

УДК 535.211

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НАНОГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ С РАЗМЫТЫМ ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

В.И. Иванов, С.Р. Симаков

*ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»
680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47
tneh@festu.khv.ru*

Аннотация: Проведен анализ голографической чувствительности наногетерогенной среды с размытым фазовым переходом. Показано, что максимальное значение чувствительности по энергии достигается при конечной ширине фазового перехода.

Ключевые слова: голографическая чувствительность, фазовый переход металл-полупроводник, диоксид ванадия.

Наногетерогенные среды (НГС) достаточно давно используются для записи оптической информации и в динамической голографии [1-3]. В общем случае НГС состоит из дисперсионной среды (матрицы) и дисперсной фазы (наночастиц), включающей одну или несколько компонент. Изменение оптических свойств НГС под действием излучения может быть обусловлено модуляцией показателя преломления, коэффициента поглощения или экстинкции (рассеяния). Можно выделить концентрационные механизмы нелинейности среды, в которых в результате светоиндуцированных эффектов происходит изменение концентрации наночастиц. Такими примерами в жидкофазных средах являются электрострикционный [4-6] и термодиффузионный [6-9] эффекты. К отдельному классу относятся НГС со статическими неоднородностями, в которых и матрица и дисперсная фаза находятся в твердом состоянии [2, 10-11].

В данной статье проанализирована голографическая чувствительность твердофазной НГС с размытым фазовым переходом (ФП). Примером такой среды может служить двуокись ванадия в области фазового перехода полупроводник – металл (ФППМ) [10]. В пленках VO_2 ФППМ обычно значительно размыт по температуре. Размытие ФП в пленке было связано в [10] с сосуществованием полупроводниковой и металлической фаз, которое является следствием того, что в окислах ванадия происходит ФП первого рода и каждая из фаз может независимо существовать по обе стороны от точки ФП. Обычно предполагается, что наиболее вероятной причиной сосуществования двух фаз при данной температуре является наличие механических напряжений и в особенности неоднородностей по составу, которые могут довольно значительно изменять температуру ФП. Важнейшее преимущество VO_2 , неоднократно

продемонстрированное целым рядом исследователей – технологичность и, соответственно, управляемость свойствами среды (например, варьированием технологических условий [10]). Диапазон технологического управления свойствами пленок двуокиси ванадия можно расширить, используя гетерогенную среду, состоящую из диэлектрической матрицы (например, прозрачного в ИК области спектра фторопласта) и микрочастиц (с объемом дисперсной фазы Φ_0) среды с ФППМ. Данная среда позволяет реализовывать объемные голограммы (при $\Phi_0 \ll 1$), что невозможно для чистого VO_2 из-за большого коэффициента поглощения. Такие среды экспериментально реализованы в [12, 13], там же описаны их оптические свойства в спектральном интервале 0,4–11 мкм и представлены результаты численного расчета дифракционной эффективности композитных пленок с наночастицами VO_2 . Для анализа взаимосвязи параметров ФППМ и голографической чувствительности рассмотрим, согласно [10], модель гетерогенной среды, состоящей из микрокристаллитов, имеющих различную температуру ФППМ. Тепловая нелинейность среды в окрестности ФППМ обусловлена размытием по температуре фазового перехода, которое обеспечивается сосуществованием полупроводниковых и металлических фаз в тонкопленочном образце [10]. Увеличение температуры образца под действием падающего излучения приводит, в результате ФППМ, к росту объемной доли металлической фазы, вызывая соответствующее изменение оптических констант среды.

В рассматриваемой полуфеноменологической модели гетерогенной среды микрочастицы дисперсной фазы имеют различную температуру ФППМ T_f . В предположении гауссова распределения критических температур T_f (аналогично [10]) имеем для доли дисперсной фазы, испытавшей ФП:

$$f_2 = (\sqrt{\pi} \Delta T_p)^{-1} \int_0^T \exp\left[-(T_c - T_{f0})^2 / \Delta T_p^2\right] dT_c, \quad (1)$$

где ΔT_p – полуширина ФППМ, T_{f0} – средняя критическая температура. Коэффициент эффективной кубичной нелинейности n_2 находим из выражения [2]:

$$n_2 = (dn^*/df_2)(df_2/dI), \quad (2)$$

где n^* – показатель преломления НГС, I – интенсивность излучения. Рассмотрим случай чисто фазовой голограммы. Решение одномерной тепловой задачи (в пренебрежении тепловыми потоками по глубине слоя) дает для квазистационарного режима ($t > \tau_p$):

$$n_2 = (dn^*/df_2)(df_2/dT)\alpha\tau_p(c_p\rho)^{-1}, \quad (3)$$

где α – коэффициент поглощения среды ($\alpha l_0 \ll 1$, l_0 – толщина слоя среды), c_p и ρ – удельные теплоемкость и плотность среды, $\tau_p = (\kappa K^2)^{-1}$ – время релаксации тепловой голограммы, κ – температуропроводность среды, $K = 2\pi/\Lambda$, Λ – период интерференционной картины.

Голографическая чувствительность среды по энергии (E – плотность энергии записывающего излучения) [2]:

$$N_{2E} = 2\pi (dn^*/df_2)(df_2/dE)\lambda^{-1}. \quad (4)$$

Максимум n_2 и N_{2E} достигается вблизи $T \approx T_{f_0}$, где для оценки имеем:

$$dn^*/df_2 \approx \Delta n^* \Phi_0, \quad (5)$$

$$df_2/dT \approx \Delta T_p^{-1}, \quad (6)$$

где Δn^* – разность показателей преломления вещества дисперсной фазы до и после ФП. Из (4) получаем оценку:

$$N_{2E} = 2\pi \Delta n^* \Phi_0 (\lambda c_p \rho \Delta T_p)^{-1}. \quad (7)$$

Как видно из (7), параметр стремится к бесконечности при $\Delta T_p \approx 0$, что связано с пренебрежением в оценке скрытой теплотой ФП. Для малой ширины ФП учтем удельную теплоту λ_f . Тогда выражение (7) будет выглядеть как:

$$N_{2E} = \frac{2\pi \lambda^{-1} \Delta n^* \Phi_0 (df_2/dT)}{\rho_m c_m + \Phi_0 (\rho_2 c_2 f_2 + \rho_1 c_1 (1 - f_2) + \rho_1 \lambda_f (df_2/dT))}, \quad (8)$$

где ρ_1, ρ_2 – плотности вещества дисперсной фазы до и после ФП, ρ_m и c_m – плотность и удельная теплоемкость дисперсионной среды. Из (8) видно, что предельная чувствительность по энергии достигается уже при конечной ширине ФП $\Delta T_p^{\min} \approx 0$:

$$N_{2E}^{\max} \approx 2\pi \lambda^{-1} \Delta n^* (\rho_1 \lambda_f)^{-1}, \quad \Delta T_p^{\min} \approx \Phi_0 \rho_1 \lambda_f (\rho_m c_m)^{-1}. \quad (9)$$

Таким образом, уменьшение ширины ФП приводит к росту чувствительности только до определенного предела – до ΔT_p^{\min} , дальнейшее уменьшение размытости ФП не приводит к увеличению N_{2E} . Для максимальной чувствительности по энергии, подставляя экспериментальные значения характеристик VO_2 для $\Phi_0 = 0,1$ [10], получаем из (9): $\Delta T_p^{\min} \approx 1,5$ К, $N_{2E}^{\max} \approx 46$ см²/Дж.

Полученные значения голографической чувствительности сопоставимы с величинами для НГС с концентрационными механизмами записи. Учитывая достоинства твердотельных нанокompозитных сред, можно отнести рассмотренный тип сред к перспективным для применения в голографии [14, 15].

Библиографический список:

1. **Иванов, В.И.** Перспективные среды для динамической голографии / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец // Вестник ДВО РАН. – 2003. – № 1. – С. 93-97.
2. **Ахманов, С.А.** Новые физические принципы оптической обработки информации / С.А. Ахманов, М.А. Воронцов. – М.: Наука, 1990. – 400 с.
3. **Иванов, В.И.** Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм: монография / В.И. Иванов. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 142 с.
4. **Иванов, В.И.** Электрострикционный механизм самовоздействия излучения в жидкости с наночастицами / А.И. Ливашвили, К.Н. Окишев // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия «Физика». – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 58-60.
5. **Иванова, Г.Д.** Динамические голограммы в наносuspензии / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // Физико–химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун–т, 2014. – Вып. 6. – С. 122-125.
6. **Иванова, Г.Д.** Динамические голограммы в жидкофазной дисперсной среде / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9 (Часть 10). – С. 2164-2168.
7. **Иванов, В.И.** Динамические голограммы в микрогетерогенных жидкофазных средах / В.И. Иванов, А.И. Ливашвили, А.И. Лобов, С.Р.Симаков // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 9. – С. 26-27.
8. **Иванов, В.И.** Самовоздействие гауссова пучка излучения в слое жидкофазной микрогетерогенной среды / В.И. Иванов, А.И. Ливашвили // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. – № 8. – С. 751-752.
9. **Иванов, В.И.** Термодиффузионный механизм записи амплитудных динамических голограмм в двухкомпонентной среде / В.И. Иванов, К.Н. Окишев // Письма в Журнал технической физики. – 2006. – Т. 32. – Вып 22. – С. 22-25.
10. **Бугаев, А.А.** Фазовый переход металл-полупроводник и его применение / А.А. Бугаев, Б.П. Захарченя, Ф.А. Чудновский. – Л.: Наука, 1979. – 220 с.
11. **Иванов, В.И.** Фотоиндуцированные изменения оптических констант в халькогенидных стеклообразных полупроводниках / В.И. Иванов, С.Р. Симаков // Физико–химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун–т, 2014. – Вып. 6. – С. 116-121.
12. **Остросаблина, А.А.** Оптические свойства управляемых интерферометров на основе композитных слоев с наночастицами диоксида ванадия / А.А. Остросаблина, А.И.Сидоров // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 7. – С. 3-9.
13. **Остросаблина, А.А.** Нелинейно–оптические свойства толстых композитных сред с наночастицами диоксида ванадия. I. Самодефокусировка излучения видимого и ближнего ИК диапазона / А.А. Остросаблина, А.И.Сидоров // Оптический журнал.– 2005. – Т.72. – № 7. – С. 36-41.
14. **Иванов, В.И.** Микрогетерогенные среды для динамической голографии / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – С. 2580-2583.
15. **Ivanov, V.I.** Efficiency and dynamic range of nonlinear reflection of a four-wavelength mixture of radiation / V.I. Ivanov, S.R Simakov // Russian Physics Journal. – 2001. – V. 44. – № 1. – P. 117-118.