

Использование термомиграции

в технологии структур силовых полупроводниковых приборов

Одна из основных тенденций развития силовой полупроводниковой техники — замена дискретных приборов в герметичных металлостеклянных корпусах на модули, в которых структуры силовых полупроводниковых приборов (СПП) — тиристоров, триаков, транзисторов, диодов и т. д. — монтируются на изолирующем керамическом основании и герметизируются в пластмассовом корпусе. Структуры СПП ведущих мировых фирм имеют одностороннюю пассивацию, анодный выпрямляющий $p-n$ -переход выводится на верхнюю плоскость структуры при помощи периферийной разделительной области (РО). Такие структуры [1] допускают монтаж непосредственно на металлизированную керамическую подложку без термокомпенсатора, благодаря чему обозначилась тенденция увеличения токоминала модулей и роста обратного напряжения.

Алексей Полухин

polukhin_alex@mail.ru

**Татьяна Зуева
Анатолий Солодовник**

marketing@element.zp.ua

Создание сквозных РО является самостоятельной технологической задачей, и большинство фирм использует для этой цели диффузию как наиболее освоенный процесс. Квадратичная зависимость времени и глубины диффузии существенно удлиняет процесс получения диффузией РО на толстых пластинах высокоомного кремния, используемых при создании высоковольтных приборов, а это ухудшает электрофизические параметры исходного кремния.

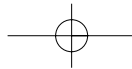
Создать локальные сквозные p -области в кремнии позволяет термомиграция, или зонная перекристаллизация градиентом температуры [2–4]. Жидкая зона раствора-расплава мигрирует сквозь кремний в плоскооднородном поле градиента температуры, оставляя за собой перекристаллизованный «след», легированный атомами металла-растворителя (в данном случае алюминия) до предела растворимости при температуре процесса. Термомиграция позволяет до десятков минут сократить время создания РО, так как в практических случаях скорость миграции зоны достигает единиц или даже десятков микрон в минуту при температуре процесса 1200–1260 °С. Перекристаллизованные слои по глубине пластины имеют примерно одинаковый уровень легирования акцепторной примесью и совершенную кристаллическую структуру [2]. Термомиграция органично сочетается с традиционными технологическими операциями полупроводникового производства: диффузией, фотолитографией, эпитаксией.

Характерными особенностями технологии термомиграции, общими для западных фирм, были: использование полированных пластин, как правило, с ориентацией (111); формирование сетки линейных зон на поверхности пластин напылением алюминия с последующей фотолитографией; проведение термомиграции в газонаполненных установках с односторонним нагревом горизонтально расположенных пластин системой ИК-ламп; обязательная механическая обработка пластин после термомиграции [3, 4]. Сообщалось [4] об изготовлении чипов тиристоров размером 1×1 мм с рабочим напряжением менее 600 В с использованием термомиграции.

В отечественной силовой полупроводниковой технологии используются пластины со шлифованной поверхностью. Зоны, полученные напылением, не погружаются с поверхности в шлифованную поверхность, как в полированную, что обусловлено еще и неадекватностью низкотемпературного процесса напыления высокотемпературному процессу термомиграции. Для формирования дискретных зон используется технология высокотемпературного избирательного смачивания [5, 6], основанная на растворении кремния расплавом металла-растворителя в окнах, созданных фотолитографией в окисной или нитридной маске. Этот способ позволяет получить на поверхности пластины заглубленные зоны требуемой топологии, изначально насыщенные кремнием.

Для термомиграции в вакууме используется односторонний резистивный нагрев вертикально расположенных пластин [2]. Пластины располагаются в кассетах, установленных у внешних граней призматического нагревательного блока. В качестве нагревателей используются плоские меандры из углеродного композитного материала, дающие плоскооднородное тепловое поле. Такая технология [6, 7], разработанная с помощью специалистов Новочеркасского политехнического института, на оборудовании, созданном сотрудниками запорожского ВНИИ «Преобразователь», позволяла обрабатывать пластины диаметром до 76 мм и толщиной от 0,25 мкм с выходом годных на операции термомиграции свыше 94% для структур (диодов, тиристоров, триаков, фототиристоров и т. д.) со стороной квадрата до 5,2 мм и напряжением до 1200 В. В сравнительной таблице приведены основные характеристики способов нагрева, применяемых при термомиграции.

При разработке приборов на токи свыше 100 А и напряжения свыше 1600 В обозначился ряд проблем, не возникавших ранее на приборах малых токоминалов. Необходимо было исключить разрывы зон при формировании их и во время термомиграции. Кроме того, на кристаллах с большим периметром РО особое значение имеет однородность электрофизических свойств РО по всему периметру, в частности, блокирующие свойства вертикаль-



Таблица

ИК-нагрев в неокислительной газовой среде	Резистивный нагрев в вакууме
1. Простота. Достаточно модернизации установки быстрого термического отжига	1. Используются многопозиционные вакуумные термические установки с программным управлением
2. Жесткие требования к допускам, качеству изготовления и подгонки деталей оборудования	2. Требования по допускам для большинства деталей не жесткие
3. Возможны быстрый нагрев и охлаждение	3. Скорость нагрева и охлаждения определяется тепловой инерцией термического узла
4. Величина градиента температуры превышает 150 °C/см, скорость миграции высокая	4. Величина градиента температуры и скорость миграции умеренные. Требуется дополнительное время для достижения вакуума в камере
5. Поштучная обработка пластин	5. Групповая обработка пластин с кассетной загрузкой
6. Продукты миграции остаются на поверхности пластины, и их необходимо удалять	6. Алюминий испаряется с финишной поверхности пластин во время процесса
7. Удельное энергопотребление высокое (на пластину Ø4" расходуется 5–7 кВт·ч)	7. Удельное энергопотребление умеренное (1–1,5 кВт·ч на пластину Ø4")
8. Используется при создании тиристорных структур 1×1 мм на напряжение до 600 В на сравнительно тонких пластинах	8. Используется для создания структур размером до 20×20 мм и Ø20 мм с напряжением до 2000 В. Толщина пластин не ограничена

ных *p-n*-переходов. Это, в свою очередь, напрямую связано со стабильной миграцией протяженных линейных зон, отсутствием в них локальных искривлений и утолщений.

С увеличением размера кристалла и уменьшением количества кристаллов на пластине каждый разрыв зоны при формировании или во время термомиграции переводит в брак больший процент площади пластины. Разрыв линейной зоны при формировании может быть вызван не только браком фотолитографии, но и локальным затенением окна в окисной маске присутствующими в расплаве посторонними частицами (предположительно, чешуйками окисла алюминия размером менее 100 мкм). Поскольку основная часть разрывов, связанных с затенением, приурочена к области первоначального смачивания, изменена топология фотошаблона. Это позволило практически исключить разрывы рабочих зон.

Однородность электрофизических параметров зон по всему периметру каждой приборной структуры, отсутствие по периметру вертикального *p-n*-перехода РО мест с повышенными токами утечки определяет степень развития технологии и ограничивает, в конечном счете, размеры приборных структур, которые могут быть изготовлены при данной степени совершенства технологии. Такая однородность определяется, помимо разрывов зон при формировании, еще и отсутствием искажений траектории миграции зон. Причины отклонения траектории миграции зон от нормали к плоскости пластины можно условно разделить на несколько групп:

1. Вызванные наличием тангенциальной составляющей градиента температуры G_t , сравнимой по порядку величины с нормальной его составляющей G_n .

2. Связанные с нестабильностью зон на стадии их погружения.

3. Обусловленные анизотропией кристаллографических свойств кремния.

Тангенциальная составляющая градиента температуры на краях пластины, обусловленная некомпенсированным излучением от краев пластины, может подавляться широкой (500 мкм) кольцевой зоной у края пластины [8] или встречным излучением от торца кассеты [4]. В нашем случае помимо компенсации излучения от графитовой кассеты используется эффект тепловой компенсации от мигрирующих параллельно основным вспомогательных зон. Эти зоны выполняют во время термомиграции функцию уменьшения G_t в периферийных областях пластины. Геометрические параметры этих зон точно такие же, как и у основных зон, поэтому они движутся с той же скоростью, выполняя свою роль по всей толщине пластины.

Погружение дискретных зон в кремний — наиболее критичная стадия процесса термомиграции [2, 9], поскольку величина G_n на поверхности пластины по сравнению с объемом снижена, особенно при сравнительно невысоких температурах [9, 10]. Зарастание следа зоны на стартовой поверхности пластины происходит для разных фрагментов зон не одновременно. Временной разброс даже в пределах одной пластины может достигать 500 с.

Это зависит от ориентации пластины, геометрических характеристик зон на старте, особенно в местах пересечения зон. Снижение временного разброса процесса погружения достигнуто соединением зон, формирующих РО, в единый ансамбль, даже если эти зоны не расположены смежно друг с другом. Особые требования предъявляются к фотошаблонам в местах пересечений линейных зон. В этих местах линейный размер зон увеличен и погружение затруднено. На рис. 1 показан след погрузившихся пересекающихся зон на кремнии с ориентацией (111) (а) и (100) (б). Заметно, что для кремния с ориентацией (111) погружение в месте пересечения затруднено, о чем свидетельствует размер впадины с характерной оградкой плоскостями (111). В пластину с ориентацией (100) зоны погружаются быстрее, и задержка их на старте в местах пересечений меньше, что объяснимо оградкой «горячей» (растворяющейся) границы зоны [2]. На рис. 2 показана финишная сторона тех же пластин после выхода зон на поверхность. Искажение формы зоны в пересечении для кремния с ориентацией (111) заметнее, и определяется оно, как уже было сказано, задержкой зоны на старте в месте ее локального расширения, в данном случае, в пересечении зон.

Использование в технологии СПП пластин с ориентацией (111) общепринято, так как они не требуют ориентации линейных зон [2]. Для кремния с ориентацией (100) направлениями стабильной миграции считались только взаимно перпендикулярные направления {011}, что требовало изначальной ориентации зон строго в этих направлениях. Однако использование кремния с ориентацией (100) позволяет получать структуры с более высокими блокирующими свойствами, чем в случае использования в качестве исходного кремния с ориентацией (111) и тем же удельным сопротивлением. Это во многом объясняется более легким погружением зон в кремний (100) и миграцией зон без искажений.

Из трех составляющих термомиграции — растворения кремния на «горячей» границе зоны, диффузии атомов кремния сквозь раствор-расплав и кристаллизации их на «холодной» границе — наиболее критична первая [2]. Взаимное влияние друг на друга кристаллизующейся и растворяющейся границ зоны снижает скорость миграции, особенно при малой их

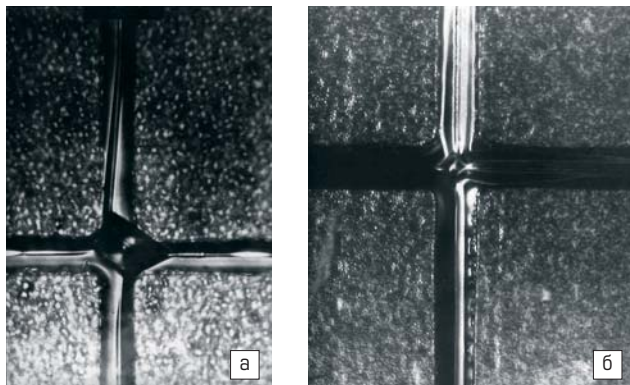


Рис. 1. След пересекающихся зон на кремнии с ориентацией (111) (а) и (100) (б). Стартовая поверхность, 100×

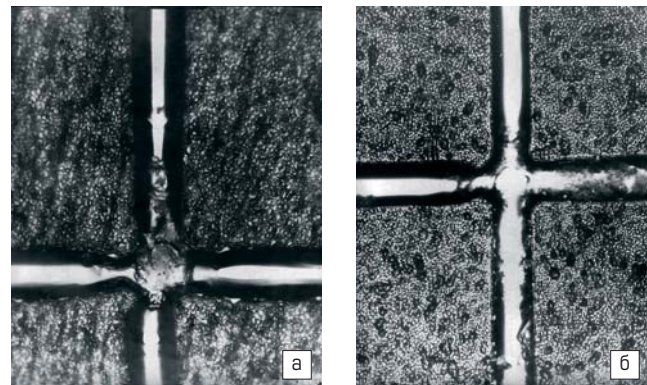
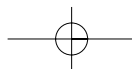


Рис. 2. Финишная поверхность пластины с ориентацией (111) (а) и (100) (б) после выхода зон на поверхность, 100×



толщине, в так называемом кинетическом режиме [2], что сильнее всего проявляется при погружении, когда градиент температуры мал и сказывается анизотропия кристаллографических свойств кремния. Зона недостаточной толщины может отклоняться от нормали к поверхности пластины сразу же после погружения. Это явление более характерно для кремния с ориентацией (111). Для газонаполненных установок с близкорасположенным теплопроводом этот эффект менее заметен, так как величина градиента температуры в них изначально больше, чем в вакуумных установках. Однако вакуумные установки имеют ряд преимуществ по сравнению с газонаполненными: они более экономичны, условия миграции в них ближе к равновесным, что обеспечивает более высокое качество миграции и кристаллографическое совершенство перекристаллизованных областей и $p-n$ -переходов РО. На них даже без диффузионной разгонки достигаются значения обратных напряжений, близкие к теоретическим.

При термомиграции в вакууме 10^{-4} мм рт. ст. алюминиевая зона, пройдя сквозь пластину, испаряется. Исчезает необходимость стравливания продуктов миграции после завершения процесса [11, 12]. Во время термомиграции в вакууме осуществляется легирование пластин алюминием из паров, в том числе локальное. Для локального легирования используется окисная маска достаточной стойкости [11]. Остающийся на стартовой поверхности после погружения зоны поликристаллический «клин» является геттером для прилегающей периферийной области кристалла на последующих термических операциях.

Предложена новая топология разделительных областей. Структуры разделяются двумя параллельными зонами [13]. Вблизи мест пересечения ширина зон плавно уменьшается на 10%, чем достигается снижение линейного размера зон по диагонали в пересечениях. Это, в свою очередь, облегчает погружение зон в таких местах. Все зоны — и основные, и вспомогательные — соединяются в единую систему и мигрируют единым «ансамблем», будучи связанными на всем пути своего движения. Параметры зон — ширина и расстояние между параллельными зонами, а также режим миграции — выбраны таким образом, чтобы в промежутке между структурами формировалась область с нарушенной кристаллической структурой, выполняющая при последующих термических операциях функции геттера. На рис. 3 показана область пересечения линейных параллельных зон, ширина которых плавно уменьшалась к пересечениям.

Параллельные близкорасположенные зоны мигрируют стабильнее, чем одиночная зона. Кроме того, даже в случае разрыва одной из зон выходит из строя только одна из двух соседних структур. Уменьшение локальных расширений в местах пересечения зон позволило облегчить погружение ансамбля линейных зон. Разброс временной задержки погружения [9] на пластине диаметром 76 мм снижен более чем вдвое. Уменьшается отклонение от нормали к плоскости пластины следа миграции параллельно мигрирующих близкорасположенных зон.

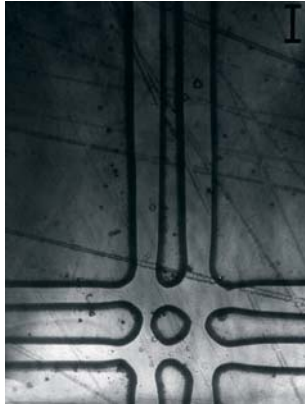


Рис. 3. Пересечение сдвоенных зон. Финишная поверхность. $100\times$

С учетом этого предложен новый технологический маршрут, исключая операцию шлифования пластин после термомиграции [12]. Для приборов ключевого типа (тиристоров, триаков и т. п.) диффузия проводится в два этапа — до и после термомиграции. Дополнительное легирование быстро диффундирующей примесью — алюминием — проводится во время термомиграции. Для диодов прямой полярности также в два этапа проводится диффузия разноименной примеси [14]. Эти изменения, а также изменение порядка операций технологического маршрута, когда термомиграция выполняется между диффузионными операциями, позволили повысить общий выход годных и процент высоковольтных структур. На рис. 4 приведены гистограммы распределения по классам стеклопассивированных диодов прямой полярности (сплошная линия) с термомиграцией на ток 100 А. Для сравнения приведено распределение по классам стеклопассивированных диодов прямой полярности с классической фаской. Обе партии изготовлены на кремнии из одного слитка. Диффузия на обеих партиях проводилась одновременно. Замеры были проведены на автомате, позволяющем подавать на приборы обратное напряжение не более 2000 В (что соответствует 16 классу по напряжению).

Помимо экономии кремния за счет обработки изначально тонких пластин (без припуска по толщине на обработку после термомиграции) и увеличения выхода годных удалось достичь высокой воспроизводимости параметров приборных структур на пластине и в пар-

тии обрабатываемых пластин. Для приборов ключевого типа оказалось возможным модулировать концентрационный профиль горизонтальных диффузионных слоев в зависимости от назначения прибора, а также необходимого заказчику сочетания чувствительности к управляющему сигналу и динамических свойств прибора.

Применение локального маскирования позволило органично сочетать в едином технологическом маршруте создание РО термомиграцией с формированием системы делительных колец, увеличивающих запирающую способность высоковольтных $p-n$ -переходов.

Усовершенствование технологического маршрута изготовления стеклопассивированных приборных структур и процесса термомиграции, модернизация топологии ансамбля линейных зон позволяют применить это решение при разработке серии СПП на токи свыше 100 А: тиристоров, фототиристоров, диодов и т. д. — для комплектации высоковольтных силовых полупроводниковых модулей.

Литература

- Blunt P. Electronic Components and Applications. 1979, V. 2, No 1.
- Лозовский В. Н., Луний Л. С., Попов В. П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия. 1987.
- Chang M., Kennedy R. J. Electrochem. Soc. V. 128, No 12. (1981). 2193-2198.
- Lischner D. G., Basseches H., D'Altroy F. A. — J. Electrochem. Soc., v. 132, No 12, (1985), 2997-3001.
- Майстренко В. Г. // В межвуз. сб. «Кристаллизация и свойства кристаллов». 1985.
- Полухин А. С., Жукова Л. В., Балюк А. В. // В межвуз. сб. «Кристаллизация и свойства кристаллов». 1989.
- Полухин А. С. и др. в межвуз. сб. «Кристаллизация и свойства кристаллов». 2003
- Патент США № 4190467.
- Малибашева Л. Я., Малибашев В. А. // В межвуз. сб. «Кристаллизация и свойства кристаллов». 1989.
- Aaron D.B., Thomas R.E. and Wiley J.D. — J. Appl. Phys., v. 54, No 6 (1983), 3632-3635.
- Патент Украины № 45 871 А.
- Патент Украины № 53903 А.
- Патент Украины № 2748.
- Патент Украины № 67122 А.

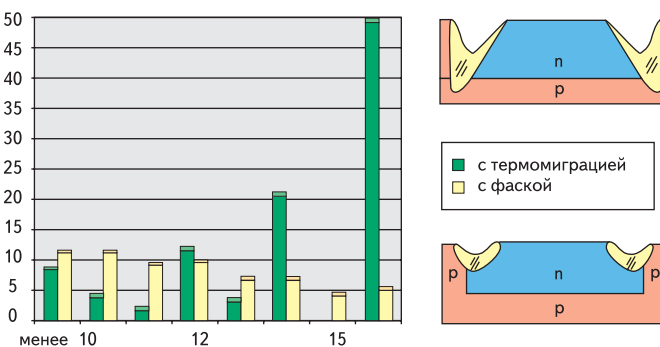


Рис. 4. Распределение по классам структур диодов Д140-100: мезапланарной конструкции и с «классической» фаской, пассивированных стеклом