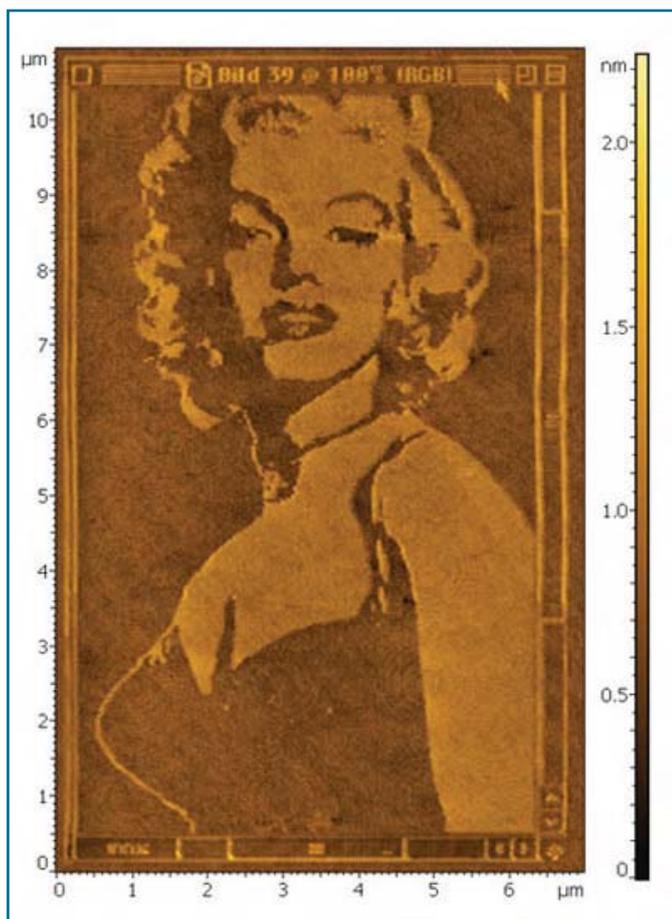


НАНОЛИТОГРАФИЯ (Nanolithography)

*«Филадельфийский сюр: разгар зимы,
Дождь медлит, не решается стать снегом,
Гуашью растекается под небом,
Окрашивая утренние сны.
И улица стихает... тормозит...
Теряет цвет, объем под слоем мела,
Лишь девочка в пальтишке черно-белом
По зимней литографии скользит...»*
Елена Максина



Портрет Мэрилин Монро, «написанный» методом литографического анодного окисления пленки аморфного титана с помощью ACM NTEGRA Prima

Литография (от греческих слов «lithos» – камень и «grapho» – пишу, рисую) была создана в 1798 году Алоизием Зенефельдером в Богемии.

Это была первая принципиально новая после изобретения гравюры техника печати. Однако в XX веке этот термин начали применять не только в книгопечатании, но и в производстве микроэлектроники. На данный момент под «литографией» понимают метод подготовки поверхности путем использования некоего шаблона, который определяет свойства конечного образца. Этот принцип оказался очень удобным при массовом производстве микросхем с отдельными элементами меньше 1 мкм.

Развитие метода сегодня ориентировано на создание топологического рисунка на поверхности монокристаллических кремниевых пластин. Учитывая размеры современных транзисторов ($\square 200$ нм), можно говорить о необходимости нанолитографии. Дальнейшее развитие микроэлектроники предполагает использовать литографические схемы для производства вычислительных машин вплоть до 2009 г., на который намечен выпуск процессора по 32-нанометровой технологии.

Наиболее простая методика создания наномикроструктур – оптическая литография – очень схожа с процессом печати фотографии. На подложку (например, кремниевую) наносится светочувствительное вещество – фоторезист, которое изменяет структуру под действием излучения (рис. 1а). На маску (пластинку с прорезями, служащую шаблоном и изготовленную из материала, не пропускающего излучение) пропускается пучок фотонов с длиной волны $\lambda = 10 \div 1000$ нм,

попадающий на резист. В засвеченных областях резист меняет состав или структуру, а в затененных – остается без изменения (рис. 1б). Далее, часть резиста вытравливается (засвеченная в случае негативного фоторезиста, затененная в случае позитивного), при этом другая часть остается без изменения, создавая на подложке рельефный рисунок, соответствующий рисунку шаблона-маски (рис. 1в). Разрешающая способность метода оптической литографии в основном определяется длиной волны используемого излучения и размером элементов маски. Для обычных масок оптимальная разрешающая способность метода составляет $\sim 1,5 \div 2\lambda$, тогда как использование так называемых фазосдвигающих масок позволяет более четко разделить элементы микросхемы и повысить разрешение до $\sim 0,5 \div 1\lambda$. Сегодня фазосдвигающие маски используются для производства транзисторов по технологии MOSFET с 30-нанометровой длиной затвора.

Необходимость уменьшения размеров элементов микроэлектроники накладывает ограничения во-первых, на длину волны используемого излучения и, во-вторых, на линейные размеры прорезей шаблона. Так, еще недавно широко применяемые в производстве микросхем источники на основе ртутных ламп (436–254 нм), сегодня заменены ArF-лазерами ($\lambda = 193$ нм) и даже рассматривается возможность использования синхротронного излучения для снижения длины волны вплоть до нескольких нанометров и, как следствие, повышения разрешающей способности литографической схемы. При уменьшении линейных размеров рисунка маски большую роль начинают играть эффекты рассеяния излучения на границах раздела фаз, которые приводят к размытию конечного рисунка на резисте. Например, для нанесения четкого отображения на резисте в форме квадрата (рис. 2а) на маске оказывается необходимым сформировать дополнительные прорезы в его вершинах (рис. 2б). Но даже в этом случае отображение оказывается несколько «размытым» (рис. 2в).

Более сложные схемы можно производить, если пучок излучения заменить на пучок электронов или ионов (электронно- или ионно-лучевая литография). Поскольку эти частицы имеют заряд, становится возможным не только засвечивать резист через маску, но также сфокусированным управляемым пучком писать на ре-

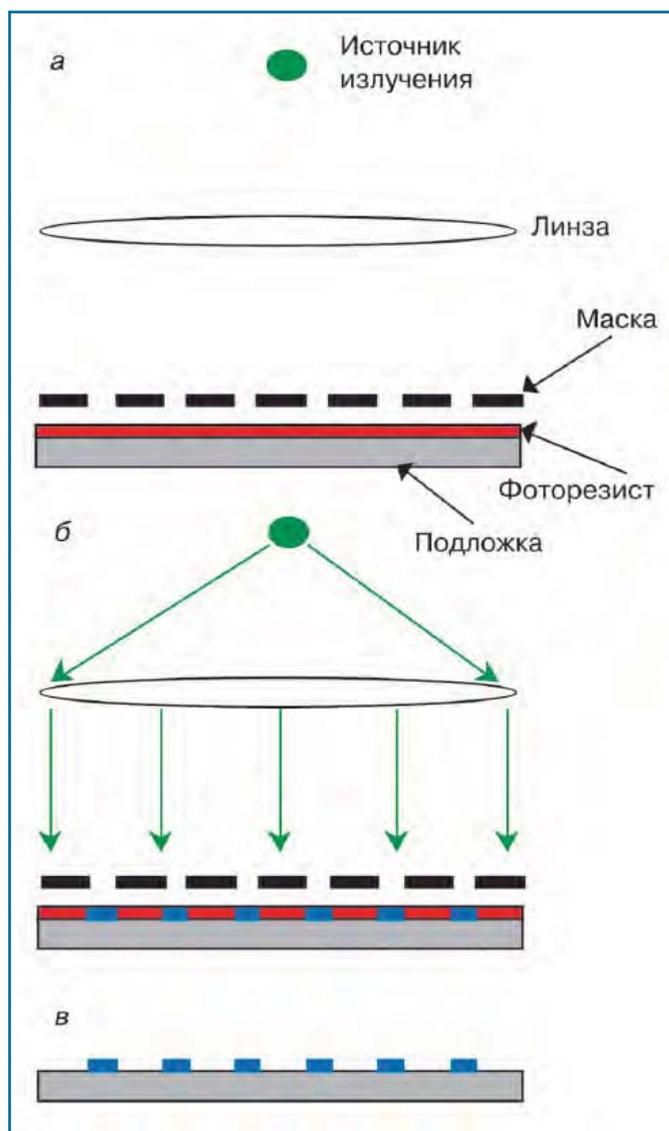


Рис. 1. Принципиальная схема литографии (а–в) с использованием источника, маски и позитивного фоторезиста

зисте как ручкой или карандашом по бумаге (см. **ФИП-нано­литография**). В случае ионов тяжелых атомов можно как модифицировать резист, так и вытравливать саму подложку или, наоборот, наносить на нее слой атомов или легировать материал подложки. В данной литографической схеме можно добиться более высокой разрешающей способности (< 100 нм), чем в оптической, однако значительная глубина проникновения электронов в облучаемый материал, процессы генерации вторичных электронов в объеме резиста приводят к значительному размытию экспонированных областей и разогреву маски, что отрицательно сказывается на качестве «рисунка».

Еще одним методом, причисляемым к литографическим, является «печатная» литография. В

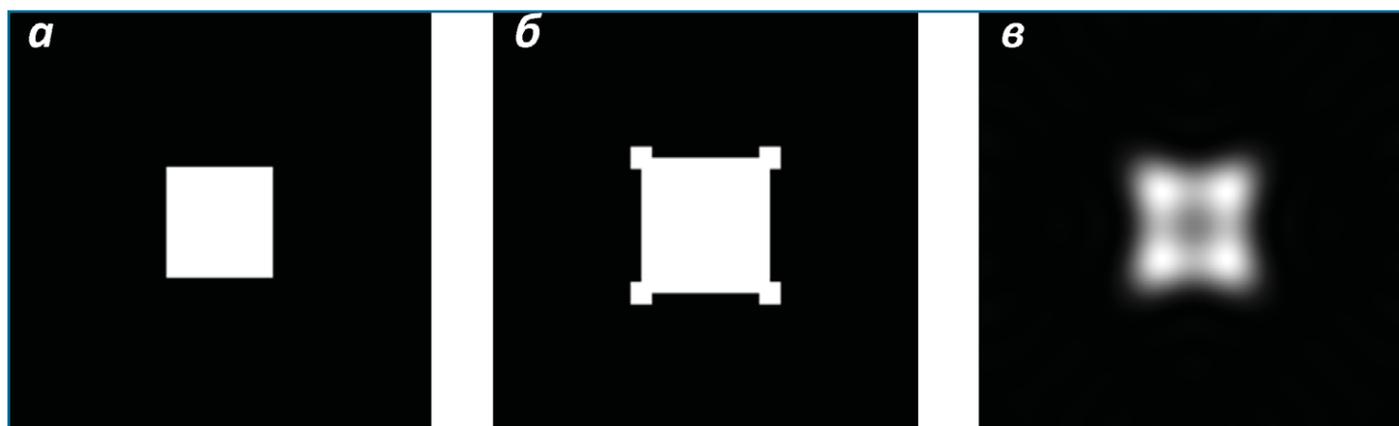


Рис. 2. Форма требуемого изображения (а), используемой маски (б), получаемого изображения (в)

данном случае маска представляет собой рельефную пластину, которую прижимают к подложке с «мягким» резистом. Таким образом рисунок с маски на резист переносится механически – путем деформирования резиста, подобно тому, как рельефный рисунок переносится путем придавливания печати к нагретому сургучу.

После создания рельефного рисунка из резиста подложка может быть окислена или протравлена в областях, не защищенных фоторезистом, или, наоборот, в «канавки» этого рельефа может быть нанесено вещество, например проводник. Таким образом, литография позволяет направленно изменять свойства определенной части подложки, что в дальнейшем используется для создания более сложных схем с отдельными элементами размером от 10 нм.

Локальное механическое воздействие на поверхность подложки можно производить иглой *атомно-силового микроскопа* (АСМ) в двух режимах. В статическом режиме (наногравировка) зонд микроскопа перемещается по поверхности

подложки с достаточно большой силой прижима, так что на подложке (резисте) формируется рисунок в виде царапин. Динамический режим (наночеканка) подразумевает модификацию поверхности образца за счет формирования углублений колеблющимся зондом (прерывисто-контактный метод сканирования). Альтернативой непосредственному механическому воздействию иглой АСМ на подложку или нанесенный резист является модификация поверхности с помощью электрических импульсов. Это становится возможным благодаря приложению разности потенциалов между иглой микроскопа и проводящей подложкой. В результате такого воздействия, изменяя потенциал, можно направленно менять структуру и химический состав поверхности, создавая очень сложные и красивые рисунки. Например, портрет Мэрилин Монро «написан» методом литографического анодного окисления пленки аморфного титана с помощью АСМ NTEGRA Prima.

Литература:

1. Nanoelectronics and Information Technology. 2.9 – Technology and Analysis: Lithography / Ed. by R. Waser, Wiley-VCH, Germany. 2005.
2. Jay Jao L. Adv. Mater. 2007. Vol. 19. P. 495–518.