

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



10/1 77

P13 - 10101

К-44

38/2-77

Ю.Ф.Киселев, В.Н. Матафонов

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ВЫСОКОЙ ЯДЕРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МИШЕНЕЙ

1976

P13 - 10101

Ю.Ф.Киселев, В.Н. Матафонов

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ВЫСОКОЙ ЯДЕРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МИШЕНЕЙ

Направлено в ПТЭ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Киселев Ю.Ф., Матафонов В.Н.

P13 - 10101

Аппаратура для измерения высокой ядерной поляризации
поляризованных мишеней

Описана аппаратура для измерения высокой ядерной поляризации поляризованных мишеней. Применение жесткой фазовой автоподстройки резонансной частоты приемного последовательного колебательного контура позволило уменьшить поправки на нелинейность Q-метра до 1% при коэффициенте модуляции высокочастотного напряжения на контуре сигналом я.м.р. до 20%. Для записи интегральной интенсивности и производной сигнала поглощения, а также формы сигналов поглощения и дисперсии применен стробоскопический интегратор.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований

Дубна 1976

Kiselev Yu.F., Matafonov V.N.

P13 - 10101

An Apparatus for the Measurement of High Nuclear
Polarization in Polarized Targets

An apparatus for the measurement of high nuclear polarization in polarized targets is described. Using a rigid automatic control of the resonance circuit frequency (AFC) and automatic control of the radio frequency (RF) voltage phase of the AFC circuit we have reduced the Q-meter non-linearity correction to 1% and the overall error of the polarization measurement to 2.5% for RF voltage modulation by the NMR signal up to 20%. A stroboscopic integrator is used to register the integrated NMR signal, its derivative and also the shapes of absorption and dispersion signals.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research

Dubna 1976

Введение

Для измерения поляризации ядер поляризованных мишеней обычно применяют методы ядерного магнитного резонанса /я.м.р./ /1/.

Поляризация ядер пропорциональна интегралу от мнимой части высокочастотной ядерной восприимчивости /2/ $\chi(\nu) = \chi'(\nu) - j\chi''(\nu)$:

$$P \sim \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \chi''(\nu) d\nu. \quad /1/$$

ν_{\min} и ν_{\max} определяют диапазон развертки частоты осциллирующего поля H_1 вблизи ларморовской частоты ν_0 ядерных спинов, находящихся в магнитном поле H_0 , где $\chi''(\nu)$ отлична от 0 /для протонов ν_0 /МГц/ = $4,257 H_0 / \kappa \text{Э} //$.

Обычно для измерения поляризации используют Q-метр, сигнал на выходе которого ν в первом приближении пропорционален $\chi''(\nu)$:

$$\nu = \frac{|Z_k(\nu)| - |Z_k(\nu)|_0}{|Z_k(\nu_0)|_0} \sim \chi''(\nu), \quad /2/$$

где $|Z_k(\nu)|$ и $|Z_k(\nu)|_0$ - модули импеданса приемного колебательного контура, возмущенного и невозмущенного сигналом я.м.р. соответственно. Анализ /2/ посвящен ряд работ /3-9/ и в общем случае оно справедливо при малом возмущении приемного колебательного контура системой ядерных спинов и при условии, что действительная часть $\chi(\nu)$ - дисперсия не сильно расстраивает колебательный контур.

В работе /3/ показано, что наименьшее отклонение от линейности Q-метра /т.е. выполнение /2/ с большой точностью/ имеет место при использовании последовательного колебательного контура и расширении его полосы пропускания. Последнее достигается либо уменьшением добротности приемного контура, либо применением автоматической подстройки резонансной частоты контура под частоту поля H_1 . В работе /10/ реализована первая возможность линейризации Q-метра. Попытка реализовать вторую возможность содержится в /11/, однако авторами не получены конкретные экспериментальные результаты.

В данной работе предложен Q-метр с жесткой фазовой автоподстройкой резонансной частоты входного последовательного колебательного контура и автоматической подстройкой фазы. Для обработки низкочастотного сигнала применен стробоскопический интегратор. Прибор позволяет измерять не только $\chi''(\nu)$, но и $\chi'(\nu)$, $\int \chi''(\nu) d\nu$, $d\chi''(\nu)/d\nu$ и представляет собой, по существу, приемную часть спектрометра я.м.р. низкого разрешения. Возможна работа как с контуром высокой, так и низкой /10/ добротности. Применение автоподстройки позволяет уменьшить поправки к измеренной величине поляризации до 1% при коэффициенте модуляции высокочастотного /в.ч./ напряжения сигналом я.м.р. до 20%.

Блок-схема прибора

На рис. 1 приведена блок-схема прибора. Высокочастотный ток через сопротивление $R_{св.} \gg |Z_k(\nu_0)|_i$ подается с генератора в.ч. на последовательный колебательный контур, образованный катушкой L_k , кабелем $2 \times \frac{\lambda_B}{2}$, до-

бавочным сопротивлением потерь R_k , конденсатором C_1 и варикапом D_1 . Варикап управляется схемой ф.а.п.ч. Сигнальное в.ч. напряжение подается на схему фазовой автоподстройки частоты с выхода усилителя высокой частоты /у.в.ч./, а опорное - от генератора в.ч. через электрически управляемый фазовращатель. С выхода

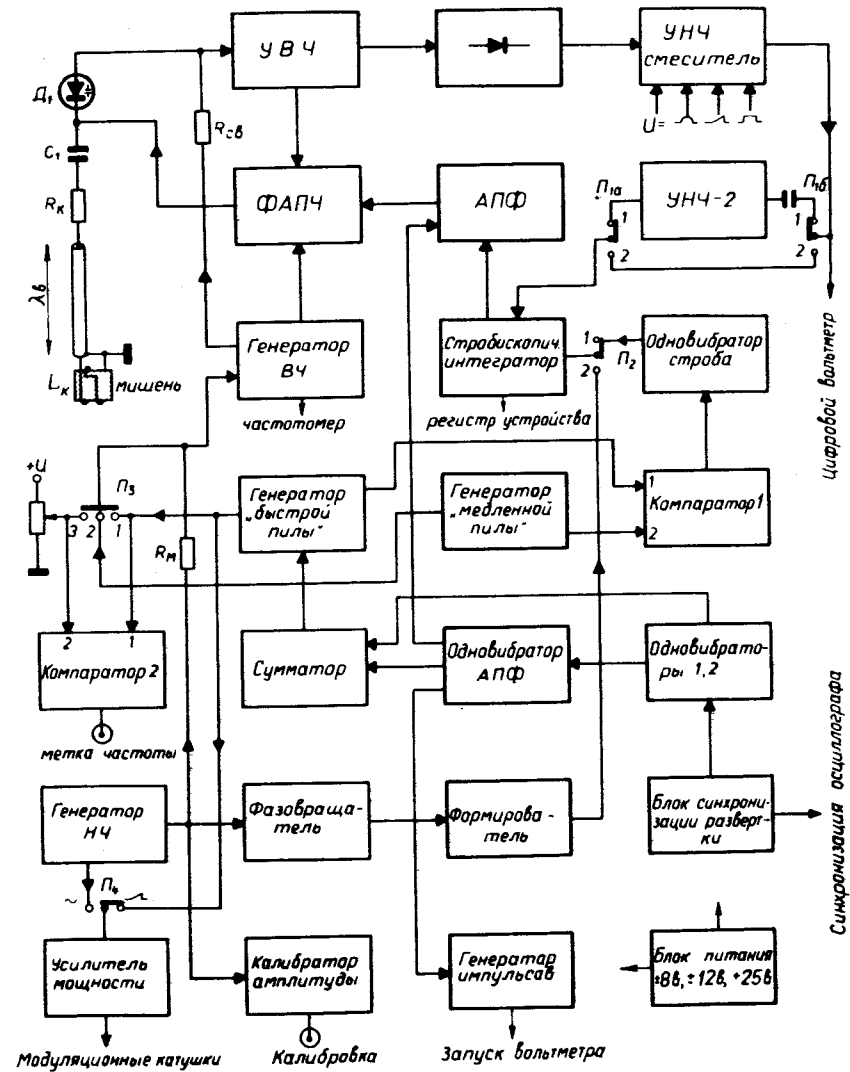


Рис. 1. Блок-схема прибора для измерения поляризации мишени.

у.в.ч. сигнал поступает на детектор, а затем на вход усилителя низкой частоты - смесителя, который состоит из двух блоков. Первый усиливает сигнал в 5 раз и в нем предусмотрена компенсация постоянной составляющей продетектированного сигнала. Во втором, кроме двукратного усиления, осуществляется коррекция базовой линии развертки сигналами прямоугольной, пилообразной, параболической форм. Коррекция необходима для компенсации огибающей амплитудно-частотной характеристики колебательного контура, остаточной амплитудной модуляции генератора в.ч., остаточной амплитудной модуляции генератора в.ч., фоновой наводки сети питания. С выхода у.н.ч. - смесителя сигнал подается либо на вход у.н.ч. - 2 /с коэффициентом усиления, равным 150/ через калиброванный делитель, либо непосредственно на вход стробоскопического интегратора. Во втором случае в канале обработки н.ч. сигнала отсутствуют переходные емкости.

Назначение блока синхронизации развертки, одновибраторов 1 и 2, одновибратора автоподстройки фазы и сумматора ¹³ поясняют рис. 1 и 2. Импульс с выхода сумматора запускает генератор пилообразного напряжения с длительностью выходного импульса 2 ± 10 мс - генератор "быстрой пилы", служащий для развертки частоты генератора в.ч. При измерении интегральной интенсивности сигнала я.м.р. /рис. 3/ на управляющий вход стробоскопического интегратора подается строб-импульс длительностью, равной длительности импульса развертки /режим полного охвата сигнала строб-импульсом/.

При записи формы линии я.м.р. с накоплением стробоскопический интегратор управляется строб-импульсом, длительность которого много меньше длительности импульса развертки. Одновибратор строб-импульса в этом случае запускается компаратором 1, сравнивающим мгновенные амплитуды импульсов генератора "быстрой пилы" и генератора пилообразного напряжения с длительностью импульса 5, 10, 15 мин - генератора "медленной пилы" /г.м.п./. При этом задержка строб-импульса относительно начала развертки пропорциональна мгновенной амплитуде импульса г.м.п. /рис. 2/. Выход стробоскопического интегратора соединяется с входом "у" двухкоро-

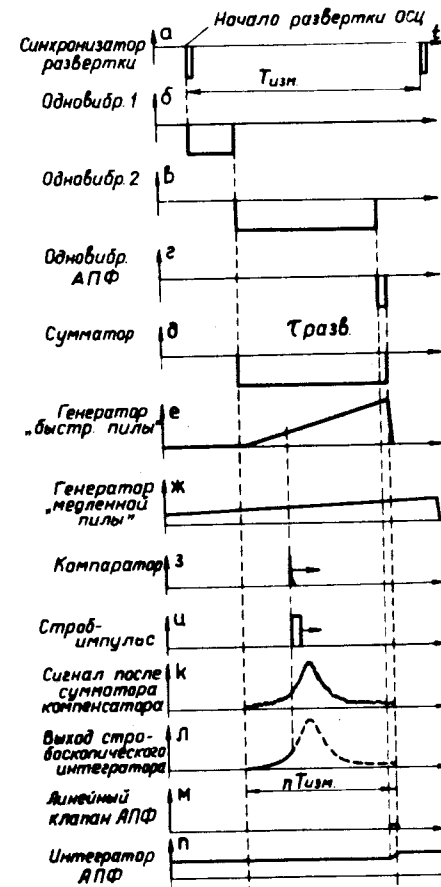


Рис. 2. Запись формы линии сигнала я.м.р.

динатного самописца, а на вход "х" последнего подается сигнал с г.м.п. Таким образом, за время, равное длительности импульса г.м.п., произойдет запись сигнала я.м.р. с накоплением.

При записи производной сигнала я.м.р. / Π_2 в положении 2 на рис. 1/ осуществляется медленная развертка частоты генератора в.ч. /или поля H_0 / и низкочастотная модуляция магнитного поля H_0 /частоты генератора в.ч./,

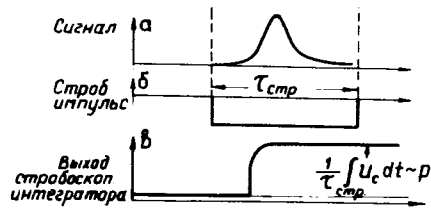


Рис. 3. Измерение поляризации.

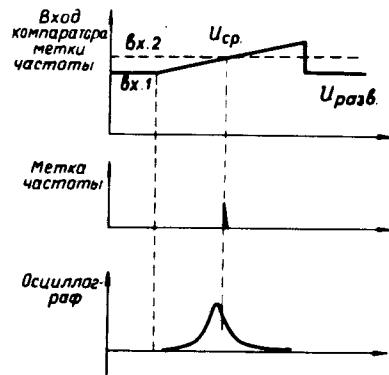


Рис. 4. Калибровка частотного диапазона развертки.

а стробоскопический интегратор управляется строб-импульсом, сформированным цепью фазовращатель-формирователь из синусоидального напряжения генератора н.ч., осуществляющего модуляцию поля или частоты /рис. 5/.

Калибровка диапазона развертки и определение частоты любой ее точки осуществляются с помощью метки частоты /рис. 4/. Импульс от генератора "быстрой пилы", подаваемый на варикап развертки частоты генератора в.ч., поступает на вход 1 компаратора 2 /рис. 1/. Компаратор сравнивает мгновенную амплитуду этого импульса с постоянным напряжением на входе 2. В момент равенства напряжений вырабатывается метка частоты, которая затем накладывается на сигнал я.м.р.

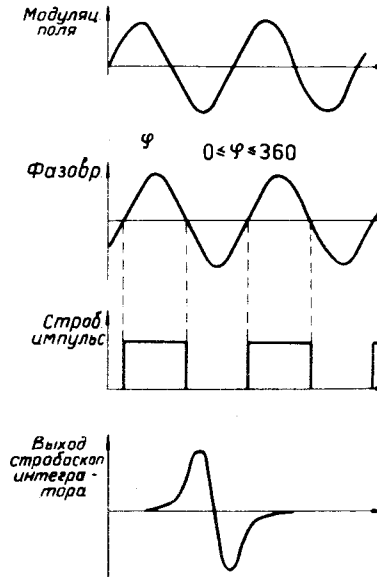


Рис. 5. Запись производной сигнала я.м.р.

Меняя напряжение на входе 2, можно передвигать метку по развертке, а частоту, соответствующую положению метки, определять после подключения к варикапу развертки частоты генератора в.ч. этого напряжения /П₃ в положении 3 на рис. 1/.

Общий коэффициент усиления приемного тракта описываемого прибора достигает $3 \cdot 10^5$, поэтому механические вибрации приемного контура и аппаратуры, сдвиг фазы опорного в.ч. напряжения приводят к расстройке приемного контура, что сказывается на стабильности интегральной интенсивности базовой линии развертки-фона, а это, в свою очередь, приводит к дополнительной погрешности измерения поляризации. Для устранения такого явления применяется автоподстройка фазы /а.п.ф./, которая осуществляется следующим образом. Из конца базовой линии развертки с помощью последовательно-параллельного клапана, управляемого одно-вibratorом а.п.ф., формируется импульс, амплитуда которого пропорциональна отклонению базовой линии раз-

вертки от начального положения /рис. 2/. Затем последовательность таких импульсов интегрируется, и напряжение с выхода интегратора управляет электрическим фазовращателем в.ч. таким образом, чтобы восстановить настройку приемного колебательного контура. Такая а.п.ф. позволяет полностью исключить дрейф фона и осуществить измерение интегральной интенсивности сигнала я.м.р. с точностью до 1% при отношении с/ш > 3:1.

Частота генератора в.ч. контролируется частотомером ЧЗ-34А, а напряжение на детекторе - цифровым вольтметром в промежутках между импульсами развертки. К выходу стробоскопического интегратора подключаются цифровой вольтметр /для контроля поляризации/, который может быть связан с ЭВМ, двухкоординатный и ленточный самописцы /для записи сигналов/, а для контроля процессов настройки аппаратуры и измерения сигналов я.м.р. используется осциллограф с памятью С1-37.

Принципиальная схема Q-метра

На рис. 6 приведена принципиальная схема Q-метра. Полосовой усилитель /транзисторы Т₁- Т₄/ имеет коэффициент усиления около 200. Частотная характеристика усилителя формируется четырьмя расстроенными друг относительно друга колебательными контурами и в диапазоне частот 109-119 МГц имеет неравномерность < 1дБ. Входной каскад собран на малошумящем транзисторе ГТ-329В. Поскольку каскад с общей базой имеет индуктивный характер входного сопротивления, в схему добавлен конденсатор С₂ для настройки входного параллельного колебательного контура, состоящего из С₂, паразитной емкости монтажа, индуктивности подводящего провода и индуктивности транзистора, на рабочую частоту Q-метра /114,5 МГц/. В результате входное сопротивление усилителя становится активным и увеличивается примерно до 300 Ом, что приблизительно в 5 раз превышает входное сопротивление каскада без упомянутой выше настройки. К выходу у.в.ч. подключен детектор /Д₄- Д₅/ и схема фазовой автоподстройки

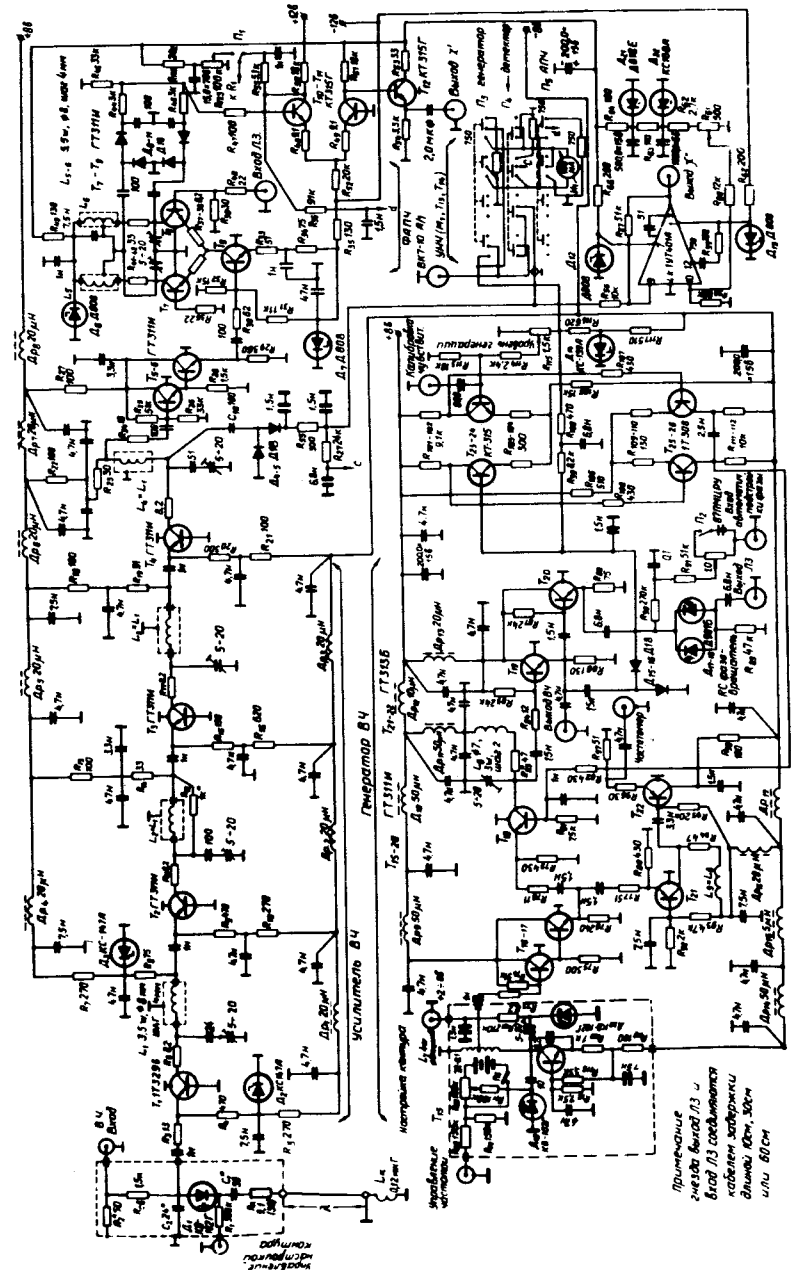


Рис. 6. Принципиальная схема Q-метра.

частоты. Сигнальное в.ч. напряжение через буферный каскад / $T_5 - T_6$ / поступает на вход фазочувствительного детектора / $D_8 - D_{11}$ /, на другой вход которого подается опорное в.ч. напряжение с генератора в.ч. через электрический фазовращатель / $D_{17} - D_{18}, R_{89}$ / и линию задержки /л.з./. Напряжение с выхода фазочувствительного детектора усиливается / T_{10-11} / и подается на варикап D_1 настройки входного колебательного контура, а также через эмиттерный повторитель / T_{12} / на гнездо "выход χ " для регистрации сигнала дисперсии. Переключателем P_1 можно отключить схему фазовой автоподстройки частоты от варикапа D_1 , в этом случае последний управляется напряжением, снимаемым с потенциометра R_{123} , и осуществляется режим работы Q -метра без автоподстройки частоты.

Генератор в.ч. / T_{15} / работает в диапазоне частот 108-120 МГц. Для дистанционной регулировки частоты генератора служит варикап D_{20} , а для развертки частоты - D_{19} . Регулировка амплитуды напряжения, подаваемого на приемный контур, осуществляется транзистором T_{18} . Последний управляется сигналом с выхода дифференциального усилителя постоянного тока / $T_{23} - T_{26}$ /, сравнивающего протектированное в.ч. напряжение / $D_{15} - D_{16}$ / и опорное напряжение (R_{115}). Такой стабилизатор амплитуды позволяет на порядок уменьшить уровень паразитной модуляции генератора и легко корректировать изменение амплитуды в.ч. напряжения в процессе эксплуатации.

Первый каскад у.н.ч. - смесителя, находящегося в блоке Q -метра, обеспечивает предварительное усиление ($K=5$) протектированного сигнала и позволяет скомпенсировать постоянную составляющую напряжения на выходе детектора (R_{61}).

Принципиальная схема стробоскопического интегратора

На рис. 7 приведена схема стробоскопического интегратора, подобного описанному в работе /12/. Отличие заключается в измененной схеме управления клапаном

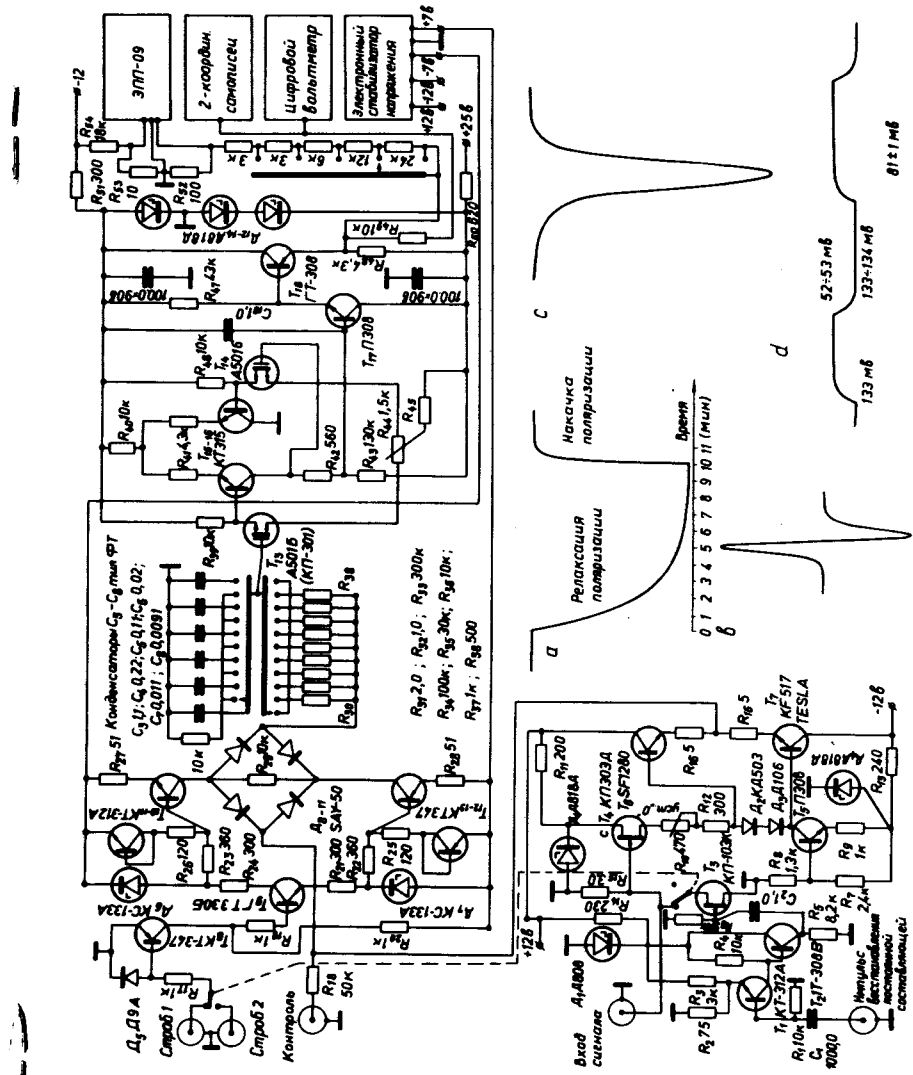


Рис. 7. Принципиальная схема стробоскопического интегратора.

$/D_8 - D_{11}/$, более стабильной схеме электрометра $/T_{13} - T_{18}/$ и замене второго канала двухканального интегратора схемой восстановления постоянной составляющей периодического сигнала, назначение которой - разряжать разделительную емкость на выходе у.н.ч. - 2 в промежутках между импульсами развертки. Схема восстановления может быть отключена, например, при записи производной сигнала я.м.р. На этом же рисунке приведены экспериментальные кривые для одного из образцов 1,2 - пропандиола с примесью Cr^{+V} , иллюстрирующие возможные режимы работы /а - релаксация и накачка поляризации, б - производная сигнала я.м.р., с - сигнал я.м.р., d - измерение интегральной интенсивности термически равновесного сигнала я.м.р./.

Измерение поляризации

После прогрева аппаратуры в течение одного часа осуществляется настройка колебательного контура. Для этого на частоте настройки кабеля приемного контура /равной в нашем случае 114,5 МГц/ включается частотная модуляция генератора в.ч. синусоидальным н.ч. напряжением /рис. 1//¹⁵. Контур настраивается изменением фазы опорного в.ч. напряжения схемы автоподстройки частоты по минимуму первой гармоники на детекторе. Затем устанавливается уровень в.ч. напряжения на детекторе, соответствующий линейному участку его характеристики /0,7 В по постоянной составляющей/. После этого осуществляется коррекция базовой линии развертки, установка нуля стробоскопического интегратора и производится запись фона и интегральной интенсивности сигнала.

Измерение термически равновесного сигнала /калибровка/ производится при температуре 1,2 К. Время релаксации T_1 при данной температуре в поле $H_0 = 26,9$ кЭ для протонов 1,2 - пропандиола с примесью Cr^{+V} /вещество мишени/ оптимальной концентрации составляет менее 5 мин, так что процедура измерения термически равновесной поляризации занимает в нашем случае существенно более короткое время, чем в¹⁰/,

где калибровка ведется при температуре 0,6-0,7 К. На рис. 8 приведен термически равновесный сигнал при $T = 0,54$ К. После измерения термически равновесного сигнала и определения температуры рассчитывается начальная поляризация протонов

$$P_0 = 1,0217 \cdot 10^{-7} \frac{H}{T}, \quad /3/$$

где [H] в Э, [T] в К.

После динамической поляризации ядер вещества мишени производится измерение интегральной интенсивности усиленного сигнала. Расчеты показывают, что при росте поляризации из-за увеличения вклада дисперсии в /2/ форма сигнала на выходе Q-метра искажается. На рис. 9 показан сигнал отрицательной поляризации, получаемый на экране осциллографа, когда в тракте н.ч. отсутствуют переходные емкости /переключатель Π_1 на рис. 1 в положении 2/. На рис. 10 показан тот же сигнал, но в тракте н.ч. имеются переходные емкости /переключатель Π_1 в положении 1/. Очевидно, что измерение поляризации в последнем случае приводит к уменьшению измеренного значения поляризации /в нашем случае приблизительно на 10%/. Поэтому при измерении термически равновесного сигнала мы используем весь тракт у.н.ч. /измерение по переменному току/, а усиленного - исключаем у.н.ч. - 2 /измерение по постоянному току/.

Поляризация после динамической поляризации ядер определяется следующим образом:

$$P' = \frac{S_1}{S_0} \cdot \frac{K_1}{K_0} \cdot P_0, \quad /4/$$

где S_0 - интегральная интенсивность термически равновесного сигнала; S_1 - интегральная интенсивность усиленного сигнала я.м.р.; K_0 - коэффициент деления аттенюатора на входе у.н.ч. - 2 при измерении S_0 ; K_1 - коэффициент деления аттенюатора на входе у.н.ч. - 2 при измерении S_1 , либо

$$P' = \frac{S_1}{S_0} \cdot \frac{A}{K_0} \cdot P_0, \quad /5/$$

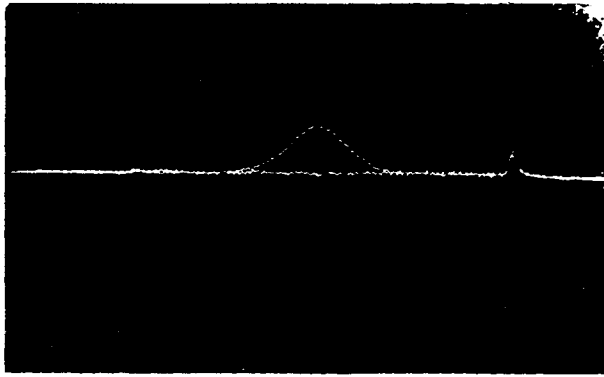


Рис. 8. Термически равновесный сигнал я.м.р. протонов 1,2-пропандиола с примесью Cr^{+V} в поле $H_0 = 26,9 \text{ кЭ}$ при температуре $0,54 \text{ К}$ /развертка частоты $400 \text{ КГц}/$.

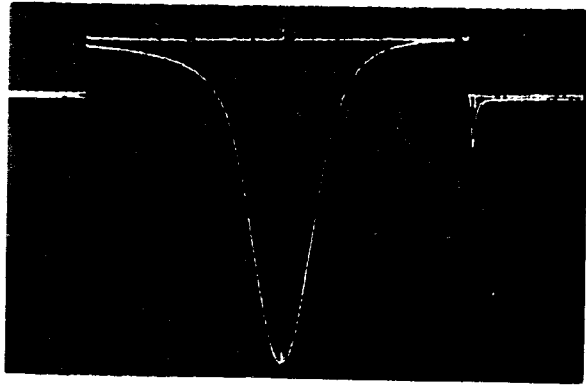


Рис. 9. Сигнал я.м.р. протонов 1,2-пропандиола с примесью Cr^{+V} , поляризация - 80%. Измерение по постоянному току /прямоугольный пьедестал обусловлен неполной компенсацией постоянного напряжения на входе у.н.ч.-смесителя при включенной схеме восстановления постоянной составляющей/.

когда при измерении усиленного сигнала у.н.ч. - 2 не используется /А - коэффициент усиления у.н.ч. - 2/.

После вычисления поляризации вводится коррекция на нелинейность Q-метра:

$$P = P'(1 - \delta_E), \quad /6/$$

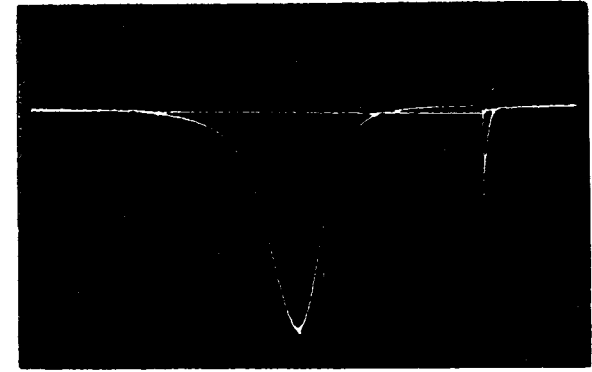


Рис. 10. Тот же сигнал. Измерение по переменному току.

где δ_E - поправка на нелинейность Q-метра^{/3/}. Результаты расчетов δ_E в зависимости от глубины модуляции

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{|Z_k(\nu_0)| - |Z_k(\nu_0)|_0}{|Z_k(\nu_0)|_0} \quad /7/$$

приведены на рис. 11 для двух случаев:

а/ сопротивление потерь $R_k = 10 \text{ Ом}$, фактор автоподстройки^{/3/} $S = 3$;

б/ сопротивление потерь $R_k = 40 \text{ Ом}$, фактор автоподстройки $S = 1$.

В расчетах* использовалось аналитическое выражение для $\chi''(\nu)$, приведенное в /16/

$$\chi''(\nu) = \frac{1,035 \chi_0 \nu_0}{\Delta \nu [1 + 4 \left(\frac{|\nu - \nu_0|}{\Delta \nu} \right)^{2,54}]}$$

* Расчет проведен Ю.Ф.Киселевым, А.П.Сапожниковым, Б.А.Хачатуровым.

где χ_0 - статическая восприимчивость ядер, а $\Delta\nu$ принималась равной $5,58 \cdot 10^4$ /определялась экспериментально по форме линии я.м.р. протонов 1,2 - пропандиола/.

Линейный участок передаточной характеристики детектора, примененного в Q-метре, описывается формулой $U_{\pm} = 7,85 (U_{вч} - 30)$, где U_{\pm} и $U_{вч}$ даны в мВ. Тогда

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta U_{вч}}{U_{вч}} = \frac{\Delta U_{\pm}}{U_{\pm} + 235}$$

Так, если в рабочей точке детектора $U_{\pm} = 700$ мВ, а $\Delta U_{\pm} = 180$ мВ /при $P = \pm 98\%$ */ то $\Delta Z/Z = 0,2$ а $\delta_E^+ = 0,8\%$ /для положительной поляризации/ и $\delta_E^- = -1,0\%$ /для отрицательной поляризации/ при факторе автоподстройки $S = 3$ /рис. 11/. При $R_k = 40$ Ом ($S=1$) приемный контур аналогичен контуру, примененному в /10/. В этом случае при той же глубине модуляции $\delta_E^+ = 4\%$, а $\delta_E^- = -4,5\%$. Таким образом, применение а.п.ч. позволяет расширить динамический диапазон Q-метра по коэффициенту усиления E поляризации до 450 /для сравнения, динамический диапазон Q-метра с контуром низкой добротности / $R_k = 40$ Ом/ равен приблизительно 200/ при сохранении линейной зависимости δ_E от $\Delta Z/Z$.

Среднеквадратичная относительная погрешность измерения поляризации определяется:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_{TE}^2 + \delta_H^2 + \delta_k^2 + \delta_p^2}, \quad /8/$$

где δ_T - погрешность определения температуры, δ_{TE} - погрешность измерения термически равновесного сигнала, δ_H - нестабильность аппаратуры за время измерений, δ_p - погрешность измерения усиленного сигнала, δ_k - погрешность определения A. Характерные величины: $\delta_T = \pm 0,5 \pm 1,0\%$, $\delta_{TE} < 1\%$, $\delta_H < 1\%$, $\delta_p < 1,5\%$, $\delta_k = 0,5\%$,

* Результаты измерения поляризации Q-метром совпадают в пределах экспериментальной ошибки с результатами, полученными по упругому p-p рассеянию неполяризованного пучка на поляризованной мишени.

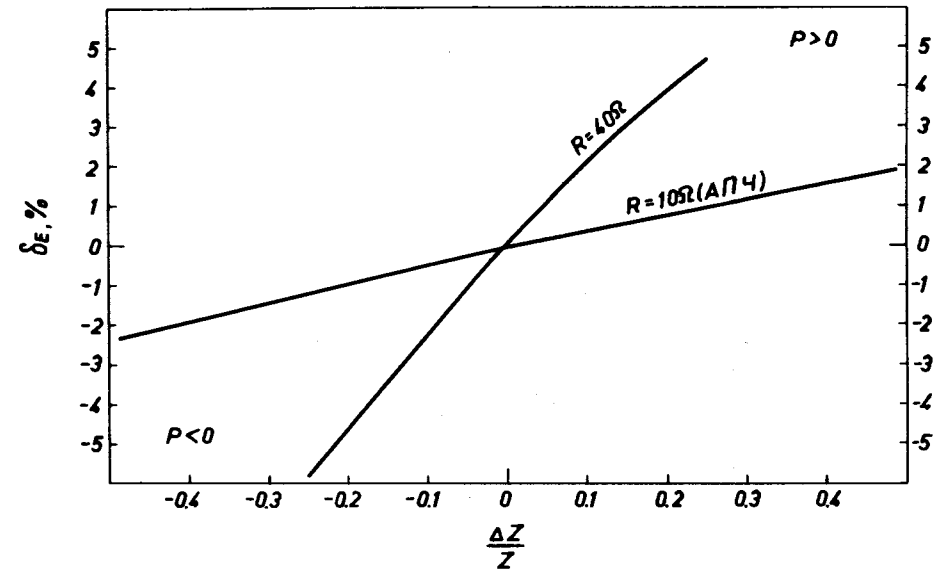


Рис. 11. Расчетный график зависимости δ_E от глубины модуляции в.ч. напряжения на контуре Q-метра сигналом я.м.р. / $L = 0,135$ мкГ, $\nu = 112$ МГц, длина кабеля коэффициент затухания кабеля $\beta = 0,013$ Нп/м/. $\ell = 2 \times \frac{\lambda_B}{2}$,

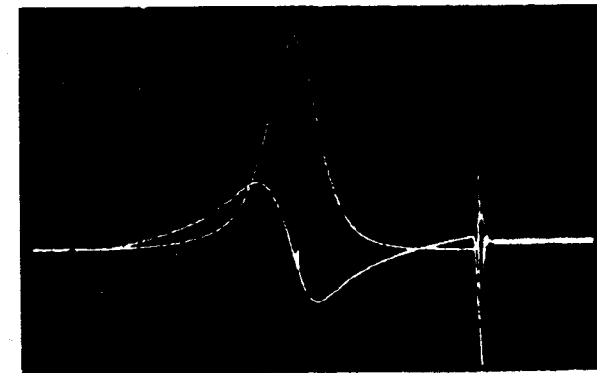


Рис. 12. Сигналы поглощения и дисперсии на выходе Q-метра.

а $\delta \Sigma < 2,5\%$, что соответствует лучшим достигнутым в настоящее время результатам.

На рис. 12 приведена фотография усиленных сигналов χ'' и χ' /при съемке последнего производилась компенсация пилообразного напряжения на выходе схемы фазовой автоподстройки частоты /рис. 13//.

В заключение отметим, что хотя при включении в приемный колебательный контур $R_k = 40 \text{ Ом}$ подавления

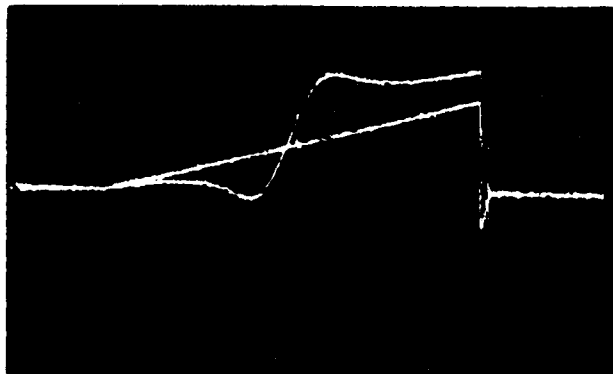


Рис. 13. Форма сигналов на выходе схемы фазовой автоподстройки частоты.

оггибающей амплитудно-частотной характеристики в режиме с автоподстройкой частоты не происходит, схема автоподстройки фазы по-прежнему эффективно стабилизирует положение базовой линии развертки, так что указанный режим является одной из возможностей работы прибора.

Авторы выражают благодарность Б.С.Неганову, Ю.М.Казаринову, В.Г.Зинову, А.Н.Синаеву, В.М.Гребенюку, К.Андерту, А.И.Калинину за постоянную помощь в работе и консультации, В.Петричку и М.Одегалу за полезные замечания и обсуждение результатов, О.Н.Щевелеву за большую и трудоемкую работу по изготовлению аппаратуры.

Литература

1. К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер. "Мир", М., 1965.
2. А.Абрагам. Ядерный магнетизм. ИЛ, М., 1963.
3. V.Petriček. Nucl. Instr. and Meth., 58, 111, 1968.
4. Л.Б.Парфенов, Б.С.Неганов. ОИЯИ, 13-4143, Дубна, 1968.
5. M.Borghini et al. Nucl.Instr. and Meth., 49, 259, 1967.
6. C.Ryter. Nucl.Instr. and Meth., 49, 267, 1967.
7. А.И.Ковалев и др. Препринт ФТИ АН СССР, 178, Л., 1969.
8. А.И.Ковалев, Г.М.Шкляревский. Препринт ФТИ АН СССР, 298, Л., 1970.
9. V.Petriček, M.Odehnal. Nucl.Instr. and Meth., 52, 197, 1967.
10. F.Udo. Instrumentation for the CERN Polarized Targets, CERN-NP Internal Report, October, 1974.
11. М.Н.Дражев, А.И.Иваненко. ОИЯИ, P13-7176, Дубна, 1973.
12. W.G.Clark, A.L.Kelvin. Rev.Sci.Instr., 38, 1593, 1967.
13. В.Ф.Борейко и др. ОИЯИ, 13-6396, Дубна, 1972.
14. H.F.Strenglein. Electronics, 38, 99, 1965.
15. J.Burget et al. A Medium Size Polarized Proton Target, UJF 2899F, Rež, Czechoslovakia, 1972.
16. J.J.Hill, D.A.Hill. Nucl.Instr. and Meth., 116, 269, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 сентября 1976 года.