



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

В.И. Лушиков, А.А. Маиенков, Ю.В. Таран

760

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРОТОНОВ
В ОБЛУЧЕННОМ ПОЛИЭТИЛЕНЕ**

В.И. Лушиков, А.А. Маненков,^{x/} Ю.В. Таран

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРОТОНОВ
В ОБЛУЧЕННОМ ПОЛИЭТИЛЕНЕ

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

^{x/} Физический Институт им. П.Н. Лебедева АН СССР.

В в е д е н и е

В последнее время, благодаря открытию Ubersfeld'ом, Erb'ом и Motchane^{/1/} и независимо Proctor'ом и Abragam'ом^{/2/} динамической ориентации ядер в твердых парамагнитных телах, сильно возрос интерес к радиочастотной ориентации ядер. Появилось большое количество работ, посвященных как выяснению сущности явления, так и его использованию для создания ориентированных мишеней. Успехи, достигнутые Hwang'ом^{/3/}, Jeffries'ом^{/4/}, Abraham'ом^{/5/}, Borghini^{/6/}, позволяют надеяться, что в настоящее время возможно создание мишени, содержащей ориентированные протоны со степенью поляризации большей 25%.

Перспективным материалом для протонной мишени является полиэтилен, который имеет плотность в два раза большую, чем чистый жидкий водород /0.14 граммолекулы на 1 см^3 для полиэтилена и 0.07 г-м для жидкого водорода/. Для создания парамагнитных центров в полиэтилене можно использовать радиоактивные излучения /протоны, быстрые нейтроны, γ -лучи и электроны/. При температуре 1.2°K Hwang^{/3/} получил наибольшее усиление сигнала ядерного магнитного резонанса /ЯМР/ $\eta = 40$ для полиэтилена высокой плотности, облученного быстрыми нейтронами в Арагонском реакторе, что соответствует поляризации протонов 1.2%. Интересной особенностью, отмеченной Hwang'ом, является то, что при понижении температуры от 77°K до 1.2°K усиление уменьшается в два раза. Измерение времен релаксации, сделанное в^{/3/}, не объяснило этот эффект.

Целью данной работы являлось выяснение возможности создания мишени, содержащей ориентированные протоны. Были измерены времена ядерной и электронной релаксации. Статья содержит описание более детальных экспериментов с облученным полиэтиленом, чем выполнены Hwang'ом. Работа является предварительным этапом в серии экспериментов по созданию ориентированной мишени.

1. Описание установки

Блок-схема установки для одновременного наблюдения ядерного магнитного резонанса и электронного парамагнитного резонанса /ЭПР/ при гелиевых температурах показана на рис. 1. В резонаторе возбуждались колебания типа H_{102} с частотой $\nu_0 = 9.3$ к мгц. Образец помещался в высокочастотное магнитное поле H_{10} . Высокочастотный генератор на клистроне обладал мощностью порядка 20 мвт. Для стабилизации частоты клистрона использовалась система автоматической подстройки частоты /АПЧ/ относительно собственной частоты резонатора, в котором находился исследуемый образец /7/. Расположение контура ЯМР генератора представляло довольно сложную задачу. Было испробовано несколько вариантов.

1/ Внутренний контур. Контур из 7-9 витков тонкого (0,2 мм) медного провода в эмалированной изоляции наматывался на образец. Концы контура через специальные щели в резонаторе выводились наружу и через коаксиальный кабель соединялись с регистрирующей схемой. В этом варианте осуществлялись две модификации: /1/ ось контура перпендикулярна внешнему магнитному полю H_0 так, что H_0 , H_{10} и магнитное поле контура H_{10} представляют тройку взаимно-перпендикулярных векторов /рис. 2/ и /2/ ось контура составляет малый угол с H_0 /рис. 3/.

2/ Внешний контур. Контур наматывался на резонатор, стенки которого были сфрезерованы до толщины $0.2 \div 0.3$ мм для уменьшения экранирующего действия на контур ЯМР - генератора. Вдоль оси резонатор был разрезан, чтобы устранить короткозамкнутый виток.

3/ Комбинированный контур. В этом случае малая часть витков наматывалась прямо на образец в модификации /1/, а большая часть витков располагалась вблизи ЯМР - генератора. Детектором сигнала ЯМР служила модифицированная автодинная схема на лампе 6Ж11П /рис.4/. Ядерная частота $\nu_{\text{я}} = 14$ мгц. Сигнал ЯМР наблюдался при прохождении ядерной частоты через резонансное значение при фиксированном магнитном поле. Частотное прохождение осуществлялось с помощью вращающегося конденсатора $C_{\text{п}}$ /рис.4/, связанного через редуктор с осью электромо-

тора. Чтобы избежать насыщения по ядерной частоте, генератор работал на минимально достижимом уровне колебаний /вблизи границы срыва генерации/. При этом частотное прохождение меняло уровень генерации. Для стабилизации уровня применялась автоматическая подстройка уровня генерации /АПУ/. Амплитуда генерируемого сигнала усиливалась УВЧ / L_2 / и детектировалась диодом / L_3 /.

Продетектированное напряжение через РС -цепь с большой постоянной времени подавалась на сетку генераторной лампы / L_1 / и тем самым регулировало смещение на сетке генератора, поддерживая постоянный уровень высокочастотных колебаний. Система АПУ в то же время позволяла достигнуть очень малых уровней генерации. Так, при температуре жидкого гелия уровень генерации легко получался порядка 0,005 вольта.

Внешнее магнитное поле модулировалось с частотой 860 гц на глубину порядка 1 э, значительно меньшую ширины линии ЯМР в полиэтилене. После детектирования сигнал ЯМР поступал последовательно на двухкаскадный усилитель низкой частоты на лампе 6НЗП, резонансный усилитель, настроенный на частоту 860 гц, и синхронный детектор. Запись сигнала производилась на самописец ЭПП-0,9. Эта система обеспечивала при гелиевых температурах для неусиленного сигнала ЯМР фактор сигнал/шум порядка 50 / 1 .

2. Образцы полиэтилена

Образцы изготовлялись из полиэтилена различных сортов. Полиэтилен высокого давления имеет малую плотность $(\rho \approx 0.90 - 0.92 \frac{\text{г}}{\text{см}^3})$. Полиэтилен низкого давления имеет большую плотность $(\rho \approx 0.95 - 0.97 \frac{\text{г}}{\text{см}^3})$. Полиэтилен низкого давления был взят с различной вязкостью. Вязкость непосредственно характеризует средний молекулярный вес полимерной цепочки полиэтилена.

Исследовались следующие образцы:

/1/ ПЭВП1М -полиэтилен высокой плотности с вязкостью 3.2 пз, что соответствует среднему молекулярному весу полимерной цепочки

4×10^5 . Прессовка производилась из гранул. Размер образца $17 \times 9 \times 7$ мм / $\sim 1.0 \text{ см}^3$ /.

/2/ ПЭВП1Б -полиэтилен высокой плотности с вязкостью 3.2 пз. Прессовка из гранул происходила в несколько других условиях, чем для ПЭВП1М. Размер образца $21 \times 9 \times 7$ мм / $\sim 1.3 \text{ см}^3$ /.

/3/ ПЭВП2 -полиэтилен высокой плотности с вязкостью 2.6 пз, что соответствует молекулярному весу 2×10^5 /вдвое меньше, чем для ПЭВП1/. Размер такой же как ПЭВП1Б.

/4/ ПЭНП - полиэтилен низкой плотности.

Размер образца как у ПЭВП1М.

Образцы облучались быстрыми нейтронами в тяжеловодном реакторе ИТЭФ АН СССР в течение 20 часов при температуре 65°C /интегральная доза облучения 7×10^{17} нейтр.см⁻² / . После облучения образцы имели γ -активность порядка 100 мкр/сек. β -активность практически отсутствует. Так как ядро C^{12} /химическая формула полиэтилена CH_2 / после захвата нейтрона образует стабильный изотоп C^{13} , которого мало в естественной смеси изотопов и который очень слабо активизируется /период полураспада изотопа C^{14} 5500 лет/, то активность вероятно вызывается загрязнениями /т.н. зольность полиэтилена/. После трехсуточного выдерживания образцов в жидком азоте /для сохранения F -центров/ активность падала ниже безопасно допустимого уровня.

3. Экспериментальные результаты

Увеличение поляризации протонов характеризуется коэффициентом динамического усиления η , равного отношению сигнала ЯМР при наличии насыщения электронного резонанса F -центров к сигналу ЯМР в отсутствии насыщения F -центров. Обозначим частоту разрешенной линии ЭПР через $\omega_{\text{э}}$, соответствующее поле — $H_{0\text{э}}$. Сверхтонкая структура электронного резонанса для полиэтилена не разрешена. Коэффициент динамического усиления при насыщении "запрещенного" перехода $\omega_{\text{э}} + \omega_{\text{я}}$

/соответствующее поле $H_{0\Omega} (1 - \frac{\mu_{\text{я}}}{\mu_{\text{э}}})$ / обозначим через η_- , аналогично для перехода $\omega_{\Omega} - \omega_{\text{я}}$ через η_+ /рис. 5/.

Сравнение образцов производилось при температуре 77°К. Мощность, насыщающая ЭПР, равна 20 мвт. Использовался внутренний контур в модификации /1/. Схема в диапазоне уровней генерации ЯМР $V_{\Gamma} = 0.05 \div 0.2$ вольта была линейной /коэффициент динамического усиления η не зависит от V_{Γ} /. Рабочий уровень генерации $V_{\Gamma} = 0.1$ в. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1.

О б р а з ц ы	η_-	η_+
ПЭВП1М	22 \pm 2	25 \pm 2
ПЭВП1Б	15 \pm 2	18 \pm 2
ПЭВП2	10 \pm 2	14 \pm 2
ПЭНП	3 \pm 1	3 \pm 1

ПЭВП1М дал наибольшее усиление. Полиэтилен с меньшим молекулярным весом дал меньшее усиление при той же дозе облучения. Отличие ПЭВП1М и ПЭВП1Б, возможно, вызвано разными условиями прессовки образцов из гранул.

Было измерено время ядерной спин-решеточной релаксации $T_{1\text{я}}$ при 77°К. Измерение $T_{1\text{я}}$ производилось следующим образом. Частота генератора ЯМР настраивалась на резонансное значение так, что самописец чертил максимальную амплитуду сигнала, затем выключался клистрон, насыщающий ЭПР F-центров. Амплитуда сигнала экспоненциально спадала до значения, соответствующего неусиленному сигналу. Рост и спад усиленного сигнала описывается одной экспонентой со временем $T_{1\text{я}} = 1/2 \pm 0.2$ /сек.

Типичная релаксационная картина показана на рис. 6. Запись усиленного и неусиленного сигналов ЯМР показана на рис. 7.

Ширины усиленного и неусиленного сигналов ЯМР равны и

поэтому коэффициент динамического усиления брался как отношение максимальных значений производных этих сигналов.

При гелиевой температуре изучались различные варианты расположения контура ЯМР. При температуре 4.2°K добротность резонатора с образцом и контуром, помещенными внутрь резонатора, равнялась $Q = 2000$. Температура 1.6°K получалась с помощью откачки паров гелия форвакуумным насосом РВН-20. Интересно отметить, что при переходе от комнатной температуры к азотной, ширина сигнала ЯМР сильно увеличивалась. При понижении температуры от 77°K до 1.6°K ширина линии практически не изменилась. Это согласуется с работой^{/8/}.

Эксперименты при гелиевой температуре производились с образцом ПЭВП1М, имеющим при 77°K усиление 18 ± 3 .

Внутренний контур, модификация /1/. При температуре 4.2°K и уровне генерации $V_{\Gamma} = 0.006$ в получено усиление $\eta_{-} = 18 \pm 2$; $\eta_{+} = 16 \pm 2$. Измерения η с разными значениями V_{Γ} показали зависимость η от V_{Γ} . Например, η_{+} с 16 при 0.006 в упало до 6 при 0.02 в.

При температуре 1.6°K получено $\eta_{+} = 11 \pm 2$, $\eta_{-} = 42 \pm 3$ при $V_{\Gamma} = 0.006$ в.

Измерения при 1.6°K дают $\eta_{-} > \eta_{+}$. Такое различие между η_{+} и η_{-} связано с нелинейными эффектами в схеме ЯМР - спектрометра, которые возникают тогда, когда мощность, поглощаемая или излучаемая при ЯМР поляризованными протонами, сравнима с мощностью, подводимой в колебательный контур ЯМР - спектрометра. Линия излучения ЯМР при поле $H_{0z} (1 - \frac{\mu_{\text{Я}}}{\mu_{\text{Э}}})$, соответствующая отрицательной поляризации протонов, приводит к регенерации колебательного контура генератора ЯМР, поскольку вносит отрицательные потери в контур, компенсирующие положительные омические потери. Это эквивалентно увеличению добротности контура, приводящему к увеличению уровня генерации. Если излучаемая протонами мощность достаточно велика, чтобы скомпенсировать омические потери в контуре, наступает эффект усиления колебаний в контуре. Получающийся квантовый усилитель на частоте ЯМР может при некоторых условиях самовозбудиться. Мы не иссле-

довали детально этот эффект, однако наблюдали при 1.6°K значительное увеличение уровня колебаний в контуре ЯМР -спектрометра при отрицательной поляризации протонов. При положительной поляризации протонов, которой соответствует коэффициент η_+ , наблюдалось значительное уменьшение уровня колебаний в контуре. Отметим, что наблюдаемые эффекты были значительными, т.к. они не устранялись даже схемой АРУ.

Эти эффекты приводили к амплитудной нелинейности ЯМР -спектрометра и объясняют, что при 1.6°K $\eta > \eta_+$. При 4.2K влияние этих эффектов было несущественным.

Были сделаны измерения с целью определения мощности, необходимой для насыщения ЭПР при температуре 4.2°K . Результаты показаны на рис. 8. Мощность клистрона, необходимая для насыщения ЭПР, оказалась равной 1 мвт при добротности резонатора $Q = 2000$. Естественно, с понижением температуры мощность насыщения будет уменьшаться.

Измерение времени спада и нарастания сигнала ЯМР при выключении и включении микроволновой мощности, соответственно, выявило интересные детали. Релаксация усиленного сигнала после выключения клистрона описывается двумя временами: $T'_{IЯ}$ - короткое время и $T''_{IЯ}$ - длинное. $T'_{IЯ}$ - это время спин-решеточной ядерной релаксации. При включении клистрона, насыщающего ЭПР F -центров, сигнал ЯМР нарастает до значения, соответствующего усиленному сигналу. Рост сигнала описывается также суммой двух экспонент с временами $\tau'_{0Я}$ и $\tau''_{0Я}$. Величины $\tau'_{0Я}$, $\tau''_{0Я}$, $T'_{IЯ}$ и $T''_{IЯ}$ были измерены при температуре 1.6°K и 4.2°K .

Результаты приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

сек	$T'_{IЯ}$	$T''_{IЯ}$	$\tau'_{0Я}$	$\tau''_{0Я}$	$\frac{\tau'_{0Я}}{T'_{IЯ}}$	$\frac{\tau''_{0Я}}{T''_{IЯ}}$
1.6	50 ± 10	150 ± 20	23 ± 5	80 ± 10	0.45	0.53
4.2	17 ± 3	67 ± 10	17 ± 3	66 ± 10	1.0	1.0

При температуре 4.2°K времена разрушения и восстановления поляризации совпадают. При 1.6°K время восстановления поляризации в два раза короче, чем время разрушения. Вклад короткой экспоненты в релаксацию при 4.2°K порядка 30%. Присутствие в релаксации двух экспонент можно объяснить наличием двух групп протонов, имеющих разные времена релаксации. Первую группу составляют протоны, находящиеся вблизи F-центров и имеющие короткое время релаксации. Вторую группу составляют протоны, удаленные от парамагнитных центров. Поляризация к последним передается посредством спиновой диффузии.

Присутствие двух экспонент в релаксации демонстрируется на рис. 9. Из общей кривой "а" вычтен длинный хвост "в". Точки ложатся на прямую "с".

Типичные релаксационные картины показаны на рис. 10 и 11. Сопоставление времен спин-решеточной релаксации при температурах 4.2°K и 1.6°K показывает, что в диапазоне температур $1.6^{\circ}\text{K}-4.2^{\circ}\text{K}$ $T'_{1\text{я}}$ и $T''_{1\text{я}}$ изменяются по закону T^{-1} .

Как уже отмечалось, схема с внутренним контуром в модификации /1/ работает нелинейно. Поэтому были исследованы другие варианты расположения контура.

Внешний контур. Казалось бы, вариант с внешним контуром является очень перспективным. Связь образца с контуром сильно ослаблена /внутри резонатора поле ослабляется почти в 10 раз/ и поэтому эффекты, имеющие место в случае внутреннего контура, должны отсутствовать. Однако схема с внешним контуром оказалась сильно нелинейной. Коэффициент динамического усиления значительно зависел от уровня генерации $V_{\text{г}}$. Причем для $\eta_{\text{г}}$ и $\eta_{\text{д}}$ нелинейности были различные. Измерения времен ядерной релаксации при 4.2°K дали $T'_{1\text{я}} = /20 \pm 4/$ сек и $T''_{1\text{я}} = /90 \pm 15/$ сек, что в пределах ошибок согласуется с измерениями на внутреннем контуре.

Комбинированный контур. Далее был исследован вариант с комбинированным контуром. Два витка наматывались непосредственно на образец, 15 витков выносились из криостата и располагались рядом с ЯМР-

-генератором. Измерения усиления при 4.2°K были сделаны в диапазоне уровней генерации $V_{\Gamma} = /0.04 - 0.4/$ в. Коэффициент усиления η при этом изменялся от 15 до 24. Ошибка измерения равнялась ± 4 . Таким образом в пределах удвоенной ошибки измерений значения η_{-} при разных V_{Γ} перекрывались и дали среднее значение $\eta_{-} = 19 \pm 4$. Аналогичные измерения для η_{+} дали среднее значение 20 ± 3 .

Внутренний контур, модификация /2/

Во всех исследованных вариантах расположения контура не имелось возможности непосредственно проверить линейность регистрирующей схемы. Такую возможность создает вариант с внутренним контуром в модификации /2/, когда направление внешнего поля H_0 и ось контура ЯМР /рис. 3/ могут быть сделаны параллельными /это достигалось вращением магнита/. Изменение угла α между H_0 и осью контура от 90° до 0° уменьшает компоненту радиочастотного магнитного поля $H_{1Я}$, перпендикулярную H_0 , по закону $H_{1Я} \sim \sin \alpha$. Если отсутствует насыщение по ядерной частоте, амплитуда сигнала ЯМР должна меняться по закону $H_{1Я}^2 \sim \sin^2 \alpha$. Например, при повороте магнита от 90° до 45° сигнал ЯМР должен уменьшиться в два раза; соответственно, от 90° до 30° в 4 раза. Таким образом, если измерения дают, что амплитуда сигнала ЯМР меняется по закону $\sim \sin^2 \alpha$, то регистрирующая схема является линейной.

Эксперименты с этим вариантом расположения контура были проведены при температурах 4.2°K и 1.6°K .

Температура 4.2°K . При уровне генерации $V_{\Gamma} = 0.014$ в схема ЯМР была линейна с хорошей точностью. Экспериментальные точки на рис. 12 хорошо совпадают с законом $\sin^2 \alpha$. Усиление равно $\eta_{-} = 21 \pm 3$. Повышение уровня генерации в три раза привело к заметному насыщению резонанса /рис. 12/. Усиление в этом случае не изменилось и равнялось $\eta_{-} = 20 \pm 3$.

Температура 1.6°K . При уровне генерации $V_{\Gamma} = 0.0084$ в схема ЯМР была также линейной. Коэффициенты усиления при $\alpha = 90^{\circ}$ и 30° совпадали и равнялись $\eta_{-} = 18 \pm 3$. Повышение уровня генерации до

0.045 в привело к заметному насыщению резонанса. Измерения при $\alpha = 90^\circ, 30^\circ$ и 5° дали результаты, совпадающие в пределах экспериментальных ошибок со средним значением $\eta_{\text{max}} = 20 \pm 3$. Типичная запись усиленного и неусиленного сигналов ЯМР показана на рис. 13.

Измерение времени спин-решеточной релаксации при $T = 4.2^\circ\text{K}$ дает $T_{1\text{я}}' = /18 \pm 3/$ сек и $T_{1\text{я}}'' = /70 \pm 15/$ сек, что согласуется с прежними результатами. С понижением температуры до 1.6°K изменение времени спин-решеточной релаксации происходит приблизительно как $T_{1\text{я}} \sim T^{-1}$.

Последние измерения с внутренним контуром в модификации /2/ достаточно надежны, чтобы сделать следующий вывод.

В диапазоне $1.6^\circ - 77^\circ\text{K}$ коэффициент динамического усиления от температуры существенно не зависит. Этот результат противоречит данным Hwang'a /3/, который наблюдал систематическое падение усиления в два раза при переходе от азотных температур к гелиевым.

Измерение времени электронной спин-решеточной релаксации $T_{1\text{э}}$ производилось при 1.6°K и 4.2°K на супергетеродинном радиоспектрометре методом импульсного насыщения /8/.

Типичные релаксационные кривые показаны на рис. 14 и 15. Времена спин-решеточной релаксации оказались равными $T_{1\text{э}} = /200 \pm 20/$ м сек при 4.2°K и $T_{1\text{э}} = /440 \pm 30/$ м сек при 1.6°K , изменяясь с температурой приблизительно по закону T^{-1} .

В наших экспериментах получено максимальное динамическое усиление поляризации протонов $\eta = 20$. Максимальное значение коэффициента динамического усиления, предсказываемое теорией в случае разрешенной сверхтонкой структуры электронного резонанса /4/, равно $\eta_{\text{max}} = \frac{\mu_{\text{э}}}{\mu_{\text{я}}} (1+f)^{-1}$, где $\mu_{\text{э}}$ - магнитный момент электрона, $\mu_{\text{я}}$ - магнитный момент протона / $\frac{\mu_{\text{э}}}{\mu_{\text{я}}} = 660/$, $f = \frac{n}{N} \frac{T_{1\text{э}}}{T_{1\text{я}}}$, n, N - количество протонов и F-центров в 1см^3 , соответственно. Используя измеренные значения $T_{1\text{э}}$ и $T_{1\text{я}}$, можно оценить величину f для нашего случая. Грубая оценка дает $f \sim 50$, соответственно, $\eta_{\text{max}} \sim 10$.

При $f \gg 1$ $\eta_{\text{max}} \sim \frac{1}{f} \sim N$.

В связи с этим интересно проверить, как сильно меняется коэффициент динамического усиления с уменьшением количества F-центров. Образец облученного полиэтилена выдерживался при комнатной температуре около 30 часов. Количество F-центров должно уменьшиться в 3.5 раза, если время жизни F-центров при этой температуре считать равным 1 суткам^{/3/}. Усиление при этом упало до $\eta = 14 \pm 2$, т.е. на 30%. Это означает, что концентрация F-центров, достигнутая при облучении, находилась не очень далеко от значения, соответствующего максимально достижимой поляризации протонов. Причины этого расхождения надо искать в том, что для полиэтилена сверхтонкая структура электронного резонанса не является разрешенной, что приводит к уменьшению динамического усиления при насыщении одной из "запрещенных" линий за счет частичного насыщения другой "запрещенной" линии, дающей усиление с обратным знаком. Тем не менее, оптимальная концентрация F-центров возможно не была достигнута. В связи с этим интересно провести накопление F-центров при азотной температуре, при которой время жизни F-центров очень велико. Подобный эксперимент находится в стадии подготовки.

З а к л ю ч е н и е

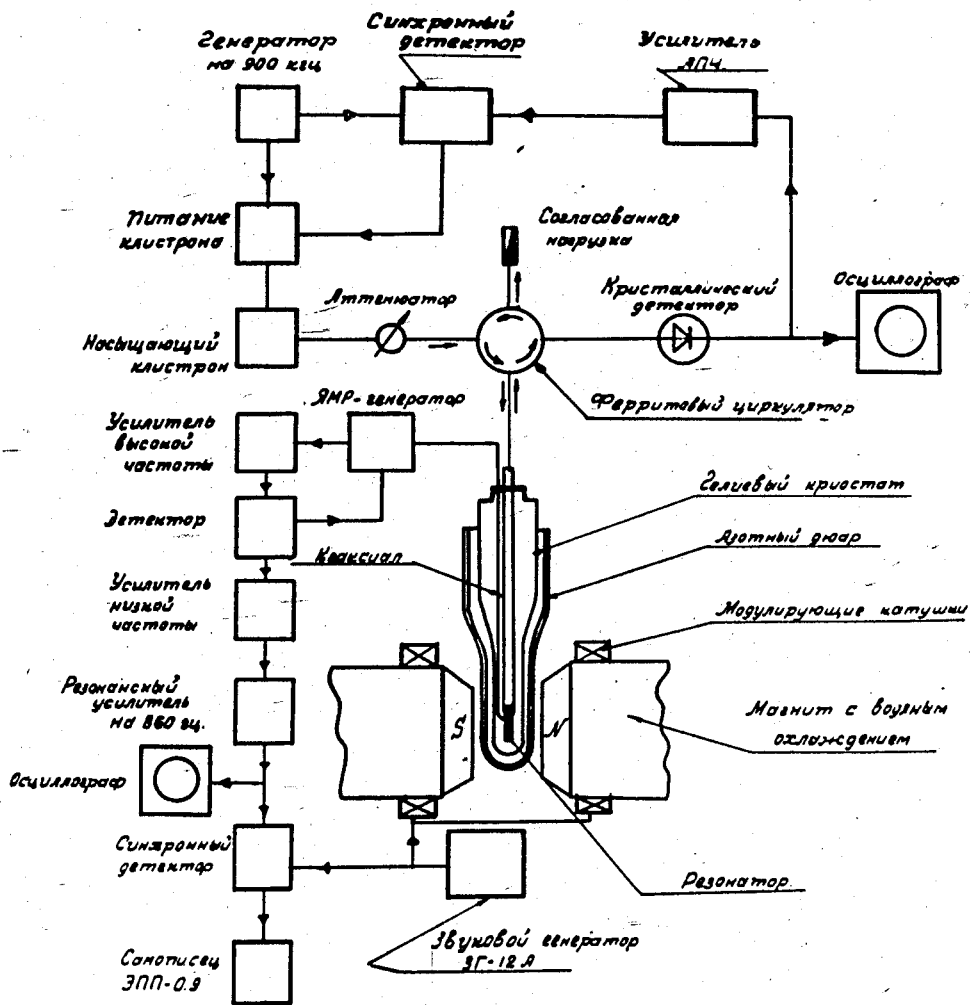
В работе исследовалась динамическая поляризация протонов полиэтилена, облученного быстрыми нейтронами.

/1/ получено увеличение протонной поляризации в 20 раз при наложении высокочастотного магнитного поля, насыщающего электронный резонанс "запрещенных переходов" F-центров, при температуре 1.8°K и поле 3500 э, что соответствует поляризации протонов 0,45%.

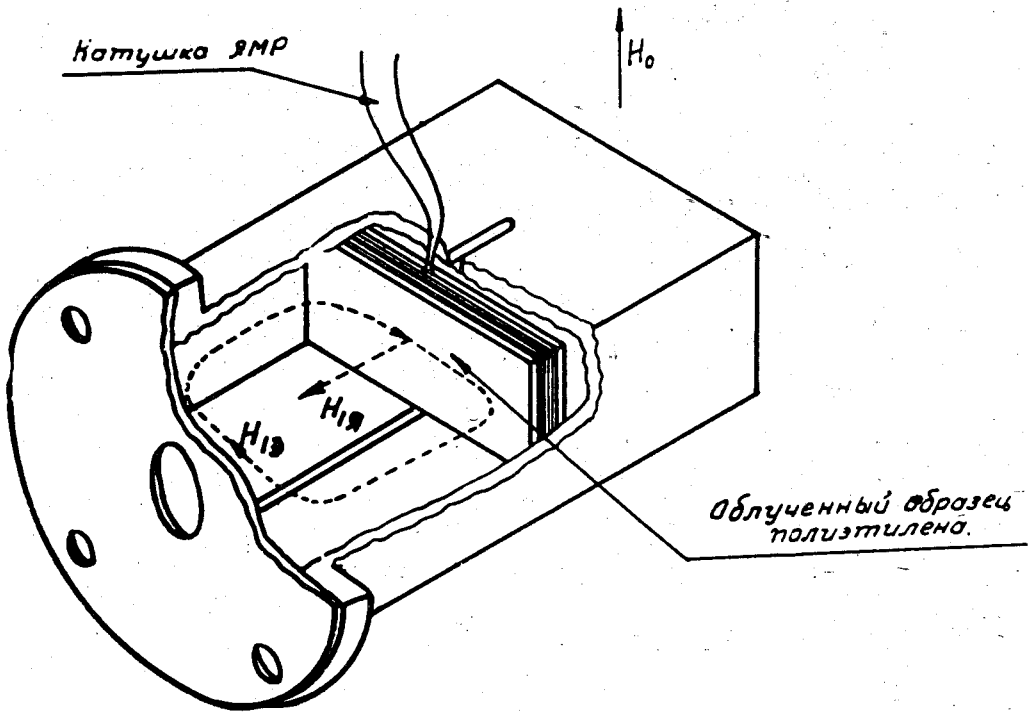
/2/ измерены времена ядерной и электронной релаксации при гелиевых температурах.

/3/ Мощность, необходимая для насыщения ЭПР, составляет 1 мвт при температуре 4.2°K и добротности резонатора $Q = 2000$.

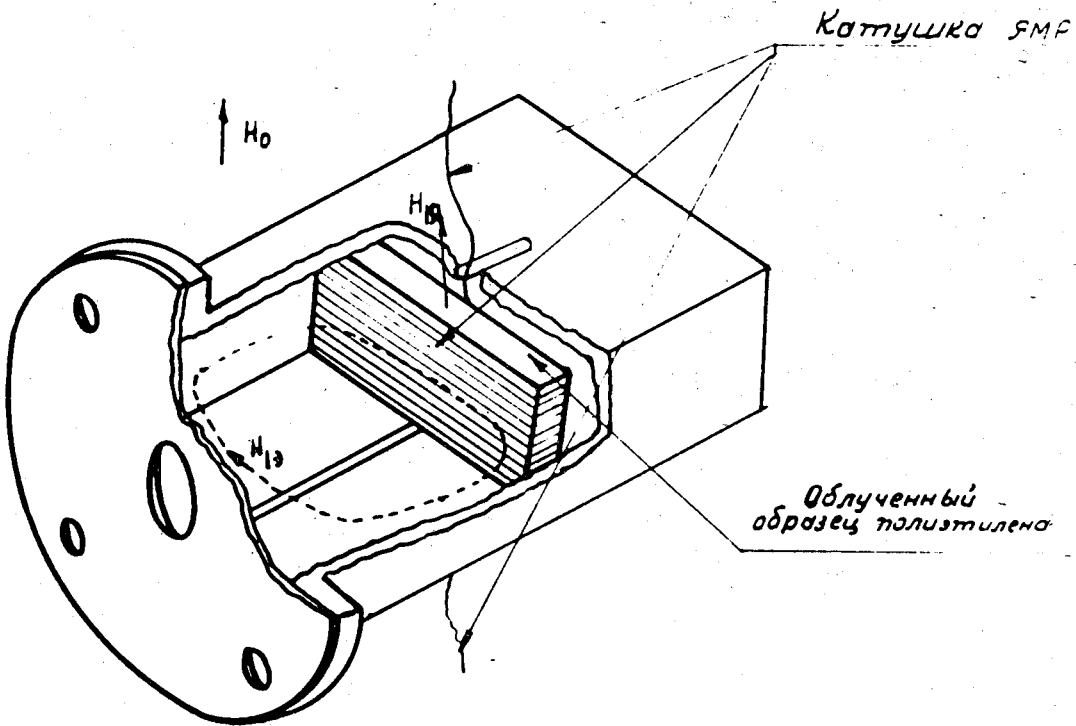
В заключение авторы пользуются случаем выразить благодарность Шапиро Ф.Л. за постоянное внимание и интерес к работе, Миляеву В.А. за участие в измерениях времени электронной релаксации, Крупчицкому П.А. за содействие в облучении образцов полиэтилена и Кокореву Б.И. за помощь в работе.



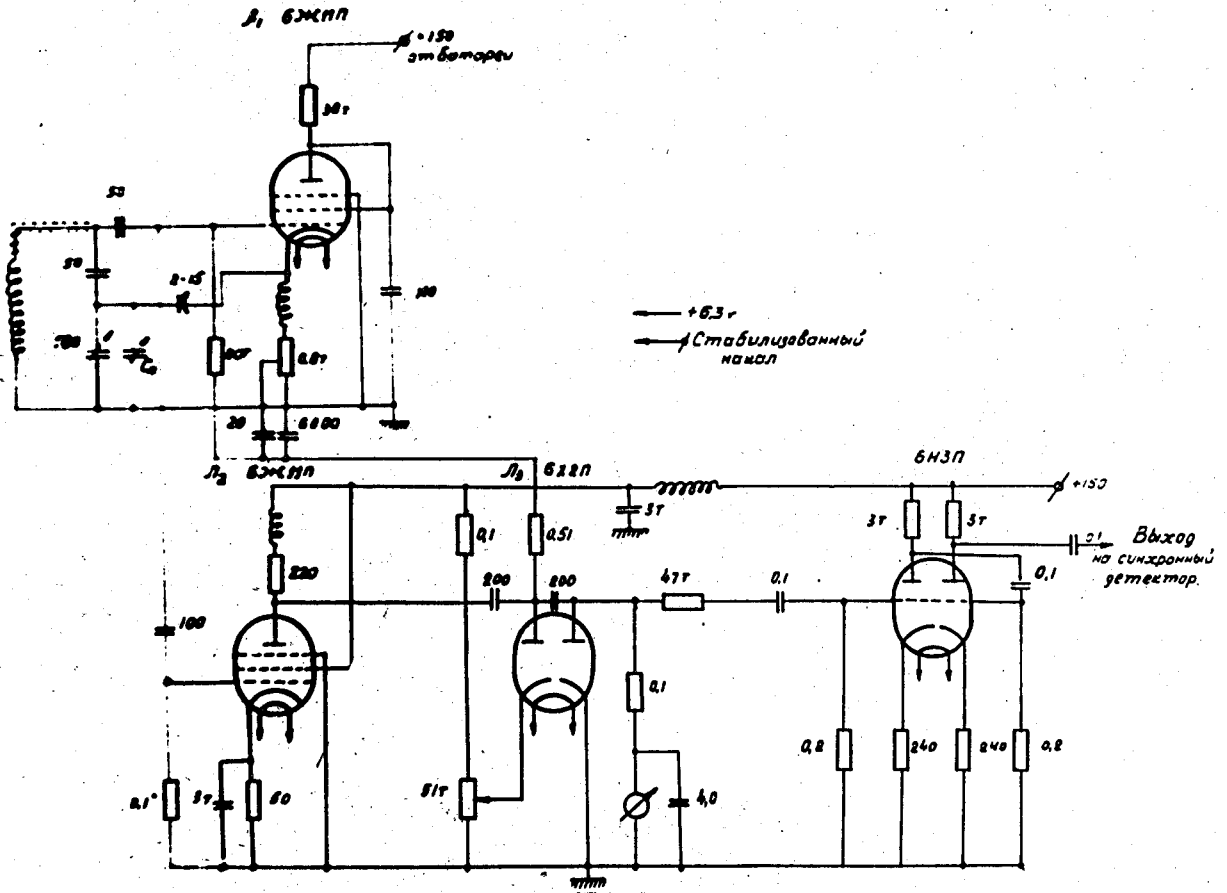
Р и с. 1. Блок-схема установки для наблюдения двойного электронно-ядерного резонанса.



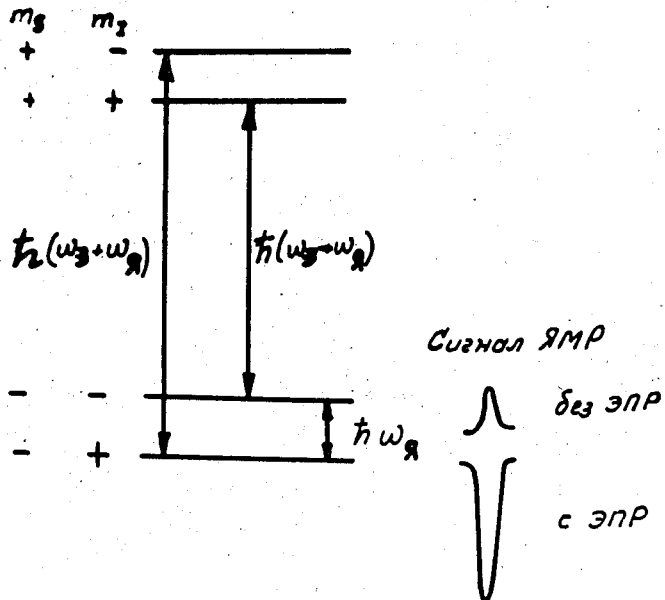
Р и с. 2. Расположение образца с контуром в резонаторе. Внутренняя катушка, Модификация /1/.



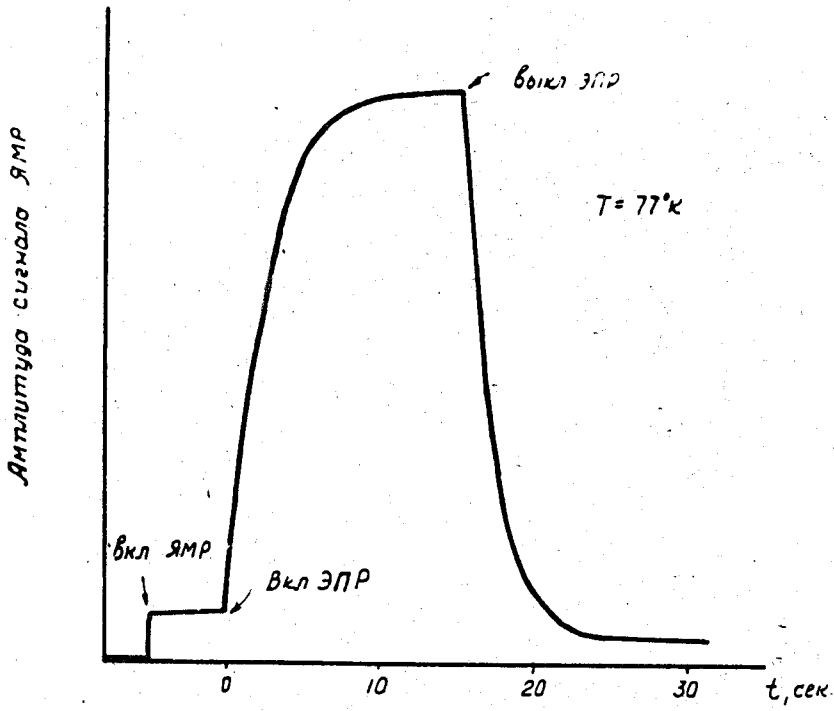
Р и с. 3. То же, что и на рис. 2. Модификация /2/.



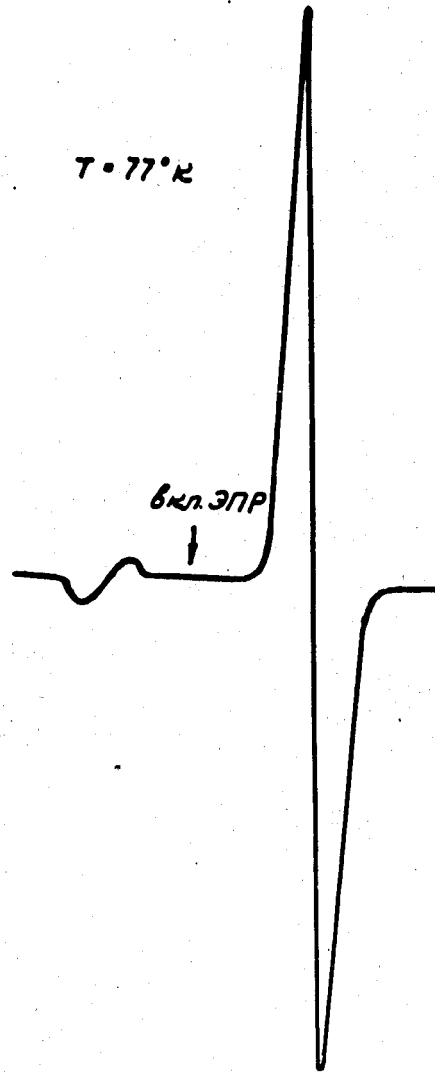
Р и с. 4. Модифицированная автодинная схема со стабилизацией уровня генерации.



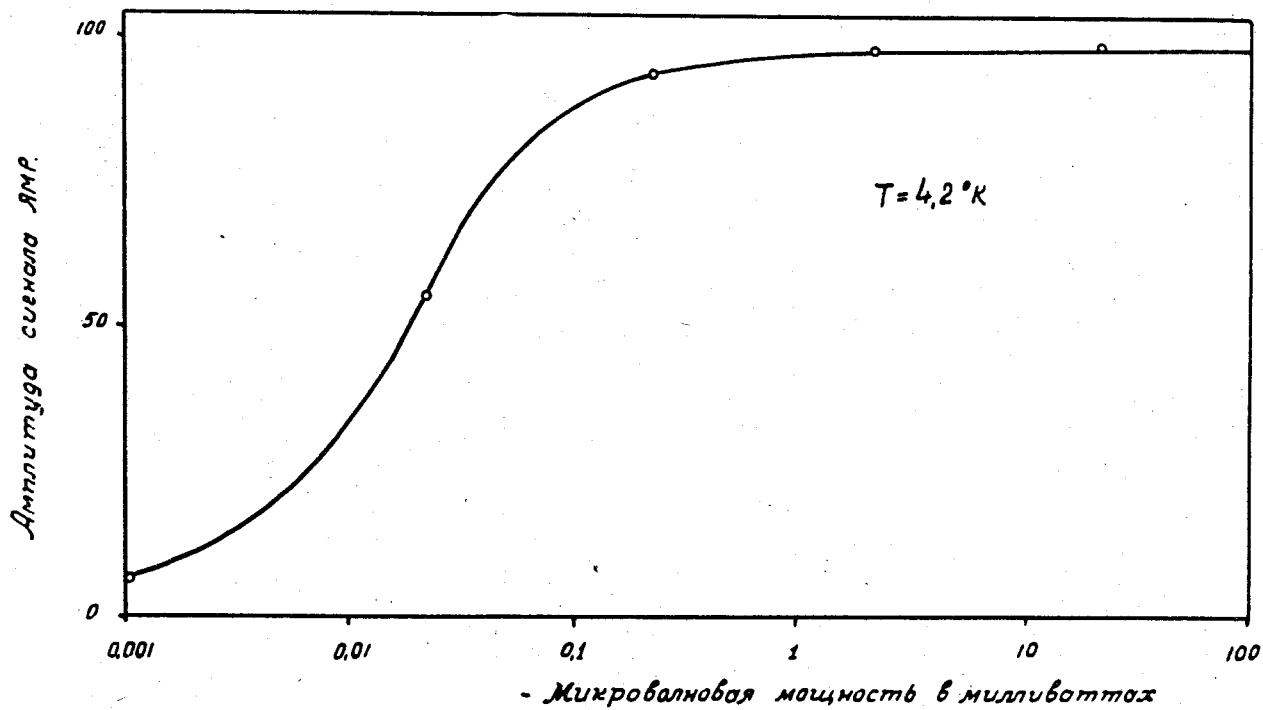
Р и с. 5. Схема уровней системы электрон-протон в сильном магнитном поле.



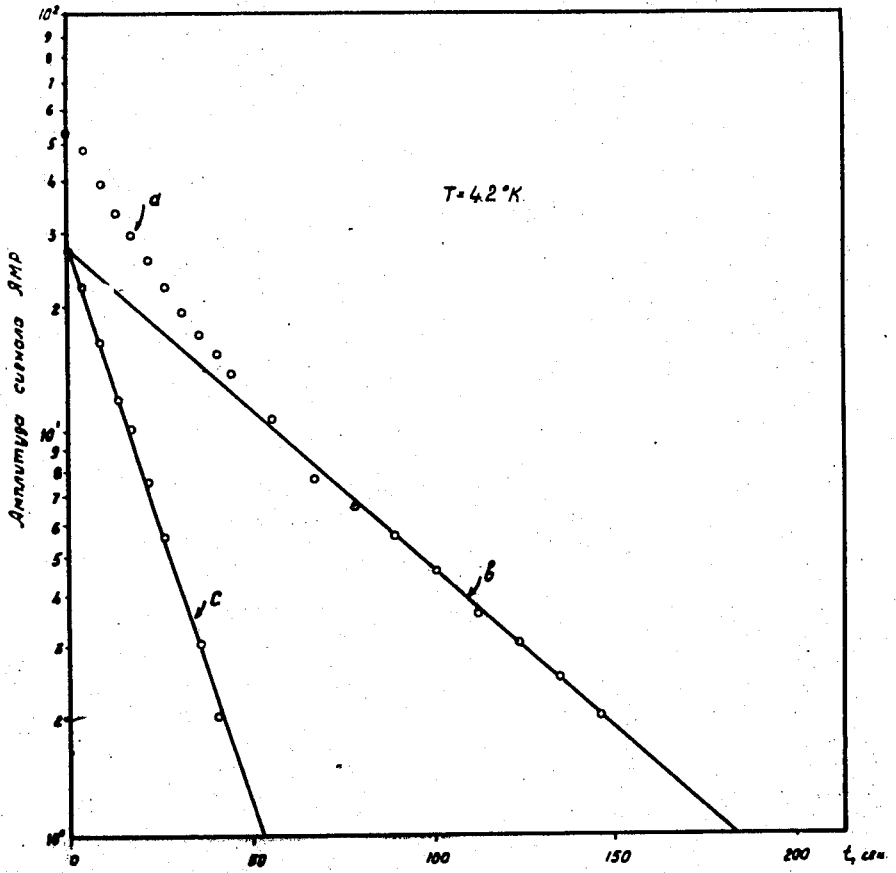
Р и с. 6. Релаксация сигнала ЯМР при 77°K .



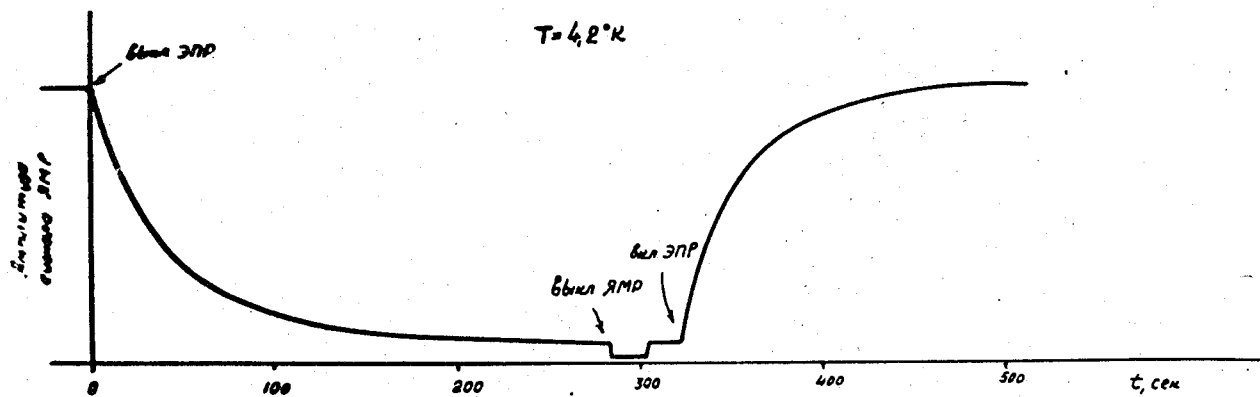
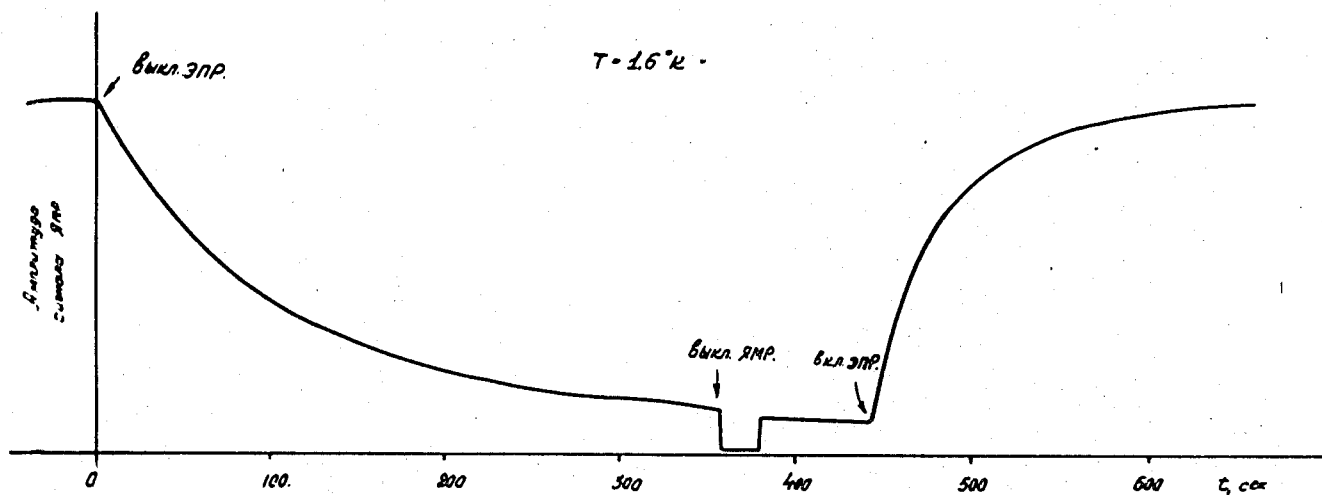
Р и с. 7. Усиление сигнала ЯМР при 77°K .

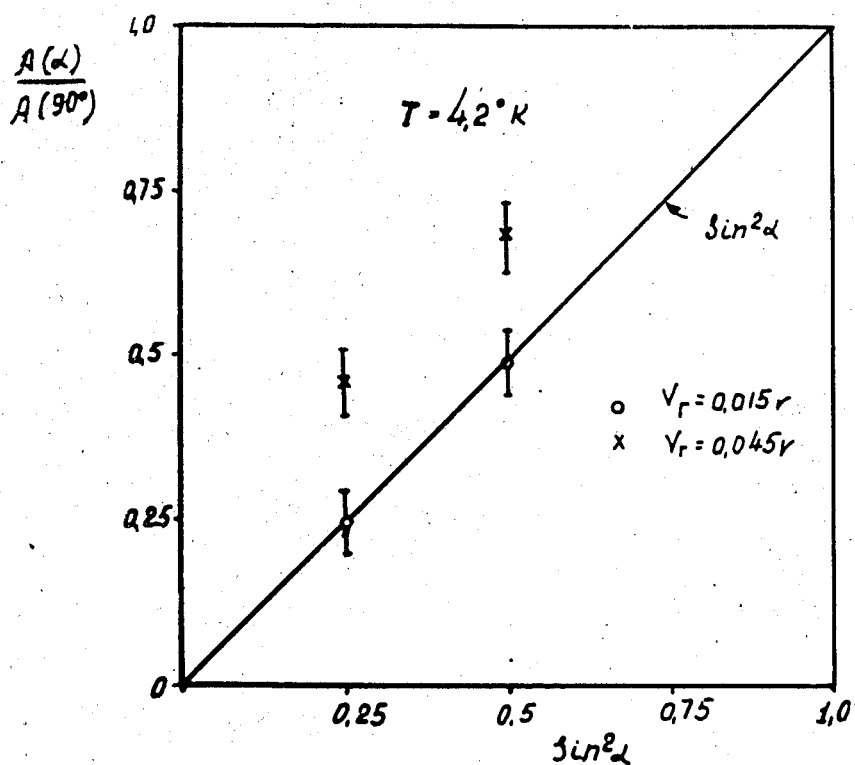


Р и с. 8. Зависимость усиления от мощности насыщения ЭПР при $4.2^{\circ}K$.

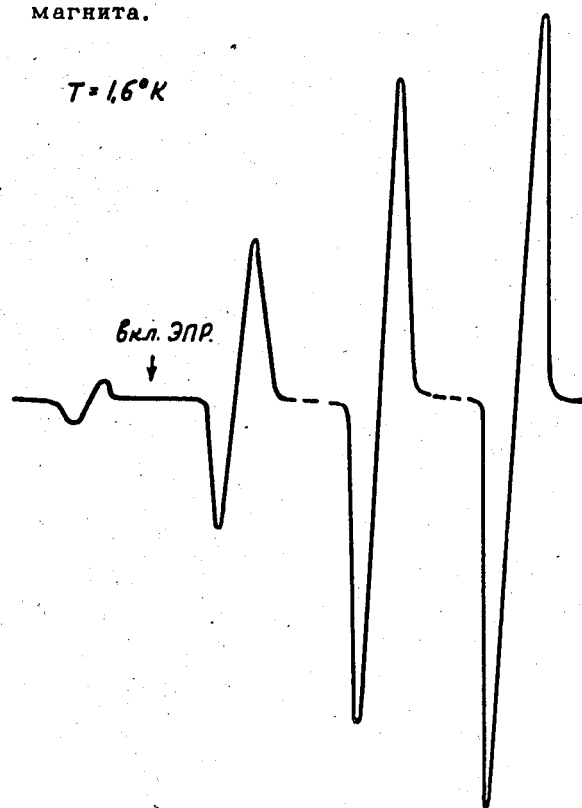


Р и с. 9. Разрушение поляризации протонов после выключения мощности, насыщающей ЭПР при 4.2°K .

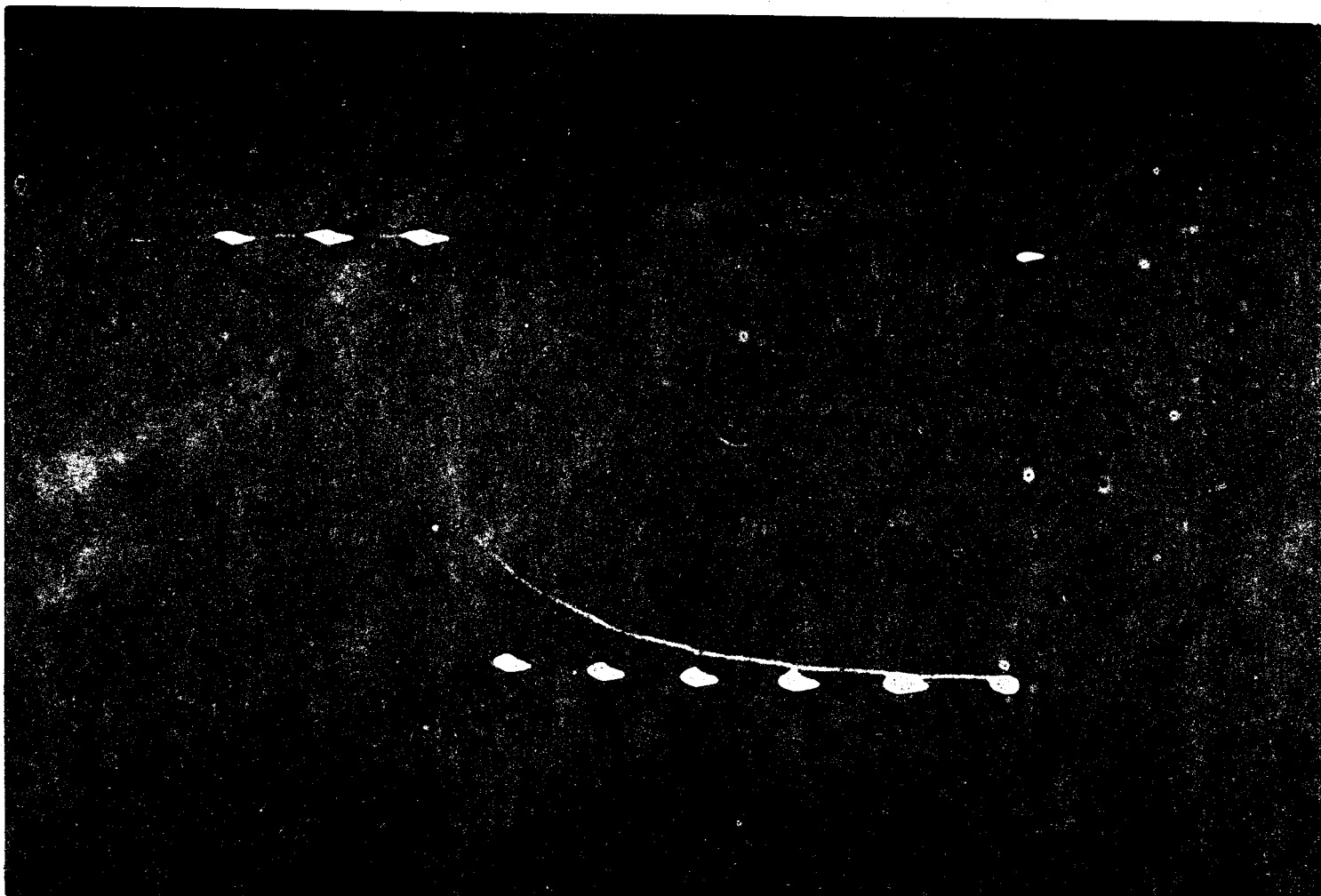
Р и с. 10. Релаксационные кривые при 4.2°K .Р и с. 11. Релаксационные кривые при 1.6°K .



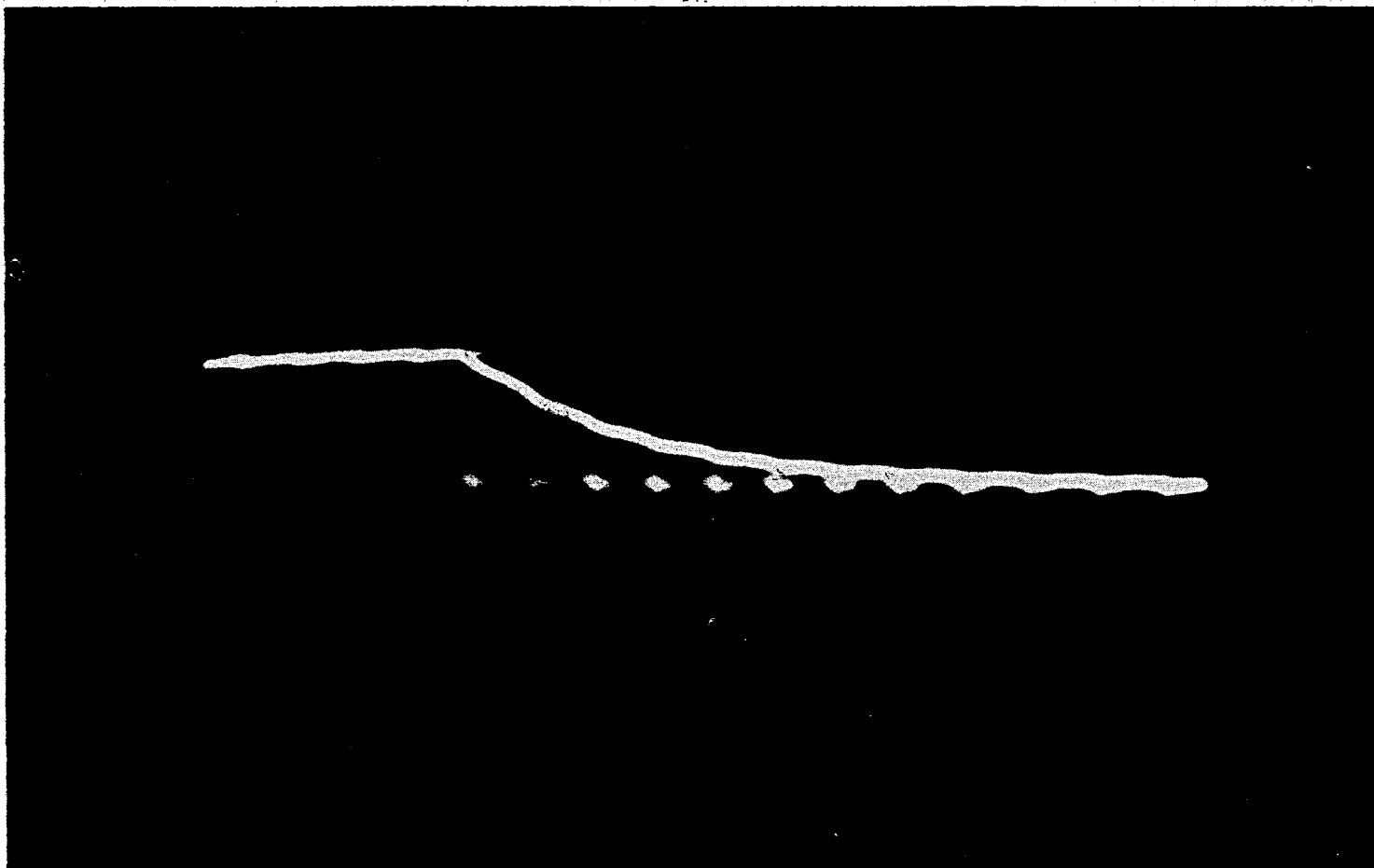
Р и с. 12. Зависимость амплитуды сигнала ЯМР от угла поворота магнита.



Р и с. 13. Усиление сигнала ЯМР при $1.6^\circ K$.



Р и с. 14. Электронная релаксация при 1.6°K . Метки времени через 200 м сек.



Р и с. 15. Электронная релаксация при 4.2°K .
Метки времени через 200 мк сек .

Л и т е р а т у р а

1. E.Erb, I.L.Motchane, J.Uebersfeld, Compt. rend. 246, 2121 and 3050 (1958).
2. A.Abragam, W.G.Proctor, Compt. rend. 246, 2253 (1958).
3. C.Hwang, T.M.Sanolevs, Proceedings of the 7th International Conference on Low Temperature Physics, University of Toronto, 1960, p. 98.
4. O.S.Leifson, C.D.Jeffries, Bull. Am. Phys. Soc. v.6, N3 (1960).
5. M.Abraham, M.A.H.Mc. Causland, F.N.H.Robinson, Phys.Rev.Lett. 2, 444 (1959).
6. M.Borghini, A.Abragam, препринт.
7. А.А. Маненков. Сборник докладов на совещании по парамагнитному резонансу. Издательство Казанского университета, 1960.
8. А.А. Маненков, В.А. Миляев. ЖЭТФ, 41, 100 /1961/.
9. Эндру Э., Ядерный магнитный резонанс, ИЛ, Москва, 1957.

Рукопись поступила в издательский
отдел 23 июня 1961 г.