

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПОЛОГИИ СУБМИКРОННЫХ ИС НА РЕЛЬЕФЕ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

Научно-исследовательское конструкторско-технологическое предприятие «Белмикросистемы», Министерство промышленности РБ, г. Минск, Республика Беларусь

Выбор типа установок проекционной фотолитографии при комплектовании линии по производству ИС с проектными нормами менее 1,0 мкм требует всестороннего анализа их технических характеристик, влияющих на качество формирования изображения топологических элементов. Известное выражение

$$R=K(\lambda/NA), \quad (1)$$

где λ – длина волны; NA – числовая апертура объектива; K – константа, зависящая от уровня стабильности и воспроизводимости технологического процесса, (1) для разрешающей способности установок проекционной печати применительно к рассматриваемым типам установок, использующим излучение G , H диапазона (436, 404 нм), позволяет рассчитать предел их разрешающей способности, обуславливаемый как фундаментальными ограничениями, так и ограничениями техпроцесса.

Величина K в (1) изменяется от 0,5 (соответствует дифракционному пределу) до 0,8 (обычно рассматривается как верхний предел при хорошо отлаженном технологическом процессе).

Из (1) легко получить предел по разрешению, который при высокой степени отлаженности процесса составляет 0,7 мкм, что дает возможность их использования для качественного переноса изображения и включения в состав технологических линий, по крайней мере, для производства изделий с проектными нормами не менее 0,8 мкм при приемлемой неплоскостности исходных кремниевых пластин и рельефа структуры ИС.

Теоретические расчеты и практика применения проекционной фотолитографии показывают, что при переходе к размерам, близким к предельно разрешимым для установки конкретного типа, определяющую роль для воспроизводимого получения требуемого размера элементов топологии на реальном рельефе играет глубина фокусировки. Глубина фокусировки должна быть достаточно большой, чтобы формируемое изображение было не чувствительно как к погрешностям системы автофокусировки установки, так и неплоскостности фоторезиста, рельефа и подложки. Глубина резкости изображения (глубина фокуса или величина дефокусировки), необходимая для формирования изображения элемента с линейным размером L , может быть определена по полуэмпирической формуле:

$$\pm Fd=0,4L^2/\lambda, \quad (2)$$

где $2Fd$ – общая глубина фокуса; λ – длина волны; L – линейный размер элемента.

При подстановке разрешающей способности из уравнения (1) в выражение (2) можно определить минимальную глубину фокуса, необходимую для переноса изображения с размером L .

Как следует из (1) и (2), воспроизводимость линейного размера элементов топологического рисунка является функцией характеристик не только проекционного оборудования таких, как глубина фокусировки, погрешность работы системы автофокусировки и время экспонирования, но и исходных материалов (неплоскостность подложки, свойства фоторезиста), и технологического процесса (воспроизводимость толщины нанесенного фоторезиста на подложку и степени планаризации рельефа вертикальной структуры ИС).

Неплоскостность подложки для качественного формирования линейного размера элементов

топологического рисунка можно определить из выражения:

$$TIR \leq 2Fd - \Delta Fd - d, \quad (3)$$

где TIR – неплоскостность подложки на поле модуля; ΔFd – погрешность работы системы автофокусировки; d – толщина фоторезиста в местах максимального рельефа.

Известны методы экспонирования на установках проекционной печати с разнесенными плоскостями фокусировки в несколько проходов (IEEE El. Dev. Lett.-1987-V. ED-8, №4, p.179), но они существенно (более чем в 1,5 раза) снижают производительность установок. Более рациональный подход заключается в определении оптимальных режимов экспонирования и выработке требований к размерам элементов при проектировании топологии промежуточного шаблона для обеспечения качественного формирования элементов с учетом того, что размеры по фоторезисту отдельностей элементов и аналогичных в группе элементов при одинаковом номинале на промежуточном шаблоне при переносе их изображения на пластину с помощью установок проекционной печати будут различны.

Для определения модели и аналитического выражения зависимости изменения линейного размера изолированных элементов и группы элементов с различным шагом при одинаковом номинале на промежуточном шаблоне от параметров экспонирования (изменения фокуса и времени экспонирования) использовался регрессионный анализ (К.Я. Курицкий, Поиск оптимальных решений средствами EXCEL, СПб.: ВНУ-Санкт-Петербург, 1997).

Коэффициенты регрессии определялись для двух наиболее значимых факторов (смещение фокуса и время экспонирования). Исходные данные для нахождения коэффициентов регрессии были получены в результате проведения эксперимента.

Значения смещения фокуса варьировались в пределах $-2,2 \text{ мкм} < F < 1,4 \text{ мкм}$, а значения времени экспонирования $-0,44 \text{ с} < T < 0,74 \text{ с}$. Линейные размеры элементов после экспонирования определялись посредством измерений поверхностного сопротивления слоя поликремния толщиной $0,45 \text{ мкм}$ электрическим методом (тест Ван-дер-Пау) на автоматизированной установке АИК ТЕСТ 2, то есть рассчитывалась эффективная ширина элемента, соответствующая прямоугольному сечению после плазмохимического травления. Элементы топологии выполнены в виде отдельностей темных элементов и регулярной структуры с набором светлых и темных элементов различного номинала.

Были получены следующие уравнения регрессии:

– для отдельно стоящего элемента

$$Y=798,58+53,6F-185,54T-76,18F^2+45,7T^2+102,8FT, \quad (4)$$

– для элемента в регулярной структуре

$$Y=729,48+24,4F-378,23T-48,63F^2-138,15T^2+31,14FT. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации для обоих уравнений имеет значение, близкое к единице (0,93 и 0,97, соответственно).

Анализ этих уравнений позволил выявить как преобладающее влияние экспозиции на формирование линейного размера, так и взаимное влияние двух выделенных факторов – смещение фокуса и время экспонирования. Как видно из рис. 1, 2, значения оптимальной экспозиции для отдельно стоящего элемента и для элемента в регулярной структуре не совпадают, а светлые элементы (зазор) с размером $0,8 \text{ мкм}$ и менее на данных установках формируются при меньшем запасе по фокусу и времени экспонирования (рис. 3, 4), что необходимо учитывать при проектировании топологии субмикронных ИС, используемой на установках проекционной печати типа ЭМ-5084Э и ЭМ-5384А с масштабом изображения 5:1.

Анализ уравнений регрессии выявил смещение оптимальной плоскости фокусировки, которая отстоит от нуля фокусировки (определяется встроенным датчиком на установках проекционной печати) на $0,5 \text{ мкм}$ в плюс.

Формирование размера элементов с допуском $\pm 10\%$ обеспечивает установление следующих границ изменения факторов: для смещения фокуса от $-0,75$ до $1,25 \text{ мкм}$, а для времени экспонирования от $0,5$ до $0,68 \text{ с}$. Эти диапазоны сужаются при одновременном формировании на поле модуля отдельностей элементов и элементов в регулярной структуре. РЭМ фотографии сформированных тестовых структур с размерами $0,8$ и $0,9 \text{ мкм}$ в слое фоторезиста приведены на рис. 5–7.

Используя уравнение (3) при известных погрешностях работы системы автофокусировки установок ЭМ-5084Э и ЭМ-5384А ($0,2 \text{ мкм}$), а также толщине фоторезиста ($1,0$ – $1,2 \text{ мкм}$) и диапазоне

фокуса можно определить требования к локальной неплоскости пластин. В данном случае при переходе к нормам проектирования ИС менее 0,9 мкм и использовании указанных выше установок проекционной печати для удовлетворения условий неравенства (3) необходимы пластины с локальной неплоскостью не более 0,5 мкм на поле модуля 15x15 мм² и максимальной высотой рельефа 0,3–0,4 мкм (при этом уход линейного размера от номинала составляет не более ±0,05 мкм).

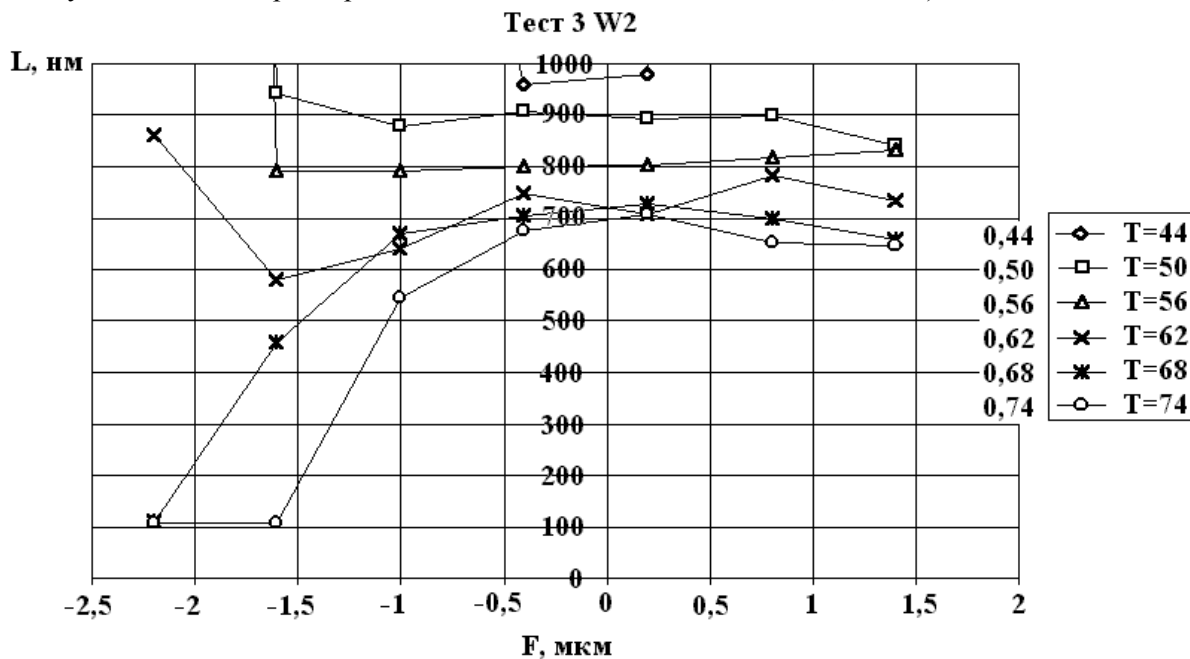


Рис. 1. Зависимость линейного размера (L) от смещения фокусировки (F) при различной экспозиции (T) для элементов в регулярной структуре при размере светлого элемента 0,8 мкм.

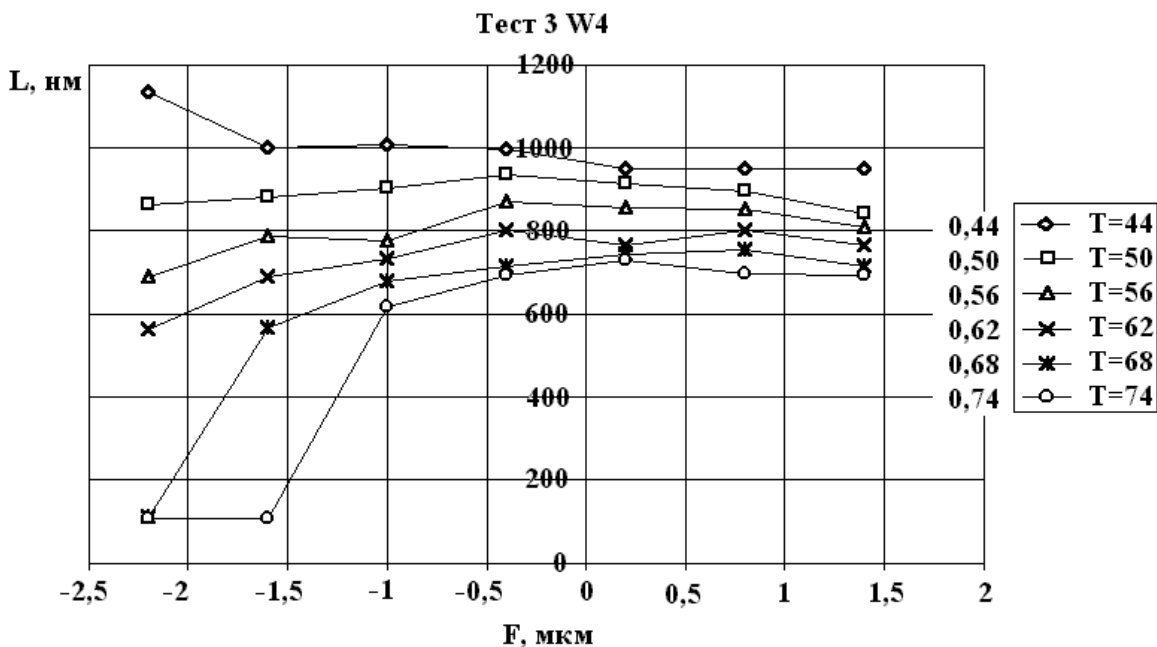


Рис. 2. Зависимость линейного размера (L) от смещения фокусировки (L) при различной экспозиции (T) для отдельного элемента.

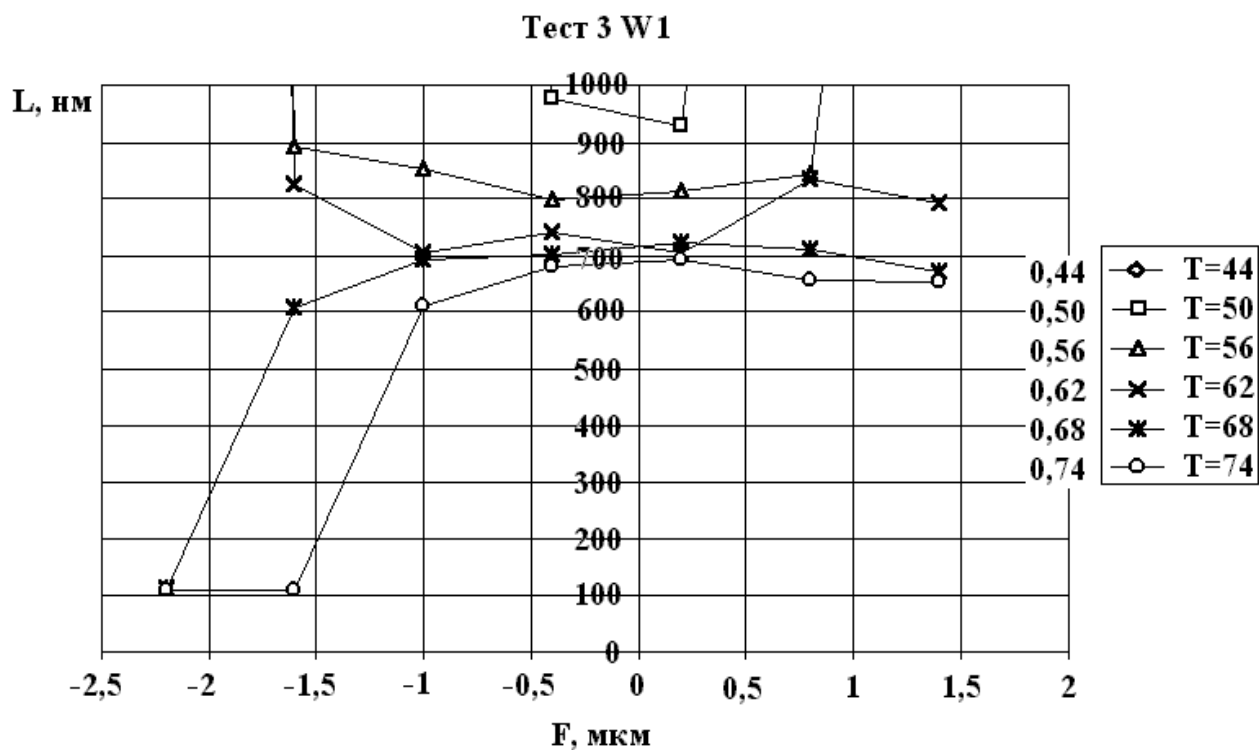


Рис. 3. Зависимость линейного размера (L) от смещения фокусировки (F) при различной экспозиции (T) для элементов в регулярной структуре при размере светлого элемента $0,7$ мкм.

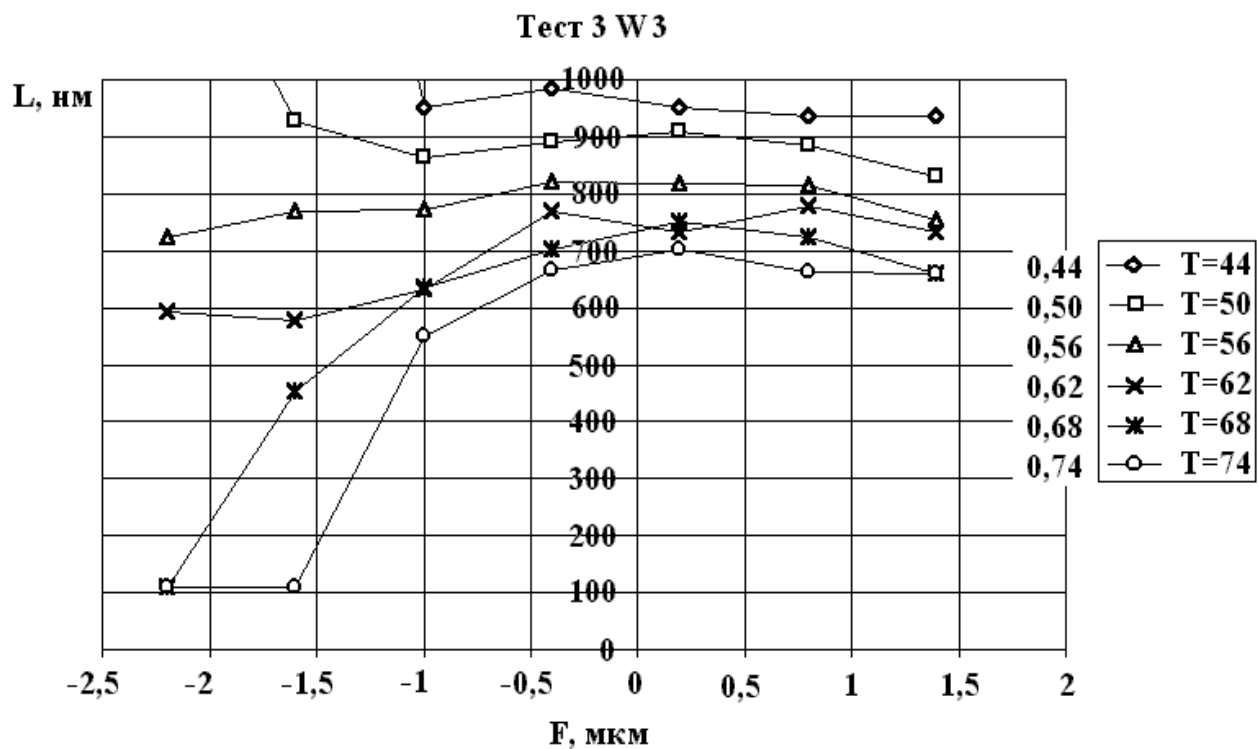


Рис. 4. Зависимость линейного размера (L) от смещения фокусировки (F) при различной экспозиции (T) для элементов в регулярной структуре при размере светлого элемента $0,9$ мкм.

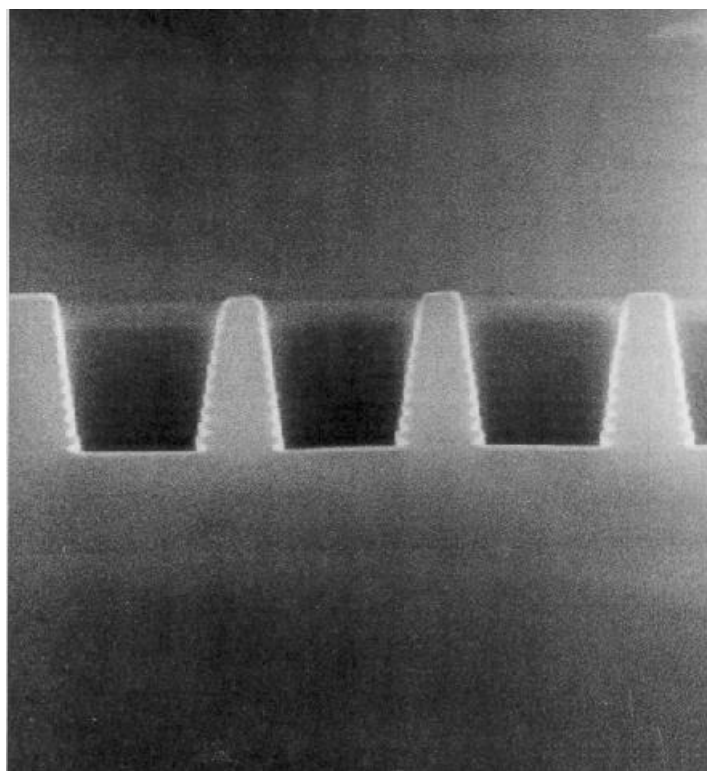


Рис. 5. РЭМ-фотография профиля элементов в регулярной структуре при размере светлого элемента 0,8 мкм в оптимальном фокусе и времени экспонирования 0,5 с.

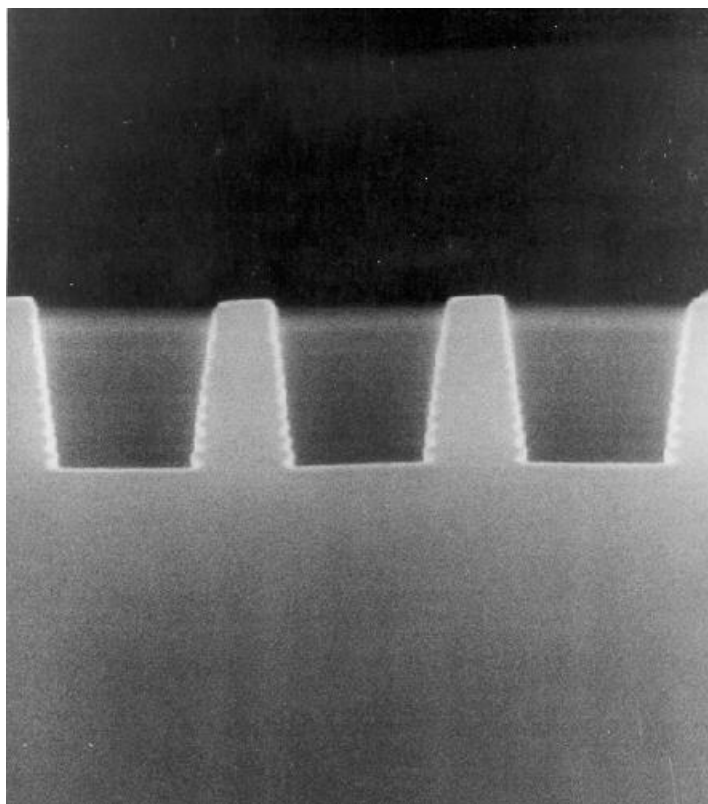


Рис. 6. РЭМ-фотография профиля элементов в регулярной структуре при размере светлого элемента 0,9 мкм в оптимальном фокусе и времени экспонирования 0,5 с.

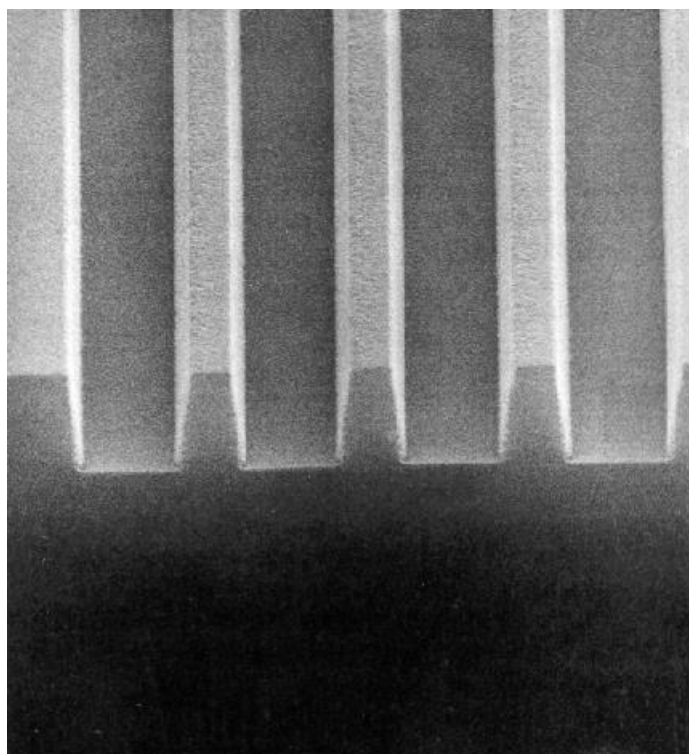


Рис. 7. РЭМ-фотография элементов в регулярной структуре при размере светлого элемента 0,8 мкм в оптимальном фокусе и времени экспонирования 0,5 с.

Таким образом, уравнения регрессии, полученные в настоящей работе, позволяют оценивать вклад наиболее значимых характеристик проекционного оборудования, определяющих воспроизводимость линейных размеров топологических элементов ИС в диапазоне 0,7–0,8 мкм в фотолитографическом процессе с использованием установок проекционной печати типа ЭМ-5084Э и ЭМ-5384А с масштабом изображения 5:1, а выражения (2), (3) позволяют выработать требования к неплоскостности пластин и величине рельефа структуры.

Поступила 27.09.99

Summary

The work investigates the key suitability criteria for use of Specialized Technological Equipment (STE) in the process of Sub-Micron IC (SMIC) fabrication. Thorough investigation was made and general technical demands to design, fabrication and transportation and use of various types of (STE) for SMIC were stated.
