

ГЕНЕРАЦИЯ КОГЕРЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ СВЧ В РУБИНЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОЛЯ ИСКУССТВЕННЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ФОНОНОВ

.Е.М.Ганапольский

Сообщается о первом наблюдении эффекта генерации когерентных электромагнитных колебаний СВЧ в рубине под воздействием поля искусственных резонансных фононов, созданного в нем на основе акустической стохастической неустойчивости.

Как известно, парамагнитные центры в диэлектрическом кристалле при низких температурах обмениваются энергией с решеткой за счет прямых (однофононных) процессов и вследствие этого равновесная населенность нижних уровней устанавливается в результате взаимодействия с тепловыми резонансными фононами в узком частотном интервале. С другой стороны, взаимодействие между резонансными фононами и остальными нерезонансными из-за ангармонизма кристаллической решетки весьма мало — об этом свидетельствует слабое затухание гиперзвука в кристаллах при низких температурах ¹. Поэтому резонансные фононы выделяют в отдельную, обладающую своей эффективной температурой T_{ph} подсистему, которая находится в тепловом контакте с парамагнитной системой, образованной нижними энергетическими уровнями ².

Отсюда естественно возникает идея, заключающаяся в следующем. Если возбудить в кристалле искусственные резонансные фононы, т. е. некогерентные в пространстве и во времени упругие колебания с подходящим спектром и равномерным, как у тепловых фононов, распределением по состояниям, то с их помощью можно будет управлять эффективной температурой парамагнитной системы, осуществить, в частности, инверсию населенностей уровней и тем самым создать условия для усиления и генерации когерентных электромагнитных колебаний.

В работе впервые с помощью искусственных резонансных фононов осуществлена инверсия населенностей спиновых уровней в рубине и получена генерация когерентных электромагнитных колебаний СВЧ с высокой стабильностью частоты. Реализация искусственных резонансных фононов в кристалле основана на создании в нем стохастической неустойчивости для звуковых волн. С этой целью в рубине возбуждалась когерентная гиперзвуковая волна. Для того, чтобы эту волну превратить в искусственные фононы было использовано ее отражение от поверхности образца с отрицательной кривизной, вызывающее стохастическую неустойчивость ³. В результате исчезала пространственная когерентность: упругие колебания из малой области, занимаемой гиперзвуковой волной, распространялись на весь образец, причем амплитуда, фаза и поляризация этих колебаний в заданной точке образца становились случайными. Резонансное взаимодействие колебаний с парамагнитными центрами, охваченными диполь-дипольной связью, вызывало спектральную диффузию магнитных и связанных с ними фононных возбуждений. Это приводило к разрушению временной когерентности колебаний с характерным временем $T_2^+ = \Delta\nu^{-1}$, где $\Delta\nu$ — частотная ширина линии парамагнитного резонанса.

Для получения эффекта генерации был использован кристалл рубина с концентрацией хрома 0,03%. Образец имел форму стержня круглого сечения диаметром 2,6 мм и длиной 17,6 мм, направленной вдоль оптической оси. Методом "точного" преобразования ⁴ вдоль этой оси возбуждался тонкий пучок продольной гиперзвуковой волны на частоте 23 ГГц. С этой целью на одном из торцов стержня был создан гиперзвуковой преобразователь на основе пленки из окиси цинка толщиной 0,4 мкм с подслоем алюминия, который имел толщину 0,15 мкм и предохранял образец рубина от непосредственного воздействия со стороны

электромагнитного поля СВЧ. Гиперзвуковой пучок диаметром 0,5 мм, распространяясь вдоль оси стержня, отражался от второго торца, который имел форму вогнутой сферической поверхности с радиусом кривизны 0,5 мм и в результате неустойчивости рассеивался.

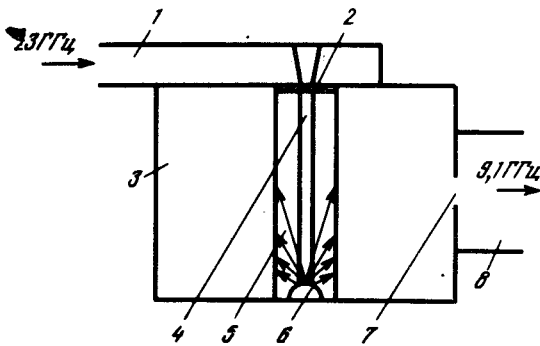


Рис. 1. Схема получения генерации электромагнитных колебаний в поле искусственных резонансных фоонов: 1 - волновод для возбуждения гиперзвука на частоте 23 ГГц, 2 - гиперзвуковой преобразователь, 3 - объемный резонатор, 4 - пучок гиперзвука, 5 - рубиновый стержень, 6 - вогнутая сферическая поверхность, 7 - отверстие связи, 8 - волновод для излучения когерентных электромагнитных колебаний на частоте 9,1 ГГц

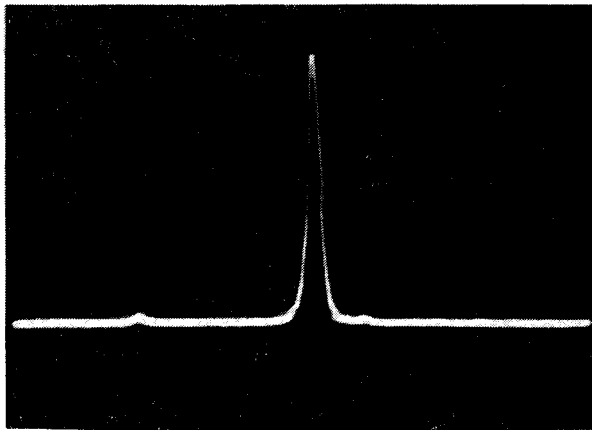


Рис. 2. Спектр генерации электромагнитных колебаний на частоте 9,1 ГГц. Частотный масштаб определяется метками, интервал между которыми 100 кГц

После многочисленных переотражений от боковой шероховатой поверхности, у которой высота неровностей $d \geq \lambda_g$, λ_g - длина волны гиперзвука ($\lambda_g = 2,7 \cdot 10^{-5}$ см), стохастическими гиперзвуковыми колебаниями равномерно заполнялся весь объем образца кристалла.

Рассматривая гиперзвуковой пучок в приближении геометрической акустики¹, которое отвечает условиям эксперимента, на основании³ можно оценить характерное время разрушения когерентности (инкремент стохастической неустойчивости) $\tau_1 = \tau_0 \ln^{-1}(L/R)$, где R - радиус кривизны отражающей поверхности, τ_0 , L - время пробега и расстояние между отражающими поверхностями. В нашем случае имеем: $\tau_0 = 1,5 \cdot 10^{-6}$ с, $\tau_1 = 4 \cdot 10^{-7}$ с, $T_2^+ = 1,6 \cdot 10^{-8}$ с.

Под действием поля искусственных резонансных фоонов на частоте 23 ГГц в рубине возникла инверсия населенностей спиновых уровней с частотой перехода 9,1 ГГц. При этом кристалл находился в условиях симметричного расположения спиновых уровней, когда магнитное поле направлено под углом $\varphi = \arcsin(1/\sqrt{3})$ к оси образца. Напряженность магнитного поля составляла 3,9 кЭ. Для получения эффекта генерации рубиновый стержень был

помещен в цилиндрический объемный резонатор, в котором возбуждались колебания типа H_{011} , (рис. 1). При температуре 1,7 К нагруженная добротность резонатора $Q_H = 2,5 \cdot 10^4$, а магнитная добротность $Q_m = 2,8 \cdot 10^3$. Так как $Q_H \gg Q_m$, порогу генерации отвечало весьма малое превышение населенности верхнего уровня по отношению к нижнему на частоте перехода 9,1 ГГц с коэффициентом инверсии $I_t = 0,1$. Для того, чтобы превзойти этот порог, как показал расчет на основе кинетических уравнений для населенностей в системе четырех спиновых уровней, необходимо повысить эффективную спиновую температуру перехода между уровнями с частотой 23 ГГц и с этой целью ввести в кристалл $3 \cdot 10^{11}$ искусственных резонансных фононов.

При подведении к гиперзвуковому преобразователю электромагнитной мощности около 1 мВт возникала генерация когерентных электромагнитных колебаний на частоте 9,1 ГГц. Поскольку коэффициент преобразования электромагнитного поля в гиперзвук по мощности составлял 10^{-4} , а время жизни резонансных фононов, которое было оценено по данным измерений затухания гиперзвука в диэлектрических кристаллах при низких температурах $\tau_{ph} \approx 10^{-5}$ с, то в рамках дебаевской модели имеет место удовлетворительное согласие с приведенной выше оценкой числа искусственных резонансных фононов, необходимых в кристалле для достижения порога генерации.

С увеличением числа вводимых в кристалл искусственных резонансных фононов мощность генерации монотонно возрастала переходя в область насыщения. Когда превышение этого числа над пороговым составляло $\approx 10^2$, в этой области наблюдалась устойчивая стационарная генерация с выходной мощностью $5 \cdot 10^{-7}$ Вт. Спектр генерации показан на рис. 2. В режиме стационарной генерации была измерена стабильность частоты излучаемых электромагнитных колебаний. За время порядка 1 с относительное изменение частоты не превышало 10^{-9} .

Реализация эффекта генерации непосредственно показала, что при возбуждении в кристалле когерентной гиперзвуковой волны в условиях стохастической неустойчивости возникают искусственные резонансные фононы, подобные тепловым с высокой эффективной температурой. Взаимодействуя с парамагнитными центрами они могут избирательно повышать спиновую температуру, присущую определенной паре энергетических уровней. Поскольку затухание этих фононов в кристалле при низких температурах весьма мало, то вполне реально создать в нем искусственные резонансные фононы с $T_{ph} = 10^4$ К, которые могут служить инструментом для изучения кинетических свойств твердого тела.

Литература

1. Ганопольский Е.М., Королюк А.П., Тараканов В.В. ЖЭТФ, 1982, 82, 182.
2. Абрагам А., Блيني Ю. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. М.: Мир, 1972, 1, 662.
3. Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. М.: Наука, 1984, 272 с.
4. Галушко В.С., Ганопольский Е.М. Письма в ЖЭТФ, 1977, 26, 459.