

Термомиграция неориентированных линейных зон в кремниевых пластинах (100) для производства чипов силовых полупроводниковых приборов

Алексей ПОЛУХИН
polukhin_alex@mail.ru

Чипы силовых диодов прямой полярности на токи до 250 А со сквозными разделительными p^+ областями изготовлены на кремниевых пластинах n -типа проводимости с ориентацией (100). Усовершенствованная технология термомиграции обеспечивает обратное напряжение, близкое к теоретическому. Линейные зоны имели сложную топологию, предварительная ориентация зон в направлениях стабильной миграции не проводилась. Приведены основные результаты термомиграции и рассматриваются перспективы развития этого способа.

Введение

В последнее время стеклопассивированные кремниевые чипы (тиристоры, триаки, фототиристоры, диоды и т. д.) практически полностью вытеснили традиционные круглые структуры с фаской в силовых полупровод-

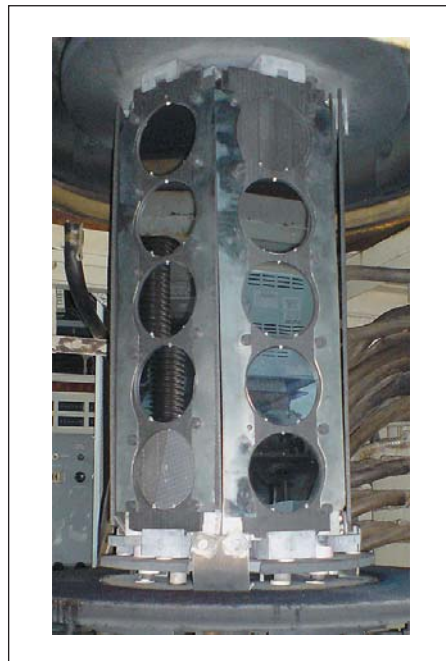


Рис. 1. Многопозиционный резистивный термический узел (30 пластин $\varnothing 76$ мм)

никовых модулях. Для чипов с нижним выпрямляющим p - n -переходом предпочтительна односторонняя пассивация, когда нижний p - n -переход пассивируется на верхней стороне чипа [1]. Это обеспечивает более эффективный теплоотвод, упрощаются процесс контроля чипов на пластине и пайка их на основание, отсутствует деградация обратной ветви ВАХ из-за механических напряжений в паяном шве и т. п.

Для вывода нижнего выпрямляющего p - n -перехода на верхнюю сторону пластины используется периферийная разделительная p -область по периметру каждого чипа. Разделительные области (РО) создают, как правило, с помощью диффузии. Основные недостатки таких РО хорошо известны: переменная концентрация акцепторной примеси по глубине пластины, потери площади из-за боковой диффузии. Квадратичная зависимость времени диффузии от требуемой глубины увеличивает время высокотемпературной обработки пластин, ухудшая электрофизические параметры кремния. Это ограничивает толщину пластин и рабочее напряжение приборов.

Термомиграция, или зонная перекристаллизация градиентом температуры [2, 3], — способ, используемый для создания РО при изготовлении чипов силовых полупроводниковых приборов. В последние годы этот способ получил широкое развитие в ряде областей: медицине, микромеханике, гелиоэнергетике, силовой электронике и технологии ИМС.

Термомиграция основана на перекристаллизации полупроводникового материала жидкой зоной раствора-расплава в поле градиента температуры. Зона оставляет за собой перекристаллизованный след, однородно легированный атомами металла-растворителя (в данном случае алюминия) до предела растворимости при температуре процесса. В практических случаях скорость миграции зон составляет десятки микрон в минуту при температуре процесса 1000...1300 °С. Время создания РО при этом сокращается до десятков минут [4–6]. Термомиграция органично сочетается с традиционными операциями полупроводникового производства: диффузией, фотолитографией, эпитаксией.

По сравнению с технологией, используемой за рубежом [4–6], процесс, организованный на предприятии ООО «Элемент-Преобразователь» [7], отличается рядом особенностей, позволяющих создавать на пластинах $\varnothing 76$ мм высоковольтные чипы размером 20×20 мм. В этом процессе зоны формируются методом высокотемпературного избирательного смачивания [7–9], а термомиграция проводится в вакуумных многопозиционных установках с резистивным нагревом (рис. 1). Изменены место термомиграции в общем маршруте изготовления чипов и топология дискретных зон, что особенно актуально для чипов большой площади.

Для термомиграции применяют пластины с ориентацией (111), поскольку ориентация линейных зон для них не нужна [2, 3].

При использовании пластин с ориентацией (100) стабильны только два взаимно перпендикулярных направления — $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$, и именно в этих направлениях должны быть ориентированы линейные зоны [2, 3]. В противном случае в процессе миграции зоны разделяются на фрагменты, ориентированные в этих направлениях, и выглядят как ломаная линия на финишной поверхности пластины. Очевидно, что для пластин с ориентацией (100) прямоугольная топология сетки ориентированных зон представлялась единственно возможной.

Интерес к пластинам с ориентацией (100) обусловлен тем, что скорость миграции зон по сравнению с ориентацией (111) почти вдвое выше. Кроме того, при изготовлении чипов на пластинах (100) величина обратного напряжения U_r для чипов, расположенных на периферийной части и в центре пластины, одинакова. Это обстоятельство становится существенным с ростом размера чипов и уровня их обратных напряжений.

Кроме технологических трудностей, связанных с ориентацией зон в направлениях $\{011\}$, недостатком является ограничение формы чипов: используется только прямоугольная. Как показывает опыт разработки высоковольтных чипов на токи 100 А и выше, перспективны прямоугольные чипы со скошенными углами [7, 10], многогранники. В связи с этим представляет особый интерес исследование возможности стабильной миграции произвольно ориентированных линейных зон в кремневых пластинах с ориентацией (100). Была успешно проведена стабильная миграция произвольно ориентированных линейных зон при миграции их в пластинах с ориентацией (100) в нестационарных тепловых условиях при модулированном ИК-нагреве [11, 12]. Такой результат можно было достичь лишь при использовании зон, сформированных с помощью высокотемпературного избирательного смачивания. Зоны же, полученные напылением в вакууме, неизбежно разделялись на фрагменты, ориентированные в направлениях $\{011\}$. Это объясняется тем, что в первом случае зоны изначально насыщены кремнием, и между зоной и кремнием отсутствует слой нативного окисла на кремнии, который зона должна растворять при погружении. А эволюция формы зоны происходит наиболее заметно именно на старте из-за необходимости насыщения зоны кремнием перед погружением, когда зона наименее стабильна.

При термомиграции в вакууме с использованием резистивного нагрева, с углекомпозитными меандрами, обладающими значительной тепловой инерцией (рис. 1), невозможно создать нестационарный режим миграции. Поэтому был осуществлен поиск условий стабильной миграции произвольно ориентированных линейных зон на расстоянии хотя бы в несколько сотен микрометров в кремнии с ориентацией (100) в стационарном поле температурного градиента.

Сравнивая данные разных источников по толщине нанесенных линейных зон, температуре миграции и величине градиента, можно сделать вывод, что расчетная толщина стабильно мигрирующих зон практически одинакова и составляет 40–55 мкм. Поэтому можно предположить, что решающую роль при обеспечении стабильной миграции линейных зон в пластинах с ориентацией (100) могут играть именно условия погружения. Анализ траекторий зон показывает, что отклонение направления миграции от нормального к поверхности особенно заметно сразу после погружения зон. Именно в это время зоны мигрируют наименее стабильно. Это обусловлено тем, что величина нормальной составляющей градиента температуры G_n на поверхности пластин гораздо меньше, чем в объеме [13, 14]. Желательно, чтобы погружение зон в объем начиналось при как можно более высокой температуре, когда влияние анизотропии на скорость растворения минимально. Речь идет о температурах выше 1100 °С, при этом значении скорость испарения алюминия в вакууме становится заметной. Необходимо, таким образом, исследовать возможность оптимизации размеров зон и режимов погружения их в этих условиях. Надо отметить, что постановка такой задачи для газонаполненных градиентных установок не имеет смысла, так как величина G_n там в несколько раз выше, и погружение зон начинается при более низких температурах, когда сильно влияние анизотропии.

Стабильная миграция на пластинах кремния с ориентацией (100) была достигнута для единого ансамбля линейных зон [7]. Зоны на стартовой поверхности пластин формировались методом высокотемпературного избирательного смачивания. Чипы имели форму квадрата, восьмигранника или круга. В последнем случае зоны в форме окружностей объединялись друг с другом в систему соединительными линейными зонами.

Ширина линейных зон составила 80 ± 2 мкм, глубина не превышала 15–18 мкм при исходном содержании кремния в зоне не менее 22%. При термомиграции температура погружения зон составила 1130 °С, а после достижения ее максимального значения (1180 °С) первые 15 минут процесс шел с постоянной температурой, после чего проводилось снижение температуры процесса до 1130 °С со скоростью 0,5 °С/мин. Стабильно мигрировали зоны всех указанных топологий на пластинах толщиной до 520 мкм. Кристаллическое совершенство проверялось травлением образцов после термомиграции в травителе Дэша. Как на стартовой, так и на финишной стороне избыточной плотности дефектов не обнаружено. В случае разрывов зон несвязанные края их в процессе миграции искривлялись в предсказанных теорией направлениях $\{011\}$, и это сопровождалось появлением дислокаций в местах искривлений. Также не удалось

добиться стабильной миграции неориентированных зон, полученных с помощью напыления алюминия в канавки с последующей фотолитографией даже при толщине зон 20 мкм.

Изготовление чипов диодов прямой полярности

Для изготовления диодов прямой полярности на ток 20 А и напряжение 1600 В использовался кремний БЗП с удельным сопротивлением 37–39 Ом·см и ориентацией (100). Пластины имели шлифованную поверхность, и толщина их составляла 290_{-20} мкм.

Плоские выпрямляющие $p-n$ -переходы создавались в два этапа. До термомиграции проводилась одновременная диффузия алюминия и бора с одной и фосфора — с другой стороны пластины на определенную глубину, а после термомиграции — дополнительная диффузия, с доведением глубины $p-n$ -перехода до расчетной (в нашем случае — 80 мкм). После термомиграции и второй стадии диффузии пластины окислялись, на них проводилась фотолитография и травление мезоканавки. Пассивировали $p-n$ -переход с помощью свинцово-алюмосиликатного стекла. Затем после вскрытия контактов и металлизации поэлементно контролировалось значение обратного напряжения U_r при токе утечки не более 20 мкА. Для каждой пластины и для всей партии в целом значение U_r измеряли отдельно для чипов, находящихся в центре пластины, и для чипов, расположенных на периферии. Среднее значение \bar{U}_r для чипов, находящихся в центральной части, составило 1685,6 В, для периферийных чипов \bar{U}_r было равно 1746,9 В. Распределение U_r для чипов партии приведено на гистограмме (рис. 2) отдельно для периферийной и центральной части пластин.

Выход годных чипов от запуска составил 87,9%, при этом количество чипов низких классов, как видно на рис. 2, мало. Полученный результат показывает высокие возможности процесса термомиграции для создания РО с высокой запирающей способностью и воспроизводимостью на кремнии с ориентацией (100).

Следует отметить возможность получения высоковольтных чипов на периферии пластин. Результат неожиданный и, в принципе, недостижимый для пластин с ориентацией (111), что неоднократно подтверждала практика производства чипов разных размеров. Еще более интересен тот факт, что не обнаружено связи между ухудшением U_r и отклонением траектории зон от нормали к поверхности пластин. Эти два явления в случае использования пластин (100) оказались не связаны между собой, хотя хорошо известно, что отклонение траектории мигрирующей зоны от нормальной к поверхности пластины ведет к снижению запирающих свойств $p-n$ -перехода РО [2]. Возможно, на величину U_r большее влияние оказала глубина мезоканавки,

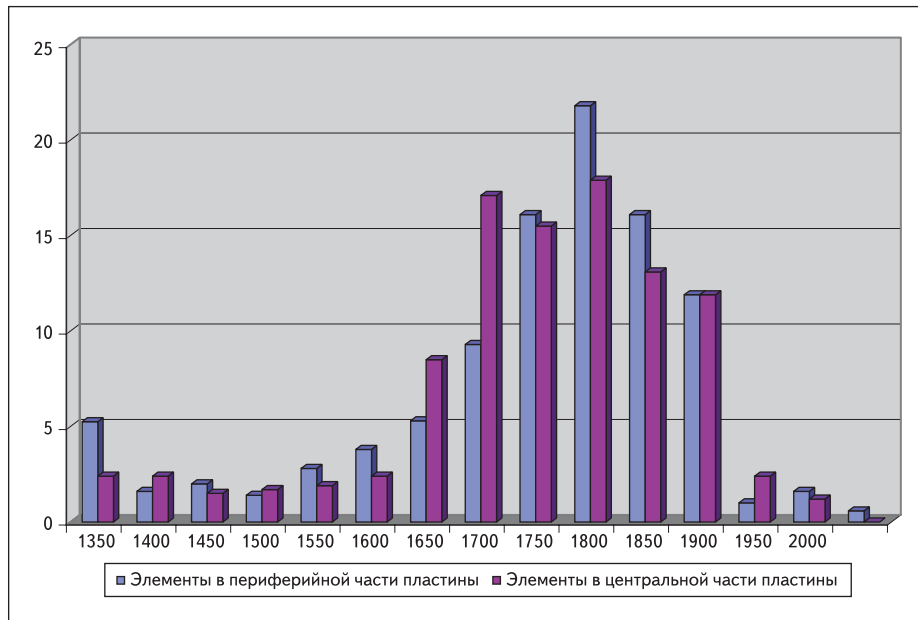


Рис. 2. Гистограмма распределения U_f для чипов диодов прямой полярности в центральной части пластин и на их периферии. Ориентация кремния (100)

которая вскрывает $p-n$ -переход РО. Разброс глубины мезы по партии действительно имеет место, кроме того, на периферии пластины, как правило, меза глубже, чем в ее центре. Это отчасти позволяет объяснить полученный результат. Но все сказанное справедливо и для пластин с ориентацией (111). А для них такой результат не получался никогда при разных глубинах меза-канавки и разном профилировании вертикального $p-n$ -перехода РО.

Изготовление диодов на ток 100–200 А

Для модулей на токи 80–100 А и 160–200 А созданы диодные чипы размером 14×14 мм и 20×20 мм соответственно. Для изготовления этих чипов использовались пластины кремния КЭФ-20/7,5 диаметром 76 мм, толщиной 0,3–0,02 мм со шлифованной поверх-

ностью и ориентацией (100). Чипы имели форму квадрата со скошенными углами, топология РО на пластине представляла собой единый ансамбль сдвоенных зон [10]. Ориентация зон относительно кристаллографических направлений не проводилась, пластины не имели базовых срезов. Маршрут изготовления диодных чипов аналогичен описанному ранее [15]. Перед термомиграцией проводилась диффузия акцепторной и донорной примеси с разных сторон пластин, и глубина плоского $p-n$ -перехода на этой стадии составляла 70 мкм. Финишная сторона пластин после термомиграции показана на рис. 3.

После термомиграции и второй диффузии глубина плоского $p-n$ -перехода составила 95 мкм, а ширина РО после миграции и разгонки сдвоенных зон составила 460–470 мкм. Меза-канавка, на внешней стороне которой вскрывался вертикальный $p-n$ -переход РО, имела глубину 100–110 мкм и пассивирова-



Рис. 3. Финишная сторона пластин (100) после термомиграции. Сколы на краях пластин позволяют судить об ориентации зон относительно направлений {011}

лась стеклом. Вольт-амперные характеристики чипов в центральной части пластин и на периферии имели значения U_f от 950 до 1130 В, что соответствует удельному сопротивлению исходного кремния. Следует отметить, что величина \bar{U}_f у чипов, находящихся в центральной части пластины, на 6–6,5% меньше, чем у чипов, расположенных на периферии пластины.

Чипы были использованы для модулей МДД8/3. Из-за невысокого времени жизни не основных носителей заряда τ_i в исходном кремнии в полученных диодах величина τ_i не превышала 10 мкс. При токе 200 А падение напряжения в открытом состоянии на диодах модуля составляло $1,29 \pm 0,03$ В, что соответствует ТУ. Принимая во внимание невысокое значение τ_i исходного кремния, это вполне удовлетворительный результат.

На пластинах кремния с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 70 Ом·см были изготовлены диоды прямой полярности круглой формы $\varnothing 24$ мм. Топология ансамбля линейных зон (рис. 4) соответствовала рекомендациям, изложенным в [7]. Значение U_f превышало 2,2 кВ.

Заключение

Таким образом, показано, что стабильная термомиграция линейных зон сложной формы на пластинах кремния ограниченной толщины с ориентацией (100) в стационарном режиме возможна. Необходимые условия — топология ансамбля линейных зон, способ формирования зон, изначально насыщенных кремнием, а также температурно-временной регламент погружения и миграции. Процесс позволяет изготавливать чипы с высоким значением U_f , которое сохраняется и на периферии пластин. Пластины этой ориентации перспективны при производстве чипов приборов высоких токовоминимумов, которые имеют большой периметр и сложную форму РО и для которых необходима высокая однородность свойств вертикальных p^+ -областей независимо от их ориентации.

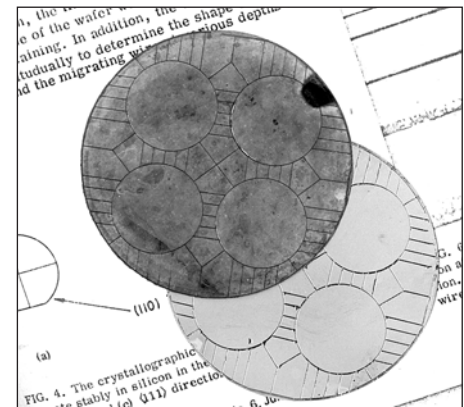


Рис. 4. Финишная поверхность пластин кремния (100) на фоне: после миграции (дальняя) и после окрашивания (ближняя) на фоне статьи [3]

Литература

1. Blunt P. Electronic Components and Applications. 1979. V. 2, No 1.
2. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Попов В. П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987.
3. Cline H. E., Anthony T. R. Thermomigration of aluminium-rich liquid wires through silicon // J. Appl. Phys. 1976. V. 47, No 6.
4. Chang M., Kennedy R. The application of temperature gradient zone melting to silicon wafer processing // J. Electrochem. Soc. 1981. V. 128. No 10.
5. Lischner D.G. et al. Observation of the TGZM process for isolating small devices // J. Electrochem. Soc. 1985. V. 132. No 12.
6. Morillon B. et al. ESSDERC 2002.
7. Полухин А. С., Зуева Т. К., Солодовник А. И. Использование термомиграции в технологии структур силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. 2006. № 3.
8. Майстренко В.Г. Исследование кристаллизационных процессов при погружении жидких включений в условиях интенсивного испарения // Межвуз. сб. «Кристаллизация и свойства кристаллов», 1985.
9. Полухин А. С., Жукова Л. В., Балюк А. В. Кремниевые структуры для СПП со сквозными разделительными p^+ -областями // Межвуз. сб. «Кристаллизация и свойства кристаллов», 1989.
10. Патент Украины № 2748.
11. Полухин А. С. и др. Применение некогерентного излучения для термомиграции дискретных зон // Тез. докл. «Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве». Миасс, 1989.
12. Авт. свид. СССР № 1665833.
13. Малибашева Л. Я., Малибашев В. А. Влияние теплообмена на стабильность роста эпитаксиальных слоев из дискретных зон расплава // Межвуз. сб. «Кристаллизация и свойства кристаллов», 1989.
14. Aaron D. B., Thomas R. E. Calculation of temperature profiles in radiantly heated and cooled silicon wafers // J. Appl. Phys. 1983. V. 54, No 6.
15. Патент Украины № 67122 А.