

УДК 621.382.2

Исследование процесса формообразования при пескоструйной обработке пакетированных кремниевых подложек

**Жуков В. В.¹, Горничев А. А.¹,
Степанов С. А.^{1,*}**

* y-stepan@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Материал статьи продолжает освещать тему изучения процесса формообразования при струйно-абразивной обработке маскированных неметаллических материалов. В ней показаны результаты исследования зависимости глубины резания пакета кремниевых пластин, соединенных пайкой, от размеров поверхности, подвергаемой пескоструйной обработке. Показано, что глубина обработанной поверхности пакета зависит от размеров маски-трафарета и имеет форму клина в сечении. Результат обработки пакета кремниевых пластин через маску-трафарет с различным зазором между маскирующими элементами позволил выявить оптимальное соотношение зазора между элементами трафарета и глубиной резания. Выявлены две стадии процесса формообразования дисков-кристаллов, последняя из которых минимизирует разницу размеров верхнего и нижнего оснований диска-кристалла.

Ключевые слова: СВЧ-диод, кремниевая пластина, диск-кристалл, пескоструйная резка, абразивный материал, маскирующее покрытие

Введение

Основу современного полупроводникового диода [1,2], выполненного по классической схеме, составляет электронный компонент – кремниевый диск-кристалл со сформированным на нем р-п переходом. Диск имеет круглую (наиболее часто используемый вариант) или шестигранную форму и изготавливается из кремниевой подложки путем ее разделения на отдельные элементы методами групповой обработки. Одним из таких методов является струйно-абразивная резка. Метод признан эффективным фирмами-изготовителями электронных компонентов и используется для изготовления полупроводниковых компонентов для СВЧ-диодов ТВ серии и ряда других.

Поэтому при участии специалистов кафедры МТ-11 МГТУ им. Н.Э. Баумана на предприятии отрасли была освоена технология и создано опытно-промышленное оборудование для разделения полупроводниковых подложек на диски-кристаллы диаметром от 1,5 мм до 3,2 мм методом пескоструйной резки [3].

На рис. 1, а – г показан поэтапно процесс резки подложки на действующей установке.

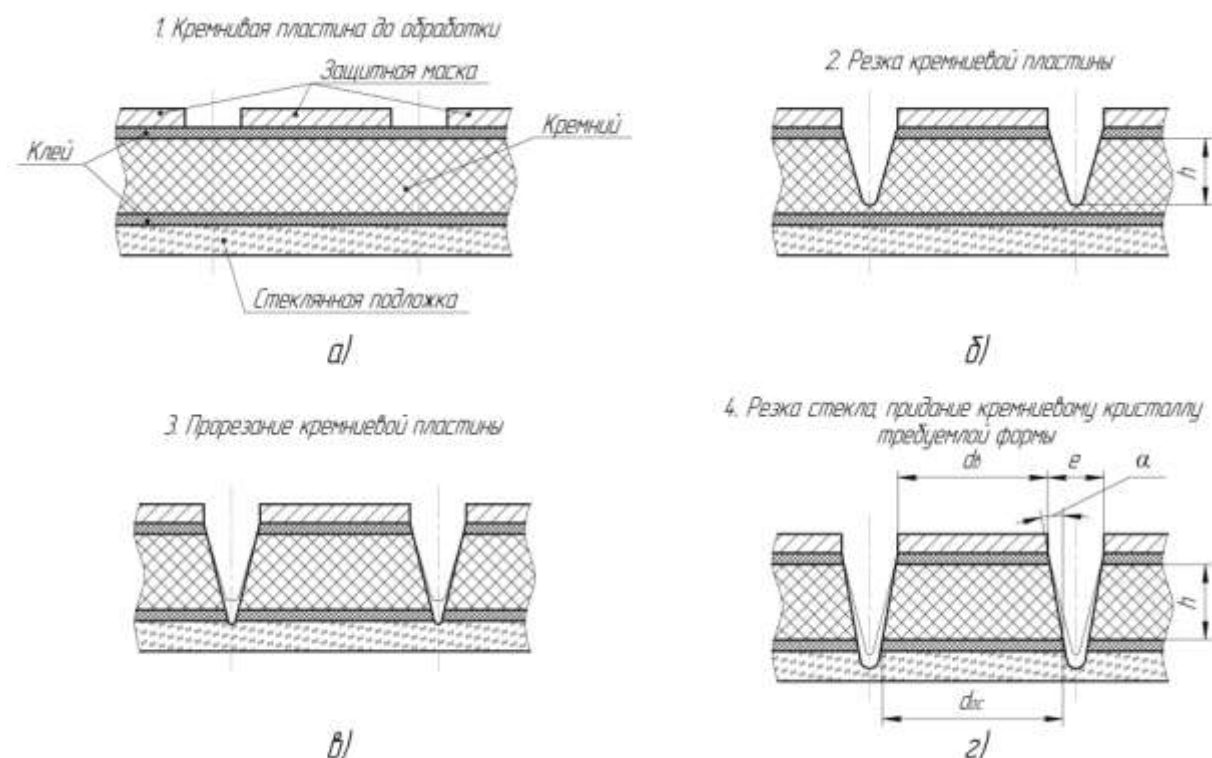


Рис. 1 Стадии разделения маскированной кремниевой пластины на диски-кристаллы при пескоструйной резке h – глубина прорезанного слоя кремния, e – ширина зазора между маскирующими элементами, $dв$ – верхний диаметр диска-кристалла, $dос$ – диаметр основания диска-кристалла

Разделяемую кремниевую пластину одной стороной наклеивают на стеклянную подложку. На другую сторону полупроводниковой пластины наносится маскирующее покрытие [4,5], состоящее из металлических дисков соответствующего диаметра, расположенных в шахматном порядке, что обеспечивает наибольшее число элементов на пластине (рис. 1а). После чего пластины загружаются в кассеты и обрабатываются струей сжатого воздуха с абразивным материалом. В процессе разделения кремний с незащищенных участков удаляются, и в результате на стеклянной подложке остаются кремниевые диски-кристаллы с наклеенными сверху защитными металлическими дисками (рис. 2).



Рис. 2 Результат разделения кремниевой пластины на диски кристаллы методом пескоструйной резки

Разделение пластины происходит в два, приблизительно равных по времени этапа. В первом насквозь прорезается слой незащищенного кремния (рис. 1б). Таким образом кремниевая пластина оказывается разделенной на отдельные диски-кристаллы, закрепленные на стеклянной подложке и прикрытые маскирующими дисками (рис. 1в). Такой диск-кристалл имеет форму усеченного конуса с углом при вершине $55^\circ \dots 45^\circ$.

При формообразовании диска-кристалла сведение к минимуму конусности боковой поверхности весьма актуально и достигается во время второго этапа разделения. Продолжается обработка стеклянной подложки вглубь, с одновременным подрезанием боковых кромок диска-кристалла. После обработки диск-кристалл имеет форму усеченного конуса (рис. 1г). Угол при вершине уменьшается до 24° . Верхний диаметр d_v повторяет диаметр маскирующего металлического диска. Нижний диаметр d_{oc} получен в процессе разделения и влияет на значение угла наклона боковой поверхности кристалла α .

Обработка пластины в ее заключительной стадии (рис. 2, в, г) по времени составляет не менее 50% от длительности всего процесса резки и производится, фактически, уже по разделенной на диски пластине, что дает минимально возможный угол конусности за счет “подрезания” боковых граней диска-кристалла.

Эффект “подрезания” боковых граней диска-кристалла достигается при выполнении ограничения, выявленного при подборе режимов резания для действующей установки, а именно, минимизации расстояния между защитными дисками маскирующего трафарета, исходя из условий сопряжения вершины «клина» с плоскостью клеевого соединения кремния со стеклом (рис. 2, в) и приближения значений угла 2α «клина» к минимальному при необходимой (заданной) глубине резки.

Технология успешно применяется для изготовления дисков-кристаллов из кремниевых пластин толщиной 250...300 мкм.

В настоящее время, в связи с нестабильной ситуацией в мире и взятым курсом промышленности на импортозамещение, остро стоит вопрос обеспечения промышленности, в особенности оборонной, современными полупроводниковыми приборами и элементами. В настоящее время на одном из предприятий отрасли разработана серия диодов, не уступающих лучшим зарубежным образцам. Главным элементом диода является кремниевый диск-кристалл, получаемый путем группового разделения пакетированной кремниевой пластины, состоящей из нескольких тонких пластин, суммарная толщина которой варьируется от 550 до 1000 микрометров. Разделение пакетированных пластин струйно-абразивным методом невозможно без исследования влияния зазора между элементами маскирующего покрытия на глубину резания пакета кремниевых пластин, что и рассмотрено в данной статье.

Постановка задачи

В настоящее время актуально повышение параметров полупроводниковых диодов за счет применения дисков-кристаллов, получаемых из пакетированных кремниевых подложек суммарной толщиной до 1000 мкм. Эти пластины так же предполагается разделять методом струйно-абразивной резки.

Попытки использовать для разделения режимы обработки пластин толщиной 250...300 мкм не обеспечили необходимого количества годных кристаллов на одну пла-

стину. Попытка определить режим эмпирическим путем так же не принесла желаемого успеха. Поэтому в настоящий момент разделение толстых пластин не получило широкого распространения и проводится эмпирическим путем, при котором можно получить на пластине как 80% годных кристаллов, так и ни одного.

Метод разделения полупроводниковых материалов на отдельные элементы методом струйно-абразивной резки применяется уже достаточно давно [6]. За это время проводились различные исследования процесса. Анализировались различные виды абразивного материала, материалы маскирующего покрытия и клеевого слоя [7]. Проводились исследования толщины прорезанного слоя от различных параметров процесса – расхода абразивного материала, формы обрабатывающего сопла, давления сжатого воздуха и т.д. Однако зависимость формы боковой поверхности от этих факторов, рассмотренная в этой статье, ранее не рассматривался.

Ранее проведенными исследованиями [8] было установлено, что при пескоструйной обработке маскированных образцов (рис. 3) из стекла и кремния в течение достаточно длительного времени (до начала разрушения маскирующего покрытия) глубина резания незащищенных маскирующим трафаретом поверхностей была переменной и увеличивалась только до некоторого предельного значения в зависимости от расстояния между элементами маски-трафарета.

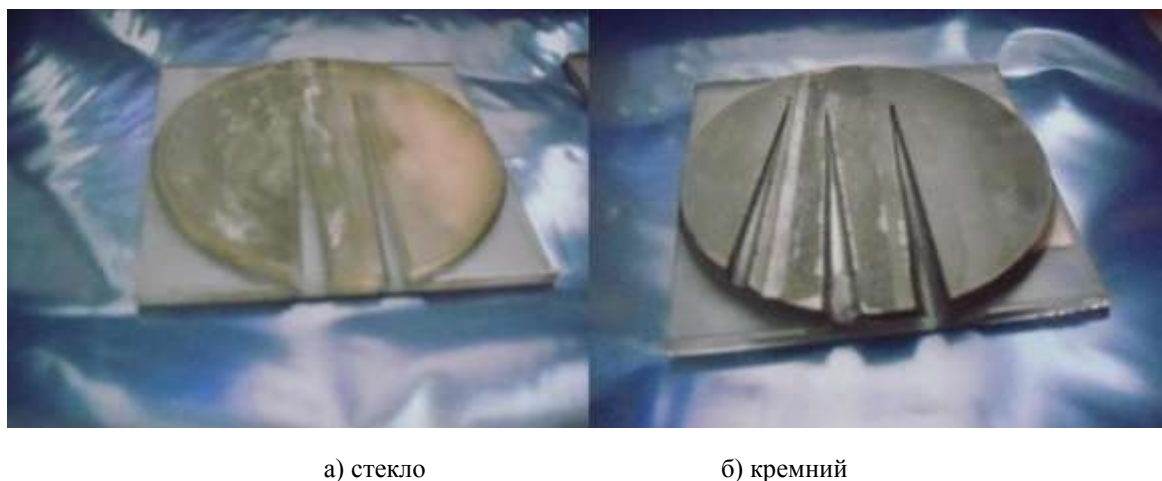


Рис. 3. Образцы обработанных материалов

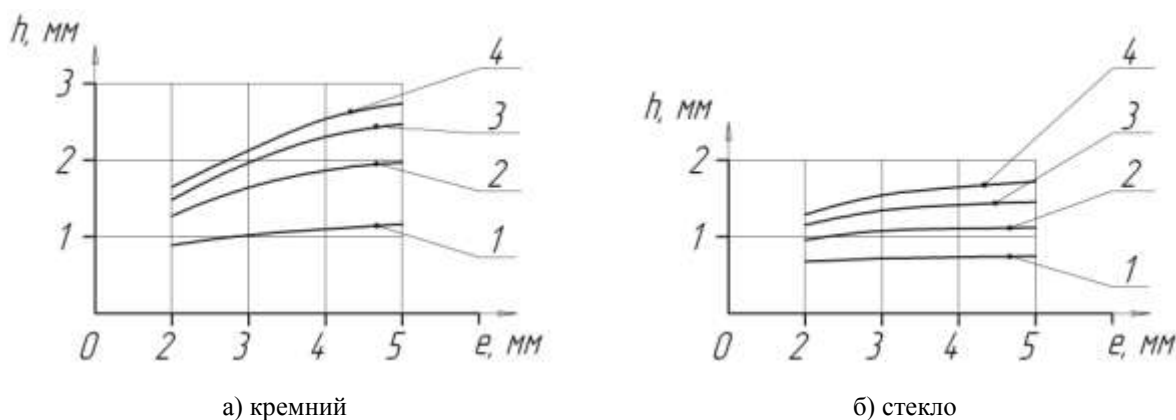


Рис 4 Зависимость глубины прорезанного слоя материала h от ширины зазора e между элементами маски:
1 – обработка в течение 15 минут на опытной полуавтоматической установке; 2 – обработка в течение 30 минут; 3 – обработка в течение 45 минут; 4 – обработка в течение 60 минут.

В тоже время максимальная глубина прорезанного слоя материала задает максимальное значение угла 2α между боковыми гранями маскированных участков, равного

$$2\alpha = 2\arcsin\left(\frac{e}{2h_{\max}}\right), \text{ где } e - \text{расстояние между маскированными участками; } h_{\max} -$$

максимальная глубина прорезанного слоя материала.

Ранее проведенные исследования показали, что при зазоре между маскирующими элементами более 2 мм угол при вершине конуса составляет более 75° при в два раза большем времени обработки. Поэтому, маска с зазором между элементами маскирующего покрытия более 2 мм не способна обеспечить необходимого бокового угла для диска-кристалла. Таким образом, целью работы является определение характеристик обрабатывающего оборудования и параметров технологического процесса, обеспечивающих разделение маскированной кремниевой пластины на диски-кристаллы, отвечающие предъявляемым к ним требованиям: размеру верхнего и нижнего оснований диска-кристалла и угла наклона боковой поверхности.

Оборудование

Для обработки маскированных кремниевых пластин на предприятии используется опытно-промышленная установка струйно-абразивной резки, разработанная при участии специалистов кафедры МТ11 МГТУ им. Н. Э. Баумана. Она будет использована и для обработки экспериментальных пластин.

Схема установки представлена на рис. 5. Она состоит из рабочей камеры 1, через которую проходит механизма подачи кассет с обрабатываемыми пластинами 2. Он представляет собой две цепи, верхнюю и нижнюю, ведущие звездочки которых вращаются в противоположных направлениях, что обеспечивает захват кассеты с заготовками 3 и ее перемещение через камеру. В действие механизм приводится электромеханическим приводом 4. Поскольку механизм перемещения кассет проходит камеру насквозь и может выносить на обработанных кассетах и своих элементах абразивный материал, камера оснащена двумя обеспыливающими пневматическими контурами 5. В камере в вертикальной плоскости перемещаются шесть обрабатывающих сопел, закрепленных на единой рейке 6. Движение сопел обеспечивает механизм возвратно-поступательного перемещения 7 с электроприводом. Абразивный материал, циркулирующий в камере, частично опадает в бункер 8, частично вместе с воздухом отсасывается в циклон-сепаратор 9.

Установка имеет следующие характеристики:

- давление сжатого воздуха на входе рабочих сопел: не менее 0.30 МПа;
- скорость сканирования сопел: 0,2 м/с;
- скорость транспортера: 0,25 мм/с;
- тип абразивный материал: электрокорунд; размер фракции 20...40 мкм;
- объем загружаемого абразивного материала: 10 - 12 л;
- расход абразивного материала через рабочее сопло: 6-8 см³/с;

- расстояние между обрабатывающими соплами: 45 мм.

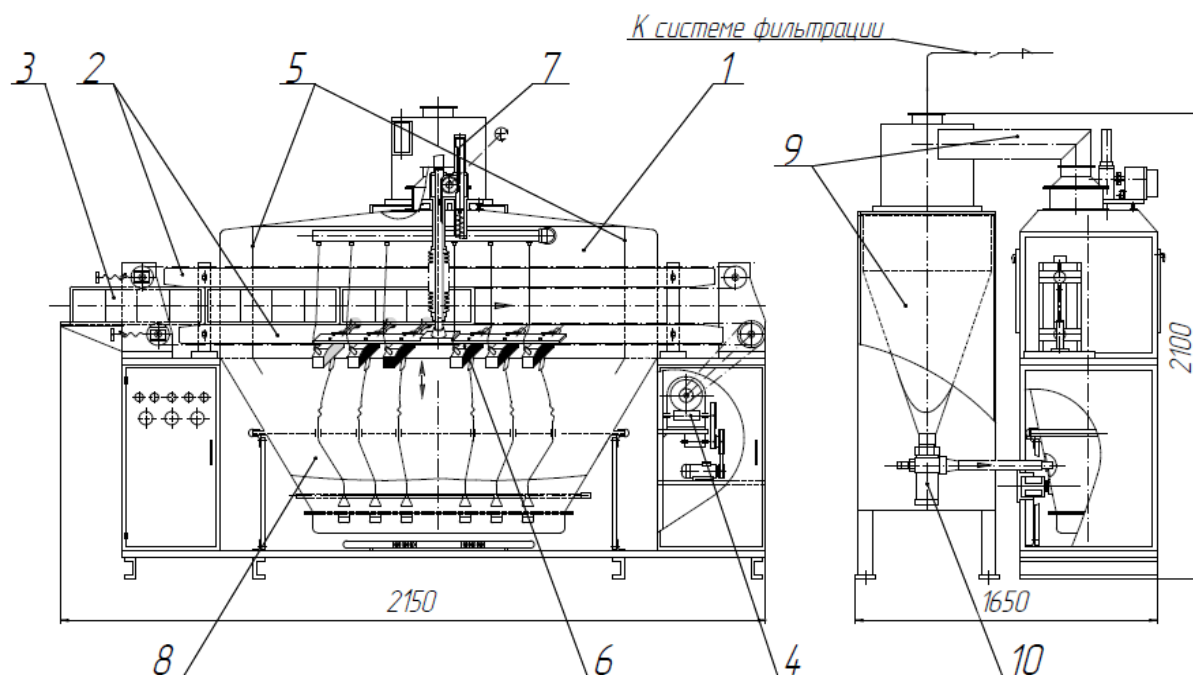


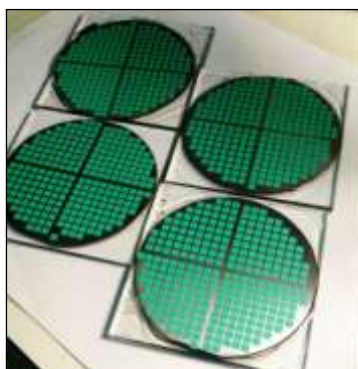
Рис 5 Схема опытной установки пескоструйной резки, НПП ТЭЗ: 1 - рабочая камера с отсеками обеспыливания кассет на выходе; 2 – транспортер цепной для подачи кассет; 3 - кассеты с обрабатываемыми пластинами; 4 - привод цепного транспортера; 5 - обеспыливающие пневматические контуры; 6 - кронштейн с рабочими соплами; 7 - механизм подачи рабочих сопел; 8 - бункер для сбора абразивного порошка; 9 - центробежный циклон; 10 – блок перекачки абразивного материала

Время воздействия струи абразивного материала на единицу поверхности при указанных режимных параметрах составляет 0,22 мин для группы из трех сопел или 15 мин на всю поверхность пластины.

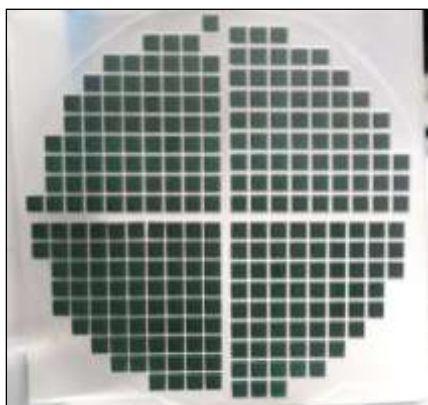
Экспериментальные исследования

Было принято решение исследовать процесс разделения кремниевой пластины пескоструйным методом при ширине зазора от 0,6 мм (используемый на предприятии отрасли для резки однослойных пластин) до 2 мм. Из ПВХ-пленки толщиной 200 мкм была изготовлена маска в виде квадратных маскирующих дисков 3х3мм с фиксированным расстоянием между ними. Маска должна была наклеиваться на кремниевую пластину диаметром 76 мм и была разделена на четыре зоны, с зазорами 0,6; 0,7; 0,8 и 0,9 мм.

Маска была нанесена на кремниевые пластины толщиной 250, 500, 750 и 1000 мкм, эмитирующие одно-, двух-, трех- и четырехслойные пластины соответственно. После чего пластины были обработаны на опытно-промышленной установке с соблюдением одинаковых условий обработки (рис. 6).



а)



б)



в)

Рис. 6 Кремниевая пластина с экспериментальной маской: а) до обработки; б) после обработки, вид со стороны маски; в) после обработки, вид со стороны стеклянной подложки

Результаты обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Величина угла 2α

Толщина пластины, мкм	Время обработки, мин	Количество сопел, шт	Угол, град			
			Зазор 0,6	Зазор 0,7	Зазор 0,8	Зазор 0,9
250	0,22	3	36,12	34,54	32,30	28,15
	0,44	6	30,42	22,48	29,30	22
	0,66	9	22,48	18,12	18,30	13,48
	0,88	12	21,06	16,42	16,40	12,12
500	0,22	3	35,78	31,15	29,25	27,16
	0,44	6	27,6	23,12	28	22,30
	0,66	9	21,42	18,12	19,36	16,24
	0,88	12	18,36	16,12	16,30	15,34
750	0,22	3	47,42	45,18	42,18	40,24
	0,44	6	39,54	36,30	37	37,6
	0,66	9	18,42	19,18	20,42	21,12
	0,88	12	17,12	18,54	17,32	16,15
1000	0,22	3	51,36	49,18	47,42	40,36
	0,44	6	43,12	42,30	38	36,42
	0,66	9	30,48	31,24	31,42	33,30
	0,88	12	27,32	24,30	23,24	22,12

На графиках (рис. 7) показана зависимость угла α от зазора e и числа обработавших пластину сопел (времени обработки)

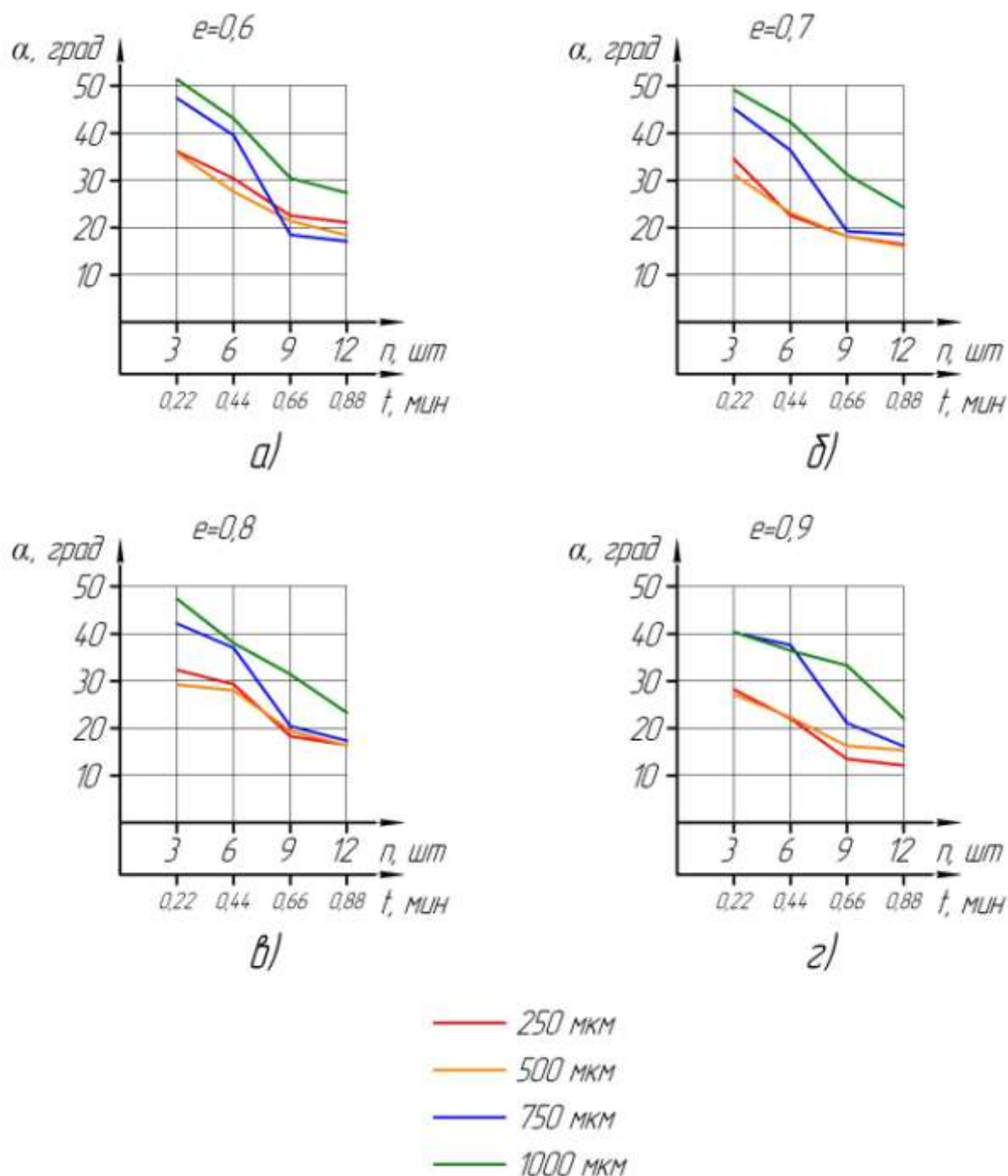


Рис. 7 Зависимость угла α от зазора e и числа обработавших пластину сопел: α – половинный угол, e , мм – ширина зазора между элементами маски, n – число обработавших пластину сопел, t , мин – время обработки

Наилучших значений угла достигли при зазоре 0,8 и 0,9 мм для трехслойной пластины при длительности обработки в 12 сопел (0,88 мин.).

Обсуждение результатов

С целью проверки гипотезы о зависимости глубины резания и процесса формообразования от зазоров между элементами маскирующего трафарета были выполнены ряд тестов на действующей опытно-промышленной установке. В результате установлено следующее.

а) Глубина пескоструйной резки пакетированных кремниевых пластин зависит от зазоров между маскирующими дисками трафарета. Минимальный зазор между дисками, равный 350 ± 25 мкм достаточен для резки обычной и двухслойной пластины при штатных режимах обработки. При этом для дисков-кристаллов из двухслойных пластин процесс формообразования оказался незавершенным полностью, т.е. сохранялось завышенное значение нижнего диаметра диска-кристалла относительно верхнего.

б) При резке трехслойных пластин через штатный трафарет (с зазорами 350 ± 25 мкм) разделения пластины не наблюдалось. Повторная обработка этой же пластины с целью разрезания ее на диски-кристаллы привела к результатам, представленном на рис. 8, а именно формированию увеличенного зазора между дисками трафарета за счет подрезания последних до достижения углов клина, соответствующих выявленным в экспериментах.

в) Полученные результаты косвенно указывают на необходимость оптимизации размеров маскирующего трафарета с учетом глубины резания пакетированной кремниевой пластины.

Проведенный тест показал, что толстую пластину можно разрезать, только увеличивая величину зазора между маскирующими дисками. В производственном процессе диаметр диска трафарета соответствует размеру диска-кристалла, поэтому, закладывая увеличенные зазоры между дисками, достигается такой же результат, что и в тесте на действующей установке, рассмотренном выше.

В экспериментальном разделе статьи показано, что варьирование величины зазоров и длительности обработки позволяет выявить зависимость глубины прорезанного слоя материала и формы прорезанного слоя от этих параметров. В частности для трехслойной пластины такими параметрами являются 0,88 мин обработки единицы поверхности или 60 минут для всей пластины на опытно-промышленной установке.

Полученные результаты были апробированы при получении микроканальных теплообменников на стеклянной основе, разделении пластины конденсаторов на керамической основе, прорезании микроотверстий в пластинах из стекла и кремния с использованием симметричного двустороннего маскирования и других.

Заключение

Исследования показали, что при изготовлении дисков-кристаллов из пакета кремниевых пластин значимым фактором является расстояние между защитными дисками маскирующего трафарета, которое определяет максимальную глубину резания и форму поверхности кристалла. Другим фактором поэтапной обработки пластины несколькими

струйными соплами, оказывающим влияние на конечные размеры диска-кристалла, является учет стадий процесса формообразования, достигаемый при минимизации расстояния между защитными дисками трафарета.

С увеличением толщины пакета зазор между защитными дисками трафарета необходимо увеличивать. Половинный угол α «клина», задающий форму поверхности резания, можно считать постоянным и равным $12^\circ \dots 14^\circ$ для диапазона минимальных зазоров между защитными дисками от 0.35 мм до 1.20 мм. В частности, при использовании эмпирической зависимости, приведенной в статье, для трехслойной пластины толщиной 750 мкм, минимальный зазор между дисками должен составлять 0,8 мм.

Научная новизна поставленной задачи заключается в определении технологических и режимных параметров процесса формообразования дисков-кристаллов методом струйно-абразивной резки из условия минимизации разницы исполнительных размеров верхнего и нижнего оснований диска-кристалла.

Апробация полученных результатов на предприятии отрасли позволила повысить выход годных дисков-кристаллов, получаемых из пакетированных кремниевых пластин толщиной до 1000 микрон.

Список литературы

1. Черепанов В.П. Диоды и их зарубежные аналоги. Справочник. В 3 т. Т. 4. Дополнительный. М.: РадиоСофт, 2009. 632 с.
2. Лазутин Ю.Д., Корячко В.П., Сускин В.В. Технология электронных средств. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 286 с.
3. Жуков В.В., Дощечкин Е.Д. Технология изготовления полимерных маскирующих покрытий с использованием клеевых соединений при пескоструйной резке полупроводниковых материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2005. № 10. С. 20-23.
4. Жуков В.В., Степанов С.А. Универсальная камера для обработки маскированных поверхностей мелкодисперсным абразивным порошком // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 5. С. 11-16.
5. [Usui S.](#) Method of making a sandblast mask: pat. US 3808751 (A). 1974.
6. Hakes G.L. Abrasive dicing of semiconductor wafers: pat. US 3693302 (A). 1972.
7. Kruusing A., Leppaeuvori S., Uusimaki A., Uusimaki M. Rapid prototyping of silicon structures by aid of laser and abrasive-jet machining // Proc. of the SPIE. Vol. 3680. Conference on Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS, 1999, 10 March, Paris, France. Paris, 1999. DOI: [10.1117/12.341285](#)
8. Жуков В.В., Степанов С.А. Обеспечение точности при разделении маскированных полупроводниковых пластин на кристаллы // IV Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сборн. матер. конф. 2011.

The Forming Process Researched in Sandblasting Separation of Masked Silicon Wafers

V.V. Zhukov¹, A.A. Gornichev¹,
S.A. Stepanov^{1,*}

[*y-stepan@yandex.ru](mailto:y-stepan@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: microwave diode, silicon plate, disc-crystal, sandblasting cutting, abrasive material, masking material

The object of study is a semiconductor silicon disc-crystal currently used in the design of semiconductor diodes. The disc-crystal is manufactured by the sandblasting separation of a pre-masked silicon wafer into individual elements. The crystal has frustum-of-a-cone shape with its top diameter determined by a protective masking disc diameter and the bottom one defined by the features of the forming process. The apex angle of the cone 2α or a half-angle α between the lateral surface of the cone and the normal drawn to its base is used as a reference value.

The work has studied the influence a thickness of the separated wafer and a width of the gap between the masked discs on the crystal shape. The masking cover is a set of square protective elements (3x3 mm), spaced at 0.6; 0.7; 0.8 and 0.9 mm. The mask material is a self-adhesive PVC-film with thickness of 200 microns. Pilot-plant semi-automatic sandblasting equipment was used to for separation.

After processing of results (the angle 2α at the top of the cone) the following conclusions have been made:

- with increasing thickness of the silicon wafers the gap between the protective discs of mask must be increased;
- in case a range of the minimum gaps between the protective discs is within 0.35 - 1.20 mm the half-angle α , which defines the shape of the cut surface, can be considered to be constant and equal to 12° ... 14°.

References

1. Cherepanov V.P. *Diody i ikh zarubezhnye analogi. Spravochnik. V 3 t. T. 4. Dopolnitel'nyi* [Diodes and their foreign analogues. Handbook. In 3 vols. Vol. 4. Additional]. Moscow, RadioSoft Publ., 2009. 632 p. (in Russian).
2. Lazutin Yu.D., Koryachko V.P., Suskin V.V. *Tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Technology of electronic means]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 286 p. (in Russian).

3. Zhukov V.V., Doshchechkin E.D. Technology of production of polymeric masking coatings using adhesive joints in sandblast cutting of semiconductor materials. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* = *Assembly in machine building and instrument making*, 2005, no. 10, pp. 20-23. (in Russian).
4. Zhukov V.V., Stepanov S.A. Universal chamber for processing of masked surfaces with microfine abrasive powder. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* = *Assembly in machine building and instrument making*, 2015, no. 5, pp. 11-16. (in Russian).
5. [Usui S.](#) *Method of making a sandblast mask*. Patent, no. US 3808751 (A), 1974.
6. Hakes G.L. *Abrasive dicing of semiconductor wafers*. Patent, no. US 3693302 (A), 1972.
7. Kruusing A., Leppaevuori S., Uusimäki A., Uusimäki M. Rapid prototyping of silicon structures by aid of laser and abrasive-jet machining. *Proc. of the SPIE. Vol. 3680. Conference on Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS*. 1999, 10 March, Paris, France. Paris, 1999. DOI: [10.1117/12.341285](https://doi.org/10.1117/12.341285)
8. Zhukov V.V., Stepanov S.A. Ensuring of accuracy in separation of masked semiconductor plates to crystals. *4 Vserossiiskaya konferentsiya molodykh uchenykh i spetsialistov "Budushchee mashinostroeniya Rossii": sborn. mater. konf.* [4 All-Russian conference of young scientists and specialists "The future of engineering in Russia": collection of materials of conference]. 2011. (in Russian).