

07;12

## О применении голографической интерферометрии для оптического контроля поверхности твердого тела

© Г.Н. Жижин, А.К. Никитин, Т.А. Рыжова, А.П. Логинов

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,  
Москва  
Российский университет дружбы народов, Москва  
E-mail: alnikitin@sci.pfu.edu.ru

Поступило в Редакцию 26 апреля 2004 г.

Предложен новый оптический метод исследования переходного слоя поверхности твердого тела, отличающийся, с одной стороны, высокой точностью, присущей голографической интерферометрии, а с другой стороны — высокой чувствительностью, характерной для микроскопии поверхностных электромагнитных волн. Выполнено численное моделирование способа для монохроматического излучения видимого диапазона.

**1. Введение.** Метод голографической интерферометрии (ГИ) широко применяется для исследования быстропротекающих процессов в объемных образцах [1]. Основным достоинством ГИ (по сравнению с классической интерферометрией) является свойство полной дифференциальности записи искажений волнового фронта. Это качество обусловлено тем, что в классическом случае интерферируют световые волны, существующие в один и тот же момент времени, но разделенные в пространстве, а в ГИ — интерферируют волны, проходящие по одному и тому же пути, но в разное время. Такая особенность ГИ позволяет регистрировать только те искажения волнового фронта световой волны, которые возникли за счет ввода на пути волны объекта исследований. Искажения же, вносимые деталями схемы интерферометра или смотровыми окнами, не регистрируются на интерферограмме, поскольку они присутствуют в обеих интерферирующих световых волнах. Свойство дифференциальности ГИ позволяет повысить точность измерений и снизить требования, предъявляемые к качеству используемых оптических элементов и стабильности в ходе эксперимента.

Конечная цель ГИ обычно состоит в получении информации о малых вариациях объемных свойств объекта, которая содержится в интерференционной картине, наложенной на мнимое изображение объекта, образованное восстановленной предметной волной. При визуальном наблюдении интерференционной картины точность измерений ограничена величиной в 0.5 полосы, а при их фотографировании — десятками и даже сотыми долями полосы [1].

Известны также попытки применения ГИ для изучения микроскопических деформаций тел и физико-химических процессов на их поверхности [2,3]. Однако в ходе этих экспериментов было установлено, что точность ГИ-измерений недостаточно высока для однозначной интерпретации результатов при контроле сверхтонких переходных слоев, формируемых на поверхности.

В данной работе мы предлагаем новую методику выполнения ГИ переходного слоя поверхности твердого тела, предполагающую возбуждение зондирующим излучением поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) на контролируемом участке поверхности [4]. Применение методики позволит существенно повысить точность измерений, поскольку она предполагает использование ГИ при сохранении высокой чувствительности, характерной для ПЭВ-микроскопии [5,6].

**2. Особенности фотонного возбуждения и детектирования ПЭВ, а также применение ПЭВ в оптической микроскопии.** ПЭВ представляет собой связанное образование волны свободных зарядов на поверхности твердого тела с отрицательной действительной частью диэлектрической проницаемости и неоднородной  $p$ -поляризованной электромагнитной волны. Поле ПЭВ затухает по экспоненте как при удалении в обе стороны от поверхности, так и вдоль направления распространения волны. Аналогом ПЭВ в радиодиапазоне являются волны Ценнеке–Зоммерфельда, а в ИК диапазоне — моды Фано.

Фазовая скорость ПЭВ меньше скорости распространения света в окружающей среде, поэтому для их фотонного возбуждения в ПЭВ-микроскопии применяют метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Возбуждение ПЭВ сопровождается усилением напряженности поля падающей волны на  $2 \div 3$  порядка и носит резонансный характер, так как поверхность образца является открытым резонатором. Поскольку основная доля энергии поля ПЭВ переносится в приповерхностной области, то характеристики ПЭВ (длина распространения, фазовая скорость, распределение поля) определяются свойствами по-

верхности и ее переходного слоя. Информация о характеристиках ПЭВ, а следовательно, и о поверхности, содержится в отраженном излучении, что и обусловило возможность применения ПЭВ (называемых в случае проводящих образцов поверхностными плазмонами) во всех основных методах оптометрии [6].

Наряду с усилением напряженности поля падающей волны возбуждение ПЭВ сопровождается уменьшением интенсивности и скачком фазы отраженного излучения [4–6], поэтому основными методами регистрации возбуждения ПЭВ в отраженном излучении являются амплитудный и фазовый.

ПЭВ эффективно применяют для повышения чувствительности и вертикальной разрешающей способности оптической микроскопии (разновидностью которой фактически является и ГИ) [7]. Разработан ряд способов реализации микроскопии, предполагающих возбуждение ПЭВ на поверхности образца зондирующим излучением [6]. Названия способов соответствуют регистрируемым характеристикам отраженного излучения.

В амплитудной ПЭВ-микроскопии, предложенной в 1987 г., неоднородности поверхности обнаруживают по вариациям интенсивности отраженного излучения, обусловленным различной эффективностью возбуждения ПЭВ на чистых и загрязненных участках образца [8].

В фазовой ПЭВ-микроскопии, предложенной в 1991 г., о неоднородностях поверхности образца судят по изменениям фазы излучения в отраженном пучке [9]. Неоднородности поверхности в фазовой ПЭВ-микроскопии воспроизводятся в виде искривлений полос интерференционной картины, наблюдаемой через обычный оптический микроскоп на экране в области пересечения предметного и опорного пучков (рис. 1). Идея фазовой ПЭВ-микроскопии была использована при создании особо чувствительных оптических датчиков внешних воздействий [10].

В эллипсометрической ПЭВ-микроскопии регистрируют вариации как интенсивности, так и фазы отраженного  $p$ -поляризованного излучения, что обеспечивает получение более полной информации о распределении неоднородностей на поверхности образца [11].

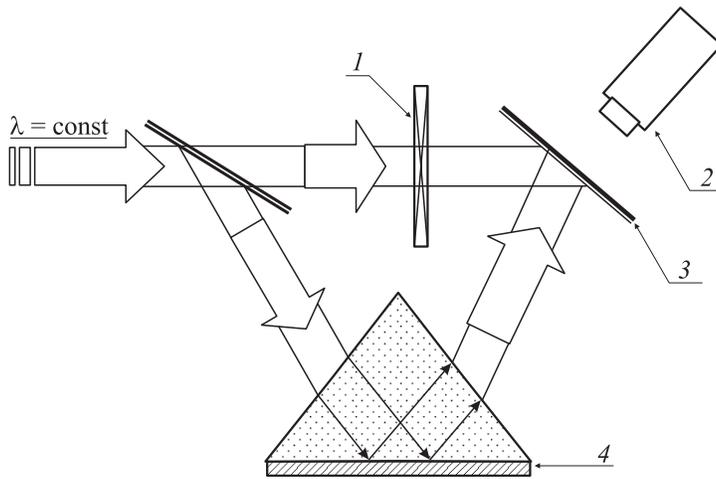
Перечисленные способы выполнения ПЭВ-микроскопии характерны высокой вертикальной разрешающей способностью (до десятых долей нанометра) и чувствительностью к внешним воздействиям, но точность измерений при этом недостаточно высока. Это объясняется в основном различием траекторий лучей предметного пучка, отраженных от

стандартного (эталонного) и контролируемого участка поверхности, что приводит к воздействию неоднородностей и изменений параметров элементов измерительной установки на качество изображения.

### **3. Применение ПЭВ в голографической интерферометрии.**

Конечно, специалисты, занимавшиеся голографией, не могли обойти вниманием ПЭВ, возбуждение которых, происходит резонансным образом и сопровождается многократным усилением напряженности поля падающей волны. Ведь эти свойства ПЭВ очень эффективно можно использовать как при записи голограмм, так и при их восстановлении. Уже в 1969 г., вскоре после первых экспериментов по возбуждению и детектированию ПЭВ американский физик Брингдаль [12] предложил ряд схем для голографической записи изображения при возбуждении ПЭВ опорным, либо предметным пучком света. Эти схемы позволяют получать трехмерные интерферограммы в слое фоторезиста, нанесенного на прозрачную металлическую пленку, осажденную на плоскую стеклянную пластинку. При записи голограммы пластинка своей свободной поверхностью приводится посредством иммерсионной жидкости в оптический контакт с призмой НПВО, через которую в пленке одним из пучков света возбуждают ПЭВ. Согласно [12], использование ПЭВ для записи или восстановления голограмм имеет следующие положительные моменты: 1) можно получать очень тонкие плоские голограммы, толщина которых определяется глубиной проникновения ПЭВ в фоторезист ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ); 2) вследствие резонансного характера возбуждения ПЭВ (по углу падения  $\theta$  и частоте  $\omega$  излучения) восстановление изображения можно производить белым светом (необходимые  $\theta$  и  $\omega$  будут выбраны автоматически); 3) восстанавливать изображение можно и монохроматическим светом с любой  $\omega$ , выбрав для этого угол  $\theta$ , обеспечивающий возбуждение ПЭВ в пленке под слоем фоторезиста.

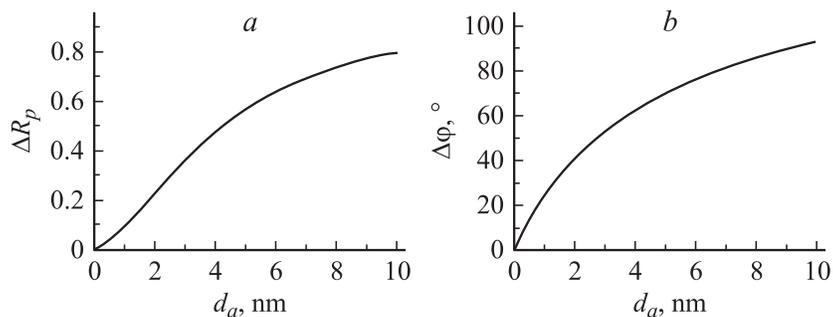
Идея использования ПЭВ в голографии была развита в работах [13,14]. Причем приоритет был отдан применению ПЭВ для восстановления изображения, поскольку при этом достигаются следующие положительные эффекты: 1) излучение восстанавливающего пучка, возбуждая ПЭВ, претерпевает полное внутреннее отражение от основания призмы и не создает фоновых помех для наблюдателя, находящегося по другую сторону призмы; 2) яркость и контраст изображения (вследствие повышения дифракционной эффективности) заметно улучшаются; 3) такой метод восстановления изображений можно применить для создания



**Рис. 1.** Схема фазового ПЭВ-микроскопа. 1 — регулируемый поглотитель, 2 — микроскоп, 3 — экран, 4 — образец.

плоских голографических экранов, используя для возбуждения ПЭВ ТМ-моды планарного металлодиэлектрического оптического волновода.

Наше предложение состоит в том, чтобы применить метод ГИ для исследования переходного слоя поверхности твердого тела, возбуждая на ней ПЭВ излучением предметного пучка при записи голограммы. Однако ни одна из схем, приведенных в [12], не пригодна для этого. Дело в том, что исследуемый слой и слой фоторезиста должны находиться одновременно с одной стороны от поверхности. Если на образец (металлическую пленку) нанести фоторезист, то он закроет доступ к поверхности. Если же слой фоторезиста наносить на пленку после формирования переходного слоя, то не удастся реализовать ни одну из методик выполнения ГИ: ни метод реального времени (МРВ), ни метод двойной экспозиции (МДЭ). Поэтому для исследования переходного слоя методом ГИ в формировании голограммы ПЭВ должны участвовать не непосредственно, а косвенно — через предметный пучок, возбуждающий ПЭВ. По сути, запись голограммы в этом случае следует осуществлять по схеме выполнения фазовой ПЭВ-микроскопии (рис. 1), заменив в ней экран на голографическую фотопластинку.



**Рис. 2.** Расчетные зависимости величин  $\Delta R_p$  (a) и  $\Delta\varphi$  (b) от толщины  $d_a$  слоя LiF, нанесенного на медную пленку толщиной 45.5 nm при возбуждении в ней ПЭВ излучением с  $\lambda = 633 \text{ nm}$  через призму НПВО с  $n_p = 1.51$ .

Восстанавливать же полученную таким образом голограмму можно либо посредством ПЭВ, либо объемной волной.

Предложенная методика записи голограмм переходного слоя позволит выполнять сравнение интерферограмм на различных стадиях контролируемого процесса на поверхности образца путем применения МДЭ или МРВ. Эта методика сочетает в себе достоинства как ПЭВ-микроскопии (высокую чувствительность и вертикальную разрешающую способность), так и ГИ (полная дифференциальность записи искажений волнового фронта, возможность качественно нового уровня изучения динамических процессов, используя приемы МДЭ и МРВ).

В качестве примера рассмотрим возможность исследования предложенным методом неоднородностей слоя LiF (с показателем преломления  $n_a = 1.3$ ), нанесенного на поверхность медной пленки с оптическими постоянными  $n_f = 0.145$  и  $k_f = 3.50$ , при использовании призмы НПВО с  $n_p = 1.51$  и излучения с длиной волны  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  для возбуждения в этой структуре ПЭВ. Расчетные зависимости приращений коэффициента отражения  $\Delta R_p$  и фазы  $\Delta\varphi$   $p$ -составляющей излучения при нанесении на пленку слоя LiF от его толщины  $d_a$  представлены на рис. 2. Вычисления выполнены при толщине медной пленки  $d = 45.5 \text{ nm}$  и угле падения  $\theta = 44^\circ 09'$ . Учитывая, что точность измерения  $R_p$  не хуже 1%, а величины  $\Delta\varphi$  —  $10^{-2} \text{ rad}$ , из приведенных графиков  $\Delta R_p(d_a)$  и  $\Delta\varphi(d_a)$  следует, что метод ГИ с возбуждением

ПЭВ предметным пучком позволяет обнаруживать и идентифицировать вариации толщины слоя LiF величиной менее 1 nm. При этом, согласно [7], чувствительностью величин  $\Delta R_p$  и  $\Delta\varphi$  можно управлять, изменяя угол падения  $\theta$  или эффективность возбуждения ПЭВ при записи голограммы.

**4. Заключение.** Таким образом, в работе предложен новый оптический метод исследования переходного слоя поверхности твердого слоя посредством поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ), сочетающий достоинства голографической интерферометрии и ПЭВ-микроскопии. Метод особенно перспективен для исследования динамических процессов в переходном слое поверхности.

## Список литературы

- [1] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 287 с.
- [2] *Ashton R.A., Slovin D., Gerritsen H.J.* // Appl. Optics. 1971. V. 10. N 2. P. 440–441.
- [3] *Петров К.Н., Пресняков Ю.П.* // Оптика и спектр. 1978. Т. 44. В. 2. С. 309–311.
- [4] *Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / Под ред. В.М. Аграновича и Д.Л. Миллса.* М., 1985. 525 с.
- [5] *Либенсон М.Н., Диденко И.А.* // Оптический вестник. 1992. № 5, 6. С. 1–2.
- [6] *Никитин А.К.* Плазмонная оптометрия. Автореф. дис. д.т.н. М.: Научно-технол. центр уникального приборостроения РАН, 2002. 28 с.
- [7] *Никитин А.К., Рыжова Т.А.* Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 9. С. 14–17.
- [8] *Yeatman E.M., Ash E.A.* // Electronics Letters. 1987. V. 23. N 20. P. 1091–1092.
- [9] *Никитин А.К., Тищенко А.А.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 11. С. 76–79.
- [10] *Кабашин А.В., Никитин П.И.* // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 7. С. 671–672.
- [11] *Никитин А.К.* // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 11. С. 99–100.
- [12] *Bryngdahl O.* // JOSA. 1969. V. 59. N 12. P. 1645–1650.
- [13] *Cowan J.J.* // Optics Communications. 1974. V. 12. N 4. P. 373–378.
- [14] *Maruo S., Nakamura O., Kawata S.* // Applied Optics. 1997. V. 36. N 11. P. 2343–2347.