

В. Б. ГУРСКИЙ, Р. Е. ПЯТЕЦКИЙ

(Минск)

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАЗМЕРА ЭЛЕМЕНТА В ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Введение. Непрерывное развитие микроэлектроники требует снижения размера минимального элемента БИС вплоть до 0,2—0,25 мкм [1—3]. В связи с этим первостепенное значение приобретает повышение стабильности размера, так как воспроизводимым может считаться минимальный элемент с размером в 5—10 раз больше величины технологического разброса размеров этого элемента в условиях производства. Нестабильность размера элемента в современных сканирующих электронолучевых установках, особенно при прямом экспонировании полупроводниковой пластины, можно оценить величиной 0,15 мкм [4, 5], что позволяет получать минимальный элемент БИС размером 0,7—1,5 мкм. Современное проекционное фотолитографическое оборудование, предназначенное для мультиплицирования на рельефную полупроводниковую пластину (ступеньки SiO₂, Al и т. д.), дает нестабильность размера 0,5 мкм для элементов рисунка внутри одной пластины [6—9] даже при стабильном литографическом процессе. Следовательно, для многослойной сложной БИС минимальным воспроизводимым размером элемента следует считать 2,5—5 мкм.

Один из путей повышения стабильности проекционной фотолитографии — уменьшение длины волны экспонирующего излучения. Например, при $\lambda = 250$ нм и числовой апертуре объектива $A = 0,5$ на малом поле можно получить нестабильность размера $\sim 0,25$ мкм с соответствующим минимальным элементом 1,25—2,5 мкм. Развитие фотолитографии в настоящее время идет именно по пути уменьшения длины волны [10].

Второй возможностью является использование когерентного света, что повышает резкость края элемента оптического изображения в 1,2 раза по сравнению с оптимальным случаем для частично-когерентного освещения и соответственно уменьшает минимальный воспроизводимый элемент [11].

Разброс толщины фоторезиста [7, 9] на ступеньках в SiO₂, Al и других обуславливает вследствие интерференционных эффектов нестабильность количества энергии, поглощенной фоторезистом. Дальнейшая групповая обработка фоторезиста (проявление, сушка и т. д.) вызывает соответствующий разброс размеров элементов по пластине. Известно, что границы элемента в фоторезистивной пленке определяются теми краевыми точками в изображении этого элемента, где поглощенная резистом энергия равняется пороговой энергии фоторезиста. Изменение поглощенной резистом энергии приводит к смещению названных краевых точек и соответственно к изменению размера элемента. Зависимость между изменением размера элемента и количеством поглощенной резистом энергии, вообще говоря, нелинейна. Однако для получения наименьшего разброса размеров элементов экспозиция обычно выбирается так, чтобы точки, в которых резист получает пороговую энергию, находились в середине линейного участка с максимальной крутизной краевой зоны оптического изображения элемента. При этих условиях зависимость отклонений размера элемента от изменений поглощенной энергии можно считать линейной. Поэтому еще одной возможностью снижения нестабильности размеров является локальная стабилизация количества энергии, поглощенной фоторезистом на рельефных пластинах. Однако это возможно только при генерировании мультиплицированного изображения на кремниевую подложку сравнительно небольшим числом элементов изображения, чтобы можно было измерять поглощенное количество энергии

в реальном масштабе времени непосредственно в точках, где проводится экспонирование, и управлять величиной экспозиции в этих точках.

Ниже исследована математическая модель (на базе модели Дилла фоторезистов. На основе модели Дилла можно рассчитать объемное распределение концентрации светочувствительной компоненты (ингибитора), величина которой определяет локальную скорость растворения фоторезиста в проявителе. Затем, зная зависимость скорости травления V фоторезиста от остаточной концентрации ингибитора M , можно рассчитать профиль края и размер экспонируемой линии после проявления. Для того чтобы рассчитать распределение концентрации по толщине $M(z)$, необходимо знать толщины пленок фоторезиста и окислов (например, SiO_2), их показатели преломления (n_{ph} , n_{SiO_2}), длину волны λ и интенсивность I_0 экспонирующего излучения, комплексный показатель преломления подложки N , а также параметры, характеризующие поглощение света фоторезистом.

Дилл определил коэффициент поглощения фоторезиста в виде

$$\alpha = AM(z, t) + B, \quad (1)$$

где A , B — коэффициенты, зависящие от типа резиста и условий его формирования (температуры и времени сушки) [16]; $M(z, t)$ — концентрация ингибитора в точке z в момент времени t .

Изменение концентрации ингибитора в процессе экспонирования описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial M(z, t)}{\partial t} = -I(z, t)M(z, t)C. \quad (2)$$

Здесь $I(z, t)$ — интенсивность световой волны в точке z в момент времени t ; C — светочувствительность резиста.

Параметры A , B , C определяются, например, по методике, изложенной в [16]. Подробная методика расчета многослойных поглощающих пленочных систем дана в [17], а примеры блок-схем программ для расчета распределения остаточной концентрации ингибитора после экспозиции $M(z, t)$ можно найти в [12, 14, 15].

На рис. 1 приведена блок-схема программы расчета параметров, необходимых для построения модели управления экспозицией на основе измерения величины энергетического коэффициента отражения R_0 от системы подложка — пленки в начальный момент экспозиции. Входными параметрами программы являются указанные выше параметры Дилла, а также требуемая величина остаточной концентрации ингибитора

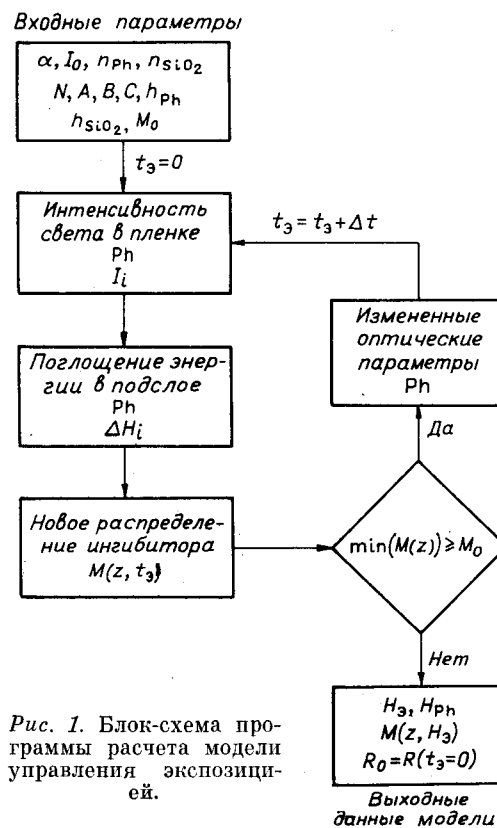


Рис. 1. Блок-схема программы расчета модели управления экспозицией.

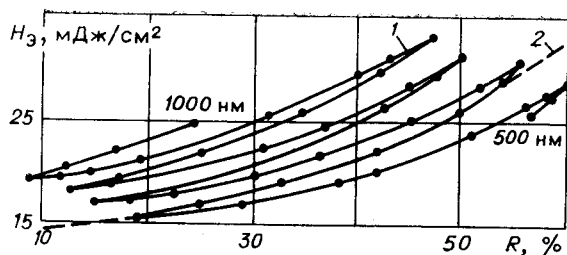


Рис. 2. Зависимость экспозиции, необходимой для получения заданной остаточной концентрации ингибитора M_0 в пучности стоячей волны, от коэффициента отражения и толщины пленки резиста:

1 — кривая, рассчитанная из модели; 2 — аппроксимирующая кривая $H_3^*(R_0)$; $A=0,54 \text{ мкм}^{-1}$; $B=0,03 \text{ мкм}^{-1}$; $C=0,014 \text{ мДж/см}^2$; $n_{\text{PH}}=1,65$; $N=0,2$ — $3,44 \text{ j}$; $J_0=50 \text{ мВт/см}^2$; $M_0=0,5$.

M_0 в пучности стоячей волны, ближайшей к границе раздела SiO_2 — фоторезист или подложка — фоторезист. На выходе получаем дозу экспозиции H_3 , необходимую для того, чтобы после экспонирования получилось распределение ингибитора с заданной концентрацией M_0 в пучности, величину энергии H_{PH} , поглощенную фоторезистом в результате экспонирования, и R_0 . Кроме того, для контроля выводится результирующее распределение концентрации ингибитора после экспозиции $M(z, t)$.

Однослойная система. На однослойной системе алюминий — фоторезист, используемой, например, для создания соединений в ИС, рассмотрим возможность управления экспозицией для повышения стабильности размера элементов в проекционной фотолитографии.

На рис. 2 показана зависимость $H_3(R_0)$ (кривая 1), рассчитанная на основе модели в диапазоне толщин фоторезиста 0,5—1 мкм. Шаг толщины пленки резиста между расчетными точками (выделены точками) 10 нм. Время счета всей кривой на ЭВМ ЕС-1040 20 мин. Величины параметров A, B, C взяты для резиста AZ-1350J из [13].

Как видно из рис. 2, полученная зависимость $H_3(R_0)$ неоднозначна. Управление экспозицией по этой кривой требует знания толщины пленки резиста с точностью ~ 10 нм, что является исключительно сложной задачей. Для устранения этой трудности введем аппроксимирующую кривую $H_3^*(R_0)$ (кривая 2 на рис. 2), которая получена путем аппроксимации участка кривой $H_3(R_0)$, соответствующего диапазону толщин резиста 585—655 нм. Рассмотрим, к чему приведет управление экспозицией по аппроксимирующей кривой 2 вместо полученной из модели неоднозначной кривой 1 в диапазоне толщин резиста 0,5—1 мкм.

На рис. 3 показана зависимость количества энергии, поглощенной резистом, от толщины пленки для трех случаев управления экспозицией, а на рис. 4 — зависимость остаточной концентрации M в пучности стоячей волны для тех же случаев.

Из кривых a рис. 3, 4 видно, что при отсутствии управления экспо-

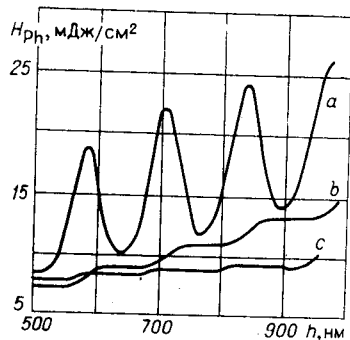


Рис. 3. Зависимость поглощенной резистом энергии от толщины пленки фоторезиста: a — управление экспозицией отсутствует, $H_3=33 \text{ мДж/см}^2$; b — управление по кривой 1 рис. 2; c — управление по аппроксимирующей кривой 2 рис. 2. (Все остальные параметры те же, что на рис. 2).

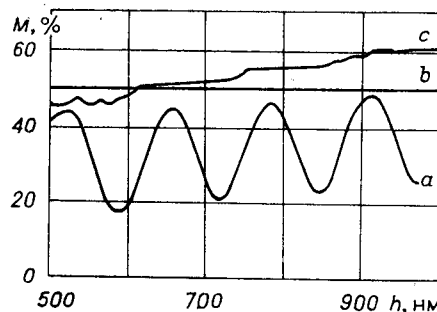


Рис. 4. Зависимость остаточной концентрации в пучности стоячей волны от толщины пленки фоторезиста:

a — отсутствие управления; b — управление по модельной кривой 1 рис. 2; c — управление по аппроксимирующей кривой 2 рис. 2. (Все параметры те же, что на рис. 2.)

зацией количество поглощенной резистом энергии изменяется почти в два раза при изменении толщины пленки резиста всего на 65 нм, что соответствует $1/4$ длины волны света $\lambda = 436$ нм в фоторезисте. Изменение поглощенной энергии в 2 раза приводит примерно к такому же изменению концентрации ингибитора в пучности стоячей волны в фоторезисте. (Поскольку энергия в узлах стоячей волны мала по сравнению с энергией в пучностях, то остаточная концентрация ингибитора в узлах для всех трех случаев примерно одинакова ($0,97 \pm 0,04$) и на рис. 4 не показана).

Управление экспозицией по модельной кривой 1 (см. рис. 2) выравнивает распределение остаточной концентрации ингибитора M и обеспечивает заданную концентрацию M_0 в пучностях стоячей волны (см. кривая b на рис. 4), что соответственно приводит к выравниванию средних скоростей растворения резиста при проявлении участков пластины с разной толщиной пленки.

Управление экспозицией по закону, соответствующему кривой 2 (см. рис. 2), примерно в 2 раза по сравнению со случаем без управления (см. рис. 4, кривые a, c) уменьшает разброс остаточной концентрации ингибитора в пучностях стоячей волны в резисте с толщиной пленки в диапазоне 0,5—1 мкм и в 3 раза — в диапазоне 0,5—0,8 мкм.

Двухслойная система. Рассмотрим применение модели для системы Si—SiO₂ — фоторезист.

На рис. 5 приведены рассчитанные с помощью модели зависимости нормированной дозы экспозиции H от коэффициента отражения R_0 для трех толщин фоторезиста 480 (1), 525 (2) и 560 нм (3) и диапазона толщин пленки SiO₂ 0—150 нм. Шаг изменения толщины SiO₂ между расчетными точками равен 10 нм.

По аналогии с рассмотренной однослойной системой введем аппроксимирующую кривую $H^*(R_0)$, в качестве которой можно взять, например, нижнюю ветвь кривой $H(R_0)$, соответствующей толщине резиста 525 нм (см. рис. 5).

Расчеты, подобные проделанным для однослойной системы, показали, что использование аппроксимирующей кривой для управления экспозицией в рассматриваемом диапазоне изменения толщин пленки фоторезиста (480—560 нм) независимо от возможного изменения толщины пленки SiO₂ позволяет в 3 раза уменьшить разброс остаточной концентрации ингибитора и соответственно средних скоростей проявления резиста по сравнению со случаем без управления экспозицией. Увеличение диапазона изменения толщины пленки резиста до 200 нм и управление экспозицией по прежней аппроксимирующей кривой $H^*(R_0)$ дают выигрыш всего лишь в 1,5 раза. Поэтому допустимым диапазоном изменения толщины пленки резиста, при котором можно получить оптимальный выигрыш при управлении экспозицией, является ~ 100 нм. Если возможный диапазон изменений толщины резиста превышает 100 нм, то его необходимо разбить на поддиапазоны и рассчитать для каждого из них свою аппроксимирующую кривую $H^*(R_0)$.

Расчеты по проверке стабильности модели для системы Si—SiO₂ — резист показали, что требующаяся точность измерения параметров A

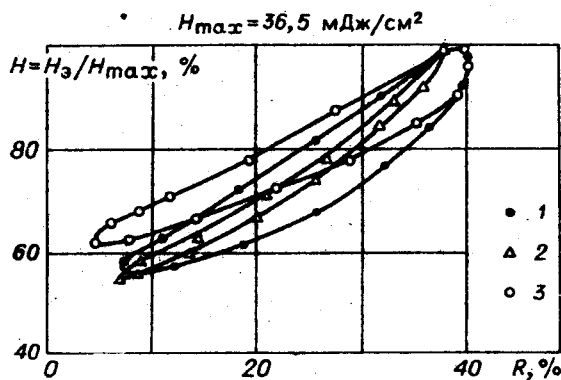


Рис. 5. Зависимость нормированной дозы экспозиции для системы Si—SiO₂—Ph от коэффициента отражения для трех толщин фоторезиста. $N=5,9-0,2j$; $n_{SiO_2} = 1,48$. (Все остальные параметры те же, что на рис. 2.)

и B не превышает 10—15%, а параметров J_0 , C , n_{ph} и $n_{\text{SiO}_2} \sim 20—30\%$. Таким изменениям входных параметров модели соответствует изменение на 20—30% значения H_{max} ; что же касается нормированной кривой $H(R_0) = H_0/H_{\text{max}}$, то ее изменения при этом не превосходят 5—10%.

Из изложенного следует, что возможным использованием модели является экспериментальное определение оптимальной для данной системы подложка — пленки дозы экспозиции и использование ее в качестве H_{max} для нормированной кривой $H^*(R_0)$, построенной на основе параметров, измеренных с указанной точностью.

Результаты эксперимента. Для проверки модели были сопоставлены разбросы средних скоростей проявления экспонированных полос в областях с различными толщинами пленок SiO_2 и фоторезиста без управления экспозицией и с управлением ею на основе модельной зависимости $H^*(R_0)$. Для этой цели с помощью фотолитографии и селективного травления термического SiO_2 были изготовлены 4 пластины со ступенчатым рельефом окисла (рис. 6). Заштрихованные вертикальные полосы представляют собой области с пленкой SiO_2 , а незаштрихованные — чистый кремний. Каждая полоса окисла имеет свою толщину от 1 до 0,3 мкм, которая от полосы к полосе меняется на 60—90 нм.

На пластину был нанесен резист AZ-1350J толщиной 480—560 нм. В области, выделенной на рис. 6 штрихпунктирными линиями, в центре каждой из полос SiO_2 и одной из полос с нулевой толщиной SiO_2 , (всего 28 точек) на спектрофотометре «Beckman UV-2500» измеряли коэффициент отражения ($\lambda = 436$ нм, ширина зондирующего пучка диафрагмировалась до 2 мм). После этого на каждой полосе экспонировалось 6 горизонтальных линий (их размеры и положение показаны на рис. 6). Экспонирование проводилось на установке мультипликации и совмещения ЭМ-542А с фильтрами ЖСС и ЖС-12 ($\lambda = 436$ нм). Каждая из 5 центральных линий экспонировалась со своим временем экспозиции, которое изменялось от τ_{max} до $0,6\tau_{\text{max}}$ с шагом $0,1\tau_{\text{max}}$. В качестве τ_{max} было взято оптимальное для данной установки и резиста время экспозиции, используемое при промышленном режиме экспонирования. Шестая линия экспонировалась со временем τ_{max} и применялась для определения режима проявления.

После экспонирования пластины подвергались сушке при 100 °С в течение 20 мин по методике, предложенной в [18], с целью выравнивания остаточной концентрации ингибитора $M(z, H_0)$ по толщине пленки фоторезиста.

Проявление экспонированных полос проводилось в растворе AZ:H₂O = 1:1 при 20 °С. Первой проявлялась верхняя (шестая) полоса, и определялось время t полного проявления. Затем в проявитель погружалась вся пластина и проявлялась в течение времени $t_1 < t$ так, чтобы ни одна из 5 центральных полос не проявилась до конца. После проявления на пластине напылялся слой Al толщиной 20—30 нм. Глубины протравленных в резисте полос на каждой из окисных ступенек для 5 экспозиций были измерены на интерференционном микроскопе МИИ-4 с точностью 20—30 нм. Данные измерений для одной из пластин приведены в таблице.

Результаты измерений в виде гистограмм показаны на рис. 7. Гистограмма a соответствует глубинам травления полос, экспонированных в течение τ_{max} . Гистограмма b показывает эффект управления экспозицией. Она строилась следующим образом. Для каждой полосы SiO_2 рассматриваемой пластины по измеренному для нее коэффициенту отражения R_0 из аппроксимированной кривой $H^*(R_0)$ (в качестве кривой $H^*(R_0)$ взята нижняя ветвь кривой $H(R_0)$, соответствующей $h_{\text{ph}} = 525$ нм на рис. 5) определялось необходимое время экспозиции t^* . Затем на основе данных таблицы глубин для этой пластины интерполяцией определялась глубина травления l^* , соответствующая времени экспози-

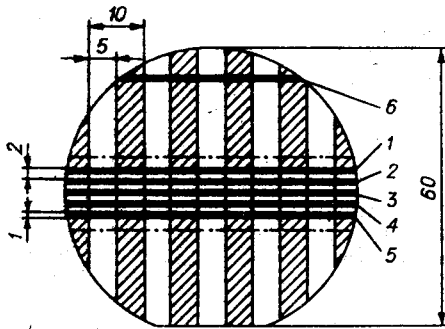


Рис. 6. Вид проявленной пластины.

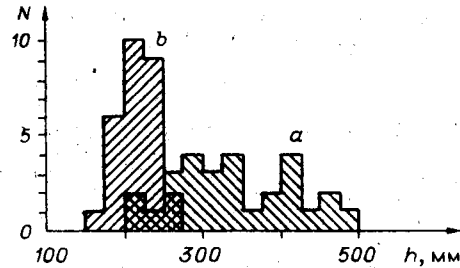


Рис. 7. Гистограммы глубин травления: а — без управления экспозицией; б — с управлением.

ции τ^* . На основе найденных таким образом l^* строилась гистограмма b .

Из гистограмм рис. 7 видно, что разброс глубин травления экспонированных полос для областей пластины с различными толщинами пленок SiO_2 и фоторезиста в результате управления экспозицией уменьшился в 2,5 раза. Во столько же раз уменьшился и разброс средних скоростей проявления, что является следствием выравнивания остаточной концентрации ингибитора и хорошо согласуется с расчетной величиной.

Заключение. В работе исследован один из возможных подходов к решению проблемы уменьшения нестабильности размера элемента в проекционной фотолитографии, основанный на измерении энергетического коэффициента отражения R_0 в локальных точках и управлении по нему экспозицией в этих точках. При этом управление осуществляется по рассчитанной из модели для каждой конкретной системы подложка — пленки зависимости экспозиции H от R_0 . На примере систем Al-Ph и $\text{Si-SiO}_2\text{-Ph}$ показано и подтверждено экспериментально, что управление экспозицией по предлагаемой методике при генерировании рисунка на рельефных подложках позволяет уменьшить разброс скоростей проявления элементов по пластине, по крайней мере, в 2—3 раза по сравнению со случаем без управления экспозицией. Выравнивание скоростей проявления должно привести к уменьшению разброса размера элементов приблизительно в той же пропорции. Однако точный ответ на вопрос об уменьшении нестабильности размера при управлении экспозицией может дать лишь прямой эксперимент.

Для практической реализации метода необходимо по имеющейся модели рассчитать зависимости $H(R_0)$ для всех применяющихся в производстве ИС систем подложка — пленки и ввести их в ЭВМ, управляющую работой генератора изображений. Для конкретной системы ЭВМ на основе измеренного коэффициента отражения R_0 дозирует экспозицию H в соответствии с модельной зависимостью $H(R_0)$ в каждой экспонируемой точке подложки. Таким образом, второй задачей, требующей решения, является разработка быстродействующего устройства для локального измерения в реальном масштабе времени энергетического коэффициента отражения R_0 .

Нормированное время экспозиции τ/τ_{max}	Коэффициент отражения R_0 , %						
	20,6	35,7	48,1	53,1	61	68,8	75,5
	Глубина травления, нм						
1	447	270	330	290	466	399	330
0,9	421	268	308	270	440	358	320
0,8	339	218	260	234	355	270	285
0,7	270	117	150	178	270	191	211
0,6	194	105	140	162	220	164	164

ЛИТЕРАТУРА

1. Хоснейзен, Мид. Фундаментальные ограничения в микроэлектронике. Ч. 1. Технология приборов с МОП структурой.— Зарубеж. радиоэлектроника, 1973, № 1, с. 96—109.
2. Хоснейзен, Мид. Ограничения в микроэлектронике. Ч. II Технология биполярных интегральных схем.— Там же, с. 110—118.
3. Folberth Otto G., Hartmut Bleher J. The Fundamental Limitations on Digital Semiconductor Technology.— Microelectronics Journal, March/April 1979, p. 33—41.
4. Neureuther A. R., Kyser D. F., Ting C. H. Electron-Beam Resist Edge Profile Simulation.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1979, vol. ED-26, N 4, p. 686—693.
5. Reynolds J. An Overview of E-Beam Mask-Making.— Solid State Technology, 1979, N 8, p. 87—94.
6. Vakase N. Optical MTF Calculation for the Photolithographic Technology.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1978, vol. ED-25, N 12.
7. Binder H., Lacombat M. Step-and-Repeat Projection Printing for VLSI Circuit Fabrication.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1979, vol. ED-26, N 4, p. 698—704.
8. Oldham W. G., Nandgaonkar S. N., Neureuther A. R., O'Toole M. A General Simulation for VLSI Lithography and Etching Processes. Part I. Application to Projection Printing.— Ibid, p. 717—722.
9. Widmann D., Binder H. Linewidth Variations in Photoresist Patterns on Profiled Surfaces.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1975, vol. ED-22, N 7, p. 467—470.
10. Леббоес, Брис. Источник дальнего УФ-излучения для прецизионной фотолитографии.— Электроника, 1979, т. 52, № 19, с. 9—10.
11. Cuthbert J. D. Optical Projection Printing.— Solid State Technology, 1977, vol. 20, N 8, p. 59—69.
12. Dill Frederick H. Modelling Projection Printing of Positive Photoresists.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1975, vol. ED-22, N 7, p. 456—465.
13. Dill Frederick H. Optical Lithography.— Ibid, p. 440—444.
14. Brochet A. Modelling of Positive Resists—Application to the Projection of the Thin Structures on Silicon.— In: International Conference on Microlithography, Microelectronics, Optics... Paris, 1977, June 21—24.
15. Bauer J. Berechnung zur Polychromatischen Projections Fotolithografie.— Feingelatetechnik, 1979, Bd 4, S. 166—171.
16. Dill Frederick H. Characterization of Positive Photoresists.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1975, vol. ED-22, N 7, p. 445—452.
17. Бернинг П. Физика тонких пленок.— М.: Мир, 1975, т. 2, с. 93—128.
18. Walker J. Reduction of Standing Wave Effect by Post-Exposure Baking.— IEEE Trans. on Electron Devices, 1975, vol ED-22, N 7, p. 464—466.

*Поступила в редакцию 20 мая 1980 г.;
окончательный вариант — 9 марта 1981 г.*