

# Общая физика

УДК 621.385.6

## Моделирование черенковского и дифракционного излучений на периодических металлодиэлектрических структурах

Г. С. Воробьев, В. О. Журба, М. В. Петровский, А. А. Рыбалко, Ю. В. Шульга

*Представлена общая методика экспериментального моделирования черенковского и дифракционного излучений на периодических металлодиэлектрических структурах на основе идентификации волн пространственного заряда электронного потока с поверхностной волной диэлектрического волновода. Разработана и реализована схема экспериментальной установки миллиметрового диапазона волн, проведено моделирование основных режимов возбуждения пространственных волн черенковского и дифракционного излучений, а также тестирование их путем сравнения с численным анализом.*

PACS: 41.60.Bq

**Ключевые слова:** металлодиэлектрическая структура, черенковское излучение, дифракционное излучение, диэлектрический волновод, электронный поток.

### Введение

В настоящее время вакуумная СВЧ-электроника в основном развивается по пути создания мощных источников электромагнитного излучения [1], которые востребованы в радиолокации, системах связи, ускорительной технике, высокотемпературной обработке материалов спектроскопии и т. д. Принципы построения таких приборов основаны как на классических методах преобразования энергии электронов в СВЧ-поля (клистроны, магнетроны, ЛОВ, ЛБВ), так и на радиационных эффектах, таких, например, как черенковское, циклотронное и дифракционное излучения (черенковские ЛОВ, мазеры на циклотронном резонансе, оротроны и генераторы дифракционного излучения).

Вместе с тем в радиоастрономических инструментах терагерцового диапазона волн предпочтение отдается твердотельным гетеродинным источникам колебаний в силу их компактности, малой массы и мощности потребления несмотря на небольшую величину выходной мощности, которая, например, на частоте 2 ТГц не превышает 1 мВт. Низкий уровень выходной мощности таких источников в значительной степени усложняет задачу создания смесителей [2].

В связи с этим несмотря на достигнутые успехи в создании мощных электровакуумных источников колебаний терагерцового диапазона волн [3] актуальным остается вопрос реализации низковольтных гетеродинных источников излучения, которые могли бы конкурировать с твердотельными генераторами по массо-габаритным показателям и потребляемой мощности, превосходя на порядок их выходные характеристики. К настоящему времени данный вопрос может быть решен путем использования в вакуумной электронике и СВЧ-технике планарных периодических металлодиэлектрических структур (МДС) [4], которые, в отличие от традиционных металлических периодических структур, имеют ряд специфических особенностей, связанных с возбуждением на МДС черенковского и широкого спектра пространственных гармоник дифракционного излучений [5].

Многообразие режимов возбуждения МДС и способов выделения из них оптимальных требует большого объема как экспериментальных, так и теоретических исследований. К настоящему времени построены численно-аналитические модели таких систем [5, 6], которые позволяют прогнозировать их электродинамические характеристики в первом приближении, проведено экспериментальное моделирование условий излучения для слоя диэлектрика полубесконечной толщины [5]. Поэтому вопросы разработки общей методики и экспериментальной установки для исследования электродинамических характеристик МДС с заданными геометрическими параметрами являются актуальными.

В данной работе представлено обоснование выбора режимов моделирования черенковского и

Воробьев Геннадий Савельевич, профессор.  
Журба Вячеслав Олегович, старший преподаватель.  
Петровский Михаил Васильевич, старший преподаватель.  
Рыбалко Александр Александрович, аспирант.  
Шульга Юлия Владимировна, аспирант.  
Сумской государственный университет.  
Украина, 40007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2.  
Тел.: (0542) 78-03-18. E-mail: vp@sumdu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2011 г.

© Воробьев Г. С., Журба В. О., Петровский М. В., Рыбалко А. А., Шульга Ю. В., 2011

дифракционного излучений на МДС конкретной геометрии, основные из которых реализованы по разработанной методике на универсальной экспериментальной установке миллиметрового диапазона волн и протестированы путем сравнения результатов эксперимента с численным анализом. Обсуждаются вопросы создания на базе МДС низковольтных генераторов и функциональных устройств миллиметрового, субмиллиметрового и терагерцового диапазонов волн, в том числе с применением современных нанотехнологий.

### Обоснование выбора режимов моделирования

Теоретическое обоснование метода экспериментального моделирования дифракционного и черенковского излучений (ДЧИ) изложено в работе [5], где решены задачи в приближении заданного тока электронного потока (ЭП) и заданного поля диэлектрического волновода (ДВ) при возбуждении объемных волн на МДС. Исходя из идентификации относительных скоростей поверхностной волны ДВ —  $\beta_w$  и скорости электронов —  $\beta_e$ , общие условия излучения электромагнитных волн имеют следующий вид в далее раскрытых обозначениях:

$$\frac{\kappa}{|n| + \kappa} \leq \left\{ \frac{\beta_w}{\beta_e} \right\} \leq \frac{\kappa}{|n| - \kappa}; \quad (1)$$

$$\frac{\kappa}{|n| + \kappa\sqrt{\varepsilon}} \leq \left\{ \frac{\beta_w}{\beta_e} \right\} \leq \frac{\kappa}{|n| - \kappa\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2)$$

где условие (1) соответствует излучению в вакуум, а условие (2) относится к излучению в диэлектрик.

Исходя из этих выражений, углы излучения электромагнитных волн в вакуум  $\gamma_{nv}$  и диэлектрик  $\gamma_{n\varepsilon}$  для заданных параметров  $\beta_w$  и  $\beta_e$  определяются соотношениями:

$$\gamma_{nv} = \arccos\left(\sqrt{\varepsilon_0} + \frac{n}{\kappa}\right); \quad (3)$$

$$\gamma_{nv} = \arccos\left(\frac{1}{\beta_e} + \frac{n}{\kappa}\right); \quad (4)$$

$$\gamma_{n\varepsilon} = -\arccos\frac{\sqrt{\varepsilon_0} + \frac{n}{\kappa}}{\sqrt{\varepsilon}}; \quad (5)$$

$$\gamma_{n\varepsilon} = -\arccos\left(\frac{\frac{1}{\beta_e} + \frac{n}{\kappa}}{\sqrt{\varepsilon}}\right). \quad (6)$$

В соотношениях (1)–(6) использованы следующие выражения:

$\beta_w = v_w/c = 1/\sqrt{\varepsilon_w}$  — относительная скорость волны в волноводе;

$v_w$  — фазовая скорость волны;

$c$  — скорость света;

$\varepsilon_w = c^2/v_w^2$  — эффективная диэлектрическая проницаемость волновода;

$\beta_e = v_e/c$  — относительная скорость электронов;

$v_e$  — скорость электронов;

$\kappa = l/\lambda$ , где  $l$  — период решетки;

$\lambda$  — длина волны излучения;

$\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$n$  — номер пространственной гармоники, которая излучается.

Из анализа соотношений (1) и (2) следует, что для параметров  $\kappa$ ,  $\beta_e$ ,  $\beta_w$  и  $\varepsilon$  в свободном пространстве возбуждаются только отрицательные пространственные гармоники с  $n = -1, -2, -3, \dots$ , а в диэлектрической среде — гармоники с  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Излучение на нулевой ( $n = 0$ ) пространственной гармонике происходит при тех же условиях, что и черенковское излучение (ЧИ) электронного потока, движущегося вблизи незэкранированной решеткой диэлектрика, т. е. при скоростях электронов  $\varepsilon\beta_e^2 > 1$  с углом излучения  $\cos\gamma_{0\varepsilon} = 1/(\beta_e\sqrt{\varepsilon})$ . Поэтому такое излучение можно назвать черенковским, а решетку рассматривать как экранирующий фактор, влияющий на коэффициент связи ЭП или ДВ с диэлектрической средой [6].

Описанные выше режимы излучений можно наглядно проанализировать путем построения диаграмм Бриллюэна для заданных значений диэлектрической проницаемости среды [5]. Отметим наличие в настоящее время достаточно широкого спектра материалов, обладающих малыми потерями на СВЧ, которые могут использоваться как при экспериментальном моделировании (например, фторопласт, полистирол, поликор с малыми значениями  $\varepsilon$ ), так и при рассмотрении вариантов создания низковольтных источников колебаний на основе МДС (высокие значения  $\varepsilon$ , например, керамические материалы оксидов бария и титана [7]). В качестве примера на рис. 1 в координатных осях  $\kappa$  и  $\eta = \kappa/\beta_e(\beta_w)$  приведены диаграммы для двух значений  $\varepsilon$ , а именно, 2 и 100.

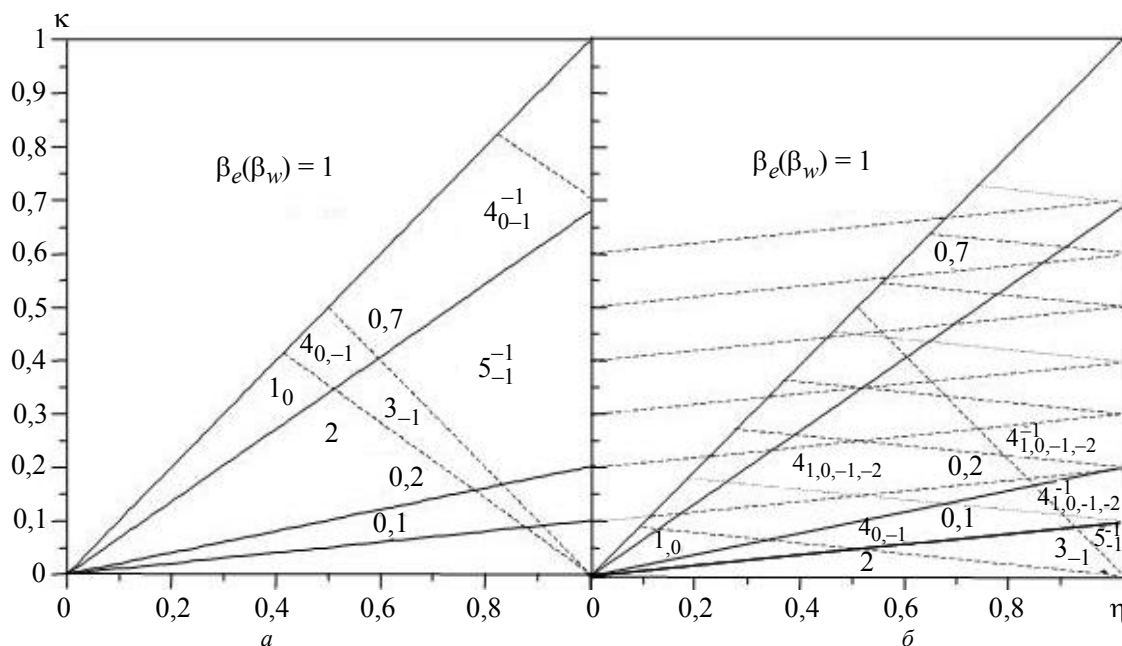


Рис. 1. Диаграммы Бриллюэна при возбуждении ДЧИ на МДС с относительными диэлектрическими проницаемостями:  $a — \varepsilon = 2$ ;  $b — \varepsilon = 100$

Диаграммы состоят из дискретных областей, обозначенных цифрами  $N_s^m$  ( $N = 1-5$ ), которые определяют наиболее характерные случаи возбуждения электронным потоком (поверхностной волной диэлектрического волновода) электромагнитных волн. Нижние индексы  $s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  указывают номера пространственных гармоник, излучаемых в диэлектрик, а верхние индексы  $m = -1, -2, \dots$  — в вакуум. Из приведенных диаграмм видно, что при заданных параметрах  $\beta_e(\beta_w)$  и  $k$  в зависимости от  $\varepsilon$  можно реализовать разные режимы возбуждения ДЧИ и их моделирования. Так, в частности, для больших значений  $\varepsilon$  в области нерелятивистских ЭП появляется возможность реализации как режимов ЧИ, так и режимов ДЧИ, например, зоны  $1_0, 4_{0,-1}, 4_{0,-1}^{-1}$  (рис. 1, б). При этом возникает излучение на положительных дифракционных гармониках, которое, как и ЧИ, направлено всегда под острым углом, например, зоны  $4_{1,0,-1,-2}, 4_{1,0,-1,-2}^{-1}$ . Но реализация таких зон для низковольтных ЭП невозможна, поскольку они лежат выше линии  $\beta_e = 0,1$ .

С точки зрения создания низковольтных источников излучения, практический интерес представляет зона  $3_{-1}$ , в которой дифракционное излучение, подобно черенковскому, возникает только в диэлектрике структуры, но при значительно меньших скоростях электронов. Учитывая специфику условий возбуждения объемной волны такого режима, условно назовем его аномальным дифракционным излучением

(АДИ). При реализации низковольтных приборов типа ГДИ (оротрон) практический интерес представляет режим излучения в зоне  $5_{-1}^{-1}$  (рис. 1, б).

### Экспериментальная установка

В [5, 8] описаны схемы установок для исследования преобразования поверхностных волн ДВ в объемные на МДС полубесконечной толщины и на металлических периодических структурах, позволяющие решить только частные вопросы без учета специфики применяемых в реальных схемах приборов объектов, а именно, возможности присутствия объемных волн как в диэлектрике, так и за его пределами, влияния толщины диэлектрического слоя на характеристики излучения, необходимости автоматизированного контроля основных параметров волноводного тракта.

Комплексный экспериментальный стенд для определения электродинамических характеристик периодических неоднородностей различных модификаций (МДС, ленточных и отражательных металлических решеток) при возбуждении их поверхностной волной ДВ состоит из двух основных блоков (рис. 2): блока измерения волноводных характеристик (коэффициентов стоячей волны — КСВ, ослаблений и т. п.); блока измерения пространственных характеристик периодических структур (диаграмм направленности излучений в дальней зоне и амплитудных распределений полей в ближней зоне).

В состав блока измерения пространственных характеристик входит исследуемый объект, который, в нашем случае, как общий пример, пред-