

07;12

Наноразмерная интерференционная литография с импульсным УФ лазером

© В.И. Бредихин,¹ В.Н. Буренина,¹ Ю.К. Веревкин,¹ А.В. Кирсанов,¹ В.Н. Петряков,¹
Н.В. Востоков,² В.Ф. Дряхлушин,² А.Ю. Климов²

¹ Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: verevkin@appl.sci-nnov.ru

² Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 21 июля 2003 г. В окончательной редакции 6 января 2004 г.)

Измерены чувствительность и пространственное разрешение фототермического резиста на основе двухслойной пленки металлического индия и полимера. Прямым лазерным воздействием изготовлены двумерные маски, через которые созданы наноразмерные металлические и диэлектрические островки на подложке кремния. Найдены условия получения субмикронных периодических структур на пленках TiO_2 , нанесенных на стеклянную подложку по золь-гель технологии. Измерены их некоторые оптические характеристики, отмечается возможность использования таких решеток для возбуждения планарных электромагнитных волн.

Введение

В последние годы активно развиваются методы интерференционной литографии для создания больших массивов периодических наноразмерных структур с различной размерностью и симметрией [1–6]. В перспективе при использовании излучения F_2 лазера и схем ахроматической интерференции [7,8] энергия излучения может быть локализована в ансамбль областей с периодом 80 nm и размерами 40 nm. В простейшей схеме такой интерференции используются подходящие фазовые структуры, которые могут быть изготовлены с использованием излучения более длинноволновых лазеров, например ХеСl лазера. Такая возможность связана с тем, что при дифракции лазерного излучения на фазовой структуре можно реализовать условия, когда период изменения интенсивности в стоячей волне в два раза меньше периода фазовой решетки.

Лазерное излучение, локализованное в таких размерах, представляется перспективным для создания квантовых объектов, локального стимулирования диффузии примесей и дефектообразования для целей микроэлектроники [9,10] и др. Ряд направлений использования интерференционной литографии обсуждается в [11]. В [12] показана возможность выращивания квантовых точек Ge на неплоской подложке Si с рельефом, полученным с помощью голографической литографии и реактивного ионного травления.

Интересные возможности импульсной интерференционной литографии заключаются в создании больших ансамблей отверстий субволновых размеров в пленках металлов для изучения влияния резонансных плазменных колебаний на оптические характеристики таких структур [13], в создании наноразмерных островков SiO_2 для возможных применений в приборах „кремний на изоляторе“, локального гетерирования примесей

и других приложений. Для применений в волоконно-оптических и планарных устройствах исследуются оптические свойства пленок TiO_2 , полученных по технологии золь-гель. Сюда можно отнести создание брэгговских решеток [14–17] и исследование оптических свойств при допировании таких пленок различными веществами [18–21].

Экспериментальная установка и результаты исследований

Работа авторов посвящена исследованиям условий прямой модификации пленок индия, а также пленок TiO_2 , полученных по золь-гель технологии. При воздействии на индий использовалась интерференция четырех пучков, а при модификации TiO_2 использовались два пучка УФ излучения.

В качестве источника УФ излучения использовался ХеСl лазер со следующими характеристиками: длина волны излучения 308 nm, длина когерентности более 30 см, длительность импульсов 7 ns, энергия в импульсе до 100 mJ, расходимость близка к дифракционной. Использование мощных наносекундных импульсов УФ излучения существенно снижает требования к механической стабильности оптической установки и позволяет проводить прямую наноразмерную модификацию различных материалов [22].

Наш интерес к пленкам индия связан с возможностью их использования в качестве достаточно чувствительного фототермического резиста [22]. Преимущество такого фоторезиста связано с тем, что пороговая энергия его экспозиции практически не зависит от спектра излучения. Существенной ценой за это преимущество является влияние диффузии тепла и, следовательно, для субмикронного разрешения необходимо использовать импульсы излучения короче 10 ns [23].

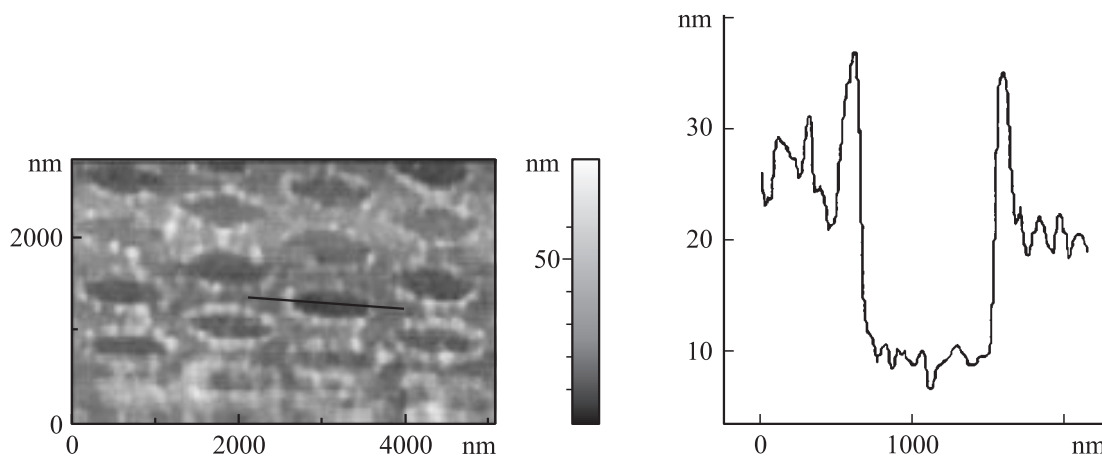


Рис. 1. АСМ изображение пленки металлического индия после облучения четырьмя когерентными пучками излучения ХеСl лазера.

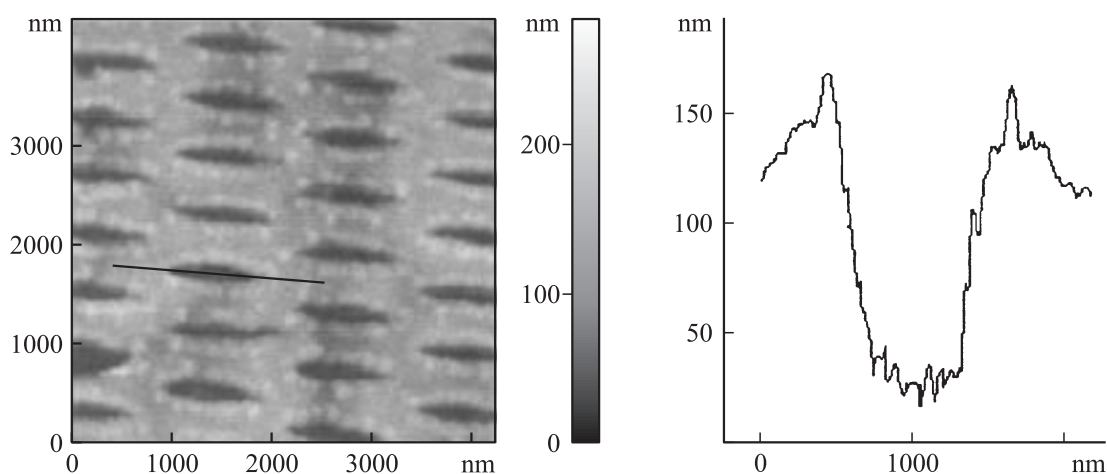


Рис. 2. АСМ изображение полимерной пленки после ее травления через маску в индии.

В экспериментах исследовались образцы, состоящие из кремниевой подложки с нанесенными на нее слоями окиси кремния (толщиной $h \sim 80$ nm), полимера ($h \sim 50$ nm) и пленки индия ($h \sim 10$ nm). При толщине пленки 10 nm сквозные отверстия в ней получались при средней плотности энергии ~ 20 мДж/см² (рис. 1). Здесь показаны изображение участка пленки индия, полученное на атомно-силовом (АСМ) микроскопе, и сечение отверстия, отмеченного чертой. Профиль отверстия в пленке характеризуется большой крутизной и плоским дном, что связано с использованием подслоя полимера с большей температурой абляции и меньшим оптическим поглощением. Из этих измерений можно оценить пространственное разрешение такого двухслойного фоторезиста величиной не хуже 100 nm. Далее слой полимера был протравлен в кислородной плазме для перенесения рисунка на поверхность образца без изменения неэкспонированных областей. Этот процесс хорошо контролируется, соответствующее АСМ изображение и сечение отдельной ямки показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что крутизна боковой поверхности ямки

несколько уменьшилась, но при этом существенно увеличилась ее глубина. Возможно, уменьшение крутизны в этом случае связано с формой зонда атомно-силового микроскопа.

Сформированная таким образом маска имеет высокое отношение ее высоты к ширине и позволяет создавать металлические и диэлектрические наноэлементы на поверхности кремния или реализовать его сухое травление с последующей взрывной литографией. На рис. 3 показано АСМ изображение большого массива наноразмерных металлических контактов на поверхности окиси кремния. На рис. 4 показаны результаты плазмохимического травления слоя окиси кремния через маску, демонстрирующие получение массива наноразмерных ямок на поверхности кремния.

Следующие наши исследования связаны с модификацией свойств TiO₂ пленок, полученных по золь-гель технологии. Интерес к TiO₂ пленке связан с возможным использованием ее в различных планарных волноводных устройствах. Эффективность воздействия излучения ХеСl лазера на такую пленку определяется тем, что

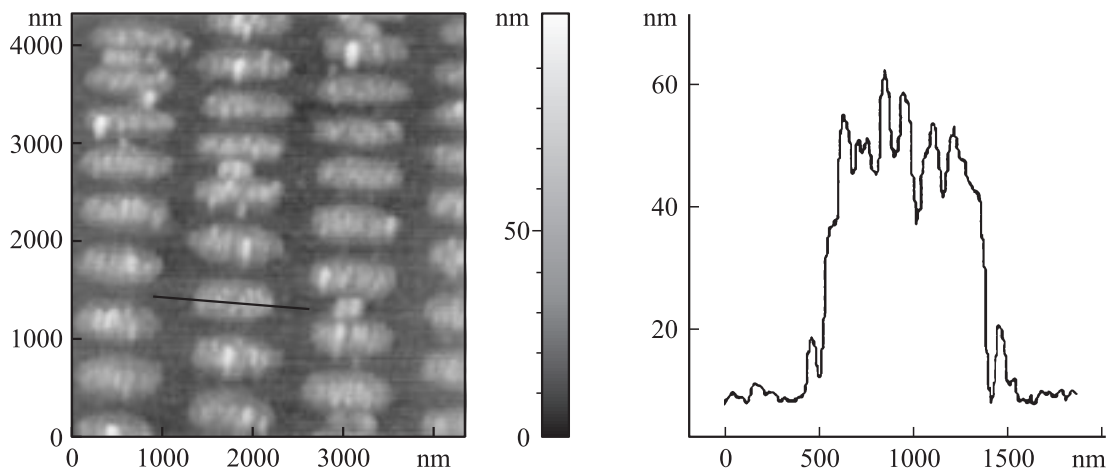


Рис. 3. АСМ изображение металлических островков на поверхности окиси кремния.

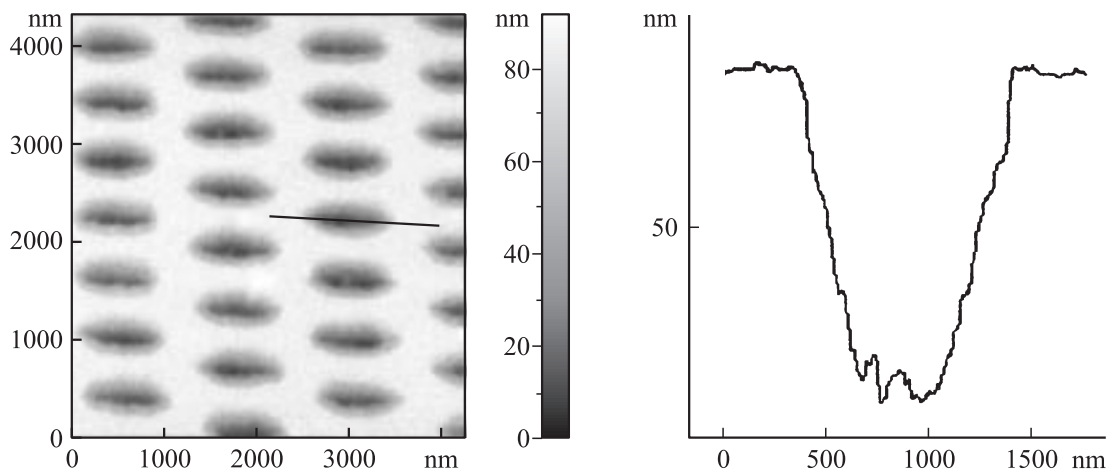


Рис. 4. АСМ изображение результатов травления слоя окиси кремния и получения наноразмерных ямок на поверхности образца.

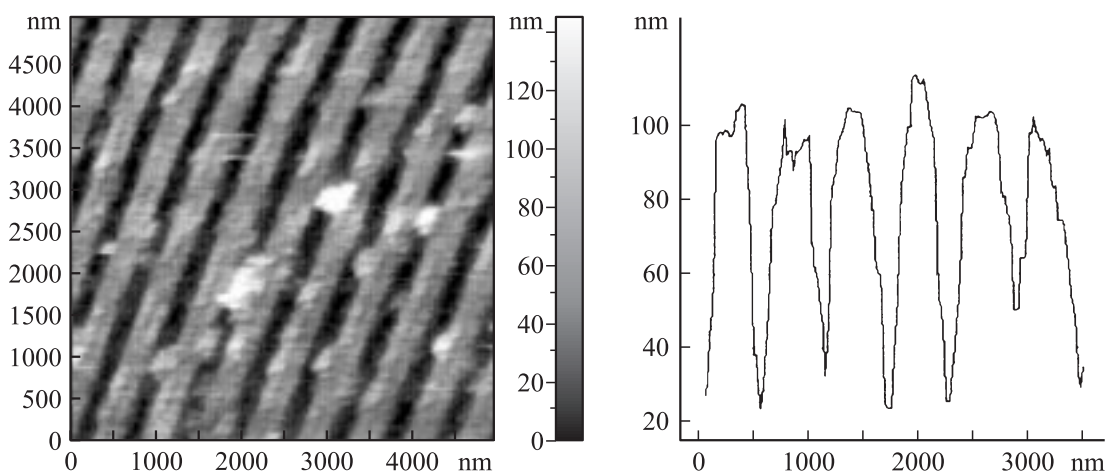


Рис. 5. Топография пленки TiO_2 после воздействия двух когерентных пучков УФ излучения. Период стоячей волны в плоскости образца ~ 560 nm, энергия экспозиции ~ 30 mJ/cm².

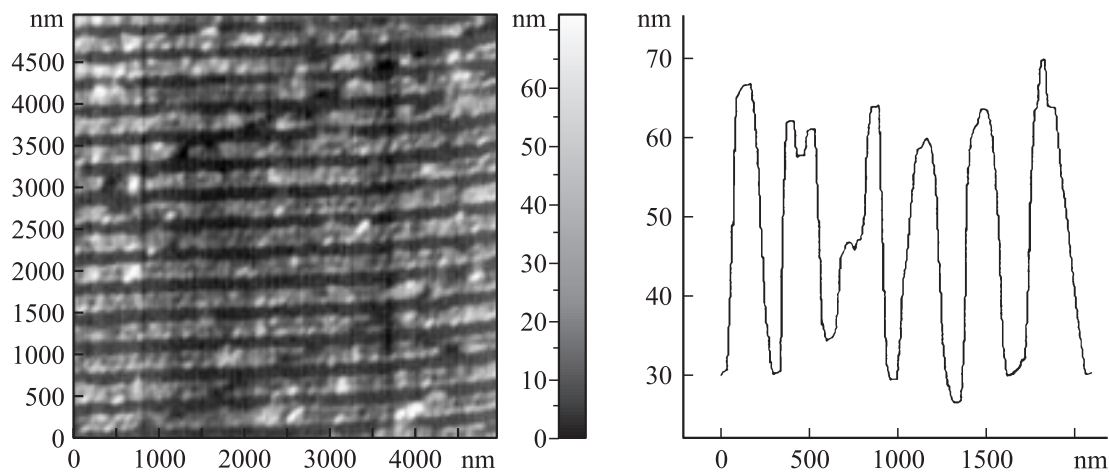


Рис. 6. Топография пленки TiO_2 после воздействия двух когерентных пучков УФ излучения. Период стоячей волны в плоскости образца ~ 330 nm, энергия экспозиции ~ 30 mJ/cm².

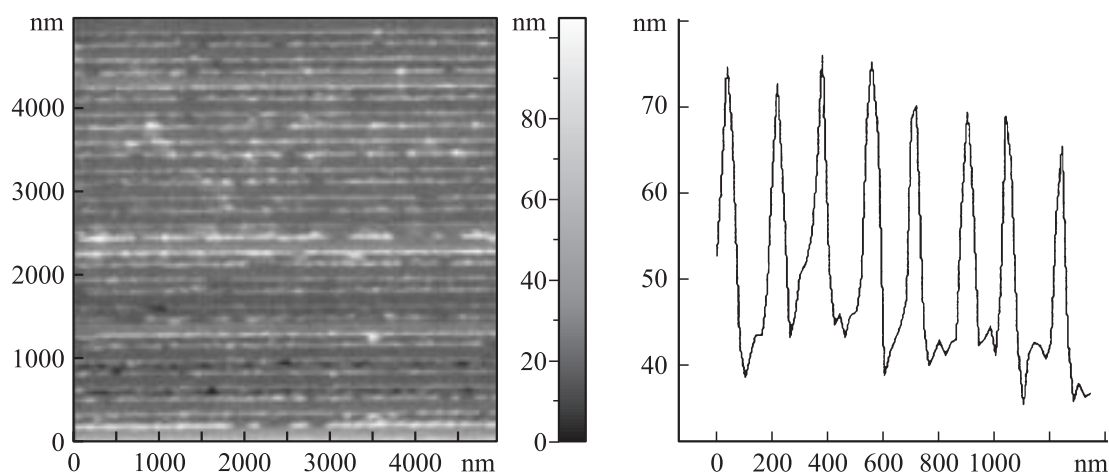


Рис. 7. АСМ изображение поверхности пленки TiO_2 . Период стоячей волны ~ 330 nm, энергия экспозиции ~ 60 mJ/cm².

излучение с длиной волны 308 попадает в область межзонного поглощения.

Для получения пленки TiO_2 использовался 5%-ный раствор $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$. Процесс нанесения покрытия осуществлялся химическим методом из раствора [24] путем полива на вращающуюся стеклянную подложку. Скорость вращения подложки составляла величину ~ 400 rev./min. Дальнейшее закрепление пленки на поверхности осуществлялось закаливанием ее в воздушном термостате при температуре 150°C в течение суток. Для достижения необходимой толщины пленка наносилась в несколько этапов с последующим прогревом после каждого слоя. В итоге в эксперименте использовались пленки толщиной от 100 до 500 nm. Используя интерференцию двух пучков, созданы рельефные структуры с периодами 560, 420 и 330 nm. Топологии типичных структур показаны на рис. 5, 6. Порог модификации составил величину ~ 30 mJ/cm², что позволяло создавать структуры площадью ~ 1 cm² за один лазерный импульс. Отметим, что при превышении порога возникают структуры с периодом, в два

раза меньшим, чем период стоячей волны излучения. Это можно объяснить тем, что в этом случае каждый интерференционный максимум излучения создает два холма на поверхности за счет скатывания расплава в разные стороны. Такая типичная картина показана на рис. 7. Здесь видно, что образовалась структура двух вложенных периодических решеток с почти симметричным взаимным расположением.

Нами проведены предварительные эксперименты по возбуждению и переизлучению планарных волн через созданные периодические структуры. Эксперименты проводились с использованием He-Ne лазера. Образцы устанавливались на гониометр и измерялись углом падения излучения на решетки, при которых возникают дифракционные волны различных порядков в воздухе и в среде. Отметим, что при отсутствии дифрагированных волн в воздухе в среде можно возбудить волны, распространяющиеся либо в разные стороны, либо в одну сторону в зависимости от углов падения и периода решеток. Легко реализуется также ситуация, когда поверхностная волна в результате дифракции на

периодической решетке в TiO_2 частично переизлучается в воздух. В дальнейшем планируется найти оптимальные условия для повышения эффективности передачи излучения из воздуха в пленку.

Заключение

Создана установка для импульсной интерференционной литографии с широким набором оптических устройств и зондовых микроскопов для диагностики характеристик пленок и поверхностей. При использовании разного количества интерферирующих пучков, их поляризаций, углов между ними получены структуры с различной симметрией и периодами. Через двумерную маску индия, полученную прямым воздействием лазерного излучения, протравлен полимер, а затем изготовлены наноразмерные металлические и диэлектрические элементы на подложке кремния. На пленке TiO_2 созданы решетки с субмикронными периодами. Такая установка перспективна для исследований в различных направлениях лазерной нанотехнологии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-02-17639).

Список литературы

- [1] *Beyer O., Nee I., Havermeier F., Buse K.* // Appl. Opt. 2003. Vol. 42. N 1. P. 30–37.
- [2] *Egglest B.J.* // IEEE J. on Sel. Top. In QE 2001. Vol. 7. N 13. P. 409–423.
- [3] *Cai L.Z., Yang X.L.* // Opt. and Laser Tech. 2002. Vol. 34. P. 671–674.
- [4] *Kintaka K., Nishii J., Tohge N.* // Appl. Opt. 2000. Vol. 39. N 4. P. 489–503.
- [5] *Fernandez A., Bedrossian P.J., Baker S.L.* et al. // IEEE Trans. on Magn. 1996. Vol. 32. N 5. P. 4472–4474.
- [6] *Бредихин В.И., Веревкин Ю.К., Дауме Э.Я.* и др. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 4. С. 333–336.
- [7] *Itani T., Wacamiya W.* // Microel. Eng. 2002. Vol. 61–62. P. 49–55.
- [8] *Switkes M., Blomstein T.M., Rothschild M.* // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77. N 20. P. 3149–3151.
- [9] *Шишицяну С.Т., Шишицяну Т.С., Райлян С.К.* // ФТП. 2002. Т. 36. Вып. 5. С. 611–617.
- [10] *Вицент С.В., Зайцев А.В., Плотников Г.С.* // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 2. С. 134–141.
- [11] *Smith H.I.* // Physica E11. 2001. P. 104–109.
- [12] *Zhou Z., Halilovic A., Muhlberger M.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. N 3. P. 445–447.
- [13] *Ebbesen T.W., Lezec H.J., Ghaemi H.F.* et al. // Nature. 1998. Vol. 391. P. 667–669.
- [14] *Pelissier S., Blanc D., Andrews M.P.* // Appl. Opt. 1999. Vol. 38. N 32. P. 6744–6748.
- [15] *Jiang H.J., Yuan X.C., Zhou Y.* et al. // Opt. Commun. 2000. Vol. 185. P. 19–24.
- [16] *Shishido A., Diviliauskas I.B., Khoo I.C.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 79. N 20. P. 3332–3334.
- [17] *Que W., Kam C.H.* // Opt. Eng. 2002. Vol. 41. N 7. P. 1733–1737.
- [18] *Selvarajian A., Srinivas T.* // IEEE J. of QE 2001. Vol. 37. N 9. P. 1117–1126.
- [19] *Howard A., Clark D.N.S., Mitchell C.E.J.* et al. // Surf. Sci. 2002. Vol. 518. P. 210–224.
- [20] *Alcober C., Alvares F., Bilmes S.A.* et al. // J. Mater. Sci. Lett. 2002. Vol. 21. P. 501–504.
- [21] *Komuro S., Katsumata T., Kokai H.* // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81. N 25. P. 4733–4735.
- [22] *Веревкин Ю.К., Востоков Н.В., Дряхлушин В.Ф.* // Сб. тр. конф. „Фундаментальные проблемы оптики“ СПб., 2000. С. 92–93.
- [23] *Веревкин Ю.К., Дауме Э.Я.* // Опт. и спектр. 1998. Т. 85. Вып. 2. С. 260–264.
- [24] *Суйковская Н.В.* Химические методы получения тонких прозрачных пленок. М.: Химия, 1971. 200 с.