

В. П. ВЕЙКО, Е. А. ШАХНО, Д. А. СИНЕВ

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ НА ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ХРОМА ПУТЕМ МНОГОКРАТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Теоретически исследован способ увеличения разрешения планарных структур, записываемых с помощью технологии локального лазерного окисления тонких пленок хрома с последующим травлением путем многократного воздействия на область.

Ключевые слова: лазерное окисление, дифракционные структуры, металлическая пленка.

Введение. Лазерная литография является одним из лучших способов формирования топологии дифракционных оптических элементов (ДОЭ), устройств звуко- и видеозаписи и фотосаблонов интегральных схем. Один из наиболее перспективных методов лазерной литографии — термохимический, основанный на локальном лазерном окислении тонкой металлической пленки с последующим травлением необлученной области [1]. Однако до настоящего времени не определены пределы разрешающей способности этого метода, что принципиально ограничивает диапазон его возможных применений. Ранее нами было показано теоретически и подтверждено экспериментально [2], что разрешающая способность термохимического изображения на тонких пленках хрома в режиме записи сканирующим пучком непрерывного излучения превышает разрешающую способность термического изображения и при диаметре облученной области 0,2 мкм составляет $0,6 \text{ мкм}^{-1}$ и выше. Изучению потенциальных возможностей повышения разрешающей способности лазерного локального окисления тонких металлических пленок посвящена настоящая работа.

Постановка задачи. При локальном поверхностном окислении пленки хрома лазерным излучением ее оптические и теплофизические свойства в зоне обработки необратимо изменяются: коэффициент отражения падает с 0,55 для чистого хрома Cr до 0,06 для чистого оксида хрома Cr_2O_3 на длине волны 532 нм, а теплопроводность уменьшается с 47 до 20 Вт/м·К при сквозном окислении пленки [3]. Поэтому можно ожидать, что при повторном облучении области температура в зоне воздействия будет значительно выше, чем при первичном за счет роста поглощательной способности пленки и уменьшения оттока тепла. Все это принципиально может привести к локализации окисленной области и повышению разрешающей способности по сравнению с однократным воздействием лазерного излучения. Рассмотрим изменение локализации термохимического изображения при многократном воздействии лазерного излучения на одну и ту же область пленки.

Одной из наиболее важных областей практического применения лазерного термохимического метода является изготовление ДОЭ [1]. Поэтому для улучшения и конкретизации

сравнения с экспериментом нами была использована учитывающая топологические особенности (кольцевую структуру) и условия записи ДОО физико-математическая модель локального окисления поверхности тонкой пленки хрома при лазерном сканировании пучка непрерывного лазерного излучения с малым размером поперечного сечения и гауссовым распределением интенсивности [4]. Толщина слоя оксида увеличивается в соответствии с вагнеровским законом окисления [5]:

$$H = \sqrt{2B \exp\left(-\frac{T_a}{T_{\max}}\right) t_e},$$

где B — константа параболического окисления, T_a — энергия активации, выраженная в К, T_{\max} — максимальная температура в области воздействия, значение „эквивалентного“ времени t_e определяется динамикой температуры при лазерном воздействии [5]:

$$t_e = \sqrt{\frac{2\pi T_{\max}^2}{T_a |T_{tt}''(t_0)|}},$$

где $T_{tt}''(t_0)$ — вторая производная температуры по времени в точке поверхности пленки в момент, когда температура в ней достигает своего максимального значения T_{\max} .

В режиме сканирования пленки лазерным пучком с гауссовым распределением интенсивности [4]:

$$T = G \int_0^{\infty} \frac{\xi}{\xi^2 + b^2} e^{-\frac{\xi^2}{4}} J_0\left(\xi \frac{r}{r_0}\right) d\xi,$$

где $G = \frac{P(1-R)}{2\pi kh} e^{\frac{b^2}{4}}$, $b = \frac{Vr_0}{2a}$, $r = \sqrt{\left(x - Vt - \frac{Vr_0^2}{4a}\right)^2 + y^2}$, x и y — пространственные координаты,

t — время, $J_0(x)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка, P — мощность лазерного излучения, V — скорость сканирования, R — отражательная способность вещества, h — начальная толщина пленки хрома, k — теплопроводность пленки хрома, $a = 0,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ — температуропроводность пленки хрома, r_0 — характерный размер гауссова распределения интенсивности излучения в пучке. Значение температуры отсчитывается от начального.

В работе была принята экспоненциальная интерполяция зависимости поглощательной способности материала от толщины слоя оксида на поверхности пленки хрома. Для появления устойчивого изменения поглощательной способности на поверхности хрома необходимо создать 2—3 молекулярных слоя оксида (с учетом структурных дефектов — „просветов“ между молекулами, дислокаций, неравномерностей рельефа и пр.). В этом случае поглощательная способность пленки хрома, покрытой оксидом, может быть рассчитана по формуле:

$$A = 1 - R = 1 - \left(R_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + (R_{\text{Cr}} - R_{\text{Cr}_2\text{O}_3}) \exp\left(-\frac{H}{jd_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}\right) \right),$$

где j — параметр, равный количеству молекулярных слоев оксида, а $d_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 2\sqrt[3]{\frac{3\nu_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}{4\pi}} =$

$= 2\sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \frac{\mu}{\rho N_A}}$ — диаметр молекулы оксида хрома, μ — молярная масса оксида хрома,

ρ — плотность оксида хрома [3], N_A — число Авогадро. Объем молекулы ν принят равным объему шара соответствующего размера.

Расчетное распределение слоя оксида в многопроходовом режиме. Результаты расчетов для воздействия непрерывного лазерного пучка $P=3,8$ мВт, $r_0=0,2$ мкм, $V=0,5$ м/с на пленку хрома $h=30$ нм (рис. 1, а) показывают утолщение окисленного слоя после каждого прохода (1 — 1, 2 — 2, 3 — 3 прохода). Рассмотрено поперечное распределение толщины оксида: после третьего прохода $H=3$ нм, этого достаточно для защиты от травления.

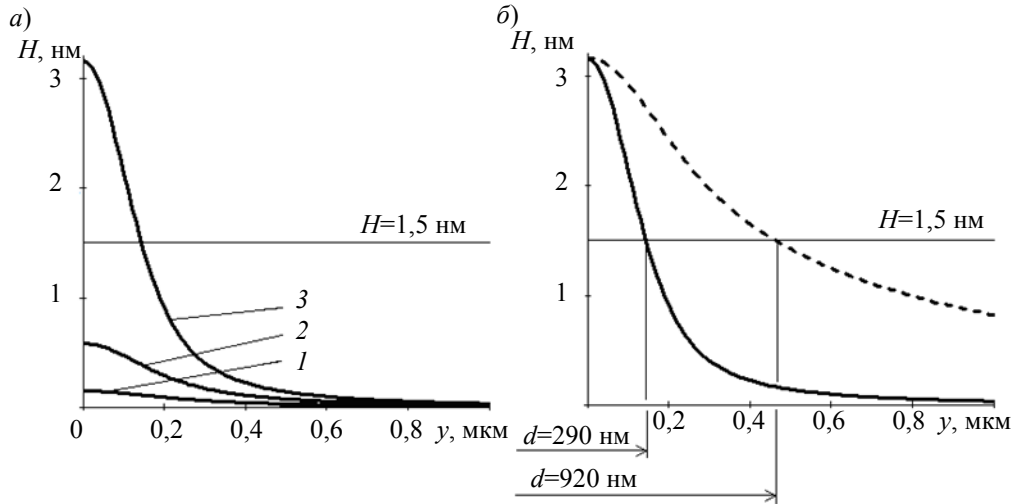


Рис. 1

Сравним режимы, требуемые для получения одинаковой толщины при однопроходовой и многопроходовой обработке. Чтобы получить слой оксида толщиной 3 нм при однопроходовой обработке, требуется уменьшить скорость сканирования с 0,5 (сплошная) до 0,077 м/с (пунктир) при сохранении значений других параметров. По причине теплопроводности минимальный размер элемента (при условии, что для защиты от последующего травления необходима толщина слоя 1,5 нм) $d=920$ нм, в то время как при обработке за три прохода это значение составляет $d=290$ нм (рис. 1, б). Надо заметить, что наряду с увеличением разрешающей способности при многопроходовом воздействии возрастает производительность, поскольку оптимальная скорость значительно увеличивается. Так, при заданных параметрах обработки при трех проходах расчетная разрешающая способность возрастает в 3,2 раза; скорость сканирования — в 6,5 раз, что соответствует увеличению производительности в 2,2 раза.

Аналогичным образом были построены и рассчитаны модели двулучевой однопроходовой и многопроходовой обработки, при которой сканирование ведется одновременно двумя пучками ($P_1 = P_2 = 2,5$ мВт), пространственно разнесенными на 3,2 мкм (рис. 2, а).

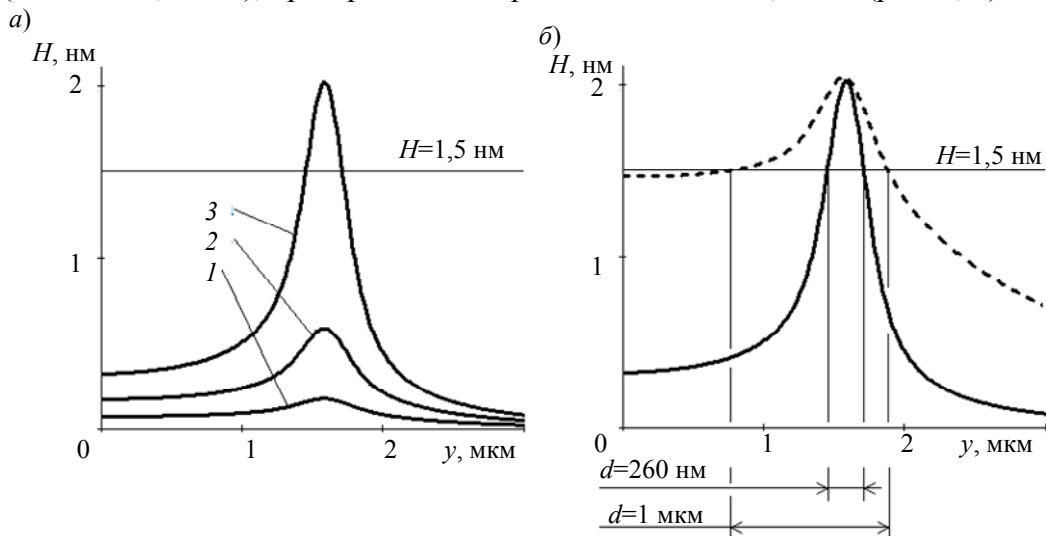


Рис. 2

При двулучевой однопроходовой обработке, чтобы получить слой оксида заданной толщины, требуется уменьшить скорость сканирования до 0,148 м/с (рис. 2, б, пунктир), что, как и в предыдущем случае, приводит к расширению нагретой области. В результате пространственное распределение толщины оксида нельзя считать контрастным, так как в центре между треками толщина слоя оксида практически достигает 1,5 нм. При увеличении числа проходов до трех скорость сканирования может быть увеличена до 0,5 м/с (сплошная). В отличие от однопроходового режима, многопроходовой ускоряет рост толщины оксида от прохода к проходу, что приводит к значительному контрасту пространственного распределения слоя оксида, поскольку толщина слоя оксида между треками мала (рис. 2, б).

Влияние малых смещений пучка на качество записи. Основную технологическую сложность при записи треков в режиме многопроходовой обработки представляют сдвиги обрабатываемого пятна в поперечном сечении на случайную величину (биения), вызываемые нестабильностью позиционирования механизмов, управляющих лазерным лучом.

Для моделирования биений записываемого луча был выполнен псевдослучайный поперечный сдвиг Δ облученной области на определенную величину в заданном направлении при каждом четном проходе (рис. 3). Рассматривалось влияние Δ на смещение положения максимума толщины оксида φ и относительное увеличение ширины окисленной области по уровню половины толщины χ .

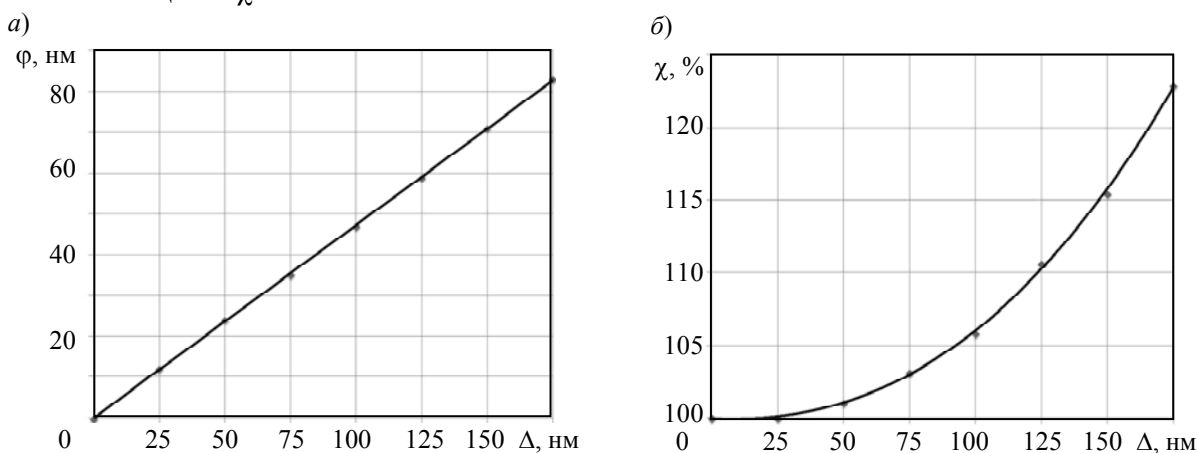


Рис. 3

Очевидным представляется общее негативное влияние биений на результат термохимической записи структур: положение максимума линейно смещается в сторону биения на величину $\approx \Delta/2$ (рис. 3, а). Однако стоит отметить, что влияние биений на разрешающую способность записи (рис. 3, б) становится критическим только при достижении $\Delta \sim r_0$ (при $\Delta = 200$ нм толщина получаемого оксида меньше 1,5 нм — значения, необходимого для устойчивой защиты от травления). В целом стоит отметить, что, согласно результатам расчета, рассмотренная проблема не является критической для процесса записи методом локального лазерного окисления в указанных условиях.

Заключение. Приведенные расчетные данные демонстрируют преимущества многократной обработки для технологии прямой лазерной термохимической записи. Благодаря увеличению поглощения излучения при окислении и снижению теплопроводности становится возможным использовать высокие скорости сканирования, при которых повышается не только разрешающая способность, но и результирующая производительность процесса записи. В рассмотренном случае трехпроходовой обработки повышение разрешающей способности в 3,2 раза сопровождается повышением производительности обработки в 2,2 раза. Показано, что методика многопроходового воздействия может применяться и при многолучевой обработке.

Работа поддержана проектами РФФИ №12-02-00974а и №13-02-00971а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейко В. П., Метев С. М. Лазерные технологии в микроэлектронике. София: Изд-во Болгарской АН, 1991.
2. Вейко В. П., Синев Д. А., Шахно Е. А., Полещук А. Г., Саметов А. Р., Седухин А. Г. Исследование особенностей многопучковой лазерной термохимической записи дифракционных микроструктур // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, № 4. С. 562—571.
3. Физико-химические свойства оксидов: Справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1978.
4. Veiko V. P., Shakhno E. A., Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Matyzhonok V. N. Local laser oxidation of thin metal films: ultra-resolution in theory and in practice // J. of Laser Micro/Nanoengineering. 2008. Vol. 3, N 3. P. 201—205.
5. Либенсон М. Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. СПб: Наука, 2007. 423 с.

Сведения об авторах

- Вадим Павлович Вейко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Елена Аркадьевна Шахно** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: elena.shakhno@rbcmail.ru
- Дмитрий Андреевич Синев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: sinev_dm@mail.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных технологий и экологического
приборостроения

Поступила в редакцию
19.09.13 г.

УДК 535.31; 681.7; 53.082.5

В. К. Баля, И. Ю. Денисюк, Е. Б. Шекланова, Н. Д. Ворзобова

НЕРЕГУЛЯРНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА ЛИНИИ

Исследован лазерный генератор линии, основанный на дифракционных решетках со „сбитым“ периодом, изготовленных методом наноимпринт-копирования. Мастер-штамп для копирования изготавливался методом лазерной гравировки термочувствительной пленки. Измерены оптические характеристики полученного дифракционного оптического элемента.

Ключевые слова: ДОЭ, лазерный генератор линии, наноимпринт.

Одна из сложных задач классической оптики — формирование пучков с заданным, не гауссовым распределением энергии в телесном угле, например, в виде линии. Лазерные генераторы линии используются в различных областях техники: для контроля рельсового пути и поверхности обрабатываемых деталей, в посадочных огнях и огнях береговой обстановки. Стандартные методы создания генераторов линии используют цилиндрические линзы и объективы на их основе, однако в этом случае распределение освещенности в линии оказывается гауссовым, что часто не соответствует техническим требованиям к элементу. Асферические линзы позволяют преодолеть проблемы, но их изготовление сложно и затратно.