

Технологические методы повышения надежности интегральных схем

Известно, что надежность полупроводникового изделия (ППИ), заложенная в его конструкции, обеспечивается при выпуске данного изделия. Задача производителей — в процессе изготовления всеми возможными методами постоянно повышать качество и надежность ППИ. Особенно это касается наиболее сложных из них — интегральных схем (ИС).

Митрофан Горлов,
д. т. н.
Павел Коваленко,
к. т. н.

dvlb@mail.ru

Опыт работы позволил авторам создать систему получения и использования информации при проведении работ по повышению надежности в процессе серийного производства (рис. 1). Эта система является динамичной, она действует непрерывно и реагирует на текущие знания и их накопление на каждый момент времени.

Технологические методы повышения надежности ИС

Процесс изготовления ИС, как правило, предусматривает три участка работ: участок формирования структур на пластине, участок сборки и финишный участок, или участок выходного контроля.

Система бездефектного изготовления изделий в большей степени является организационной и не исключает, например, для ИС технических, физико-химических несовершенств технологических операций и процессов. Поэтому, на наш взгляд, при серийном производстве (рис. 2) необходимы широкая разработка и применение технологических методов повышения надежности ИС.

Снижение температуры технологических процессов как путь повышения надежности ИС

Среди многочисленных способов энергетического воздействия на физико-химическую систему кристалла ИС основное место занимает тепловое воздействие, которое практически используется при проведении всех технологических процессов ИС (кроме фотолитографии и травления).

Главная тенденция в термической обработке — это снижение температуры и продолжительности обработки для того, чтобы уменьшить диффузию атомов, которая приводит к нежелательным изменениям в характеристиках структуры.

Термический способ воздействия имеет объемный характер, включающий селективность в производстве, поэтому существенные преимущества дает применение когерентных излучений, обеспечивающих высокую селективность воздействия лишь на отдельные участки или связи системы.

Подобное воздействие осуществляется излучением как в УФ-, так и в ИК-области спектра, а также

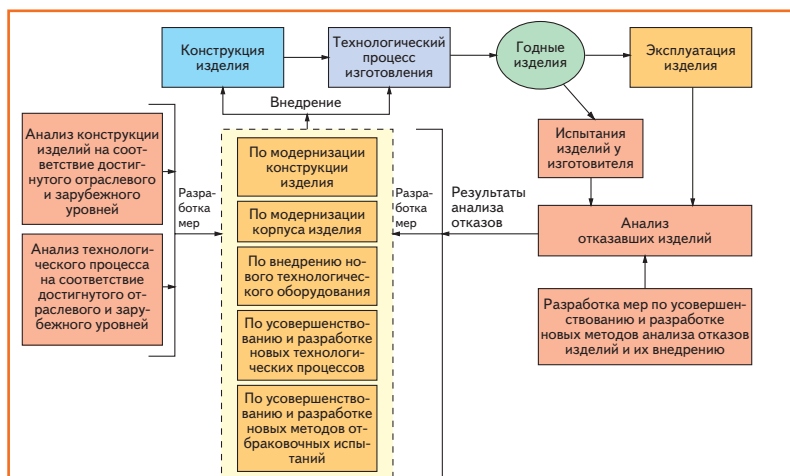


Рис. 1. Схема получения и использования информации при проведении работ по повышению надежности ППИ в процессе серийного производства



Рис. 2. Схема реализации технологических методов повышения надежности ИС в процессе серийного производства

комбинированным воздействием в обеих областях.

Например, для снижения температуры при росте эпитаксиальных слоев кремния из газобразной фазы эффективно двухстадийное проведение процесса: короткая (около 30 с) затравочная стадия в диапазоне 1100–1200 °С, после чего температура снижается до 900 ± 50 °С.

Для оценки температурного воздействия на структуру ИС введено понятие «термический эффект», характеризующий коэффициентом термического эффекта — $K_{ТЭ}$, который определяется в виде произведения температуры процесса на его время. Электрические параметры КМОП-структур могут быть получены двумя вариантами формирования p -карманов: ионно-диффузионным с высоким $K_{ТЭ}$ и ионным процессом с низким $K_{ТЭ}$. Последний предполагает формирование p -карманов с использованием легирования кремния высокоэнергетическими ионами бора и кратковременного отжига.

Оценка термического воздействия на структуру для двух технологических вариантов изготовления проводилась путем сравнения коэффициента термического эффекта. Для ионно-диффузионного варианта $K_{ТЭ}$ составляет величину порядка $2 \cdot 10^5$ °С·ч, для ионного — $2 \cdot 10^3$ °С·ч. Резкое уменьшение термического эффекта для ионного варианта объясняется сокращением длительности температурной операции разгонки примеси в p -кармане. Это снижает отрицательное воздействие температуры на кремний и предотвращает возможность сохранить качество исходного материала. Так, время жизни неосновных носителей в ионно-диффузионном варианте составляет 0,1–0,001 мкс, в ионном варианте — 1–3 мкс. Быстрое снижение времени жизни неосновных носителей, наблюдаемое после длительной разгонки примеси в p -кармане, связано с неконтролируемыми загрязнениями и термическими дефектами.

Можно заключить, что снижение температуры всего комплекса «горячих операций» технологии производства кремниевых ИС ограничивается уровнем 1110 °С; при использовании термодиффузионного легирования этот предел снижается до 1000 °С, и до 900 °С при замене термодиффузионного легирования на ионное или радиационно-стимулируемую диффузию с последующим отжигом.

Компенсирующая технология в производстве ИС

Технологический процесс изготовления полупроводниковых ИС состоит более чем из ста технологических операций. Каждая такая операция необходима для последовательного получения структур ИС и схемы в сборе. Но наряду с необходимым положительным эффектом технологическая операция может вносить и отрицательные качества, на устранение которых зачастую направлены последующие технологические операции. Например, коробление (или «холмистость» на пластине и изгиб, то есть вогнутость или выпуклость пластины по диаметру), поя-

вляющееся при повышенной температуре и различных технологических обработках и влияющее на искажение геометрии структур и ухудшение электрических характеристик ИС, может быть значительно уменьшено за счет дополнительной операции осаждения компенсирующей пленки на обратной стороне пластины или за счет компенсирующего легирования обратной стороны пластины.

Но известны технологические процессы, где отрицательное влияние технологической операции на процент выхода годных, структуру и электрические параметры компенсируется в процессе проведения данной операции. Так, введение хлорсодержащей добавки в инертную атмосферу на операции разгонки при двухстадийной диффузии фосфора приводит к уменьшению дефектности структуры и снижению токов утечки изделий.

Технологию, в которой при технологической операции одновременно проводится процесс, направленный на устранение или значительное снижение отрицательных последствий данной операции на изделие, будем называть компенсирующей технологией.

Приведем пример компенсирующей технологии. Наиболее эффективное понижение плотности линейных дефектов в высоколегированных диффузионных областях заключается в снижении напряжений кристаллической решетки полупроводника с помощью дополнительной компенсирующей примеси. Введение дополнительного диффузанта тетрахлорида германия $GeCl_4$ в процессе диффузии фосфора из трихлорида фосфора PCl_3 выполняет функцию значительного снижения плотности линейных дефектов.

Применение метода выравнивающей технологии

Известно, что из-за всевозможных объективных и субъективных причин в процессе производства партии ИС могут иметь разброс по выходу годных, на одной или нескольких технологических операциях, от установленных плановых значений. Обычно эти партии

изделий на выходном контроле соответствуют по конструктивным электрическим параметрам техническим условиям (ТУ), и их отгружают потребителям. Но какова надежность партий изделий, выпущенных с плановым процентом выхода годных по всем технологическим операциям, а также со значительным отклонением от планового? Опыт работы показал, что надежность партии изделий будет ниже надежности изделий, указанной в ТУ, если процент выхода годных на определяющих операциях значительно ниже планового.

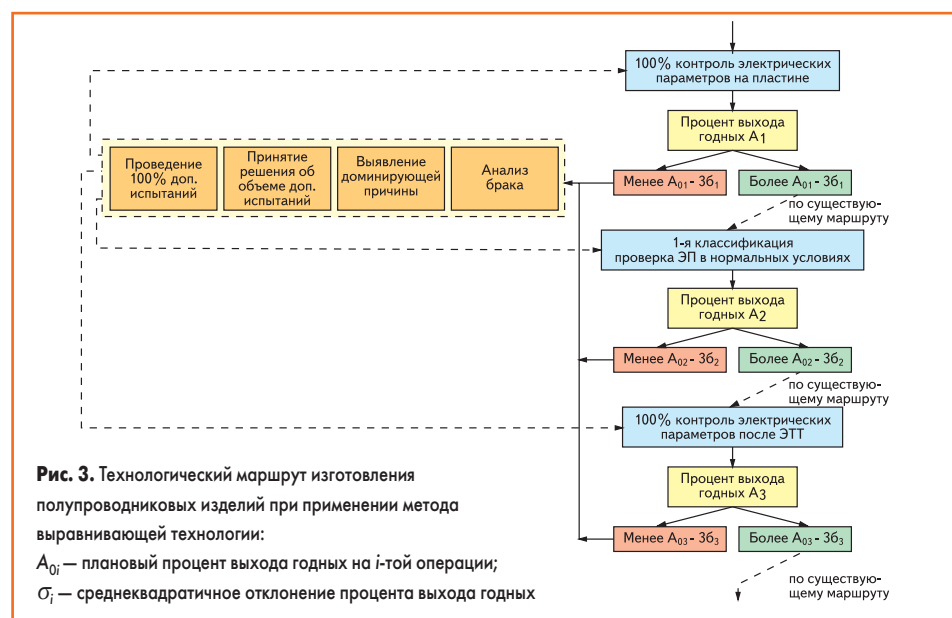
Предложен следующий подход к процессу производства с целью получения партий изделий с одинаковой надежностью, не менее установленной в ТУ. Если выход годных на какой-либо операции будет ниже планового, необходимо впоследствии ввести добавочную операцию (или операции), обеспечивающую дополнительную отбраковку потенциально ненадежных изделий (рис. 3). И хотя результирующий процент выхода годных после введения дополнительных операций может снизиться, надежность этой партии будет равна надежности партий, прошедших с плановым процентом выхода годных.

Технология, в которой устанавливается допустимый разброс по выходу годных и предусмотрены дополнительные отбраковочные испытания, если фактический выход годных ниже величины этого разброса, названа выравнивающей.

Выбор оптимальных отбраковочных испытаний

Выбору оптимальных отбраковочных испытаний и их режимов посвящено множество работ. Ниже изложено несколько наших наблюдений.

Анализ результатов электротермотренировки (ЭТТ), как одного из наиболее применяемых и эффективных методов отбраковочных испытаний, показывает, что если более 50% отказов являются катастрофическими, это свидетельствует о неуправляемости и нестабильности ТП. Отказы в данном случае проявляются





практически в первые 12 часов ЭТТ. При стабильном ТП изготовления ИС количество отказов на ЭТТ составляет менее 1%, а более 90% отказов ИС происходит из-за ухода их электрических параметров за нормы ТУ.

Анализ отказов ИС, имеющих выход электрических параметров за нормы, установленные ТУ, показал, что при перепроверке этих схем через 24, 36, 48 часов у части из них значения параметров начинают входить в допустимые. В большей степени это связано с нестабильностью поверхности полупроводника, оксидной пленки. Если эти ИС поставить заказчику, то при работе в аппаратуре они откажут в первую очередь. Вот почему были введены следующие ограничения на время проверки партии ИС после проведения ЭТТ: замер электрических параметров следует начинать сразу же после изъятия ИС из нагретой камеры стенда ЭТТ (с учетом физического остывания схем) и проверку осуществлять не позднее 8 часов после изъятия ее из камеры.

Диагностические методы контроля качества и надежности ИС

Отбраковочные испытания зачастую не могут выявить все потенциально ненадежные ИС. Хотя проведение ЭТТ требует немалых затрат на изготовление стендов, а также больших площадей и потребления электроэнергии. Поэтому в мировой практике электронной промыш-

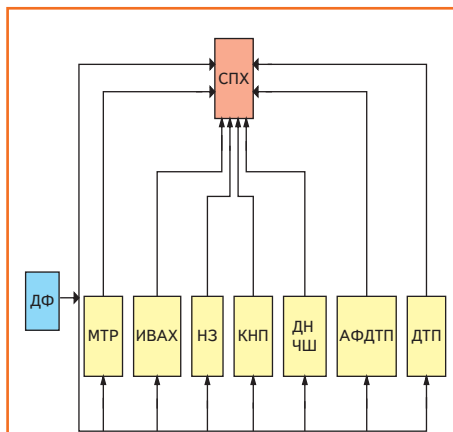


Рис. 4. Диагностические методы контроля качества и надежности ИС:

СПХ — стандартные параметры и характеристики;
ДФ — дестабилизирующие факторы (температура, изменение напряжения питания или нагрузки, электростатическое или радиационное воздействие и т. д.);
МТР — микротоковые режимы;
ИВАХ — интегральная вольт-амперная характеристика;
НЗ — наведенный заряд;
КНП — критическое напряжение питания;
ДНЧШ — диагностика по низкочастотному шуму;
АФДТП — анализ формы динамического тока потребления;
ДТП — диагностика по тепловым параметрам

ленно проводятся серьезные изыскания по разработке альтернативных методов отбраковки потенциально ненадежных ИС. Это могут быть методы измерения малых токов, шумов, критического напряжения питания, динамического тока потребления и т. д. (рис. 4).

Применение диагностических методов позволяет не только повышать надежность партии ИС за счет отбраковки потенциально ненадежных схем, но зачастую и делать индивидуальные прогнозы по надежности конкретной схемы. Применение диагностических методов в ТП целесообразно только тогда, когда достоверность этого метода не хуже достоверности заменяющих стандартных методов отбраковки.

Литература

1. Горлов М. И., Ануфриев Л. П., Бордюжа О. Л. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе серийного производства / Под ред. д. т. н., проф. М. И. Горлова. Минск: Интеграл. 1997.
2. Горлов М. И., Ануфриев Л. П. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства. Минск: Бестпринт. 2003.
3. Горлов М. И., Емельянов В. А., Ануфриев Д. И. Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий. Минск: Белорусская наука. 2006.