

УДК 004.94

А. В. Амирханов, А. А. Гладких,
В. В. Макарчук, А. Г. Пшеничков,
В. А. Шахнов

ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЛАНАРИЗАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СУБМИКРОННЫХ СБИС

Рассмотрены особенности технологической операции химико-механической планаризации при формировании межслойной изоляции в СБИС. Проведен анализ модели операции химико-механической планаризации на основе преобразованного уравнения Престона и модели, учитывающей временную зависимость скорости планаризации. Предложена полиномиальная модель химико-механической планаризации. Проведено сравнение результатов моделирования с использованием рассмотренных моделей.

**E-mail: Alexey_Amirkhanov@srisa.ru;
gladkikhalexey@gmail.com;
vvmakarchuk@gmail.com; shakhnov@mail.ru**

Ключевые слова: химико-механическая планаризация, кристалл, межслойная изоляция, многоуровневая металлизация, длина планаризации, выход годных, СБИС, топология, свертка, полином.

В современных СБИС в целях минимизации площади кристалла весь его тонкий приповерхностный слой используется только для создания активных элементов, коммутация которых осуществляется с помощью многослойной металлизации [3]. Одной из проблем, затрудняющих формирование последующих проводящих слоев, является наличие рельефа нижележащей поверхности изолирующего слоя.

Процесс формирования слоя межсоединений в ряде существующих технологических процессов производства СБИС является процессом субтрактивным [1]. Это означает, что первоначально на поверхность пластины с изолирующим слоем осаждается сплошной проводящий слой, а затем в нем с помощью операции литографии и последующего травления открытых участков получают требуемый рисунок межсоединений. После этого осаждают изолирующий слой следующего уровня (в рассматриваемом случае диоксид кремния), в процессе формирования которого над каждым проводником образуется локальная ступенька (рис. 1). При ее наличии формирование каждого из проводящих слоев следующего уровня будет проводиться уже на поверхности, имеющей рельеф.

Из-за эффекта электромиграции это может привести к разрыву проводников на участках малой толщины. Кроме того, вследствие более

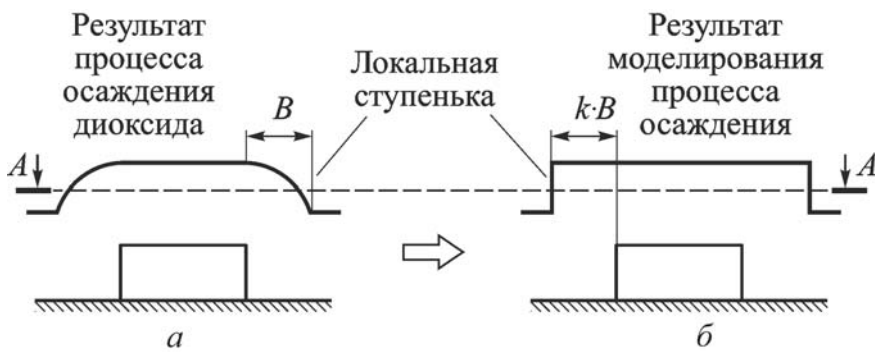


Рис. 1. Модель осаждения слоя диоксида на проводники нижележащего слоя

низкой скорости травления проводящего слоя на наклонных участках, возможно появление непротравленных областей, т.е. возникновение “закороток”.

Для удаления локальной ступеньки, возникающей при нанесении диоксида кремния, используется технологическая операция химико-механической планаризации (ХМП), особенность которой состоит в сохранении некоторой остаточной неровности поверхности. Остаточная неровность является причиной появления нескрытых контактных окон к проводникам, а при увеличении времени травления — причиной их растрова. Все это приводит к нестабильности технологического процесса и снижению процента выхода годных СБИС [2].

При формировании многоуровневой металлизации в СБИС с минимальной проектной нормой, превышающей 0,13 мкм, в качестве материала межсоединений применяется алюминий. При меньшей проектной норме вместо алюминиевой металлизации необходимо использовать медную металлизацию [3]. Поскольку медь имеет меньшее электрическое сопротивление, нежели алюминий, это является очень важным фактором при формировании межсоединений [4], число которых значительно возрастает в технологии с проектной нормой 0,13 мкм. В случае использования меди при формировании рисунка проводящего слоя возникают технологические сложности, связанные с операцией травлением меди [4]. Для решения данной проблемы фирмой IBM (США) была разработана технология dual-damascene process, в которой операция ХМП проводится по меди, а не по диоксиду [3].

Модель операции ХМП позволяет заполнять пустые места в топологическом слое межсоединений проектируемой СБИС специальными фигурами (dummy features), которые электрически не связаны с остальной схемой, а служат только для увеличения плотности заполнения топологического слоя межсоединений таким образом, чтобы добиться минимизации разброса толщины изолирующего межслойного диэлектрика.

Особенности технологической операции ХМП. В результате исследований, проведенных в Массачусеттском технологическом институте, было установлено [5], что ключевым параметром, который влияет

на процесс планаризации диоксида кремния, является плотность заполнения нижележащего слоя. Было показано, что конечная толщина слоя диоксида имеет линейную зависимость от плотности заполнения нижележащего слоя и не зависит от других параметров.

Следует отметить, что при формировании многослойной металлизации слой диоксида кремния осаждается из газовой фазы конформно, повторяя рисунок нижележащего слоя с некоторым уширением B (рис. 1, *a*). Поэтому плотности заполнения слоя диоксида и нижележащего слоя металлизации различаются. Измерения на сколах пластин показали, что значение уширения B для исследуемого технологического процесса находится в пределах от 0,9 до 1,0 мкм.

При моделировании осаждения диоксида кремния это уширение учитывалось путем увеличения ширины всех проводников с каждой стороны на величину, равную kB , где k — постоянный корректирующий коэффициент уширения, меньший единицы. При этом считалось, что сам слой диоксида имеет прямоугольный профиль (рис. 1, *б*).

Процесс моделирования выполнялся в предположении, что при выполнении операции ХМП плотность заполнения слоя диоксида (ключевого параметра моделирования) постоянна во времени. В противном случае алгоритм расчета его остаточной толщины был бы существенно сложнее.

Алгоритм вычисления остаточной толщины межслойного диэлектрика после операции ХМП. Вычисление толщины состоит из следующих этапов. Сначала проводится моделирование процесса нанесения диоксида кремния, для этого уширяется топологический рисунок проводящего слоя СБИС. Затем вычисляется локальная плотность заполнения в виде матрицы и рассчитывается матрица эффективной плотности заполнения. На заключительном этапе по полученной матрице эффективной плотности, используя откалиброванную по экспериментальным данным модель ХМП, рассчитывают остаточную толщину межслойного диэлектрика. С помощью модели ХМП матрица эффективной плотности преобразуется в матрицу остаточной толщины.

Плотность заполнения топологического слоя СБИС. Для дальнейшего изложения материала введем понятие матрицы D локальной плотности заполнения топологического слоя межсоединений СБИС. Для этого разобьем слой на квадраты со стороной a и площадью $S_{\text{кв}} = a^2$. Вычислив суммарную площадь расширенных на kB топологических элементов $S_{\text{эл}}$, лежащих внутри каждого квадрата, определим локальную плотность заполнения слоя каждого квадрата как

$d_{ij} = S_{ij\text{эл}}/S_{\text{кв}}$. Тогда матрица D имеет вид

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1N} \\ \vdots & d_{ij} & \vdots \\ d_{M1} & \cdots & d_{MN} \end{pmatrix}.$$

Сторона квадрата a определяет расчетную сетку вычислений, а матрица локальной плотности необходима для вычисления матрицы Φ эффективной плотности заполнения:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi_{11} & \cdots & \varphi_{1N} \\ \vdots & \varphi_{ij} & \vdots \\ \varphi_{M1} & \cdots & \varphi_{MN} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где φ_{ij} — эффективная плотность заполнения ij -квадрата.

Алгоритм преобразования матрицы D в матрицу Φ будет рассмотрен далее. Введение понятия эффективной плотности позволяет учесть прогиб полировальной подушки установки ХМП при ее адаптации к рельефу поверхности. Прогиб рассчитывается с помощью так называемого ядра свертки (которое также представляет собой матрицу), определяющего степень влияния соседних элементов топологии друг на друга и максимальное расстояние, на котором оно должно учитываться.

Каждый элемент матрицы эффективной плотности зависит от значений локальных плотностей в квадратах, которые лежат на расстоянии, не превышающем максимального радиуса r_{max} ядра свертки. Причем на некотором расстоянии (меньше PL), называемым длиной планаризации (planarization length) проявляется максимальное влияние близлежащих топологических элементов друг на друга.

При контакте с поверхностью пластины подушка деформируется и принимает форму, близкую к рельефу поверхности. При дальнейшем проведении процесса планаризации остаточная неровность также принимает вид деформированной подушки.

Для расчета ядра свертки можно использовать, например, нормальное распределение Гаусса или распределение какого-либо другого вида. Однако для отражения физики процессов, протекающих при операции ХМП, целесообразно использовать соотношения теории упругости, определяющие прогиб материала подушки при нагрузке, приложенной со стороны пластины. Такая функция эластичности w была получена в работе [6] и имеет следующий вид:

$$w(r, PL) = \begin{cases} 2k_2 PL \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{4r^2}{PL^2} \sin^2 \theta} d\theta & \text{при } r \leq \frac{PL}{2}; \\ 4k_2 r \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{4r^2}{PL^2} \sin^2 \theta} d\theta - \right. \\ \left. - \left(1 - \frac{4r^2}{PL^2} \right) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \frac{PL^2}{4r^2} \sin^2 \theta}} \right) & \text{при } r > \frac{PL}{2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $k_2 = q(1 - \nu^2)/\pi E$, E — модуль Юнга материала подушки, q — приложенное давление, ν — коэффициент упругости материала подушки.

Хотя выражение (2) и не имеет прямого отношения к технологии производства СБИС, но для моделирования операции ХМП именно его было предложено использовать в работе [5] как наиболее точно описывающее технологическую операцию ХМП с точки зрения протекающих в ней физических процессов.

Как видно из (2), функция $w(r, PL)$ задана на двух интервалах: первый — когда расчетный радиус r больше половины длины планаризации PL , и второй — когда расчетный радиус меньше PL . Поскольку указанная функция вычисляется с помощью эллиптических интегралов, то расчет может проводиться только с использованием численных методов. В этом случае ядро свертки представляет собой квадратную матрицу вида

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1R} \\ \vdots & w_{ij} & \vdots \\ w_{R1} & \cdots & w_{RR} \end{pmatrix}.$$

Для расчета матрицы эффективной плотности заполнения Φ используется свертка матрицы локальной плотности D и матрицы ядра W , которая вычисляется следующим образом:

$$\varphi_{ij} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N d(m, n) w(i - m, j - n). \quad (3)$$

Математически ядро свертки представляет собой низкочастотный фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр). Его использование позволяет смоделировать при выполнении операции

ХМП полное удаление всех мелких элементов топологии (“высокие частоты”) и частичное удаление/сглаживание глобальных неровностей (“низкие частоты”).

Используя свертку (3), можно получить как бы размытое изображение локальной плотности, что позволяет учесть влияние соседних элементов топологии друг на друга.

Метод калибровки моделей операции ХМП. Все рассматриваемые далее модели операции ХМП являются эмпирическими, из чего следует, что каждая из них должна быть откалибрована (настроена) по некоторому необходимому и достаточному набору экспериментальных данных применительно к определенному технологическому процессу.

Для калибровки модели операции ХМП в качестве экспериментальных данных использовались результаты измерений тестовых структур, полученных с помощью специального шаблона, рисунок которого аналогичен шаблону, разработанному в МТИ [5, 7]. Данные были разделены на два набора: калибровочный — для настройки модели и верификационный — для ее проверки. Проверка модели проводится путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными для структур, не входивших в калибровочный набор.

В качестве критерия оценки точности калибровки модели была использована среднеквадратическая ошибка отклонения результатов моделирования RMSE (Root Mean Square Error), рассчитываемая согласно следующему выражению:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_k^N \left(z_k^{\langle M \rangle} - z_k^{\langle I \rangle} \right)^2}{N}}, \quad (4)$$

где $z_k^{\langle M \rangle}$ — смоделированные значения толщины диоксида кремния; $z_k^{\langle I \rangle}$ — значения толщины, полученные в результате измерений; N — общее число точек измерений.

Калибровка коэффициента уширения. Для определения значения коэффициента уширения k была вычислена среднеквадратическая ошибка моделирования для верификационного набора измерений при различных значениях этого коэффициента. В расчетах использовалась модель, предложенная в работе [5], параметры которой пересчитывались (калибровались заново) для значений k , приведенных на графике рис. 2.

Из рис. 2 следует, что минимальному значению ошибки моделирования, равному примерно 505 \AA , соответствует $k = 0,4$. Именно такое

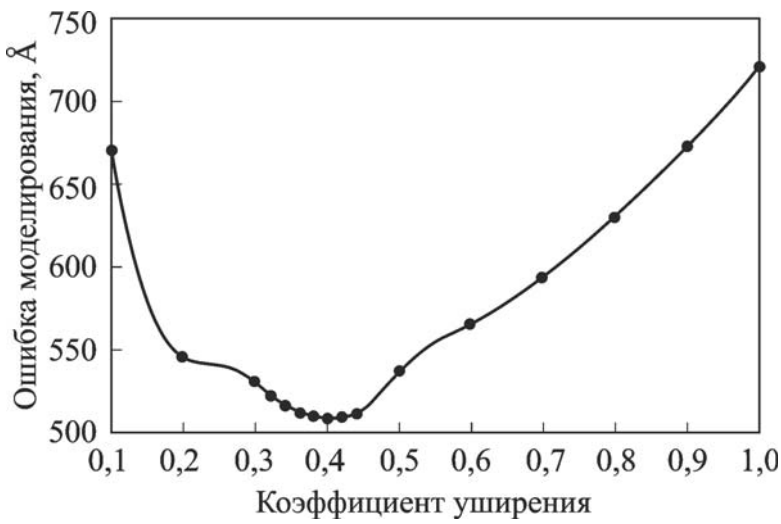


Рис. 2. Результаты калибровки коэффициента уширения k для процесса нанесения диоксида кремния

значение коэффициента уширения и было в дальнейшем использовано во всех рассмотренных далее моделях операции ХМП при их калибровке и верификации.

Существующие модели операции ХМП. *Первой предложенной моделью операции ХМП* в технологии изготовления СБИС следует считать модель, предложенную в работе [5]. Она описывает скорость удаления материала в зависимости от плотности заполнения топологического слоя на основе уравнения Престона [8]

$$MRR = \alpha PV, \quad (5)$$

где MRR (Material Removal Rate) — скорость удаления материала; α — коэффициент пропорциональности; P — приложенное давление; V — относительная скорость вращения подушки и пластины.

Уравнение (5) предложено использовать для расчета скорости планаризации только гладкой пластины, у которой давление и скорость вращения в каждой ее точке одинаковы. В случае наличия рельефа на пластине в работе [5] было предположено, что давление и скорость вращения в каждой точке пластины не одинаковы и зависят от матрицы эффективной плотности заполнения Φ следующим образом:

$$MRR = \frac{dz}{dt} = -\frac{BR}{\varphi_{ij}(z)}, \quad (6)$$

где z — толщина диоксида кремния, отсчитываемая от некоторой базовой точки; BR (Blanket Rate) — скорость удаления материала при 100 %-ном заполнении слоя, т.е. при отсутствии рельефа на поверхности пластины.

В работе [5] решение дифференциального уравнения (6) было рассмотрено для двух случаев: первый случай при $z \geq z_0 - z_1$ и второй — при $z < z_0 - z_1$ (рис. 3).

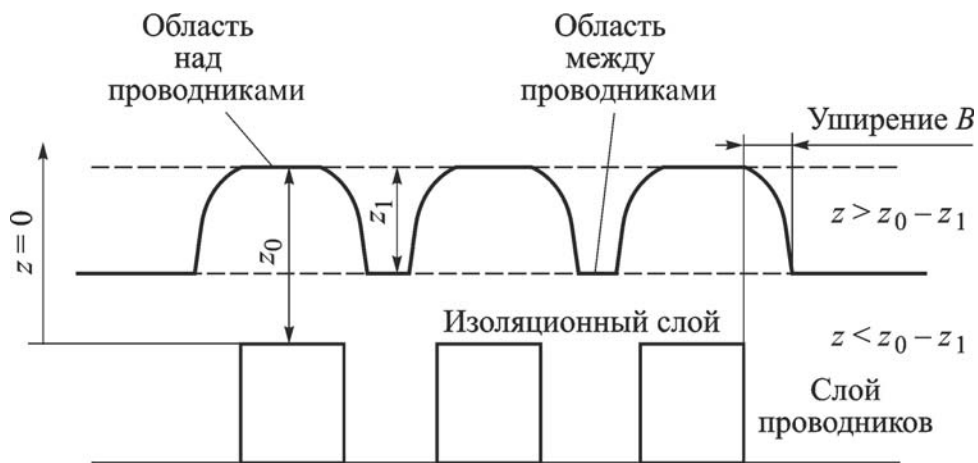


Рис. 3. К расчету остаточной толщины диоксида кремния после проведения операции ХМП

Эффективная плотность равна

$$\varphi_{ij}(z) = \begin{cases} \varphi_{ij} & \text{при } z \geq z_0 - z_1; \\ 1 & \text{при } z < z_0 - z_1. \end{cases} \quad (7)$$

Зависимость конечной толщины диоксида кремния от времени планаризации была получена путем интегрирования уравнения (6) с использованием условия (7):

$$z_{ij} = \begin{cases} z_0 - \frac{BRt}{\varphi_{ij}} & \text{при } BRt \leq \varphi_{ij}z_1; \\ z_0 - z_1 - BRt + \varphi_{ij}z_1 & \text{при } BRt > \varphi_{ij}z_1. \end{cases} \quad (8)$$

Физические процессы, протекающие при планаризации, можно интерпретировать следующим образом. До удаления локальной ступеньки в некотором квадрате расчета локальной плотности конечная толщина диоксида в нем обратно пропорциональна эффективной плотности. После того как локальная ступенька удалена, скорость планаризации становится постоянной и равной коэффициенту BR (линейный режим).

С использованием экспериментальных данных в настоящей работе была проведена калибровка и верификация модели, рассмотренной в [5], результат калибровки приведен на рис. 4. Экспериментальные данные получены на установке планаризации AvantGaard-676 фирмы IPEC SpeedFam (США) с полирующей подушкой FX9 фирмы Freudenberg (США).

Среднеквадратическая ошибка отклонения моделирования при калибровке и верификации указанной модели составила 371 и 505 Å, соответственно.

Следующим этапом развития модели операции ХМП, в которой также было использовано понятие эффективной плотности заполнения топологического слоя СБИС, была модель, разработанная в рабо-

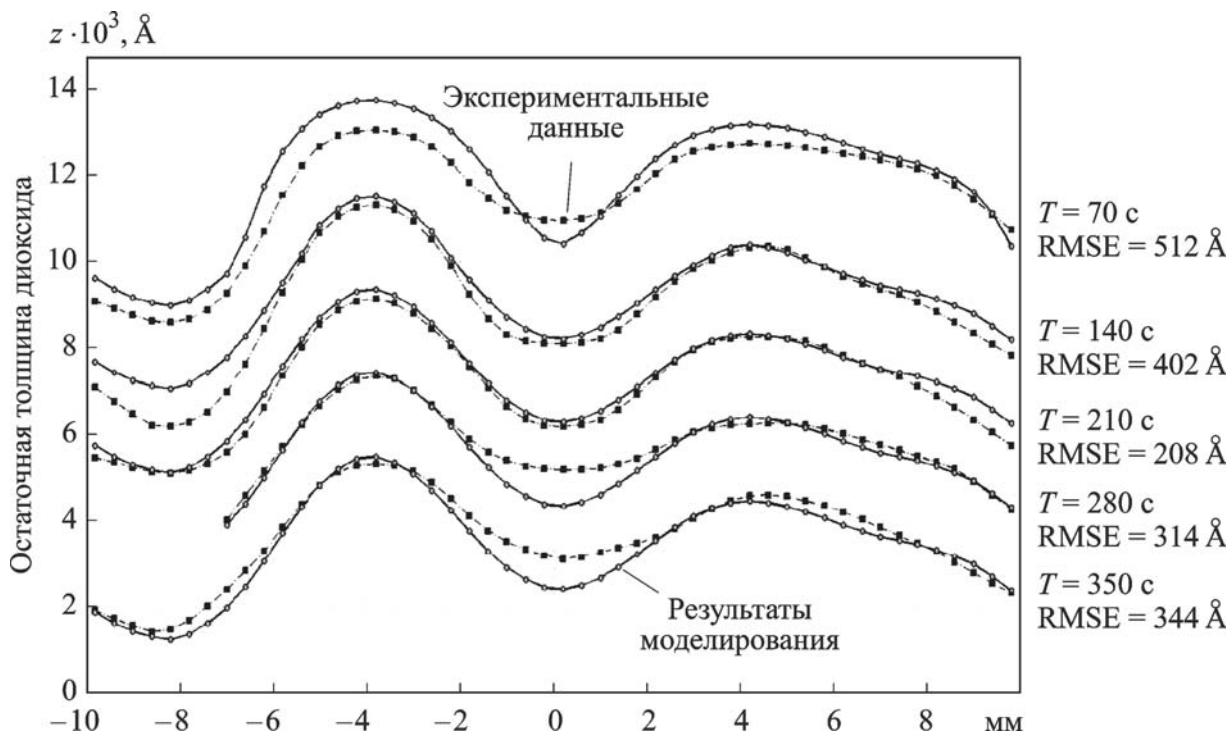


Рис. 4. Результат калибровки модели технологической операции ХМП, разработанной в [5]

те [7]. Основное отличие этой модели от предыдущей состояло в учете нелинейности скорости планаризации ступеньки. Начальные скорости планаризации для обеих моделей совпадают. Однако после удаления локальной ступеньки вместо ступенчатого изменения скорости удаления материала, как было предусмотрено в модели [5], в модели [7] предположено экспоненциальное изменение этой скорости.

В модели [7] начальная скорость планаризации областей между проводниками равна нулю. После контакта подушки с этими областями следует промежуток времени, в течение которого скорость удаления областей диоксида над проводниками экспоненциально снижается до скорости его удаления с гладкой пластины, а скорость планаризации областей между проводниками, наоборот, экспоненциально возрастает. Функция, описывающая скорость планаризации в модели [7], имеет следующий вид:

$$\text{MRR}_{ij} = \begin{cases} \frac{BR}{\varphi_{ij}} & \text{при } t \leq t_k; \\ BR + (1 - \varphi_{ij}) \frac{h_1}{\tau} \exp\left(\frac{-(t - t_c)}{\tau}\right) & \text{при } t > t_k, \end{cases} \quad (9)$$

где BR — скорость удаления материала с гладкой пластины; $h_1 = z_1 - BRt_k/\varphi_{ij}$ — локальная высота ступеньки; φ_{ij} — эффективная плотность элементов топологии; τ — экспоненциальная постоянная времени; t — время операции планаризации; t_k — время от начала планаризации до контакта подушки с областью между проводниками.

Интегрирование выражения (9) с учетом непрерывности функции MRR приводит к следующему выражению для расчета остаточной толщины диоксида над слоем металлизации:

$$z_{ij} = z_0 - \begin{cases} \frac{BR}{\varphi_{ij}} t & \text{при } t \leq t_k; \\ \frac{BR}{\varphi_{ij}} t_k + BR \cdot (t - t_k) + \\ + (1 - \varphi_{ij}) h_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_k}{\tau}\right) \right] & \text{при } t > t_k. \end{cases} \quad (10)$$

Модель, разработанная в [7], объединяет в себе первоначальную модель [5] и учитывает изменение скорости планаризации рельефа пластины во времени. Это позволяет повысить точность моделирования, однако увеличивает число параметров модели. Следует отметить, что так как параметр модели t_k предложено описать как функцию эффективной плотности заполнения, модель существенно усложнилась по сравнению с [5].

Для рассматриваемой модели [7] так же, как и для модели [5], с использованием полученных экспериментальных данных были выполнены ее калибровка и последующая верификация. Результаты калибровки приведены на рис. 5.

Среднеквадратическая ошибка отклонения моделирования при калибровке составила 303 \AA , а при верификации 494 \AA . По сравнению с моделью, предложенной в [5], уменьшение ошибки рассматриваемой модели при калибровке составило 18%, а при верификации 2%.

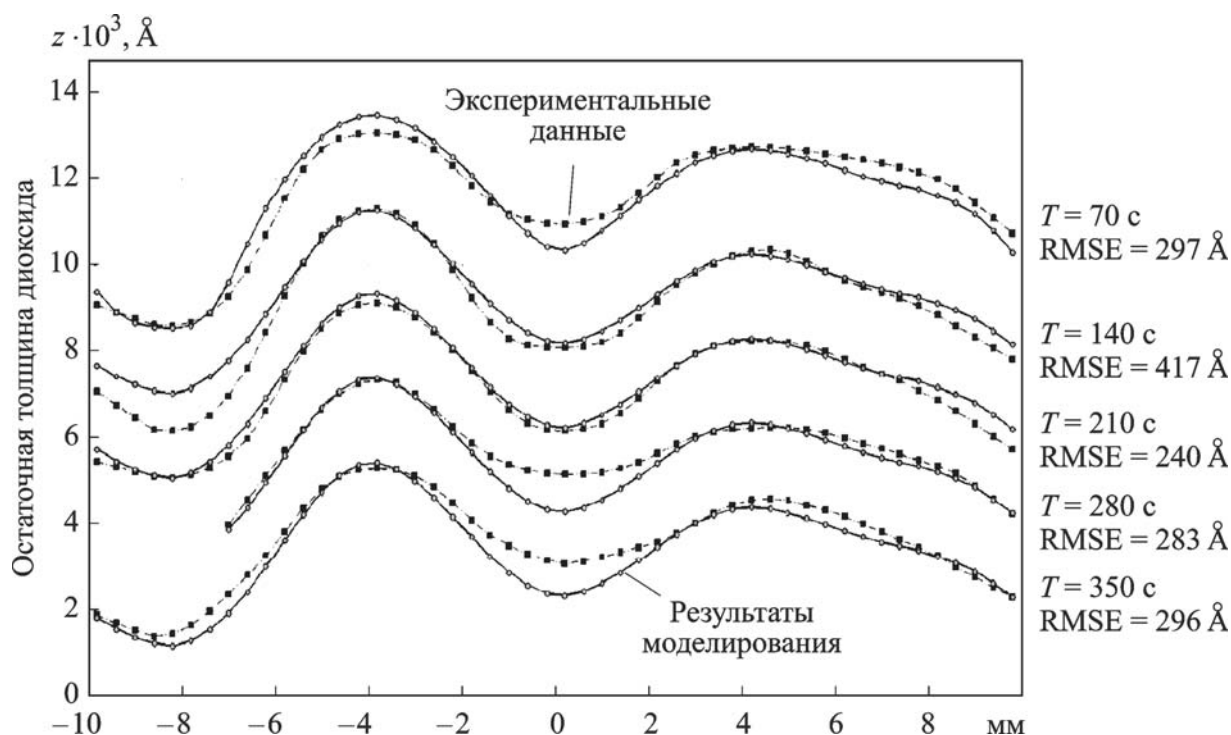


Рис. 5. Результат калибровки модели технологической операции ХМП, разработанной в [7]

Полиномиальная модель операции ХМП. Анализ результатов калибровки моделей [4] и [8] показал, что они не в состоянии описать поведение остаточной толщины межслойного диэлектрика в областях с низкой плотностью заполнения слоя СБИС в диапазоне времен планаризации. Для устранения этого недостатка предлагается полиномиальная модель.

Описание полиномиальной модели начнем с построения зависимости остаточной толщины диоксида кремния от эффективной плотности топологического слоя (рис. 6), используя полученные экспериментальные данные. Дополнительно на графике показаны результаты моделирования, полученные с помощью модели операции ХМП, предложенной в [5], и построено сглаженное значение экспериментальных данных с помощью метода скользящего среднего [9] по десяти точкам с использованием следующего выражения:

$$y_{s_i} = \frac{1}{2N + 1} \sum_{k=-N}^N y(i + k), \quad (11)$$

где $2N + 1$ — число точек, выбираемых для сглаживания, т.е. слева и справа от текущей точки выбирается по N точек (число точек, участвующих в сглаживании, должно быть нечетным), y_{s_i} — результат сглаживания, y — значения сглаживаемой кривой.

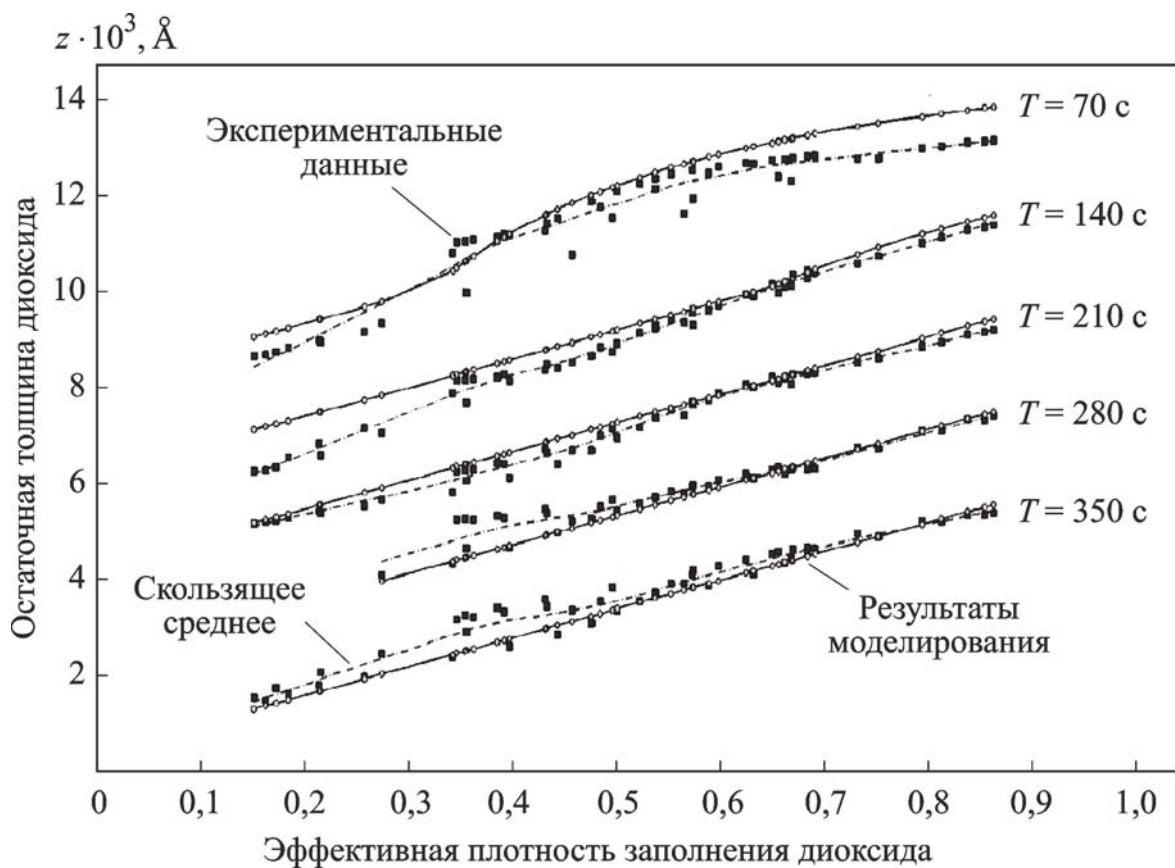


Рис. 6. Зависимость остаточной толщины диоксида кремния от эффективной плотности заполнения

Из рис. 6 следует, что с изменением времени планаризации меняется и наклон скользящего среднего. Это говорит о том, что скорость планаризации ровных участков пластины со временем изменяется. При малом времени планаризации (нелинейный режим модели [5], $z \geq z_0 - z_1$) экспериментальные данные имеют расхождение с модельными. В целях анализа модели в зависимости от времени планаризации полученных результатов моделирования графики были разбиты по вертикальным сечениям с постоянным значением эффективной плотности (рис. 7).

В первом случае (рис. 7, а) построена линейная аппроксимация экспериментальных данных. Такая зависимость используется в модели работы [5]. На графиках хорошо видны возникающие расхождения между модельными и экспериментальными данными. Однако если вместо линейной зависимости воспользоваться, например, аппроксимацией полиномом 3-й степени (рис. 7, б), то получаем гораздо лучшее соответствие между экспериментальными данными и результатами моделирования.

Тогда в общем случае зависимость остаточной толщины слоя диоксида кремния от времени планаризации и эффективной плотности аппроксимируется следующим выражением:

$$z(t, \varphi_{ij}) = C_0(\varphi_{ij}, z_0, z_1) + \sum_{k=1}^{N_s} C_k(\varphi_{ij})t^k. \quad (12)$$

Однако при увеличении степени полинома до значения, большего или равного числу точек для одной кривой, при его построении возникает неоднозначность. Это означает, что степень полинома ограничена числом измеренных точек для различных времен планаризации.

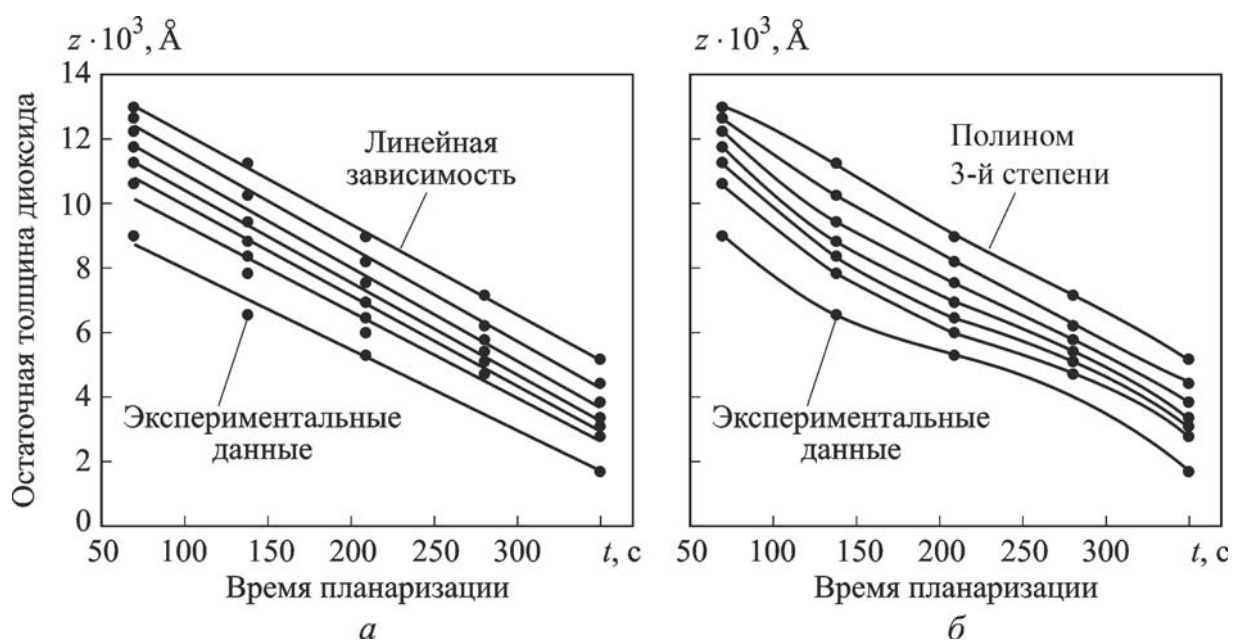


Рис. 7. Зависимость остаточной толщины диоксида от времени планаризации для линейной (а) и нелинейной (б) моделей

В свою очередь число точек измерения, необходимых для получения адекватной модели, зависит от постоянства распределения скорости планаризации во времени. Например, для процесса, который рассмотрен в [5], достаточно использовать линейную функцию, в то время как для рассматриваемой операции ХМП, с помощью которой получены экспериментальные данные, достаточно полинома 3-й степени.

Отметим, что при увеличении числа степеней полинома, возможно возникновение негативного эффекта — перекалибровки модели. В этом случае модель способна очень точно рассчитывать результаты для структур, участвовавших в калибровке, но не способна предсказывать результаты. Кроме того, перекалиброванная модель воспроизводит при моделировании все случайные дефекты, которые могут быть получены во время формирования структур на пластине с помощью тестового шаблона.

Зависимости остаточной толщины диоксида кремния после планаризации от времени операции ХМП (см. рис. 7) построены при постоянном значении эффективной плотности. Анализируя полученные коэффициенты полиномов, выявили, что каждой заданной эффективной плотности соответствует отличающийся набор коэффициентов. Изменение значений коэффициентов полинома в зависимости от эффективной плотности аппроксимируем также полиномиальной зависимостью

$$C_k(\varphi_{ij}) = \sum_{r=0}^{M_s} a_{k,r} \varphi_{ij}^r. \quad (13)$$

Для полученных экспериментальных данных результат аппроксимации приведен на рис. 8.

Поскольку данные измерений имелись не для всего диапазона эффективных плотностей, то в целях повышения точности моделирования там, где они отсутствовали, была предложена кубическая интер- и экстраполяция данных в области отсутствующих экспериментальных значений эффективной плотности.

С учетом сказанного ранее окончательное выражение в общем виде для полиномиальной модели операции ХМП диоксида кремния при формировании межслойного изолятора приобретает следующий вид:

$$z(t, \varphi_{ij}) = z_0 - z_1 \left(1 - \sum_{r=1}^{M_s} a_{0,r} \varphi_{ij}^r \right) + \sum_{k=1}^{N_s} \left[\sum_{r=1}^{M_s} a_{k,r} \varphi_{ij}^r \right] t^k. \quad (14)$$

Модель [5], описывающая процесс удаления материала линейной функцией, в качестве параметра содержит только скорость планаризации. В отличие от нее в предложенной модели в качестве параметров

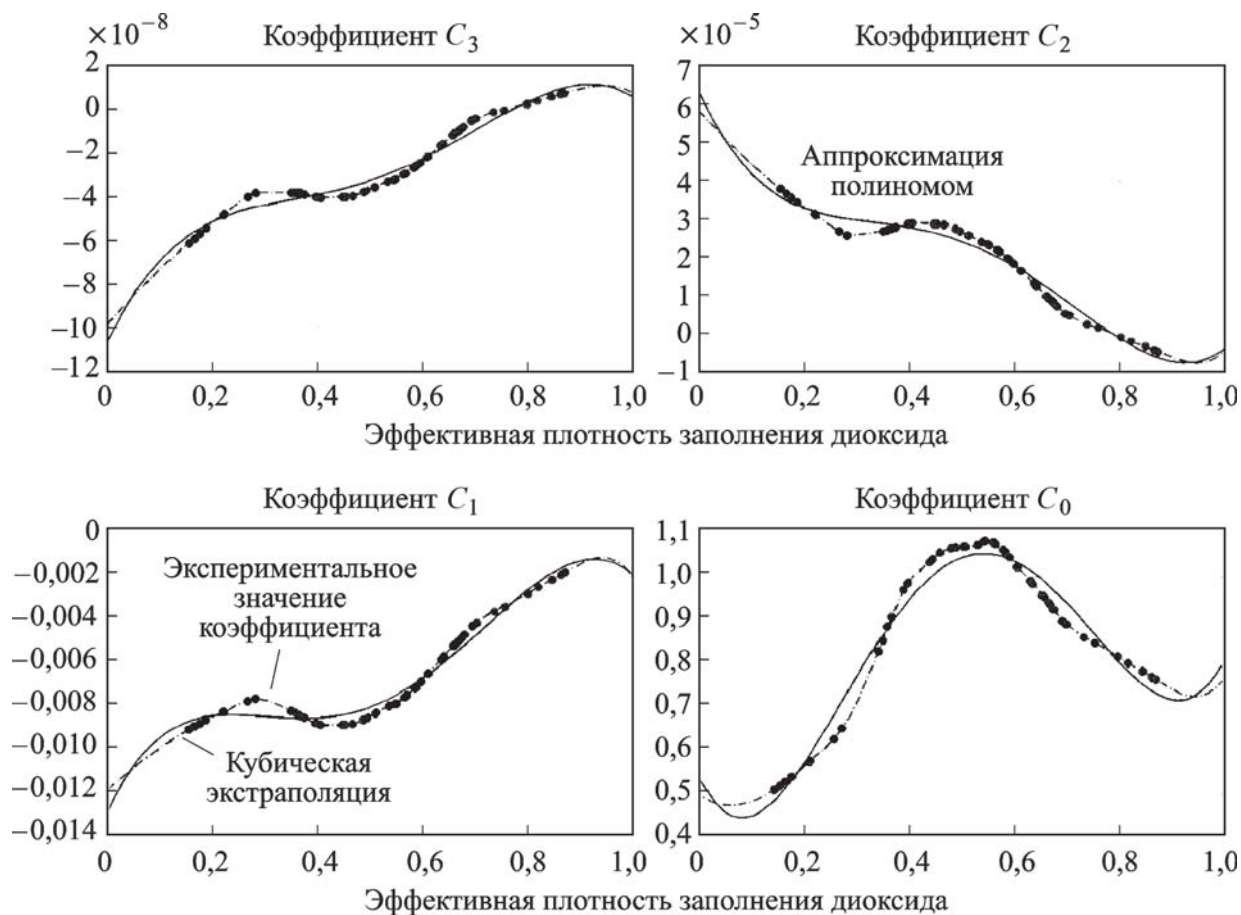


Рис. 8. Аппроксимация полиномиальной зависимостью коэффициентов предыдущего полинома при расчете остаточной толщины диоксида кремния

используются: длина планаризации PL , максимальный радиус r_{\max} и матрица S следующего вида:

$$S = \begin{pmatrix} C_0 & C_1 & & C_k & & C_{N_s} \\ \downarrow & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ a_{00} & a_{01} & \cdots & a_{0r} & \cdots & a_{0N_s} \\ a_{10} & a_{11} & \cdots & a_{1r} & \cdots & a_{1N_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{k0} & a_{k1} & \vdots & a_{kr} & \vdots & a_{kN_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{M_s 0} & a_{M_s 1} & \cdots & a_{M_s r} & \cdots & a_{M_s N_s} \end{pmatrix},$$

где C_k и a_{ij} — коэффициенты полинома.

С одной стороны, увеличение числа коэффициентов, размера матрицы S позволяет точнее настроиться на определенный технологический процесс, а с другой — необходимо иметь в виду, что после расчета значений элементов матрицы S (коэффициентов полиномов a_{ij}) путем регрессионного анализа, далее требуется получить с помощью оптимизации параметры ядра свертки совместно с найденными элементами матрицы S .

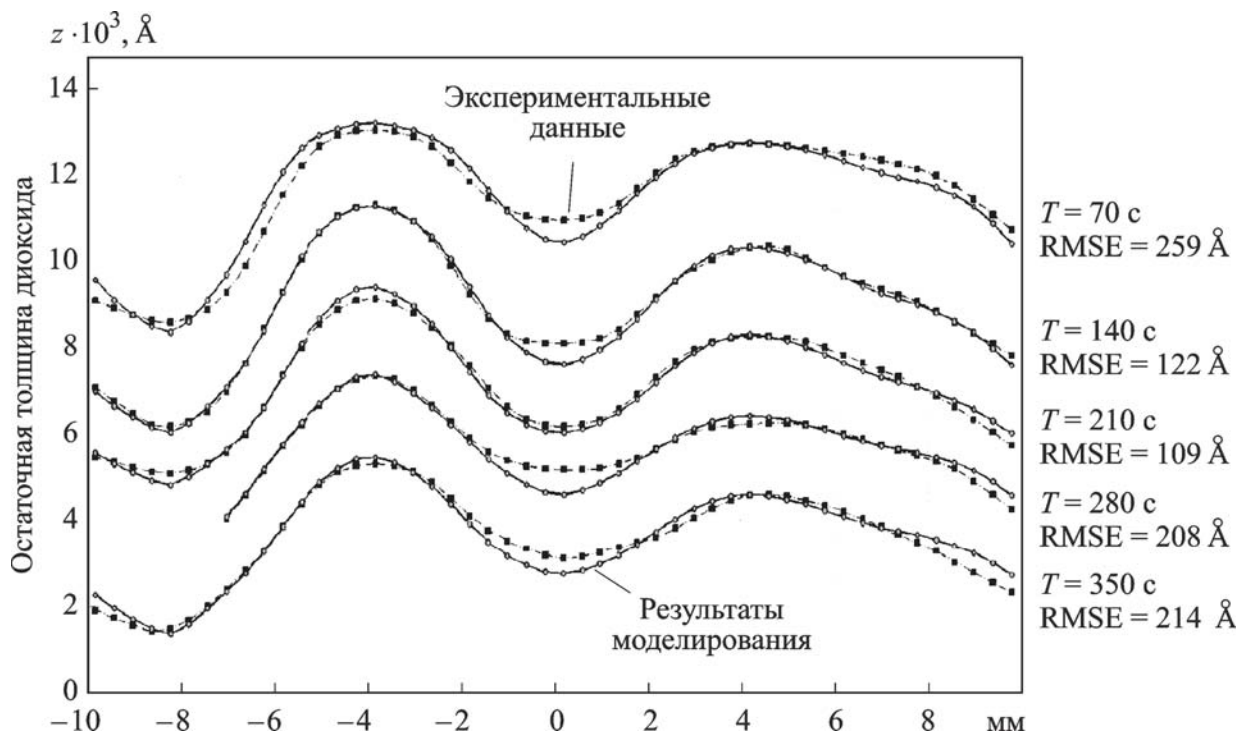


Рис. 9. Результат калибровки полиномиальной модели технологической операции ХМП

Большое число коэффициентов, во-первых, увеличивает время расчета, во-вторых, что более важно, снижает сходимость метода поиска оптимальных значений параметров при калибровке модели.

С использованием экспериментальных данных и разработанного алгоритма поиска значений первого приближения коэффициентов выражения (14) была проведена калибровка модели, в результате чего получена кривая (рис. 9).

В результате калибровки и верификации среднеквадратическая ошибка отклонения модели по экспериментальным данным составила 191 и 404 Å. По сравнению с моделью, предложенной в [5], снижение ошибки при калибровке и верификации составило 49 и 20 %, а в сравнении с моделью, предложенной в [7], 37 и 18 %.

Выводы. Среди всех известных моделей операции ХМП, предложенная полиномиальная модель операции ХМП позволяет наиболее точно предсказать величину остаточного рельефа поверхности пластины. Это дает возможность оптимальным образом вводить в топологический слой межсоединений СБИС специальные фигуры заполнения, с помощью которых можно минимизировать остаточный рельеф поверхности, и, тем самым, разброс толщины изолирующего слоя диоксида кремния. В результате повышается стабильность технологического процесса производства СБИС в целом и увеличивается процент выхода годных кристаллов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L i Y. Microelectronic applications of chemical-mechanical planarization. – Wiley Interscience, 2008. – 734 p.
2. C h i a n g C. C., K a w a J. Design for manufacturability and yield for nano-scale CMOS. – Springer, 2007. – 251 p.
3. D e J u l e R u t h. Dual-damascene: overcoming process issues / Ruth DeJule: [Электронный ресурс]. (http://www.semiconductor.net/article/204962-Dual_Damascene_Overcoming_Process_Issues.php). Проверено 09.04.2010.
4. M e t h o d for fabrication of damascene interconnects and related structures [Text]: Patent No. 6'380'078 B1 USA : Int. Cl. H01L21/4763 / Q. Z. Liu ; Assignee: Conexant System Inc., Newport Beach, CA (US). – Filled: May 11, 2000; Date of Patent Apr. 30, 2002.
5. O u m a D. O. Modeling of chemical mechanical polishing for dielectric planarization. Dis. PhD in Electrical Engineering and Computer Science / Dennis Okumu Ouma; Massachusetts Institute of Technology – Massachusetts, 1998. – 228 p.
6. S m i t h T. H. Device independent process control of dielectric chemical mechanical polishing. – Massachusetts Institute of Technology, 1999. – 162 p.
7. T i m o s h e n k o S. P., G o o d i e r J. N. Theory of Elasticity, 3rd Int.Ed. – McGraw-Hill Book Company, Chap. 12, 1970.
8. P r e s t o n F. W., S o c J. Glass Tech. – 1927. – Vol. 11. – 214 p.
9. M a t l a b & Toolboxes: Основы работы в Curve Fitting Toolbox: [Электронный ресурс]. (http://matlab.exponenta.ru/curvefitting/3_10.php). Проверено 07.09.2010.

Статья поступила в редакцию 6.12.2011

Алексей Владимирович Амирханов окончил в 1971 г. Московский физико-технический институт. Канд. физ.-мат. наук, руководитель группы “Отдела проектирования интегральных микросхем и структур”. Автор более 50 научных работ в области разработки и моделирования полупроводниковых приборов и микросхем.

A.V. Amirkhanov graduated from the Moscow Physics and Technology Institute in 1971. Ph. D. (Phys.-Math), head of group of Department for Design of Integrated Circuits and Structures. Author of 50 publications in the field of development and simulation of semiconductor devices and integrated circuits.

Алексей Алексеевич Гладких окончил в 2011 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор семи научных работ в области моделирования технологических процессов производства СБИС.

A.A. Gladkikh graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2011. Post-graduate of “Design and Technology of Production of Electronic Apparatus” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 7 publications in the field of simulation of technological processes of VLSIC production.

Владимир Васильевич Макаrchук окончил в 1970 г. Московский институт электронного машиностроения. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области автоматизации проектирования интегральных микросхем.

V.V. Makarchuk graduated from the Moscow Institute of Electronic Machine Building in 1970. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Design and Technology of Production of Electronic Apparatus” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of automation of design of integrated circuits.

Альберт Геннадьевич Пшенников — инженер отдела разработки технологических процессов.

A.G. Pshennikov — engineer of department for development of technological processes.

Вадим Анатольевич Шахнов — чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Проектирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 180 научных работ в области проектирования и технологии электронных средств.

V.A. Shakhnov — corresponding member of the Russian Academy of Sciences, D. Sc. (Eng.), professor, head of “Design and Technology of Production of Electronic Apparatus” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 180 publications in the field of design and technology of production of electronic aids.