

07;11;12

РЕГУЛИРОВАНИЕ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЯ И ГЛУБИНЫ РЕЗКОСТИ В ПЭВ-МИКРОСКОПИИ

© А.К.Никитин, Т.А.Рыжова

Микроскопия поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) — одно из новых направлений оптической микроскопии со сверхвысокой разрешающей способностью (наряду с дифференциальной фазовой оптической микроскопией [1] и ближнепольной растровой оптической микроскопией [2]) [3–5]. В настоящее время ПЭВ-микроскопия позволяет получать изображение со сверхвысоким разрешением только в вертикальном (относительно поверхности образца) направлении; латеральное разрешение этого вида микроскопии превышает дифракционный предел. Однако существенными достоинствами ПЭВ-микроскопии являются: 1) простота реализации; 2) возможность получения мгновенных снимков со сверхвысоким разрешением (до 1 нм) сравнительно больших площадей плоских поверхностей проводящих и полупроводящих образцов.

ПЭВ-микроскопия основана на резонансном возбуждении ПЭВ на исследуемой поверхности образца методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) по схеме Кречманна (для прозрачных образцов) или схеме Отто (для непрозрачных образцов). Сколлимированное р-поляризованное монохроматическое излучение направляют на основание призмы НПВО, расположенной параллельно поверхности образца на расстоянии $h \leq \lambda$, под углом падения φ , равным или близким к углу возбуждения ПЭВ $\varphi_0 > \varphi_{кр}$, где $\varphi_{кр}$ — критический угол для границы “призма — окружающая среда”. Возбуждение ПЭВ приводит к нарушению явления полного внутреннего отражения и зависимости коэффициента отражения R_p от эффективности возбуждения ПЭВ. Если отражающая (она же волноведущая) структура однородна, то эффективность возбуждения ПЭВ на всем освещенном участке одинакова, что соответствует постоянному значению R_p по всему поперечному сечению пучка отраженного излучения. При наличии в отражающей структуре (составной частью которой является исследуемая поверхность) неоднородности эффективность возбуждения ПЭВ на участке с неоднородностью отлична от эффективности возбуждения ПЭВ на однородных участ-

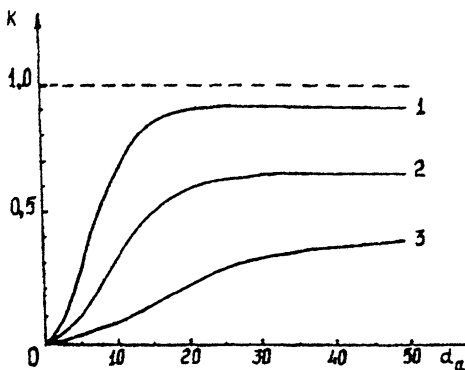


Рис. 1. Расчетные зависимости $K(d_a)$ при различных λ : кривая 1 — $\lambda = 0.60 \mu\text{м}$; 2 — $\lambda = 0.58 \mu\text{м}$; 3 — $\lambda = 0.55 \mu\text{м}$.

ках, что обуславливает соответствующую вариацию R_p , которая фиксируется с помощью традиционного оптического микроскопа или иных регистрирующих устройств. Однако неоднородность может быть настолько значительной, что при выбранном угле падения $\varphi \approx \varphi_0$ (где φ_0 — угол возбуждения ПЭВ на однородном участке) возбуждения ПЭВ на участке с неоднородностью может и не произойти. Для такого участка $R_p \approx 1$ и дифференциация неоднородностей становится невозможной.

Таким образом, за сверхвысокую вертикальную разрешающую способность ПЭВ-микроскопии приходится расплачиваться малой глубиной резкости, что не позволяет визуализировать разновеликие объекты. В связи с этим возникает задача регулирования глубины резкости и контраста изображения в ПЭВ-микроскопии.

Анализ дисперсионного уравнения ПЭВ и аналитического выражения коэффициента отражения для многослойной структуры показывает, что регулирование контраста K и глубины резкости изображения Δd в ПЭВ-микроскопии, определяемых угловой шириной и формой резонансного провала на зависимости $R_p(\varphi)$, обусловленного возбуждением ПЭВ, можно осуществить тремя путями: 1) изменением длины волны λ излучения, возбуждающего ПЭВ; 2) изменением показателя преломления $n_{\text{ср}}$ окружающей среды; 3) внесением в поле ПЭВ, возбуждаемых на исследуемой поверхности, плоскогранного зонда, поперечный размер которого больше размера неоднородности (зонд может быть выполнен из любого материала, оптические свойства которого отличны от оптических свойств окружающей среды). Отметим, что в схеме Отто роль зонда выполняет призма НПВО, используемая для возбуждения ПЭВ.

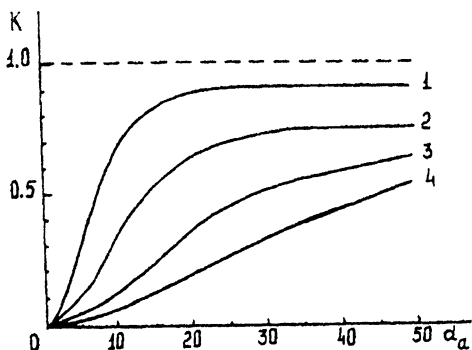


Рис. 2. Расчетные зависимости $K(d_a)$ при $\lambda = 0.60$ мкм и размещении образца в: а — воздухе с внесенным в поле ПЭВ на расстояние h от поверхности образца медным зондом: кривая 1 — $h \Rightarrow \infty$, 2 — $h = 0.4$ мкм, 3 — $h = 0.1$ мкм; б — воде при $h \Rightarrow \infty$.

На примере конкретных структур было выполнено компьютерное моделирование всех трех возможностей регулирования K и Δd . В качестве объекта визуализации использовалась решетка из LiF ($n_a = 1.39$) толщиной d_a , нанесенная на поверхность медной пленки с показателем преломления n_1 и показателем поглощения k_1 толщиной 50 нм (схема Кречманна). Значения оптических постоянных n_1 и k_1 взяты из [6]. При этом контраст изображения рассчитывался по формуле

$$K = (R - R_{\min}) / (R_{\max} + R_{\min}) \approx (R - R_{\min}) / (1 + R_{\min}),$$

где R_{\min} — коэффициент отражения по мощности p -поляризованного излучения на данной λ при $\varphi = \varphi_0$ и $d_a = 0$ (соответствует минимуму резонансного провала на зависимости $R_p(\varphi)$ при $d_a = 0$); R_{\max} — значение R_p за пределами резонансного провала (можно считать $R_{\max} \approx 1$); R — текущее значение R_p при $\varphi = \varphi_0$ и $d_a \neq 0$.

На рис. 1 приведены расчетные зависимости $K(d_a)$ для различных λ . Анализ хода этих зависимостей показывает, что при $\lambda = 0.6$ мкм контраст изображения достигает своего максимального значения 0.90 при $d_a = 20$ нм. Это означает, что при выполнении ПЭВ-микроскопии в этом случае слой LiF с $d_a > 20$ нм неотличимы друг от друга. При использовании излучения с $\lambda = 0.58$ мкм глубина резкости (т.е. возможность дифференциации толщины слоя LiF) повышается до 30 нм, а при $\lambda = 0.55$ мкм — до 50 нм. Увеличение глубины резкости сопровождается уменьшением контраста изображения. Отличие максимального значения K от единицы объясняется отлличием от нуля R_{\min} , что выполняется лишь при оптимальных условиях возбуждения ПЭВ.

На рис. 2 приведены расчетные кривые $K(d_a)$ при размещении образца в воздухе ($n_{cp} = 1.00$) и воде ($n_{cp} = 1.33$) и использовании излучения с $\lambda = 0.6$ мкм (кривые 1 и 4 соответственно). Видно, что при помещении образца в воду глубина резкости возрастает более чем в два раза и превышает 50 нм.

Результаты численного моделирования изменения K и Δd путем размещения в поле ПЭВ на расстоянии h от поверхности образца медного зонда с плоской поверхностью при $\lambda = 0.6$ мкм представлены также на рис. 2 (кривые 1–3). Видно, что для увеличения глубины резкости Δd до 50 нм необходимо приблизить медный зонд к поверхности образца на расстояние не менее 0.1 мкм.

Таким образом, в работе показано, что есть не менее трех возможностей регулирования глубины резкости и контраста изображения в ПЭВ-микроскопии: изменение длины волны излучения, возбуждающего ПЭВ; изменение оптических свойств окружающей среды; внесение в поле ПЭВ зонда с плоской поверхностью.

Список литературы

- [1] *Божевольный С.И., Золотов Е.М., Постников А.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 12. С. 1–5.
- [2] *Heinzelmann H., Pohl D.W.* // Appl. Phys. (A). 1994. V. 59. N 2. P. 89–101.
- [3] *Rothenghausler B., Knoll W.* // Nature. 1988. V. 332. N 6165. P. 615–617.
- [4] *Либенсон М.Н., Диденко И.А.* // Оптический вестник. 1992. № 5–6. С. 1–2.
- [5] *Никитин А.К., Тищенко А.А.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 17. С. 25–28.
- [6] *Золотов В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В.* Оптические постоянные природных и техн. сред. Л.: Химия, 1984. 215 с.

Поступило в Редакцию
16 ноября 1995 г.