

Циклотронно-резонансный модулятор на основе эффекта самоиндуцированной прозрачности

И.В. Зотова, С.В. Самсонов, Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский, А.С. Сергеев, Л.А. Юровский

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

Аннотация: обсуждается конструкция и экспериментальное тестирование циклотронно-резонансного модулятора, основанного на эффекте модуляционной неустойчивости монохроматической волны во встречном изначально прямолинейном электронном потоке. Традиционно считалось, что в таких потоках возможно только циклотронное поглощение. Однако, в определенной области параметров может развиваться модуляционная неустойчивость стационарной волны с периодическим образованием когерентных СВЧ-солитонов самоиндуцированной прозрачности (СИП). Необходимая нелинейность в рассматриваемом случае, также как и в гиротронах, обусловлена неизохронностью электронов-осцилляторов вследствие релятивистской зависимости гирочастоты от энергии частиц. На основе описанного эффекта экспериментально реализован модулятор стационарного излучения от гиро-ЛОВ Ка-диапазона со спиральным волноводом. В соответствии с расчетами получены последовательности суб-наносекундных импульсов с пиковой мощностью ~ 40 кВт, что в 1.3 раза превосходит мощность входного сигнала за счет нелинейной самокомпрессии. Преимуществом такого подхода по сравнению, например, с модуляцией СВЧ-сигналов на основе управляемых лазером полупроводниковых коммутаторов является высокая (суб-ГГц) частота повторения.

Ключевые слова: модуляционная неустойчивость, циклотронный резонанс, самоиндуцированная прозрачность

1. Введение

Предметом исследования, обсуждаемого ниже, является разработка нового типа электровакуумных приборов, основанного на циклотронном резонансе. То есть, как и в других классах циклотронно-резонансных приборов, взаимодействие достаточно интенсивного электронного пучка с электромагнитным излучением происходит в области, где имеется статическое однородное магнитное поле. Известно, что такие приборы выполняют совершенно разные функции. Например, гиротроны преобразуют мощность постоянного тока в стационарное одночастотное излучение, гиро-ЛБВ и гиро-клистроны усиливают падающее излучение по амплитуде, сохраняя его спектр (см., например, [1,2]), циклотронные выпрямители эффективно преобразуют мощность входящего микроволнового излучения в мощность постоянного тока [3-5]. Рассматриваемое в данной работе циклотронно-резонансное устройство преобразует (модулирует) падающее стационарное одночастотное излучение в периодическую последовательность коротких микроволновых импульсов с высокой частотой повторения. Соответственно, это устройство существенно изменяет спектр микроволнового излучения, которое, вместо того чтобы остаться монохроматическим, становится многочастотным, принимая форму «частотной гребенки».

Отметим, что источники такого СВЧ-излучения в виде когерентной последовательности коротких (наносекундных) импульсов актуальны для ряда приложений, включая диагностику плазмы, радиолокацию, спектроскопию и т. д. В частности, в [6] для этих целей использовались управляемые лазером полупроводниковые коммутаторы, что, однако, ограничивает мощность и частоту

следования генерируемых импульсов. Здесь мы обсуждаем альтернативную возможность, основанную на циклотронном резонансном взаимодействии излучения со встречным электронным пучком. Предполагается, что в исходном состоянии электроны не имеют вращательной скорости, т. е. на входе в пространство взаимодействия пучок является прямолинейным. Как показано в [7, 8], в этом случае развивается модуляционная неустойчивость (МН) монохроматической волны с периодическим образованием когерентных СВЧ-солитонов самоиндуцированной прозрачности (СИП). Образование СИП солитонов хорошо известно в оптике при распространении короткого (в масштабе времен релаксации) светового импульса в неинвертированных средах [9, 10], однако МИ стационарных оптических сигналов подавляется из-за быстрой фазовой релаксации. В электронике фазовая релаксация, как правило, не влияет на процессы взаимодействия, что приводит к возникновению МИ. Преимуществом такого подхода для модуляции СВЧ-сигналов является высокая (суб-ГГц) частота повторения, а также возможность достижения пиковой мощности, превышающей мощность электронных пучков (за счет нелинейной самокомпрессии).

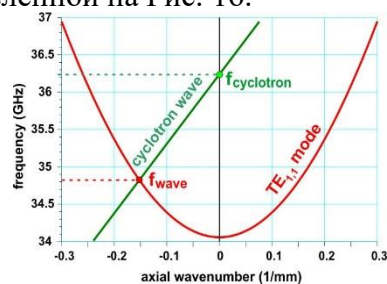
Теория таких циклотронных модуляторов, основанная на использовании упрощенных уравнений, была разработана в [7, 8]. В данной работе представлены результаты прямого 3-D моделирования, которые позволили определить конструктивные особенности такого устройства Ка-диапазона, а также – результаты первых экспериментов.

2. Проектирование и моделирование циклотронно-резонансного модулятора Ка-диапазона

Эксперимент по реализации циклотронно-резонансного (ЦР) модулятора был разработан с учетом имеющегося оборудования: во-первых, – жидкоохлаждаемого постоянного магнита, позволяющего создавать статическое магнитное поле до 1.5 Тл во внутреннем отверстии диаметром 52 мм (Рис. 1а), и, во-вторых, – источника СВЧ-излучения в виде гиротронной лампы обратной волны (гиро-ЛОВ), генерирующей импульсы длительностью около 100 мкс мощностью до 30 кВт и частотой, перестраиваемой в диапазоне 32–36 ГГц. В соответствии с этим рабочая частота циклотронного модулятора была выбрана равной 35 ГГц, рабочая мода – мода $TE_{1,1}$ гладкого круглого волновода, рабочее магнитное поле – около 1.3 Тл. Радиус участка волновода, в котором происходит циклотронное взаимодействие прямолинейного электронного пучка на основной циклотронной гармонике с падающей волной, был выбран равным 2.58 мм, что обеспечивает синхронизм пучка со встречной волной, как следует из дисперсионной диаграммы, представленной на Рис. 1б.



(а)



(б)

Рисунок 1. (а) Фотография соленоида постоянного тока с жидкостным охлаждением. (б) Диаграмма дисперсии электронно-волнового взаимодействия в ЦР модуляторе с рабочими частотами, обеспечиваемыми указанным соленоидом.

Рассмотренный выше принцип работы циклотронного модулятора определяет следующую конфигурацию прибора, представленную на Рис. 2. Рабочее пространство

(резонатор) модулятора образовано отрезком цилиндрического волновода с закритическим катодным сужением и коллекторным конусным расширением. Ниже по потоку от резонатора размещен поляризатор в виде отрезка волновода с эллиптическим поперечным сечением, который преобразует падающую линейно поляризованную волну $TE_{1,1}$ в циркулярно-поляризованную и наоборот. Резонатор пронизывается тонким прямолинейным электронным пучком, направляемым сильным аксиальным магнитным полем. Электронный пучок оседает на стенки коллектора с помощью отклоняющего магнита в виде двух постоянных магнитов. С коллекторного конца системы в резонатор модулятора вводится одночастотное излучение постоянной амплитуды в виде линейно поляризованного гауссова пучка, который проходит через профилированную волноводную секцию и преобразуется в линейно поляризованную моду $TE_{1,1}$, которая затем, проходя через поляризатор, преобразуется во вращающуюся моду, резонансно взаимодействующую со встречным электронным пучком. Далее волна отражается от закритического сужения и, проходя через поляризатор в направлении вверх по потоку, приобретает линейную поляризацию, ортогональную входной волне. После чего волна выводится через вакуумное окно. Вне лампы расположена квазиоптическая система, включающая сетку из проволок, позволяющую пространственно разделить падающий и выходной сигналы, имеющие взаимно ортогональные поляризации.

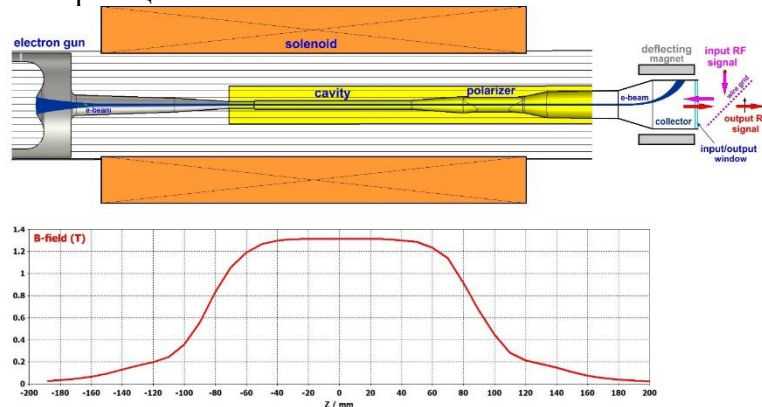


Рисунок 2. CST модель циклотронно-резонансного модулятора (вверху) и измеренный профиль магнитного поля соленоида (Рис.1а), использованный в моделировании (внизу).

Перед техническим проектированием и изготовлением ЦР модулятора было проведено его моделирование с использованием программного пакета CST Studio Suite. При этом, согласно представленной на Рис.2 геометрии, в расчет не только область взаимодействия, но и электронная пушка, помещенную в магнитное поле реального соленоида. Оптимизация параметров системы (напряжение и ток электронного пучка, геометрия резонатора, величина магнитного поля, мощность и частота падающего излучения) была выполнена с целью обеспечения стабильного формирования СИП солитонов.

Было продемонстрировано, что при энергии электронного пучка 10 кэВ и токе 0.5 А, такой модулятор может обеспечить импульсы длительностью 0.3-0.5 нс, пиковой мощностью 20-40 кВт и периодом повторения 1-3 нс (Рис. 3) при подаваемой мощности 30 кВт на частоте около 35 ГГц. В частности, результаты, показанные на Рис.4, представляют реализацию, в которой выходные импульсы имеют длительность 0.33 нс, период повторения 2.9 нс и пиковые мощности около 45 кВт, что в 1,5 раза превышает мощность поступающего сигнала. Спектр этой последовательности импульсов имеет вид частотной гребенки с четко выраженными линиями, что подтверждает фазовую когерентность ВЧ колебаний в формируемых импульсах.

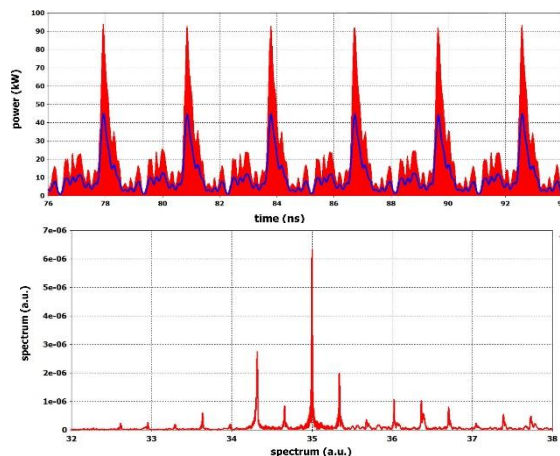


Рисунок 3. Результаты CST моделирования. Показаны временной провидь средней мощности (вверху) и спектр излучения (внизу) для оптимального случая с магнитным полем 1.32 Тл.

3. Результаты эксперимента

Эксперимент проводился на стенде [11], который, помимо самого циклотронного модулятора, включал также источник входного сигнала – спиральную ЛОВ с указанными выше параметрами и квазиоптическую линию передачи. Обе лампы работали в режиме длинных импульсов. Фото изготовленного модулятора представлено на Рис.4.



Рисунок 4. Фото экспериментального образца циклотронно-резонансного модулятора Ка-диапазона

В отличие от расчетов, приведенных на Рис.3, мощность входного сигнала была несколько снижена, чтобы обеспечить более плавную (без всплесков) вершину СВЧ-импульса, имитирующего стационарный сигнал. Соответственно, были снижены и рабочие токи модулятора, что соответствует результатам теоретического анализа. При этом, в зависимости от соотношения частоты входного сигнала и гирочастоты, задаваемой величиной магнитного поля, наблюдались различные режимы взаимодействия, предсказанные теорией, включая циклотронное поглощение, нелинейное просветление, а также модуляционную неустойчивость входного сигнала с его разбиением на периодическую или квазихаотическую последовательность СИП солитонов. Некоторые из полученных периодических реализаций со спектром вида «частотная гребенка» представлены на Рис.5.

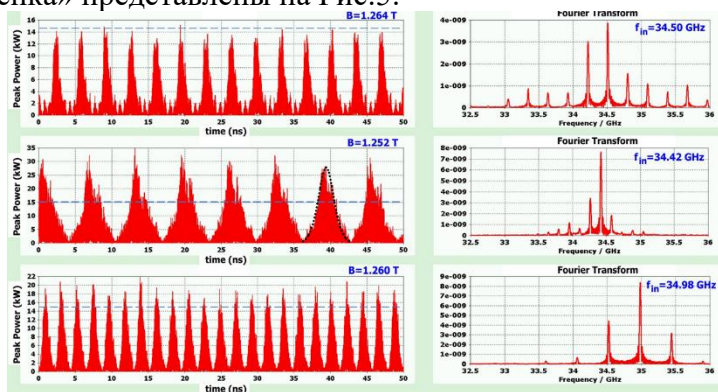


Рисунок 5. Полученные в эксперименте периодические последовательности СИП солитонов.

Заключение

Таким образом, результаты эксперимента подтвердили возможность наблюдения формирования микроволновых СИП солитонов в результате циклотронно-резонансного взаимодействия стационарного излучения со встречным изначально прямолинейным электронным пучком. На этой основе был разработан, изготовлен и успешно протестирован циклотронно-резонансный модулятор Ка-диапазона. Получены импульсы с параметрами, близкими к расчетным. Показано возмодность управления параметрами излучения при изменении магнитного поля. Масштабирование разработанного устройства на более высокие чатсоты представляет интерес для создания модуляторов излучения спектроскопических гиротронов с целью обогащения их спектра. Когерентное высокочастотное излучение со спктром вида частотная гребенка представляет интерес для широкодиапазонной импульсно спектроскопию

Работа выполнена в рамках проекта ИПФ РАН **FFUF–2022–0007** «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона».

Список литературы

1. Thumm M. State-of-the-art of high-power gyro-devices and free electron masers // *J. Infr., Millim., THz Waves.* – 2020. – V. 41.– P. 1–140. doi: 10.1007/s10762-019-00631-y.
2. Nusinovich G. S. *Introduction to the Physics of Gyrotrons.* – Baltimore, MD, USA: Johns Hopkins Univ. Press, 2004.
3. Watson D. C. et al. A cyclotron-wave rectifier for S-band and X-band // *IEEE Trans. Electr. Dev.* – 1971. – V. 18. – P. 3–11. doi: 10.1109/T-ED.1971.17137.
4. Zhao X. et al. Research on the high power cyclotron-wave rectifier // *Phys. Plasmas.* – 2017. – V. 24. –Art.no. 073117. doi: 10.1063/1.4994074.
5. Samsonov S. V. et al. High-Power Ka-Band Gyrotron Rectifier for Advanced Systems of Wireless Power Transmission // *J. Infr., Millim., THz Waves.* – 2025. – V. 46. –P. 2153-2156. doi: 10.1007/s10762-024-01026-4.
6. Вихарев А.А. и др. Быстродействующий квазиоптический переключатель фазы волнового пучка, основанный на эффекте индуцированной фотопроводимости в кремнии // *Письма в ЖТФ.* – 2007. – Т. 33. – С. 38–45.
7. Zotova I. V. et al. Conversion of an electromagnetic wave into a periodic train of solitons under cyclotron resonance interaction with a backward beam of unexcited electron-oscillators // *Phys. Rev. Lett.* – 2014. – V. 113. –Art.no. 143901. doi: 10.1103/PhysRevLett.113.143901.
8. Rostuntsova A. A. et al. Modulation instability of an electromagnetic wave interacting with a counterpropagating electron beam under condition of cyclotron resonance absorption // *Phys. Rev. E.* – 2022. – V. 106. – Art.no. 014214. doi: 10.1103/PhysRevE.106.014214.
9. McCall S. L. and Hahn E. L. Self-Induced Transparency by Pulsed Coherent Light // *Phys. Rev. Lett.* – 1967. – V. 18. – P. 908. doi: 10.1103/PhysRevLett.18.908.
10. Aceves A. B. and Wabnitz S. Self-induced transparency solitons in nonlinear refractive periodic media // *Phys. Lett. A.* – 1989. – V. 141. – P. 37. doi: 10.1016/0375-9601(89)90441-6.
11. Ginzburg N. S. et al. Ka-Band 100-kW Subnanosecond Pulse Generator Mode-Locked by a Nonlinear Cyclotron Resonance Absorber // *Phys. Rev. Applied.* – 2021. – V. 16.– Art.no 054045. doi: 10.1103/PhysRevApplied.16.054045.