

ЛСЭ с резонатором Тальбо-типа: оптимизация системы в рамках двумерной модели

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

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: В настоящее время ведутся активные работы по созданию лазера на свободных электронах (ЛСЭ), работающего в терагерцовом частотном диапазоне на основе длинноимпульсного электронного пучка с характерными параметрами 10-20 МэВ, ~ 1-2 кА, ~ 300 нс. Важной проблемой здесь является конструкция резонатора, который неизбежно должен быть сверхразмерным как в поперечном, так и в осевом направлении, но при этом обеспечивать одночастотную генерацию заданной рабочей моды. В данной работе мы развиваем теорию ЛСЭ, основанную на использовании возбуждения супермоды резонатора Тальбо — типа.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, лазер на свободных электронах

1. Введение

В настоящее время в Институте прикладной физики РАН совместно с Институтом ядерной физики им. Будкера РАН ведутся активные работы по созданию терагерцового лазера на свободных электронах (ЛСЭ) с сильноточным пучком [1]. В данной работе мы описываем конструкции ЛСЭ на основе длинноимпульсного (сотни наносекунд) электронного пучка 5 – 10 МэВ / 1 – 2 кА и ондулятора с периодом в несколько сантиметров. При эффективности электронно-волнового взаимодействия ~5% можно обеспечить близкий к ГВт уровень мощности выходного волнового сигнала на ТГц частотах.

Важной проблемой является конструкция резонатора, который неизбежно должен быть сверхразмерным (сотни длин волн в поперечном направлении и десятки тысяч длин волн в продольном направлении) и в то же время обеспечивать стабильную узкополосную генерацию заданной рабочей моды. Ранее система, основанная на эффекте Тальбота, была предложена в качестве сверхразмерной СВЧ-системы такого ЛСЭ [2]. В подходе, описанном в данной работе, мы используем селективное возбуждение супермоды, образованной фиксированным набором поперечных мод сверхразмерной системы. Такая высокодобротная супермода может быть сформирована внутри сравнительно простого резонатора, представляющего собой отрезок волновода, оканчивающегося двумя зеркалами, в результате эффекта Тальбота, а именно периодического воспроизведения поперечной структуры многомодового волнового поля в сверхразмерном волноводе. Рисунок 1 а схематически иллюстрирует этот эффект. Любой волновой пакет, обладающий фиксированной частотой и распространяющийся в волноводе, можно представить как сумму полей парциальных поперечных собственных мод этого волновода. В системе, где $d/\lambda \gg 1$, в формировании волнового пакета участвует большое количество парциальных поперечных мод, далеких от отсечки. В такой ситуации любое симметричное поперечное распределение волнового поля воспроизводится в волноводе с периодом (длиной Тальбота), описываемым формулой $L = d^2/\lambda$. Поэтому для обеспечения высокой добротности (эффективной обратной связи) для рабочей супермоды можно использовать простой сверхразмерный резонатор (рис. 1).

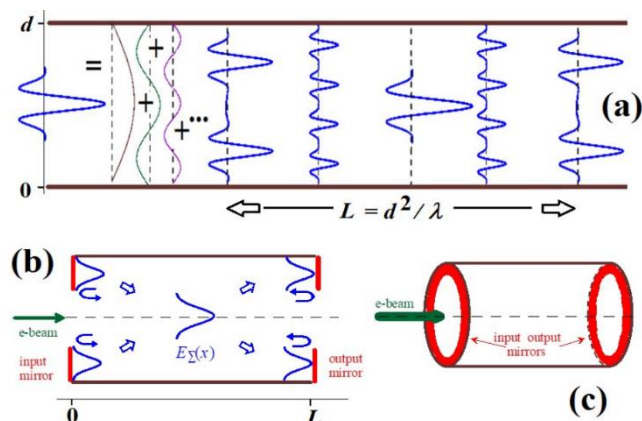


Рисунок 1 (а) Схематическая иллюстрация эффекта Тальбота, а также реализации высокочастотной супермоды типа Тальбота в резонаторах плоской (b) и цилиндрической (c) геометрии.

В данной работе мы развиваем теорию ЛСЭ, основанную на использовании резонаторов типа Тальбота, уделяя особое внимание двум ее аспектам. Во-первых, моделирование предсказывает сложную продольную структуру поля супермоды, действующего на рабочий электронный пучок. Поэтому вопрос об интенсивности взаимодействия частиц с супермодой нуждается в углубленном изучении. Кроме того, в некоторых ситуациях длина системы, равная длине Тальбота, недостаточна для обеспечения достаточно эффективного электронно-волнового взаимодействия. В связи с этим необходимо изучить возможность реализации резонатора с длиной, равной удвоенной длине Тальбота (рисунок 2).

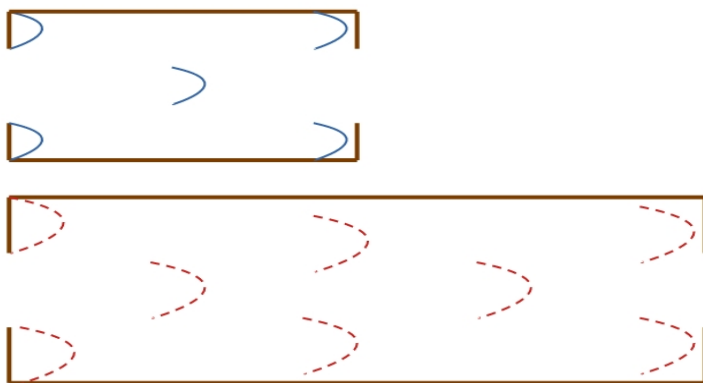


Рисунок 2. Полости типа Тальбота, длина которых соответствует одной (а) и двум длинам Тальбота (б). Волновые поля показаны условно.

2. ЛСЭ с резонатором Тальбо-типа

Исследуем общие свойства ЛСЭ с резонаторами типа Тальбота в рамках простейшей планарной двумерной модели и рассмотрим случаи, когда длина резонатора соответствует одному и двум повторениям волновой структуры супермоды по продольной координате (Рис. 2).

Следует еще раз отметить, что на рисунки 1 и 2 весьма схематично показаны волновые поля супермод, соответствующих одному и двум повторениям поперечной структуры волнового поля. На рисунке 3 показаны реальные двумерные структуры супермод, рассчитанные в рамках специально разработанного численного кода, моделирующего циркуляцию волнового поля по резонатору при любом случайном затравочном сигнале. В процессе прохождения через резонатор около 5-10 волн формируется структура, соответствующая наиболее высокочастотной супермоды [3].

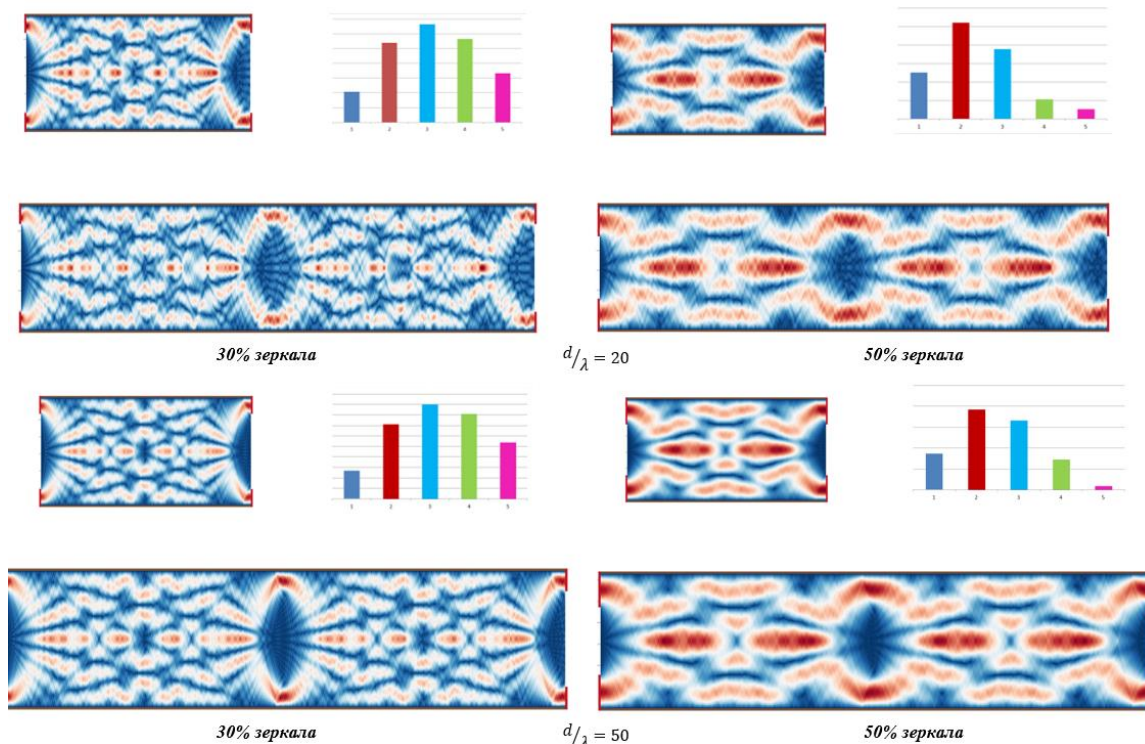


Рисунок 3. Структуры полей рабочих супермод, а также спектры парциальных мод, образующих эти супермоды, в случаях двух разных коэффициентов поперечного превышения, $d/\lambda = 20$ и 50 , а также двух разных размеров входных/выходных зеркал (когда зеркала занимают 30% и 50% сечения волновода).

На рисунке 3 сравниваются случаи двух разных коэффициентов поперечного завьшения $d/\lambda = 20$ и 50 , а также двух разных размеров входных/выходных зеркал (когда зеркала занимают 30% и 50% поперечного сечения волновода). Кроме того, рассмотрены случаи резонаторов с длиной, равной одному и двум периодам Тальбота. Рисунок 4 иллюстрирует коэффициенты отражения супермод от входного/выходного зеркала в зависимости от коэффициента поперечного превышения d/λ для случаев длин резонатора, равных одному и двум периодам Тальбота.

Из рис. 3 и 4 можно сделать следующие выводы. Во-первых, супермоды типа Тальбота имеют высокую дифракционную добротность. Даже если входные/выходные зеркала перекрывают только 30% поперечного сечения волновода, факторы отражения составляет 85-90% в случае $d/\lambda = 20$ и более 95% в случае $d/\lambda > 40$ (рисунок 4).

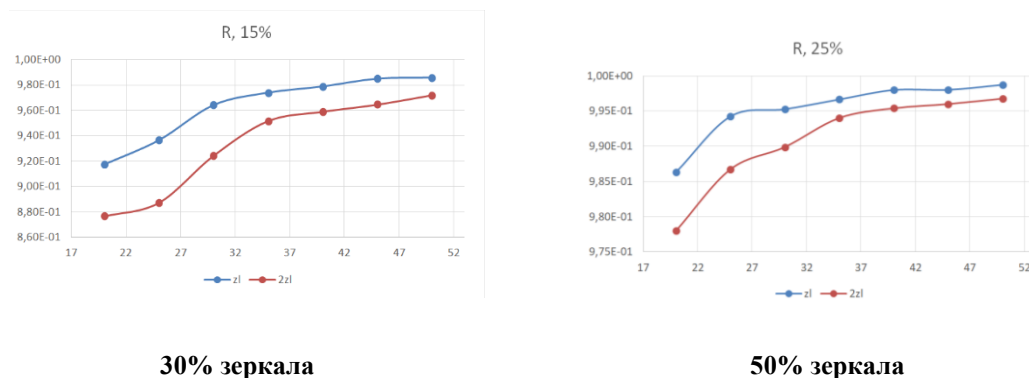


Рисунок 4. Коэффициенты отражения супермод от входных/выходных зеркал в зависимости от коэффициента поперечной сверхразмерности d/λ для случаев, когда длины резонатора равны одному

(1) и двум (2) периодам Тальбота.

Во-вторых, спектры парциальных мод, образующих рабочие супермоды (рисунок 3), а, следовательно, и коэффициенты отражения (рисунок 4), практически одинаковы в случаях, когда длины резонаторов равны одному и двум периодам Тальбота.

В-третьих, спектры парциальных мод, образующих супермоды, в основном зависят от размера зеркал, тогда как они практически не зависят от фактора d/λ (рисунок 3). Действительно, поскольку поле рабочей супермоды имеет одно изменение на каждом зеркале, число парциальных мод, образующих эту супермоду, определяется количеством n парциальных мод, необходимых для формирования одной вариации на стороне поперечного зеркала d_{mir} , а именно:

$$\frac{\pi}{d_{mir}} \approx n \frac{\pi}{d} \rightarrow n \approx \frac{d}{d_{mir}}$$

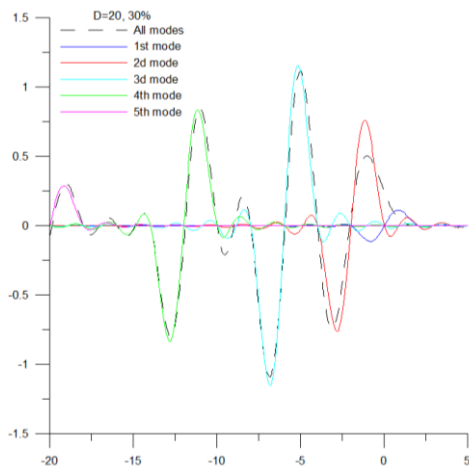
Эта формула дает нам $n \approx 6 - 7$ и $n \approx 4$ для случаев, когда входные/выходные зеркала покрывают соответственно 30% ($d_{mir} = 0,15d$) и 50% ($d_{mir} = 0,25d$) сечения волновода. Это очень хорошо соответствует спектрам, показанным на рисунок 3.

В-четвертых, структура полей супермод весьма сложна. В случае 50%-зеркал частицы рабочего электронного пучка, инжектированные в центр сечения волновода, «чувствуют» два максимума поля супермоды в пределах периода Тальбота, $0 < z < L$ (рис. 3). В случае 30%-ных зеркал, когда в формировании супермоды участвует больше парциальных волн, электроны «чувствуют» четыре максимума поля супермоды в области $0 < z < L$ (рис. 3). В обоих случаях в точке, соответствующей полупериоду Тальбота $z=L/2$, электроны «видят» близкое к нулю волновое поле, что контрастирует с картиной, показанной на рис. 2.

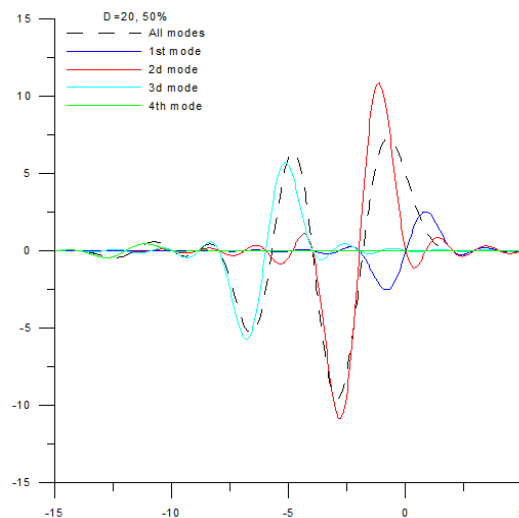
Однако более детальный анализ показывает, что процесс электронно-волнового взаимодействия выглядит проще. Рисунок 5 иллюстрирует интенсивность электронно-волнового взаимодействия в режиме малого сигнала. Это нормированный электронный КПД, найденный по известной формуле:

$$\eta = -\frac{\partial}{\partial \delta} \left| \int a(z) \exp(i\delta z) dz \right|^2.$$

Здесь $a(z)$ — аксиальное распределение волнового поля вдоль траектории электрона, а $\delta \propto \omega - (\omega/c + h_u)V_z \omega$ — рассогласование электронно-волнового ондуляторного резонанса. На рисунок 5 черные пунктирные кривые описывают ситуацию, когда $a(z) = \sum a_p \exp[i(\omega/c - h_p)z]$ формируется всеми парциальными модами (здесь h_p — продольное волновое число p -й моды), тогда как другие кривые описывают ситуацию, когда в приведенной выше формуле для нормированного электронного КПД η учитывается только одна парциальная мода. Мы видим, что в случае 30%-ных зеркал нормированный электронный КПД имеет четыре максимума, соответствующих резонансному взаимодействию электронов с модами $p = 2, 3, 4$ и 5 , тогда как в случае 50%-ных зеркал мы видим два максимума соответствуют резонансам с модами $p = 2$ и $p=3$. Наибольшая эффективность в обоих случаях соответствует наиболее важной парциальной моде в спектре супермоды.



30% зеркала



50% зеркала

Рисунок 5. Интенсивность электронно-волнового взаимодействия в режиме малого сигнала (нормированный электронный КПД) в зависимости от расстройки электронно-волнового резонанса.

Наиболее важное утверждение, следующее из рисунка 5, состоит в том, что взаимодействие электронного пучка с полем супермоды выглядит как взаимодействие только с одной парциальной модой (ближайшей к резонансу). Поэтому, хотя, глядя на рисунок 3, кажется, что электроны взаимодействуют с волновым полем сложной продольной структуры, на самом деле частицы эффективно взаимодействуют просто с одной из парциальных волн, образующих эту супермоду. По сути, это просто волна, бегущая по волноводу с амплитудой, близкой к постоянной. Последнее справедливо, если пренебречь влиянием электронно-волнового взаимодействия на волновую структуру, что справедливо при коэффициенте отражения волнового поля от зеркал, близкого к 100%.

3. Заключение

Простая двумерная теория, развитая в данной работе, дает нам важное утверждение: хотя рабочая супермода ЛСЭ на основе резонатора типа Тальбота формируется рядом парциальных мод, только одна из этих мод принимает участие в резонансном электронно-резонансном волновом взаимодействии. Если коэффициент отражения волн от входных/выходных зеркал близок к 100% (это верно, если коэффициент d/λ достаточно велик), то теория электронно-волнового взаимодействия в таких ЛСЭ просто совпадает с теорией автогенератора с высокой добротностью рабочего резонатора и однородной продольной структурой рабочей волны.

Работа поддержана **Российским научным фондом, проект № 21-72-30027.**

Список литературы

1. Peskov N.Yu., Arzhannikov A.V., Belousov V.I., et al. "Electrodynamic system of a powerful THz band free electron laser based on the LIU linear induction accelerator: modelling and cold tests", Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Vol.87, 669, 2023.
2. Oparina Yu.S., Peskov N.Yu., Savilov A.V., "Electron rf oscillator based on self-excitation of a Talbot-type supermode in an oversized cavity", Physical Review Applied, Vol.12, 044070, 2019.
3. Oparina Yu.S., Savilov A.V., Shchegolkov D.Yu., "Supermodes of oversized Talbot-type cavities," J. Appl. Phys., Vol. 128, 114502, 2020.