

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
ХАРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им.А.М. ГОРЬКОГО

На правах рукописи

ВЕЛИЕВ ЭЛЬДАР ИСМАИЛ оглы

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ВОЛН НА РЕШЕТКЕ ИЗ КРУГОВЫХ
ЦИЛИНДРОВ С ПРОДОЛЬНЫМИ ЩЕЛЯМИ

(01.04.03.—радиофизика, включая квантовую радиофизику)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ФИЗИКО—МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

ХАРЬКОВ—1977

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Институте радиофизики и электроники АН УССР

Научный руководитель:

член-корреспондент АН УССР, доктор физико-математических наук, профессор ШЕСТОПАЛОВ В.П.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук ИЛЬИНСКИЙ А.С.

доцент, кандидат физико-математических наук КАМЫШАН В.В.

Ведущее предприятие - Белорусский государственный университет им. В.И.Ленина

Защита диссертации состоится "07" 10 1977г.
в 14 часов на заседании Специализированного совета К-21/1 по радиофизике при Харьковском госуниверситете, 310077, Харьков, пл. Дзержинского, 4

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ХГУ

Автореферат разослан "02" 09 1977 г.

Ученый секретарь Специализированного совета

ЯЦУК К.П.

Актуальность темы. В различных областях современной физики и радиоэлектроники широко используются дифракционные решетки. Они являются одним из основных узлов в лампах бегущей и обратной волны, преобразователях поляризации и фазовращателях, волномерах и интерферометрах, фильтрах и устройствах для разрежения спектра, линейных ускорителях и т.д. Однако, несмотря на различные применения дифракционных решеток, свойства рассеянного ими электромагнитного поля строгими методами исследованы только для ряда простейших периодических структур.

Решетки со сложной геометрией элементов, многопараметрические и многоэлементные, а также решетки из элементов, обладающих резонансными свойствами, позволяют более эффективно управлять свойствами рассеянных ими полей, поскольку при этом имеется больше возможностей изменять их геометрию в широких пределах по различным параметрам. Однако дифракционные свойства таких решеток мало изучены на основе строгих математических методов. Этим и объясняется ограниченность их применения в различных приборах и устройствах.

В данной диссертационной работе впервые рассматривается задача дифракции электромагнитных волн на решетке из крутовых цилиндров с продольными щелями. Она отличается от ранее исследованных решеток именно наличием элементов, обладающих резонансными свойствами. Более того, эта решетка обобщает свойства уже известных периодических структур, таких, как решетка из сплошных круглых брусьев и ленточные решетки плоского и ножевого типа /в том числе и "жалюзи"/.

Поэтому актуальность темы определяется прежде всего развитием метода решения задачи о дифракции волн на периодической

структуре, элементы которой представляют собой незамкнутые цилиндрические экраны в виде круговых цилиндров с продольными щелями, выявлением новых физических эффектов, характерных для таких структур, а также на основе проведенного анализа предложениями об использовании таких структур в различных областях радиофизики и электроники.

Цель работы. Целью настоящей диссертационной работы является разработка строгого математического метода решения задачи о дифракции волн на решетке из круговых цилиндров с продольными щелями, построение длинноволновой асимптотики, создание численного алгоритма и проведение подробного физического анализа свойств рассеянного поля для различных параметров задачи, в том числе и таких, когда длина падающей волны соизмерима с периодом и размерами элементов решетки.

Научная новизна. Новизна проведенных исследований связана с тем, что впервые сформулирована и эффективно аналитически и численно с помощью ЭВМ решена краевая задача о дифракции волн на решетке из круговых цилиндров с продольными щелями. Получен ряд новых физических результатов. В частности, установлен эффект полного отражения от такой решетки падающей Н-поляризованной электромагнитной волны в длинноволновом случае даже для редкой решетки.

Методы исследования. Решения поставленных в диссертации задач получены путем последовательного применения к главным частям операторов функциональных уравнений I-го рода, к решению которых сводятся рассматриваемые задачи, двух вариантов полуобращения, развитых в работах В.П.Шестопалова при решении других задач дифракции. Такой подход позволил свести эти задачи к решению бесконечных систем линейных алгебраических уравнений Фредгольмового типа, получить в длинноволновой области аналитическое решение за-

дачи и провести численный анализ в широких пределах изменения параметров падающего поля и периодической структуры.

Практическая ценность работы заключается

- в создании строгой методики решения и проведении на ее основе подробного физического анализа рассматриваемых задач в широких областях изменения их параметров;

- в получении простых аналитических формул, позволяющих с достаточной точностью определять значения параметров, при которых наблюдаются резонансные эффекты.

Полученные в диссертационной работе результаты могут найти применение в различных областях радиотехники: антенной, волноводной технике, дифракционной электронике. В частности, обнаруженный эффект полного отражения плоской Н-поляризованной электромагнитной волны редкой решеткой из круговых цилиндров с узкими продольными щелями позволит использовать эту решетку в качестве эффективного отражателя и фильтра /в том числе поляризационного/ для электромагнитных и звуковых волн. Эффект резонансного увеличения энергии дифракционного излучения окажется полезным для СВЧ электроники.

Апробация работы. Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах ИРЭ АН УССР, докладывались на У, У1 и УП конференциях молодых исследователей ИРЭ АН УССР /1974, 1975, 1976 г.г./, на Всесоюзной сессии НТОРЭС им. А.С.Попова, посвященной Дню радио /Москва, 1976 г./.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Объем работы. Диссертация изложена на 167 стр., в том числе 131 стр. машинописного текста, 29 стр. иллюстраций и таблиц, 7 стр. списка литературы из 73 библиографических наименований.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе подробно исследуется задача о дифракции плоской поперечно-электрической волны на решетке из круговых цилиндров с продольными щелями.

Для рассматриваемого типа поляризации можно показать, что рассеянное поле представляется в виде суперпозиции потенциалов двойного слоя, распределенных по всем элементам решетки с неизвестной плотностью $\mu(x,y)$, совпадающей с плотностью поверхностного тока. Спределение рассеянного поля связано с нахождением функции $\mu(x,y)$. Удовлетворение граничным условиям для поля на поверхности элементов решетки, требованиям конечности энергии в любой ограниченной области пространства и соответствующего поведения поля на бесконечности приводит к интегродифференциальному уравнению относительно функции $\mu(x,y)$ вида

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \int_{L_0} \mu(x,y) \frac{\partial}{\partial \rho} \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_0^{(1)}(k\sqrt{(x-x_s-nl)^2+(y-y_s)^2}) e^{i\kappa x_n l} dL_s = \frac{\partial}{\partial \rho} e^{i\kappa(\alpha x + \beta y)}, \quad |I|$$

где $H_0^{(1)}(x)$ - функция Ханкеля I-го рода, L_0 - определяет контур нулевого элемента решетки, $(x,y) \in L_0$, l - период решетки, $\kappa = k_0 \sin \chi$, $\alpha = \sin \varphi$, $\beta = \cos \varphi$, χ и φ - углы падения в плоскостях yOz и xOy - соответственно, решение которого определяется в пространстве L_2 .

Если учесть, что функция тока $\mu(x,y)$ периодическая с периодом 2π , то, разлагая ее в ряд Фурье, а также используя теорему сложения для бесселевых функций, в общем случае получим систему функциональных уравнений первого рода вида $A\bar{x} = \bar{f}$, где вектор-столбец \bar{x} имеет своими компонентами Фурье-амплитуды

тока μ_n . Для отыскания μ_n эта система малоприсгодна. Поэтому необходимо провести ее регуляризацию. Требуемое преобразование в работе проведено на основе метода полуобращения. Для получения систем уравнений Фредгольмового типа, дающих решение рассматриваемой задачи, указанным методом необходимо воспользоваться дважды. Сперва из оператора A , как и в случае задачи о рассеянии волн на решетке из сплошных круглых брусьев, выделим часть, связанную с отдельным элементом структуры. Затем повторное полуобращение выделенного оператора так же, как и в задачах о дифракции волн на ленточных решетках, производим методом Римана-Гильберта. В результате такого обращения главной части матричного оператора A приходим к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений второго рода для Фурье-амплитуд тока μ_n

$$\mu_n = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_{nm} \mu_m + b_n, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad |2|$$

где

$$a_{nm} = c_{nm} + M_{nm}, \quad n, m=0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$$c_{nm} = \begin{cases} (-1)^{n+m} e^{i(m-n)\varphi_0} \frac{|m|}{n} \delta_m V_{n-1}^{m-1}(u'), & m \neq 0, n \neq 0, \\ \frac{(-1)^n}{n} e^{-in\varphi_0} i\pi(\kappa\alpha)^2 J_0'(\kappa\alpha) H_0^{(1)'}(\kappa\alpha) V_{n-1}^{-1}(u'), & m=0, n \neq 0, \\ (-1)^{m+1} e^{im\varphi_0} |m| \delta_m W_m(u'), & m \neq 0, n=0, \\ -i\pi(\kappa\alpha)^2 J_0'(\kappa\alpha) H_0^{(1)'}(\kappa\alpha) W_0(u') & m=0, n=0, \end{cases}$$

$$M_{nm} = \begin{cases} i\pi(\kappa\alpha)^2 \frac{(-1)^n}{n} e^{-in\varphi_0} J_m'(\kappa\alpha) \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_p'(\kappa\alpha) V_{n-1}^{p-1}(u') G_{p-m}(\kappa l, \alpha) e^{4ip\varphi_0}, & n \neq 0 \\ -i\pi(\kappa\alpha)^2 J_m'(\kappa\alpha) \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_p'(\kappa\alpha) W_p(u') G_{p-m}(\kappa l, \alpha) e^{4ip\varphi_0}, & n=0 \end{cases}$$

$$\delta_n = \begin{cases} \frac{(-1)^n}{n} e^{-in\varphi_0} i\pi(\kappa\alpha)^2 \sum_{p=-\infty}^{\infty} J'_p(\kappa\alpha) V_{n-1}^{p-1}(u') e^{i2p(\varphi+\varphi_0)}, & n \neq 0, \\ i\pi(\kappa\alpha)^2 \sum_{p=-\infty}^{\infty} J'_p(\kappa\alpha) W_p(u') e^{ip(\varphi+\varphi_0)}, & n = 0, \end{cases}$$

$G_n(\kappa l, \alpha) V_{n-1}^{p-1}(u')$, $W_n(u')$, δ_n - величины, определенные в работах, посвященных дифракции волн на решетке из сплошных круговых цилиндров и на ленточных решетках; $u' = -\cos\theta = -u$; α - радиус цилиндров.

Показано, что система уравнений /2/ при произвольных значениях параметров задачи может быть решена на ЭВМ методом "усеченная" при условии $2\alpha < l$ /т.е. когда цилиндры не касаются друг друга/, а в случае узких щелей и лент и редкой решетки - методом последовательных приближений.

Величины $G_n(\kappa l, \alpha)$, входящие в матричные элементы a_{nm} , представляют собой ряды Шлемилха, которые, как известно, сходятся очень медленно. Поэтому при численных расчетах на ЭВМ удобно пользоваться представлением для этих величин в виде быстроходящихся рядов по элементарным функциям, которое получено в работах

V. Trzasky. Необходимо заметить, что матричные элементы a_{nm} бесконечной системы уравнений /2/ при некоторых значениях параметров $x_0 = \frac{l}{\lambda_0}$, φ и γ могут обратиться в бесконечность. Это произойдет в точках скольжения, когда $x_0 \sin\gamma (1 \pm \sin\varphi) = n$ ($n = 1, 2, \dots$). С помощью специального преобразования получена новая бесконечная система линейных алгебраических уравнений второго рода, у которой матричные элементы уже в бесконечность не обращаются при любых значениях параметров задачи. Этой системой при численном анализе целесообразно пользоваться только вблизи точек скольжения, в остальных же случаях система уравнений /2/ более удобна в силу

простоты ее матричных элементов.

Отметим также, что поскольку при значениях угла ориентации щелей $\varphi_0 = 0^\circ$ и $\varphi_0 = 90^\circ$ рассматриваемая решетка имеет плоскости симметрии, то бесконечную систему линейных алгебраических уравнений /2/ с помощью линейной комбинации неизвестных коэффициентов с положительными и отрицательными индексами можно свести к двум бесконечным системам уравнений, у которых строки и столбцы нумеруются от 0 до ∞ . Последнее преобразование позволяет увеличить порядок усечения этих систем в два раза.

В случае, когда решетка редкая / $S = 2\alpha/l \ll 1$ / и щели узкие ($\theta = 0^\circ$), получено приближенное решение задачи с оценкой погрешности. В частности, установлено, что если при этом также мало отношение периода решетки к длине волны / $x_0 = l/\lambda_0 < 1$ /, то при значениях параметров x , S , γ и θ / $\varphi_0 = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ /, удовлетворяющих соотношению

$$(\kappa\alpha)^2 = (\pi x_0 S \sin\gamma)^2 = -\frac{1}{2 \ln \sin \frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{2} \text{Im} G_0(\kappa l, 0)}, \quad /3/$$

где $\text{Im} G_0(\kappa l, 0) = -\frac{2}{\pi} (\ln \frac{x_0}{2} \sin\gamma + C) - \frac{x_0^2 \sin^2\gamma}{\pi} \cdot 1,202$, C - постоянная Эйлера, коэффициент прохождения $|G_0''|$ стремится к нулю как $O[\theta^2 + x^2 (\frac{\sigma}{l})^2]$, т.е. наблюдается полное отражение падающей плоской поперечно-электрической волны. Причем с уменьшением ширины щели добротность этого резонанса возрастает как

$$O(\ln \sin \frac{\theta}{2}).$$

Численные расчеты на ЭВМ показали, что эффект полного отражения наблюдается как при малых, так и при больших значениях коэффициента заполнения S ($0 < S \leq 1$) и что полученное приближенное соотношение /3/ при $S < 0,5$, $x < 1$ и $\theta < 30^\circ$ позволяет с точностью до 0,1% - 1% определять резонансные значения параметров x , S , γ и θ , для которых наблюдается этот резонансный эффект. В этом случае также получено

приближенное выражение для плотности поверхностного тока, содержащее информацию о полном отражении падающей волны. Из него следует, что несмотря на приближенное решение задачи, этого вполне достаточно, чтобы функция тока обладала нужным поведением на ребре.

Показано, что резонансное отражение /в том числе и полное отражение в длинноволновой области/ возникает, когда падающая волна возбуждает в структуре режимы колебаний, близкие к собственным. Получены дисперсионные уравнения, описывающие эти квази-собственные режимы. Найденные корни этих уравнений близки к корням производных бесселевых функций $J'_m(ka) / m = 0, 1, 2, \dots /$, но отличаются от них на малую комплексную добавку, причем ее мнимая часть - отрицательная величина, что указывает на принадлежность собственных колебаний исследуемой структуры к классу "затухающих резонансов". Отклонение корней дисперсионных уравнений от указанных корней производных бесселевых функций обусловлено наличием узкой щели на стенке цилиндров и взаимодействием между ними. Резонансное отражение, в котором коэффициент прохождения $|\delta_0''|$ минимален, возникает при возбуждении падающей волной внутри цилиндров волноводных вытекающих волн. При $\varphi_0 = 90^\circ$ падающая волна внутри цилиндров возбуждает только четные волноводные вытекающие волны TE_{m0} - типа $m = 0, 1, 2 \dots /$, которым соответствует один резонансный минимум $|\delta_0''|$, причем добротность этих резонансов с уменьшением ширины щели возрастает как $O(kr^2 \sin \frac{\theta}{2})$. А при $\varphi_0 \neq 90^\circ$ падающая волна возбуждает внутри цилиндров четные и нечетные волноводные вытекающие волны TE_{m0} - типа $(m \neq 0)$. Следовательно, в этом случае для $|\delta_0''|$ имеет место два резонансных минимума. Добротности резонансов, соответствующих нечетным волноводным вытекающим волнам, с уменьшением ширины щели возрастают как $O(\theta^{-4})$. Раздвигание минимума $|\delta_0''|$ в этом случае

связано со снятием поляризационного вырождения у высших типов волноводных вытекающих волн.

Показано, что полное отражение, наблюдаемое в длинноволновой области, связано с возбуждением падающей волной внутри цилиндров щелевой вытекающей волны.

Из указанных выше резонансов значительный интерес представляет именно этот, так как в данном случае имеет место эффект полного отражения падающей волны даже в случае редкой решетки из круговых цилиндров с узкими продольными щелями, т.е. когда

$a/c \ll 1$ и θ - мало, что позволяет использовать такую решетку в качестве эффективного отражателя и фильтра как для электромагнитных, так и для звуковых волн /в случае звуковых волн поверхности цилиндров должны быть абсолютно жесткими/.

Выявлено, что резонансные эффекты имеют место и при значении угла падения $\varphi \neq 0^\circ$. Прозрачность решетки при $x < 0,5$ и $S \leq 0,25$ практически не зависит от угла падения в плоскости XOY при $\varphi < 60^\circ$. Для углов падения, близких к скользящему, исследуемая решетка, как и другие решетки, во всем волновом диапазоне /при любых S и φ_0 / полностью отражает падающую волну. При увеличении коэффициента заполнения решетки для любых x становится заметной зависимость прозрачности решетки от φ во всем диапазоне $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ /взаимное влияние элементов решетки велико/.

В случае узких цилиндрических лент, а точнее при $\theta > 160^\circ$, $x < 1$ и любых S , прозрачность решетки практически не зависит от угла ориентации щелей φ_0 и не опускается ниже, чем 0,99 по модулю коэффициента прохождения. С увеличением ширины цилиндрических лент прозрачность решетки при изменении φ_0 от 0° до 90° постепенно падает. Такое поведение $|\delta_0''|$ в зависимости от φ_0

связано с распределением тока на поверхности лент для рассматриваемого типа поляризации.

В случае очень узких щелей и $S < 1$ $|\beta_0^H|$ слабо зависит от угла φ_0 . Поэтому эффект полного отражения в длинноволновой области наблюдается при любых значениях угла φ_0 . Однако с увеличением θ зависимость $|\beta_0^H|$ от угла φ_0 становится заметной, причем при заданных резонансных значениях параметров и θ с изменением φ_0 от 90° до 0° резонансные значения параметра x уменьшаются, т.е. резонансный минимум смещается в сторону более длинных волн. Зависимость $|\beta_0^H|$ от φ_0 становится более существенной также при увеличении S и x .

Проведенный анализ зависимости коэффициента прохождения от угла ориентации щелей φ_0 показывает, что при фиксированных значениях параметров S , θ , x и φ путем простого поворота элементов решетки практически можно добиться любого значения прозрачности решетки, определяемой $|\beta_0^H|$.

Приведенные зависимости $|\beta_0^H|$ от ширины щелей θ позволяют при заданных значениях параметров S , x , φ и φ_0 определять значения θ , при которых наблюдается резонансное отражение.

Во второй главе рассмотрена задача о дифракции плоской поперечно-магнитной волны на исследуемой решетке.

Рассеянное поле, в отличие от случая поперечно-электрической волны, имеется в виде суперпозиции потенциалов простого слоя, распределенных по всем элементам решетки с неизвестной плотностью $\rho(x, y)$. Функция $\rho(x, y)$ определяется из условия подчинения полного поля граничному условию на поверхности цилиндров; это приводит к системе функциональных уравнений I-го рода относительно Фурье-амплитуд ρ_n функции $\rho(x, y)$ того же типа, что и

в случае другой поляризации. Поэтому ее регуляризация проведена так же, как и в первой главе. В результате получена система линейных алгебраических уравнений второго рода относительно неизвестных ρ_n , подобная системе /2/. Эта система при произвольных значениях параметров задачи решается методом редукции на ЭМ при условии $2a < l$, а в случае редкой решетки, узких щелей и лент - методом последовательных приближений.

В последнем случае получено приближенное решение задачи с оценкой погрешности. Проведен анализ рассеянных полей. Показано, что коэффициенты отражения $|\alpha_0^E|$ и прохождения $|\beta_0^E|$ инвариантны относительно знака угла падения φ и угла ориентации щелей φ_0 , как и для других периодических структур.

На основе аналитического и численного исследования строгого решения задачи установлено, что падающей волной внутри цилиндров возбуждаются волноводные вытекающие волны TH_{mn} - типа / $m = 0, 1, 2, \dots$ /. При этом подбором угла ориентации щелей можно добиться резонансного отражения либо прохождения падающей волны. Добротности соответствующих резонансов с уменьшением ширины щелей при значении угла $\varphi_0 = 90^\circ$ возрастают как $O(\theta^{-4})$, а при $\varphi_0 \neq 90^\circ$ - как $O(\theta^{-6})$.

Приведенные зависимости коэффициента прохождения $|\beta_0^E|$ от параметров S и x позволяют сделать вывод, что наличие щели на поверхности цилиндров приводит, в отличие от решетки из сплошных круглых цилиндров, к значительному отражению и прохождению падающего поля не только в случае редкого расположения элементов решетки / $S \ll 1$ /, но также и для $x > 1$ при значениях коэффициента заполнения $S \leq 0,7$.

Известно, что в области длин волн, соизмеримых с периодом структуры, прозрачность редкой решетки из сплошных круговых цилиндров практически не зависит от типа поляризации - такая решет-

ка в заданной области частот не разделяет типов поляризации. Полученные результаты первой и второй глав показывают, что наличие щели на поверхности цилиндров приводит к четкому разделению рассеянных полей по их поляризации.

В третьей главе диссертации методом, развитым в первой и во второй главах, решены две задачи: а/ об излучении монохроматического потока электронов, пролетающего над решеткой из круговых цилиндров с продольными щелями; б/ о дифракции волноводной H_{10} -волны на круговом цилиндре с продольной щелью, расположенном внутри прямоугольного волновода.

Как известно, энергетические характеристики дифракционного излучения в основном определяются геометрическими свойствами конкретной периодической структуры. С этой точки зрения рассмотрение дифракционного излучения, возникающего при движении электронного потока над исследуемой решеткой, представляет особый интерес, поскольку имеется возможность изменять геометрию решетки в широких пределах по различным параметрам: по коэффициенту заполнения S , по ширине щели θ , по углу ориентации щелей φ_0 . Все это открывает новые возможности для улучшения энергетических характеристик дифракционного излучения и, следовательно, генераторов дифракционного излучения. Собственное поле монохроматического электронного потока имеет вид неоднородной плоской H -поляризованной электромагнитной волны. При рассмотрении задачи дифракции этой волны, падающей на решетку под комплексным углом, применение метода, разработанного для решения задачи дифракции плоской однородной волны на решетке из цилиндров с продольными щелями, позволило получить систему линейных алгебраических уравнений второго рода относительно Фурье-амплитуд плотности тока на

поверхности цилиндра того же типа, что и система /2/. К решению этой системы, как и системы /2/, при произвольных значениях параметров задачи применим метод редукции, а в случае узких щелей, лент и редкой решетки - метод последовательных приближений. Показано, что в случае узких лент излучение отсутствует в направлении, параллельном лентам решетки, и эффект взаимодействия электронного потока с решеткой экспоненциально зависит от прицельного параметра, что хорошо согласуется с аналогичными результатами других работ.

На основе проведенного аналитического и численного исследования задачи было установлено, что для амплитуд дифракционного излучения имеет место резонансное возрастание или убывание, когда электронный поток возбуждает на решетке из круговых цилиндров с узкими продольными щелями квазисобственные режимы. Подробно исследовался такой режим, когда вся энергия дифракционного излучения сосредоточена в одной незатухающей гармонике, излучающейся по нормали к решетке. Именно этот режим в основном и используется на практике. Для -1 -ой пространственной гармоники это условие выполняется при $x = \beta < 1$ / $\beta = \frac{v}{c}$ - безразмерная скорость потока/.

Резонансные значения параметров x , S и θ , приводящие к возрастанию или убыванию энергии излучения при $x = \beta < 1$, $S < 0,5$ и $\theta = 30^\circ$, с точностью до 0,1% + 1% можно определять из соотношения /3/, если в нем заменить $Im G_0(kl, 0)$ на

$$Im G_0(x, \beta) = -\frac{2}{\pi} (\ln \frac{x}{2} + C) - (x^2 - \beta^2) \cdot 0,601,$$

где $|\beta| = |x/\beta - 1| < \frac{1}{2}$.

Этот резонанс связан со щелевой вытекающей волной, возбуждаемой электронным потоком в цилиндрах.

Особенный интерес представляло изучение влияния угла ориентации щели φ_0 на эффективность дифракционного излучения, по -

сколькx подобный параметр ранее не исследовался в задачах об излучении заряженных частиц. Было установлено, что при больших значениях θ , когда решетка близка к ленточной, основную роль играет изменение прицельного параметра с изменением φ_0 . При уменьшении ширины щели / $\theta < 90^\circ$ / прицельный параметр по мере уменьшения φ_0 меняется слабее. В этом случае определяющее значение имеет соотношение между параметрами S , θ и x . Максимум энергии излучения наблюдается, когда щели в цилиндрах обращены к потоку / $\varphi_0 = 90^\circ$ /, а минимум - при $\varphi_0 = 270^\circ$. Если же уйти от резонанса по какому-либо из параметров S , θ , x , то зависимость от φ_0 становится незначительной.

В целом можно сделать вывод, что при больших θ решетка из цилиндрических лент ведет себя подобно решетке из плоских лент. Это сходство тем больше, чем уже ленты. Если же угловые размеры щели малы / $\theta < 90^\circ$ /, то дифракционное излучение при определенных частотах резко возрастает. Эти свойства тем сильнее выражены, чем меньше θ .

В последнее время возрос интерес к строгому решению задач дифракции волноводных волн на объемных неоднородностях /стержни и т.д./ внутри прямоугольного волновода. Это связано с тем, что в отличие от приближенных методов, строгие методы позволяют учитывать особенности неоднородности, ее взаимодействие со стенками волновода, а также определять более точно ближние поля и распределение тока на неоднородности. Поэтому получение строгого решения задачи дифракции волноводной H_{10} - волны на такой неоднородности, как цилиндр с продольной щелью, размещенный внутри прямоугольного волновода, представляет определенный интерес, поскольку неоднородность обладает резонансными свойствами. Важно также, что решение рассматриваемой задачи содержит и решение бо-

лее простой /сплошной цилиндрической стержень в прямоугольном волноводе/, для которой недавно было получено строгое решение.

При решении поставленной задачи нахождение рассеянного поля проводится с использованием метода зеркальных изображений. Поскольку полное поле образуется в результате многократного отражения рассеянного поля от стенок прямоугольного волновода, то каждому акту отражения можно сопоставить эквивалентный источник отраженного поля, т.е. многократное изображение цилиндра в стенках волновода. Эти источники образуют периодическую решетку из бесконечно длинных круговых цилиндров с продольными щелями. Ввиду того, что падающая H_{10} - волна относительно образующих цилиндра является поперечно-магнитной, то рассеянное поле ищется в виде суммы потенциалов простого слоя, распределенных на "зеркальных" источниках. Для этого поля получено два представления: в локальной системе координат, связанной с цилиндром, и в прямоугольной системе координат прямоугольного волновода. Первое из них удобно для исследования поля вблизи неоднородности, второе - вдали от нее.

После подчинения полного поля на поверхности цилиндра граничному условию рассматриваемая задача сведена к решению системы линейных алгебраических уравнений второго рода относительно фурье-амплитуд плотности тока на поверхности цилиндра, аналогичной системе /2/. К решению этой системы при условии, когда цилиндр не касается боковых стенок волновода, применим метод усечения, а в случае его малых волновых размеров и узких щелей и лент - метод последовательных приближений.

Отметим, что для величин, входящих в матричные элементы и представляющих собой ряды Шлеммльха, получено представление в виде быстросходящихся рядов по элементарным функциям, которые удобны для численного анализа.

В одном частном случае, когда неоднородность представляет собой замкнутый круглый цилиндр малых волновых размеров, получено аналитическое выражение для коэффициента отражения по основной волне, которое уточняет известную приближенную формулу.

В приложении приводятся вспомогательные материалы, уточняющие основной текст.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты диссертационной работы:

а/ впервые получено строгое решение задачи о дифракции плоских электромагнитных волн на решетке из круговых цилиндров с продольными щелями;

б/ проведен всесторонний аналитический и численный анализ свойств электромагнитного поля, порождаемого этой решеткой;

в/ обнаружен эффект полного отражения падающей плоской Н-поляризованной электромагнитной волны в длинноволновой области редкой решетки из круговых цилиндров с узкими продольными щелями;

г/ установлена возможность эффективного управления свойствами рассеянного поля за счет изменения параметров структуры;

д/ показано, что, возбуждая электронным потоком в структуре ее квазисобственный режим в длинноволновой области, можно добиться существенного увеличения энергии дифракционного излучения;

е/ впервые получено строгое решение задачи о дифракции волноводной H_{10} - волны на круговом цилиндре с продольной щелью, размещенном внутри прямоугольного волновода.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Э.И.Велиев. Дифракция плоской Н-поляризованной электромагнитной волны на решетке из круговых цилиндров с продольными щелями. Сб. "Радиотехника", вып.34, Изд-во ХГУ, стр.158-162, 1975.

2. Э.И.Велиев, В.Г.Сологуб, В.П.Шестопапов. Дифракция плоской Н-поляризованной электромагнитной волны на решетке из круговых цилиндров с продольными щелями. ДАН УССР, сер.А, № 3, стр. 242-246, 1976.

3. Э.И.Велиев. Дифракция волн на решетке из круглых цилиндров с продольными щелями. Аннотации и тезисы докладов 31 Всесоюзной научной сессии, посвященной Дню радио. Секция антенных устройств. М., стр.77-78, 1976 г.

4. Э.И.Велиев, В.П.Шестопапов. Дифракция плоской поперечно-электрической волны на решетке из круговых цилиндров с продольными щелями. Препринт ИРЭ АН УССР, Харьков, № 65, стр.1-55, 1976.

5. Э.И.Велиев, А.И.Носич, В.П.Шестопапов. К теории щелевой волны. ДАН УССР, сер.А, № 10, стр.928-931, 1976.

6. Э.И.Велиев, В.П.Шестопапов. Об одном дифракционном эффекте, наблюдаемом на редкой решетке из круговых цилиндров с продольными щелями. Письма в ЖТФ, т.3, вып.6, стр.276-280, 1977.

7. Э.И.Велиев, А.И.Носич, В.П.Шестопапов. Распространение электромагнитных волн в круглом волноводе с продольной щелью. Радиотехника и Электроника, т.22, №3, стр. 466-474, 1977.

8. Э.И.Велиев, А.Н.Носич, В.П.Шестопапов. Излучение потока электронов, пролетающих над решеткой из цилиндров с продольными щелями. Изв. высш.уч.зав. - Радиофизика, 20, 3, стр.451-461, 1977.

Ответственный за выпуск В.П.Шестопалов
Подписано к печати 3 июня 1977 г. БЦ № 04081
Формат 60x90 1/16.Зак. 87, тираж 180.
Объем 1,2 физ.п.л., 1 уч.изд.л.

Ротапринт ИРЭ АН УССР
Харьков-85, ул.ак.Проскуры, 12