

УСИЛЕНИЕ ГИПЕРЗВУКА В РУБИНЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНОГО ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Е.М.Ганапольский

Сообщается о первом наблюдении эффекта усиления гиперзвука при стимулированном излучении фононов в рубине с инверсной населенностей спиновых уровней, созданной интенсивной гиперзвуковой волной.

Гиперзвуковая волна, распространяясь в кристалле с парамагнитными центрами и модулируя внутрикристаллическое электрическое поле, в условиях акустического парамагнитного резонанса (АПР) воздействует на систему принадлежащих этим центрам электронных энергетических уровней. Отсюда возникает возможность создавать в такой системе с помощью интенсивной гиперзвуковой волны существенно неравновесные в термодинамическом отношении состояния, в том числе состояние с инвертированной населенностью избранной пары уровней, когда возникает конвективная неустойчивость, проявляющаяся в усилении слабого гиперзвукового сигнала и обусловленная стимулированным излучением фононов парамагнитными центрами.

Поскольку взаимодействие гиперзвука с системой парамагнитных центров в отличие от электромагнитного поля имеет квадрупольный характер, при котором разрешены переходы между уровнями не только с изменением магнитного квантового числа $\Delta M = \pm 1$, но и с

$\Delta M = \pm 1, \pm 2$, то возможности использования индуцированного излучения с гиперзвуковой накачкой значительно богаче по сравнению с электромагнитной, получившей широкое распространение при усилении электромагнитных, а также гиперзвуковых СВЧ сигналов.

Несмотря на то, что идея создания инвертированного состояния парамагнитных центров помощью интенсивного гиперзвукового поля была предложена давно², экспериментального подтверждения она не получала, и в связи с этим вопрос о возможности усиления электромагнитных (гиперзвуковых) сигналов парамагнитными центрами, активированными гиперзвуковым полем, оставался открытым.

В настоящей работе впервые осуществлен эксперимент по усилению слабого гиперзвукового сигнала в парамагнитной системе с инверсией населенности электронных спиновых уровней, созданной в результате воздействия на нее интенсивным гиперзвуковым полем. В качестве материала для создания активной среды был выбран кристалл розового рубина с концентрацией хрома 0,03% в условиях симметричного расположения спиновых уровней при ориентации магнитного поля под углом $\varphi = \arccos(1/\sqrt{3})$ к оптической оси кристалла. Гиперзвуковое поле создавалось в рубине при распространении в нем вдоль этой оси непрерывной продольной гиперзвуковой волны с частотой 23 ГГц. В магнитном поле 3,9 кЭ оно приводило к одновременному резонансному насыщению переходов между эквидистантными спиновыми уровнями $E_1 - E_3$ и $E_2 - E_4$ (нумерация уровней в порядке возрастания энергии) и создавало состояние инверсии населенностей на переходе $E_2 - E_3$, необходимое для усиления слабого импульсного сигнала продольной гиперзвуковой волны с частотой 9 ГГц, отвечающей этому переходу.

Образец кристалла рубина, в котором наблюдалось усиление гиперзвука, имел форму стержня круглого сечения диаметром 2,6 мм и длиной 17,6 мм с оптически плоскими и параллельными торцами. Геометрическая ось стержня была направлена вдоль кристаллографической оси симметрии 3-го порядка. Выбранное направление распространения гиперзвука и ориентация стержня в магнитном поле обеспечивали эффективное взаимодействие продольной гиперзвуковой волны с парамагнитными центрами на частоте ν_p переходов $E_1 - E_3$ и $E_2 - E_4$, а также на частоте ν_s перехода $E_2 - E_3$ с инверсией населенностей. На одном из торцов стержня вакуумным напылением был создан широкополосный гиперзвуковой преобразователь, служивший одновременно для возбуждения в стержне вдоль этой оси интенсивной продольной гиперзвуковой волны и слабого импульсного гиперзвукового сигнала на этих частотах. Он представлял собой нанесенную на торец стержня пьезоэлектрическую пленку из окиси цинка толщиной 0,4 мкм с подслоем алюминия, в которой концентрировалось электрическое поле СВЧ. Концентрация поля на частотах ν_p и ν_s осуществлялась в одной и той же области пленки с помощью тонкой металлической иглы, имеющей оптически плоский торец, плотно прижатый к поверхности пленки. С этой целью игла запитывалась электромагнитным полем с помощью двухчастотной волноводно-резонаторной системы, схематически показанной на рис. 1. Выбором диаметра торца иглы $D \approx 5 \cdot 10^2 \lambda$, где λ — длина гиперзвуковой волны на частоте ν_s , обеспечивалась возможность получения в кристалле гиперзвуковой волны с относительно высокой интенсивностью при слабой дифракционной расходимости ее на указанных частотах. Благодаря этому как интенсивная, так и слабая сигнальная гиперзвуковые волны возбуждались и распространялись в одной и той же области кристалла, имеющей форму прямой нити с диаметром поперечного сечения, равным диаметру торца иглы. В этой области имели место процессы насыщения гиперзвуковым полем переходов между уровнями парамагнитных центров и усиление слабого гиперзвукового импульса в результате стимулированного излучения. Алюминиевый подслой в гиперзвуковом преобразователе служил не только для концентрации электрического поля, но и предохранял образец кристалла от непосредственного воздействия электромагнитным полем СВЧ.

Эксперименты были выполнены при температуре 1,7 К, при которой гиперзвуковое поле даже с относительно небольшой интенсивностью существенно изменяет состояние спиновой

системы в рубине и может быть получено усиление гиперзвука, сравнимое с нерезонансным поглощением его в кристалле. Результаты экспериментов показаны на рис. 2. В отсутствие интенсивной гиперзвуковой волны наблюдается обычный АПР на ионах Cr^{3+} (рис. 2б). При ее распространении в кристалле линия АПР инвертируется (рис. 2а) и возникает усиление гиперзвукового сигнала, которое монотонно увеличивается с ростом интенсивности этой волны и выходя на плато, достигает 0,8 дБ/см при интенсивности $S_p = 5 \text{ мВт/см}^2$, чему соответствует эффективный коэффициент инверсии $I_s = 4,2$. Нерезонансное поглощение продольного гиперзвука на частоте 9 ГГц в образце рубина составляло 1,2 дБ/см.

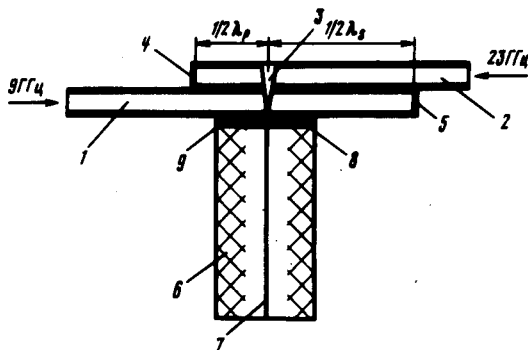


Рис. 1. Двухчастотная волноводно-резонаторная система для усиления гиперзвука в рубине в поле интенсивной гиперзвуковой волны. 1, 2 – волноводы сигнала и накачки, 3 – игла, 4, 5 – короткозамыкатели, 6 – рубин, 7 – область, где распространяются гиперзвуковые волны сигнала и накачки, 8 – пленка оксида цинка, 9 – пленка алюминия, λ_s, λ_p – длины электромагнитных волн в волноводе для сигнала и накачки

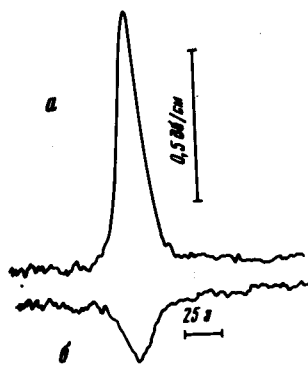


Рис. 2. Резонансное усиление гиперзвукового сигнала в поле интенсивной гиперзвуковой волны накачки – а, линия АПР – б

Существенное превышение величины коэффициента инверсии по сравнению с максимальным значением $I_m = 3,3$, полученным в мазерных, а также в фазерных экспериментах ¹, можно объяснить тем, что в этих экспериментах наблюдалось усиление электромагнитного, а также гиперзвукового сигналов при электромагнитной накачке, когда инвертированию подвергаются все парамагнитные центры, содержащиеся в образце, и распространение усиливаемого сигнала происходит в однородно инвертированном активном кристалле и сопровождается дифракционной расходимостью гиперзвуковой волны. В данном случае инвертируются лишь парамагнитные центры, находящиеся в области, занятой интенсивной гиперзвуковой волной. Поэтому гиперзвуковой сигнал распространяется в своеобразном волноводном канале, образованном интенсивной гиперзвуковой волной в результате насыщения резонансной дисперсии фазовой скорости гиперзвука ³. В этом случае существенно уменьшаются дифракционные потери, на величину которых, как показывают оценки, и увеличивается эффективный коэффициент усиления гиперзвука.

Достигнутая величина коэффициента усиления гиперзвука близка к пороговому значению, определяемому потерями в кристалле. Поэтому, используя кристаллы с малыми потерями, можно пслучить автогенерацию когерентных фононов в интенсивном гиперзвуковом поле.

Литература

1. Ганапольский Е.М., Маковецкий Д.Н. ЖЭТФ, 1977, 72, 203.
2. Ганапольский Е.М. № 10-я Всесоюзная конференция по акустоэлектронике и квантовой акустике. Тезисы докладов. Ташкент, 1978, с. 4.
3. Ганапольский Е.М. ЖЭТФ, 1973, 65, 2421.