

О КВАНТОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА С МАГНИТНОЙ НАКАЧКОЙ

С.А.Альтшулер, Е.К.Завойский

Здесь будут обсуждены некоторые возможности получения индуцированного когерентного излучения субмиллиметрового диапазона.

1. Обычно в качестве рабочих веществ квантовых генераторов и усилителей используются ионные кристаллы, активированные парамагнитными атомами. Если для получения расщеплений порядка $\Delta \approx 10; 100 \text{ см}^{-1}$ использовать импульсные магнитные поля, то в качестве рабочих веществ целесообразно применять концентрированные парамагнитные соли. При температуре $T = 4,2^\circ\text{K}$ в сильных магнитных полях отношение $(\Delta/KT) \gg 1$, и поэтому наступает полное упорядочение магнитных моментов, что устраняет основной источник уширения – магнитные диполь-дипольные взаимодействия парамагнитных атомов. Линии, обычно имеющие ширину

$\Delta \nu \sim 10^9 - 10^{10}$ г, можно ожидать, сузятся на два порядка [1,2]. В парамагнетиках со слабой спин-фононной связью главную роль в уширении линий будут играть сверхтонкие взаимодействия и, если они отсутствуют, несовершенство кристалла.

2. В сильных магнитных полях при не очень высоких температурах спин-решеточная релаксация осуществляется, главным образом, благодаря однофононным процессам. При этом вероятность перехода за 1 сек с верхнего магнитного уровня на нижний равна

$$A = K \frac{\Delta^3}{\rho \nu^5} \frac{\exp(\Delta/KT)}{\exp(\Delta/KT) - 1}, \quad (1)$$

где ρ – плотность кристалла, ν – средняя скорость звука, а K зависит от природы релаксационного механизма и структуры парамагнитного иона. Если в обычных условиях у ионов с относительно слабыми спин-фононными взаимодействиями наиболее эффективный релаксационный механизм как-то связан со спин-спиновыми взаимодействиями между парамагнитными ионами, что проявляется в наличии концентрационной зависимости, то в сильных магнитных полях решающая роль должна принадлежать механизму Ван-Флека. Из опытов [3, 4], позволяющих выделить ван-флековскую релаксацию, известно, что для Cr^{3+} в Al_2O_3 $K = 3,10^{48} \text{ г}^{-2} \text{ см}^{-4}$; отсюда для поля $2 \cdot 10^5$ э согласно (1) $A \approx 10^5 \text{ сек}^{-1}$.

Расчеты [5] показали, что у ионов в S-состоянии K должно быть меньше. Поэтому наиболее подходящими для рассматриваемой нами цели, вероятно, являются соли двухвалентного марганца и трехвалентного железа.

Заметим, что в полях, вызывающих расщепление $\Delta > \hbar \omega_D$, где ω_D – предельная частота Дебая, время релаксации начнет удлиняться, ибо однофононные процессы станут невозможными.

3. Из опытов по акустическому парамагнитному резонансу [6] и по ЭПР под давлением [7] можно заключить, что у ионов с нечетным числом электронов (нижний штарковский уровень – кramerсов дублет) механизм Ван-Флека в обычных условиях вносит в спин-решеточную релаксацию очень малый вклад. Так как можно ожидать, что в сильных полях ван-флековский механизм будет преобладающим, то не исключена возможность использования редкоземельных ионов.

Среди редкоземельных ионов с четным числом электронов выделяются такие, у которых нижняя пара штарковских уровней представляет собой два случайно близко расположенных синглета. Примером могут служить ионы Tb^{3+} в этилсульфате и CeWO_4 .

Измерения показали [8], что времена релаксации у этих ионов по порядку величины не отличаются от ионов с кramerсовыми дублетами. Использование ионов Tb^{3+} и некоторых других редкоземельных ионов весьма перспективно по следующей причине: у этих ионов во многих кристаллах очень велик эффективный g -фактор ($g \sim 20$), благодаря чему расщепления $\Delta \sim 20 \text{ см}^{-1}$ могут быть получены в полях $\sim 2 \cdot 10^4$ э.

4. Рассмотрим возможность инвертирования населенности магнитных подуровней путем перемены направления магнитного поля на обратное. В случае сильных магнитных полей применение этого метода облегчается благодаря сужению резонансной линии и сдвигу ее положения за счет намагничивания парамагнетика. Кроме этого, требования к скорости инвертирования магнитного поля можно понизить, выбирая вещества с $g > 2$ и $S > 1/2$. Оценки показали, что этот метод инвертирования технически вполне осуществим.

5. Сильные магнитные поля могут быть использованы для генерации гиперзвука частоты $\sim 10^{12}$ в/с. Оценки [9] показывают, что рассмотренные нами парамагнитные соли подходят также для получения звукового лазер-эффекта. Заметим, однако, что интенсивные некогерентные звуковые импульсы могут быть возбуждены без предварительного инвертирования населенностей магнитных подуровней. Если магнитное поле включить за промежуток времени $t \ll T_1 = 1/A$, то магнитные подуровни будут заселены одинаково; последующее установление равновесного распределения в условиях, когда преобладают однофононные процессы, приведет к появлению звукового импульса, интенсивность которого будет зависеть от соотношения между временами t , T_1 и T_ϕ (T_ϕ — время "рассасывания" резонирующих фононов). Детектирование гиперзвука возможно по дифракции света или по рассеянию Мандельштама-Бриллюэна. Несомненный интерес представляет выяснение влияния звуковых колебаний столь высоких частот на химические и биологические процессы.

Поступило в редакцию
13 июня 1967 г.

Литература

- [1] M. Mc Millan, W. Opechowski, *Canad. J. Phys.*, **38**, 1168h, 1960.
- [2] I. Svare, G. Seidel, *Phys. Rev.*, **134**, A172, 1964.
- [3] W. I. Dobrov, M. E. Broun, *J. Phys. Soc. Japan*, **17**, Suppl B1, 1962, p. 477.
- [4] А. А. Маненков, Ю. К. Данилейко. Письма ЖЭТФ, **2**, 414, 1965.
- [5] А. М. Леушин, ФТТ **5**, 605, 1963.
- [6] W. I. Dobrov, *Phys. Rev.*, **146**, 268, 1966.
- [7] М. М. Зайтов, Л. Я. Шекун. Письма ЖЭТФ, **4**, 338, 1966.
- [8] S. H. Zaron, C. D. Jeffries, *Phys. Rev.*, **141**, 461, 1966.
- [9] С. Н. Townes, Материалы 1-й междунар. конф. по квантовой электронике. Нью-Йорк, 1959, стр. 405; У. Х. Колвиллем, В. Д. Корепанов. ЖЭТФ **41**, 211, 1961; ФТТ **3**, 2014, 1961; C. Kittel, *Phys. Rev. Lett.* **6**, 449, 1961.