

# Эволюция в создании карбида кремния — революционного полупроводника

**Карбид кремния (SiC) является довольно молодым материалом в истории полупроводниковой промышленности по сравнению с кремнием (Si) или арсенидом галлия (GaAs), однако его истоки восходят к концу XIX в. В 1891 г. Эдвард Ачесон (Edward Acheson) разработал способ получения кристаллического SiC в качестве абразивного материала, и этот метод используется до сих пор. Первые минералогические исследования «второго по твердости минерала в природе», осуществленные французским химиком Х. Муассаном (H. Moissan), также относятся к этому времени, и карбид кремния до сих пор иногда называют муассанитом.**

**Роберт Экштейн  
(Dr. Robert Eckstein)**

**Али Машали  
(Aly Mashaly)**

**Перевод:  
Евгений Карташов**

Когда в середине XX в. началась эра полупроводников с появлением биполярных транзисторов, уже был понятен огромный потенциал SiC для определенных условий работы. В соответствии с исследованиями Э. Джонсона (E. Johnson), произведение напряженности поля пробоя и скорости дрейфа насыщения может быть использовано как показатель пригодности материала для производства транзисторов для радиочастотных (RF) и мощных применений. С этой точки зрения SiC оказывается значительно лучше, чем Si и GaAs.

Однако на практике этот инновационный полупроводниковый материал не смог сразу доказать свое превосходство. В то время не существовало производственного процесса, обеспечивающего изготовление достаточно больших подложек из SiC с низкой плотностью дефектов, необходимых для производства соответствующих тестовых структур. На основе процесса Ачесона и т. н. процесса Лели в качестве промежуточного шага был разработан модифицированный процесс Лели, который послужил основой для современного производства SiC-подложек в конце 1970-х годов. Когда в результате эволюции этой технологии подложки из карбида кремния становились все больше и лучше, достоинства SiC-структур стали достаточно убедительными.

### Предпосылки для производства кристаллов SiC

Для начала производства кристаллов SiC (которое экспертами называется «выращивание») необходимо иметь соответствующие компоненты и оборудование. Сюда входит непосредственно оборудование для выращивания кристаллов, технология выращивания, различные носители, исходный материал SiC и затравочные кристаллы. SiC выступает в качестве сырья в процессе роста и постоянно подпитывает растущий кристалл.

Исходный материал обычно имеет форму порошка, он изготавливается при подготовке производства. Этот высокотемпературный и строго контролируемый процесс объединяет базовые материалы — очень чистый кремний и углерод. Прецизионный контроль гарантирует, что используемый базовый материал обладает конкретной, заданной чистотой, стехиометрией, размером и распределением зерен и другими заранее определенными параметрами.



**Рис. 1.** Значение «затравочных» кристаллов для выращивания Si- и SiC-структур

Затравочный кристалл представляет собой монокристаллическую круглую SiC-пластину, он инициирует (и в значительной степени контролирует) рост крупного монокристалла, отсюда и термин «затравочный». Подобно семенам растения, «затравка» несет «генетическую информацию», которая передается растущему кристаллу. Структурное совершенство затравочного материала во многом определяет плотность дефектов в окончателной структуре. Многоступенчатый процесс селекции, непрерывно используемый компанией Rohm, гарантирует, что «затравка» будет производиться только из лучшего материала, имеющего оптимальное качество. Этот постоянный внутренний отбор действует как процесс дистилляции, непрерывно совершенствующий качество «зародышей» и конечного продукта.

### Значение «затравочных кристаллов» для обеспечения роста кремниевых кристаллов

Оборудование для выращивания кристаллов, технология выращивания, исходный материал и затравочные кристаллы играют важную роль в процессах, используемых для производства и других полупроводников (включая кремний). Однако SiC в этом плане заметно отличается. Как будет объяснено более подробно далее, SiC-кристаллы выращиваются с помощью специальной технологии «паровой фазы». По этой причине диаметр затравочного чипа должен, как минимум, равняться диаметру выращиваемого кристалла. Невозможно вырастить большой кристалл высокого качества на «затравочной» пластине относительно небольшого диаметра, как это делается в случае с Si (рис. 1).

Любые дефекты исходной структуры станут «в наследство» растущему кристаллу из-за «генетических» особенностей, описанных выше, поэтому при производстве SiC обязательно использование бездефектных затравочных кристаллов большого диаметра. Таким образом, их наличие является одним из факторов, обеспечивающих стабильную работу предприятия. На рынке нет предложения «затравочных» кристаллов, что является своего рода защитой от копирования. Этот материал всегда доступен в достаточном количестве у SiCrystal, где он надежно защищен собственными технологическими процессами.

### Выращивание SiC-кристаллов

Когда все необходимые, описанные выше, условия выполнены, можно начинать процесс. Для производства SiC обычно используется метод сублимационного выращивания. Установка состоит из графитового тигля, окруженного углеродным изоляционным материалом. Это помогает экономить энергию и использовать оборудование для индукционного нагрева (рис. 2). Процесс выращивания кристаллов протекает следующим образом.

Индукционная катушка, входящая в состав установки, создает вихревые токи в графитовом тигле, нагревая его свыше 2273 К. При таких высоких температурах исходный материал

в нижней области тигля испаряется, происходит возгонка порошкового SiC, который превращается в различные газы, состоящие из кремния и/или углерода и заполняющие свободное пространство тигля. Затравочный кристалл, прикрепленный к верхней части тигля, не испаряется, потому что температура там несколько меньше, чем внизу, но она все равно выше 2273 К.

В соответствии с законами термодинамики, газообразные примеси, образованные из исходного материала при температуре гораздо выше 2273 К, склонны к осаждению из паровой фазы, если они перемещаются ближе к более холодной «затравке». Кристаллизуясь на ее поверхности, они образуют дополнительный объем кристалла и позволяют ему расти. Однако это не бесконтрольный процесс, поскольку «генетика зародышей» определяет кристаллографическое соотношение затравочной и конечной структуры.

В процессе роста кристалла в паровой фазе производится добавление примесного материала (обычно это газообразный азот). Внедряясь в кристалл в малых, четко заданных количествах, легирующая примесь выступает в качестве электрического донора, обеспечивая необходимую проводимость кристалла.

Таким образом, процесс требует постоянной передачи материала от источника к растущему кристаллу. Выращивание, сопровождающееся непрерывным переходом газов и легирующей примеси через паровую фазу, длится пару дней. Когда порошок почти полностью испарится и кристалл вырастет в длину на несколько сантиметров, цикл прекращается в управляемом режиме.

Необходимо рассмотреть и некоторые другие аспекты, позволяющие реализовать описанный выше процесс. Как уже упоминалось, тигель и его изоляция выполняются из углерода. Этот материал используется благодаря высокой температурной стабильности, доступности в полупроводниковой чистоте и тому факту, что он не создает загрязнения для SiC. Однако все карбоновые детали немедленно сгорают при 2273 К в нормальных атмосферных условиях.

Поэтому процесс должен происходить в инертной среде (часто используется аргон). Чтобы удерживать все газы, включая аргон, вокруг тигля и его изоляции расположены две коаксиальные стеклянные трубки, их внутреннее пространство охлаждается водой.

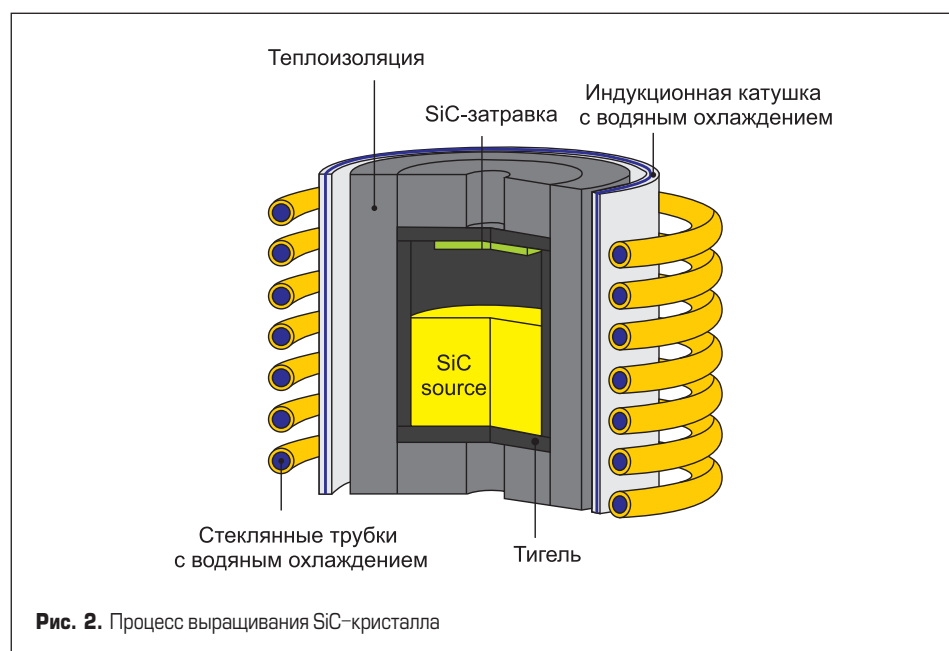
### Изготовление SiC-подложек: производственная цепочка

В конце процесса выращивания цилиндрический монокристалл длиной несколько сантиметров, диаметр которого несколько превышает заданное значение, может быть изъят из тигля. Последующие производственные этапы почти идентичны для других полупроводников, в частности кремния:

- ориентация кристаллов с помощью рентгеновского анализа;
- цилиндрическое шлифование кристалла до нужного диаметра;
- шлифование поверхностей (маркировка на поверхности кристалла);
- распиливание пластин;
- применение индивидуальной лазерной маркировки для идентификации пластин;
- закругление кромок пластин;
- обработка поверхностей с использованием следующих методов:

- шлифование;
- притирка;
- полирование путем механического истирания;
- полирование путем химического/механического истирания;
- очистка пластин с помощью сухих или влажных химических методов.

Разумеется, все описанные этапы сопровождаются проверкой многих внутренне или внешне заданных параметров с использованием специальных оптических, механических, химических и электрических методов. Большой объем полученных и архивированных данных обеспечивает полную «отслеживаемость» производства конечной продукции, от исходного сырья, используемого в начальной стадии.





**Рис. 3.** Увеличение диаметра и улучшение качества

Описанная выше технология давно зарекомендовала себя в качестве стандарта в изготовлении полупроводниковых подложек. Технологические этапы, оборудование и методы контроля, в основном, известны по производству кремния. Тем не менее некоторые процессы и/или оснастку приходилось изменять, чтобы учесть специфические свойства SiC, который является очень твердым материалом. По шкале твердости Мооса, где алмазы находятся на верхнем пределе с твердостью 10, а минералы считаются очень жесткими, если их твердость выше 6, SiC (твердость 9) — один из лидеров. Всего несколько материалов являются пригодными для абразивной обработки SiC. Инструменты и даже технологическое оборудование должны быть адаптированы для обеспечения необходимой точности обработки.

**Выращивание и производство пластин — вызовы и решения**

Не удивительно, что обеспечение наивысшего качества, основанного на жестких спецификациях, является одной из основных проблем в производстве SiC-кристаллов и подло-

жек. В данном контексте «качество» означает качество поверхности подложки:

- отсутствие царапин;
- предельно низкая (нанометрическая) шероховатость поверхности;
- чистота поверхности в физическом смысле (отсутствие частиц, пленок) и в электрическом смысле (отсутствие электрически активных примесей).

Высокие геометрические свойства:

- низкие допуски на диаметр и толщину;
- минимальная кривизна и деформация подложки;
- точно заданная форма краевых областей.

Лучшие внутренние свойства:

- однородность легирования и, следовательно, электрическая проводимость;
- минимально возможный уровень механического напряжения в материале;
- низкая плотность смещений или связанных с этим дефектов.

**Существующее состояние SiC-структур**

Хотя качество — это, несомненно, «быстро движущаяся цель», мы вправе сказать, что на сегодня параметры SiC соответствуют основным требованиям, установленным для полупроводниковых материалов. Однако в прошлом многое было сделано для достижения и поддержания этого уровня.

Сравнение «старых» и существующих подложек методом активного двойного лучепреломления свидетельствует о впечатляющем улучшении качества материала за последние 15 лет или около того. Этот оптический метод выявляет отклонения от идеального состояния в виде светлых зон, в то время как ненарушенные области отображаются на фотографии

в черном цвете. На поверхности пластины, изготовленной в 2000 г., видны выраженные контрастные области (рис. 3, слева), являющиеся индикатором дефектов. Это смещения и связанные с ними структурные дефекты, показывающие, что процесс выращивания не был тогда достаточно оптимизирован.

Вид современной пластины (рис. 3, справа) сильно отличается. Несмотря на то, что чувствительность оптического метода значительно улучшилась за последнее время, здесь практически отсутствуют контрасты между темными и светлыми областями. Это наглядно показывает, что технология выращивания была существенно оптимизирована, плотность дефектов внутри кристалла уменьшена на несколько порядков, и подложки теперь можно производить без каких-либо ограничений.

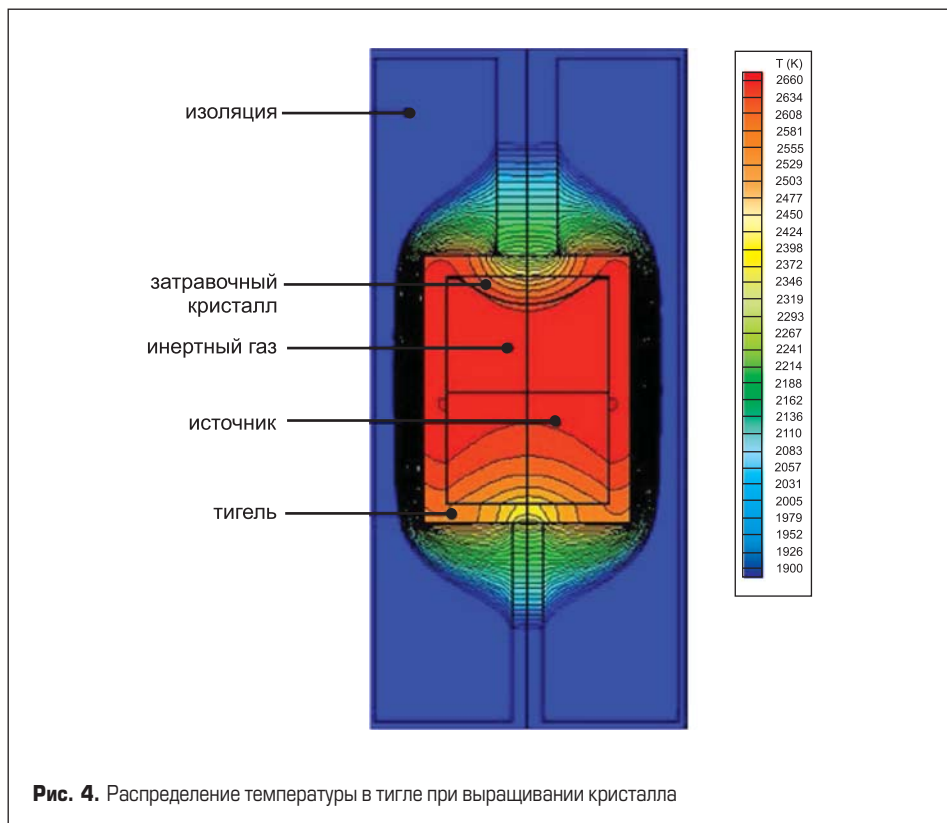
Как удалось добиться такого улучшения качества материала? В данном случае это было достигнуто за счет оптимизации процесса выращивания кристаллов. Однако как оптимизировать высокотемпературный процесс, происходящий при температуре гораздо выше 2273 К? Установка датчиков Кельвина в рабочей зоне тигля при таких температурах трудно представима. Наличие дополнительных контрольных отверстий в изоляции для внешних оптических измерений температуры будет недопустимо влиять на распределение температуры в тигле. Любое отверстие в тигле неизбежно приведет к высвобождению технологических газов, что нарушит процесс выращивания.

Задача может быть решена путем численного моделирования процесса роста кристалла (рис. 4). Используя специальное программное обеспечение, учитывающее свойства используемых материалов и параметры технологического процесса, технологи теперь имеют возможность «смотреть в тигель». Опытные специалисты способны адекватно распознать по распределению температуры (т. н. тепловые поля на рис. 4), как кристалл будет расти в различных, изменяемых условиях. Множество «численных экспериментов» позволяет ограничить число необходимых «реальных экспериментов». Сочетание моделирования с экспериментальным подтверждением обеспечивает производителям кристаллов, имеющим многолетний опыт, достижение радикального улучшения качества материала.

**Перспективы**

Приведенное выше сравнение SiC-пластин в настоящее время и в 2000 г. показывает увеличение диаметра от 35 до 150 мм, достигнутое за прошедшие годы. Мы можем видеть, что качество поверхности современных пластин увеличилось в 18 раз. Постоянный рост размеров, сопровождаемый совершенствованием качества, будет оставаться наиболее важной целью и в будущем. Преимуществом больших пластин являются лучшие экономические показатели и меньшие затраты на производство.

Переход от 100-мм к 150-мм пластинам для заказчиков только начинается, поэтому большой интерес вызывает возможное появление 200-мм



**Рис. 4.** Распределение температуры в тигле при выращивании кристалла

подложек как очередной этап эволюции. Хотя для следующего шага потребуется некоторое время, чтобы сделать его коммерчески привлекательным, SiCrystal надеется, что сможет представить первые образцы в течение двух-трех лет. Предварительная работа по изготовлению 200-мм пластин уже ведется.

### Выводы

Хотя потенциал SiC для силовой и RF-электроники был признан довольно давно, соответствующая технология изготовления этого материала появилась только в конце 1970-х годов. В производственном процессе, используемом до настоящего времени, исходный материал сублимируется перед прохождением паровой фазы и кристаллизацией на затравочном SiC-кристалле. Так создается единый кристалл, который впоследствии перерабатывается в подложки с помощью модифицированных производственных этапов, хорошо отработанных в полупроводниковой промышленности.

Постоянно растущие требования по качеству и диаметру подложек привели к разработке процесса адаптации, основанного на компьютерном моделировании. Благодаря ему современные подложки диаметром до 150 мм могут быть без ограничений использованы для производства полупроводниковых компонентов. Обладая оптимальными решениями для настоящего и будущего, SiCrystal (дочерняя компания ROHM Semiconductor GmbH) продолжает движение в сторону увеличения диаметров и повышения качества SiC-структур.

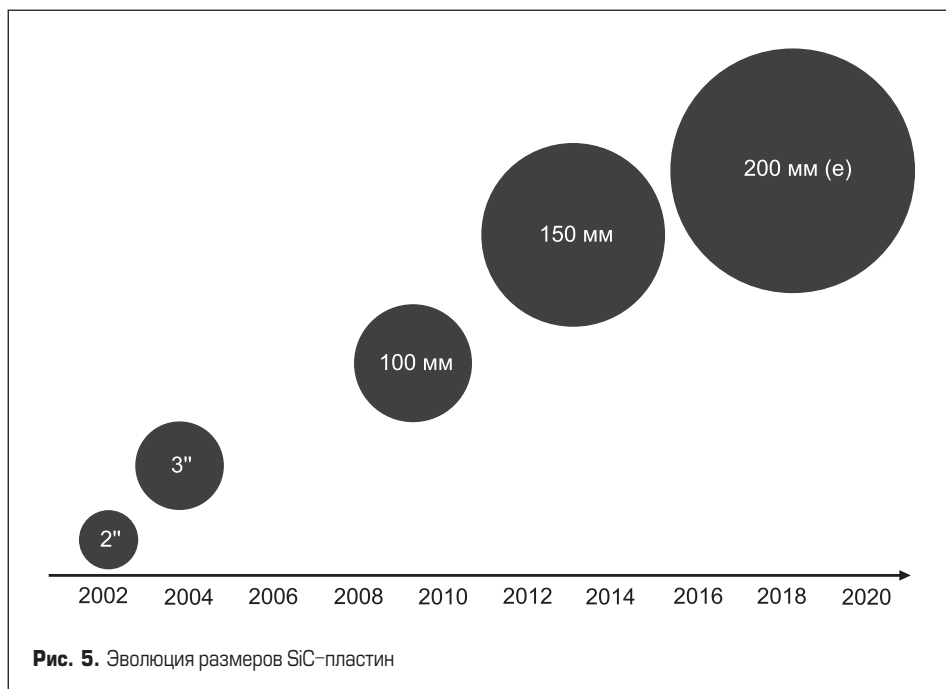


Рис. 5. Эволюция размеров SiC-пластин

### О компании SiCrystal AG

SiCrystal AG, один из ведущих мировых производителей полупроводниковых SiC-подложек, основана в 1996 г. со штаб-квартирой в г. Нюрнберг (Германия). SiCrystal AG является дочерней компанией ROHM Co. Ltd, поставляющей свою продукцию клиентам по всему миру. SiCrystal AG владеет всеми технологическими этапами — от производства исходного материала

до упаковки т. н. «эпи-полированных» (epi-ready) подложек в собственных стерильных цехах. В дополнение к фирменным методам анализа, SiCrystal AG имеет прямой доступ к результатам испытаний компонентов в пределах группы ROHM. Это является неоценимым преимуществом для дальнейшей оптимизации свойств материала, основанной на оценке производительности кристаллов и даже модулей.