

## КОМПЛЕКСИРОВАННЫЙ СВЧ-МОДУЛЬ С СИНХРОНИЗИРОВАННЫМИ МАГНЕТРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

### COMPLEXED RF-MODULE WITH SYNCHRONIZED M-TYPE GENERATORS

**Н.И.Скрипкин** /n.skripkin@pluton.msk.ru

**А.В.Шмелев** / av.shmelev88@gmail.ru

**А.И.Проников** / pronikovalexey@mail.ru

**И.М.Иванов** /vela-kim@mail.ru

**N.I.Skripkin, A.V.Shmelev, A.I. Pronikov, I.M. Ivanov**

АО «Плутон»

*В АО «Плутон» создана установка генераторного модуля СВЧ 2-см диапазона длин волн на основе технического решения – способа когерентного суммирования мощностей двух генераторов в волноводном сумматоре мощности – волноводном 3-х децибельном мосте. При этом на выходе модуля синхронизированного устройства мощность в пределах полосы синхронизации может достигать 95% от суммарной мощности генераторов.*

*JSC «Pluton» has developed a complexed RF-module in the 2-cm wave-range based on a technical solution – a method of coherent summation of the RF-powers of two generators M-type in a waveguide power combiner – a waveguide 3-dB power coupler. The RF-power can reach 95% of the total RF-powers of two generators in output of a synchronized device.*

*Ключевые слова: СВЧ-модуль, магнетрон, генератор, волновод.*

*Key words: RF-module, magnetron, generator, waveguide.*

## ВВЕДЕНИЕ

Современная СВЧ-техника характеризуется большим разнообразием типов генераторов. Среди них магнетрон зарекомендовал себя как надёжный в эксплуатации, простой по конструкции, экономичный вакуумный прибор с высоким КПД.

В 2-х сантиметровом диапазоне длин волн номенклатура разработанных магнетронов достаточно велика и зависит от конкретных задач. Стремление создать конструкции сверхмощных магнетронов (0,5 МВт и более) [1] является актуальной, но не простой задачей.

В конце 80-х годов ОКБ при заводе «Плутон» были созданы уникальные единичные образцы магнетронов в 2-х сантиметровом диапазоне длин волн с импульсной мощностью до 1 МВт. Такие магнетроны представляли собой обращённо-коаксиальную конструкцию, имеющую как преимущества, так и недостатки. Для них создавались специальные откачные посты и модуляторные стенды, откачка производилась несколько дней, а тренировка – до двух месяцев. Прибор выпускался с встроенным технологическим МЭРН насосом, позволяющем вести постоянную откачку при работе магнетрона в генераторном режиме. Магнетроны нуждались в длительной тренировке, т.к. необходимо было избавиться от искрений и стабилизировать электрические параметры.

В 90-е годы после спада экономики пострадали многие предприятия электронной промышленности. Это коснулось и ОКБ при заводе «Плутон». Оно было расформировано, численность рабочего персонала завода резко уменьшилась. Резко уменьшилась и номенклатура изделий. Сохранить все технологические процессы изготовления единичного производства магнетронов не удалось.

В настоящее время начинают востребоваться сверхмощные магнетроны для выполнения конкретных задач, например, для формирования зондирующих мощных

импульсных сигналов. Возобновлять производство не выпускаемых более 30-ти лет магнетронов является сложной задачей и по срокам, и по стоимости создания технологических процессов.

В данной статье описывается установка «СВЧ-модуль», в которой используется способ когерентного суммирования мощностей двух магнетронов в сумматоре мощности. Питание магнетронов осуществляется высоковольтным двухканальным модулятором. Серийно-выпускаемые магнетроны в 2-х сантиметровом диапазоне длин волн с импульсной мощностью 270 – 300 кВт позволяют получить импульсную мощность на выходе сумматора не менее 500кВт.

На основании ранее проведенных работ [2,3], по нашему мнению, установлено, что наиболее эффективным и простым по конструкции способом для когерентного суммирования мощности двух генераторов с волноводным выводом является использование в качестве сумматора волноводного 3-х децибельного моста. При этом на выходе мощность синхронизированного устройства в пределах полосы синхронизации может достигать 95% от суммарной мощности генераторов. Схема синхронизации представлена на рис.1.

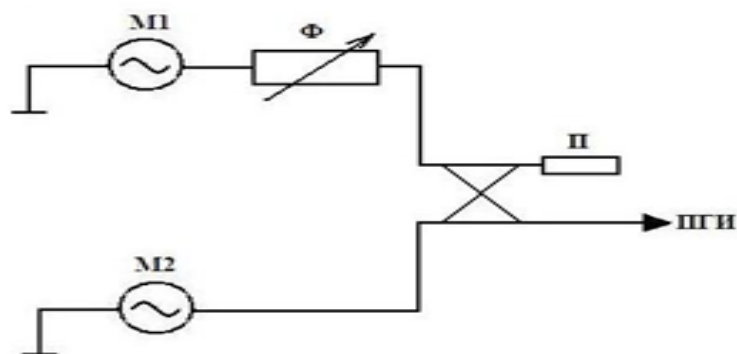


Рис. 1. Схема синхронизации двух магнетронных генераторов.

Взаимная фазированная (синхронизация) двух магнетронов (M1 и M2) обеспечивается фазовращателем (Ф), согласование обеспечивается короткозамыкающим поршнем (П). Суммированный сигнал направляется в выходной (антенный) тракт РЛС, либо на вход прибора горячих измерений (ПГИ). Точный подбор положения поршня обеспечивает максимальный коэффициент суммирования. Генераторный модуль СВЧ предназначен для формирования зондирующих импульсных сигналов в многофункциональном приёмопередающем радиолокационном измерительном комплексе.

## ВЫБОР СУММИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Классические волноводные мосты делятся на три группы [4]:

- волноводный мост щелевой со связью по широкой или узкой стенке;
- волноводный мост на основе 2-го волноводного тройника (Е и Н);
- кольцевые волноводные мосты.

Наилучшим согласованием и электрической прочностью отличаются мосты со связью по узкой стенке. Для дальнейших работ был выбран волноводный мост со связью по узкой стенке (рис. 2). Электрическая прочность достигалась за счёт избыточного давления гексафторида серы (элегаз) в волноводном тракте. Расчётная модель такого суммирующего устройства в программе для трёхмерного моделирования СВЧ-процессов представлена на рис. 2.



Рис. 2. Расчётная модель суммирующего устройства (суммирующее устройство).

Анимационный рис. 3 показывает равное суммирование сигналов из плеча 1 и плеча 2 в плечо 4.

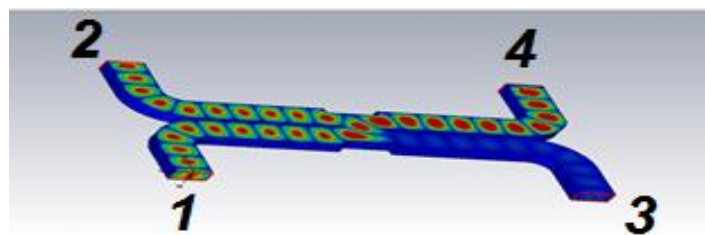


Рис. 3. Согласование плеч в расчетной модели.

Расчёт производился в диапазоне частот 14,5 – 15,6 ГГц. Коэффициенты передачи (S-параметры) для различного положения регулировочного (согласующего) штыря представлены на рис. 4-7. Регулировочный штырь может перемещаться в волноводном тракте сумматора мощности на 2,5 – 4,0 мм.

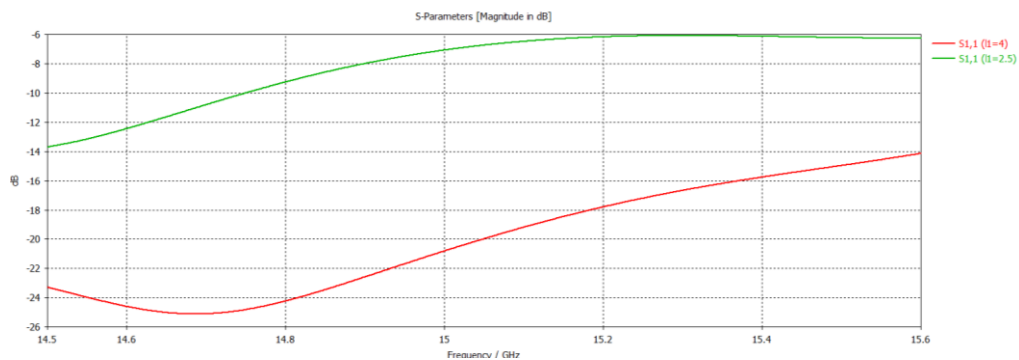


Рис. 4. S<sub>11</sub> – параметр.

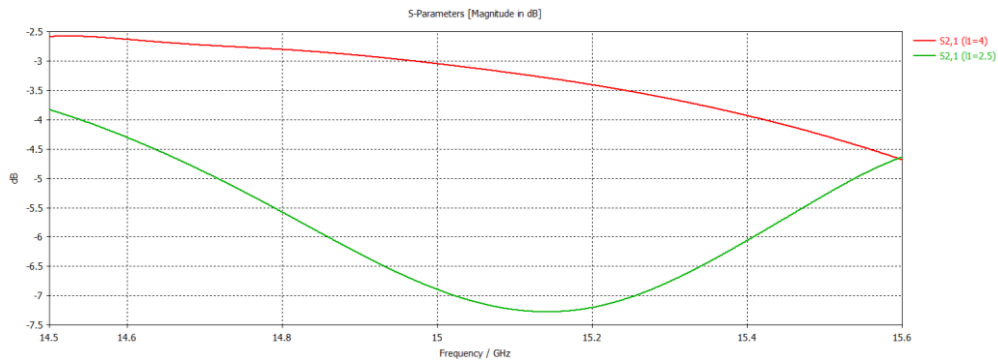


Рис. 5.  $S_{13}$  – параметр.

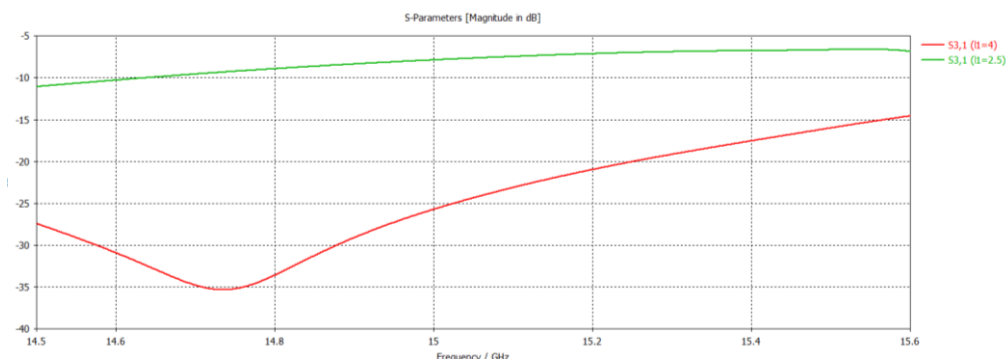


Рис. 6.  $S_{12}$  – параметр.

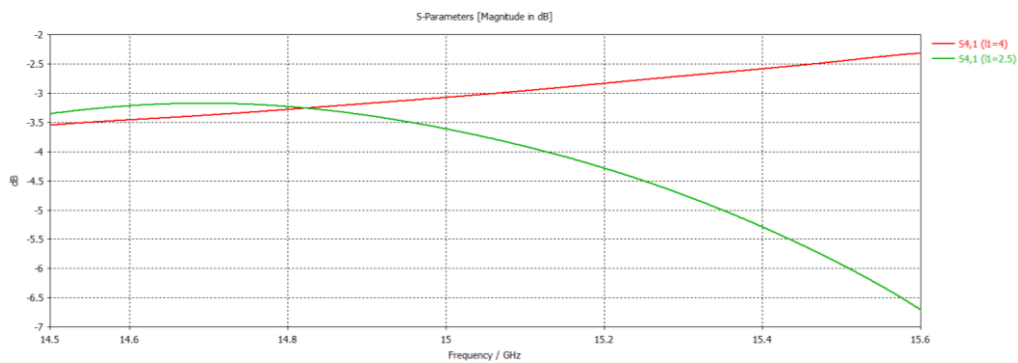


Рис. 7.  $S_{14}$  – параметр.

На рис. 8 представлена упрощенная схема моста. Нумерация плеч: 1,2 – входные, 4 – ВЫХОД.

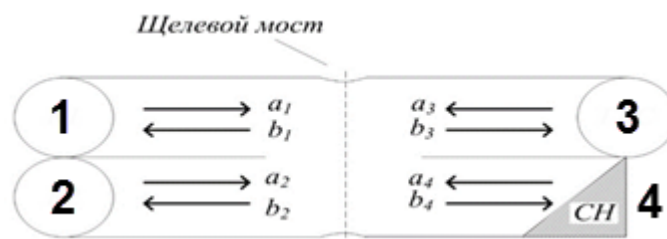


Рис.8. Упрощенная схема моста.

Матрица рассеивания идеального сумматора может быть представлена в виде:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & jd & f & jg \\ jd & 0 & jg & f \\ f & jg & 0 & jd \\ jg & f & jd & 0 \end{bmatrix},$$

где  $d$  характеризует направленность щелевого моста;  $f$  и  $g$  – уровни разветвленных сигналов. На основании баланса мощностей:

$$d^2 + f^2 + g^2 = 1.$$

При этом в идеальном случае элементы  $S_{11}=S_{22}=S_{33}=S_{44}=0$ .

Для изготовленного сумматора на измерителе коэффициентов передачи четырехплечных (восьмиполусных) устройств были проведены измерения S-параметров.

На частоте 15 ГГц при положении (длине) регулировочного штыря  $\sim 3$  мм обеспечивалось идеальное согласование, направленность и баланс разветвления сигналов.

#### Измерение модулей S-параметров:

$$S_{11} \approx S_{22} \approx S_{33} \approx S_{44} \approx 0.1 \pm 0.05$$

$$S_{12} \approx S_{21} \approx S_{34} \approx S_{43} \approx 0.1 \pm 0.05$$

$$S_{13} \approx S_{31} \approx S_{24} \approx S_{42} \approx 0.7 \pm 0.05$$

$$S_{14} \approx S_{41} \approx S_{23} \approx S_{32} \approx 0.7 \pm 0.05$$

#### Измеренный баланс мощностей:

$$(S_{11})^2 + (S_{12})^2 + (S_{13})^2 + (S_{14})^2 \approx 1 \pm 0.04$$

При изменении длины регулировочного штыря симметрия моста нарушалась, баланс между входами (выходами) отсутствовал. Соответственно, при правильной настройке моста он полностью соответствует требованиям для суммирования и синхронизации сигналов.

#### РЕЖИМ КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ

Произведена отработка режима когерентного сложения мощности двух магнетронов на установке «СВЧ-модуль», которая представлена на рис. 9.

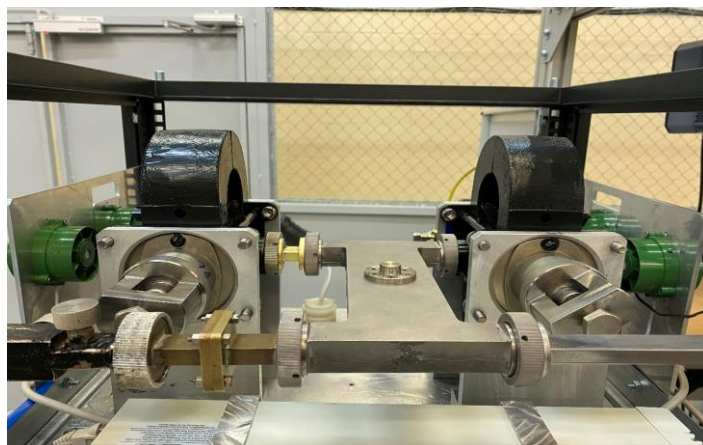


Рис.9. Два магнетрона, нагруженные на сумматор мощности, в составе «СВЧ-модуля».

Получены следующие рабочие параметры:

Таблица 1

Полученные рабочие параметры СВЧ-модуля

– Рабочая частота, МГц	15000
– Выходная импульсная мощность, кВт	500
– Частота посылок, Гц	800
– Длительность импульса, мкс	0,6
– Диапазоны регулировки выходной мощности, %	25 – 100
– Охлаждение магнетронов	воздушное принудительное
– Ток анода магнетронов импульсный, А	87
– Напряжение анода магнетронов, кВ	16,0; 16,2

Модулирующий импульс, импульс тока, ВЧ-огибающая и спектр выходного сигнала (синхронизированный по фазе режим) представлены на рис. 10 и рис. 11. Режимы охлаждения с помощью встроенных высокоэффективных кулеров обеспечили бесперебойную работу модуля. Избыточное давление в волноводном тракте создавалось гексафторидом серы (элегазом) и составляло 2 ати.

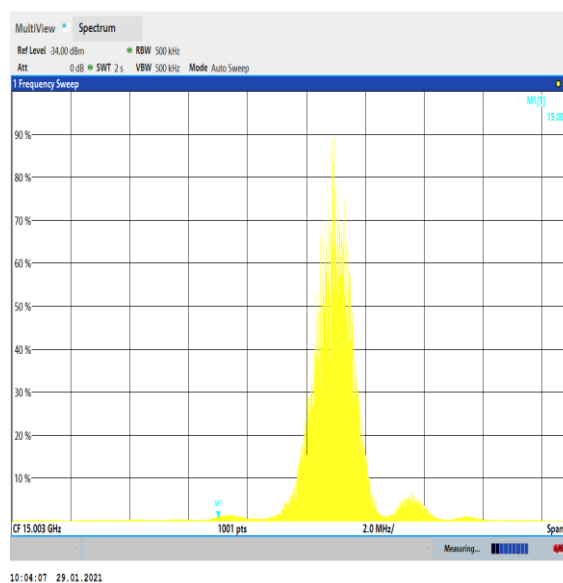


Рис. 10. Спектр выходного сигнала.

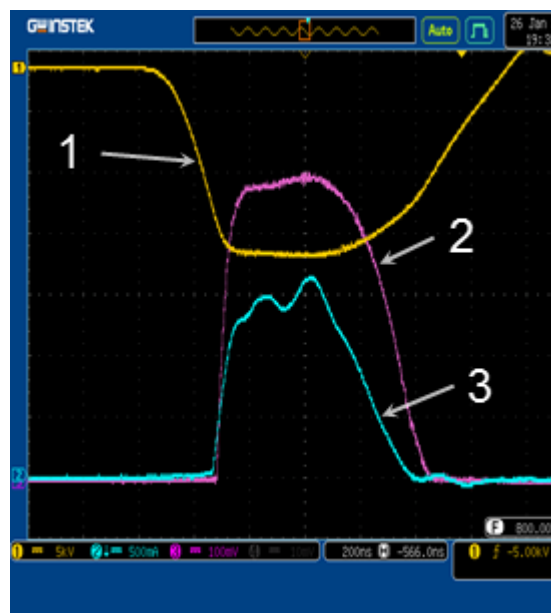


Рис. 11. Рабочее напряжение – 1, ВЧ-огибающая – 2, анодный ток – 3.

На рис.12 представлены осциллограммы модулирующего импульса, импульса тока и ВЧ-огибающая при несинхронизированном по фазе режиме работы магнетронов. ВЧ-огибающая представляет собой осциллограмму биений.

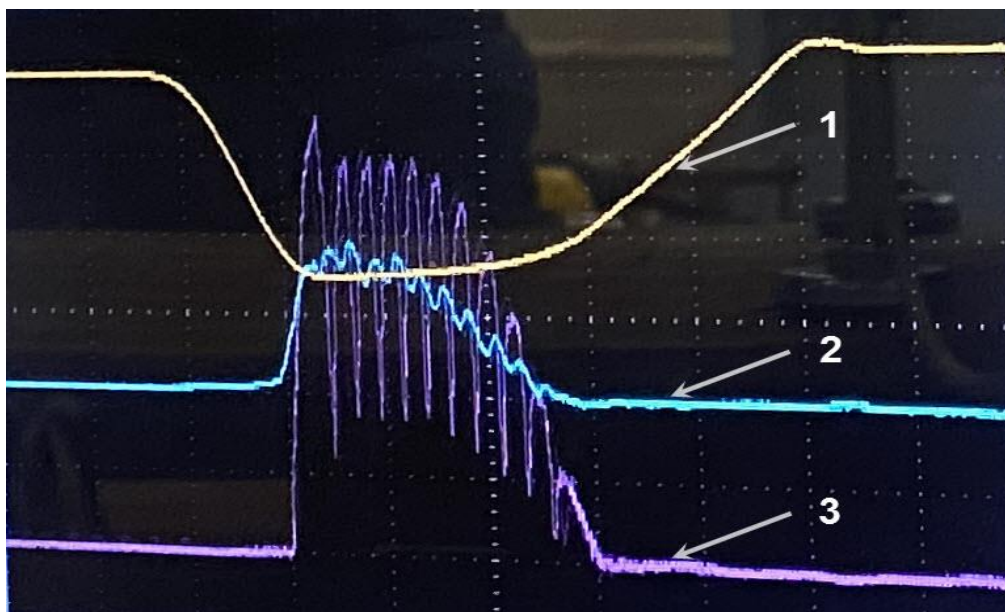


Рис. 12. Осциллограммы при несинхронизированном режиме работы магнетронов: рабочее напряжение – 1, анодный ток – 2, ВЧ-огибающая – 3.

Разработанный СВЧ-модуль представляет собой устройство, состоящее из двух магнетронов, питающихся от двухканального, высоковольтного, импульсного модулятора и сумматора мощности, размещенных в специальном шкафу с габаритами 750x550x800 мм, в одной из стенок которого выходит волноводный тракт для дальнейшего подсоединения его через необходимые элементы к антенне (рис. 13, 14). Масса устройства СВЧ-модуль составляет ~ 150 кг.

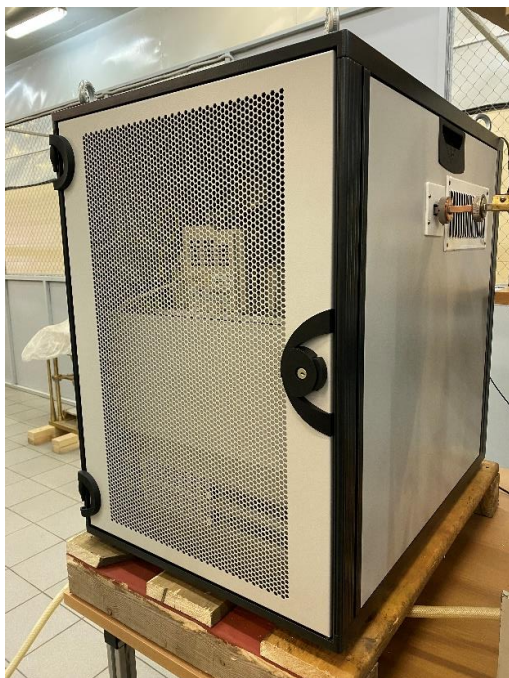


Рис. 13 – Стенка с выходным трактом модуля.



Рис. 14 – Глухая стенка модуля

Управление работой СВЧ-модуля осуществляется от удаленного компьютера по специальным программам, позволяющим производить регулировки в каждом канале: источника питания, амплитуды и длительности модулирующего импульса, частоты следования импульсов, тока накала магнетрона (рис. 15, 16).



Рис. 15 – Общий вид на управление модулем.



Рис. 16 – Интерфейс программы управления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В АО «Плутон» впервые в России создана установка СВЧ-модуль в 2-х сантиметровом диапазоне длин волн, позволяющая использовать принцип когерентного сложения мощностей двух магнетронов, серийно выпускаемых в производстве. Стоимость установки и сроки изготовления во много раз меньше вновь разрабатываемого магнетрона на параметры, представленные в данной статье.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Петроченков// Электронная техника, 2010, сер.1, вып. №2, Оптимизация характеристик магнетрона.
2. И.М. Иванов, Н.И. Скрипкин, К.В. Ходатаев, А.И. Вагин// СВЧ-электроника, 2015, №6 (00146), стр. 98-104, Экспериментальное исследование самосинхронизации магнетронов 3-миллиметрового диапазона.
3. А. И. Вагин, М. В. Ефремова, И. М. Иванов, А. А. Курушин, Н. И. Скрипкин// СВЧ-техника, 2016, серия 1, №3 (530), стр. 14-19, Расчёт и экспериментальное исследование прототипа излучателя ФАР на синхронизированных магнетронах 3-мм диапазона.
4. Собенин Н.П., Милованов О.С.// Техника сверхвысоких частот: Издание второе, 2007, Энергоатомиздат.