

Когерентное воздействие на поверхность четырёх пучков излучения ХеСl-лазера

В.И.Бредихин*, Ю.К.Верёвкин*, Э.Я.Дауме*, С.П.Кузнецов*, О.А.Мальшакова*,
В.Н.Петряков*, Н.В.Востоков**, Н.И.Полушкин**

Исследовано влияние геометрии сведения четырех пучков когерентного излучения ХеСl-лазера на модификацию тонких пленок. Показано, что, изменяя положение биссектрисы угла между пучками по отношению к образцу, можно создавать двумерные структуры с изменяющимися в пространстве параметрами. Определены условия создания совершенных двумерных субмикронных структур на тонких металлических пленках. Отношение размера модифицированной (удаленной) области к периоду структуры в типичных экспериментальных условиях составило ~ 0.25 . Показано, что субмикронные особенности модифицированной области существенно зависят от длительности и энергии лазерных импульсов.

Ключевые слова: субмикронные двумерные структуры, интерференция четырех пучков, перестраиваемый ХеСl-лазер, металлические пленки.

Введение

Методы лазерной модификации поверхности можно классифицировать по числу использованных пучков излучения. Наиболее развит метод, связанный с фокусировкой одного лазерного пучка [1, 2]. При этом нелинейность механизмов модификации позволяет уменьшить размер области измененных свойств вплоть до почти до длины волны воздействующего излучения [2, 3].

С использованием устройств сканирования излучения или перемещения обрабатываемой поверхности этот способ позволяет создавать сложные структуры, в том числе для брэгговского отражения в оптических волокнах. Существенно более адекватно данная задача решается при интерференции двух когерентных лазерных пучков [4–7]. Возникающие при этом структуры имеют эквидистантный характер на расстояниях более сантиметра. При необходимости создания брэгговских структур с переменным периодом используется интерференция двух пучков, имеющих различные неплоские структуры волнового фронта [8, 9]. Интересная возможность создания оптических фильтров со сложным спектром пропускания заключается в использовании интерферирующих волн со спектром излучения в виде нескольких узких линий [9].

Аналогичные возможности появляются при использовании для интерференции трех и более пучков одночастотного излучения, расположенных в одной плоскости – плоскости падения. Интерференция трех и четырех пучков излучения, расположенных в различных плоскостях, представляет интерес при создании больших двумерных массивов субмикронных элементов [10–13], в том числе при интерференции с участием поверхностных

электромагнитных волн [14, 15]. На наш взгляд, изучение особенностей такой интерференции будет полезно при построении измерительных и изображающих систем на основе апертурного синтеза. Так, используя многопучковую интерференцию, можно создавать голографические делители излучения для разведения пучков после задающего генератора в мощных лазерных системах.

В большинстве цитированных выше экспериментальных работ рассматриваются условия модификации поверхности с помощью литографической технологии. Наши исследования посвящены изучению возможности использования мощных импульсных лазеров для субмикронной модификации поверхности пленок только за счет прямого силового воздействия. Для ряда приложений (например, для создания больших массивов анизотропных магнитных элементов) представляет интерес исследование возможностей реализации субмикронных вытянутых структур, обладающих значительной геометрической анизотропией. Этими соображениями определяется выбор различных углов падения на образец двух пар пучков в описанных ниже экспериментах.

1. Методика эксперимента

В продолжение исследований [16, 17] по созданию ферромагнитных структур с субмикронными размерами ниже исследуются модификации поверхности пленки смеси Fe–С под действием четырех когерентных пучков излучения ХеСl-лазера со следующими характеристиками: близкой к дифракционной расходимостью, шириной спектра $\sim 0.02 \text{ см}^{-1}$ и длительностью импульсов 2–40 нс при энергии до 0.1 Дж.

В отличие от традиционно используемых для селекции спектра в задающем генераторе дифракционных решеток [18, 19], нами использовались два интерферометра Фабри–Перо и выходная плоскопараллельная пластина. Это существенно повысило стабильность модового состава выходного излучения.

Площадь модифицированной части поверхности со-

*Институт прикладной физики РАН, Россия, 603600 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; эл. почта: verevkin@appl.sci-nnov.ru

**Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603600 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46

ставляла обычно несколько квадратных миллиметров. Основные процессы, влияющие на модификацию поверхности, определяются тепловыделением. В [20] детально рассчитано двумерное тепловыделение в металлической пленке, находящейся на теплопроводящей подложке, и показано, что для получения заметной глубины пространственной модуляции температуры с субмикронными размерами необходимо использовать греющие импульсы длительностью не более нескольких наносекунд. Этим требованием и определялся выбор режима работы эксимерного лазера.

Для диагностики поверхности до и после модификации использовались атомно-силовой микроскоп (АСМ), микроскоп-профилометр общего назначения Maxim*GP 200, сканирующий электронный микроскоп и другие приборы с субмикронным пространственным разрешением. Экспресс-анализ модификации поверхности осуществлялся по дифракции излучения He-Ne- и XeCl-лазеров.

2. Особенности когерентного сложения четырех пучков излучения

В общем случае картина интерференции четырех пучков определяется более чем двадцатью параметрами. При создании немодулированных однородных периодических двумерных структур достаточно рассмотреть три упрощенных варианта интерференции, характеризующихся меньшим числом параметров. В первом варианте по два пучка излучения расположены в двух плоскостях падения на образец, эти плоскости взаимно перпендикулярны и биссектрисы углов между пучками в каждой из плоскостей падения перпендикулярны образцу. Второй вариант отличается от первого тем, что биссектриса угла между пучками одной из пар не перпендикулярна образцу. В третьем варианте две плоскости падения образуют угол, отличный от прямого.

Во всех вариантах картина интерференции существенно зависит от поляризации пучков. Рассмотрим два случая [10]: когда плоскости поляризации обеих пар пучков перпендикулярны своим плоскостям падения (ТЕ/ТЕ-интерференция) и когда направление поляризации одной пары пучков перпендикулярно, а направление поляризации другой пары параллельно их плоскостям падения (ТЕ/ТМ-интерференция). Математическая процедура получения картины интерференции для этих случаев достаточно очевидна. Не воспроизводя тригонометрических преобразований, отметим некоторые особенности картины интерференции четырех пучков. В первом варианте интерференции все максимумы одинаковы и расположены строго эквидистантно. Во втором и третьем вариантах максимумы интенсивности в плоскости образца и расстояния между ними изменяются по периодическому закону. При допустимом отклонении интенсивности в максимумах $\sim 10\%$ погрешность настройки углов составляет менее 1° .

3. Экспериментальные результаты

В работе изучалось воздействие четырех пучков при их ТЕ/ТМ-интерференции на поверхность пленки Fe-C толщиной несколько десятков нанометров, нанесенной на кремниевую подложку. В результате модификации поверхности за один лазерный импульс были получены двумерные структуры с различными периодами. На

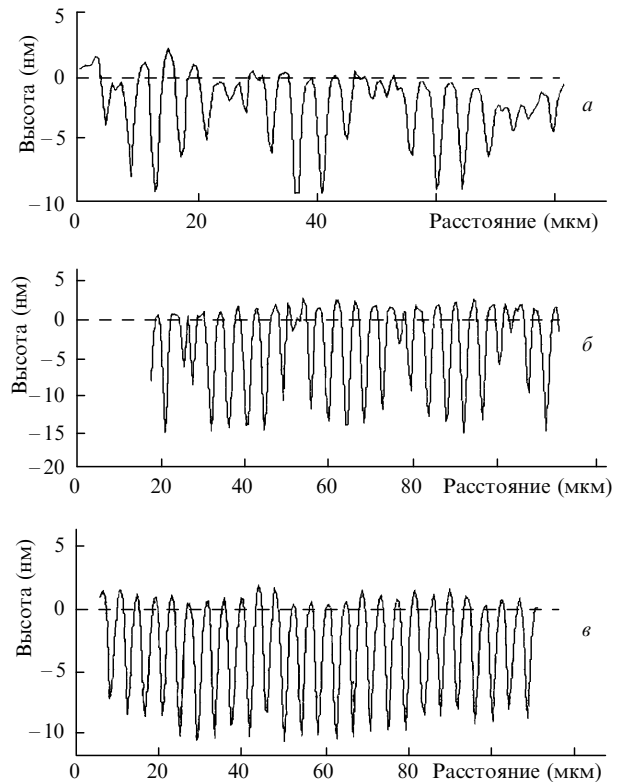


Рис.1. Влияние неперпендикулярности образцу биссектрисы угла между двумя пучками, лежащими в одной из плоскостей падения: биссектриса не перпендикулярна образцу (отклонение $\sim 2^\circ$) (а, б) и перпендикулярна образцу с погрешностью $\sim 30'$ (в).

рис.1 показаны профили сечений поверхностей, измеренные с разрешением ~ 0.5 мкм в плоскости образца и ~ 0.2 нм в направлении, перпендикулярном этой плоскости, с использованием прибора Maxim*GP200. На рис.1,а,б представлен случай, когда биссектриса одной из пар пучков не перпендикулярна образцу. Видны пространственные изменения глубины модификации поверхности с различным периодом, которые при уменьшении угла между биссектрисой и нормалью к поверхности образца существенно уменьшились (рис.1,в).

Более детальная картина (для того же образца, что и на рис.1,в) наблюдается при использовании АСМ с поперечным разрешением лучше 20 нм (рис.2). На рис.2,а,б показаны трехмерные картины поверхности с различным увеличением, а на рис.2,в – профиль сечения поверхности через среднюю часть ямки на рис.2,б. Режим модифика-

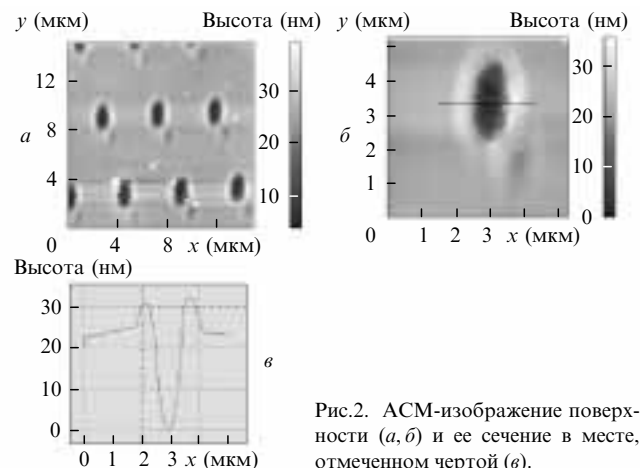


Рис.2. АСМ-изображение поверхности (а, б) и ее сечение в месте, отмеченном чертой (в).

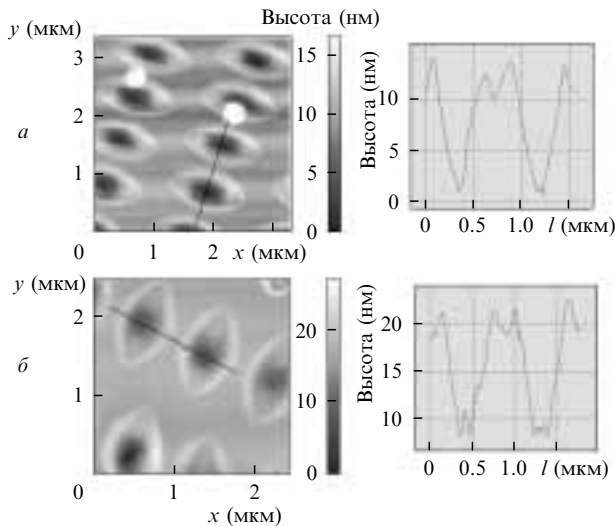


Рис.3. Влияние энергии лазерного импульса на характер модификации металлической пленки.

ции характеризуется незначительной диффузией тепла за время лазерного импульса. Поскольку размер измеряемой части образца в АСМ составляет $\sim 15 \times 15$ мкм, то медленные биения (см. рис.1) наблюдать не удастся, но при этом проявятся другие особенности модификации поверхности. Видно, что примерно 25 % материала, удаленного при образовании ямки (рис.2,б), осталось вблизи ее верхней кромки, а остальная часть либо равномерно расплылась по поверхности образца, либо вылетела в окружающую среду (образцы находились в лабораторных условиях).

Существенно изменяется также высота подъема вдоль верхней кромки ямки. На рис.2,а, б, видны дополнительные ямки (справа от основных) на модифицированной поверхности, причины возникновения которых нами пока не выяснены. Заметим, что отличие результатов измерений с помощью профилометра (рис.1) и АСМ (рис.2) объясняется различной поперечной разрешающей способностью этих приборов. Профилометр дает ~ 2 мкм для ширины и ~ 10 нм для глубины, а на рис.2,в измеренная ширина равна ~ 0.8 мкм, а глубина составляет ~ 25 нм. Измеренное по рис.2,б отношение минимального и максимального поперечных размеров модифицированной области составило ~ 0.3 , что близко к отношению пространственных периодов интерференции лазерного излучения.

На рис.3, а, б показаны трехмерные изображения модифицированной поверхности металлической пленки, полученные с помощью АСМ (слева), и двумерные сечения (справа), полученные вдоль прямых линий. Приведенные результаты достигнуты при одной геометрии сведения четырех пучков излучения для одного образца в разных его местах и различаются энергиями лазерных импульсов длительностью ~ 3 нс. Картина модификации на рис.3,а получена при энергии ~ 17 отн.ед., а на рис.3,б – при энергии ~ 25 отн.ед. Плотность энергии в максимумах интерференции в этих экспериментах составила $\sim 0.3 - 0.5$ Дж/см². На рис.3 хорошо видно, что глубина и ширина образовавшихся кратеров увеличиваются с увеличением энергии в импульсе. В этих случаях ~ 20 % материала, удаленного из пленки, оседает вблизи кратера.

На рис.4 показаны трехмерное АСМ-изображение

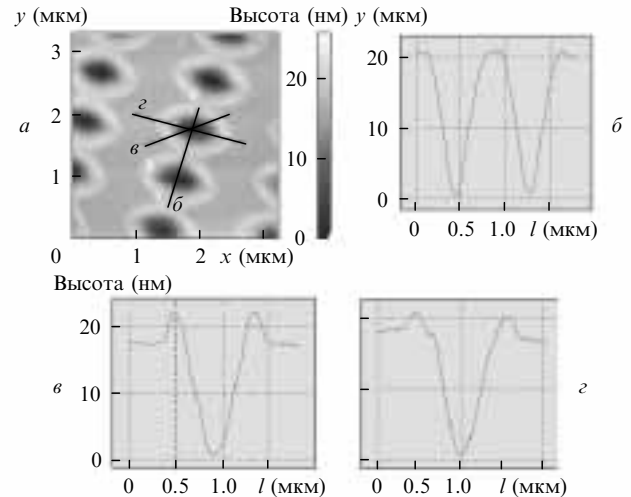


Рис.4. АСМ-изображение поверхности, модифицированной при существенном влиянии диффузии тепла за время лазерного импульса, и ее сечения, отмеченные прямыми линиями с соответствующими буквами.

модифицированной пленки и ее различные двумерные сечения, полученные при воздействии лазерного импульса длительностью ~ 7 нс с энергией ~ 23 отн.ед. Сравнивая эти измерения с результатами рис.3, отметим, что область удаленных частей пленки заметно увеличилась, так, что выступы на поверхности от соседних максимумов поля соединились (рис.4,б). Отношение поперечных размеров ямки (рис.4,б, в) было равно ~ 0.5 , тогда как отношение периодов в интерференционной картине лазерного излучения на образце составило ~ 0.25 .

На рис.5 показаны трехмерные АСМ-изображения с максимально возможным полем обзора, полученные при разных периодах пространственной интерференции лазерного излучения. Здесь отметим достаточно высокую однородность картины модификации.

4. Обсуждение

Измерения, представленные на рис.3, 4, позволяют оценить расстояние, на которое произошла диффузия лазерного воздействия за время модификации, как ~ 0.25 мкм, что согласуется с оценками для трехмерной тепловой диффузии в металлической пленке на теплопроводящей подложке [20]. Роль тепловой диффузии в условиях проведенных экспериментов становится существенно меньше при создании структур с периодом более 2 мкм (см. рис.2). Следуя [20], можно оценить, что температура пленки в максимумах интерференции близка к температуре кипения железа, параметр двухфазного разрушения [1] $\chi = (h/d)(V_l/V_v) < 0.7$ (здесь h – толщина

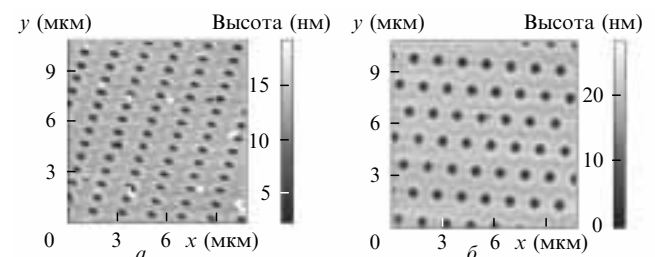


Рис.5. АСМ-изображение модифицированной поверхности с максимальным полем обзора при отношении периодов следования максимумов в интерференционной картине во взаимно перпендикулярных направлениях ~ 0.25 (а) и ~ 0.5 (б).

пленки; d – диаметр области нагрева; V_1 – скорость истечения расплава из зоны облучения; V_v – скорость испарения), а модельное отношение массы удаленного жидкого металла к массе удаленного пара меньше 0.3. Это число хорошо согласуется с экспериментальными измерениями (рис.2,в) отношения объема выступа вдоль края ямки к объему всей ямки. Зная среднюю скорость скатывания расплава [1] $V_1 \sim 250$ м/с и радиус ямки $r \sim 0.5$ мкм, можно оценить время скатывания жидкого металла как $t \sim 2$ нс, что близко к длительности греющего излучения.

Итак, найдены условия создания совершенных двумерных субмикронных структур при интерференции четырех пучков лазерного излучения и развитием двухфазном разрушении в качестве механизма модификации.

Авторы благодарят РФФИ (гранты Л-ЕН 96-15-96594 и 98-02-16306) за финансовую поддержку работы.

1. Вейко В.П., Метев С.М. *Лазерные технологии в микроэлектронике* (София, изд-во Болгарской АН, 1991).
2. Bauerle D. *Laser processing and chemistry* (Berlin, Springer, 1996).
3. Mullendorn M., Birkelund K., Grey F., Madsen S. *Appl.Phys.Letts*, **69**, 3013 (1996).
4. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. *Optics Letts*, **14**, 823 (1989).
5. Askins G.G., Tsai T.-E., Williams G.M., Putnam M.A., Bashkausk M., Friebele E.Y. *Optics Letts*, **17**, 833 (1992).
6. Dong L., Archambault Y.-L., Reekie L., Russell P.St.Y., Payne D.N. *Electron.Letts*, **29**, 1677 (1993).
7. Бухараев А.А., Лобков В.С., Яндуганов В.М., Самарский Е.А., Бердунов Н.В. *Оптика и спектроскопия*, **79**, 417 (1995).
8. Zhang L., Sugden, Williams Y.A.R., Denion Y., Reid D.C.Y., Ragle C.M. *Optics Letts*, **20**, 1927 (1995).

9. Othonos A., Lee X. *Rev.Sci.Instrum.*, **66**, 3112 (1995).
10. Fernandez A., Phillion D.-W. *Appl.Optics*, **37**, 473 (1998).
11. Baker K.M. *Appl.Optics*, **38**, 352 (1999).
12. Baker K.M. *Appl.Optics*, **38**, 339 (1999).
13. Meier M., Mekis A., Dodabalapur A., Timko A., Slusher R.E., Yoannopoulos Y.D., Nalamasu O. *Appl.Phys.Letts*, **74**, 7 (1999).
14. Ezaki M., Kumagai H., Toyoda K., Obara M. *Jap.J.Appl.Phys.*, **32**, 1308 (1993).
15. Семиногов В.Н., Панченко В.Я., Худобенко А.Н. *ЖЭТФ*, **111**, 174 (1997).
16. Polushkin N.I., Gusev S.A., Drosdov S.A., Verevkin Yu.K., Petryakov V.N. *J.Appl.Phys.*, **81**, № 8, 1 (1997).
17. Верёвкин Ю.К., Петряков В.Н., Полушкин Н.И. *Письма в ЖТФ*, **24**, № 12, 13 (1998).
18. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. *Квантовая электроника*, **19**, 688 (1992).
19. Perrone M.R., Yao Y.B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 1327 (1994).
20. Верёвкин Ю.К., Дауме Э.Я. *Оптика и спектроскопия*, **85**, 260 (1998).

V.I.Bredikhin, Yu.K.Verevkin, E.Ya.Daume, S.P.Kuznetsov, O.A.Mal'shakova, V.N.Petryakov, N.Vostokov, N.I.Polushkin. Coherent effect of four XeCl laser beams on a surface.

The influence of the geometry of four beams of coherent XeCl laser radiation on the modification of thin films is studied. It is demonstrated that two-dimensional structures with parameters varying in space can be created by changing the orientation of the bisectrix of the angle between the laser beams with respect to the sample. The conditions necessary for the creation of perfect two-dimensional submicron structures on thin metal films are determined. The ratio of the size of the modified (distant) region to the period of the structure for typical experimental conditions was ~ 0.25 . Submicron features of the modified area are shown to be highly sensitive to the duration and the energy of laser pulses.