

---

*В.В. Аристов, С.В. Бабин, А.И. Ерко*

## ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

В статье дан обзор основных процессов субмикронной технологии микроэлектроники и приведены примеры применения этих методов в создании элементов компьютерной оптики для диапазона длин волн мягкого рентгеновского излучения (1-10 нм). Основное внимание уделено методу электронно-лучевой литографии как основ-

ному методу генерации изображений с субмикронным пространственным разрешением.

Разработка в начале 80-х годов методов технологии микроэлектроники, направленных на создание принципиально новых микроэлектронных приборов с субмикронными размерами элементов, определила прогресс и во

многих других областях науки и техники. В частности, эти методы обладают большими потенциальными возможностями в реализации идей компьютерной оптики. Так, благодаря методам технологии микроэлектроники в настоящее время получила второе рождение рентгеновская дифракционная оптика, нашедшая широкое применение в исследованиях по физике плазмы, микроскопии, литографии и т.д. [1].

Основным методом создания микроструктур является планарная технология [2]. При использовании этого метода подложка покрывается слоем полимера (резиста), чувствительного к излучению. Требуемые участки подвергаются облучению фотонами, электронами или ионами и становятся селективными по отношению к жидкостному проявлению. Под воздействием проявителя облученные участки полимера удаляются (в случае позитивного процесса), чем обеспечивается доступ к подложке. Оставшийся полимер служит маской при последующих операциях обработки пластины - жидкостном или плазменном травлении, гальваническом осаждении металла и т.п. (рис. 1).

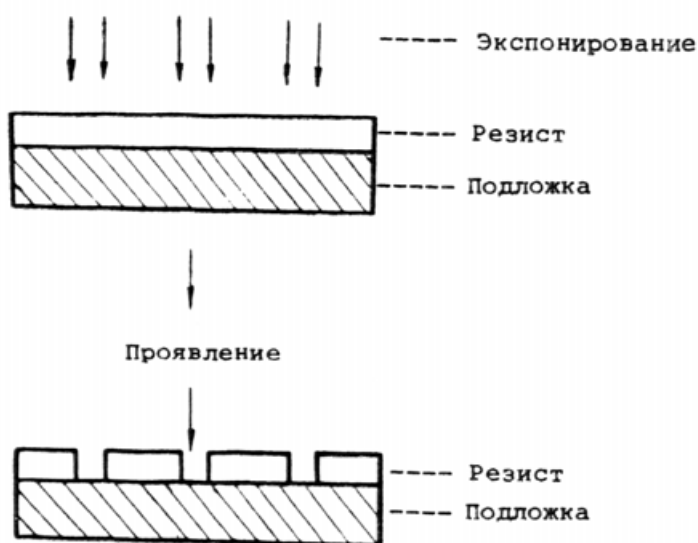


Рис. 1. Схема формирования резистивной маски в процессе литографии

Операция формирования рисунка защитного маскирующего слоя - литография проводится при использовании оптического (фотолитография) и рентгеновского (рентгенолитография) излучений, электронных и ионных пучков (электролитография и ионная литография). Наиболее распространена фотолитография в силу относительной

простоты реализации метода и высокой производительности процесса. К настоящему времени фотолитография практически достигла своего предела пространственного разрешения, обусловленного дифракционными явлениями, что составляет величину порядка 1 мкм (с использованием эксимерных лазеров до 0,5 мкм).

Рентгенолитография, позволяющая достичь разрешения в несколько десятков нанометров, сталкивается с трудностями изготовления шаблонов и требует источников излучения с высокой яркостью. Однако развитие методов микроструктурирования и создание источников синхротронного излучения открывают возможности к ее широкому использованию в будущем. Активно развивается ионная литография на основе проекционных ионных систем передачи изображений и жидкометаллических источников тяжелых ионов со сфокусированным пучком. Однако пока применения ионной литографии не вышли за рамки лабораторных испытаний.

По-видимому, для задач изготовления элементов компьютерной оптики наиболее адекватным методом является электронно-лучевая литография, поэтому остановимся на этом методе подробнее.

Электронная пушка формирует поток электронов, который системой линз фокусируется на подложку. Системы отклонения и бланкирования позволяют устанавливать луч и проводить облучение точно заданных участков. Управление лучом осуществляется с помощью ЭВМ, в результате чего установки электронной литографии обладают большой гибкостью, перепрограммируются на создание новых топологий. Пространственное разрешение электронно-лучевой литографии определяется не только размером пучка, но и процессами рассеяния электронов при взаимодействии с резистом и подложкой. На основе изучения физической природы этого взаимодействия разрабатываются алгоритмы коррекции искажений изображений субмикронных структур.

Создание элементов компьютерной оптики предъявляет ряд специальных требований к процессам генерации изображений (в литографии). Прежде всего это более жесткие, по сравнению с микросхемой, требования к точности взаимного расположения элементов структуры. Элементы компьютерной оптики являются фазово-

чувствительными приборами, и неточность положения отдельных фрагментов приводит к полному разрушению изображения. В рентгеновской оптике, например, абсолютная погрешность положения фрагментов структуры на площади в  $1 \text{ мм}^2$  не должна превышать  $100 \text{ нм}$  для фокусирующего устройства с разрешением  $0,4 \text{ мкм}$ . Поэтому при генерации топологий приборов компьютерной оптики необходима тщательная коррекция аберраций электронно-оптической системы и повышенная, по сравнению с обычными требованиями, точность управления пучком электронов. Специальной проблемой является также тот факт, что топологии структур компьютерной оптики описываются кривыми второго и третьего порядка. Стандартные системы управления установками электронно-лучевой литографии для генерации изображений подобных топологий не предназначены. И, наконец, создание структур сложного пространственного профиля и реализация алгоритмов коррекции физических эффектов размытия субмикронного изображения в процессе экспонирования также требуют специального программного и аппаратного обеспечения.

В ИПТМ АН СССР создана система управления установкой электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ), полностью удовлетворяющая требованиям реализации алгоритмов создания и коррекции структур сложной геометрии. Она сконструирована на базе персональной ЭВМ с ГМД в качестве носителей информации. Для хранения данных сложных структур и реализации алгоритмов трехмерной коррекции предусмотрено подключение комплекса ИВК-2. ЭВМ связана с исполнительным комплексом ЭЛЛ через интерфейс, собранный на модулях КАМАК.

Созданное специалистами ИПТМ АН СССР программное обеспечение комплекса управления позволяет решать широкий круг задач по созданию прецизионных структур с размерами до  $0,3 \text{ мкм}$  и точностью их взаимного положения  $0,06 \text{ мкм}$  на полях в несколько квадратных миллиметров. Структуры могут быть заданы как с накопителя на ГМД или жесткого диска, так и непосредственно оператором в диалоговом режиме с ДВК по элементам или в аналитическом виде. Набор сервисных программ позволяет проводить вызов необходимого файла на цветной монитор для визуального контроля топологии и юстировки элек-

тронно-оптической системы. Работа комплекса на языке высокого уровня (ФОРТРАН IV) позволяет реализовать любые алгоритмы, не входящие в стандартное программное обеспечение и постоянно наращивать его возможности.

Введение независимой третьей координаты требует не только знания двумерного распределения дозы облучения по плоскости, но и учета объемного распределения радиационно-химических превращений в резисте. Созданный комплекс ЭЛЛ позволяет управлять профилем резистивной маски и реализовывать различные типы специальных технологий изготовления микроструктур. Применение этой системы иллюстрирует фотография на рис. 2, где изображена эллипсоидальная зонная пластинка Френеля для диапазона мягкого рентгеновского излучения, сформированная в многослойном рентгеновском зеркале. Минимальная ширина зон составляет  $250 \text{ нм}$ . Использование переменного времени экспонирования позволяет создавать субмикронные структуры специального профиля. На рис. 3 приведена фотография поперечного сечения решетки, элементы которой имеют специальный профиль.

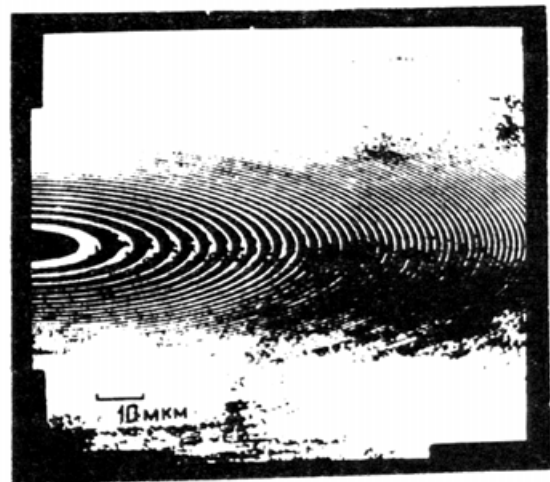


Рис. 2. Эллипсоидальная зонная пластинка на поверхности многослойного рентгеновского зеркала

Сформированный рисунок в полимере является либо самостоятельным оптическим элементом, либо служит маской для дальнейших технологических операций. Одним из широко распространенных способов изготовления металлических реплик с полимерных матриц является гальваническое осаждение металла на свободные от резиста участки подложки. Известно более 20 металлов и их сплавов, которые можно наносить гальванически. Так,

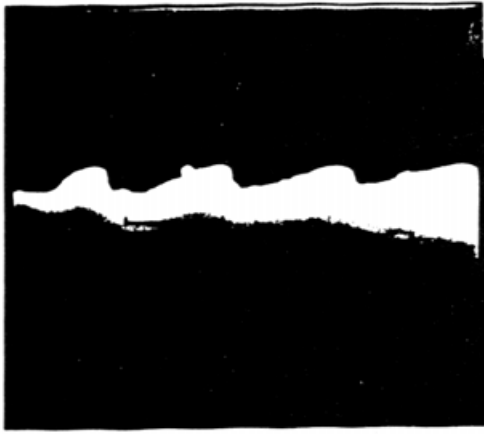


Рис. 3. Профиль поверхности киноформного элемента

например, на рис. 4 представлена золотая линейная зонная пластинка, впечатанная в свободновисящую полимерную мембрану [3-5].

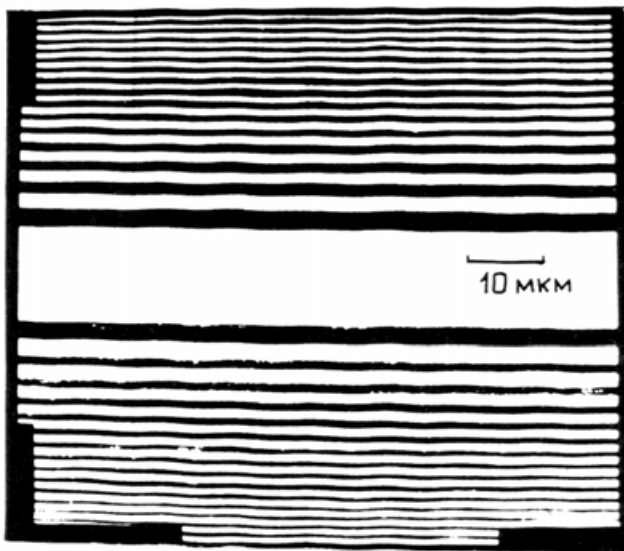


Рис. 4. Зонная пластинка с маскирующим покрытием из золота

Методы сухого травления, использующие для обработки химическое или кинетическое взаимодействие ионов с материалом подложки, весьма перспективны для формирования элементов компьютерной оптики. С их помощью в ряде случаев удается получать структуры с высоким соотношением высоты к ширине. Примером может служить фазовая зонная пластинка для диапазона длин волн  $10-20\text{\AA}$ , созданная с помощью электроно-литографии и плазмохимического травления, показанная на рис. 5. При этом моно-

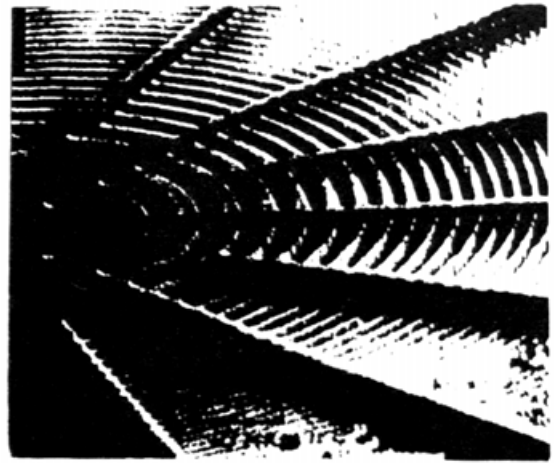


Рис. 5. Свободностоящая кремниевая зонная пластинка

кристаллический кремний был протравлен на глубину 3 мкм при минимальном размере зон 0,3 мкм [6].

Важным моментом является разработка методов напыления тонких пленок. Помимо традиционного термического напыления в вакууме, методы электронно-лучевого и лазерного распыления, магнетронного напыления позволяют расширить диапазон материалов, наносимых с заданными свойствами. В частности, удается создавать многослойные рентгеновские зеркала, имеющие слои толщиной в десятки ангстрем при количестве слоев свыше сотни. Существующие методы контроля позволяют измерять толщину с точностью до единиц ангстрем, в том числе в процессе нанесения пленок.

Таким образом, технологические методы микроэлектроники дают возможность создания прецизионных элементов компьютерной оптики с пространственным разрешением вплоть до десятков нанометров. Однако решение этой задачи потребует развития методов микроструктурирования, ориентированных непосредственно на решение этой задачи. В свою очередь работы в области создания высокоразрешающих прецизионных процессов технологии для компьютерной оптики служат полигоном для будущих технологий микроэлектроники, создавая их основы и демонстрируя возможности, близкие к предельным для современного этапа развития приборной и технологической базы.

## Л и т е р а т у р а

1. Рентгеновская оптика и микроскопия / П/р Г. Шмаля и Д. Рудольфа. М.: Мир, 1987.
  2. Б р о у д а й И., М е р е й Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985.
  3. Б а б и н С.В., Д а в ы д о в А.В., Е р к о А.И. ПТЭ, 1987, № 2, с. 191-195.
  4. A r i s t o v V.V., B a b i n S.V., D a v i -  
d o v A.V., E r k o A.I., S v i n t s o v A.A., R e d -  
k i n S.V. Microelectronic Engineering, 1987, N 6, с. 129-134.
  5. Б а б и н С.В., Д а в ы д о в А.В., Е р к о А.И.,  
С в и н ц о в А.А. Поверхность. Физика. Химия. Механика.  
1988, № 4, с. 79-82.
  6. Д а в ы д о в А.В., Е р к о А.И., П а н ч е н к о Л.А.,  
Р е д ь к и н С.В., С а з о н о в а Г.Д., Ю н к и н В.А. Пись-  
ма в ЖТФ, 1987, 13, вып. 16, с. 1017-1020.
-