

01; 07

© 1992

НЕЛИНЕЙНОЕ ПРОПУСКАНИЕ
И ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ
В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ СИЛЛЕНИТОВ

А.А. Л и п о в с к и й, С.Э. Х а б а р о в

Фотоиндуцированное поглощение (ФИП) – это изменение коэффициента пропускания вещества под действием световой волны. Этот эффект был зарегистрирован в кристаллах силленитов [1]. Идеальные кристаллы сохраняют информацию о воздействии света лишь в течение времени, не превышающего времени жизни электронов в зоне проводимости. Однако наличие дефектов и примесей приводит к появлению дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне. В результате захвата ими электронов, возбуждаемых при освещении образцов либо с дополнительных уровней, либо из валентной зоны, возможно появление в спектрах кристаллов достаточно долговременных изменений, что и имеет место в реальных кристаллах силленитов [1]. Структура их энергетических уровней описана достаточно подробно [2, 3].

Упрощенная схема уровней, представляющих интерес для интерпретации процесса фотоиндуцированного поглощения, может быть проиллюстрирована рис. 1, а. Здесь 1 и 2 – не отдельные уровни, а группы уровней, они же являются ответственными и за эффекты, связанные с фотопроводимостью, 3 – зона проводимости, 4 – валентная зона.

Механизм ФИП в силленитах обусловлен увеличением заселенности уровней, находящихся на расстоянии, соответствующем энергии кванта зондирующего излучения с длиной волны λ_2 , от дна зоны проводимости. Тогда при распространении такого излучения оно будет поглощаться, возбуждая электроны с этих уровней. Очевидно, коэффициент поглощения при этом будет пропорционален населенности соответствующего уровня N_2 . Заброс электронов в зону проводимости осуществляется и при возбуждении глубоких примесных центров (группа уровней 1 с населенностью N_1) излучением засвета, имеющего длину волны λ_1 . Естественно, возбуждаться будут уровни, лежащие на соответствующем расстоянии от дна зоны проводимости. Возбужденные в зону проводимости электроны эффективно захватываются ловушками в тех же точках кристалла, где происходит их генерация. В дальнейшем за счет релаксации электроны распределяются на более глубокие уровни, попадая и на группу уровней 2. Таким образом, явление ФИП может быть схематически описано как процесс перераспределения электронов между уровнями 1 и 2 и зоной проводимости при воздействии на систему

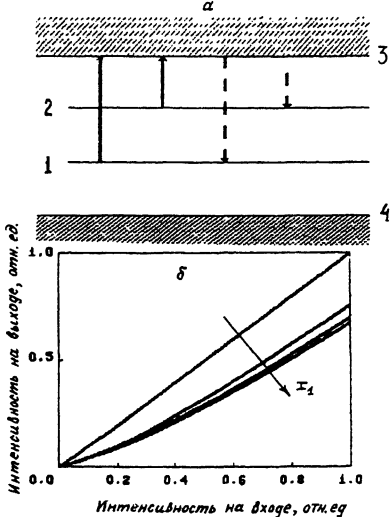


Рис. 1. а) Эквивалентная система уровней. б) Рассчитанная зависимость интенсивности света на выходе силленитной структуры от интенсивности света на входе при различных интенсивностях подсветки.

световых волн с длинами λ_1 и λ_2 . При использовании фиксированных длин волн вместо зоны проводимости удобно рассматривать эквивалентный уровень 3, так как времена релаксации электронов внутри зоны проводимости существенно меньше времен межуровневой и межзонной релаксации. Будем считать, что релаксация электронов с уровня 2 на уровень 1 (см. рис. 1, а) запрещена. Тогда процессы перезаселения уровней можно описать с помощью системы уравнений вида:

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = I_1 b_1 N_1 + I_2 b_2 N_2 - (a_1 + a_2) N_3,$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = a_2 N_3 - I_2 b_2 N_2, \quad (1)$$

$$N_1 + N_2 + N_3 = N.$$

Здесь N_1 , N_2 , N_3 и N — объемные плотности электронов на 1-м, 2-м, 3-м уровнях и общая плотность электронов соответственно, коэффициенты a_1 и a_2 характеризуют вероятность релаксации с уровня 3 на уровни 1 и 2 в единицу времени соответственно, коэффициенты b_1 и b_2 характеризуют вероятность возбуждения электронов с уровней 1 и 2 на уровень 3 под действием излучения единичной интенсивности в единицу времени соответственно

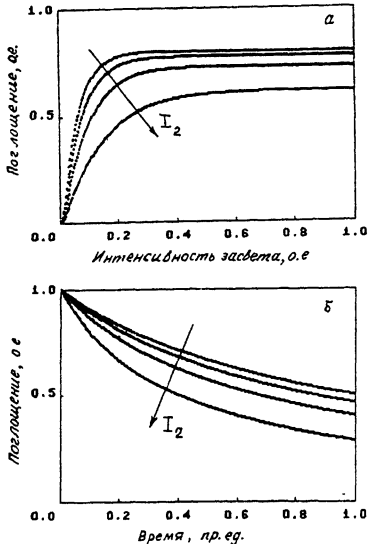


Рис. 2. а) Поглощение силленитной структуры в зависимости от интенсивности излучения подсветки I_1 при различных интенсивностях считывающего излучения I_2 . б) Временные зависимости поглощения предварительно проэкспонированного образца при различных интенсивностях считывающего излучения I_2 .

Вначале рассмотрим стационарное решение системы (1), соответствующее $\frac{\partial N_i}{\partial t} = 0$, $i = 1, 2, 3$. Будем интересоваться населенностью N_2 , определяющей величину индуцированного поглощения. Решение системы дает

$$N_2 = N \frac{I_1 b_1}{I_1 b_1 + \frac{a_1}{a_2} I_2 b_2 + \frac{b_1 b_2}{a_2} I_1 I_2} \quad (2)$$

Рассчитанная, согласно (1), зависимость, характеризующая нелинейность пропускания рассматриваемой структуры, связанную с обеднением уровня 2 при повышении интенсивности распространяющегося излучения с длиной волны λ_2 , представлена на рис. 1, б. Наблюдается хорошее совпадение формы зависимостей с полученной в работе [4].

Зависимости величины $\alpha = N_2 / N$, которая пропорциональна фотоиндуцированному поглощению, от интенсивностей I_1 и I_2 для различных ситуаций представлены на рис. 2, а. Наблюдается хорошее совпадение вида зависимостей с соответствующими экспериментальными, представленными в работе [5].

Для расчета временных зависимостей ФИП следует решить приведенную выше систему дифференциальных уравнений с учетом на-

чальных условий $N_2 = 0$, $N_3 = 0$ (образец предварительно непроэкспонирован) или $N_2 = N$, $N_3 = 0$ (образец предварительно проэкспонирован до максимальной заселенности уровня 2, все релаксационные процессы, связанные с экспонированием, прекратились). Выразив N_3 как

$$N_3 = \frac{1}{a_2} \left(\frac{\partial N_2}{\partial t} + I_2 b_2 N_2 \right)$$

и N_1 как (3)

$$N_1 = N - N_2 - \frac{1}{a_2} \left(\frac{\partial N_2}{\partial t} + I_2 b_2 N_2 \right),$$

получим из (1) дифференциальное уравнение второго порядка для населенности N_2 :

$$N_2'' + N_2' (a_1 + a_2 + I_1 b_1 + I_2 b_2) + N_2 (I_1 b_1 a_2 + I_2 b_2 a_1 + I_1 I_2 b_1 b_2) = NI_1 b_1 a_2. \quad (4)$$

Решения этого уравнения и будут описывать кинетику изменения индуцированного поглощения.

Вид уравнения (4) определяет решения вида

$$N = C_1 \exp \left[\left(\frac{-\beta + \lambda}{2} \right) t \right] + C_2 \exp \left[\left(\frac{-\beta - \lambda}{2} \right) t \right] + \delta / \gamma. \quad (5)$$

Здесь $\beta = a_1 + a_2 + I_1 b_1 + I_2 b_2$, $\gamma = I_1 b_1 a_2 + I_2 b_2 a_1 + I_1 I_2 b_1 b_2$, $\delta = NI_1 b_1 a_2$,

$$\lambda^2 = (a_1 + a_2)^2 + (I_1 b_1 - I_2 b_2)^2 + 2(I_1 b_1 - I_2 b_2)(a_1 + a_2) > 0.$$

Ситуации, когда предварительная экспозиция отсутствует, соответствует

$$C_1 = -\frac{\delta}{2\gamma} \left(1 + \frac{\beta}{2\lambda} \right), \quad C_2 = -\frac{\delta}{2\gamma} \left(1 - \frac{\beta}{\lambda} \right). \quad (6)$$

Ситуации с предварительной экспозицией соответствует

$$C_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{N\beta}{\lambda} - \frac{\beta\delta}{\gamma\lambda} + N - \frac{\delta}{\gamma} - \frac{2I_2 b_2 N}{\lambda} \right), \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left(N - \frac{\delta}{\lambda} - \frac{N\beta}{\lambda} + \frac{\beta\delta}{\gamma\lambda} + \frac{2I_2 b_2 N}{\lambda} \right).$$

Подстановка (6) и (7) в (5) позволяет рассчитать ход временных зависимостей фотоиндуцированного поглощения при одновременном воздействии зондирующей и засвечивающей световых волн.

Результаты расчетов для одной из возможных ситуаций представлены на рис. 2, б. В этом случае также наблюдается совпадение вида соответствующих кривых с экспериментальными временными зависимостями ФИП, представленными в работе [5].

Таким образом, анализ простейшей системы уравнений (1) позволяет получить зависимости, совпадающие с экспериментальными, что говорит о пригодности использованной модели.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Wardzynski W., Lukasięwicz T., Zmiga J. // Opt. Commun. 1979. V. 30. N 2. P. 203-205.
- [2] Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. 270 с.
- [3] Гудаев О.А., Гусев В.А. Силлениты: энергетическая структура и природа центров фоточувствительности. Инст. автоматики и электрометрии СО АН СССР, Препр. № 248, 1984. 38 с.
- [4] Абусев В.М., Леонов Е.И., Липовский А.А., Хабаров С.Э. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 20. С. 1240-1243.
- [5] Абусев В.М., Леонов Е.И., Липовский А.А., Хабаров С.Э. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 11. С. 2181-2187.

Поступило в Редакцию
23 декабря 1991 г.