

## ФАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ФОНОНОВ ПРИМЕСНЫМИ ЦЕНТРАМИ ДВУХВАЛЕНТНОГО НИКЕЛЯ В КОРУНДЕ

*Е.М.Ганапольский, Д.Н.Маковецкий*

Сообщается о первом наблюдении фазерной генерации поперечных фононов в системе  $Ni^{2+} : Al_2O_3$ .

Фазерная генерация когерентных фононов при стимулированном излучении парамагнитными центрами была детально исследована авторами [1] на ионах  $Cr^{3+}$  в корунде ( $Al_2O_3$ ). Установлено, что для возникновения такой генерации необходимо, во-первых, чтобы коэффициент усиления на собственных частотах акустического резонатора превосходил потери на этих частотах, и, во-вторых, чтобы скорость диффузии спиновых возбуждений в кристалле была достаточно малой. В этом случае в узком спектральном интервале возбуждается многомодовая генерация на собственных частотах акустического резонатора, происходящая в условиях пространственной разобщенности возбуждений, питающих генерирующие моды.

Могут ли реализоваться подобные условия для фазерной генерации в другой системе парамагнитных центров — на этот вопрос до последнего времени ответа не было. С точки зрения осуществления фазерной генерации интерес представляет система парамагнитных центров  $Ni^{2+}$  в корунде, обладающая электронным энергетическим спектром, в котором имеются хорошо разрешенные переходы как в звуковом, так и в электромагнитном поле. Более того, ион  $Ni^{2+}$  по величине спин-орбитальной связи значительно превосходит  $Cr^{3+}$  и поэтому можно ожидать более эффективное по сравнению с  $Cr^{3+}$  взаимодействие его со звуковым полем. Однако попытка осуществить фазерную генерацию в системе  $Ni^{2+} : Al_2O_3$ , предпринятая ранее в работе Петерсона и Джекобсена [2], оказалась безуспешной.

В настоящей работе приведены эксперименты с целью реализовать фазерную генерацию в такой системе. Эксперименты выполнялись на кристалле корунда, содержащем  $Ni^{2+}$  с концентрацией  $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Основное состояние иона  $Ni^{2+}$  в этом кристалле — трижды вырожденный по спину орбитальный синглет. Спиновый триплет частично расщеплен кристаллическим полем тригональной симметрии на соновный спиновый дублет  $| \pm 1 \rangle$  и синглет  $| 0 \rangle$ , отстоящий от основного дублета на  $\delta = 1,33 \text{ см}^{-1}$ . Спин-фононное взаимодействие спинового мультиплета было определено методом АПР. Для этого вдоль оси  $x$  симметрии второго порядка были измерены коэффициенты резонансного поглощения гиперзвука при переходах между уровнями дублета  $| \pm 1 \rangle$ , расщепленного магнитным полем  $H$ , направленным вдоль оси  $z$  симметрии третьего порядка. Резонансное поглощение продольного, медленного и быстрого поперечного гиперзвука на частоте 3 ГГц при температуре 1,8К составляет 0,066; 0,16; 0,23 дБ/см соответственно. Ширина линии АПР для всех трех типов волн равна 11 э. По этим данным определены компоненты тензора спин-фононной связи, ответственные за поглощение (а при инверсии за усиление) гиперзвука:  $| G_{11} - G_{12} | = 30 \text{ см}^{-1}$ ,  $| G_{14} | = 5,5 \text{ см}^{-1}$ ,  $| G_{15} | = 9,7 \text{ см}^{-1}$ . Эти значения существенно превосходят величины соответствующих компонент  $G_{ij}$  для рубина [3].

Из измерений АПР выяснилось обстоятельство, важное для реализации фазерной генерации, заключающееся в том, что наиболее эффективно взаимодействует с парамагнитными центрами  $Ni^{2+}$  не продольная гиперзвуковая волна, с которой проводились эксперименты в работе [2], а быстрая поперечная волна, резонансное поглощение которой значительно (в 5 раз) превосходит поглощение продольной волны.

Фазерное усиление и генерация изучались нами в условиях инверсии населенностей уровней спинового дублета  $| \pm 1 \rangle$  с помощью электромагнитной накачки перехода  $| -1 \rangle \rightarrow | 0 \rangle$  на частоте  $\nu_p = 41,3 \text{ ГГц}$ . Частота сигнального перехода  $| -1 \rangle \rightarrow | +1 \rangle$  составляет  $\nu_s = 3,0 \text{ ГГц}$  при  $H = 0,49 \text{ кэ}$ . В системе  $Ni^{2+} : Al_2O_3$  при  $H \parallel z$  сигнальный переход, для которого  $\Delta m = 2$ , полностью разрешен для звука, а переход накачки, для которого  $\Delta m = 1$ , полностью разрешен для электромагнитного поля. Большая величина отношения  $\nu_p/\nu_s$  благоприятствует достижению эффективной инверсии населенностей сигнального дублета  $| \pm 1 \rangle$ .

Схема фазерного эксперимента, в котором изучалось усиление и генерация фононов, близка к описанной ранее в [1]. Основным элементом

фазера является акустический резонатор, вырезанный из монокристалла  $\text{Ni}^{2+} : \text{Al}_2\text{O}_3$  в виде цилиндра с геометрической осью вдоль оси  $x$  и плоскопараллельными торцами, на один из которых нанесен тонкопленочный гиперзвуковой преобразователь для возбуждения гиперзвука в кристалле и для регистрации фазерного излучения. Для концентрации поля накачки в акустическом резонаторе последний помещен вдоль оси перестраиваемого электромагнитного цилиндрического резонатора, настроенного на частоту перехода накачки. Добротность резонатора накачки при гелиевых температурах составляет  $10^4$ .

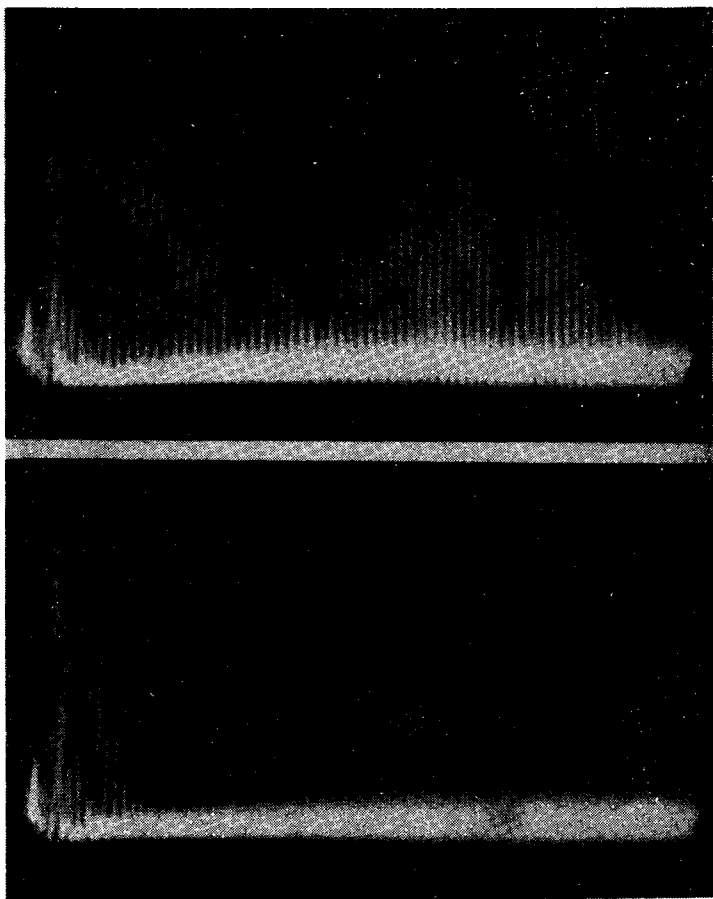


Рис. 1. Последовательности эхо-импульсов быстрого поперечного гиперзвука частотой 3 ГГц вдоль оси  $x$  в системе  $\text{Ni}^{2+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ . Длительность развертки 215 мксек.  $T = 1,8\text{K}$ ; *a* – предпороговый режим фазерного усиления, *б* – пассивный режим (без усиления)

С ростом мощности накачки резонансное поглощение гиперзвука сменяется усилением. Было зарегистрировано усиление как продольной, так и медленной и быстрой поперечных волн. При  $T = 1,8\text{K}$  и мощности накачки 10 мВт усиление для этих волн составляет 0,32; 0,78 и 1,6 дБ/см

соответственно. Коэффициент инверсии  $I = 4,8$ . На рис. 1 приведены осциллограммы эхо-импульсных серий для быстрого поперечного звука в пассивном режиме и в режиме предпорогового усиления. Для быстрого поперечного гиперзвука было также достигнуто превышение усиления над фоновыми потерями, благодаря чему оказалось возможным реализовать фазерную генерацию поперечных фононов. При непрерывной накачке строго по центру линии  $Ni^{2+}$  наблюдалась фазерная генерация с интегральной интенсивностью фононного потока не менее  $10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>.

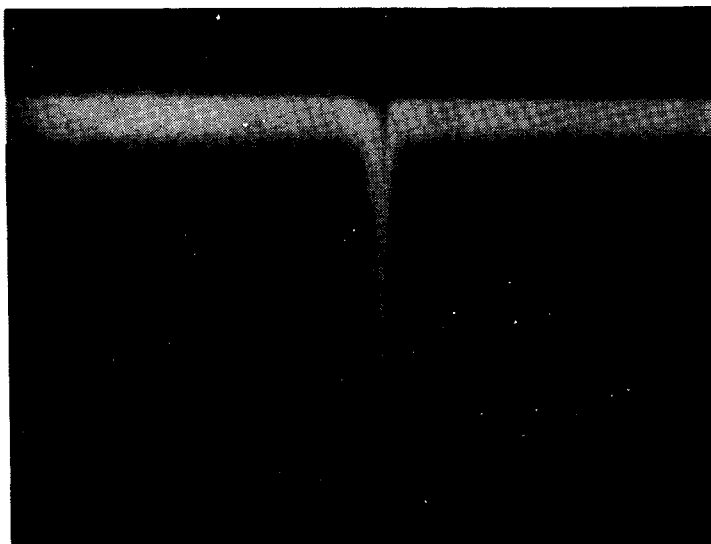


Рис. 2. Импульсная фазерная генерация быстрых поперечных фононов при частотно-манипулированной прерывистой накачке. Период повторения импульсов накачки 20 мсек.  
 $T = 1,8K$

Причем генерация возникает не во всей надпороговой области линии усиления, а лишь в малой окрестности ее вершины, в интервале магнитных полей  $\approx 1$  э. в то время как ширина надпороговой области составляет  $6 \div 7$  э. Такой характер спектра фазерного излучения отвечает рассмотренным в [1] условиям пространственной неравновесности возбуждений, питающих генерирующую систему.

Весьма интересное с точки зрения фазерной генерации явление наблюдалось нами в случае прерывистой частотно-манипулированной накачки, когда при фиксированном значении магнитного поля частота источника накачки проходила в течении времени порядка 1 мсек. через резонансы электромагнитного резонатора накачки, лежащие в пределах  $\pm 50$  МГц по отношению к вершине линии накачки. Фазерная генерация в этом случае приобретала регулярный импульсный характер (рис. 2) и, что весьма существенно, интенсивность фазерного излучения возрастала более, чем на порядок по сравнению с непрерывным режимом на-

качки. В режиме частотно-манипулированной накачки наблюдалось также возрастание на  $20 \div 30\%$  и коэффициента усиления как поперечных, так и продольных волн.

Причина столь большого возрастания интенсивности генерации пока не ясна, однако можно предположить, что здесь проявляются нестационарные термодинамические явления, аналогичные изученным нами ранее в рубиновом фазере [1], когда большая теплоемкость ядерного спинового резервуара оказывает существенное влияние на повышение спиновой температуры системы накачки при быстрых изменениях условий насыщения в этой системе.

Институт радиофизики и электроники  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
3 июля 1978 г.

### Литература

- [1] Е.М.Ганапольский, Д.Н.Маковецкий. ЖЭТФ, 72, 203, 1977.
  - [2] P. D. Peterson. E. H. Jacobsen. Science, 164, 1065, 1969.
  - [3] Е.М.Ганапольский, Д.Н.Маковецкий. ФТТ, 15, 2447, 1973.
-