

Е. М. ГАНАПОЛЬСКИЙ, Д. Н. МАКОВЕЦКИЙ

КВАНТОВЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ГИПЕРЗВУКА НА ЧАСТОТЕ 9,4 ГГц

(Представлено академиком А. М. Прохоровым 5 IX 1973)

Значительное поглощение гиперзвуковых волн в твердом теле ставит существенные препятствия при использовании их как для физических исследований, так и в приборах СВЧ. Поэтому представляет интерес возможность усиления гиперзвука, основанная на акустическом парамагнитном резонансе (а.п.р.) в инвертированной системе спиновых уровней примесных парамагнитных центров, которая была теоретически предсказана в работах (1, 2) и экспериментально обнаружена в (3). Несмотря на

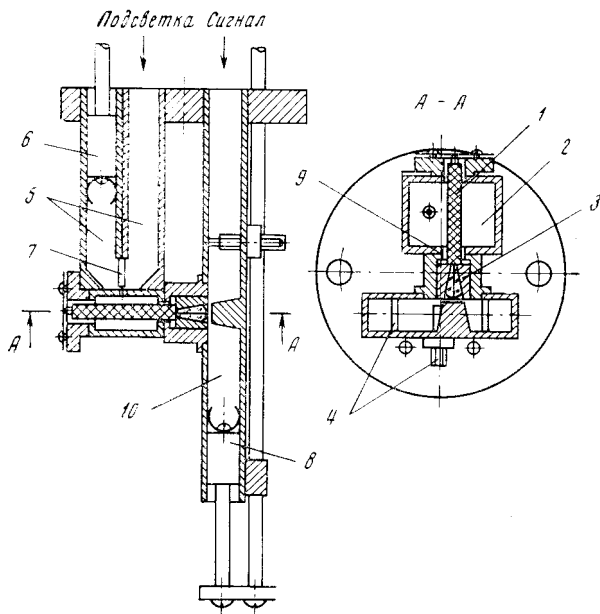


Рис. 1. Гиперзвуковая усилительная головка. 1 — кристалл, 2 — резонатор подсветки, 3 — концентратор, 4 — согласователь, 5 — волновод подсветки, 6 — поршень, 7 — штырь связи подсветки, 8 — поршень, 9 — пьезоэлектрическая пленка, 10 — волновод сигнала

то, что этот способ позволяет осуществить усиление с крайне малым уровнем собственных шумов, он до сих пор малоизучен, что связано, в частности, с трудностями в технике гиперзвукового эксперимента.

Предметом настоящего сообщения является квантовый парамагнитный усилитель (к.п.у.) гиперзвуковых волн с частотой 9,4 ГГц, созданный на основе разработанных ранее методов возбуждения гиперзвука и регистрации резонансного поглощения (4). В качестве рабочего вещества в к.п.у. служит рубин в условиях симметричной схемы спиновых уровней Cr^{3+} , когда магнитное поле направлено под углом $\theta = \theta_s = 54^\circ 44'$ к тригональной оси кристалла (ось z). В этом случае, как известно, имеет

место максимум эффективности по накачке переходов 1–3 и 2–4 (нумерация уровней в порядке возрастания энергии). Усиление возникает за счет индуцированных переходов между уровнями 2 и 3 при взаимодействии продольного гиперзвука в направлении оси z со спиновой системой. Это взаимодействие определяется матричным элементом оператора спиновой связи $\frac{1}{2}G_{33}[3S_z^2 - S(S+1)]$ (G_{33} — компонента тензора спиновой связи в обозначениях Фогта, S_z — оператор проекции спина).

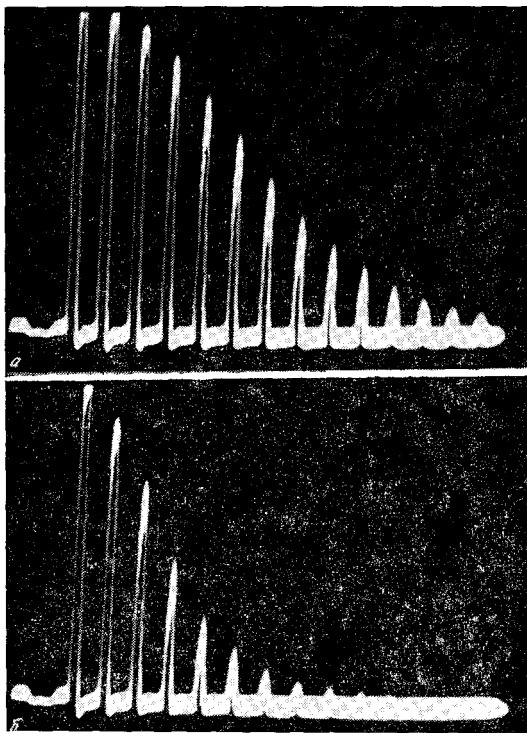


Рис. 2. Эффект усиления гиперзвука. а — гиперзвуковые эхо-сигналы в режиме усиления; б — эхо-сигналы в отсутствие усиления

волноводе. Добротность резонатора подсветки $\approx 10^3$. Через резонатор вдоль оси, где расположена пучность поля СВЧ, проходит рубиновый стержень круглого сечения диаметром 2,6 мм. Торцы стержня выполнены оптически плоскими и параллельными (неровности $\leq 0,1$ мкм, отклонения от параллельности $\approx 2''$), а нормаль к ним с точностью 2–3° совпадает с кристаллографической осью симметрии третьего порядка [0001] (ось z).

Для возбуждения в стержне продольного гиперзвука на один из его торцов нанесена пьезоэлектрическая **текстурированная пленка** ZnO с подслоем Al, у которой ось текстуры направлена вдоль нормали к плоскости пленки (6). Электрическое поле СВЧ в пленке, необходимое для возбуждения гиперзвука, создается с помощью коаксиального концентратора (4). Волноводные элементы — поршень, емкостный штырь и проволочная диафрагма — служат для согласования гиперзвукового преобразователя с волноводом. Благодаря концентрации электрического поля в пленке преобразователь обладает высокой эффективностью в широкой полосе частот (потери на двойное преобразование ≈ 40 дБ, полоса ≈ 100 МГц). Гиперзвуковая волна распространяется в рубиновом стержне в виде тонкого луча-иголки, претерпевая многократные отражения от торцов. Ввиду того, что преобразователь служит как возбудителем, так и приемником

По данным а.п.р. (5) матричный элемент, а, следовательно, и вероятность индуцированного звуком перехода в зависимости от θ имеет тугой максимум при $\theta = \theta_s$, равный ≈ 6 см⁻¹. Это обстоятельство, а также то, что в симметричной схеме уровней при пуш-пульной накачке можно получить относительно большое значение коэффициента инверсии, определило ее выбор для к.п.у. гиперзвука.

Основным элементом усилителя является гиперзвуковая головка, устройство которой показано на рис. 1. Головка содержит прямоугольный резонатор типа H_{012} с размерами $5,5 \times 11, 5 \times 14$ мм² для одновременной накачки переходов 1–3 и 2–4 электромагнитным полем на частоте 23,4 ГГц. Связь резонатора с волноводом осуществляется с помощью тонкого штыря, проходящего через волновод в резонатор на глубину 0,5 мм и регулируется до согласования поршнем в

гиперзвука, для разделения входного и выходного сигналов работа усилителя осуществляется в импульсном режиме (длительность импульса 1 мксек., частота повторения 10 кгц).

При непрерывном насыщении электромагнитным полем переходов 1—3 и 2—4 спиновые уровни 2 и 3 инвертированы. Поэтому при каждом прохождении через кристалл гиперзвуковой импульс усиливается в результате взаимодействия со спиновой системой. Это усиление регистрируется в виде увеличения амплитуды эхо-сигнала, которое пропорционально его номеру (рис. 2). Вследствие большого различия в волновых

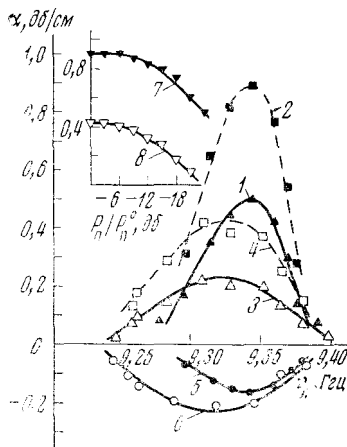


Рис. 3. Зависимость усиления от частоты сигнала и мощности подсветки ($H_0=4,1$ кэ, $\theta=54^\circ 44'$, $P_n^0=3$ мвт). 1, 3 — α_n ; 2, 4, 7, 8 — α_d ; 5, 6 — α_n . α_n — наблюдавшийся коэффициент усиления, α_d — действительный коэффициент усиления, α_n — а.п.р.; $|\alpha_d|l_p = (|\alpha_n| + |\alpha_n|)l_0 - |\alpha_n|l_p$, где l_0 — общая длина кристалла, l_p — рабочая длина, $l_0^{(1)}=1,8$ см, $l_p^{(1)}=1,1$ см, $l_0^{(2)}=1,3$ см, $l_p^{(2)}=0,9$ см. Темные точки относятся к кристаллу 1, светлые — к кристаллу 2

сопротивлениях рубина и жидкого гелия, в который погружена усиленная головка, потери гиперзвука при отражении от торцов малы. Линейное усиление возможно, лишь когда коэффициент усиления не превосходит величину нерезонансного поглощения α_0 в объеме кристалла и проявляется как уменьшение этого поглощения. Нерезонансное поглощение в рубине при гелиевых температурах обусловлено главным образом рассеянием на дефектах структуры кристалла, а также дифракционной расходимостью гиперзвукового луча. В использованных образцах это поглощение составляло ≈ 2 дб/см.

Были измерены параметры и характеристики усилителя на рубиновых стержнях 1 и 2 с концентрацией Cr^{3+} 0,028% и 0,05% соответственно. В рубине с меньшей концентрацией (кристалл 1) получено большое усиление, которое составило 0,9 дб/см при температуре 1,7° К и полном насыщении переходов подсветки. В кристалле 2 при этой температуре усиление равно 0,4 дб/см. Величина усиления зависит от θ и имеет острый максимум в точке $\theta=\theta_0$, где линии э.п.р., отвечающие переходам 1—3 и 2—4, совмещены. Поэтому при измерении коэффициента усиления совмещение контролировалось на видеоспектрометре э.п.р. Уровень мощности подсветки P_n устанавливался таким, чтобы дальнейшее повышение его не приводило к увеличению усиления (рис. 3). Во избежание насыщения сигнального перехода импульсная интенсивность гиперзвука в кристалле устанавливалась не выше 0,1 мвт/см² при частоте повторения зондирующих импульсов 10 кгц. Насыщающая интенсивность гиперзвука (при которой усиление уменьшается вдвое) на этой частоте повторения составляла 1—2 мвт/см². Было обнаружено, что коэффициент усиления для кристалла 1 при полном насыщении переходов подсветки растет с понижением температуры существенно быстрее, чем это следует из расчетов населенности спиновых уровней в рубине на основе кинетических уравнений. Определяемое в наших измерениях отношение коэффициента усиления к величине резонансного поглощения гиперзвука в отсутствие подсветки — эффективный коэффициент инверсии $I_{эф}$ — в интервале темпера-

тур $4,2^{\circ}-1,7^{\circ}$ К для кристалла 1 изменяется от 3,2 до 5,4. В кристалле 2 при $T=1,7^{\circ}$ К значение $I_{эф}$ оказалось меньшим ($I_{эф}=2$), что связано, по-видимому, с влиянием кросс-релаксации.

Были измерены частотные зависимости коэффициента усиления и резонансного поглощения в обоих рубиновых кристаллах (при $T=1,7^{\circ}$ К). В этих измерениях величина угла θ и магнитное поле H_0 были фиксированными, отвечающими максимуму на частотной зависимости. Результаты измерений на втором эхо-сигнале приведены на рис. 3 (измерения на других эхо-сигналах, вплоть до шестого, дали аналогичные результаты). Из рис. 3 видно, что полоса усиления для кристалла 1 составляет 65 Мгц и приблизительно равна частотной ширине линии а.п.р. Такое же совпадение имеет место и для второго кристалла, где полоса равна 105 Мгц. Отсюда следует, что полоса усиления при малом усилении определяется частотной шириной линии а.п.р. сигнального перехода. Как показали наши измерения, частотная ширина линии э.п.р. в этих кристаллах на переходе 2-3 при $\theta=\theta_s$ также близка к ширине линии а.п.р. Ширина линии, а следовательно, и полоса усилителя обусловлены разбросом направления кристаллической оси третьего порядка z и параметра кристаллического поля D в объеме кристалла.

Авторы благодарны А. Н. Чернецу за интерес к работе и Н. Л. Кенигсбергу за напыление ZnO-преобразователей.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук УССР
Харьков

Поступило
29 VIII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ У. Х. Копвиллем, В. Д. Корепанов, ЖЭТФ, т. 41, 211 (1961). ² С. Kittel, Phys. Rev. Lett., v. 6, 449 (1961). ³ Е. В. Тукер, Phys. Rev. Lett., v. 6, 547 (1961). ⁴ Е. М. Гананольский, Приборы и техн. эксп., № 6, 214 (1969); ФТТ 12, 2606 (1970). ⁵ Е. М. Гананольский, Д. Н. Маковецкий, ФТТ, т. 15, № 8 (1973). ⁶ М. И. Бабенко, Е. М. Гананольский и др., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 35, 916 (1971).