

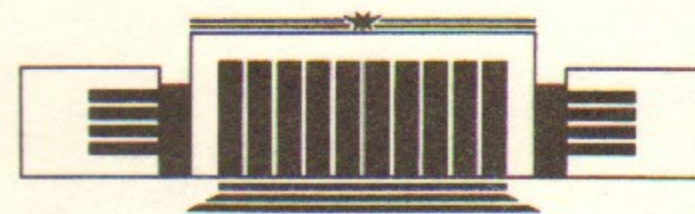


38  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

**И.И. Авербух, П.А. Довгерд**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ ФЕРРИТОВ  
В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ  
ЧАСТОТНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ  
РЕЗОНАТОРОВ**

**ПРЕПРИНТ 91-43**



**НОВОСИБИРСК**

Исследование СВЧ ферритов  
в условиях работы частотно-перестраиваемых  
резонаторов

И.И. Авербух, П.А. Довгерд

Институт ядерной физики  
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

В работе исследованы СВЧ ферриты в условиях одновременного воздействия высокочастотного и подмагничивающего полей.

Подмагничивающее поле ориентировано перпендикулярно высокочастотному.

Измерена добротность иттриевых гранатов в диапазоне частот 35÷70 МГц при подмагничивании постоянным и импульсным полями с напряженностью до 850 А/см.

Установлено, что при глубоком подмагничивании добротность феррогранатов типа 55СЧ в высокочастотном поле имеет величину более 2000.

Поиски путей уменьшения потерь, вносимых ферритами в частотно-перестраиваемые резонаторы, привели к исследованию сверхвысокочастотных магнитных материалов на основе иттриевых гранатов.

Отличительной особенностью этих ферритов является резкое уменьшение потерь в высокочастотном поле при высоких уровнях намагничивания, причем обязательным условием получения низких потерь является ориентация подмагничивающего поля перпендикулярно высокочастотному. Другая ориентация подмагничивающего поля относительно высокочастотного не дает такого эффекта уменьшения потерь.

При уровнях намагничивания более 150 А/см добротность ферритов в широком диапазоне частот более 1000.

Следует отметить, что для обычных никель-цинковых ферритов, широко применяемых в ускоряющих устройствах, такие значения добротности не достижимы при любых способах взаимной ориентации высокочастотного и подмагничивающего полей. В это же время характерной ориентацией подмагничивающего и высокочастотного полей является коллинеарное. Как показали исследования, перпендикулярная ориентация полей в никель-цинковых ферритах не дает существенного выигрыша в добротности [1].

Высокочастотные иттриевые ферриты с перпендикулярным намагничиванием уже используются в ускоряющих устройствах. На установке TRIUMF в Канаде [2] применение феррогранатов позволило существенно снизить высокочастотную мощность, потребляемую ускоряющей системой и получить достаточно широкую перестройку частоты от 46 до 62 МГц.

Аналогичные или близкие по параметрам ферриты изготавливаются и отечественной промышленностью.

Для исследования взяты 4 образца ферритов из материала 55СЧ с размерами колец 80,7×20×10 мм. Предварительно измерена начальная магнитная проницаемость образцов и возможные пределы ее изменения.

С этой целью каждый сердечник заключался в объемный виток с минимальными зазорами и перестраивался в перпендикулярном подмагничивающем поле.

Магнитная проницаемость образцов определялась расчетным путем по измеренному значению перестраиваемой при подмагничивании резонансной частоты колебательного контура и известному значению емкости.

По результатам измерений начальная магнитная проницаемость образцов ферритов составляет  $80 \pm 100$ .

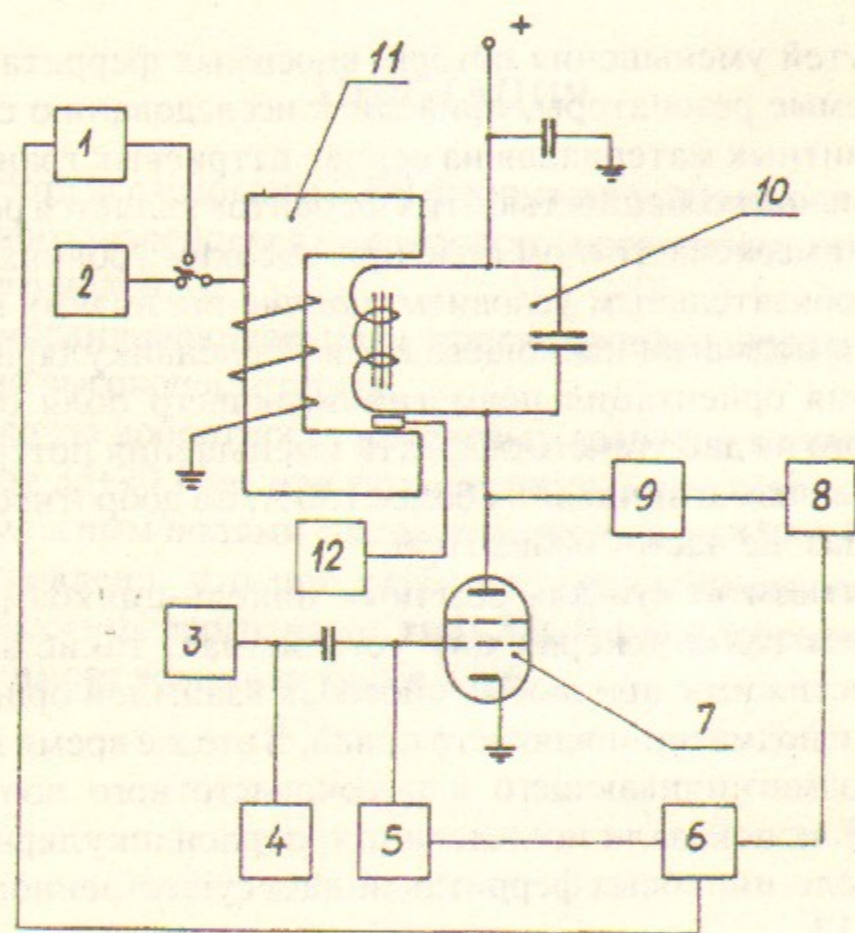


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения добротности ферритов при подмагничивании:

1—генератор импульсного подмагничивающего тока; 2—источник постоянного подмагничивающего тока; 3—высокочастотный генератор; 4—высокочастотный вольтметр; 5—источник импульсного смещения; 6—генератор синхронизирующих импульсов; 7—усилительный каскад; 8—осциллограф; 9—детектор; 10—резонатор с ферритами; 11—подмагничивающий электромагнит; 12—измеритель магнитной индукции.

Измерение добротности ферритов при различных уровнях подмагничивающего поля выполнено на установке, схематический чертеж которой приведен на рис. 1.

Установка содержит резонансный усилительный каскад, источники питания, системы подмагничивания, синхронизации и измерения.

Для измерения добротности ферритовые сердечники помещаются в медный коаксиальный резонатор. Резонатор представляет собой отрезок коаксиальной линии, нагруженный внешней укорачивающей емкостью. Для уменьшения влияния подсоединительных проводников укорачивающий конденсатор выполнен в виде конструктивной сосредоточенной емкости, образованной торцевыми поверхностями внутреннего и наружного проводников коаксиальной линии.

Геометрические размеры резонатора выбраны из расчета, чтобы зазоры между ферритами и корпусом резонатора не превышали 0,5 мм. В резонатор устанавливаются одновременно 4 сердечника. Высота набора 4 см. Электрическая длина резонатора  $12,5^\circ$ . Частотная перестройка резонатора осуществляется в электромагнитном подмагничивающем устройстве. Резонатор с ферритами устанавливается в зазоре электромагнита таким образом, чтобы подмагничивающее поле было направлено перпендикулярно высокочастотному.

Исследование добротности ферритов проведено в диапазоне частот  $35 \div 70$  МГц при подмагничивании постоянным и импульсным магнитными полями. Импульсные поля имеют пилообразную форму длительностью 14 мсек. Наибольшие значения магнитной индукции постоянного и импульсного подмагничивающих полей достигают 180 мТ.

Резонатор включен последовательно в анодную цепь однокаскадного резонансного усилителя мощности на лампе 6Ж52П.

Наибольшее высокочастотное напряжение на резонаторе 170 В, что соответствует высокочастотной индукции в ферритах  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  Т. При включении в параллель двух ламп 6Ж52П, что предусмотрено конструкцией, можно в два раза увеличить высокочастотное напряжение на резонаторе и соответственно индукцию в ферритах.

Для снижения тепловых потерь в ферритах и в выходном каскаде усилительная лампа работает в импульсном режиме. Для исследования ферритов в постоянном подмагничивающем поле принято несколько режимов работы, при которых лампа открывается по управляющей сетке на время 0,7 мсек и 15 мсек. Частота повторения открывающих импульсов  $1 \div 2$  Гц.

В режиме импульсного подмагничивания ферритов усилительная лампа открывается на время несколько больше длительности импульсного подмагничивающего поля—15 мсек. Частота повторения 1 Гц.

Начальная частота настройки резонатора при отсутствии подмагничивающего поля выбрана равной 9,2 МГц. Это обеспечивает возможность при увеличении магнитной индукции подмагничивающего поля до 180 мТ перестроить резонатор и измерить добротность ферритов на частотах до 70 МГц.

При исследовании ферритов в постоянном подмагничивающем поле добротность резонатора с ферритами измерена следующими двумя способами. Во-первых, по полосе пропускания резонансного контура в соответствии с известным соотношением

$$Q = f / 2 \Delta f \quad (1)$$

Здесь  $Q$ —добротность резонатора с ферритами.,  $f$ —резонансная частота Гц,  $2\Delta f$ —полоса пропускания резонатора в Гц на уровне  $0,707 U_p$ .  $U_p$ —напряжение на резонаторе при резонансе.

Во-вторых, по измеренному значению коэффициента усиления усилительного каскада, нагрузкой которого, как указывалось, является измеряемый резонатор с ферритами. В нашем случае, применения в усилительном каскаде пентода 6Ж52П, усиление связано с добротностью известным равенством

$$K = S \cdot \rho \cdot Q \quad (2)$$

Здесь  $K$ —коэффициент усиления каскада на резонансной частоте, равный отношению измеряемого высокочастотного напряжения на аноде к измеряемому входному напряжению на управляющей сетке.  $S$ —крутизна характеристики лампы 6Ж52П. Измеренное значение крутизны в рабочей точке равно 41 ма/В,  $\rho$ —волновое сопротивление резонатора на измеряемой частоте;  $\rho = 1/\omega C$ , где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ —резонансная частота Гц,  $C$ —суммарная емкость укорачивающего конденсатора и схемы—270 пФ.

Результаты измерения добротности резонатора с ферритами обоими методами при перпендикулярном подмагничивании постоянным по направлению магнитным полем приведены на рис. 2.

Как видно из приведенных характеристик измеренные значения добротности резонатора с ферритами по усилению и по полосе пропускания достаточно хорошо совпадают. Небольшие отличия объясняются влиянием выходного сопротивления усилительной лампы, увеличивающего полосу пропускания резонатора и соответственно снижающего добротность.

Добротность ферритов в импульсном подмагничивающем поле оценивалась по измерению коэффициента усиления усилительного каскада.

Для обеспечения проникновения импульсного подмагничивающего поля в ферриты в коаксиальном корпусе резонатора сделан продольный разрез по всей наружной поверхности до центрального проводника. Разрез не увеличивает высокочастотные потери в меди, но уменьшает экранирующее действие корпуса для импульсного подмагничивающего потока.

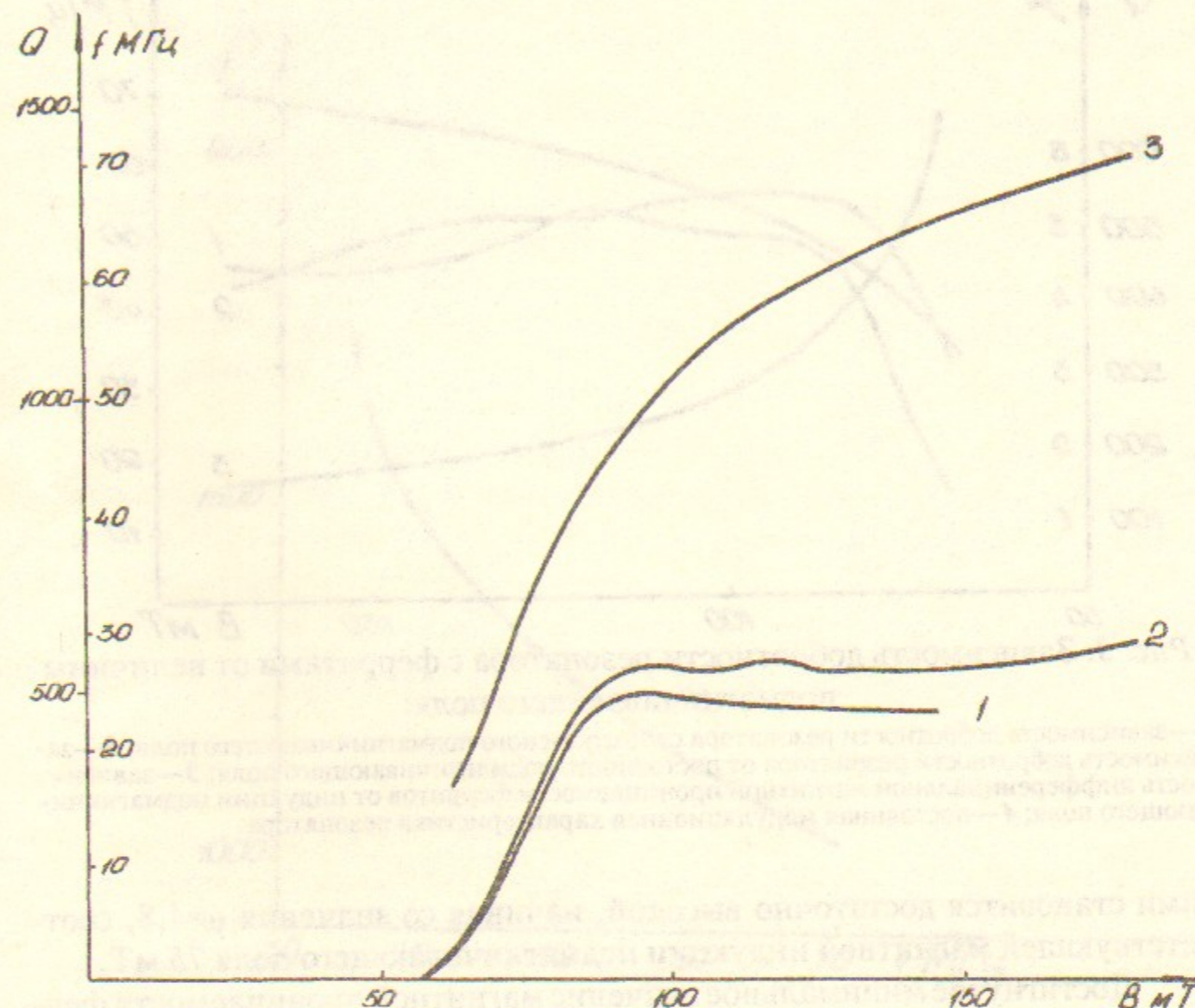


Рис. 2. Зависимость добротности резонатора с ферритами от величины подмагничивающего поля:

1—измерение выполнено по полосе пропускания резонатора; 2—измерение выполнено по коэффициенту усиления; 3—постоянная модуляционная резонатора.

На рис. 3 приведена зависимость добротности резонатора с ферритами от величины напряженности импульсного подмагничивающего поля. Там же для сравнения приведена зависимость добротности резонатора с ферритами от постоянного подмагничивающего поля. Обе эти характеристики измерены при одних и тех же условиях работы усилителя, конструкции, настройки и установки резонатора.

Сравнение измеренных добротностей резонатора с ферритами при постоянном и импульсном подмагничивании показывают очень близкое их совпадение при высоких уровнях намагниченности.

Там же на рис. 3 приведены изменения при подмагничивании резонансной частоты резонатора и магнитной проницаемости ферритов. Анализ характеристики изменения добротности и магнитной проницаемости при подмагничивании показывает, что добротность резонатора с ферри-

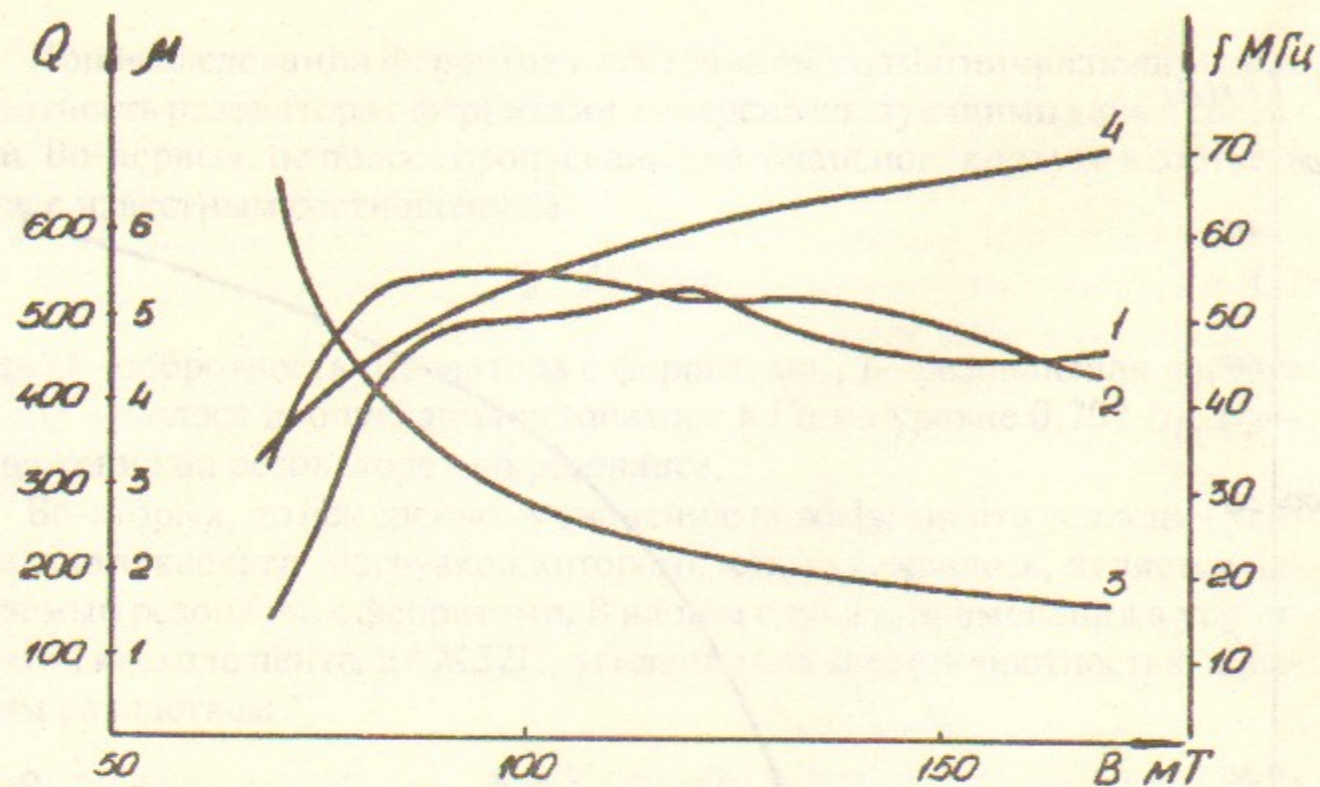


Рис. 3. Зависимость добротности резонатора с ферритами от величины подмагничивающего поля:

1—зависимость добротности резонатора от импульсного подмагничивающего поля; 2—зависимость добротности резонатора от постоянного подмагничивающего поля; 3—зависимость дифференциальной магнитной проницаемости ферритов от индукции подмагничивающего поля; 4—постоянная модуляционная характеристика резонатора.

тами становится достаточно высокой, начиная со значения  $\mu=4,8$ , соответствующей магнитной индукции подмагничивающего поля 75 мТ.

Достигнутое минимальное значение магнитной проницаемости ферритов 1,60 соответствует магнитной индукции подмагничивающего поля 170÷180 мТ.

Добротность резонатора с ферритами продолжает увеличиваться и при дальнейшем увеличении намагниченности, но это связано с увеличением подмагничивающих ампервитков.

При значениях магнитной индукции подмагничивающего поля меньше 50 мТ добротность резонатора с ферритами  $<10$ .

Измеренные значения добротности резонатора с ферритами ниже действительной величины добротности самого феррита, т.к. в этих измерениях учитываются суммарные потери в ферритах, в медном корпусе резонатора и в диэлектрическом зазоре укорачивающего конденсатора, в котором, для формирования необходимой величины емкости, применяется фторопластовая изоляция.

Добротность конструкции медного коаксиального резонатора без ферритов в диапазоне частот 35÷70 МГц получена расчетным путем и приведена на рис. 4 [3]. Как видно из полученной кривой добротность

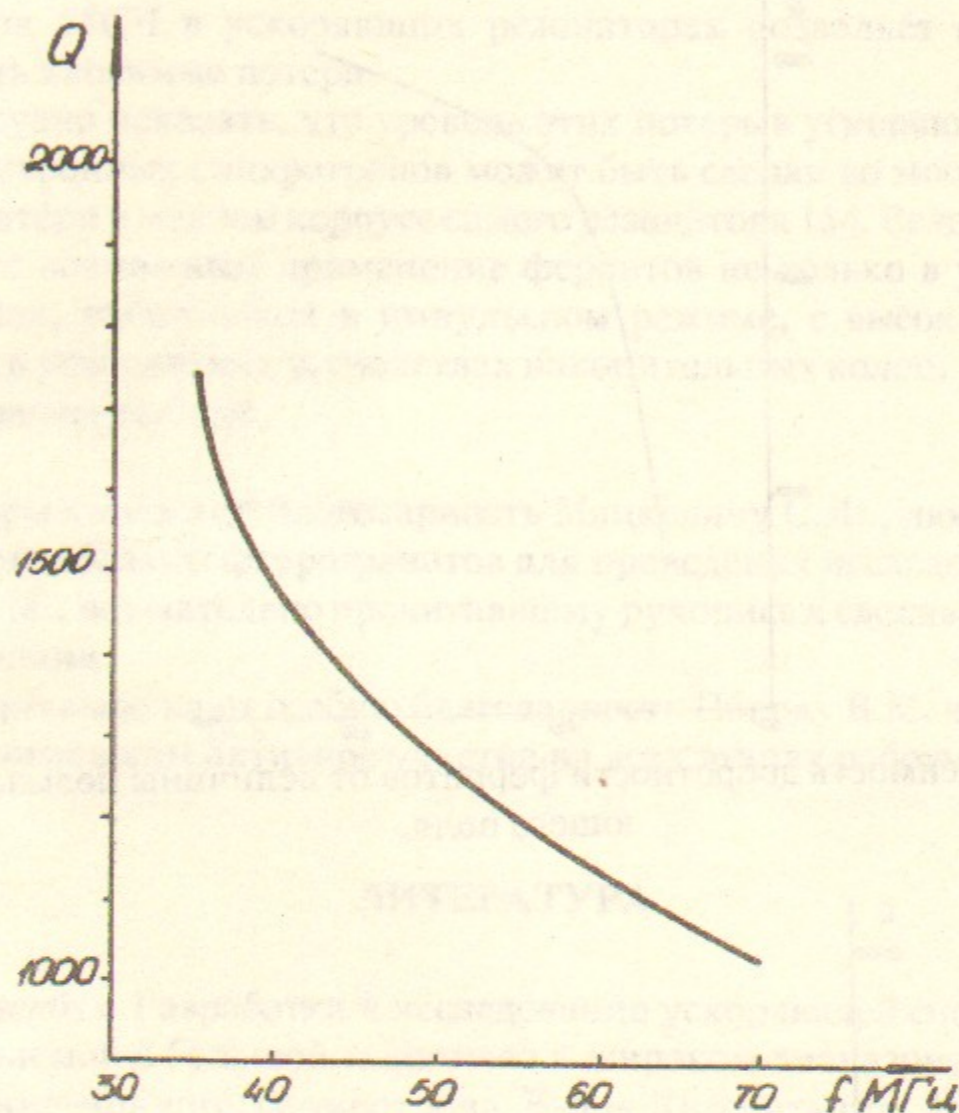


Рис. 4. Зависимость добротности корпуса резонатора от частоты.

корпуса резонатора в указанном диапазоне частот уменьшается с частотой от 1700 до 1000.

Тангенс диэлектрических потерь фторопласта составляет  $2,5 \cdot 10^{-4}$  [4], что соответствует добротности 4000.

Окончательные значения добротности ферритового материала 55СЧ, включающего только магнитные и диэлектрические потери самого феррита получены расчетным путем, по измеренным значениям добротности, приведенной на рис. 2 за вычетом потерь в меди и диэлектрике укорачивающего конденсатора.

Зависимость добротности ферритов от величины магнитной индукции подмагничивающего поля, а также зависимость добротности ферритов от частоты при подмагничивании приведены на рис. 5 и рис. 6.

Как видно из этих кривых добротность ферритов при высоких уровнях намагничивания достигает значений более 1500 на частоте 60 МГц.

Проведенные исследования показывают, что применение феррогра-

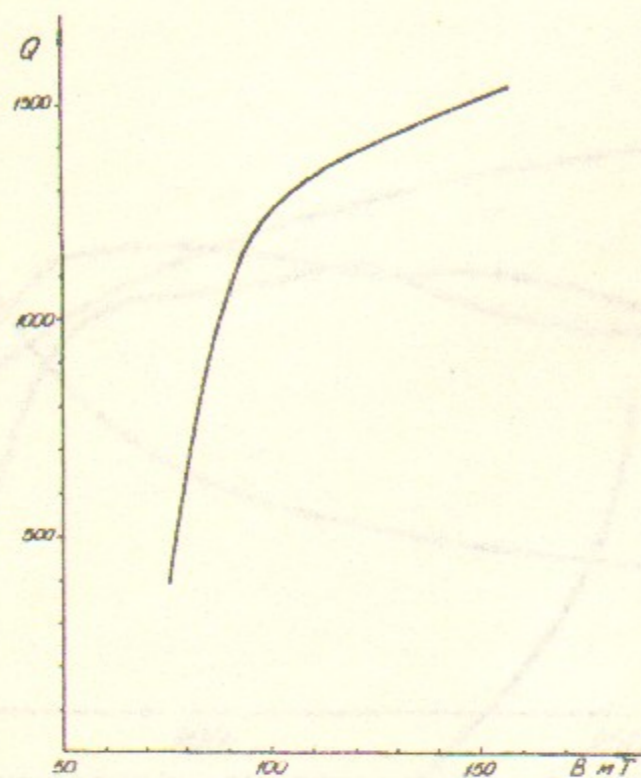


Рис. 5. Зависимость добротности ферритов от величины подмагничивающего поля.

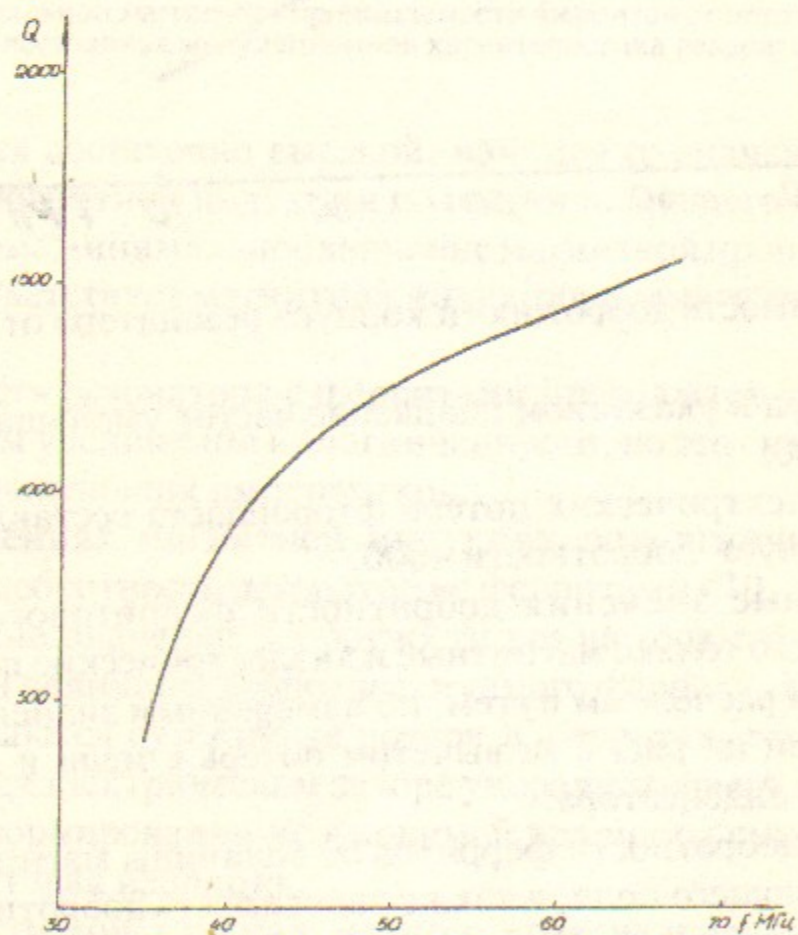


Рис. 6. Зависимость добротности ферритов при подмагничивании от частоты.

натов типа 55СЧ в ускоряющих резонаторах позволяет существенно уменьшить вносимые потери.

Нетрудно показать, что уровень этих потерь в ускоряющих устройствах электронных синхротронов может быть сделан во много раз меньше, чем потери в медном корпусе самого резонатора [5]. Вследствие этого становится возможным применение ферритов не только в ускоряющих резонаторах, работающих в импульсном режиме, с высокой скважностью, но и в ускоряющих устройствах накопительных колец, работающих в непрерывном режиме.

Авторы выражают благодарность Мацкевичу С.Л., любезно предоставившему образцы феррогранатов для проведения исследований, Карлинеру М.М., внимательно прочитавшему рукопись и сделавшему полезные замечания.

Авторы выражают особую благодарность Попову В.М. и Шубенкову А.С., принимавшим активное участие на всех этапах работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И.И. Авербух. Разработка и исследование ускоряющей системы, переоборудованной с большой скоростью в широком диапазоне частот, для протонно-ионного синхротрона Б-5.—Диссертация. Новосибирск, 1981.
2. R.L. Poirier, T.A. Enegren, J. Enchevich, S.J. Mai. Parallel bias vs perpendicular bias of a ferrite tuned cavity for the TRIUMF kaon factory booster ring. EPAC. Vol. 2. Rome, 1988.
3. С.И. Орлов. Расчет и конструирование коаксиальных резонаторов. Сов. радио.—М. 1970.
4. Полосковые платы и узлы. Под ред. Е.П. Котова и В.Д. Каплуна. Сов. радио.—М. 1979.
5. И.И. Авербух. Применение ферритов в ускоряющих резонаторах электронных синхротронов. Препринт 91—13. Новосибирск, 1991.

*И.И. Авербух, П.А. Довгерд*

**Исследование СВЧ ферритов в условиях  
работы частотно-перестраиваемых резонаторов**

Ответственный за выпуск: С.Г. Попов

Работа поступила 16 апреля 1991 г.

Подписано в печать 16.04 1991 г.

Формат бумаги 60 × 90 1/16. Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.

Тираж 160 экз. Бесплатно. Заказ № 43.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск, 90.