

ДВУХЭТАПНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЭНЕРГИИ ФОТОВОЗБУЖДЕННОЙ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ В КРИСТАЛЛЕ CdS

Р.Балтрамеюнас, А.Жукаускас, В.Латинис, С.Юршенас

Обнаружены два этапа остывания неравновесной электронно-дырочной плазмы (ЭДП) в полярном полупроводнике CdS (характерные времена релаксации энергии $\tau_1 \leq 15$ пс и $\tau_2 = 400$ пс), отражающие начальные стадии установления термодинамического равновесия в фононной подсистеме сильно возбужденного кристалла.

В ряде исследований (работы, цитируемые в ¹, также ²⁻⁴) установлено, что релаксация энергии плотной ЭДП, возбуждаемой в полупроводниках мощными пикосекундными импульсами света, протекает значительно медленнее, чем можно ожидать, исходя из элементарных моделей электрон-фононного (ЭФ) взаимодействия. Толкование природы процессов, обуславливающих скорость такой релаксации в полярных кристаллах (GaAs, CdSe), в настоящее время сопряжено с рядом трудностей. Так, попытка объяснить экспериментальные данные усилением продольных оптических (LO) колебаний решетки ^{1,2} потребовала принятия завышенных значений времени релаксации неравновесной заселенности LO-фононов (25 – 60 пс) по

сравнению с известными величинами ($< 10 \text{ пс}^5$). Другой подход, основанный на эффекте экранирования ЭФ взаимодействия неравновесными носителями заряда ⁶, дает удовлетворительное описание результатов опытов ^{4,7} лишь в рамках модели, использующей упрощенный спектр энергетических потерь горячего электронного газа ⁸. Наконец, привлечение модели разогрева собственно кристалла ³ предполагает мгновенное установление термодинамического равновесия между всеми модами колебаний решетки.

В настоящей работе на основе детального анализа спектрально-временных характеристик излучения сильно возбужденного монокристалла CdS впервые удалось отчетливо выделить две стадии остывания неравновесной ЭДП, отражающие последовательное включение нескольких механизмов, замедляющих релаксацию энергии.

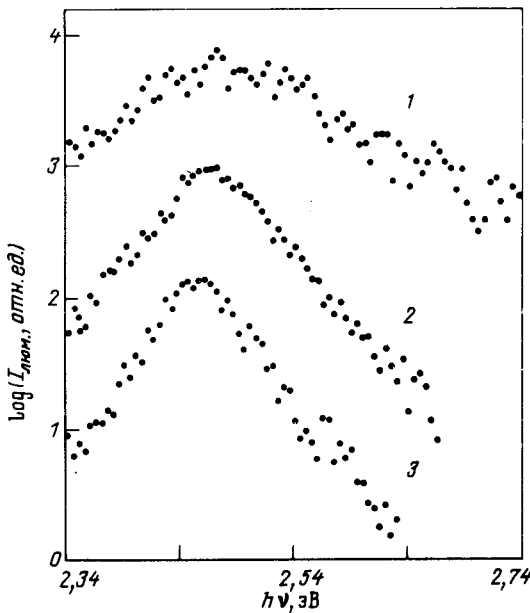


Рис. 1

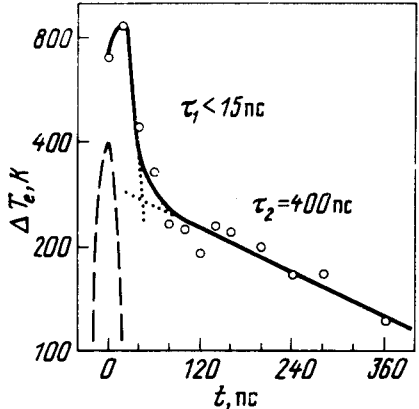


Рис. 2

Рис. 1. Спектры люминесценции монокристалла А CdS ($T = 295 \text{ К}$) при различных задержках относительно импульса возбуждения: 1 – 20 пс, 2 – 80 пс, 3 – 280 пс. Шкалы интенсивностей произвольно сдвинуты для каждого спектра

Рис. 2. Кинетика перегрева ЭДП в сильно возбужденном CdS. Пунктир иллюстрирует форму импульса накачки в логарифмическом масштабе

Эксперимент проводился на установке, состоящей из лазера на АИГ : Nd^{3+} с пассивной синхронизацией мод (длительность импульса 30 пс), люминесцентного спектрометра, автоматизированного на базе стандарта КАМАК, и микро-ЭВМ. Временное разрешение установки обеспечивалось оптическим затвором Керра на CS_2 . Спектры люминесценции регистрировались фотоэлектрически путем накопления сигнала в отдельных точках с дискриминацией возбуждающих импульсов по амплитуде. На рис. 1 показано несколько характерных спектров люминесценции ЭДП в монокристалле CdS, возбуждаемом третьей гармоникой излучения лазера ($h\nu_0 = 3,50 \text{ эВ}$, плотность мощности 500 МВт/см^2), снятых при различных задержках относительно импульса накачки. Форма коротковолновой области спектров указывает, что эффективная температура ЭДП T_e значительно превышает исходную температуру решетки кристалла ($T = 295 \text{ К}$). Вместе с тем, анализ спектрального положения максимума полос излучения

позволяет заключить, что тривиальный разогрев решетки кристалла, приводящий к сужению запрещенной зоны, в данном случае не проявляется. На рис. 2 представлена временная зависимость перегрева ЭДП $\Delta T_e = T_e - T$. Как видно, на начальном этапе имеет место быстрое остывание ЭДП с постоянной времени равной или несколько ниже 15 пс (величина получена методом деконволюционного анализа). Затем происходит резкое возрастание времени релаксации энергии ЭДП до 400 пс. Следует отметить, что смена скоростей в кинетике остывания ЭДП происходит с некоторым опозданием относительно момента достижения максимальной плотности неравновесных носителей заряда (на спаде импульса накачки). Это не позволяет отнести механизм замедления релаксации энергии ЭДП к эффекту экранирования ЭФ взаимодействия. Причиной снижения скорости релаксации энергии со временем может служить поэтапное неравновесное заселение мод колебаний решетки кристалла, начиная с самых высокочастотных, которое происходит следующим образом. Во время действия импульса накачки в кристалле образуется горячая ЭДП, которая отклоняет от равновесия наиболее сильно связанные с электронами и дырками фононы — LO -колебания в длинноволновой области зоны Бриллюэна. По окончании импульса возбуждения инжекция быстрых электронов в кристалл прекращается, и кинетика температуры T_e из-за поглощения плазмой накопившихся LO -фононов отражает релаксацию их неравновесной заселенности. Процесс депопуляции неравновесных LO -фононов за счет ангармонического распада протекает с характерной постоянной времени τ_1 до тех пор, пока в определенном интервале волновых чисел не разогреваются более низкочастотные долгоживущие моды колебаний решетки, являющиеся конечными состояниями такого распада. В итоге вероятность образования длинноволнового LO -фонона становится близкой к вероятности его распада, и на следующем этапе скорость остывания ЭДП определяется медленной релаксацией неравновесных низкочастотных фононов с характерной постоянной времени τ_2 . Если полагать, что LO -фонон распадается на два фонона одинаковой энергии, то отношение τ_2/τ_1 должно быть оценочно равно $2^5 \approx 32$, что согласуется с приведенными экспериментальными данными.

Таким образом, обнаруженное ступенчатое остывание неравновесной ЭДП, по-видимому, отражает последовательное накапливание неравновесных фононов в ограниченных областях k -пространства вследствие ограничений, налагаемых правилом отбора по квазиимпульсу на процессы передачи энергии в возбужденном кристалле.

Литература

1. Luzzi R., Vasconcellos A.R. In: Semiconductors probed by ultrafast laser spectroscopy, vol. 1, ed. R.R. Alfano, Orlando e.a.: Academic Press, 1984, p. 135 – 169.
2. Pötz W., Kocevar P. Phys. Rev. B, 1983, 28, 7040.
3. Amand T., Collet J. J. Phys. Chem. Sol., 1985, 46, 1053.
4. Балтрамеюнас Р., Жукаускас А., Латинис В., Стяпанквичюс В., Юршенас С. ФТП, 1987, 21, 932.
5. Von der Linde D., Kuhl, Klingenberg H. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 1505.
6. Pagnet M., Collet J., Cornet A. Solid State Comm., 1981, 38, 531.
7. Seymour R. J., Junnarkar M.R., Alfano R.R. Solid. State Comm., 1982, 41, 657.
8. Yoffa E.J. Phys. Rev. B. 1981, 23, 1909.
9. Klemens P.G. Phys. Rev., 1966, 148, 845.