

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Методы генерации излучения Смита-Парселла в терагерцовом  
диапазоне частот**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студентки 4 курса 421 группы  
направления 03.03.03 "Радиофизика"  
факультета нелинейных процессов  
Козловой Татьяны Алексеевны

Научный руководитель  
ассистент кафедры электроники,  
колебаний и волн

\_\_\_\_\_

А.В. Титов

Зав. кафедрой электроники,  
колебаний и волн  
чл.-корр. РАН,  
профессор, д.ф-м.н.

\_\_\_\_\_

Д.И. Трубецков

Саратов 2018 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из актуальных направлений в СВЧ электронике является разработка и исследование методов генерации и усиления электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот. Данный диапазон лежит между коротковолновой областью СВЧ диапазона и длинноволновой областью оптического диапазона. Интерес к данному диапазону частот обусловлен свойствами, которые проявляет излучение терагерцового диапазона при взаимодействии с молекулами различных веществ, что в свою очередь, делает его перспективным в области спектроскопии, а также в области медицины. Также терагерцовый диапазон частот открывает широкие возможности для создания новых типов высокоскоростных средств связи и устройств сверхточной радиолокации.

На сегодняшний день существует ряд достаточно громоздких вакуумных источников излучения терагерцового диапазона высокой мощности, таких как, например, гиротрон и лазер на свободных электронах. Однако наблюдается дефицит компактных вакуумных источников и усилителей излучения терагерцового диапазона.

В связи с этим является актуальной задача анализа существующих на сегодняшний день научных направлений, посвященных разработке новых типов устройств терагерцового диапазона.

Целью данной работы является обзор работ, посвященных вопросам генерации излучения субмиллиметрового диапазона на основе излучения Смита-Парселла.

Работа содержит введение, две главы и заключение. В первой главе дано краткое описание теории излучения Смита-Парселла, во второй главе приведен обзор актуальных работ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа включает в себя Введение, две главы и Заключение. В первой главе приведены модели описания механизма излучения Смита–Парселла, а также проведен краткий обзор пионерских работ, посвященных данной теме. Во второй главе проведен обзор актуальных работ, опубликованных в течение последних лет, посвященных генерации излучения Смита–Парселла.

В 1942 было предположено, что электрон, пролетающий близко к периодической структуре испускает поляризованный свет. Но только в 1953 году было получено первое экспериментальное подтверждение этого эффекта Смитом и Парселлом [1]. Они первыми наблюдали излучение в оптическом диапазоне длин волн, генерируемое электронами с энергией 300 кэВ, пролетающими над оптической решеткой.

Смит и Парселл предположили, что когда электрон проходит вблизи поверхности дифракционной решетки из металла, происходит излучение на длинах волн, которые могут быть определены из выражения:

$$\lambda_n = \frac{D}{|n|} \left( \frac{c}{v_0} - \cos \theta \right), \quad (1.1)$$

здесь  $\lambda_n$  – длина волны излучения  $n$ -го порядка,  $D$  – период решетки;  $n$  – порядок излучения;  $v_0$  – скорость электрона;  $\theta$  – угол наблюдения излучения. Излучение, полученное таким образом, впервые стало известно как излучение Смита–Парселла (ИСП) после публикации результатов их эксперимента.

Несмотря на различные исследования и варианты применения ведутся споры относительно физической интерпретации механизма излучения Смита–Парселла. Как правило, для описания механизма ИСП используют одну из двух существующих теоретических моделей. Первая модель – дифракционная. Согласно ей ИСП возникает за счет дифракции на периодической структуре волн, излучаемых электронными пучками. Вторая модель – модель с поверхностными токами, основанная на приближении мнимых зарядов. Согласно этой модели, ИСП генерируется поверхностными токами, наведенными электронным пучком на периодической структуре. Обе модели приводят к выражению (1.1).

Эффекту дифракционного излучения за счет электронного потока, движущегося вблизи периодических структур, посвящено достаточно большое количество работ отечественных и зарубежных авторов.

Первая строгая теория излучения Смита–Парселла была разработана Ван-ден-Бергом. Его теорию можно применить для произвольного профиля

решетки. Угловое распределение энергии излучения для  $n$ -го порядка определяется выражением:

$$\frac{dW_n}{d\Omega} = 2\pi\alpha c \frac{n^2}{D} N \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \Phi}{\left(\frac{1}{\beta} - \cos \theta \sin \Phi\right)^3} |R_n|^2 \exp\left(-\frac{4\pi d}{\lambda\beta\gamma} \sqrt{1 + (\beta\gamma \cos \Phi)^2}\right), \quad (1.2)$$

где  $\alpha$  – константа тонкой структуры,  $N$  – число периодов решетки,  $d$  – расстояние от пучка до решетки,  $|R_n|^2$  – радиационный фактор, который определяется профилем решетки и энергией электронов,  $\gamma$  – Лоренц фактор,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $D$  – период решетки,  $n$  – порядок дифракции,  $\beta = v/c$  – отношение скорости электрона к скорости света,  $\theta$ ,  $\Phi$  – углы вылета фотона, показанные на Рис. 1. По соотношению (1.2) интенсивность падает с увеличением прицельного параметра  $d$ . Длина взаимодействия

$$h_{\text{int}} = \frac{\lambda\beta\gamma}{4\pi} \quad (1.3)$$

определяет эффективность “связи” между пучком и решеткой. В эксперименте размер пучка электронов 0,15 мм был много больше, чем длина взаимодействия  $h_{\text{int}} = 10^{-8}$  м, однако выход фотонов в оптическом диапазоне для пучка электронов с энергией 300кэВ и током 5мкА был достаточен для преобразования световым методом.

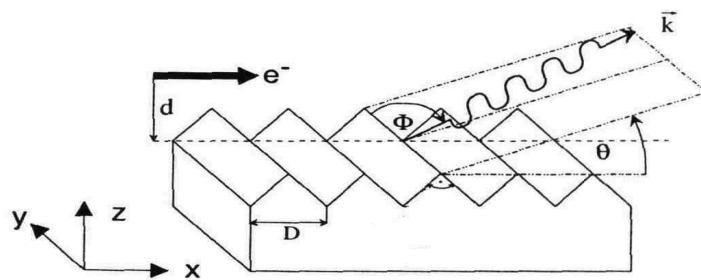


Рис. 1 Схема, иллюстрирующая процесс излучения Смита–Парселла.

Почти через десять лет после опытов Смита–Парселла появился генератор электромагнитного излучения, основанного на том же принципе. Прибор этот был назван варотроном. Чуть позднее появилось описание еще одного прибора, основанного на взаимодействии электронного луча с периодической дифракционной структурой. Схема прибора, названного

авторами оротроном (прибор с открытым резонатором и отражающей решеткой) [2,3], изображен на Рис. 2.

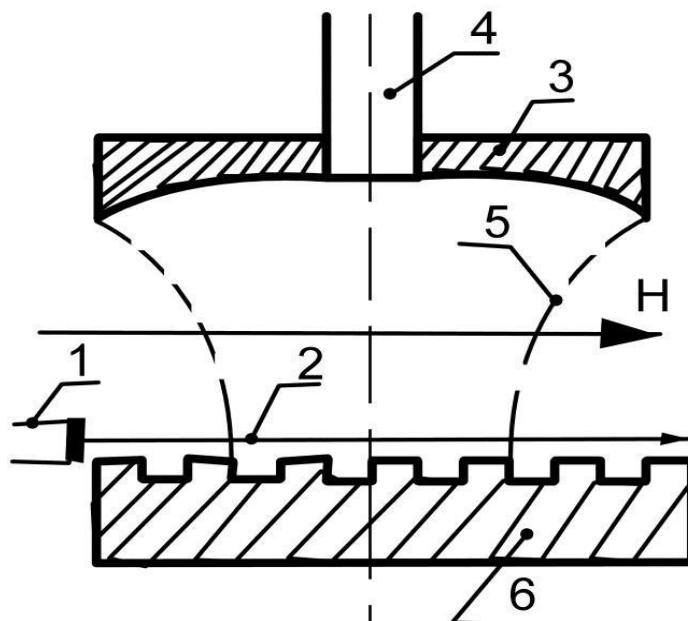


Рис. 2 Схема оротрона: 1 – электронная пушка; 2 – электронный пучок; 3 – сферическое зеркало; 4 – волновод; 5 – каустика, ограничивающая поле; 6 – гребенчатая замедляющая структура.

Открытый резонатор образован плоским и сферическим зеркалами, расстояние между которыми можно медленно изменять. На поверхности плоского зеркала нанесена гребенка. Генерируемая в резонаторе мощность выводится из него через отверстие в сферическом зеркале. Плоский электронный пучок создавался диодной пушкой, формировался с помощью диафрагмы и ускорялся постоянным или импульсным напряжением. В приборе наблюдалась генерация волн миллиметрового диапазона, причем частота зависела от расстояния между зеркалами и ускоряющего напряжения.

В последнее время ряд научных групп плотно занимается вопросами, связанными с излучением Смита–Парселла. Рассмотрим некоторые из них более подробно.

В одной из первых работ исследователи научной группы из Китая предложили тип ИСП – монохромное когерентное излучение от цепочки связанных открытых резонаторов, возбужденной однородным электронным пучком [ 4 ]. Как теоретически, так и с помощью моделирования планировалось показать, что это совершенно новый механизм, отличающийся от обеих теоретических моделей, упомянутых выше. Данная

система без каких-либо предварительных операций над электронным пучком (было отмечено, что формирование предварительно модулированного электронного пучка является серьезной проблемой для ЛСЭ СП) способна генерировать когерентное излучение значительно большей интенсивности, чем обычное ИСП. По мнению исследователей, новый тип излучения может быть широко использован для работы в терагерцовом диапазоне частот. Остановимся на этих работах подробнее.

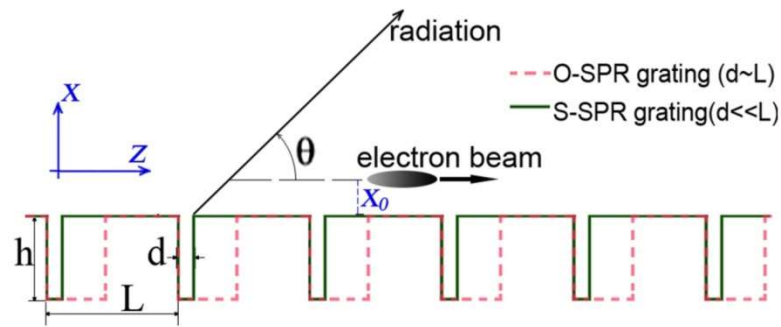


Рис. 3 Схематический рисунок излучения Смита–Парселла из резонаторной решетки.  $\theta$  – показывает направление излучения,  $h$  – глубина канавки,  $d$  – ширина канавки,  $L$  – период.

На Рис. 3 изображена исследуемая система. На первый взгляд это прямоугольная оптическая решетка, которая обычно используется для получения ИСП.

Расчеты показали, что направление (107.8град) соответствует частоте 172ГГц. Таким образом, классическое ИСП (КИСП) сменяется монохроматическим излучением увеличенной мощности в определенном направлении, которое удовлетворяет основному соотношению ИСП. Деформация спектра в узкую полосу частот можно интерпретировать следующим образом: электронный пучок, используемый в моделировании представляет собой электронный импульсом, который приводит к возбуждению излучения; также он является импульсной волной (с конечной длительностью и конечным числом периодов). Авторы отмечают, что главной целью их работы являлось исследование физического механизма и характеристик нового типа излучения.

С точки зрения авторов, в открытой периодической структуре в случае 1 поверхностные волны формируются за счет связанного взаимодействия резонаторных мод в цепочке связанных резонаторов [5]. При уменьшении ширины зазора  $d$  расстояние между соседними резонаторами увеличится, что

очевидно ослабит или полностью уничтожит связь резонаторных мод. В отсутствие связи поверхностные волны не смогут существовать.

На основе приведенных результатов моделирования можно утверждать, что для успешной работы механизма ОИСП необходимо выполнение ряда условий.

- 1) Во избежание появления связи между собственными модами соседних резонаторов необходим точный подбор значений периода  $L$  и ширины зазора  $d$ .
- 2) Должна быть тщательно подобрана глубина резонатора: при слишком малом значении глубины моды не смогут эффективно возбуждаться, при слишком большом значении глубины собственная частота окажется ниже порогового значения, что приведет к невозможности излучать.
- 3) Период  $L$ , частота резонаторных мод и скорость пучка должны удовлетворять соотношению **Ошибка! Источник ссылки не найден..**

В данной работе авторами не был проведен теоретический анализ. В следующей работе данной научной группы [6] сделана попытка дать теоретическое описание процессов, протекающих при генерации излучения Смита-Парселла (ИСП) нового типа.

Для лучшего понимания физики излучения в данной работе исследуется механизм и условие происхождения ОИСП. Анализируя дисперсионные и излучательные характеристики, можно сделать вывод что ИСП порождается собственными модами гребенки. С точки зрения механизма он напоминает ИСП от фотонных кристаллов, которое порождается оптическими модами фотонных кристаллов, возбуждаемых электронным пучком. Как известно, ИСП на основе фотонных кристаллов представляет собой узкополосное излучение с интенсивностью на несколько порядков выше интенсивности излучения от обычной решетки. Было показано, что для случая ОИСП собственные моды имеют такой же характер, как и моды оптического диапазона, что по существу приводит к увеличению интенсивности. Другими словами, путем правильного выбора (настройки) параметров решетки и скорости пучка усиленное ИСП также может быть получено в обычной гребенке, что продемонстрировано впервые. Очевидно, что по сравнению с фотонными кристаллами прямоугольная гребенка является более простым предметом для эксперимента. Ее преимущества в интенсивности, перестраиваемости и простоте делают её перспективной для генерации волн и диагностики энергии пучков.

В рамках данной работы научной группы из Китая был проведен расчет дифракционной компоненты излучения решетки. Особое внимание будет уделено различиям между ОИСП и КИСП.

Следующая работа данной научной группы из Китая посвящена моделированию прибора, принцип действия которого основан на предложенном ранее особом излучении Смита-Парселла [7].

Схема предлагаемого источника приведена на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Как и в классическом оротроне, непрерывный электронный пучок движется над прямоугольной гребенкой, за счет чего генерируется излучение Смита Парсела. Над гребенкой расположено плоское проводящее зеркало, оно отражает излучение, которое в последствие взаимодействует с электронным пучком. Электромагнитное излучение экспоненциально усиливается за счет электронно-волнового взаимодействия и затем выводится через устройство связи на отражающем зеркале. В отличие от классического оротрона, в котором используется перпендикулярная компонента КИСП, в данном оротроне используется ОИСП.

Рассчитанные дисперсионные кривые приведены на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**(а). В случае КИСП линия пучка пересекает кривые поверхностных (медленных) волн. Точка самовозбуждения на схеме показывает, что заряд будет взаимодействовать главным образом с поверхностными волнами. КИСП является не когерентным излучением с широким спектром частот. В случае же ОИСП заряд может взаимодействовать только с излучательными модами, поскольку рабочие точки (точки пересечения) лежат в области излучательных мод. ОИСП представляет собой когерентное излучение, причем частоты однозначно определяются рабочими точками.

Далее было проведено двумерное моделирование методом частица в ячейке с использованием кода SHIPIC-2D.

Для дальнейшего исследования двух рабочих режимов и возможности перестройки был проведен расчет моделей с различными значениями  $H$ .

По мере изменения  $H$  от 1мм до 2.6мм первая и вторая мода возбуждаются поочередно. Также имеет место случай, когда обе моды возбуждаются одновременно (при  $H=1.2$ мм). Для каждой моды частота плавно изменяется с изменением  $H$ , что говорит о возможности перестройки в некотором диапазоне. Полученные результаты авторы работы объясняют следующим образом.

Поскольку электрическое поле  $E_x$  должно достигать максимума в области прохождения пучка и обращаться в ноль на поверхности



проводящего зеркала, длина волны излучения должна удовлетворять соотношению

$$H \approx \left(p + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2},$$

где  $p$  – неотрицательное целое число. Если обеспечить приблизительное равенство этой длины волны и той, что определяется глубиной канавки (упомянутой ранее), то собственные моды решетки и зеркала окажутся связанными. Это ключевое свойство предложенной схемы также определяет и рабочие моды.

Можно отметить, что результаты моделирования хорошо согласуются с теорией

Авторы работы указывают на следующие особенности предлагаемого ими источника излучения. Во-первых, данный источник может работать в широком диапазоне частот. Во-вторых, источник обладает малыми размерами и простотой конструкции. В сравнении с параболическим зеркалом, используемым в обычном оротроне, плоское зеркало предлагаемого устройства является более простым в производстве. Также на сегодняшний день возможно создание ленточных пучков с плотностью  $50 \text{ А / см}^2$  и толщиной около  $0.1 \text{ мм}$ .

В данной главе проведен обзор ряда работ иностранных исследователей, посвященных вопросам генерации излучения Смита-Парселла в терагерцовом диапазоне. На основании обзора можно сделать вывод, что излучение Смита-Парселла является перспективным механизмом генерации электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот. Тем не менее, модель, предложенная группой исследователей из Китая, требует дополнительного анализа, поскольку на сегодняшний день отсутствуют данные об экспериментах на макетах.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе проведен обзор работ, посвященных вопросам генерации излучения субмиллиметрового диапазона на основе излучения Смита-Парселла. Особое внимание было уделено теории нового типа излучения Смита-Парселла, предложенной исследовательской группой из Китая. В ходе работы был проведен подробный анализ, на основе которого можно сделать вывод о необходимости дальнейших исследований в данной области. В частности, следует провести моделирование предложенной системы при иных значениях параметров, а также рассмотреть возможность создания макета на основе данной модели.

## ЛИТЕРАТУРА

---

- [1] – S. J. Smith and E. M. Purcell, Phys. Rev. 92, (1953)1069.
- [2] – Русин Ф.С., Богомолов Г. Д., Оротрон как генератор миллиметрового диапазона, в сборнике: Электроника больших мощностей, в. 5, М., 1968;
- [3] – Русин Ф.С., Богомолов Г. Д. Эффект дифракционного излучения и его применение в электронике, «Электронная техника, серия 1», 1972, в. 12.
- [4] – Liu W., Liang Zh., New Journal of Physics 16 (2014)
- [5] – Liu H-C and Yariv A 2012 Opt. Express 20 9249–63
- [6] – Liu W., Li W., He Zh., Jia Q. AIP Advances 5, 127135 (2015)
- [7] – Liu W., Lu Y., Wang L., Jia Q. Appl. Phys. Lett. 108, 183510 (2016)