

14. Диденко А.Н., Зеленцов В.И., Штейн Ю.Г., Юшков Ю.Г. Генерирование мощных СВЧ импульсов наносекундной длительности // Радиоэлектроника. - 1972. - Т. 17, вып. 7. - С. 1545-1547.
15. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 112 с.
16. Артеменко С.Н., Августинович В.А., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Вывод энергии из сверхразмерного резонатора через "пакет" интерференционных переключателей с суммированием выходных сигналов // ЖТФ. - 2000. - Т. 7, вып. 11. - С. 105-107.
17. Новиков С.А., Разин С.В., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Получение мощного СВЧ излучения при сложении радиосигналов на выходе резонансных формирователей // Письма в ЖТФ. - 1990. - Т. 16, вып. 20. - С. 46-48.
18. Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Формирователь гигаваттного наносекундных СВЧ импульсов с применением временной компрессии энергии излучения магнетрона // Приборы и техника эксперимента. - 2000. - № 3. - С. 85-87.
19. Диденко А.Н., Винтизенко И.И., Машенко А.И. и др. Резонансная компрессия СВЧ импульсов на выходе релятивистского магнетрона // Доклады РАН. - 1999. - Т. 366. - № 5. - С. 619-621.

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ВИРКАТОРЕ ТИПА ТРИОД С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ

А.Г. Жерлицын, Г.В. Мельников

Приведены результаты исследований эффективности генерации СВЧ излучения в виркаторе с виртуальным катодом. Рассмотрены процессы группировки электронов, обратная связь в триоде, оказывающие влияние на эффективность генерации.

1. Введение

Наиболее актуальным вопросом при исследовании генерации СВЧ излучения в различных типах виркаторов является повышение эффективности преобразования энергии пучка в энергию СВЧ излучения [1]. Как показывают эксперименты, проведенные в последнее время, эффективность в виркаторах, как правило, составляет единицы процентов. В тоже время эксперименты, проведенные в виркаторе типа триод с виртуальным катодом (ВК) в S-диапазоне частот, показывают возможность генерации гигаваттного уровня мощности с эффективностью до 12 % [2], а на низком уровне мощности эффективность достигала 30 % [3].

В данном сообщении представлены результаты исследования эффективности генерации СВЧ излучения в триоде с ВК.

2. Группировка электронов

Для эффективного преобразования энергии пучка в СВЧ излучение необходимо обеспечить упорядоченное движение электронов в потоке, т.е. их группировку. В триоде с ВК колеблющиеся между реальным и виртуальным катодами электроны представляют собой систему нелинейных осцилляторов, и их упорядоченное движение обеспечивается, прежде всего, фазовой группировкой.

В теоретической работе [4] было проведено исследование эффективности генерации в триоде с ВК в предположении, что фактором, определяющим группировку электронного потока, является несинхронность колебаний электронов в самосогласованной потенциальной яме. С учетом влияния

внешнего колебательного контура и конечного времени жизни электронов в пространстве взаимодействия показано, что при такой группировке триод с ВК выходит на режим стационарной генерации с электронным КПД $\sim 10\%$. Полученные же в экспериментах КПД более 10 % свидетельствуют о том, что наряду с фазовой группировкой действуют и другие механизмы группировки. Один из таких механизмов - фазовая селекция электронов на электродах триода и стенках вакуумной камеры.

На рис. 1 представлены результаты вычисления электронного КПД с учетом фазовой селекции при прозрачности анода $T = 0,8$. Для сравнения приведена зависимость электронного КПД, полученная без учета селекции электронов при тех же параметрах. Из рис. 1 видно, что в течение трех периодов колебаний электронов КПД определяется фазовой группировкой, а затем в результате роста самосогласованного ВЧ поля определяющей становится фазовая селекция, и триодная система выходит на режим стационарной генерации с КПД 30 %.

Проведенные эксперименты подтверждают, что в триоде с ВК имеет место механизм фазовой селекции [5]. Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис. 2. Для обнаружения "неправильно-фазных" электронов при генерации СВЧ колебаний в триодной системе в центре катода - 1 просверлено отверстие, за которым помещен цилиндр Фарадея - 9. Отверстие закрывалось алюминиевой фольгой - 8 толщиной 10 мкм, которая исключала попадание на цилиндр ионов из триода, ускоренных в катод-анодном промежутке. При наличии фазовой селекции "неправильно-фазные" электроны, получив дополнительную энергию из ВЧ поля и преодолев потенциал катода, через отве-

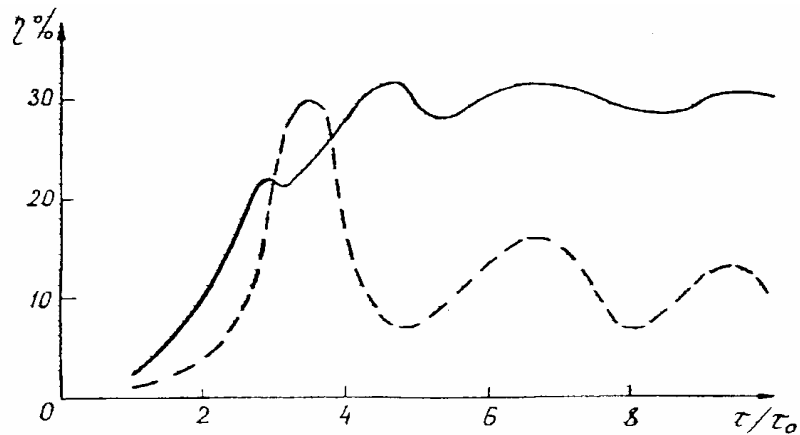


Рис. 1. Зависимость электронного КПД от соотношения τ/τ_0 . Сплошная кривая - с учетом фазовой селекции, пунктирная - без учета, τ_0 - время пролета электронов в электронном промежутке катод-виртуальный катод, τ - время генерации СВЧ колебаний

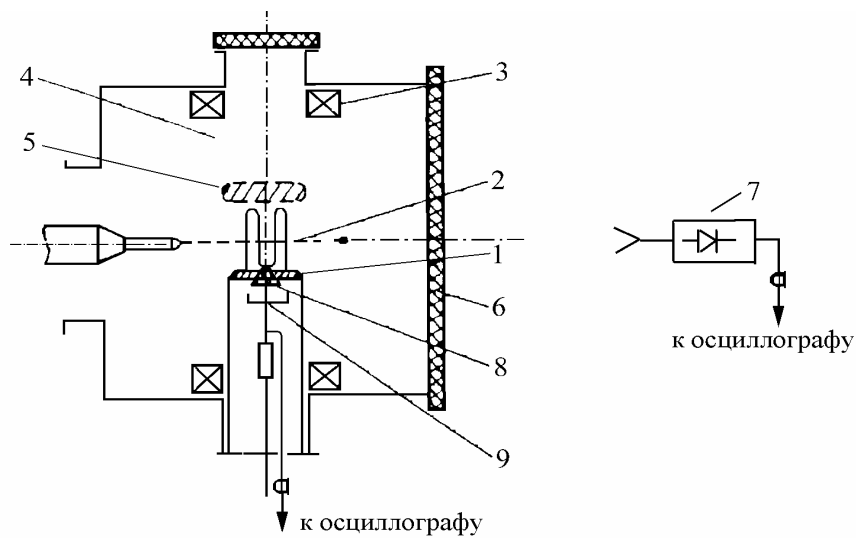


Рис. 2. Схема эксперимента - 1) катод, 2) анод-сетка, 3) катушка соленоида, 4) вакуумная камера, 5) область виртуального катода, 6) окно для вывода СВЧ излучения, 7) приемная антенна с детекторным блоком, 8) фольга, 9) цилиндр Фарадея

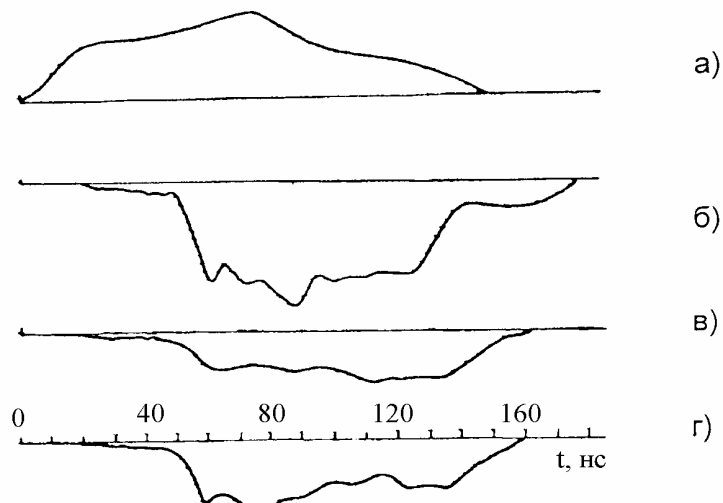


Рис. 3. Типичные осциллограммы импульсов: а) тока в триоде, б) СВЧ излучения в триоде, в) тока с цилиндра Фарадея, г) высокочастотной модуляции тока с цилиндра Фарадея

рстие в нем попадают на цилиндр Фарадея. В экспериментах цилиндр Фарадея зарегистрировал ток "неправильно-фазных" электронов и ВЧ модуляцию потока этих электронов.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3, из которого видно, что сигнал на цилиндре Фарадея возникает в тот момент, когда в системе появляется осциллирующий поток электронов, и исчезает, когда осцилляция прекращается. Уменьшение мощности СВЧ излучения в триоде приводит к уменьшению амплитуды сигнала с цилиндра Фарадея. Так, уменьшение мощности в 10 раз привело практически к исчезновению сигнала с цилиндра, т.е. сигнал настолько мал, что при данной чувствительности регистрирующей аппаратуры импульс тока не наблюдали. Была зарегистрирова-

на ВЧ модуляция потока "неправильно-фазных" электронов и измерена частота модуляции.

Установлено, что модуляция происходит на частоте генерируемых в триоде СВЧ колебаний. Оценка энергии этих электронов по фольгам разной толщины дает величину более 100 кэВ и хорошо согласуется с расчетным значением энергии "неправильно-фазных" электронов.

3. Обратная связь в триоде с ВК

Отличительной особенностью генерации в триоде с ВК по сравнению с другими типами виркаторов является то, что в этой системе процессы формирования пучка и преобразования энергии пучка в энергию СВЧ излучения происходят в одном и

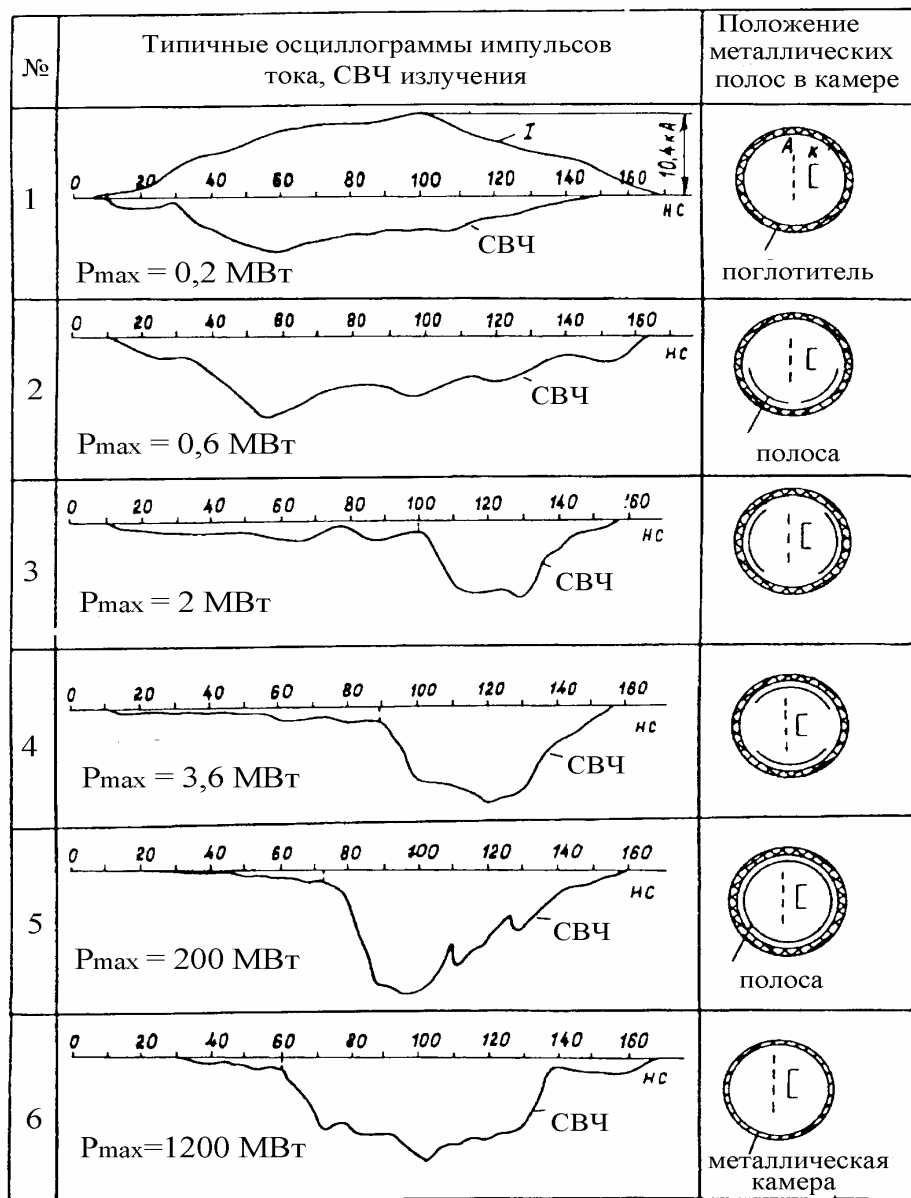


Рис. 4. Влияние вакуумной камеры на процесс генерации излучения

том же объеме (рис. 2), являющимся одновременно электродинамической структурой (резонатором) виркатора. Это, безусловно, оказывает влияние на процесс генерации и ее эффективность, поскольку в этом случае в системе наиболее эффективно действует обратная связь между пучком и СВЧ полем, возбужденным в триоде. В виркаторе, именуемым "виртод" [6], для повышения эффективности генерации до 17 %, специальной (искусственной) образом создавалась дополнительная обратная связь. В триоде с ВК этого не требуется. Более того, в этой системе обратная связь создается одновременно с возбуждением СВЧ полей пучком, как бы автоматически, без вмешательства извне.

Влияние обратной связи в триоде с ВК на эффективность генерации было исследовано экспериментально. В эксперименте в качестве резонатора триода использовалась цилиндрическая вакуумная камера, покрытая изнутри поглощающим материалом с коэффициентом отражения в рабочей полосе частот не более 3 %. СВЧ излучение выводилось через окно - 6.

Эксперименты проводились при энергии электронов 0,5 МэВ, токе до 18 кА, длительности импульса 160 нс. Обратная связь в камере изменялась за счет размещения на поверхности поглотителя экранов, выполненных из металлической фольги в виде полос, рис. 4.

Во всех случаях параметры пучка (энергия электронов, ток, сечение пучка) были неизменными. При этом генерация СВЧ колебаний осуществлялась на частоте осцилляции электронов между реальным и виртуальным катодами, равной 2,94 ГГц. Однако, как видно из рис. 4, процесс генерации в каждом случае протекает по-разному. В отсутствие обратной связи, когда практически все излучение поглощается, рис. 4 (1), излучение начинается с появления тока осциллирующих электронов во времени и изменяется приблизительно по закону изменения тока. Максимальная мощность СВЧ излучения не превышала 0,2 МВт.

Расположение полос в камере, как показано на рис. 4 (2-4), изменяет процесс генерации во времени. В этом случае появляется возможность многократного взаимодействия СВЧ излучения с осциллирующим потоком, что приводит к резкому нарастанию мощности излучения при некоторых значениях тока (стартовый ток $I_{смапм}$). Скорость нарастания амплитуды СВЧ импульса больше, чем скорость нарастания импульса тока. Передний фронт импульса излучения составляет несколько наносекунд. Величина стартового тока зависит от размеров полос и их положения в камере. Это, очевидно, связано с диаграммой излучения осциллирующих электронов, которая зависит от энергии электронов. При энергиях электронов не более 0,5 МэВ излучение с наименьшей интенсивностью происходит вдоль их осцилляций.

Поэтому, при расположении полос в системе, рис. 4 (2), обратная связь более слабая по сравнению с обратной связью в системе, рис. 4 (3). На

рис. 4 (5) показаны результаты измерений, при которых кроме полос, расположенных, как на рис. 4 (3 и 4), в торце камеры напротив выходного окна помещались дополнительные две полосы. Это привело к уменьшению стартового тока с 10 до 8 кА и увеличению интенсивности излучения почти в 50 раз.

Наибольшая мощность излучения наблюдалась в металлической камере, рис. 4 (4), имеющей такую же геометрическую форму и размеры, что и камера с поглотителем. В ней интенсивность излучения достигала 1,2 ГВт, стартовый ток снизился до $I_{смапм} = 7,3$ кА.

Эти исследования показали, что использование в триоде металлической камеры, в которой одновременно формируется пучок, возбуждаются СВЧ поля, обуславливает преобразование энергии пучка в энергию СВЧ излучения, обеспечивает условия создания обратной связи и возможность генерации с высокой эффективностью.

В продолжении исследования влияния обратной связи в триоде с ВК на эффективность генерации были проведены эксперименты по определению условия ее создания и оптимизации. Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис. 5.

В этой схеме принимались во внимание результаты предыдущих экспериментов с обратной связью. А именно, размещение отражающих полос в торце камеры напротив окна для вывода СВЧ излучения приводит к резкому увеличению интенсивности излучения. Поэтому в схеме эксперимента - 2 (рис. 5) торцевая стенка камеры была выполнена в виде короткозамыкающего поршня. Поршень перемещали вдоль оси камеры, таким образом изменялась длина камеры. Эксперименты проводили при трех величинах катод-анодного зазора $d_{к-А}$ - 16, 18 и 20 мм, соответственно. Наименьшее

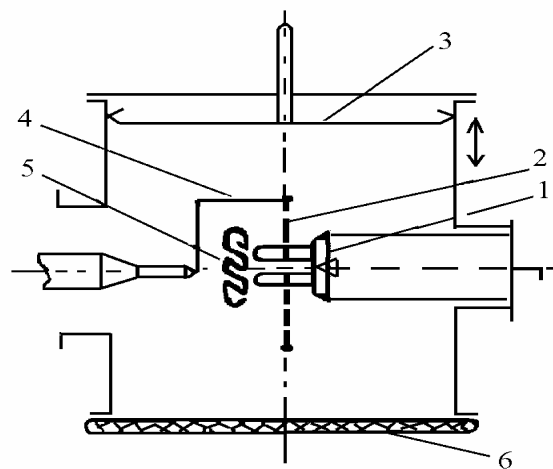


Рис. 5. Схема эксперимента - 2: 1) катод, 2) анод-сетка, 3) короткозамыкающий поршень, 4) вакуумная камера, 5) область виртуального катода, 6) окно для вывода СВЧ излучения

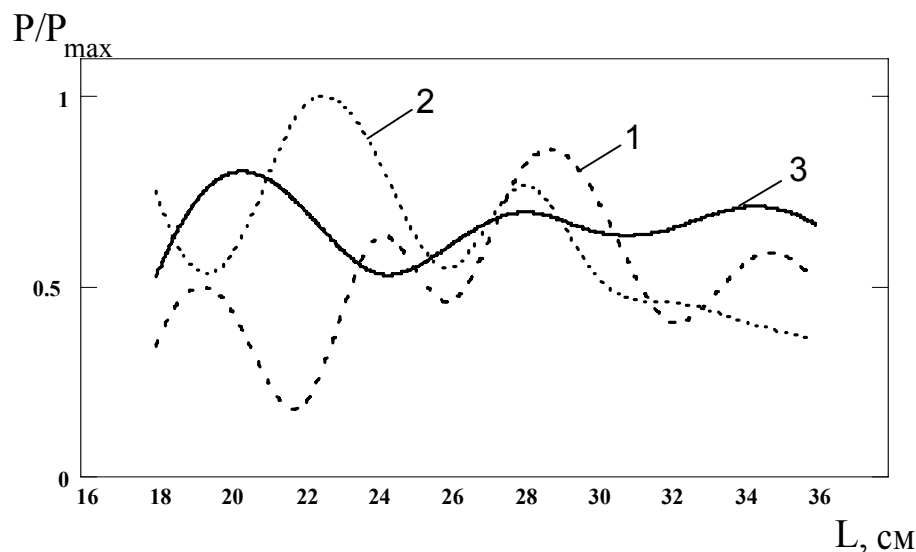


Рис. 6. Зависимости относительной мощности излучения от положения экрана при разных катод-анодных зазорах $d_{к-а}$: 1) 16; 2) 18; 3) 20 мм

расстояние между поршнем и анодом-сеткой было 18 см и ограничивалось оно электрической прочностью промежутка между оправкой анода-сетки и поршнем.

На рис. 6 представлены зависимости мощности излучения в относительных единицах от положения поршня относительно оси катода при разных катод-анодных зазорах.

Из рис. 6 видно, что при перемещении поршня вдоль камеры мощность излучения изменяется. Причем изменение мощности излучения имеет периодический характер.

При зазоре $d_{к-а}$ - 16 мм максимальная мощность излучения была зарегистрирована при расположении поршня на расстоянии 29 см от оси катода на частоте излучения 3,4 ГГц. При зазоре $d_{к-а}$ - 18 мм - на расстоянии 23 см и на частоте излучения 3,2 ГГц. При зазоре $d_{к-а}$ - 20 мм - на расстоянии 20 см и на частоте 3,1 ГГц.

4. Заключение

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что в триоде с виртуальным катодом имеет место механизм фазовой селекции. При вза-

имодействии пучка с высокочастотным полем, электроны, попадающие в ускоряющую фазу СВЧ колебаний ("неправильно-фазные" электроны), получают дополнительную энергию, достаточную для преодоления потенциалов реального и виртуального катодов, и покидают область взаимодействия, оседая на катоде и стенках вакуумной камеры. Удаление этих электронов происходит периодически с частотой, равной частоте излучения. Электроны, находящиеся в тормозящей фазе СВЧ колебаний ("правильно-фазные" электроны) в процессе взаимодействия, отдавая энергию СВЧ полю, постепенно оседают на аноде-сетке триода, и таким образом выводятся из взаимодействия с полем, не успев перейти в ускоряющую фазу поля. Своевременное поглощение электронов сеткой анода обеспечивается ее прозрачностью, которая должна иметь определенное оптимальное значение.

Проведенные эксперименты с обратной связью показали, что в триоде с ВК оптимальную обратную связь можно получить, меняя длину камеры. При оптимальной длине камеры достигается резонансное взаимодействие осциллирующего электронного пучка с высокочастотным полем камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перелыгин С.Д., Фоменко Г.П. Генерация мощного СВЧ излучения релятивистским пучком в триодной системе // Письма в ЖТФ. - 1979. - Т. 5, вып. 6. - С. 321-324.
2. Didenko A.N., Fomenko G.P., Gleizer I.Z., Krasik Ya.E., Melnikov G.V., Perelygin S.F., Shtein Yu.G., Sulakshin A.S., Tsvetkov V.I., Zehrlitsyn A.G. Generation of high power RF-pulses in magnetron and reflex triode systems // High Power Electron and Ion Beam Research and Technology. Proc. III Intern. Conf., Novosibirsk. - 1979. - V. 2. - P. 683-691.
3. Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В., Фоменко Г.П., Цветков В.И. Получение мощных импульсов СВЧ излучения микросекундной длительности в триоде с виртуальным катодом // Письма в ЖТФ. - 1985. - Т. 11, вып. 17. - С. 1083-1086.
4. Привезенцев А.П., Филипенко Н.М., Фоменко Г.П. Нелинейная теория электронного потока в триодной системе с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. - 1985. - Т. 30, вып. 4. - С. 756-760.

5. Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В., Филипенко Н.М., Фоменко Г.П. Исследование механизма группировки в СВЧ триоде с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. - 1987. - Т. 32, вып. 4. - С. 837-840.
6. Гадецкий Н.П., Магда И.И., Найстетер С.И., Прокопенко Ю.В., Чумаков В.И. Генератор на сверхкритическом токе РЭП с управляемой обратной связью - виртод // Физика плазмы. - 1993. - Т. 19, вып. 4. - С. 530-537.

УДК 620.179.13

ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В ТОМСКОМ НИИ ИНТРОСКОПИИ

В.П. Вавилов, В.Г. Торгунаков, В.В. Ширяев, А.И. Иванов, Д.А. Нестерук

Работы НИИ интроскопии при ТПУ в области теплового контроля, начатые в 70-х годах прошлого века, ориентированы на неразрушающий контроль и техническую диагностику изделий и материалов, а также специальные применения. Аппаратурную базу теплового контроля (ТК) составляют инфракрасные (ИК) системы измерения температуры, в особенности, тепловизоры. В настоящее время область наших исследований включает теоретические решения прямых и обратных задач теплопередачи, проектирование и мелкосерийный выпуск ИК сканирующих систем, разработку новых способов ТК и алгоритмов обработки нестационарной информации, а также техническую диагностику промышленных, энергетических и строительных объектов.

1. Сущность теплового метода неразрушающего контроля

Российский ГОСТ 18353-79 различает 9 видов неразрушающего контроля (НРК) согласно используемым физическим явлениям: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновый, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами. Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля (ПБ 03-440-02) Госгортехнадзора вводят уже 11 методов НРК: ультразвуковой, акустико-эмиссионный, радиационный, магнитный, вихретоковый, проникающими веществами (капиллярный и течеискание), визуальный и измерительный, вибродиагностический, электрический, тепловой, оптический. В целом, классификация методов НРК не успевает за разработкой все новых способов испытаний материалов и изделий, многие из которых используют комбинацию разнообразных физических феноменов.

Тепловой метод НРК основан на регистрации возмущений, вносимых внутренними дефектами в регулярный (эталонный) характер распространения тепловых потоков в объекте контроля. На практике анализируют двумерное нестационарное распределение температуры на поверхности объекта контроля, причем информативными признаками скрытых дефектов являются локальные температурные сигналы или характерные времена теплопередачи.

Аппаратурную базу теплового контроля (ТК) составляют инфракрасные (ИК) системы измерения температуры, в особенности, тепловизоры. Современные тепловизоры являются измерительными приборами, используют охлаждаемые и не охлаждаемые матричные приемники ИК излучения и обеспечивают следующие параметры: 1) формат кадра - от 128x128 до 1024x1024 пикселей; 2) спектральный диапазон 3...5 мкм и 7...13 мкм; 3) частота кадров - до 1000 Гц; 4) глубина оцифров-

ки сигнала - 12, 14 и 16 бит. В портативных тепловизорах массой от 0,7 до 3 кг возможна цифровая запись до 1000 термограмм.

2. Историческая справка

Техника регистрации ИК излучения берет свое начало в 1800 г. в работах сэра Уильяма Гершеля, астронома при дворе английского короля Георга III. В 1829 г. Л. Нобили создал первую термопару, работа которой была основана на термоэлектрическом эффекте, открытом Т. Зеебеком в 1821 г. Пробразом первых тепловизоров можно считать устройство Д. Гершеля (брата У. Гершеля), который регистрировал тепловое излучение объектов по неравномерному испарению спирта на тонкой фильтровальной бумаге. В 1857 г. А. Сванберг изобрел новый приемник ИК излучения - болометр. В 1900 г. произошло второе рождение ИК методов исследований в качестве строгой научной дисциплины, что было обусловлено фундаментальными исследованиями М. Планка, Г. Кирхгофа, Б.Б. Голицына, В. Вина в области теории теплового излучения и прогрессом в технологии ИК приемников. Часто считают, что прообразом современных тепловизоров с оптико-механическим сканированием явился бортовой тепловизор фирмы Barnes, США, разработанный в 1954 г. и положивший начало так называемым "впередсмотрящим" ИК системам (Forward Looking Infrared - FLIR).

Отечественные разработки в 80-90-х годах прошлого столетия развивались по нескольким направлениям. Прежде всего, в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова под руководством М.М. Мирошникова развивалась оригинальная теория оптико-электронных устройств, на основе чего, совместно с Азовским оптико-механическим заводом, были разработаны тепловизоры как военного, так и гражданского применения: "Филин", "Рубин", "Алмаз", "Радуга", "Статор",