

# Умножение частоты в мощном терагерцовом лазере на свободных электронах

Д.Д. Крыгина, Ю.С. Опарина, Н.Ю. Песков, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** В данной работе исследуются возможности реализации схем двухволновых осцилляторов на основе режима излучения на высокой частоте, обеспечиваемого за счет модуляции электронного луча на более низкой частоте. Ранее был предложен проект генератора, основанного на использовании резонатора с брегговскими рефлекторами и нацеленного на достижение в этом МСЭ частоты около 300 ГГц. В данной работе исследована возможность реализации на основе этого генератора эффекта умножения частоты и проведены расчеты на увеличения частоты выходного излучения в 2-3 раза.

**Ключевые слова:** лазер на свободны электронах, умножение частоты

## 1. Введение

Проект лазера на свободных электронах в настоящее время разрабатывается в сотрудничестве между ИЯФ РАН (Новосибирск) и ИПФ РАН (Нижний Новгород) на основе нового поколения индукционных линейных ускорителей «ЛИУ», реализованных в последние годы в ИЯФ РАН и способен формировать электронные пучки 5-20 МэВ / 2 кА / 200 нс. Использование таких пучков позволяет реализовать сверхмощные длинноимпульсные МСЭ, работающие в частотных диапазонах от суб-ТГц до ТГц.

Основной проблемой при реализации автогенераторов, работающих на таких частотах в режиме индуцированного когерентного излучения, является создание электродинамической системы, способной обеспечить селективную узкополосную обратную связь в сильно завышенной области электронно-волнового взаимодействия. В качестве решения этой проблемы в случае относительно низких частот (0,3-0,6 ТГц) разработаны резонаторы в виде отрезка регулярных волноводов с отражателями на основе так называемых усовершенствованных брегговских структур. На более высоких частотах (до 2 ТГц) предлагается использование квазиоптических резонаторов на основе эффекта Тальбо.

Естественно, что чем выше частота рабочей волны, тем проблематичнее обеспечить для нее эффективную обратную связь. Известным способом избежать этой проблемы и обеспечить индуцированное излучение на высоких частотах является использование умножения частоты, когда излучение на высокой частоте обеспечивается за счет модуляции электронного луча на более низкой частоте.

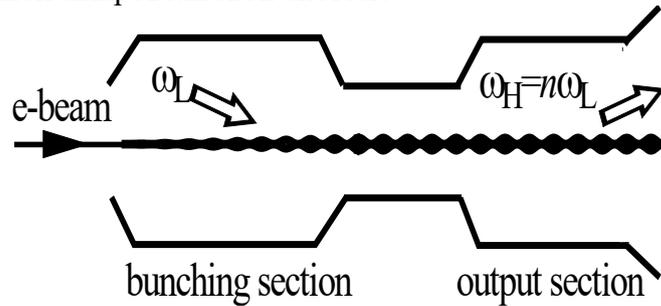
## 2. МСЭ с умножением частоты

Использование эффекта умножения частоты является известным и весьма привлекательным путем существенного повышения частоты генерации электронных лазеров.

Принципиальная схема секционированного электронного лазера с умножением частоты показана на рис. 1. В его первой, группирующей секции, электроны взаимодействуют с низкочастотной (НЧ) волной на частоте. Это может быть либо сигнальная волна, поступающая от какого-либо внешнего источника, либо волна, возбужденная самим электронным пучком, которая в последнем случае должна

представлять собой фактически самовозбуждающийся СВЧ генератор. Результатом этого взаимодействия является группировка электронов на частоте НЧ волны. При этом в электронном пучке формируются временные гармоники тока на частотах, кратных. Это дает возможность обеспечить во второй, выходной секции прибора когерентное излучение электронов на частоте  $\omega_H = n\omega_L$ , которое происходит благодаря наличию в электронном пучке n-той гармоники тока.

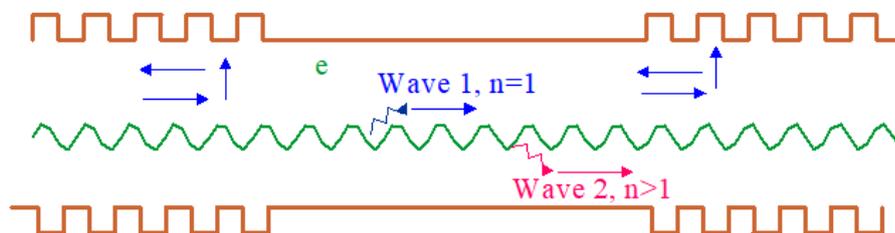
Отметим, что рис. 1 носит лишь схематический характер. Так, в некоторых работах, включая настоящую курсовую работу, рассматриваются модификации, в которых оба процесса (группировка электронов в НЧ волне и излучение ВЧ волны) происходит в единой микроволновой системе.



**Рисунок 1.** Принципиальная схема секционированного электронного лазера с умножением частоты.

Основной идеей схем МСЭ с умножением частоты является селективное возбуждение в выходной секции волны, частота которой существенно превышает частоту собственных осцилляций  $\Omega$ . Это может быть либо генерация волны с большим доплеровским преобразованием частоты, либо генерация на высоких гармониках электронной частоты  $\Omega$ .

Мы в данной работе рассматриваем МСЭ-генераторы на основе схемы: отрезка волновода, оканчивающегося отражателями брэгговского типа (рис. 2). В этом случае резонаторы обеспечивают обратную связь только для низкочастотной волны 1, возбуждаемой электронным пучком на основной гармонике ондулятора. Что касается высокочастотной волны 2, то она излучается электронным пучком на более высокой ( $n= 2, 3$ ) ондуляторной гармонике. Индуцированный характер этого излучения обеспечивается за счет группировки электронного пучка волной 1, а также за счет кратности частот двух волн  $\omega_2 = n\omega_1$ .



**Рисунок 2.** Схема МСЭ-убитрона с умножением частоты.

Согласно двухволновому моделированию электронно-волнового взаимодействия в данных МСЭ-генераторах, использование возбуждения низкочастотной  $TE_{1,1}$  волны 1 в резонаторе брэгговского типа (рис. 2) на частоте  $\omega_1 = 0,3$  ТГц может сопровождаться индуцированным излучением  $TE_{2,1}$ -волны 2, возбуждаемой на второй

ондуляторной гармонике на удвоенной частоте  $\omega_2 = 2\omega_1 = 0,6$  ТГц. В случае электронного пучка 5 МэВ/ 2 кА эффективность генерации высокочастотной волны в оптимизированной системе может достигать нескольких процентов, это соответствует выходной мощности на уровне сотен МВт.

В стационарном режиме работы предлагаемой схемы МСЭ мы решаем следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\gamma}{d\zeta} = \text{Re}[\kappa_1 a_1 e^{i\theta_1} + \kappa_2 a_2 e^{i\theta_2}], \\ \frac{d\Phi}{d\zeta} = M\gamma, \\ \frac{da_1}{d\zeta} = G_1 \langle e^{i\theta_1} \rangle, \\ \frac{da_2}{2d\zeta} = G_2 \langle e^{i\theta_2} \rangle, \end{array} \right. \quad (1) \quad (2) \quad (3)$$

Граничные условия для пучка имеют вид  $\gamma = \mathbf{0}(\zeta = 0), \theta = \theta_0 \in [0, 2\pi](z=0)$ .

Задача решалась с помощью численного моделирования. Изначально задавался малый шум в качестве начальной амплитуды низкочастотной волны. Амплитуду волны на выходе из резонатора мы домножали на коэффициент отражения R и использовали как начальную амплитуду в следующей итерации. Физически это означает, что мы отразили волну на выходе из резонатора. Таким образом, граничное условие для низкочастотной волны выглядело так для каждого прохода кроме первого:  $a_{01} = a_1 \times R$ . Для высокочастотной волны начальная амплитуда всегда:  $a_{02} = 0$ .

Было проведено численное моделирование процесса умножения частоты в МСЭ с параметрами 2 кА/ 5 МэВ. Коэффициент отражения мощности первой волны от отражателя был  $R = \left(\frac{a_1}{a_{01}}\right)^2 = 0,5$ . Радиус резонатора в нашей задаче  $R_w = 1$  см, период ондулятора  $d_u = 10$  см, длина волны  $\lambda = 0,1$  см.

В моделировании проводилась оптимизация по расстройке  $\delta_2$  высокочастотной волны в зависимости от расстройки  $\delta_1$  низкочастотной волны, где мы меняли длину волны, что соответствовало увеличению расстройки частоты первой волны.

В данной работе исследована зависимость КПД высокочастотной волны в оптимальном режиме от длины системы. Очевидно, что, чем длиннее система, тем выше КПД, так как связь с волной слабая. В заданных параметрах оптимальной длиной системы является 100 см.

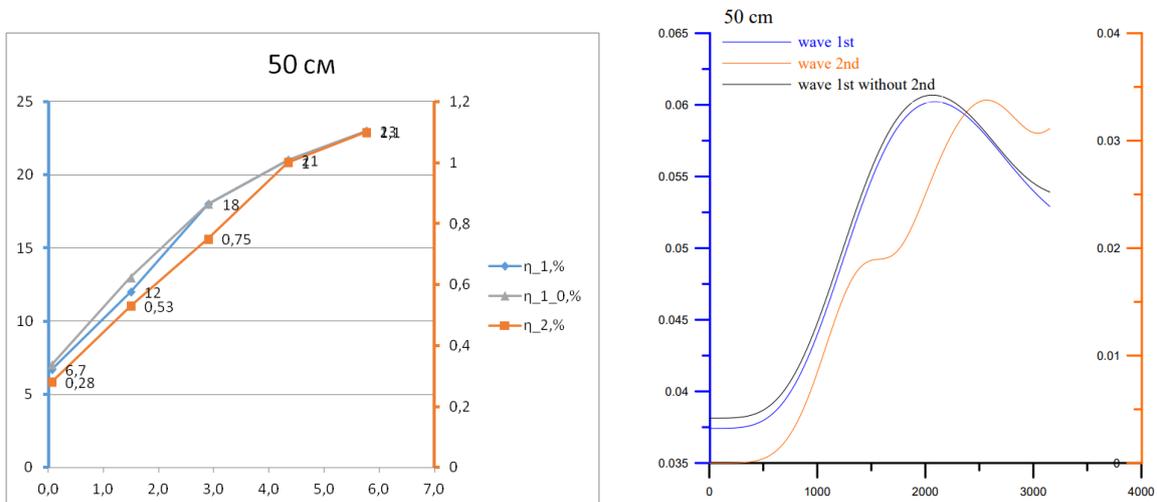


Рисунок 3. Зависимость КПД и амплитуда волн в системе  $l=50$ см

На рис. 3 видно, что можно добиться существенного усиления для волны на низкой частоте — КПД составит 23%, тогда как для интересующей нас высокочастотной волны КПД составляет около 1% в зависимости от расстройки.

Далее рассмотрим найденный нами оптимальный режим при заданных параметрах для КПД высокочастотной волны.

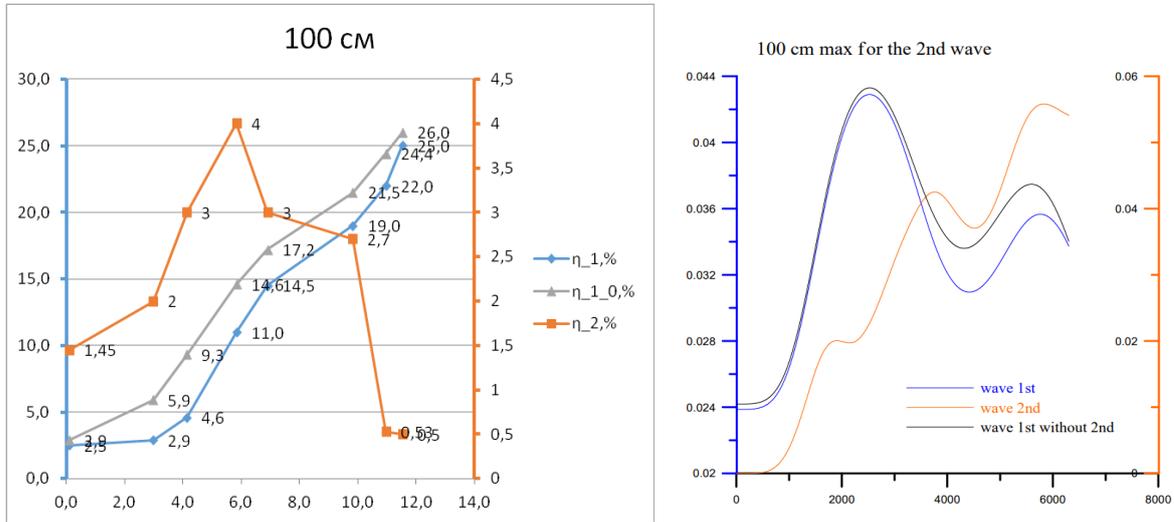


Рисунок 4. Зависимость КПД и амплитуда волн в системе  $l=100$  см.

Рассмотрим поведение низкочастотной волны, исходя из графика КПД волн (рис.4). В принципе, при данной длине мы можем достигнуть большего КПД, чем при длине в 2 раза меньшей в области, где первая волна стартует. Однако, на графике видно, что в точке максимального КПД высокочастотной волны КПД волны на низкой частоте меньше возможного и не совпадает с максимумом КПД волны на высокой частоте. Также КПД первой волны в этом режиме меньше КПД этой волны при короткой системе  $l=50$  см (рис.4). Тогда оно составляло 23%, сейчас 14,6%. Однако нас интересует максимум КПД волны на высокой частоте. КПД высокочастотной волны теперь достигает 4%, что является существенным усилением.

Стоит отметить влияние присутствия волны на умноженной частоте на низкочастотную волну. В отсутствии второй волны КПД первой больше, например, в оптимальном режиме для второй волны КПД на 3,6% ниже возможного.

Также в работе отражена идея резонатора типа Тальбота, основанная на отказе от возбуждения фиксированной поперечной моды в пользу возбуждения супермоды, образованной фиксированным спектром нескольких поперечных мод сверхразмерного волновода, имеющих одинаковую частоту. Высокодобротная супермода может быть сформирована внутри простого волноводного резонатора, оканчивающегося двумя зеркалами, в результате эффекта Тальбота - периодического воспроизведения поперечной структуры волнового пакета в квазиоптическом волноводе. В данной работе исследуется схема реализации двухволнового ЛСЭ 300/600 ГГц, основанного на возбуждении низкочастотной волны, являющейся супермодой сверхразмерного (диаметр 3,6 см, длина 100 см) резонатора типа Тальбота. Волна на удвоенной частоте генерируется электронным пучком, сгруппированным в поле низкочастотной волны, за счет эффекта умножения частоты. При моделировании мы рассматриваем супермоду типа Тальбота, образованную центральной поперечной модой  $TE_{1,7}$ , вместе с несколькими соседними модами ( $TE_{1,5} + TE_{1,6} + TE_{1,8} + TE_{1,9}$ ). Возбуждение этой супермоды обусловлено резонансным взаимодействием с электронами центральной парциальной моды  $TE_{1,7}$ . Что касается высокочастотной волны, то удвоение частоты первой волны вместе с правилом селективности, имеющим место в случае приосевого электронного пучка (а именно, совпадение номера баунс-гармоники ондуляторного

электронно-волнового резонанса с азимутальным индексом моды) соответствует поперечной моде  $TE_{2,13}$ . При этом моделирование предсказывает также присутствие небольшой примеси соседних мод ( $TE_{2,12}$  и  $TE_{2,14}$ ). Согласно моделированию, эта сложная система является относительно длинной с точки зрения усиления более низкочастотной волны  $TE_{1,7}$ , так что оптимальный режим соответствует второму максимуму усиления этой волны (рис. 4). Что касается более высокочастотной волны, то ее амплитуда монотонно возрастает по всей системе, не достигая насыщения. Это означает, что 100-сантиметровая длина области электронно-волнового взаимодействия слишком мала для достижения насыщения излучения на удвоенной частоте. Это связано с большим поперечным масштабом системы и, следовательно, с возбуждением поперечной моды высокого порядка на удвоенной частоте. Тем не менее, при моделировании достигается эффективность излучения на удвоенной частоте  $\sim 1\%$ .

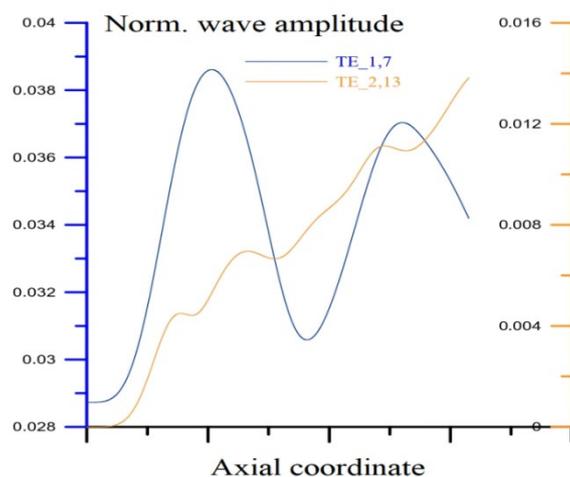


Рисунок 5. МСЭ на основе резонатора типа Тальбота

### 3. Заключение

Были исследованы возможности реализации схем двухволновых осцилляторов на основе режима умножения частоты. Проведено численное моделирование процесса повышения частоты в терагерцовом МСЭ с параметрами пучка 2 кА/ 5 МэВ. В ходе расчетов найдена оптимальная длина резонатора для максимизирования КПД волны на умноженной частоте, проведена оптимизация по расстройке частоты этой волны.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда, проект № 19-12-00212.**

#### Список литературы

1. D.A. Nikiforov, M.F. Blinov, V.V. Fedorov, A.V. Petrenko, P.V. Logachev, P.A. Bak, K.I. Zhivankov, A.V. Ivanov, A.A. Starostenko, O.A. Pavlov, G.I. Kuznetsov, M.A. Batazova, D.A. Starostenko, D.V. Petrov, O.A. Nikitin, A.R. Akhmetov, "High-current electron-beam transport in the LIA-5 Linear Induction Accelerator", *Phys. of Particles and Nuclei Lett.*, vol. 17, p. 197, 2020..
2. A.V. Arzhannikov, N.S. Ginzburg, A.M. Malkin, N.Y. Peskov, E.S. Sandalov, A.V. Savirov, S.L. Sinitsky, D.I. Skovorodin, A.A. Starostenko, V.Y. Zaslavsky, "Powerful long-pulse THz-Band Bragg FEL based on linear induction accelerator," 44th Int. Conf. on IR MM and THz Waves IRMMW-THz (Paris, France, Sept. 2019), p. 8874573.
3. Yu. S. Oparina, N.Y. Peskov, A.V. Savirov, "Electron rf Oscillator Based on Self-Excitation of a Talbot-Type Supermode in an Oversized Cavity," *Physical Review Applied*, vol. 12, p. 044070, 2019.
4. N.Yu. Peskov, I.V. Bandurkin, A.K. Kaminsky, S.V. Kuzikov, E.A. Perelstein, A.V. Savirov, S.N. Sedykh, A.A. Vikharev, "High-power free-electron maser operated in a two-mode frequency-multiplying regime," *Physical Review AB*, vol. 19, no. 6, p. 060704, 2016.