

Исследование технологических факторов процесса термомиграции

Алексей Полухин

polukhin_alex@mail.ru

Введение

Термомиграция, или зонная перекристаллизация градиентом температуры [1], — способ, позволяющий создавать в течение сравнительно короткого времени сильно легированные подложечные p^+ -слои и локальные сквозные p^+ -области в объеме полупроводникового материала. Жидкая зона расплава металла-растворителя в объеме полупроводника, мигрируя в поле градиента температуры, растворяет своей передней, «горячей» стороной твердый материал, атомы которого диффундируют сквозь расплав и кристаллизуются на «холодной» стороне зоны. Скорость миграции при температуре 1000...1350 °C составляет единицы или десятки микрон в минуту. Перекристаллизованный p^+ -слой легирован атомами металла-растворителя (чаще всего алюминия) до предела растворимости при температуре процесса. Создаваемые при помощи термомиграции сквозные периферийные разделительные p^+ -области (РО) используются при выведении нижнего выпрямляющего $p-n$ -перехода на верхнюю поверхность пластин в технологии изготовления чипов силовых полупроводниковых приборов [2–5]. Способ также успешно используется в микромеханике, медицине, гелиоэнергетике и т. д.

Технологический процесс термомиграции линейных зон включает в себя операцию формирования линейных зон заданной конфигурации на стартовой поверхности пластин и собственно операцию термомиграции. В большинстве источников [2–4] формирование зон понимается как напыление на полированную поверхность пластины слоя алюминия требуемой толщины с последующей фотолитографией по напыленному слою. На пластине со шлифованной поверхностью необходимо предварительно создать систему канавок в соответствии с требуемой топологией РО. Однако, в любом случае, на поверхности пластин перед напылением имеется тонкий слой нативного окисла. Возможно также наличие следов рабочей жидкости паромасляного насоса, осаждающихся при напылении. Это, а также необходимость насыщения зоны кремнием до погружения, приводит к задержке зон на старте перед погружением и может являться одной из причин стартовой нестабильности и отклонения траектории миграции от нормальной к поверхности пластины. Для формирования зон также используется способ высокотемпературного избирательного смачивания [5], основанный на локальном растворении кремния в окнах, созданных фотолитографией в окисной или нитридной маске. Образующиеся заглубленные зоны изначально насыщены кремнием. Межфазный слой нативного окисла или загрязнений между зоной и объемом кремния в данном способе формирования зон отсутствует.

Сама термомиграция проводится при помощи облучения с односторонним нагревом, как правило, в контролируемой среде или в вакууме. Можно выделить три основных способа одностороннего нагрева: инфракрасными кварцевыми лампами [2], резистивный [5] и индуктивный [6]. Каждому из способов соответствует своя система закрепления обрабатываемых пластин в камере, их ориентация, объем разовой загрузки и среда в камере. Применимость того или иного способа во многом зависит от специфики выполняемого процесса и требуемых электрофизических свойств перекристаллизованных областей. Так, для миграции точечных зон при создании сквозных межсоединений использовались системы с индуктивным нагревом в атмосфере гелия [6]. Для создания сетки линейных зон размером 1×1 мм применяются системы ИК-нагрева [3, 4]. Для создания протяженных РО для чипов с большим периметром предпочтительны многопозиционные устройства с резистивным нагревом в вакууме [5, 7]. В последнем случае алюминий после выхода на финишную поверхность пластин испаряется, и проблема удаления продуктов миграции с поверхности пластин исчезает. Это предоставляет дополнительные возможности проведения термомиграции в том или ином месте технологического маршрута [5]. В зависимости от этого может изменяться суммарное время послемиграционного отжига вертикальных РО и, соответственно, меняются выпрямляющие свойства вертикальных $p-n$ -переходов. Исследование выпрямляющей способности вертикальных $p-n$ -переходов РО, созданных термомиграцией, в зависимости от способа формирования зон и от длительности послемиграционного отжига является целью настоящей работы.

Методика проведения исследования и полученные результаты

Для сравнения технологических особенностей создания РО чипов СПП были изготовлены три партии пластин, отличавшиеся способом формирования зон. В каждой партии пластины были подвергнуты послемиграционному отжигу в течение различного времени.

Использовались пластины кремния Чохральского марки КЭФ-40 диаметром 76 мм с удельным сопротивлением 40 Ом·см, на которых был выращен слой термического окисла. Для создания РО использовался шаблон в виде квадратной сетки 4,55×4,55 мм с шириной линий 50 мкм.

В пластинах первой партии зоны создавались с помощью вакуумного напыления алюминия в предварительно выгравленные канавки глубиной 25–30 мкм и последующих фотолитографии и травления. Для фотолитографии по алюминию использовался фотошаблон с шириной линий 100 мкм, чтобы исклю-

чить подтравки алюминия в канавках. Толщина алюминия в канавках составляла 17–20 мкм.

В пластинах двух остальных партий зоны были сформированы с помощью высокотемпературного избирательного смачивания (ВИС). Во второй партии толщина зон была оптимальной — 18±20 мкм, а пластины третьей партии имели избыточную толщину зон — более 35 мкм.

Термомиграция в пластинах всех трех партий проводилась в вакууме 10⁻⁴ мм рт. ст. Использовалась установка термомиграции, с призматическим многопозиционным резистивным нагревателем из углекомпозиционного материала [5]. Температура процесса не превышала 1170 °С, время миграции составило 90 минут.

Часть пластин каждой из трех партий сразу после термомиграции подверглась двухсторонней шлифовке, и из них были изготовлены стеклопассивированные чипы тиристоров на ток 12,5 А, по стандартному маршруту.

Остальные пластины в каждой из партий разделялись на 4 подпартии. Одна из подпартий не подвергалась послемиграционному отжигу, три других отжигались в открытой трубке при температуре 1250 °С в течение 4, 9 и 16 часов соответственно. В дальнейшем с помощью двусторонней фотолитографии и глубинного травления в смеси фтористоводородной, азотной и уксусной кислот (1:4:0,5) вертикальные *p-n*-переходы РО вскрывались и затем пассивировались. Ширина окна в шаблоне составляла 1000 мкм, поэтому профилирование вертикального *p-n*-перехода осуществлялось только за счет разницы в скорости травления исходного *n*-кремния и сильнолегированного *p*⁺-слоя РО.

Для каждого из квадратных элементов, ограниченных по периметру РО, было измерено обратное напряжение \bar{U}_r при токе утечки не более 20 мкА. На пластинах условно выделялись центральная и периферийная области, и расположение элемента на пластине учитывалось с точки зрения принадлежности к одной из них. Данные измерений приведены в таблице.

Судя по приведенной таблице, характер изменения величины \bar{U}_r для РО, созданных миграцией зон, полученных напылением и ВИС, разный. Запирающая способность *p-n*-переходов РО, полученных миграцией напыленных зон, изначально невысока, но с увеличением длительности отжига величина \bar{U}_r монотонно растет, хотя и не достигает значения \bar{U}_r для зон, созданных ВИС.

Для вертикальных *p-n*-переходов РО, созданных миграцией зон, полученных ВИС, величина \bar{U}_r , даже без отжига, сравнительно велика, причем при избыточной толщине зон запирающая способность заметно ниже. Характер изменения \bar{U}_r с длительностью отжига для зон, созданных ВИС, также одинаков: при отжиге в течение 4 часов наблюдается четко воспроизводимый спад \bar{U}_r .

Внешний вид пересекающихся зон для всех трех партий приведен на рис. 1–3. На напыленных зонах заметно значительное искажение формы зоны в пересечении. Это можно объяснить стартовой задержкой зон перед погружением, когда зона насыщается кремнием,

Таблица. Зависимость среднего обратного напряжения *p-n*-переходов РО от технологических факторов и места расположения чипа на пластине

	\bar{U}_r , В, зоны получены напылением		\bar{U}_r , В, зоны получены ВИС, h = 20 мкм		\bar{U}_r , В, зоны получены ВИС, h = 35 мкм	
	центр	периферия	центр	периферия	центр	периферия
Без отжига	505±86	572±197	1247±347	1154±491	976±236	920±262
4 ч, 1250 °С	872±319	661±390	975±193	869±277	656±115	675±87
9 ч, 1250 °С	974±325	935±378	1095±456	1027±393	1091±248	802±246
16 ч, 1250 °С	1035±403	984±451	1555±340	1392±500	1098±267	1000±354

и величина градиента температуры в приповерхностном слое недостаточно велика, чтобы обеспечить миграцию. Поскольку линейный размер канавки в пересечении увеличен, капиллярное давление там меньше, и происходит перераспределение расплава и изменение формы зоны перед погружением. В процессе миграции в местах пересечений измене-

ние формы зон продолжается, иногда до полного разрыва на отдельные линии. Это приводит к снижению запирающей способности вертикальных *p-n*-переходов РО. Зоны, сформированные ВИС, несмотря на кажущуюся геометрическую идентичность с напыленными в канавки зонами, практически не изменяют морфологии на старте, потому что изна-

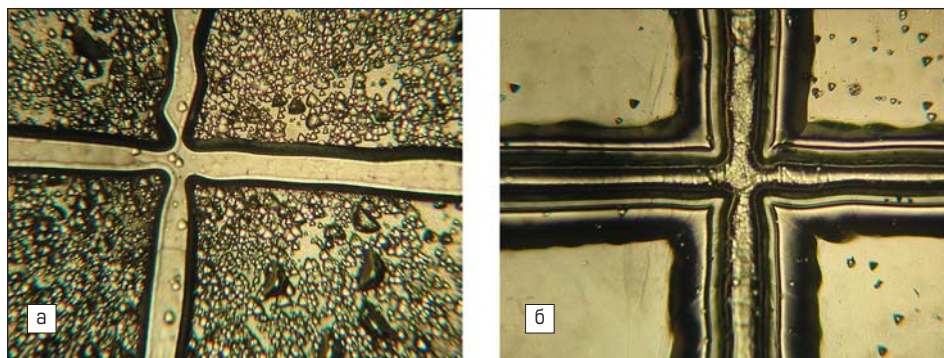


Рис. 1. Напыленные зоны в пересечении: а) без отжига; б) с отжигом 9 ч (100х)

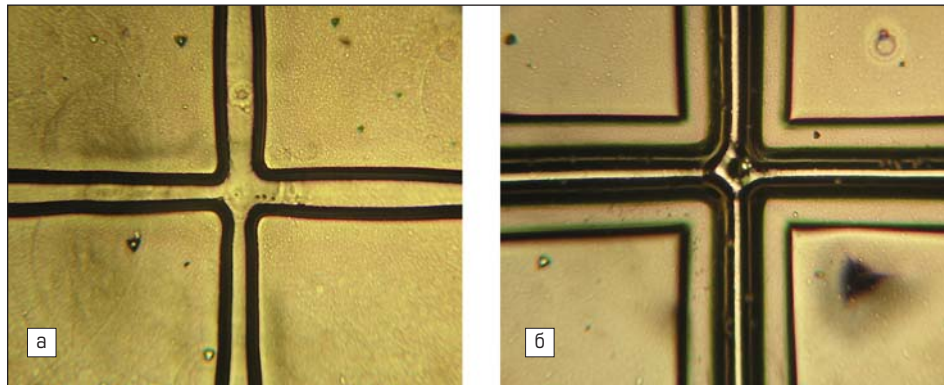


Рис. 2. След миграции пересекающихся зон, сформированных ВИС: а) после миграции; б) после 9-часового отжига (100 х)

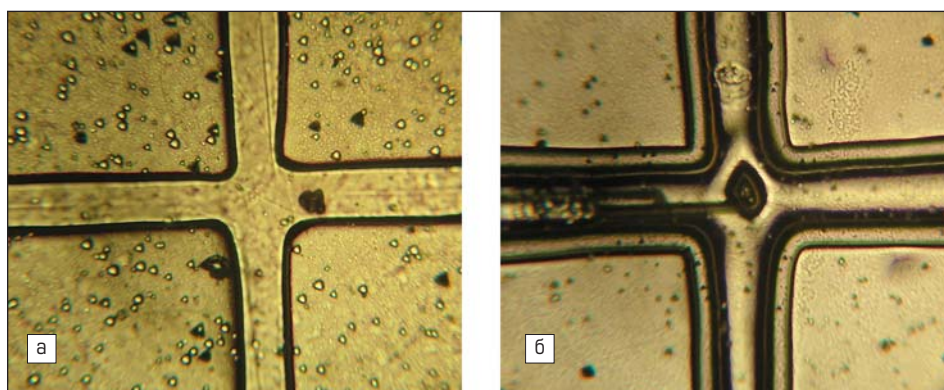


Рис. 3. След миграции пересекающихся зон, сформированных ВИС избыточной толщины: а) после миграции; б) после 9-часового отжига (100х)

чально насыщены кремнием, и там отсутствует межфазный слой окисла и загрязнений. И поскольку миграция проходит в условиях, приближенных к равновесным, запирающие свойства резких вертикальных $p-n$ -переходов РО достаточно высоки и без разгонки.

Уменьшение \bar{U}_r при отжиге 4 часа для зон, сформированных ВИС, можно объяснить тем, что во время миграции происходит перераспределение примесей не только в самой перекристаллизованной p -области, но и в прилежащем к ней исходном кремнии [8]. Мигрируя, зона уносит из близлежащей матрицы примеси, в частности кислород и фосфор. Кроме того, плотность дислокаций в РО ниже, чем в матрице, но вблизи металлургической границы областей плотность дислокаций может быть повышена. Во время отжига разгоняемый вертикальный $p-n$ -переход оказывается в области с отличными от исходных физическими свойствами. В частности, при обратном смещении область пространственного заряда в дырочном кремнии (где расчетная напряженность поля выше, чем в n -области) оказывается в более дефектной области, и это также может оказаться причиной устойчивого снижения запирающей способности вертикальных $p-n$ -переходов РО. Такой результат показывает, что длительность послемиграционной термообработки должна отличаться от критической (в нашем случае 4 часа при 1250 °С, но при иных параметрах кремния и технологического процесса возможны и иные значения температуры и времени).

Для зон с повышенной толщиной достигнут высокий выход годных на операции термомиграции, они мигрировали более стабильно и быстро, что обусловлено заведомо диффузионным режимом миграции. Трудности на стадии погружения зон, особенно в местах пересечения линий, были успешно преодолены за счет изменения режима погружения. Затеки расплава после завершения миграции на финишной поверхности пластин удалялись последующим травлением и сошлифовкой. Однако запирающие свойства таких РО оказались гораздо ниже, чем для зон оптимальной толщины. Дальнейшие исследования показали, что в РО, особенно в местах пересечений, могут находиться дефекты, нередко наличие двойников от старта до финиша зон.

В дальнейшем многократно подтверждено, что увеличение толщины и ширины зон при изготовлении чипов СПП неминуемо ведет к снижению запирающей способности чипов при обратном смещении. Поэтому увеличение ширины/толщины зон при изготовлении чипов высоковольтных СПП недопустимо.

Изготовление чипов СПП

Чипы тиристоров на ток 10 А с односторонней стеклопассивацией изготавливались по стандартному маршруту из пластин, отобранных после термомиграции из указанных партий. Толщина пластин после термомиграции была уменьшена с помощью двухсторонней шлифовки до толщины 370₋₂₀ мкм. Глубина плоских выпрямляющих $p-n$ -переходов составляла 70 мкм, а вертикальные $p-n$ -переходы РО удалились от металлургической границы на 110 мкм. Существенная конструкционная особенность чипов — это наличие закруглений в углах меза-канавки, тогда как сетка РО имела квадратную форму. Соответственно, вертикальный $p-n$ -переход РО на сторонах квадрата раскорачивался на внешней поверхности меза-канавки, а в углах раскоротка осуществлялась по плоскому $p-n$ -переходу, созданному диффузией, и имела промежуточная область.

После металлизации и замера ВАХ чипы на пластинах были испытаны на тепловизоре при обратном смещении с целью определения места первоначального пробоя. Установлено, что для пластин, где алюминиевые зоны были созданы напылением с последующей фотолитографией, отсутствует какая-либо закономерность появления и распространения области первоначального пробоя. Для пластин, где зоны формировались ВИС, место и характер распространения области первоначального пробоя мультиплицируется от структуры к структуре по вертикали и по горизонтали. Микроплазмы появлялись в промежуточной области вблизи одного из углов чипа и распространялись вдоль одной из сторон для всех годных чипов на пластине. Такой характер преимущественной локализации первичных микроплазм на пластинах с зонами, сформированными ВИС, свидетельствует об их более высокой геометрической воспроизводимости и определяется только тех-

нологическим рассовмещением на операции фотолитографии меза-канавки, а не дефектами зон, как это наблюдалось для чипов с зонами, созданными напылением.

Заключение

Результаты настоящей работы показывают, что при создании высоковольтных чипов СПП на кремниевых пластинах со шлифованной поверхностью высокотемпературное избирательное смачивание как способ формирования линейных зон имеет весомые преимущества по сравнению с напылением алюминия в канавки и последующей фотолитографией. Полученные миграцией таких зон РО имеют более высокую воспроизводимость как геометрических, так и электрофизических свойств, в том числе запирающую способность вертикальных $p-n$ -переходов, что, в конечном счете, обеспечивает более высокое качество чипов СПП. Это особенно важно для чипов на большие токи (20–250 А), которые имеют большой периметр, и для которых однородность свойств РО и воспроизводимость должны быть максимальными.

Литература

1. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Попов В. П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987.
2. Chang M., Kennedy R. J. *Electrochem. Soc.*, v.128. 1981. No 12.
3. Lischner D.G. et al. - *J. Electrochem. Soc.*, v.132. 1985. No 12.
4. Morillon B. et al. *ESSDERC*, 2002
5. Полухин А. С., Зуева Т. К., Солодовник А. И. // *Силовая электроника*. 2006. № 3.
6. Etchells R. D., Grinberg J., Nudd G. R. *Proc. SPIE*, v. 282. 1981.
7. Полухин А. С., Жукова Л. В., Балюк А. В. Кремниевые структуры для СПП со сквозными разделительными p^+ областями / В межвузов. сб. «Кристаллизация и свойства кристаллов», 1989.
8. Бучин Э. Ю., Денисенко Ю. И., Симакин С. Г. Структура термомиграционных каналов в кремнии // *Письма в ЖТФ*. 2004. Том 30. Вып. 5