

## СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ CdS ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ

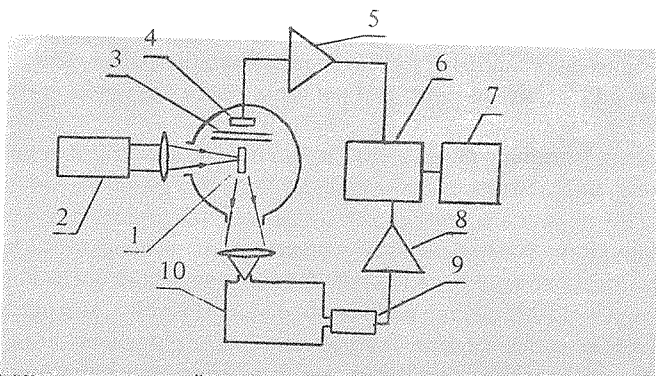
Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, С.А. Стоклицкий

УДК 621.315.572:535.37

*В монокристаллах CdS при высоких уровнях оптического возбуждения обнаружено интенсивное субмиллиметровое излучение в диапазоне длин волн 50-90 мкм, возникающее при температурах  $\geq 110$  К. Показано, что излучение является вынужденным и может быть объяснено внутриэкситонными переходами.*

Система свободных экситонов большой плотности ( $n_{ex} \sim 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) в прямозонных полупроводниках (CdS, CdSe, GaAs и т.п.) представляет интерес с точки зрения создания инверсной заселенности и получения лазерной генерации в субмиллиметровой области спектра [1-4]. В этих материалах при таких концентрациях экситонов одним из основных каналов рекомбинации являются процессы, связанные с неупругим экситон-экситонным рассеянием (излучательная Оже-рекомбинация) [5, 6]. В спектрах междузонной люминесценции им соответствует Р-линия, сдвинутая относительно линии свободного экситона в длинноволновую сторону [5]. Из различных Оже-процессов можно выделить два, которые приводят к росту заселенности возбужденного состояния экситонов [7]: 1) процесс  $1s + 1s \rightarrow 2p + \hbar\omega$ , когда один из двух 1s-экситонов рекомбинирует с испусканием фотона, а второй переходит в возбужденное 2p-состояние; 2) процесс  $1s + 1s \rightarrow 1s + \hbar\omega$ , в результате которого появляется горячий экситон в основном 1s-состоянии, который может быстро (за время порядка  $10^{-13} - 10^{-14}$  с [8]) перейти в возбужденное 2p-состояние с испусканием продольного оптического фонона. Лазерная генерация на Р-линии стимулирует указанные процессы, в то время как обратные процессы типа  $2p+2p \rightarrow 1s+\hbar\omega$  и  $2p+2p \rightarrow 2p+\hbar\omega$  идут без стимулирующего влияния генерации на Р-линии, поскольку фотоны соответствующей энергии сильно поглощаются в кристалле. Как теоретически показано в [1, 2], стимулированные Оже-процессы могут привести, с одной стороны, к существенному уменьшению времени жизни экситона в 1s-состоянии и, с другой стороны, к накоплению экситонов в возбужденном 2p-состоянии вплоть до достижения инверсии.

В настоящей работе излагаются результаты исследования субмиллиметрового излучения экситонов большой плотности в монокристаллах CdS при высоких уровнях оптического возбуждения. Исследования выполнены в интервале температур 1,6–180 К с использованием импульсных методов регистрации сигнала.



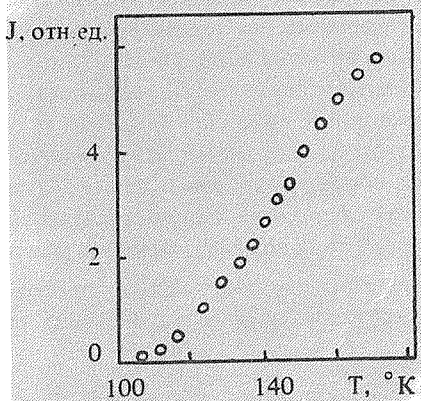
Р и с. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – исследуемый образец; 2 – лазер накачки; 3 – фильтры; 4 – фотоприемник Ge:Ga; 5, 8 – широкополосные усилители; 6 – стробинтегратор ВС1-280; 7 – двухкоординатный графопостроитель; 9 – ФЭУ-79; 10 – монохроматор МДР-3.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Образец, расположенный на хладопроводе гелиевого криостата, возбуждался излучением азотного лазера ( $\lambda = 337,1 \text{ нм}$ ,  $\tau = 10 \text{ нс}$ ,  $P \approx 1 \text{ кВт}$ ) или третьей гармоники YAG-лазера с модулированной добротностью ( $\lambda = 335 \text{ нм}$ ,  $\tau = 10 \text{ нс}$ ,  $P \approx 10 \text{ кВт}$ ), которое фокусировалось в пятно диаметром 0,3–1 мм. Субмиллиметровое излучение регистрировалось фотоприемником Ge(Ga), установленным на расстоянии 5 мм от образца. Постоянная времени приемно-регистрающей системы составляла 0,1 мкс. Исследуемые кристаллы CdS, выращенные из газовой фазы, представляли собой пластинки толщиной 40–50 мкм со сколотыми вдоль оси С параллельными гранями, расстояние между которыми составляло  $\sim 2 \text{ мм}$ . За счет разогрева образца излучением накачки температура образца в зависимости от частоты следования импульсов варьировалась от 10 до 180° К и контролировалась по положению линии лазерной генерации в зеленой области спектра. Измерения при более низких температурах (1,6 ÷ 4,2 К) проводились при погружении образца и приемника непосредственно в жидкий гелий.

В экспериментах при температуре ниже 100 К наблюдалось только тепловое излучение, обусловленное адиабатическим разогревом поверхностного слоя образца импульсами накачки. Оно регистрировалось в виде затянутых импульсов длительностью 100–1000 мкс. Согласно спектральным измерениям, выполненным с помощью фильтров, основная часть его энергии сконцентрирована в области длин волн существенно короче 50 мкм. Излучение с примерно такими же характеристиками наблюдалось при замене кристалла CdS черной бумагой. В жидком гелии тепловой сигнал не наблюдался.

При увеличении температуры кристалла выше 100 К обнаружено возникновение интенсивного субмиллиметрового излучения, мощность которого на 2–3 порядка превосходит мощность теплового излучения. Зависимость мощности обнаруженного излучения от температуры приведена на рис. 2, из которого видно, что интенсивность излучения после порога возникновения при  $\approx 110$  К растет вплоть до максимальной температуры  $\approx 180$  К, достигнутой в эксперименте. Излучение зарегистрировано в виде коротких импульсов, длительность которых существенно меньше постоянной времени системы регистрации. Введением фильтров между образцом и приемником показано, что наблюдаемое излучение сосредоточено в интервале длин волн 50–90 мкм. Максимальная излучаемая образцом мощность составляет  $\sim 10$  мВт.

Совокупность полученных результатов и оценки мощности излучения позволяют сделать вывод о том, что обнаруженное излучение не связано с разогревом образца или электронно-дырочной плазмы в кристалле. Поскольку спектральному диапазону 50–90 мкм, в котором оно наблюдается, соответствует частота перехода из возбужденного ( $2p$ ) в основное ( $1s$ ) состояние



Р и с. 2. Температурная зависимость интенсивности субмиллиметрового излучения.

свободного А-экситона в CdS ( $\hbar\omega = 20,5$  мэВ,  $\lambda = 60,6$  мкм), можно предположить, что излучение обусловлено именно этими переходами. Исходя из измеренной мощности излучения, нетрудно подсчитать соответствующие числа заполнения фотонных мод  $n_{\phi}$  в кристалле CdS. Для мощности 10 мВт и спектрального диапазона 50–90 мкм такой расчет дает  $n_{\phi} \geq 10$ , что указывает на вынужденный характер обнаруженного излучения и на избыточную по сравнению с равновесной заселенность возбужденных состояний экситонов (в равновесии при  $T = 100$  К  $n_{\phi} \approx 0,1$ ). Тот факт, что излучение наблюдается при достаточно высоких температурах и только при наличии лазерной генерации на Р-линии, позволяет сделать вывод, что основным механизмом, приводящим к избыточной заселенности возбужденного состояния экситонов, по-видимому, является процесс вынужденной излучательной Оже-рекомбинации  $1s+1s \rightarrow \hbar\omega + 1s$ , сопровождающийся разогревом одного из экситонов и последующим переходом его в возбужденное 2р-состояние с испусканием LO-фонона. Такой процесс, очевидно, может быть эффективен лишь при достаточно высоких энергиях сталкивающихся экситонов.

Авторы благодарны Г.К. Власову за полезные обсуждения и А.Д. Левиту за предоставленные монокристаллы CdS.

Поступила в редакцию 1 февраля 1985 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. V l a s o v G.K. et al. Phys. stat. sol. (b) 71, 787 (1975).
2. V l a s o v G.K. Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2, 115 (1981).
3. В л а с о в Г.К. и др. ФТТ, 20, 1886 (1978).
4. Ф о м и ч е в А.А., Я к ш и н М.А. ЖТФ, 8, 903 (1982).
5. G u i l l i a m e B.ala et al. Phys. Rev., 177, 567 (1969).
6. M a g d e D., M a h z H. Phys. Rev. Lett., 24, 890 (1970).
7. M o r i y a T., K u s h i d a T. J. Phys. Soc. Japan, 40, 1668 (1976).
8. Т р а л л е р о Г и н е р К. и др. ФТТ, 21, 2028 (1979).