

Режимы самосинхронизации мод в лампе бегущей волны W-диапазона с запаздывающей обратной связью

М.Н. Вилков¹, А.А. Иванов^{1,2}, Р.М. Розенталь^{1,2}

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: Выполнено трехмерное моделирование методом крупных частиц модели экспериментально реализованной лампы бегущей волны W-диапазона с запаздывающей обратной связью. Продемонстрировано существование режимов самосинхронизации мод, характеризующихся генерацией последовательностей коротких (с длительностью около 0.5 нс) импульсов, пиковая интенсивность которых многократно превосходит среднюю интенсивность излучения.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, запаздывающая обратная связь, синхронизация мод

1. Введение

Генерация коротких импульсов микроволнового излучения представляет значительный интерес для ряда приложений. В радиолокационных приложениях укорочение длительности импульса позволяет увеличить пространственное разрешение. Также, подобные импульсы востребованы в методах высокоинтенсивной спектроскопии.

Одним из вариантов создания последовательностей коротких импульсов является использование эффекта синхронизации мод в усилителях с насыщающимся поглотителем в цепи обратной связи. Исторически первый такой генератор был выполнен на основе лампы бегущей волны (ЛБВ) с насыщающимся поглотителем в цепи обратной связи [1]. Функция поглотителя (оригинальное название – экспандер) состояла в поглощении сигналов с малой амплитудой и пропускании сигналов с большой амплитудой. Это позволяет обеспечить условие сфазированности отдельных мод в системе и, как результат, получить генерацию коррелированных последовательностей коротких импульсов. В недавней работе [2] такой подход использован для получения последовательностей ультракоротких импульсов большой мощности на основе гирорезонансной ЛБВ Ka-диапазона и циклотронного насыщающегося поглотителя.

Вместе с тем, в физике лазеров достаточно давно известен и эффект самосинхронизации мод, при котором генерация последовательностей импульсов возможна без применения дополнительных элементов [3]. В СВЧ приборах на основе электронных потоков впервые режимы самосинхронизации мод теоретически были описаны для модели лазера на свободных электронах с высокодобротным резонатором [4]. В дальнейшем было высказано предположение, что в силу достаточно универсального вида уравнений, использованных в работе [4], ее выводы могут быть применимы и к другим типам электронных генераторов, в частности – к генераторам на основе ЛБВ с запаздывающей обратной связью [5]. В свою очередь, недавние экспериментальные исследования показали существование режимов самосинхронизации мод в гирорезонансной ЛБВ с сильными отражениями выходного излучения [6].

В данной работе выполнено теоретическое исследование ЛБВ W-диапазона с

замедляющей системой типа "петляющий волновод". Показано, что при введении запаздывающей обратной связи в такой системе возможна генерация последовательностей коротких импульсов, пиковая мощность которых многократно превосходит средний уровень излучения.

2. Принцип синхронизации мод

Рассмотрим пример синхронизации трех мод с частотами $\omega + k\Delta\omega$, $k = -1, 0, 1$ (Рис.1а,б,в), сумма которых запишется в виде:

$$A(t) = \sum_k a_k(t), \quad a_k(t) = a_k^0 e^{i[(\omega+k\Delta\omega)t+\varphi_k]} \quad (1)$$

Если фазы мод имеют одинаковое значение

$$\varphi_k = \text{const} = \varphi \quad (2)$$

то при условии $a_k^0 = a_0 = \text{const}$ выражение (1) преобразуется к виду:

$$A(t) = a_0 e^{i(\omega t + \varphi)} (2 \cos(\Delta\omega t) + 1), \quad (3)$$

в свою очередь суммарная интенсивность запишется в виде

$$I(t) = \text{Re}\{A(t)\}^2 = a_0^2 (2 \cos(\Delta\omega t) + 1)^2 \cos^2(\omega t). \quad (4)$$

Благодаря выполнению условия (2) в суммарном сигнале образуются равномерно отстоящие друг от друга волновые пакеты, пиковая интенсивность которых будет составлять величину

$$I_{\max} = 9a_0^2 = 6\langle I(t) \rangle, \quad (5)$$

где $\langle I(t) \rangle = 1.5a_0^2$ – среднее значение интенсивности суммы трех мод.

На рис.1 показаны зависимости от времени амплитуд отдельных мод, суммарной амплитуды и относительной интенсивности для случая $\omega = 3\pi$, $\Delta\omega = \omega/10$. На практике спектральные компоненты могут иметь разную амплитуду, что также сказывается на суммарном колебании. К примеру, для случая сложения трех сфазированных мод с соотношением амплитуд $a_{\pm 1}^0 = \beta a_0^0$ выражение для относительной интенсивности приобретет следующий вид

$$\frac{I_{\max}}{\langle I \rangle} = \frac{2(2\beta + 1)^2}{2\beta^2 + 1}. \quad (6)$$

Таким образом при значении $\beta = 0.5$ пиковое значение интенсивности снижается до $I_{\max} = \frac{16}{3}\langle I(t) \rangle \approx 5.3\langle I(t) \rangle$, а при $\beta = 0.25$ составляет $I_{\max} = 4\langle I(t) \rangle$.

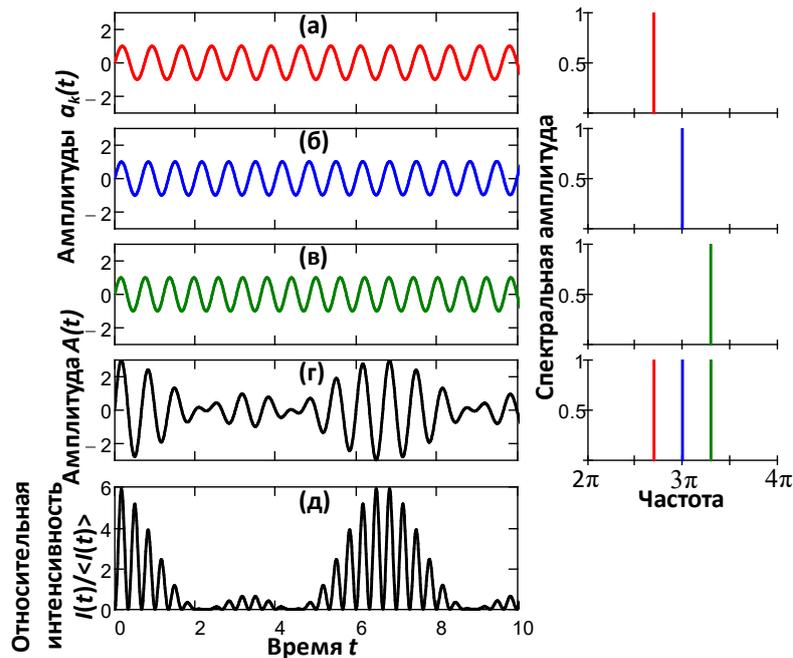


Рисунок 1. Иллюстрация принципа синхронизации мод: (а)-(в) – зависимости амплитуд отдельных мод от времени (слева) и соответствующие спектры (справа), (г) – зависимость от времени амплитуды суммарного колебания и соответствующий спектр, (д) – зависимость от времени суммарной относительной интенсивности $I(t)/\langle I(t) \rangle$.

Для реализации рассмотренного эффекта наиболее существенной проблемой является выполнения условия (2), т.е. обеспечение фиксированной разности фаз между генерируемыми модами. Одним из известных механизмов, в том числе реализованных в СВЧ-технике, является использование т.н. насыщающегося поглотителя, который сильно поглощает сигналы с малой амплитудой, при этом практически полностью пропускает сигналы с большой амплитудой. При определенных условиях включение такого элемента в цепь обратной связи позволяет обеспечить преимущество сфазированных осцилляций мод, дающих последовательность мощных коротких импульсов на выходе системы. Вместе с тем, существуют достаточно серьезные препятствия в создании насыщающихся поглотителей в миллиметровом диапазоне длин волн, способных работать со значительными уровнями мощности.

В свою очередь, в работе [4] при исследовании модели СВЧ-генератора с распределенным взаимодействием были обнаружены режимы генерации последовательностей коротких импульсов. Было показано, что при определенных параметрах возникает ситуация когда часть собственных мод генератора попадает в зону поглощения, определяемую отрицательным значением активной части электронной восприимчивости. В результате возникает "встроенный" насыщающийся поглотитель, что и приводит к эффекту синхронизации мод. Учитывая, что используемая модель в том числе может быть использована для описания динамики ЛБВ с цепью обратной связи, представляет интерес исследование возможностей генерации последовательностей импульсов в реальной модели ЛБВ.

3. Моделирование ЛБВ W-диапазона

Будем рассматривать далее модель экспериментально реализованной ЛБВ W-диапазона на основе замедляющей системы типа "петляющий волновод" [7]. Такая замедляющая система в классическом виде представляет собой систему встречных

пластин с боковыми стенками и имеет прямоугольные изгибы волноводного канала (Рис.2). В качестве рабочей при этом используется (+1)-я пространственная гармоника, обладающая слабой дисперсией в широкой (более 20 %) полосе частот.

Моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия выполнялось на основе программного комплекса CST Studio. В моделировании прямолинейный электронный пучок (1) с энергией 13.5 кэВ проходил через замедляющую систему (2) через каналы транспортировки (3) диаметром 0.45 мм. Для создания цепи обратной связи выходной сигнал ЛБВ разделялся на две равные части волноводным делителем (4), одна из которых через волновод цепи обратной связи (5) поступала на вход ЛБВ, а другая – в выходной волновод (6). Значение коэффициента обратной связи составляло $R \approx 0.1$ за счет наличия поглощающей вставки (7).

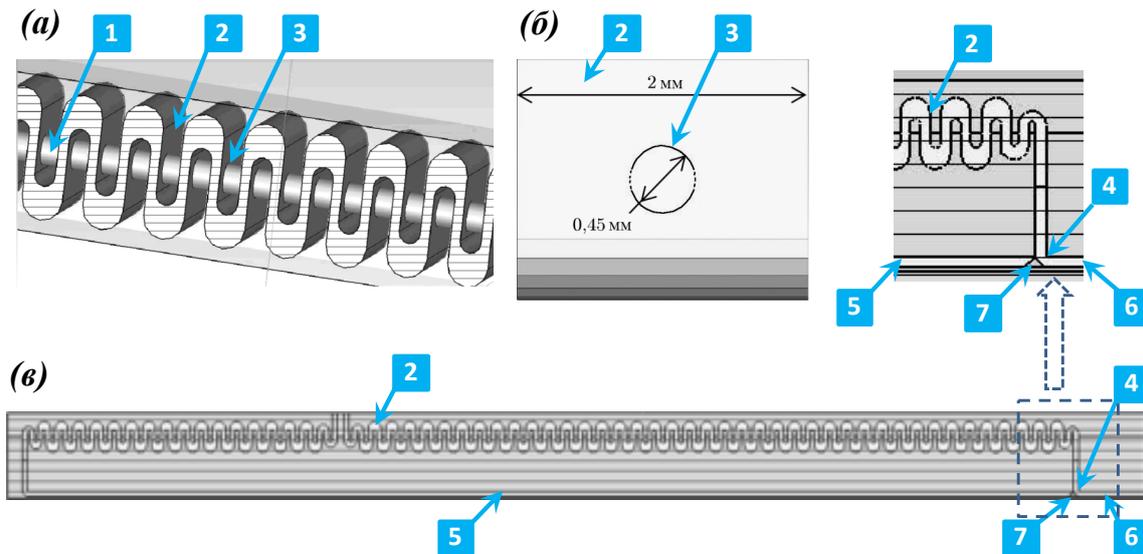


Рисунок 2. Трехмерная модель ЛБВ: (а) – область электронно-волнового взаимодействия, (б) – поперечное сечение замедляющей системы, (в) – продольный разрез системы с запаздывающей обратной связью (1 – электронный пучок, 2 – замедляющая система, 3 – канал транспортировки электронного пучка, 4 – волноводный делитель, 5 – волновод цепи обратной связи, 6 – выходной волновод, 7 – поглотитель).

По мере увеличения тока пучка происходило самовозбуждение ЛБВ на одной из собственных частот кольцевого резонатора, образованного замедляющей системой и цепью обратной связи. При токе пучка около 22 мА стационарный режим генерации сменялся режимом периодической автомодуляции. Возникновение автомодуляции происходило по "жесткому" сценарию, при котором глубина модуляции сразу имеет достаточно большое значение, что соответствует одновременному возбуждению нескольких мод кольцевого резонатора (Рис.3). Далее при увеличении тока происходил переход к режиму самосинхронизации мод, характеризующийся пиковым значением относительной интенсивности равным 5.65. Длительность импульсов при этом составляла около 0.5 нс.

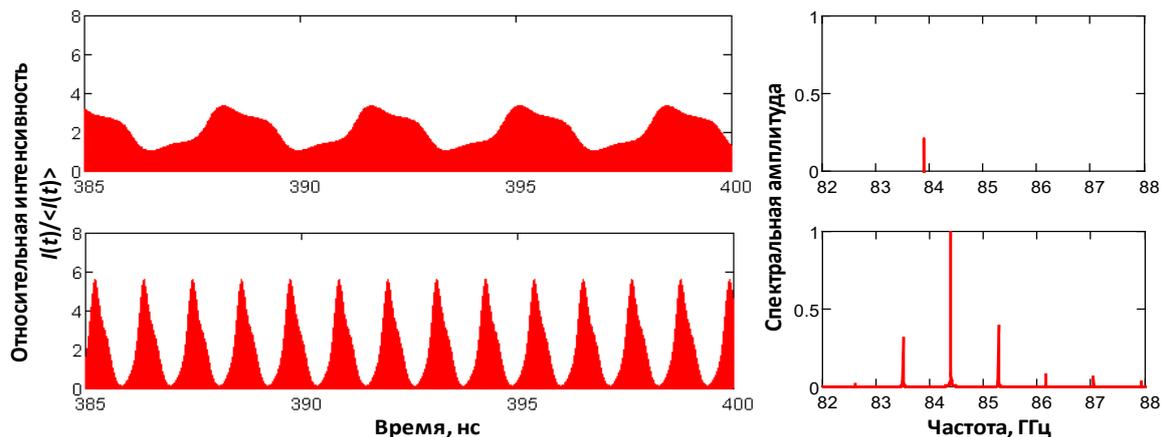


Рисунок 3. Зависимость относительной интенсивности выходного сигнала от времени и спектр излучения при токе пучка 23 мА (верхний рисунок) и 26 мА (нижний рисунок).

4. Заключение

В настоящее время наиболее широкое применение эффект синхронизации мод получил в физике и технике лазеров, где, в том числе, используются и режимы самосинхронизации. Привлекательность последних обусловлена отсутствием необходимости создания дополнительных устройств для фазирования отдельных мод, например – насыщающихся поглотителей. Учитывая, что в настоящее время уже экспериментально реализованы ЛБВ диапазона 0.2 ТГц и выше [9], возникают перспективы получения последовательностей коротких импульсов в терагерцовом диапазоне.

Список литературы

1. Cutler C. C. The Regenerative Pulse Generator // Proceedings of the IRE. – 1955. – V. 43. – No. 2. – P. 140-148.
2. Ginzburg N. S. et al. Ka-Band 100-kW Subnanosecond Pulse Generator Mode-Locked by a Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber // Physical Review Applied. – 2021. – V. 16. – Art.no. 054045.
3. Statz H., DeMars G. A., Tang C. L. Self-Locking of Modes in Lasers // Journal of Applied Physics. – 1967. – V. 38. – P. 2212.
4. Ginzburg N.S., Petelin M.I. Multifrequency generation in free-electron lasers with quasi-optical resonators // International Journal of Electronics. – 1985. – V. 59. – No. 3. – P. 291-314.
5. Рыскин Н.М. Исследование нелинейной динамики ЛБВ- генератора с запаздывающей обратной связью // Известия вузов. Радиофизика. – 2004. – Т. 44. – № 10. – С. 129-142.
6. R. M. Rozental et al . Self-Mode-Locking Regime in a K-Band Gyro-TWT With External Reflections // IEEE Electron Device Letters. – 2023. – V. 44. – No. 1. – P. 140-143.
7. Иванов А.А. Исследование возможности улучшения выходных характеристик ЛБВ W-диапазона // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2016. – Т. 59. – № 8-9. – С.721-728.
8. Богомолова Е. А., Галдецкий А. В., Рувинский Г. В., Солдатенко И. Г. ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов: особенности конструкций замедляющих систем и технологий изготовления // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3 (546). – С. 66-83.