

БЫСТРОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПРОПУСКАНИЯ СВЕТА В СТЕКЛАХ, АКТИВИРОВАННЫХ МИКРОКРИСТАЛЛАМИ CdS

Балтрамеюнас Р., Гульбинас В., Екимов А. И., Кудрявцев И. А.,
Пакальнис С., Тамулайтис Г., Чепик Д. И.

С временным разрешением 5 пс исследованы временная кинетика пропускания и зависимость оптической плотности от уровня возбуждения для образцов стекол, легированных микрокристаллами сульфида кадмия, при комнатной температуре. Наряду с просветлением, связанным с заполнением уровней размерного квантования в микрокристалле CdS, наблюдалось наведенное поглощение при энергии кванта зондирующего света, значительно превышающей ширину запрещенной зоны, которое релаксирует с характерным временем 200 пс. При высоких уровнях возбуждения обнаружено быстрое (5 пс) переключение из состояния просветления к наведенному поглощению. Природа наблюдаемых эффектов объясняется с учетом межчастичного взаимодействия, а также с учетом процессов разогрева и охлаждения фотовозбужденной электронно-дырочной плазмы.

Значительный интерес уделяется в настоящее время исследованию оптических свойств полупроводниковых микрокристаллов, диспергированных в прозрачной стеклообразной матрице. Эффекты размерного квантования движения квазичастиц, проявляющиеся в спектрах поглощения и люминесценции, приводят к существенным изменениям в энергетическом спектре электронов и дырок [1]. Большие нелинейности оптических характеристик и малые времена жизни фотовозбужденных носителей в таких объектах [2] позволяют рассматривать стекла с микрокристаллами как материалы, перспективные для создания элементов, управляющих оптическим сигналом. Кроме того, низкая концентрация полупроводниковой фазы в объеме стекла ($\approx 0.1\%$) обуславливает достаточно малые коэффициенты поглощения даже в области глубоких межзонных переходов полупроводника. Это позволяет проводить исследования особенностей оптических свойств далеко за краем фундаментального поглощения.

В настоящей работе были исследованы кинетики межзонного поглощения с использованием метода оптического возбуждения и зондирования в широком диапазоне энергий зондирующего света $h\nu$. Исследовались образцы силикатного стекла толщиной 0.3 мм, содержащего микрокристаллы CdS (средний радиус от 50 до 250 Å), при комнатной температуре. Образцы возбуждались третьей гармоникой стоковой компоненты излучения лазера на КГВ $[\text{K}(\text{Gd}(\text{WO}_4)_2)]$; $h\nu_0 = 3.15$ эВ; $\tau_{\text{амп}} = 5$ пс) и зондировались второй гармоникой перестраиваемого излучения параметрического генератора света, накачиваемого второй гармоникой от основного излучения лазера.

Известно, что сильное оптическое возбуждение полупроводниковых микрокристаллов приводит к коротковолновому сдвигу края собственного поглощения [3]. В проведенных экспериментах вид временной зависимости пропускания качественно зависит как от уровня возбуждения, так и от энергии $h\nu$. На рис. 1 приведены кинетики изменения оптической плотности образцов $D = \lg(I_0/I)$, где I_0 , I — интенсивности соответственно падающего и прошедшего света.

При низкой плотности энергии возбуждения (≈ 0.1 мДж/см²) и зондировании квантами с энергией $h\nu = 2.583$ эВ ($h\nu \approx E_g$) наблюдается незначительное просветление образца на крае собственного поглощения (рис. 1, а). Просветле-

ние релаксирует с характерным временем, превышающим доступный исследованию на данной установке временной интервал (≈ 1 нс). В этом случае (при невысоком уровне накачки) реализуется близкий к линейному режим рекомбинации, поскольку концентрация неравновесных носителей мала. Времена ре-

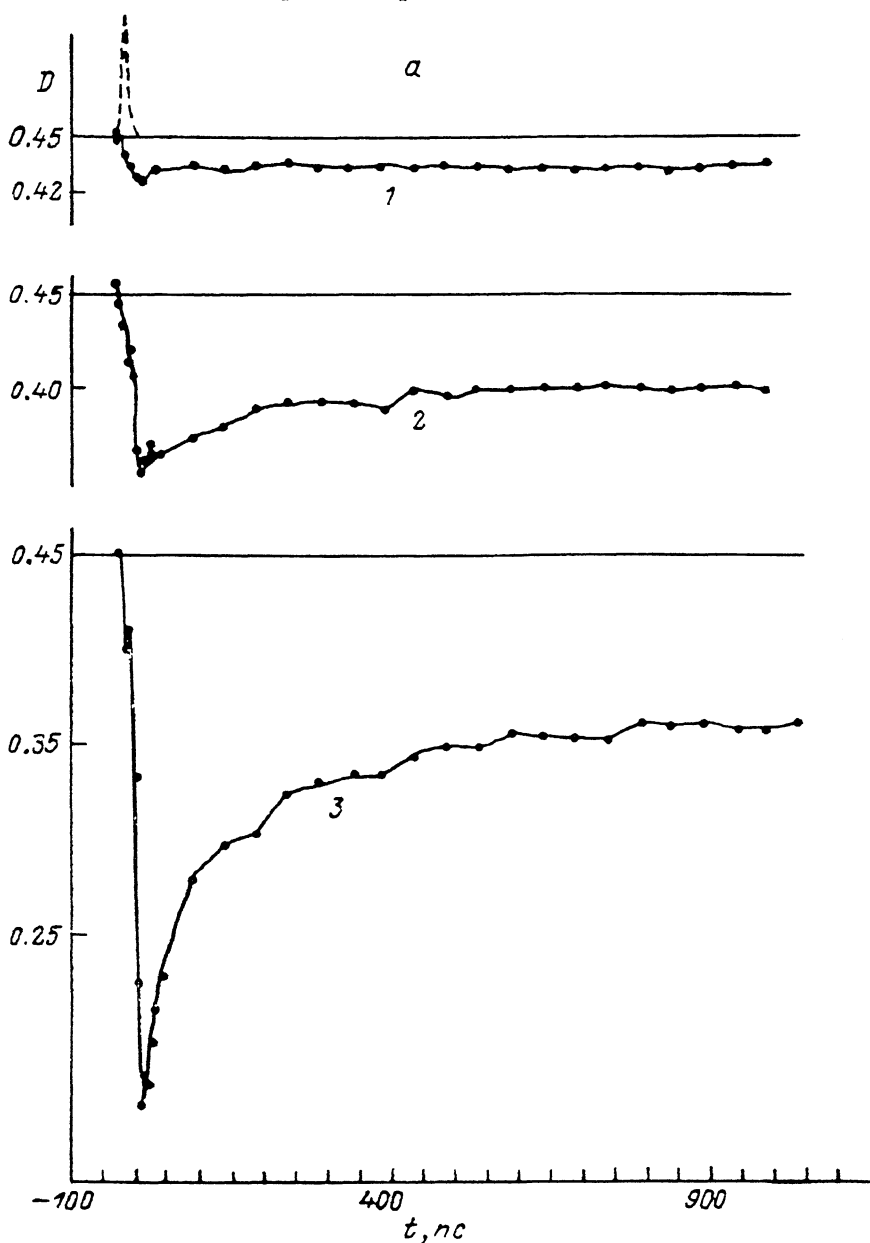


Рис. 1. Временные кинетики оптической плотности стекла с микрокристаллами CdS радиусом 120 \AA при разных энергиях кванта зондирующего света и разных плотностях энергии возбуждения.

$h\nu$, эВ: $\alpha - 2.583$, $\beta - 2.85$. Плотность энергии возбуждения, мДж/см^2 : 1 — 0.7, 2 — 3.0, 3 — 8.0. Штриховая кривая — аппаратная функция.

комбинации, измеренные в [3] по кинетике затухания межзонной люминесценции в микрокристаллах CdSe, составляют ≈ 3 нс. Поскольку в CdS межзонные переходы запрещены, рекомбинация происходит через примесные состояния (теоретически эффект рассмотрен в [4]). Поэтому следует ожидать, что радиационное время жизни неравновесных носителей для микрокристаллов CdS по порядку величины должно быть таким же.

При повышении плотности энергии возбуждения до ≈ 2 мДж/см² и $h\nu \approx E_g$, появляется быстрая компонента нелинейного просветления с временем релаксации ≈ 0.5 нс. Эта составляющая обладает достаточно коротким передним фронтом

б

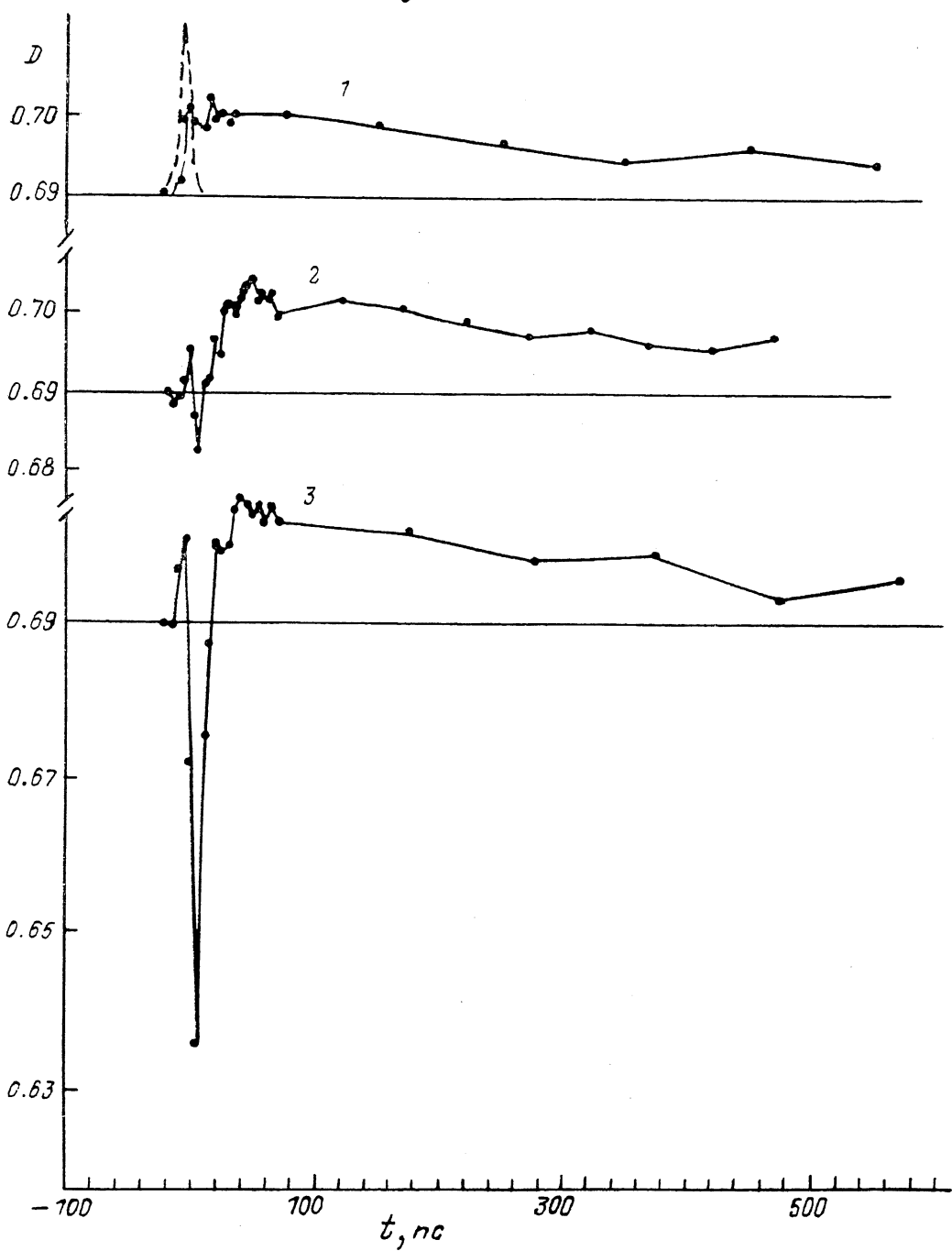


Рис. 1 (продолжение).

том ≈ 10 пс и неэкспоненциальным спадом. При дальнейшем увеличении уровня накачки амплитуда просветления увеличивается, а характерные времена рекомбинации существенно не изменяются.

Наблюдаемое уменьшение времени жизни фотовозбужденных носителей при увеличении уровня накачки связано прежде всего с увеличением их концентрации, а также с включением процессов оже-рекомбинации [3]. Увеличение пропускания образца в спектральной области незначительно выше энергии запрещенной зоны и обусловлено заселением уровней размерного квантования. Быстрая релаксация просветления при высоких уровнях возбуждения обеспечивается высокой скоростью рекомбинации электронно-дырочных пар.

Экспериментальная картина становится иной при изменении энергии кванта зондирующего света. При фиксированной мощности импульса накачки по мере увеличения $h\nu$ эффект просветления ослабевает, а при $h\nu \geq 2.75$ эВ начинает наблюдаться наведенное поглощение. На рис. 1, б представлены временные зависимости пропускания при энергии кванта $h\nu = 2.85$ эВ. При низком уровне накачки наблюдается только наведенное поглощение, однако увеличение плот-

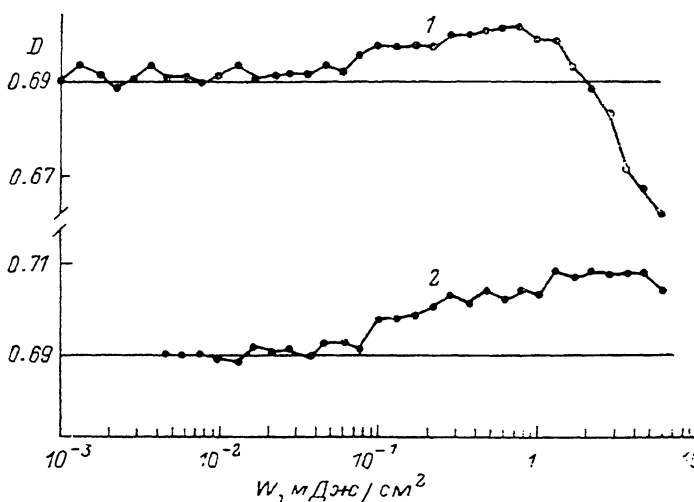


Рис. 2. Зависимость оптической плотности стекла с микрокристаллами CdS радиусом 120 \AA от плотности энергии возбуждения.

$h\nu = 2.85$ эВ. Задержка зондирующего импульса относительно возбуждающего, пс: 1 — 0, 2 — 300.

ности энергии возбуждения до нескольких мДж/см² приводит в этой области спектра к кратковременному переключению от состояния наведенного поглощения к просветлению, которое происходит на переднем фронте импульса накачки. Достигнув максимума за время, не превышающее 5 пс (аппаратурное разрешение), просветление релаксирует с характерным временем, которое в свою очередь с ростом энергии $h\nu$ уменьшается до значений ≈ 5 пс (рис. 1, б).

Авторы [6] также отмечали уменьшение времени релаксации нелинейного просветления по мере увеличения энергии кванта зондирующего света. В их эксперименте исследовалось пропускание на длине волны возбуждающего света в образцах стекла с микрокристаллами $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ с различными значениями x , т. е. с различной шириной запрещенной зоны. При разности $h\nu - E_g \approx 300$ мэВ релаксация нелинейного просветления неэкспоненциальна и может быть описана двумя постоянными времени: быстрой (≈ 250 фс) и медленной (≈ 80 пс). Наличие быстрой составляющей авторы связывают с охлаждением электронно-дырочной плазмы до температуры решетки.

Из рис. 1, б видно, что в нашем случае при $h\nu = 2.85$ эВ в зависимости от уровня накачки могут наблюдаться как наведенное поглощение, так и наведенное просветление с различными временами релаксации. Было исследовано изменение поглощения образца при увеличении плотности энергии накачки и различном временном положении возбуждающего импульса и зондирующего импульса с $h\nu = 2.85$ эВ (рис. 2). При совпадении по времени двух импульсов повышение уровня накачки сначала приводит к увеличению наведенного поглощения, однако при дальнейшем повышении плотности энергии, начиная

с 2 мДж/см², появляется наведенное просветление образца, резко зависящее от уровня возбуждения. При задержке зондирующего импульса относительно возбуждающего на 300 пс наблюдается лишь наведенное поглощение, незначительно увеличивающееся с ростом уровня накачки до $\cong 1$ мДж/см² и далее остающееся практически неизменным.

Причины такого изменения оптических свойств микрокристаллов вдали от края поглощения не совсем ясны. Эффект наведенного поглощения, по нашему мнению, связан с ренормализацией запрещенной зоны полупроводника вследствие электрон-фононного взаимодействия [7]. Кратковременное переключение из состояния наведенного поглощения к наведенному просветлению, по-видимому, обусловлено особенностями разогрева и охлаждения электронно-дырочной плазмы при возбуждении квантами с энергией, значительно превышающей ширину запрещенной зоны.

Таким образом, впервые обнаружено, что при действии импульса возбуждающего света в области $h\nu - E_g \gg kT$ сначала наблюдается наведенное поглощение образца вследствие ренормализации E_g , а затем — просветление, которое при уменьшении эффективной температуры электронно-дырочной плазмы быстро релаксирует и вновь переходит в поглощение. Наличие состояния наведенного поглощения и короткие времена переключения ($\cong 5$ пс) в состояние просветления и назад открывают перспективы использования стекол с микрокристаллами CdS в качестве быстродействующих управляющих элементов.

Список литературы

- [1] Ekimov A. I., Efros Al. L., Onushchenko A. A. // Sol. St. Commun. 1985. V. 56. N 11. P. 921—924.
- [2] Ymomoto J., Fukushima S., Kubodera K. // Opt. Lett. 1987. V. 12. P. 832—835.
- [3] Вандышев Ю. В., Днепровский В. С., Екимов А. И., Огороков Д. К., Попова Л. Б., Эфрос Ал. Л. // Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 46. В. 10. С. 393—396.
- [4] Иванов М. Г., Харченко В. А., Эфрос Ал. Л. // Матер. Всес. теор. конф. по физике полупроводников. Донецк, 1989. С. 36.
- [5] Dneprovskii V. S., Efros Al. L., Ekimov A. I., Klimov V. I., Kudryavtsev I. A., Novitsov M. G. // Sol. St. Commun. 1990. V. 74. N 7. P. 555—557.
- [6] Nuss M. C., Zinth W., Kaiser W. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 49. P. 1717—1720.
- [7] Rosler M., Zimmermann R. // Phys. St. Sol. (b). 1977. V. B83. N 1. P. 85—91.

Получена 10.09.1990
Принята к печати 9.10.1990