. на длине волны, близкой к периоду решетки) зависимость переходного ослабления от положения пробного тела при протягивании его вдоль оси z на расстоянии 12 мм от поверхности тонкого слоя диэлектрика (а) – в случае, когда была установлена только решетка 1 а (Рис. 5) и (б) - только решетка 1 б. В качестве пробного тела использовался цилиндр из ферроэпоксида диаметром 8 мм и высотой 3 мм с осью, направленной вдоль оси z . Поскольку для данного типа измерений имеет значение относительные изменения переходного ослабления – калибровка анализатора “на проход” не проводилась.

Как видно из рисунков, независимо от того, облучалась ли решетка со стороны толстой подложки (решетка 1 а) или со стороны тонкого внутреннего слоя диэлектрика (1 б), особенности двух кривых весьма близки. Основные максимумы ослабления (на Рис. 10 использован обратный порядок значений по оси ординат), следующие с периодом решетки – 25 мм, располагаются напротив

центров проводящих полос. Максимумы меньшей величины располагаются вблизи центров свободных участков решетки.

Изменение переходного ослабления при протягивании пробного тела обусловлены поглощением и рассеянием электромагнитного поля. Поглощение энергии электромагнитного поля приводит к увеличению переходного ослабления между излучающим (2) и приемным (3) рупорами (Рис. 5). Рассеяние, вследствие интерференционных эффектов, может приводить как увеличению, так и к уменьшению переходного ослабления. Для пробного тела с характерными размерами существенно меньшими длины волны угловое распределение рассеянного излучения достаточно изотропно - параметр, характеризующий анизотропию углового распределения $\langle \cos\theta \rangle \approx 0$ - [7]. Поэтому, независимо от фазы рассеянной волны, основным эффектом рассеяния также будет увеличение переходного ослабления между рупорами (2) и (3).

Рассмотрим связь изменений переходного ослабления с модулем напряженности электрического поля в месте положения пробного тела. Пусть U_{in} - амплитуда сигнала на выходе рупора (2), U_{out} - амплитуда сигнала на входе рупора (3) в отсутствие пробного тела и $\Delta U_{out}(z)$ - изменение амплитуды сигнала на входе рупора (3) за счет поглощения и рассеяния электромагнитного поля пробным телом. Тогда измеряемое переходное ослабление, представленное на Рис. 10, может быть записано следующим образом:

$$S_{21}(z) = 20 \log \left(\frac{U_{out} - \Delta U_{out}(z)}{U_{in}} \right) \quad (1)$$

Полагая, что $\Delta U_{out}(z) \approx \chi |E(z)| U_{in}$, где χ - параметр, определяемый геометрией пробного тела и его комплексной диэлектрической проницаемостью, а $E(z)$ - напряженность электрического поля в месте положения пробного тела, усредненная по его объему, получаем следующее приближенное выражение для распределения электрического поля:

$$|E(z)| \approx \frac{10^{\frac{S_{21}^0}{20}} [S_{21}^0 - S_{21}(z)]}{20\chi}, \quad (2)$$

где S_{21}^0 - переходное ослабление в отсутствие пробного тела.

Из выражения (2) следует, что, амплитуда максимумов распределений переходного ослабления, представленных на Рис. 10, за вычетом уровня ослабления в отсутствие пробного тела (-30.61 дБ для Рис. 10(а) и -31.12 дБ для

Рис. 10 (б)), пропорциональна абсолютной величине максимумов напряженности электрического поля. Тот факт, что рупорная антенна (3) восприимчива, главным образом, к излучению, поляризованному вдоль оси z , позволяет предположить, что основной вклад в измеренное распределение поля вносит z -компонента электрического поля. Ниже, при анализе распределения поля для двух решеток, будут даны дополнительные аргументы в пользу данного предположения.

Таким образом, результаты измерений с одной дифракционной решеткой, погруженной в диэлектрик и облучаемой плоской волной поляризованной в направлении перпендикулярном направлению проводящих полос, показывают, что вблизи ее поверхности образуется стоячая волна. Эта стоячая волна, которая может рассматриваться как суперпозиция двух поверхностных волн бегущих перпендикулярно проводящим полосам решетки в противоположных направлениях [8], создает основу для использования дифракционных решеток для ускорения заряженных частиц.

3.2 Две решетки

При установке второй дифракционной решетки в зависимости переходного ослабления от частоты появляются дополнительные резонансы, положение и глубина которых зависят от расстояния ($2Y_h$ – Рис. 1) между решетками – Рис. 11.

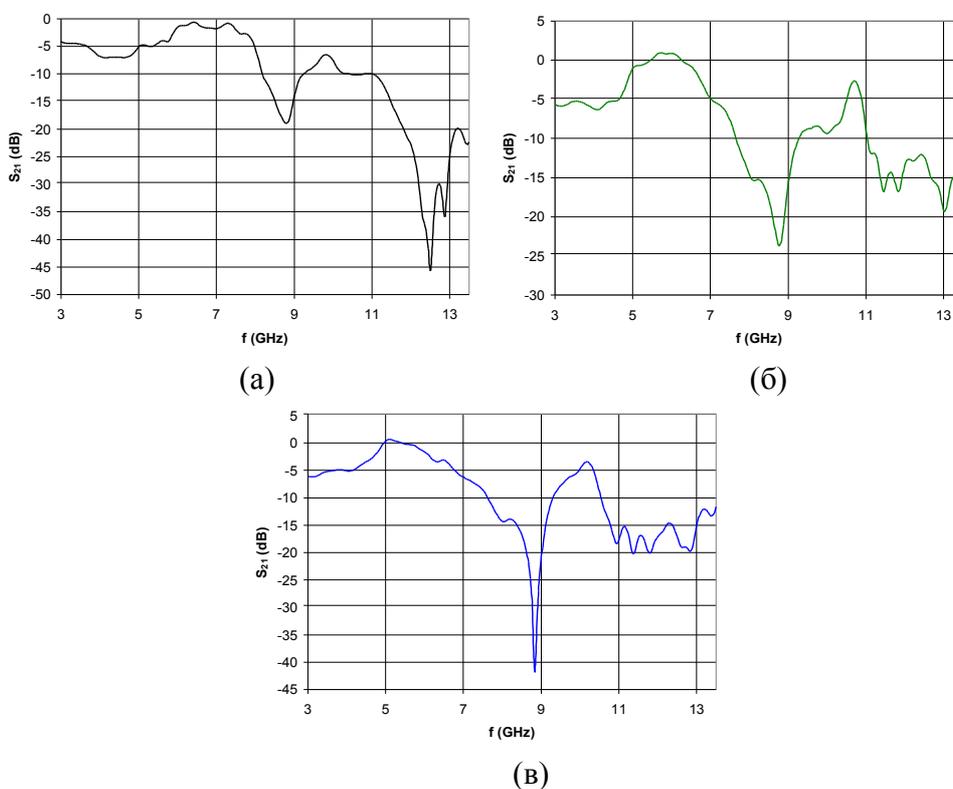


Рисунок 11. Переходное ослабление для (а), двух решеток на расстоянии 19 мм, (б) - 26.5 мм, (в) – 29.5 мм.

На Рис. 12 показаны зависимости коэффициента отражения и переходного ослабления от расстояния между решетками, измеренные на частоте 12 ГГц. Минимумы коэффициента отражения S_{11} располагаются при $L= 11.5, 24, 36.5$ и 49 мм, т.е. следуют с периодом в половину длины волны. Минимумы переходного ослабления S_{21} не проявляют такой регулярности и располагаются при $L= 11.5, 20, 31.5, 37.5$ и 54 мм. Наблюдаемые особенности могут быть вызваны резонансами открытого резонатора, образованного дифракционными решетками, и их связью с резонансами поверхностных волн решеток.

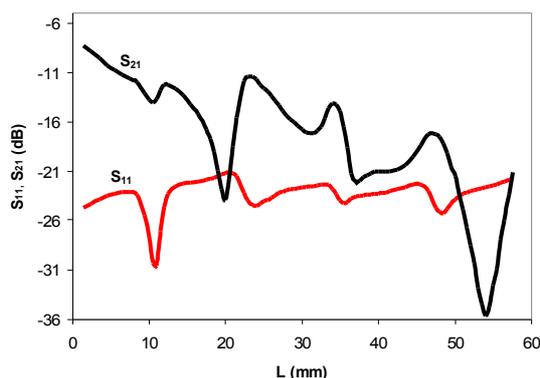


Рисунок 12. Зависимость коэффициентов S_{11} , S_{21} от расстояния между решетками на частоте 12 ГГц.

Для двух решеток нами были выполнены измерения зависимости переходного ослабления от положения пробного тела в широком диапазоне расстояний между решетками и с использованием пробных тел различного размера и изготовленных из различных материалов. Эти измерения показали, что, если характерные размеры пробного тела заметно (в 2-4 раза) меньше длины волны, то относительное поведение переходного ослабления как для прямого прохождения между рупорами (2) и (3), так и под углом 90^0 между рупорами (2) и (4) (Рис.5) слабо зависят от геометрии и материала тела. В этой связи, в дальнейшем анализируются результаты, полученные с пробным телом, изготовленным из ферроэпоксида в виде диска диаметром 8 мм и высотой 1 мм. Использование тонкого диска позволяет получить высокое пространственное разрешение в направлении оси z .

На Рис. 13 приведена зависимость переходного ослабления между рупорами (2) и (3) от положения пробного тела при расстоянии между решетками 32 мм, измеренная на частоте 12 ГГц (калибровка “на проход” в отсутствие решеток не проводилась). Пробное тело находилось в медианной плоскости структуры, образованной решетками. Полученное распределение, фактически,

является модификацией распределений, представленных на Рис. 10. Период следования максимумов модуля электрического поля равен половине периода решетки, максимумы располагаются напротив центров проводящих полос и центров свободных промежутков, амплитуды максимумов, соседних полупериодов близки по величине. Подчеркнем, что расстояние между решетками 32 мм, при котором достигается примерное равенство амплитуд поля соседних полупериодов, не соответствует каким-либо резонансом системы, видимым на Рис. 12.

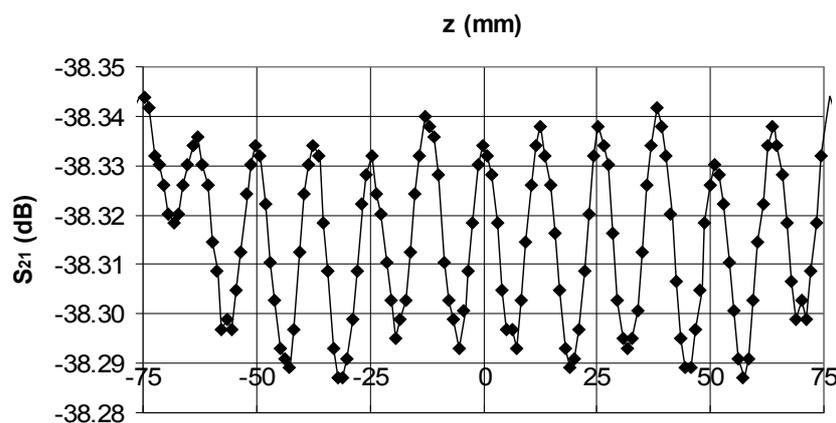


Рисунок 13. Изменение переходного ослабления между рупорами (2) и (3) (Рис. 5) при перемещении пробного тела.

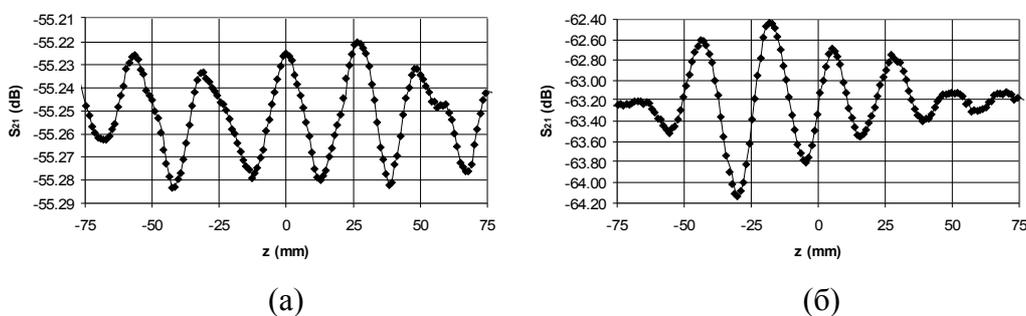


Рисунок 14. Изменение переходного ослабления между рупорами (2) и (4) (Рис. 5) при перемещении пробного тела, (а) – вертикальная поляризация, (б) – горизонтальная поляризация.

На Рис. 14 показаны результаты измерения переходного ослабления между рупорными антеннами (2) и (4) (Рис. 5). Измерения проводились для расстояния между решетками 32 мм на частоте 12 ГГц для двух положений плоскости поляризации приемного рупора (4). Принципиальным отличием поведения переходного ослабления при измерениях под углом 90° от измерений при прямом прохождении является то, что максимумы ослабления для обеих поляризаций следуют с периодом близким к периоду решетки. Сдвиг положения экстремумов

переходного ослабления для горизонтальной поляризации по сравнению с вертикальной поляризацией составляет около четверти периода решетки.

Подобное поведение переходных ослаблений может быть объяснено следующим образом. Электромагнитное излучение, рассеянное пробным телом под углом 90° , интерферирует с фоновым излучением, возникающим из-за рассеяния на решетках и попадающим на приемный рупор (4). Фаза поля фонового излучения постоянна, в то время как фаза рассеянного излучения изменяется на 180° при переходе от одного полупериода решетки к другому в связи с изменением фазы электрического поля структуры в соседних полупериодах на 180° – см. раздел 1. Из-за интерференции излучений при нахождении пробного тела в одном полупериоде решетки амплитуда сигнала, принимаемого антенной (4) увеличивается, а в соседнем – уменьшается. Вследствие этого период чередования максимумов ослабления, так же как и минимумов, оказывается равным периоду решетки. Сдвиг экстремумов вблизи центра решетки для горизонтальной поляризации на четверть периода по сравнению с вертикальной может быть объяснен тем, что в первом случае основной вклад в рассеянное излучение дает горизонтальная (y) компонента электрического поля, имеющие экстремумы напротив краев проводящих полос (Рис. 3), а во втором случае вертикальная (z) компонента поля, имеющая экстремумы вблизи центров полос и свободных промежутков. Некоторое отличие периода следования экстремумов от периода решетки, наблюдаемое на Рис. 14 обусловлено тем обстоятельством, что по мере движения пробного тела происходит изменение расстояния между ним и приемным рупором (4), приводящее к заметному сдвигу фазы рассеянной волны в плоскости входного окна рупора.

Таким образом, результаты измерений позволяют сделать вывод о том, что в соседних полупериодах решетки располагаются максимумы модуля ускоряющей (z) компоненты электрического поля, при этом сдвиг фазы поля между соседними полупериодами составляет 180° .

Нами были проведено изучение чувствительности полученного распределения поля к изменению расстояния между решетками и их не параллельности. Изменение расстояния в пределах 1 мм (4% длины волны) и не параллельности в пределах 10 мрад приводит к изменению соотношения амплитуд поля в пределах 10%. Столь слабая чувствительность обусловлена тем,

что при расстоянии между решетками 32 мм структура находится вне резонансов системы.

4. Заключение

Совокупность экспериментальных результатов, полученных в настоящей работе, показывает, что структура, образованная двумя проводящими дифракционными решетками, погруженными в диэлектрические подложки, может быть использована для ускорения заряженных частиц. В диапазоне длины волны 10.6 мкм при использовании CO₂ лазера в качестве источника электромагнитного поля ожидаемый темп набора энергии составляет 1 ГэВ/м. Данная структура может использоваться и в СВЧ диапазоне, при этом геометрические особенности структуры могут позволить реализовать новые схемы ускорителей заряженных частиц.

Авторы выражают благодарность А.Ф. Королеву за предоставление рупорной антенны и полезные обсуждения.

Литература

1. С.В.Абрамов, Ю.К.Алексеев, Д.А.Заярный, Б.С.Ишханов, В.И.Шведунов. Дифракционная ускоряющая структура π -вида. Письма в ЖТФ, том 30, вып. 12 (2004), стр. 44-49.
2. В.И.Шведунов, 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.
3. User's Guide, Agilent Technologies, 8719ET/20ET/22ET, 8719ES/20ES/22ES Network Analyzers
4. Антенна измерительная П6-23А. Руководство по эксплуатации.
5. R. W. Wood, "On the remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum," *Philos. Mag.* 4, 396-402 (1902); R. W. Wood, "Anomalous diffraction gratings," *Phys. Rev.* 48, 928-936 (1935); J. E. Stewart and W. S. Gallaway, "Diffraction anomalies in grating spectrophotometers," *Appl. Opt.* 1, 421-430 (1962).
6. R. H. Ritchie, E. T. Arakawa, J. J. Cowan, and R. N. Hamm, "Surface-plasmon resonance effect in grating diffraction," *Phys. Rev. Lett.* 21, 1530-1533 (1968).
7. M.I. Mischenko, L.D. Travis, A.A. Lacis, *Scattering, Absorption and Emission of Light by Small Particles*, Third electronic edition, Cambridge University Press, 2006, 448 p.
8. С.Н. Воробьев, И.К. Кузьмичев, Экспериментальное исследование резонансного отражения плоской электромагнитной волны от редкой ленточной решетки, *Журнал технической физики*, 1998, том 68, №5, стр. 138-140.

Андрей Алексеевич Ветров¹
Дмитрий Альбертович Заярный²
Борис Саркисович Ишханов¹
Андрей Николаевич Каманин¹
Николай Иванович Пахомов¹
Василий Иванович Шведунов¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, 119899, Москва, Ленинские горы

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, ленинский проспект 53

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ АНАЛОГ ДИФРАКЦИОННОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006 – 22/821

Работа поступила в ОНТИ 20 декабря 2006 г.