

## Лекция 17

### Контактная фотолитография

*Нанесение слоя резиста.* Наиболее распространенным методом нанесения фоторезиста на подложки является центрифугирование: при включении центрифуги жидкий фоторезист растекается под действием центробежных сил. При центрифугировании на краю подложки всегда возникает утолщение - "валик", ширина и высота которого зависят от вязкости резиста, скорости вращения центрифуги и формы подложки. В слое, нанесенном на центрифуге, всегда есть внутренние напряжения, плотность дефектов довольно высока, в частности, из-за того, что пыль из окружающей среды засасывается в центр вращающегося диска.

*Первая сушка* при температурах 80 - 90 °С заканчивает формирование слоя фоторезиста. При удалении растворителя объем полимера уменьшается, слой стремится сжаться, но жестко скрепленная с ним подложка препятствует этому. Величина и характер возникающих напряжений определяются свойствами фоторезиста и режимами сушки, в частности, приближением к температурному интервалу пластичности полимера. Обычно используют ИК сушку.

*Экспонирование (совмещение) и проявление* неразрывно связаны между собой. В силу этого для выбора режимов, обеспечивающих точную передачу размеров, необходимо одновременно изменять время проявления и время экспонирования. На практике, однако, часто пользуются методом подбора оптимального значения одного параметра при фиксации другого.

Для любого типа резистов снимают зависимости точности передачи размеров изображения от времени проявления при фиксированном времени экспонирования и от времени экспонирования при фиксированном времени проявления. В результате находят оптимальные времена, соответствующие точной передаче размеров.

*Проявление.* Для проявления позитивных резистов используют водные щелочные растворы: 0,3 - 0,5%-ный раствор едкого кали, 1 - 2%-ный раствор тринатрийфосфата, органические щелочи - этаноламины. При проявлении очень важно контролировать температуру и величину pH проявителя.

При изменении величины pH всего лишь на десятую долю размер элемента меняется примерно на 10 % от номинала. Для проявления негативных фоторезистов используются органические растворители.

*Сушка проявленного слоя* проводится при температурах 140 - 180 °С. От характера изменения температуры во время сушки зависит точность передачи размеров изображений. Резкий нагрев вызывает оплывание краев, поэтому для точной передачи малых (1 - 2 мкм) размеров следует применять плавное или ступенчатое повышение температуры. Примерный режим сушки позитивного резиста ФП-383: 10 - 15 минут при комнатной температуре, 20 - 25 минут в

термостате при 120 °С, затем переключение термостата и нагревание до 150 - 160 °С.

*Травление* чистой и легированной двуокиси кремния, а также примесносиликатных стекол с защитой рельефом из резиста осуществляется в буферных травителях, состоящих из 1 - 2 частей плавиковой кислоты и 8 - 9 частей 40%-ного водного раствора фтористого аммония. Окисел, легированный бором, травится почти с той же скоростью, что и нелегированный, и только у самой границы с кремнием скорость возрастает. Наоборот, легированные фосфором окислы травятся сначала гораздо быстрее, затем скорость травления уменьшается. Соответственно будут отличаться профили на границе вытравленных в окисле рельефов. Эти соображения носят общий характер, а конкретный процесс травления зависит от степени легирования окисла примесями. Богатые бором и фосфором примесносиликатные стекла травятся очень быстро. Скорость травления фосфоросиликатных стекол достигает 30 нм/с, что в 25 - 40 раз выше скорости травления чистого окисла.

*Удаление с подложки* фоторезиста завершает фотолитографический процесс, для чего используются в основном химические и термические способы. В последнее время применяется обработка в ВЧ плазме кислорода.

### **Искажение рисунка при контактной фотолитографии**

При экспонировании рисунка в процессе фотолитографии наблюдается ряд оптических эффектов, вызывающих искажение изображения. Фотошаблон с рисунком современной интегральной схемы является некоторым аналогом дифракционной решетки. В результате дифракции возникают нерезкость и неровности края рисунка. Изгиб подложки, ее неплотное прилегание к шаблону при экспонировании, т.е. существование зазора между поверхностями подложки и шаблона может приводить к значительным искажениям рисунка. При дифракции на краю рисунка световой поток расширяется и заходит в область геометрической тени. Огибающая этого потока образует с нормалью к поверхности фоторезиста угол дифракции  $\varphi$ , зависящий от величины зазора  $d$  и длины волны света  $\lambda$ :

$$\sin \varphi = \lambda / nd,$$

где  $n$  - коэффициент преломления света в воздушном зазоре.

Ширина освещенной зоны  $\delta$  в области геометрической тени равна  $d\lambda / a$ , где  $a$  - размер окна рисунка шаблона. При этом если в области окна интенсивность света  $E_0$  постоянна, то в области геометрической тени она неравномерна и имеет несколько убывающих по величине дифракционных максимумов с интенсивностью, меньшей  $E_0$ . Когда размеры окна  $a \gg \lambda$ , увеличение размеров изображения даже при достаточно длительном экспонировании незначительно. Однако при малых значениях  $a$  интенсивность

света на ширине  $\delta$  может быть велика. Так, если  $a = 10$  мкм,  $\lambda = 0,4$  мкм,  $d = 1$  мкм и толщина резиста  $h = 1$  мкм, то увеличение изображения  $\delta$  для неотражающей подложки составит 0,04 мкм. С уменьшением  $a$  до 1 мкм при тех же остальных размерах изображение увеличится до 2,4 мкм, причем только за счет зазора между шаблоном и подложкой увеличение составит 0,43 мкм. Следовательно, для точной передачи размеров необходимо уменьшать зазор  $d$  и толщину слоя фоторезиста  $h$ . Подбирая величину экспозиции и время экспонирования, можно достичь достаточно точной передачи размеров окна. Наиболее перспективно в этом направлении использование более коротковолнового излучения.

### **Литография в глубокой ультрафиолетовой области**

Уменьшение размеров элементов ИМС от 1,5 - 1 мкм при стандартной фотолитографии до 0,5 мкм может быть достигнуто путем уменьшения длины волны экспонирующего излучения до 200 - 300 нм, называемого глубокой ультрафиолетовой областью (ГУФ). Можно использовать обычные оптические литографические установки, модернизированные для работы с более коротковолновым излучением.

Однако эта возможность ограничивается целым рядом факторов, связанных с созданием компактных источников излучения в диапазоне 200 - 300 нм, разработкой новых фоторезистов (известные фотолаки и фоторезисты чувствительны к длинам волн не более 300 нм), заменой стеклянной оптики (в этом диапазоне длин волн стекло очень сильно поглощает свет).

Для получения субмикронных размеров с помощью ГУФ в качестве источника можно использовать дуговые лампы с ксеноно-ртутным наполнителем ( $\lambda = 200 - 260$  нм), а также дейтериевые лампы мощностью 1 кВт. Как фоторезист чаще других используется полиметилметакрилат (ПММК). Перспективно применение фоторезиста на основе полиметилизопропенилкетона, чувствительность которого к излучению с  $\lambda \leq 300$  нм в несколько раз выше, чем чувствительность ПММК. Фотошаблонные заготовки для фотолитографии в области ГУФ изготавливаются не из стекла, а из кварца или сапфира, на поверхность которых наносится слой непрозрачного металла (Cr, Al).

### **Проекционная фотолитография**

Современная микроэлектроника требует не только уменьшения размеров элементов микросхем до 0,35 мкм и менее, но и размещения элементов подобных размеров на все больших площадях вплоть до использования подложки диаметром 200 мм, 300 мм.

Одним из методов, обеспечивающих высокое разрешение на больших полях и исключающих непосредственный контакт подложки и фотошаблона, является проекционная фотолитография.

Возможны следующие варианты оптической проекционной фотолитографии:

- 1) одновременная передача (проецирование) изображения всего фотошаблона на полупроводниковую пластину, покрытую фоторезистом;
- 2) последовательное поэлементное экспонирование изображения одного или разных типов модулей с уменьшением или без него;
- 3) последовательное вычерчивание изображения на фотослое сфокусированным световым лучом, например, лазерным, управляемым от ЭВМ.

Для успешного использования проекционной литографии необходима автоматическая система совмещения. Поэтому наиболее широкое распространение получил первый вариант проекционной фотолитографии; второй вариант применяется при монтаже модулей, третий вариант пока используется главным образом для изготовления фотошаблонов.

Возможны несколько способов проведения проекционной фотоли-тографии по первому варианту (рис.4.2):

- совмещение и экспонирование посредством одного источника;
- совмещение фотошаблона с подложкой в пространстве изображения с помощью зеркала и микроскопа;
- проекция изображения поверхности полупроводниковой пластины в плоскость фотошаблона.