

УДК 535.354

СВЕРХБЫСТРАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ФОТОВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СУЛЬФИДЕ КАДМИЯ

© 2019 г. А. В. Леонтьев¹, *, Д. К. Жарков¹, А. Г. Шмелев¹, В. С. Лобков¹, В. В. Самарцев¹

¹Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр Российской академии наук”, Казань, Россия

*E-mail: AndreyVLeontyev@gmail.com

Проведены эксперименты по регистрации наведенного изменения показателя преломления в монокристалле сульфида кадмия с фемтосекундным временным разрешением в геометрии “наведенной линзы” и “наведенных решеток”. Сделана оценка времени жизни фотовозбужденных носителей заряда в 230 пс. Зарегистрирована дополнительная компонента, характеризующаяся временем распада в единицы пикосекунд, в спаде эффективности наведенной решетки концентрации свободных носителей заряда. Показано, что это время определяется скоростью термализации фотовозбужденных носителей заряда.

DOI: 10.1134/S0367676519010319

ВВЕДЕНИЕ

Широкозонный полупроводник сульфид кадмия (CdS) уже долгое время применяется в приложениях оптоэлектроники, в частности, как рабочая среда оптоэлектронных излучателей, одноэлектронных транзисторов, дисплеев на квантовых точках, лазеров и др. [1–3]. Эволюция фотоиндуцированных электронов и дырок, а следовательно, и кинетика люминесценции сильно зависит от параметров возбуждения и характеристик образца. Так, оценки значения характерного времени релаксации свободных носителей (например, в [4–6]) могут варьироваться в пределах от десятков наносекунд до единиц пикосекунд. Для получения независимой оценки этого параметра в условиях возбуждения монокристалла CdS ультракороткими лазерными импульсами проведены эксперименты в схеме “возбуждение–зондирование”.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лазерное излучение с длиной волны 800 нм и длительностью импульсов 100 фс и энергией 0.1–3 мкДж (возбуждающий импульс) и 0.02 мкДж (зондирующий) было сфокусировано линзой в пятно на поверхности образца диаметром ~50 мкм. Временной интервал между импульсами может быть установлен с использованием оптической линии задержек в интервале 0–300 пс. Перед фотодетектором в зондирующий пучок помещена диафрагма, блокирующая ~98% излучения в отсутствие возбуждения. На рис. 1 показана зависимость интенсивности зондирующего пучка, прошедшего

через диафрагму, от задержки относительно возбуждения. Интенсивность пучка, прошедшего через диафрагму, в основном определяется степенью изменения наведенной в среде поляризуемости спустя заданное время после действия импульса возбуждения (“наведенная линза” [7]). В свою очередь, наведенное изменение показателя преломления Δn в полупроводниках пропорционально плотности свободных носителей заряда [8]. Характерное время спада сигнала на рис. 1, которое, таким образом, можно интерпретировать как время жизни свободных носителей заряда, составляет 230 ± 6 пс.

В дальнейшем схема эксперимента была модифицирована заменой пучка возбуждения парой пучков, пересекающихся в образце, без относительной взаимной задержки. При интерференции двух лазерных пучков возбуждения возникает периодическое распределение электромагнитного поля, и повторяющая его динамическая периодическая решетка концентрации возбужденных носителей заряда и локального изменения показателя преломления. Для создания решетки использовались два лазерных пучка с энергией импульсов 0.1–1.5 мкДж, для ее зондирования – пучок с энергией 0.02 мкДж. Регистрируя интенсивность зондирующего пучка, испытавшего дифракцию на такой решетке, в зависимости от его запаздывания Δt относительно пучков возбуждения, можно проследить процесс разрушения решетки, причем следует ожидать, что характерное время такого процесса будет, главным образом, определяться скоростью рекомбинации свободных носителей заряда (~200 пс).

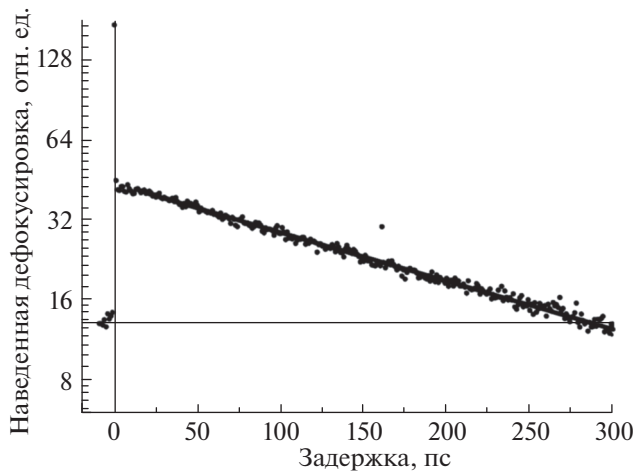


Рис. 1. Зависимость величины наведенной дефокусировки от задержки зондирующего импульса в монокристалле CdS.

На рис. 2 приведены зависимости интенсивности зондирующего пучка, испытавшего дифракцию на наведенной решетке, от задержки относительно пучка возбуждения, при различных значениях интенсивности возбуждения. В случае, если возбуждение превышает пороговое значение в $100 \text{ ГВт} \cdot \text{см}^{-2}$, кривая спада эффективности наведенной решетки обнаруживает участок “быстрой” релаксации ($\sim 4 \text{ пс}$).

Зарегистрированное ускорение распада сигнала наведенной решетки может быть связано с ускорением рекомбинации носителей заряда (уменьшение средней величины Δn) или их диффузии (уменьшение градиента Δn). Однако любое гипотетическое сокращение времени рекомбинации должно приводить к появлению аналогичных особенностей в сигнале распада наведенной линзы при соответствующей интенсивности возбуждения, что (рис. 1) не наблюдается. Альтернативным объяснением может быть увеличение подвижности свободных носителей. В [9, 10] показано, что коэффициент диффузии может возрастать до 10^5 раз при увеличении плотности возбужденных носителей. Чтобы оценить влияние диффузии на скорость распада решетки, была проведена серия измерений, в которых постоянная решетки варьируется в пределах $0.8\text{--}1.8 \text{ мкм}$. Из рис. 3 видно, что с увеличением постоянной решетки значительного уменьшения характерного времени распада не происходит.

Можно предложить следующее непротиворечивое объяснение наблюдаемой динамики распада наведенных решеток [11]: свет, излучаемый при рекомбинации, испытывает реabsорбцию в окружающих слоях, однако в области, где населенность превышает порог усиления, величина поглощения ограничивается поглощением сво-

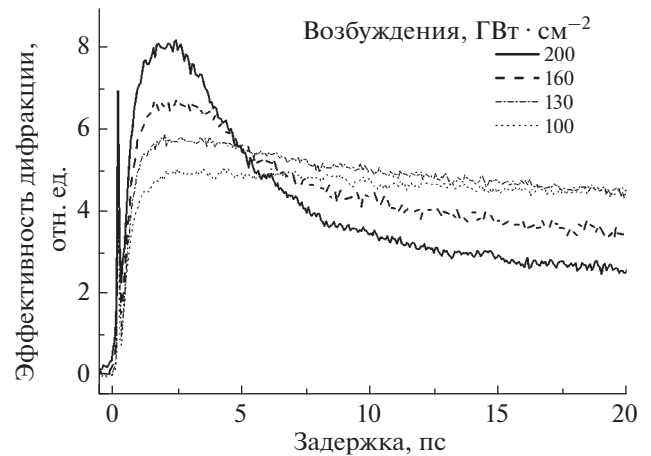


Рис. 2. “Быстрая” составляющая спада эффективности дифракции на наведенных решетках концентрации свободных носителей заряда при разных значениях интенсивности фотовозбуждения.

бодных носителей заряда и сравнительно невелика. Излучение свободно распространяется через эту зону и либо покидает образец, либо реabsорбируется дальше, в области, где распределение носителей невырождено, тем самым увеличивая локальную плотность носителей. Такой процесс эквивалентен почти мгновенному транспорту возбужденных носителей на расстояние в несколько микрометров [11]. Решетка населенностей разрушается, снижая эффективность дифракции зондирующего пучка, и этот процесс будет продолжаться, пока поддерживается неравновесная населенность в зоне проводимости.

Поскольку избыточная населенность нижних уровней зоны проводимости, падающая при вы-

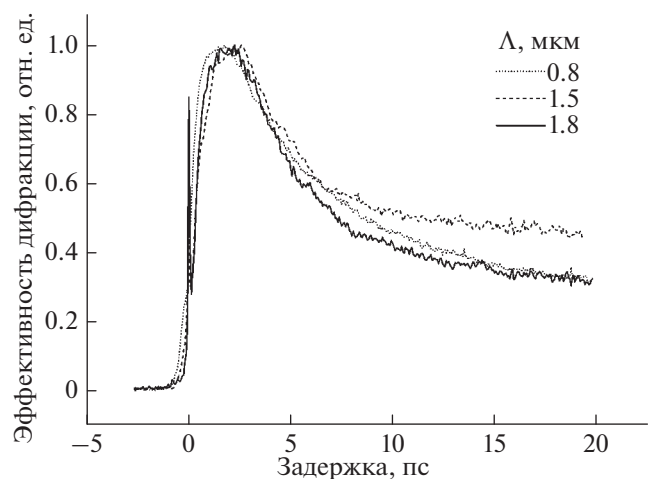


Рис. 3. Спады эффективности дифракции на наведенной решетке в сверхпороговом режиме фотовозбуждения ($I > 100 \text{ ГВт} \cdot \text{см}^{-2}$), зарегистрированные при различных значениях постоянной решетки.

нужденной эмиссии, восстанавливается в процессе охлаждения горячих носителей заряда, обладающих после возбуждения импульсом возбуждения избыточной кинетической энергией $\Delta E = 0.66$ эВ, длительность вынужденной эмиссии определяется характерным временем охлаждения носителей. Потеря кинетической энергии горячих носителей с переносом ее в кристаллическую решетку происходит, главным образом, при полярном рассеянии на продольных оптических фононах с энергией 37.5 мЭв [12, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование динамики релаксации фотовозбужденных носителей в монокристалле сульфида методом “возбуждение—зондирование” с регистрацией наведенного изменения показателя преломления в геометрии “наведенной линзы” и “наведенных решеток”. Определено характерное время рекомбинации носителей заряда — 230 пс. Показано влияние процесса внутризонной релаксации фотовозбужденных носителей заряда на скорость распада наведенных динамических решеток концентрации носителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maleki M., Ghamsari M.S., Mirdamadi Sh., Ghasemzadeh R.* // *Semicond. Phys. Quant. El. and Optoelect.* 2007. V. 10. P. 30.
2. *Demir H.V., Sedat N., Evren M. et al.* // *Nanotechnology.* 2008. V. 19. № 33. P. 335203.
3. *Жарков Д.К., Сафиуллин Г.М., Никифоров В.Г. и др.* // Уч. зап. Казан. гос. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. 2013. Т. 155. № 1. С. 66.
4. *Lambe J.* // *Phys. Rev.* 1955. V. 98. № 4. P. 985.
5. *Evenor M., Gottesfeld S., Harzion Z. et al.* // *J. Phys. Chem.* 1984. V. 88. № 25. P. 6213.
6. *Zhang J.Z., O'Neil R.H., Roberti T.W.* // *App. Phys. Lett.* 1994. V. 64. № 15. P. 1989.
7. *Terazima M.* // *Israel J. Chem.* 1998. V. 38. № 3. P. 143.
8. *Fox E.C., Van Driel H.M.* *Ultrashort Processes in Condensed Matter.* N.Y.: Springer, 1993. P. 1.
9. *Junnarkar M.R., Alfano R.R.* // *Phys. Rev. B.* 1986. V. 34. P. 7045.
10. *Rudolph W., Puis J., Henneberger P., Lap D.* // *Phys. Stat. Sol. B.* 1990. V. 159. P. 49.
11. *Fox E.C., Van Driel H.M.* // *Phys. Rev. B.* 1993. V. 47. № 3. P. 1663.
12. *Днепроvский В.С., Климов В.И., Новиков М.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52. № 10. С. 1130.
13. *Lami F., Gilliot P., Hirlimann C.* // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 77. № 8. P. 1632.