



Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ
Уральского отделения
Российской академии наук
(ИЭФ УрО РАН)

Амундсена ул., д.106, г.Екатеринбург, 620016
Тел. (343) 267-87-96 Факс (343) 267-87-94

ОКПО 04839716 ОГРН 1026604936929
ИНН/КПП 6660007557/667101001

20.11. 2019 г. № 16346-1256-337

на № _____ от _____
[Отзыв ведущей организации]

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЭФ УрО РАН,
член-корреспондент РАН

В. Чайков

« 20 »



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Вилкова Михаила Николаевича **«Электронные генераторы мощных ультракоротких микроволновых импульсов с пассивной синхронизацией мод»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика

Диссертационная работа Вилкова Михаила Николаевича посвящена вопросам генерации периодической последовательностей мощных ультракоротких микроволновых импульсов в электронных генераторах, основанных на пассивной синхронизации мод. С этой целью в цепь обратной связи устанавливается нелинейный насыщающийся поглотитель, который практически полностью поглощает малый шумовой фон и прозрачен для микроволновых импульсов большой амплитуды. Подобный метод генерации ультракоротких импульсов широко используется в квантовой электронике при реализации фемтосекундных лазеров, но относительно мало изучен применительно к классической электронике. Вместе с тем, данный круг вопросов непосредственно обозначен в программе фундаментальных исследований государственных академий наук РФ на 2013-2020 гг., где в пункте № 13 указаны задачи по направлению «Фундаментальные проблемы физической электроники, в том числе разработка методов генерации, приема и преобразования электромагнитных волн с помощью твердотельных и вакуумных устройств, акустоэлектроника, релятивистская электроника больших мощностей, физика мощных пучков заряженных частиц». Это, безусловно, обосновывает актуальность диссертационной работы.

Основными задачами работы явилось, с одной стороны, построение теоретических моделей, описывающих динамику генераторов с нелинейным поглотителем в цепи обратной связи, а с другой – поиск механизмов электронно-волнового взаимодействия, обеспечивающих реализацию насыщающегося поглощения излучении большого уровня мощности (от киловаттной до гигаваттной).

Автором получен ряд новых результатов. В целом, защищаемые Вилковым М.Н. положения доказаны и раскрыты в диссертационной работе. Автореферат соответствует диссертации и в сжатой форме достаточно полно отражает её содержание.

Диссертация состоит из введения, трех глав, а также заключения, в котором сформулированы основные результаты работы. Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, кратко изложены цели и задачи, личный вклад автора, положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассматривается общая двухсекционная схема генератора ультракоротких импульсов (УКИ), цепь обратной связи которого включает электронный усилитель и насыщающийся поглотитель. Для описания активного элемента используется универсальная модель электронного усилителя с преобладающей инерционной группировкой частиц, на основе которой могут быть описаны многие типы электронных усилителей в приближении малого изменения энергии частиц, включая черенковские и гиро- ЛБВ, а также лазеры на свободных электронах. Нелинейное поглощение, аналогично лазерной физике, описывается безинерционной моделью.

Показано, что в зависимости от параметров исследуемая двухсекционная система обладает большим набором динамических режимов, включая режимы генерации регулярных последовательностей УКИ. Если уровень подавления малого сигнала в поглощающей секции таков, что условия самовозбуждения генератора выполнены, то импульсно-периодическая генерация развивается из малых начальных флуктуаций, то есть реализуется мягкий режим возбуждения. В жестком режиме генерация может развиваться только после подачи в систему достаточно большого сигнала, просветляющего поглотитель. В мягком режиме в цепи обратной связи образуется последовательность импульсов, интервал следования которых вырабатывается системой самостоятельно и определяется временем прохождения сигнала пространства взаимодействия усилителя. Увеличение времени задержки приводит к росту числа импульсов, циркулирующих внутри системы. При этом интервал между импульсами в выходном сигнале практически не меняется. Соответственно, на смену импульсу, покидающему пространство взаимодействия усилителя, почти сразу по цепи обратной

связи поступает новый импульс. В результате, в мягком режиме средний по времени электронный КПД при увеличении времени задержки остается неизменным.

В жестком режиме внутри резонатора может образоваться и циркулировать единственный импульс. Поэтому при увеличении времени задержки и, соответственно, времени пробега импульса по цепи обратной связи часть электронов пучка, непрерывно инжектируемых в пространство взаимодействия усилителя, не взаимодействует с излучением. Как следствие, в жестком режиме генерации средняя по времени эффективность энергообмена падает по мере увеличения времени задержки сигнала. Однако стабильность генерации УКИ в жестком режиме значительно выше, чем в мягком.

Целью **второй** главы является анализ насыщающихся поглотителей на основе электронно-волнового взаимодействия, которые способны функционировать при высоких уровнях входящего излучения.

В качестве наиболее универсального варианта анализируется нелинейный поглотитель на основе циклотронного взаимодействия излучения с первоначально прямолинейным замагниченным электронным пучком. Показано, что в этом случае насыщение поглощения излучения обусловлено релятивистской зависимостью гирочастоты от энергии частиц, т.е. используется тот же эффект, который лежит в принципе работы гиротронов.

Альтернативный вариант насыщающихся поглотителей может быть реализован на основе эффекта комфнеровского подавления входного сигнала, который реализуется при определенной настройках условий электронно-волнового синхронизма и хорошо известен для многих типов электронных усилителей в режимах малого сигнала. В работе показано, что при поглощении сигналов большой амплитуды возникает эффект насыщения и комфнеровский режим может быть использован при создании насыщающихся поглотителей.

В третьей главе детально рассмотрены несколько схем генераторов УКИ, основанных на режиме пассивной синхронизацией мод. При этом, в отличие от **Главы 1**, используются более полные модели, в которых прохождение импульсов как через усилитель, так и через просветляющийся поглотитель описывается системами динамических уравнений, учитывающих специфику электронно-волнового взаимодействия, включая дисперсию, ограниченность частотных полос усиления и поглощения.

Здесь с точки зрения электроники больших мощностей представляются наиболее актуальными схемы УКИ генераторов, в которых электронные усилители уже реализованы экспериментально. Прежде всего, выделим схему с релятивистской черенковской ЛБВ и насыщающимся циклотронным поглотителем. Моделирование показывает, что в такой сильноточной схеме возможна генерация последовательности субнаносекундных импульсов с мощностью до 6 ГВт, что втрое превышает мощность электронного пучка. При этом показывается, что механизм генерации периодической последовательности импульсов с высоким коэффициентом конверсии аналогичен механизму генерации одиночных импульсов сверхизлучения и обусловлен кумулятивным отбором энергии электромагнитным импульсом у различных (новых) фракций электронного потока.

Другой перспективный вариант УКИ генератора основан на схеме, включающей широкополосную гиро-ЛБВ с винтовым волноводом и циклотронный поглотитель. Важно отметить, что данная схема использована автором для моделирования экспериментального макета 32 ГГц генератора УКИ, разработка и реализация которого в настоящий момент находится в завершающей стадии.

По материалам диссертационной работы имеется ряд замечаний и вопросов. В частности:

1. В разделе 1.1 исследуется зависимость максимальной амплитуды импульсов от длины усилителя. Показывается, что пиковая амплитуда растет с увеличением длины. При этом в конечном итоге рассматриваются длины, достигающие десятки обратных инкрементов. Из опыта построения аналогичных зависимостей для пиковой амплитуды сверхизлучательных импульсов известно, что при больших длинах необходим учет шумовых флуктуаций плотности электронного потока, существенно ограничивающих достижимую амплитуду. Хотелось бы видеть учет указанных факторов при анализе УКИ генерации.
2. Наряду с развитой теорией, основанной на усредненном описании электронно-волнового взаимодействия, было бы полезно видеть сопоставление её выводов с результатами прямого численного моделирования, например методом крупных частиц, особенно когда это касается систем, предназначенных для экспериментальной реализации.
3. В перечне целей диссертационной работы указана разработка макетов генераторов УКИ. В списке результатов отмечено, что «разработан макет генератора УКИ 8-ми миллиметрового диапазона на основе винтовой гиро-ЛБВ и циклотронно-резонансного насыщающегося поглотителя». Здесь следовало бы уточнить, что разработана была всё-

таки (теоретическая, численная) модель такого прибора, поскольку макет предполагает уже некоторую экспериментальную реализацию.

Отмеченные замечания носят скорее характер пожеланий для дальнейшего развития исследований и не влияют на общее положительное впечатление о диссертационной работе. В целом диссертация Вилкова Михаила Николаевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные задачи генерации периодической последовательности ультракоротких микроволновых импульсов большой амплитуды. Полученные результаты, безусловно, имеют важное фундаментальное и прикладное значение и могут быть использованы для дальнейших исследований в ряде академических и других профильных организаций, в том числе, занимающихся практическими разработками.

Вилков Михаил Николаевич является сложившимся специалистом в области радиофизики и высокочастотной электроники; его высокая квалификация не вызывает сомнений. Основные результаты работы Вилкова М.Н. опубликованы в профильных научных журналах с высоким импакт-фактором, а также неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. Они хорошо известны специалистам. Применяемые методы исследований, в том числе, экспериментальные, свидетельствуют о достоверности полученных результатов.

В целом диссертационная работа Вилкова Михаила Николаевича «Электронные генераторы мощных ультракоротких микроволновых импульсов с пассивной синхронизацией мод» удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика за теоретическую разработку новых подходов в задаче формирования последовательностей мощных ультракоротких микроволновых импульсов.

Работа заслушана и обсуждалась на семинаре ИЭФ УрО РАН, протокол № 23 от 20 ноября 2019 года.

Отзыв составил

главный научный сотрудник ИЭФ УрО РАН,
д.т.н., профессор, академик РАН

Яландин М. И.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106
Тел.: 8 (343) 267-87-96; Факс: (343) 267-87-94; E-mail: admin@iep.uran.ru