

АКТИВНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СИНТЕЗА ТОНКИХ ПЛЕНОК ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Д.В. Образцов¹

odvru@ramber.ru

В.Н. Чернышов¹В.А. Шахнов²

shakhnov@bmstu.ru

¹ Тамбовский государственный технический университет
г. Тамбов, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен метод активного технологического контроля электрофизических параметров тонких пленок, используемый при производстве сверхбольших интегральных схем. Приведен алгоритм реализации этого метода в целях достижения минимально допустимых отклонений параметров пленок, что позволяет производить такие схемы по более прогрессивным проектным нормам

Ключевые слова

Тонкие пленки, напыление в вакууме, активный контроль, производство, сверхбольшие интегральные схемы

Поступила в редакцию 22.06.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Производство сверхбольших интегральных схем (СБИС) является многостадийным технологическим процессом, требующим проведения операций контроля на всех его стадиях [1–4]. В большинстве случаев основные параметры топологических слоев (пленок) контролируют после завершения каждой из стадий, что исключает возможность корректировки параметров пленок на этапе выполнения технологической стадии, а это приводит к уменьшению процента выхода годных СБИС.

В производстве СБИС при нанесении тонких пленок обычно используют метод вакуумного напыления веществ, который отличается от других возможностью получения химически чистых и однородных по морфологическим параметрам пленок [5]. При этом до начала проведения напыления моделируется скорость роста пленки, определяются оптимальные режимные параметры технологического процесса, однако на формирование тонких пленок оказывает влияние большое число дестабилизирующих факторов, не учтенных или недостаточно точно учтенных в модели, результатом чего является появление больших отклонений параметров пленок от заданных значений. Предлагаемый метод активного технологического контроля параметров синтезируемых пленок позволяет выполнять адаптивную коррекцию модели скорости роста пленок, управлять технологическим процессом в режиме реального времени, что в итоге приводит к повышению качества получаемых тонких пленок при производстве СБИС.

Обоснование предлагаемого метода. Процесс роста пленочных покрытий при напылении в вакууме происходит в два этапа: образование зародыша на поверхности подложки и его рост. Вначале происходит взаимодействие одиночных атомов напыляемого вещества между собой и с подложкой, между ними возникает химическая связь, в результате чего они остаются на поверхности подложки и успевают присоединить следующий атом и т. д. Таким образом образуются скопления адсорбированных атомов, более длительное время связанных с подложкой и имеющих тенденцию к дальнейшему росту, который происходит за счет падающих атомов, присоединения мигрирующих по поверхности атомов и объединения мелких кластеров друг с другом. В процессах напыления принято различать три типа роста пленки: островковый, послойный и послойно-островковый (смешанный). Тип роста в основном определяется взаимодействием напыляемых атомов между собой и с атомами подложки. Островковый рост происходит, если осаждаемые атомы напыляемой пленки имеют большее взаимодействие между собой, чем с атомами подложки. Послойный рост происходит при образовании больших по площади двумерных зародышей на поверхности подложки вследствие того, что атомы напыляемого материала сильнее связываются с атомами подложки. Послойно-островковый рост имеет место, когда островки начинают расти после того, как сформируется пленка толщиной в несколько атомных слоев [6].

Как известно, только при использовании атомарно гладких поверхностей можно добиться минимального разброса параметров синтезируемых тонких пленок [5]. Проведенная серия экспериментов показала, что при синтезе тонких пленок на не атомарно гладких поверхностях намного труднее добиться хорошей воспроизводимости пленок от партии к партии из-за неравномерности рельефа подложки. В этом случае в математических моделях практически невозможно учесть изменчивость случайных факторов, влияющих на параметры синтезируемых тонких пленок [7].

Для определения момента прекращения напыления тонких пленок ранее был предложен метод [8], заключающийся в дискретной выемке в заданные интервалы времени из вакуумной камеры контрольных образцов, находящихся в одинаковых технологических условиях с рабочими подложками, и в последующем исследовании структуры синтезируемых на их поверхности контрольных образцов с помощью электронного микроскопа. Время, необходимое для роста пленки заданной толщины, определялось по математической модели (1) с граничным условием (2):

$$t_{\text{нап}} = \left(h / 6 \cdot 10^5 \left(\alpha_k \frac{\alpha_n 3,16 \cdot 10^{-3} p_n^0 F_n \cos \varphi_n \cos \varphi_k}{(2\pi R T_n M)^{0,5} \pi l^2} - \alpha'_n \frac{p_{\text{ж}}^0}{(2\pi R T_k M)^{0,5}} \right) M / p_{\text{тв}} \right), \quad (1)$$

где h — требуемая толщина пленки; α_k и $\alpha_{и}$ — коэффициенты конденсации и реиспарения с поверхности подложки; $p_{и}^0$ — давление насыщенного пара испаряемого вещества; $F_{и}$ — площадь поверхности испарителя, значительно меньшая поверхности подложки; $\varphi_{и}$ и φ_k — углы между нормальными к поверхности источника и подложки соответственно и прямой, соединяющей источник с точкой n ; R — универсальная газовая постоянная; $T_{и}$ — температура испарителя; M — молекулярная масса вещества (испаряемого металла); l — расстояние от испарителя до рассматриваемой точки n на поверхности подложки; $p_{ж}^0$ — плотность жидкой фазы вещества (плотность расплавленного металла); T_k — температура на поверхности подложки; $p_{тв}$ — плотность конденсата;

$$L / \left(\frac{10^{20} k T_A}{\pi \sigma_{AB}^2 2,62 \cdot 10^{-2} \left[L(0,37 + \sigma_B)^2 (1 + 10,28 M_B / T_B)^{0,5} \right]^{-1} + [1 + T_A M_B / (T_B M_A)]^{0,5}} \right) \leq 0,05, \quad (2)$$

где L — расстояние от испарителя до основной поверхности подложки; T_A , T_B — температуры, определяющие энергию атомов (молекул) пара; σ_{AB} — характеристическое расстояние между компонентами A и B ; σ_B — характеристическое расстояние между компонентами B ; M_B и M_A — атомная (молекулярная) масса компонентов B и A в паровой фазе.

Для проверки работоспособности разработанного ранее метода [9] и корректности созданной модели проводили серию экспериментов напыления никелевой пленки при изменении доминирующего параметра — расстояния от испарителя до поверхности подложки. Материалом для испарения служили наноразмерные порошки металлов, полученные химическим и плазмохимическим методом [10, 11]. При этом для расчета скорости роста пленки и соответственно времени напыления задавали необходимую толщину пленки, например 50 нм. Расстояние от испарителей до поверхности подложки при проведении эксперимента составляло соответственно 20, 40 и 60 см, площадь резистивного испарителя 0,1 см². Температура нагрева основной поверхности и первичного измерительного преобразователя (ПИП) задавалась равной 473 К. Отклонения экспериментальных данных от рассчитанных по модели значений скорости роста на примере никелевой пленки и требуемого времени для достижения заданной толщины представлены в табл. 1.

Результаты экспериментов показали значительное (до 28 %) отклонение значений основных параметров технологического процесса от расчетных значений, а также нелинейность и случайный характер этих отклонений, что обусловлено отсутствием учета в модели влияния таких факторов, как шероховатость и физико-химические свойства материала подложки, физических процессов, происходящих при взаимодействии молекулярного потока испаряемого вещества с поверхностью подложки, и т. д. В связи с этим при одном и том же времени напыления могут синтезироваться пленочные структуры от идеально

сплошной до островковой или структуры смешанного вида. Кроме того, данный метод является затратным в плане предварительной подготовки и необходимости использования дорогостоящей электронной микроскопии. Поэтому описанный метод применим только на стадии разработки и отладки технологии получения тонких пленок, при быстропротекающих процессах синтеза тонких пленок контроль с помощью такого метода невозможен. На устранение приведенных недостатков направлен рассмотренный далее метод активного технологического контроля.

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и расчетных значений скорости и времени роста никелевой пленки

Расстояние от испарителя подложки L , см	Скорость роста пленки, нм/с		Время роста пленки толщиной 50 нм, с		Отклонение экспериментальных данных от расчетных, %
	расчетная	экспериментальная	расчетное	экспериментальное	
20	0,28	0,22	179	227	27
40	0,16	0,14	312	357	14
60	0,09	0,07	556	714	28

Описание и реализация предлагаемого метода. Предлагается метод активного технологического контроля процесса синтеза тонких пленок, суть которого заключается в измерении электрофизических параметров (диэлектрической проницаемости и сопротивления) растущих пленок непосредственно в процессе их синтеза и управлении основными технологическими параметрами в реальном времени до момента получения пленки с заданными характеристиками. Электрофизические параметры растущих пленок предлагается измерять с помощью ПИП, который изготавливается на материале, идентичном рабочим подложкам, путем вакуумного напыления медных или золотых электродов 1, 2 в виде встречно-штыревой конструкции (рис. 1, а). В ПИП предусмотрено уменьшение периода штыревой конструкции (в 2 раза при переходе от одной пары электродов к другой) в целях охвата контролем практически всех топологических размеров между элементами проектируемых СБИС.

В процессе напыления в межэлектродном пространстве ПИП формируется пленка, островковый рост которой можно условно разделить на два этапа (рис. 1, б). На первом этапе растущие островки находятся на расстоянии друг от друга и не замыкают электроды, на втором этапе происходит разрастание, рост новых и объединение островков пленки, что в итоге приводит к электрическому замыканию межэлектродного пространства ПИП.

На рис. 2, а приведена схема подключения ПИП к измерительной аппаратуре для измерения емкости и на рис. 2, б — для измерения сопротивления (когда измерение емкости невозможно из-за межэлектродного замыкания растущей пленкой).

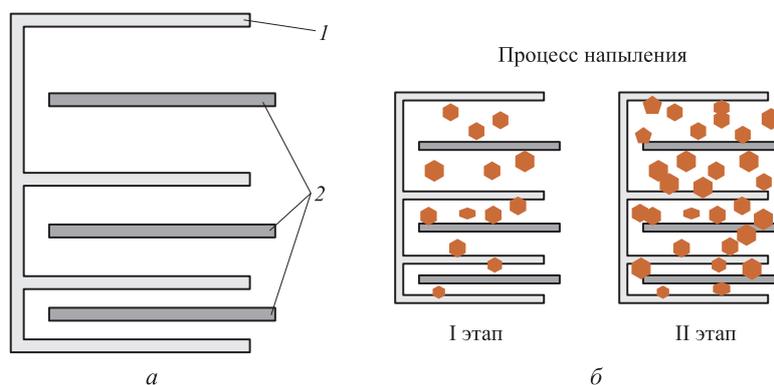


Рис. 1. Расположение электродов первичного измерительного преобразователя и этапы роста пленки:

a — конструкция ПИП (*1, 2* — электроды ПИП); *б* — этапы роста пленки

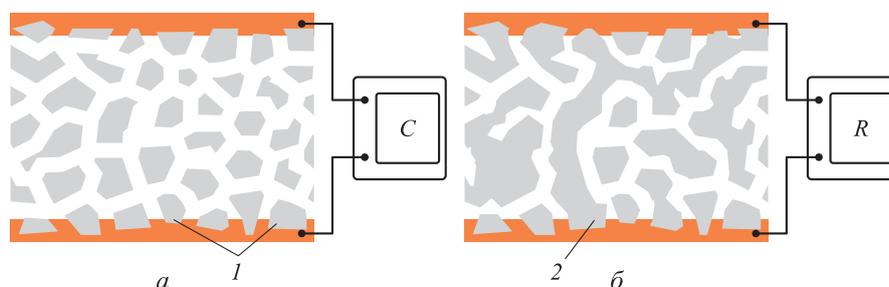


Рис. 2. Структурная схема подключения измерительной аппаратуры к электродам планарного ПИП:

a — измерение емкости структуры островковой пленки, *1* — островки напыляемой пленки; *б* — измерение сопротивления структуры островковой пленки, *2* — срастающиеся островки

Для осуществления предлагаемого метода разработана микропроцессорная управляющая система (рис. 3). В схеме электроды *1, 2* ПИП через коммутатор *3* подключены соответственно к измерителю емкости *4* и измерителю сопротивления *5*, выходы которых через АЦП *6* соединены с микропроцессором *7*. Алгоритмическое обеспечение, заложенное в программу микропроцессора, позволяет через коммутатор *3* выполнять поочередный опрос всех электродов ПИП либо выбранной группы электродов. Измеряемое блоками *4* или *5* значение емкости или сопротивления между выбранными электродами ПИП преобразуется в цифровой сигнал АЦП *6* и передается в микропроцессор *7*, в котором по заданной программе вычисляются значения сигналов управления силовым блоком *8* для требуемого изменения режимных параметров технологического оборудования.

Поскольку планарный ПИП находится практически в равных технологических условиях с рабочими подложками СБИС, то на их поверхностях формируется близкая по топологическим параметрам пленка. Так, например, при напылении медных пленок для межслойной электрической связи в СБИС вначале контролируется емкость структуры островковой пленки, контроль условно

можно разделить на три этапа (рис. 4). На первом этапе процесса напыления пленки емкость между группами электродов планарного ПИП изменяется плавно, так как процесс синтеза пленки только начинается и островки находятся на большом расстоянии друг от друга. На втором этапе происходит резкое возрастание и спад значения емкости (фиксируется пик) на планарном ПИП. Пик емкости появляется тогда, когда в процессе роста формируется максимальное число островков на минимальном расстоянии друг от друга. На третьем этапе (см. рис. 4) при продолжении напыления островки начинают сливаться между собой, образуя сплошную пленку с минимальной начальной толщиной. В этом случае контролировать емкость образованной структуры не представляется возможным, поэтому с этого момента начинают контролировать сопротивление растущей пленки.

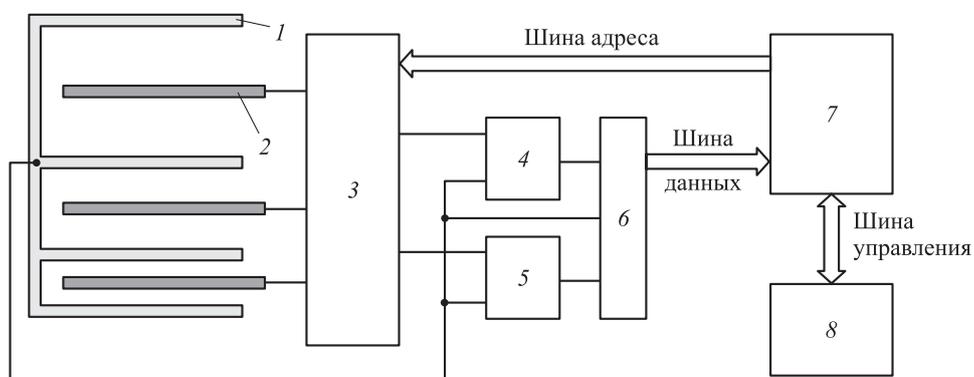


Рис. 3. Функциональная схема подключения ПИП к микропроцессорной управляющей системе

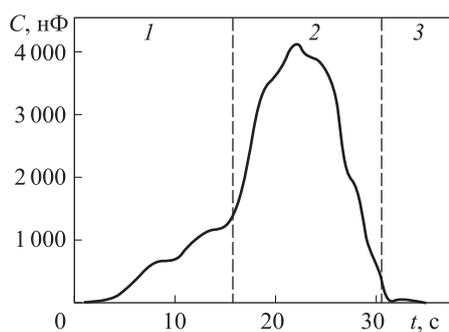


Рис. 4. Экспериментальный график зависимости емкости структуры островковой пленки, растущей между электродами ПИП, от времени напыления меди

Измерение сопротивления растущей послойно пленки между электродами планарного ПИП (рис. 5) прекращают при достижении на ПИП сопротивления, рассчитанного в зависимости от геометрии межэлектродного пространства и толщины пленки, после чего и завершается процесс синтеза пленки.

Для реализации предложенного метода было разработано устройство на базе установки вакуумного напыления УВН-71 (рис. 6).

Устройство представляет собой программно-аппаратный комплекс, в котором в качестве данных для управляющей программы используется значение измеряемой емкости или сопротивления планарного ПИП, а также заданные оператором основные параметры технологического процесса, граничные условия и рассчитанные по математической модели значения скорости роста пленки.

Устройство работает следующим образом. Аналоговый сигнал с планарного ПИП, термопары 4, вакуумметра 5 (см. рис. 6) поступает в управляющее микропроцессорное устройство 8. Микропроцессорное устройство по заданной программе управляет процессом синтеза тонких пленок посредством изменения мощности испарителей и перекрытия молекулярных потоков испаряемых веществ, изменения температуры нагрева подложек и ПИП. Молекулярный отсекатель 7 служит для практически мгновенного перекрытия молекулярных потоков от испарителей, которые в связи с инертностью продолжают некоторое время испарять вещества. При достижении на планарном ПИП 3 заданного значения емкости испаритель 6 отключается и молекулярный поток от него переключива-

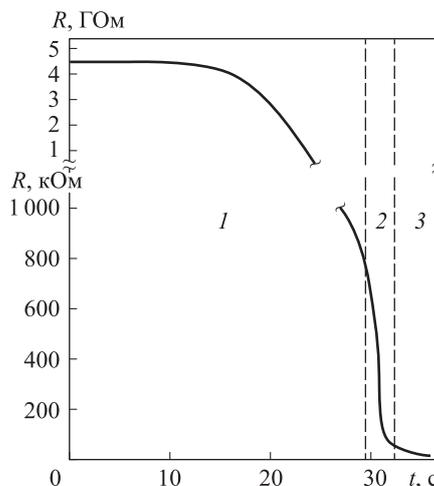


Рис. 5. Экспериментальный график зависимости сопротивления пленки от времени напыления меди

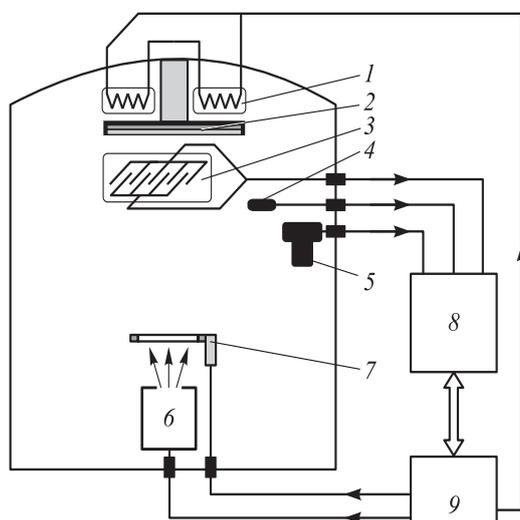


Рис. 6. Схема устройства, реализующего метод активного контроля параметров процесса синтеза тонких пленок:

1 — нагреватель; 2 — держатель подложек; 3 — ПИП; 4 — термопара; 5 — вакуумметр; 6 — испаритель; 7 — молекулярный отсекатель; 8 — управляющее микропроцессорное устройство; 9 — силовой блок вакуумной установки

ется отсекателем 7. В том случае, когда нужно получить пленки с заданным сопротивлением, продолжают процесс напыления и переходят в режим измерения сопротивления между электродами ПИП. При достижении заданного значения на ПИП останавливают процесс напыления путем перекрытия молекулярного потока отсекателем. Сравнительные экспериментальные данные по напылению металлов с использованием разработанного метода и без него приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение толщин синтезированных пленок и их отклонения от расчетных значений

Напыляемый металл	Толщина синтезируемой пленки, нм / отклонение от заданной толщины 50 нм, %	
	без активного контроля	с применением активного контроля
Медь	43 / 14	53 / 6
Никель	38 / 24	54 / 8
Хром	44 / 12	52 / 4

Проведенные эксперименты показали, что применение метода активного контроля позволяет снизить процент отклонения в толщине синтезируемой пленки от заданных значений в 2–3 раза по сравнению с применяемыми в настоящее время методами и используемым оборудованием.

Заключение. Метод и реализующая его измерительно-управляющая система позволяют в режиме реального времени контролировать процесс роста и по косвенным параметрам определять структуру пленки, что позволит получать электронные компоненты требуемого качества. Как показали проведенные эксперименты, предложенный метод активного технологического контроля и созданная на его основе измерительная управляющая система позволяют уменьшить разброс параметров пленок, что приводит к увеличению разрешающей способности технологических норм и повышению стабильности параметров СБИС при производстве их на имеющемся оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнюхин А.В., Курдюков С.А., Ланцев А.Н., Стариков М.В. Особенности проектирования фотошаблонов для производства наноразмерных полупроводниковых СБИС // Наноматериалы и наноструктуры — XXI век. 2012. № 2. С. 26–35.
2. Mode optimization of retrograde pocket doping in SOI-MOS VLSI transistors / A.V. Amir-khanov, S.I. Volkov, A.A. Glushko, L.A. Zinchenko, V.V. Makarchuk, V.A. Shakhnov // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45. No. 4. P. 237–241. DOI: 10.1134/S106373971604003X URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S106373971604003X>
3. Беспалов В.А., Дьяконов В.М., Коришунов А.В. Методы уменьшения статической мощности, потребляемой наноразмерными СБИС // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 10. С. 36–42.

4. Качемцев А.Н., Киселев В.К., Смолин В.К. Технологические принципы изготовления перспективной энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 7. С. 13–26.
5. Панфилов Ю.В. Нанесение тонких пленок в вакууме // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 3. С. 76–80.
6. Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. М.: Наука, 2006. 490 с.
7. Влияние давления рабочего газа на компонентный состав и свойства тонких пленок титаната бария-стронция / А.В. Тумаркин, А.Ю. Попов, М.В. Злыгостов, С.В. Разумов, А.Г. Гагарин // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 2. № 1. С. 124–128.
8. Способ синтеза наноструктурной пленки на изделии и устройство для его реализации / Д.В. Образцов, В.В. Гумбин, В.П. Шелохвостов, В.Н. Чернышов, М.В. Макаrchук. Патент РФ 2466207. Заявл. 23.12.2010. Опубл. 10.11.2012.
9. Образцов Д.В., Чернышов В.Н., Шелохвостов В.П. Метод и система активного технологического контроля синтеза нанобъектов // Наноинженерия. 2015. № 8. С. 27–32.
10. Kilimnik A.B., Nikiforova E.Y. Electrochemical behavior of nickel and its oxides in concentrated sodium hydroxide solutions // Russian Journal of Electrochemistry. 2013. Vol. 49. No. 12. P. 1122–1126. DOI: 10.1134/S1023193513120033
URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1023193513120033>
11. Платенкин А.В., Шелохвостов В.П., Баршутин С.Н. Разработка устройства воздействия электромагнитными полями на процесс плазмохимического синтеза нанобъектов // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 1. С. 240–241.

Образцов Денис Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» Тамбовского государственного технического университета (Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, Советская ул., д. 106).

Чернышов Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» Тамбовского государственного технического университета (Российская Федерация, 392000, г. Тамбов, Советская ул., д. 106).

Шахнов Вадим Анатольевич — чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Образцов Д.В., Чернышов В.Н., Шахнов В.А. Активный технологический контроль синтеза тонких пленок при производстве сверхбольших интегральных схем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 6. С. 17–27.
DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-17-27

DIRECT PROCESS CONTROL OF THIN FILM SYNTHESIS DURING PRODUCTION OF VERY-LARGE-SCALE INTEGRATED CIRCUITS

D.V. Obraztsov¹

odvru@ramber.ru

V.N. Chernyshov¹

V.A. Shakhnov²

shakhnov@bmstu.ru

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article deals with a method for direct process control of electrophysical parameters of thin films, used in production of very-large-scale integrated circuits. We present an algorithm for implementing this method so as to achieve minimum deviations in film parameters, which makes it possible to produce these circuits according to more advanced design standards

Keywords

Thin films, vacuum deposition, direct control, production, very-large-scale integrated circuit

Received 22.06.2017

© BMSTU, 2017

REFERENCES

- [1] Korniyukhin A.V., Kurdyukov S.A., Lantsev A.N., Starilov M.V. Photomasks design features for nanosized semiconductor VLSI. *Nanomaterialy i nanostruktury — XXI vek* [Nanomaterials and Nanostructures — XXI Century], 2012, no. 2, pp. 26–35 (in Russ.).
- [2] Amirkhanov A.V., Volkov S.I., Glushko A.A., Zinchenko L.A., Makarchuk V.V., Shakhnov V.A. Mode optimization of retrograde pocket doping in SOI-MOS VLSI transistors. *Russian Microelectronics*, 2016, vol. 45, no. 4, pp. 237–241. DOI: 10.1134/S106373971604003X Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S106373971604003X>
- [3] Bespalov V.A., D'yakonov V.M., Korshunov A.B. Design techniques for static power reducing of nanometer VLSI. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2012, no. 10, pp. 36–42 (in Russ.).
- [4] Kachemtsev A.N., Kiselev V.K., Smolin V.K. Technological principles for production of perspective nonvolatile memory. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystems Technology], 2015, no. 7, pp. 13–26 (in Russ.).
- [5] Panfilov Yu.V. Thin films deposition in vacuum. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in Electronic Industry], 2007, no. 3, pp. 76–80 (in Russ.).
- [6] Oura K., Lifshits V.G., Saranin A.A., Zotov A.V., Katayama M. *Vvedenie v fiziku poverkhnosti* [Introduction to surface physics]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 490 p.
- [7] Tumarkin A.V., Popov A.Yu., Zlygostov M.V., Razumov S.V., Gagarin A.G. Effect of working gas pressure on the component composition and properties of thin films of barium-strontium titanate. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 124–128 (in Russ.).
- [8] Obraztsov D.V., Gumbin V.V., Shelokhvostov V.P., Chernyshov V.N., Makarchuk M.V. Sposob sinteza nanostrukturnoy plenki na izdelii i ustroystvo dlya ego realizatsii [A method for synthesizing nanostructured film on the product and device for its realization]. Patent RF 2466207. Appl. 23.12.2010, publ. 10.11.2012.

[9] Obraztsov D.V., Chernyshov V.N., Shelokhvostov V.P. Method and system for active process control of the synthesis of nanoobjects. *Nanoinzheneriya* [Nano Engineering], 2015, no. 8, pp. 27–32 (in Russ.).

[10] Kilimnik A.B., Nikiforova E.Y. Electrochemical behavior of nickel and its oxides in concentrated sodium hydroxide solutions. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2013, vol. 49, no. 12, pp. 1122–1126. DOI:10.1134/S1023193513120033

Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1023193513120033>

[11] Platenkin A.V., Shelokhvostov V.P., Barshutin S.N. Working out of the device of influencing by electromagnetic fields on a process plasma-chemical synthesis of nano-objects. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences], 2010, vol. 15, no. 1, pp. 240–241 (in Russ.).

Obraztsov D.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Criminal Law and Applied Information Technology in Jurisprudence, Tambov State Technical University (Sovetskaya ul. 106, Tambov, 392000 Russian Federation).

Chernyshov V.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Criminal Law and Applied Information Technology in Jurisprudence, Tambov State Technical University (Sovetskaya ul. 106, Tambov, 392000 Russian Federation).

Shakhnov V.A. — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Obraztsov D.V., Chernyshov V.N., Shakhnov V.A. Direct Process Control of Thin Film Synthesis During Production of Very-Large-Scale Integrated Circuits. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 6, pp. 17–27. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-17-27