
МЕТАЛЛУРГИЯ. МЕТАЛЛООБРАБОТКА. МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.921:621.9

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПРИ РЕЗКЕ СЛИТКОВ НА ПЛАСТИНЫ

Докт. техн. наук, проф. ШЕЛЕГ В. К., КОРЗУН А. Е., КРАЙКО С. Э.

Белорусский национальный технический университет

В связи с развитием микроэлектроники в последнем десятилетии, увеличением в сотни раз уровня производства и потребления полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных схем (ИС) наблюдаются тенденции устойчивого роста производства кремниевых подложек, а именно:

- выход на новый уровень в области качества пластин с субмикронным уровнем топологии-

ческой нормы, что наряду с повышением требований к кремниевым пластинам по структурным, электрофизическим параметрам, микрошероховатости и чистоте поверхности ужесточает требования к их геометрическому совершенству – локальному отклонению от плоскостности, разнотолщинности, короблению и прогибу поверхности пластины;

- увеличение фактической площади пластин, количества физических и годных кристаллов и, как следствие, диаметра промышленно изготавливаемых монокристаллических слитков (до диаметра 400 мм к 2010 г.);

- рост стоимости исходных слитков в условиях увеличения промышленно изготавливаемых диаметров и растущего спроса на кремний;

- расширение гаммы используемых материалов;

- повышение степени автоматизации технологического оборудования и переход к автоматизированным производствам.

С учетом того, что размерный ряд отечественной технологии изготовления пластин крем-

ния не обновлялся с середины 1980-х гг. [1], реализация новых тенденций требует совершенствования технологии изготовления пластин и, в частности, технологических способов резки слитков: эффективность данного процесса как процесса прецизионного механического во многом определяет экономические показатели производства в целом.

Операция резки слитков на пластины – начальная стадия технологического процесса производства ПП и ИС. Условия проведения этой операции определяют последующее качество полупроводниковых пластин, которое непосредственно влияет на процент выхода годных пластин и выходные характеристики ПП и ИС.

В последние 40 лет [2] технология резки монокристаллов на пластины базировалась на резке алмазными отрезными кругами с внутренней режущей кромкой (АКВР), что обусловлено использованием исходных слитков кремния диаметром до 150 мм, наличием широкого размерного ряда технологического оборудования для последующей обработки и отработанной технологии изготовления. В связи с новыми требованиями, предъявляемыми к экономической целесообразности изготовления пластин, необходимо вместе с увеличением диаметра слитка снижать расход кремния.

Используя технологию резки АКВР, проблему экономии кремния предположительно можно решить двумя путями. Первый – уменьшить припуски на отдельных этапах технологического процесса. Так как на финишных

операциях припуски минимальны, наиболее целесообразным представляется снижение припусков на операции разделения слитка на пластины. Предварительный анализ технологического процесса резки АКВР позволил сделать вывод о том, что рассматриваемый процесс является сложной системой, зависящей от большого числа контролируемых и неконтролируемых параметров, и уменьшение припуска на обработку с одновременным получением соответствующего качества пластин сложно реализовать. Второй путь – уменьшить ширину пропила без уменьшения припусков на обработку. Однако резка АКВР имеет конструкционные ограничения кругов по ширине пропила (толщине круга) и диаметру разрезаемого слитка. Выход из данной ситуации видится в замене резки АКВР многопроволочной резкой.

В статье приведены результаты сравнительных испытаний двух технологических процессов резки слитков монокристаллического кремния: резки алмазными отрезными кругами с внутренней режущей кромкой и многопроволочной резки. Для характеристики качества пластин и экономии кремния при применении многопроволочной резки были выбраны следующие показатели: процент выхода годных пластин и фактический расход кремния на одну пластину.

Дисковая резка АКВР и многопроволочная резка производились согласно действующим техническим условиям (ТУ) предприятия. Затем результаты двух технологических процессов сравнивались.

В настоящее время за базовый процесс изготовления пластин диаметром до 150 мм резкой АКВР принимается следующая последовательность операций: приготовление мастики; промывка в моющем растворе слитка; приклеивание; калибровка; отклеивание; приготовление щелочных растворов; подтравливание; определение расположения световой фигуры травления; ориентированное маркирование слитка; определение положения базового и маркировочного срезов; проведение рентгенооптической юстировки и ориентация слитка кремния; алмазно-отрезная операция; промывка в щелочи пластин; визуальный контроль и определение угла разориентации пластин; профилеполировальная операция снятия фаски; техни-

ческий контроль – разбраковка по внешнему виду; разбраковка по геометрическим параметрам – контроль формы заданного профиля; прямолинейности и др.; травление; сушка центрифугированием; упаковывание пластин – в бумагу, в ящик.

Последовательность процесса многопроволочной резки по набору технологических операции мало отличается от резки АКВР, изменения касаются только алмазно-отрезной операции и операции предварительной и окончательной ориентации слитка [3, 4].

Исследование двух технологических процессов было проведено на: станке «Алмаз-6М» для резки с алмазным кругом марки АКВР 422×136×0,36; станке для многострунной резки Takatori (Япония); установке рентгеновского дифрактометра «УОМ-1»; а также вспомогательном оборудовании для приготовления слитков к резке и промывке пластин.

В качестве образцов использовались слитки монокристаллического кремния марки КДФ-4,5, предварительно откалиброванные до диаметра 150,8–151,0 мм. Предварительная ориентация слитка для дисковой резки производилась по стандартной схеме на установке «УОМ-1» по первой отрезанной горбушке с дальнейшей поправкой ориентации плоскости среза относительно кристаллографических осей слитка. Предварительная ориентация при подготовке к проволочной резке производилась на той же установке, но по более сложной схеме, с вычислением суммирующего вектора отклонений с последующим внесением поправки при базировании слитка на станке и с учетом требований оборудования Takatori. При втором способе разделения слитка на пластины точное численное значение угла разориентации поверхности пластин определяется только после окончания процесса резки и промывки пластин.

Для проведения процессов резки были выбраны следующие режимы обработки. Для станка «Алмаз-6М» в автоматическом цикле: частота вращения шпинделя – 4000 об/мин; рабочая подача – 35 мм/мин; расход смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) – 6–8 л/мин как на охлаждение, так и на очистку кромки. В качестве СОЖ использовалась деионизированная

вода. Для станка Takatori режимы обработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы обработки при многопроволочной резке

Параметр	Величина
Скорость подачи проволоки, м/мин	19–24
Частота вращения шпинделя, об/мин	810
Угол поворота шпиндельной бабки, град	2,5
Толщина пластин, мкм	640 ± 20
Диаметр струны, мм	0,15
Барабан с шагом резки, мкм	815
	840
Длина слитка, мм	167
Диаметр слитка, мм	100,4

В качестве СОЖ при многопроволочной резке использовалось масло (SILCUT S-LV), карбид кремния (F-600) ORKLA EXOLON (Норвегия) с плотностью суспензии в начале резки 1,466 г/см³ и в конце резки – 1,474 г/см³.

При многопроволочной резке толщина резанных пластин зависит от параметров барабана, плотности суспензии и диаметра струны. В исследованиях использовался барабан с шагом резки 840 мкм. Пропил при обработке равен 0,21 мм и состоял из суммы толщин струны 0,15 мм, допуска на биение и толщину зерна СОЖ 0,05 и 0,01 мм соответственно.

После разрезания на пластины слиток снимали со станка и помещали в ванну с горячей водой для отклеивания пластин от прокладки. Отклеенные пластины подвергались отмывке

в две стадии. На первой стадии – замачивание в горячей воде (80–90 °С) с добавлением моющих средств в течение 10 мин. На второй стадии – ручная отмывка на пенополиуретане обеих сторон пластин и промывка в ванне с деионизированной водой.

Снятие фаски после проволочной резки осуществлялось на профильно-копировальном станке модели SVG8614-G профильным кругом фирмы SMI 21-R-20.

После распила, очистки и сушки пластин производились их технический контроль и выбраковка по геометрическим параметрам. В связи с тем, что резка и контроль качества пластин проходили согласно ТУ предприятия, а одним из параметров оценки эффективности процессов является процент выхода годных пластин, оценивались все виды дефектов, приводящие к отбраковке пластины, а именно: трещины, сколы, занижение, завышение, прогиб, клин и следы резки. Для оценки выхода годных пластин контролю подверглись 165 пластин после дисковой резки и 189 пластин – после многопроволочной резки.

На первом этапе производился укрупненный контроль для выявления значительных отклонений от технических требований на резаную пластину.

Сколы и завышения отсутствовали при обоих видах резки. Сравнительные результаты контроля по остальным видам брака приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты контроля пластин по остальным видам брака, шт.

Операция	Поступило	Годные	Брак	Вид брака					Выходной % годных
				Трещины	Занижение	Прогиб	Клин	Следы резки	
Дисковая резка									
Резка	165	165	–	–	–	–	–	–	100
Снятие фаски	165	165	–	–	–	–	–	–	100
Травление	165	165	–	–	–	–	–	–	100
Контроль	165	158	7	–	2	3	–	2	95,8
Итого	165	158	7	–	2	3	–	2	95,8
Многострунная резка									
Резка	189	189	–	–	–	–	–	–	100
Снятие фаски	189	182	7	–	–	–	–	–	96,3
Травление	182	181	1	1	–	–	–	–	99,5
Контроль	181	164	17	–	–	–	17	–	90,6

Итого	189	164	25	–	–	–	17	–	86,8
-------	-----	-----	----	---	---	---	----	---	------

Как видно из табл. 2, процент выхода годных пластин выше при резке кругами АКВР. Это во многом связано с тем, что процесс резки кругом АКВР является технологически отработанным. Если не учитывать бой пластин (7 шт.) на операции снятия фаски, то процент выхода годных пластин на многопроволочной резке повышается до 90,5 %. С учетом исправимого брака (11 пластин) процент выхода годных пластин увеличивается до 96,3 %, что с учетом неотработанности технологического процесса многопроволочной резки по режимам резания в условиях опытного производства уже превосходит процент выхода годных пластин на резке кругами. Кроме этого, за счет групповой технологии вместе со значительным повышением производительности обеспечивается уменьшение ширины пропила, количество нарезанных пластин из одного монокристалла в случае использования многострунной резки больше на 24 шт., что в условиях массового производства данного технологического процесса позволит перекрывать увеличение брака по сравнению с резкой кругами АКВР.

При выходе на субмикронный уровень топологии поверхности пластины ужесточаются требования к геометрическому совершенству. В связи с этим некоторые параметры качества пластин, такие как клин, прогиб и шероховатость, требуют повышенного внимания. Более детальные исследования, проведенные в лабораторных условиях, показали, что распределение прогиба в пределах от 0 до 30 мкм наблюдалась у 97,6 % пластин, изготовленных резкой АКВР, и 95,6 % пластин – проволочной резкой. Наличие клина в пределах от 0 до 10 мкм присутствует в обоих видах обработки в пределах 84,2 % годных пластин, однако для пластин, полученных многопроволочной резкой, характерно присутствие распределения клина в сторону верхнего предела от 25,1 до 40 мкм на 9,4 % пластин. Шероховатость поверхности оценивалась по 10 пластинам и составляла 0,48–0,59 и 0,64–0,82 мкм для резки АКВР и многопроволочной резки соответственно. Для такой же величины выборки оценивались оста-

точные напряжения – в обоих случаях они отсутствовали.

Другим параметром, который оценивался, являлась эффективность экономии кремния. Для возможности сравнения резки алмазными отрезными кругами с внутренней режущей кромкой и многопроволочной резки введено понятие физической пластины, которое подразумевает количество поверхности монокристаллического кремния, годной для последующей механической обработки, пересчитанное на поверхностный размер пластин. Количество физических пластин в расчетах может быть дробным числом. На первом этапе оценивались норма расхода и стоимость изготовления одной физической пластины без учета исходной стоимости монокристаллического кремния. Результаты данных расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Нормы расхода кремния и стоимость пластины

Параметр	Многопроволочная резка	Резка АКВР
Физическая норма расхода на одну пластину, г	16,17	20,0
Планируемая годная норма расхода кремния на одну пластину, г (%) выхода годных	16,76 (96,5)	20,92 (95,6)
Фактическая норма расхода кремния на одну пластину по весу, г	18,6 (вес 3050: годные 164 шт.)	20,87 (вес 3300: годные 158 шт.)
Годная норма расхода кремния на одну пластину, г (%) выхода годных	18,63 (86,8)	20,9 (95,7)
Расчетная норма расхода количества пластин на 1 кг кремния, шт.	61,2	47,8
Цена за 1 шт., у. е, без учета стоимости кремния	1,24	0,32

Как видно из табл. 3, стоимость одной пластины при многопроволочной резке выше, чем при резке АКВР. Это во многом объясняется тем, что резка АКВР производилась в условиях промышленного производства, а многопроволочная резка – в условиях опытного производства с учетом расходов на приобретение сторонних, в основном импортных, материалов и увеличения трудоемкости изготовления.

Для более полного сравнения двух методов резки на втором этапе производился экономический анализ изготовления с учетом различной (в зависимости от производителя и поставщика) стоимости кремния и большего, условно принятого, количества пластин – 1000 физических пластин. Расчет позволил установить, что на 1 кг монокристаллического кремния количество физических пластин составляет: для резки АКВР – 50,0, а для многострунной резки – 61,8, выход же годных пластин – соответственно 48 и 58 шт. Для изготовления 1000 физических пластин необходимая потребность кремния составляет: для резки АКВР – 20,0 кг, а для многострунной резки – 16,18 кг, для выхода 1000 годных пластин необходимая потребность кремния – соответственно 20,83 и 17,24 кг.

Результаты расчета экономического эффекта в зависимости от фиксированной стоимости кремния и затрат на обработку пластин не только на операции разделения на пластины, но и всего технологического процесса в целом приведены в табл. 4.

Как видно, экономический эффект от использования многострунной резки достаточно существенный. Однако в промышленных условиях стоимость монокристаллического кремния не является фиксированной величиной и может

изменяться в зависимости от поставщика в пределах одного обрабатываемого диаметра и естественно растет с увеличением диаметра монокристалла.

Таблица 4

Расчет экономического эффекта (расчет на 1000 физических пластин)

Параметр	Резка АКВР	Многопроволочная резка
Сумма затрат на закупку кремния, у. е.	2558	2117
Экономический эффект, у. е.	441	
Сумма затрат на операции резки, у. е.	64,87	361,13
Сумма затрат на обработку пластин, у. е.	2622,87	2478,13
Экономический эффект, у. е.	144,74	
Суммарный экономический эффект, у. е.	585,74	

Кроме удорожания кремния в пределах одного номинала следует учитывать увеличение стоимости кремния в зависимости от диаметра. Результаты исследований, проведенных в этом направлении для кремния Ø150 мм, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнительный экономический анализ изготовления 1000 резаных пластин Ø150 мм

Параметр	Резка АКВР	Многопроволочная резка
Выход годных резаных пластин из 1 кг	15 шт.	21 шт.
Кремний: 145 у. е., эффект: + 2185 у. е., удешевление одной годной пластины на 2,18 у. е.		
Кремний, у. е.	9603	6808
Обработка, у. е.	1370	1980
Итого, у. е.	10973	8788
Цена одной резаной пластины	10,97	8,79
Кремний: 175 у. е., эффект: + 2764 у. е., удешевление одной годной пластины на 2,76 у. е.		
Кремний, у. е.	11590	8216
Обработка, у. е.	1370	1980
Итого, у. е.	12960	10196
Цена одной резаной пластины	12,96	10,2
Кремний: 200 у. е., эффект: + 3246 у. е., удешевление одной годной пластины на 3,2 у. е.		
Кремний, у. е.	13246	9390
Обработка, у. е.	1370	1980

Итого, у. е.	14616	11370
Цена одной резаной пластины	14,6	11,4

ВЫВОДЫ

По геометрическим параметрам и качеству поверхности (характеристикам шероховатости) пластины, получаемые методом многопроволочной резки (выход годных пластин – 96,3 %), не уступают пластинам, изготавливаемым методом дисковой резки (выход годных пластин 95,8 %), а также за счет небольшой глубины дефектных слоев возможно снижать припуски на обработку на технологическом этапе резки; многопроволочная резка обеспечивает существенную экономию монокристаллического кремния в сравнении с дисковой резкой (в исследованиях до 2,27 кг на 1000 пластин) за счет уменьшения величины пропила (с 0,3 мм при резке кругом АКВР до 0,21 мм при струнной резке), а также существенное снижение стоимости единичной пластины при одновременном увеличении диаметра получаемого изделия. Кроме этого, как положительный факт следует учитывать, что разница в фактическом расходе кремния на одну пластину могла быть значительно выше при использовании барабанов с шагом резки 815 мкм, а также многопроволочная резка облегчает решение проблемы резки слитков большого диаметра.

Однако следует отметить, что существенным недостатком многопроволочной резки по

сравнению с резкой АКВР является бой слитка – в случае разрыва струны теряется весь слиток. Это приводит к заключению, что данный метод обеспечивает существенную экономию монокристаллического кремния по сравнению с дисковой резкой только в том случае, когда процесс резки применяется в массовом производстве и оптимизирован по режимам обработки. В период подбора режимов обработки бой монокристаллов кремния неизбежен. Повышение эффективности процесса алмазной резки является комплексной проблемой, положительный результат может быть достигнут только при использовании комплекса предложенных средств и методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Особенности** обработки пластин кремния большого диаметра / С. В. Петров [и др.] // Электронная промышленность. – 2003. – № 3. – С. 24–32.
2. **Повышение** эффективности резки слитков монокристаллов на пластины / Н. А. Большаков [и др.] // Электронная промышленность. – 2003. – № 3. – С. 139–146.
3. **Готра, З. Ю.** Технология микроразборных устройств: справ. / З. Ю. Готра. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
4. **Запорожский, В. П.** Обработка полупроводниковых материалов / В. П. Запорожский, Б. А. Лапшинов. – М.: Высш. шк., 1988. – 184 с.

Поступила 05.05.2008

УДК 621.762, 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ДИФФУЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНОЙ И ЧУГУННОЙ ДРОБИ

Инж. ПАНТЕЛЕЕНКО Е. Ф.

Белорусский национальный технический университет