

Дифракцию в узком интервале углов с высокой точностью изучают с помощью более сложной (и более дорогой) аппаратуры — рентгеновских дифрактометров.

Лит.: Ужанинский М. М., Аппаратура рентгеноструктурных исследований, М., 1960; Гинье А., Рентгенография кристаллов, пер. с франц., М., 1961; Финкель В. А., Высокотемпературная рентгенография металлов, М., 1968; его же, Низкотемпературная рентгенография металлов, М., 1971.

В. В. Зубенко.

РЕНГЕНОВСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ — метод микроэлектронной технологии, заключающийся в формировании с субмикронным разрешением защитной маски заданного профиля на поверхности подложки; осуществляется при помощи рентг. излучения длиной волны $\lambda \sim 0,4-5$ нм; один из методов микролитографии. Маска изготавливается из стойкого к технол. воздействиям материала — полимерного резиста; необходимый рисунок формируется с помощью рентгеношаблона. Поток рентг. излучения направляют на рентгеношаблон (рис. 1), к-рый этот поток пространственно модули-

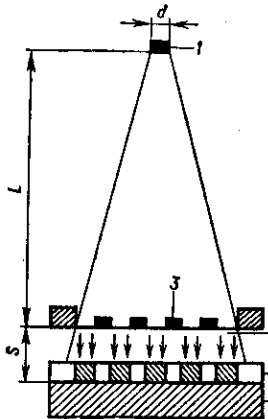


Рис. 1. Схема рентгеновской литографии. Излучение рентгеновского источника 1 с размером излучающей области d падает на рентгеношаблон, расположенный на расстоянии L от него и состоящий из прозрачной для излучения мембраны 2 и сильно поглощающего покрытия 3, в к-ром сформирован рисунок. Пройдя через свободные от маскирующего покрытия участки шаблона, излучение экспонирует пленку резиста 4, покрывающую поверхность подложки 5. S — расстояние между шаблоном и подложкой.

рует. Резист поглощает попавшее на него излучение, и т. о. в нём формируется скрытое изображение рентгеношаблона: под действием излучения в резисте образуются высокоэнергетичные (с энергией $\mathcal{E} \sim 1$ кэВ) фото- и оже-электроны, к-рые вызывают сшивание молекул резиста или их деструкцию. В зависимости от того, какой из процессов преобладает, при проявлении на подложке остаются либо облучённые, либо необлучённые участки, т. е. получается негативное или позитивное изображение рисунка шаблона (рис. 2). Соответственно резисты делятся на негативные и позитивные.

Благодаря малой длине волны λ рентг. излучения методы Р. л. обладают высокой разрешающей способностью (~ 10 нм). По сравнению с электроно- и ионолитографией в Р. л. малы радиац. повреждения формируемых структур и высока производительность благодаря возможности одноврем. обработки больших площадей образца. Р. л. отличается большой глубиной реакции и малым влиянием материала подложки и её топографии на разрешающую способность.

Разрешающая способность Р. л. определяется неск. факторами. Основные из них: дифракционное $\delta_1 = \sqrt{S\lambda}$, полутеневое $\delta_2 = S(d/L)$ (обозначения см. на рис. 1) и фотоэлектронное $\delta_3 \sim \mathcal{E}^{1,75}$ размытия границ скрытого изображения. Величина δ_3 определяется длиной пробега фото- и оже-электронов в резисте и зависит от состава резиста и λ (рис. 3). Полутеневое размытие можно в достаточной степени уменьшить подбором значений S , d и L . Теоретически предельная разрешающая способность Р. л. (контактное экспонирование; $S = H_0$, где H_0 — толщина резиста) достигается при $\lambda \approx 5$ нм и составляет ок. 5 нм. Разрешение, близкое к предельному (17,5 нм), получено при экспонировании позитивного резиста — полиметилметакрилата (ПММА) излуче-

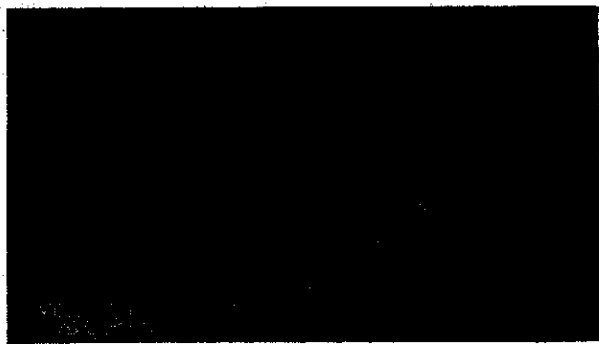
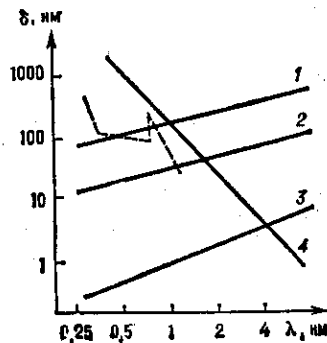


Рис. 2. Фотография тестовой структуры с шириной линий 0,3 мкм, сформированной методом рентгеновской литографии в позитивном резисте толщиной 3 мкм, полученная в растровом электронном микроскопе (РЭМ-фотография).

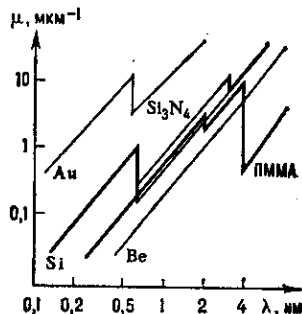
нием $S_{K\alpha}$ ($\lambda = 4,48$ нм). Для того чтобы электрофиз. характеристики элементов интегральных схем имели разброс в допустимых пределах, необходимо, чтобы точность воспроизведения размеров элементов составляла не менее 10% от их ширины, т. е. разрешающая способность метода должна превышать мин. размеры элементов.

Рис. 3. Зависимость дифракционного и фотоэлектронного пределов разрешения от λ . Дифракционное размытие приведено для величин заворов 1 и 25 мкм, а также для случая контактного экспонирования — прямые 1, 2 и 3 соответственно; 4 — зависимость эффективного пробега фотоэлектронов в органическом резисте; пунктирная кривая — участок аналогичной зависимости для резиста, в состав которого для увеличения поглощения излучения введены атомы кремния. Вблизи начтков поглощения ход зависимости немонотонен, что связано с резким изменением энергетического спектра фото- и оже-электронов.



Р. л. предъявляет высокие требования к рентгеношаблонам. Мембрана шаблона при достаточно высокой механич. прочности и стабильности должна пропускать не менее 50% излучения (что возможно при толщинах ~ 1 мкм), а нанесённое на неё маскирующее покрытие быть высококонтрастным — сильно (на порядок) ослаблять поток излучения, толщина же покрытия не должна

Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения рентгеновского излучения материалами, используемыми для изготовления рентгеношаблонов, и стандартного резиста (ПММА) от λ .



превышать 1 мкм, т. к. в более толстом маскирующем покрытии затруднено формирование рисунка с субмикронными размерами.

Для излучения с $\lambda < 0,3$ нм отсутствуют материалы для изготовления высококонтрастного маскиру-