

ВЫКЛЮЧИТЬ СВЕТ – ВКЛЮЧИТЬ МИНИ-ПРОЖЕКТОР

П.Кох, Dr.-Ing. info@publikomm.de

Если бы Илья Рихтер (немецкий телеведущий музыкальной передачи "Disco" в 1970-1980-е годы) сегодня в своей типичной манере объявлял песню, ставшую победительницей, ему потребовалась бы всего одна маленькая светодиодная лампа, чтобы выставить исполнителя в сверкающем прожекторном свете. Сегодня даже крошечные полупроводниковые кристаллы способны давать поток яркого света при чрезвычайно низком энергопотреблении. К тому же эти маленькие светоносные волшебники имеют неограниченный срок службы. Неудивительно, что сегодня они производят переворот в светотехнике. Однако есть много других областей применения, где возлагаются большие надежды на аналогичный материал: это карбид кремния – старый материал, открытый заново.

В качестве технической керамики карбид кремния (SiC) на протяжении десятилетий широко использовался в подшипниках скольжения, насосах и горелках. Но на пути его применения в качестве полупроводника долгое время стояли большие проблемы, связанные с выращиванием кристаллов. Как это часто бывает в технической сфере, проблемы в производстве и здесь блокировали технологический прорыв. Лишь несколько лет назад появились мощные производственные установки, такие как SiCube и baSiC-T фирмы PVA TePla AG, способные обеспечить воспроизводимое и экономичное изготовление высокочистых кристаллов карбида кремния в нужном объеме (рис.1). С тех пор растет количество маркетинговых исследований, предсказывающих полупроводниковым соединениям блестящее будущее. Многие эксперты ожидают, что

текущий объем рынка к 2020 году увеличится в восемь раз. Основание для таких оптимистичных прогнозов: карбид кремния обладает большим потенциалом использования в таких динамично развивающихся отраслях промышленности, как выработка экологически чистой электроэнергии, производство электромобилей и светотехника, и значительно превосходит в этих перспективных сферах кремний.

ФАНТАСТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Достоинства карбида кремния особенно хорошо заметны на примере производства энергии из возобновляемых источников. Фотогальванические или ветроэнергетические установки производят только постоянный ток, для подачи в электросеть его необходимо преобразовать в переменный.



Рис.1. Системы выращивания карбида кремния

Эту функцию выполняют кремниевые приборы, используемые в инверторах. Такими модулями оснащены фотогальванические установки каждой частной компании, производящей электроэнергию. При этом КПД инверторов, как и любого технического конструктивного элемента, не достигают 100% в связи с потерями на преобразование. В системах на основе кремния КПД, как правило, составляет 50–70%. Когда в 2008 году Институт систем солнечной энергетики им.Фраунгофера (ISE) сообщил, что использование элементов на основе карбида кремния поможет увеличить КДП до 98,5%, все местные инвесторы ветроэнергетических и фотогальванических установок радостно потирали руки. Ведь в самом благоприятном случае это означало увеличение фактического дохода почти в два раза. С физической точки зрения высокая эффективность преобразования тока объясняется в три раза большей шириной запрещенной зоны карбида кремния в сравнении с кремнием. Благодаря этому в значительной степени блокируются нежелательные, снижающие КПД переходы электронов между двумя зонами, например, за счет туннельного эффекта. Таким образом, потери мощности при этом не происходит (рис.2).

"НЕ ТЕРЯЕТ ГОЛОВУ НА ХОЛОДЕ"

Еще одно достоинство карбида кремния – его высокая термостойкость и теплопроводность. Если кремний плавится при температуре около 1400°C, то карбид кремния выдерживает почти в два раза более высокую температуру. Поэтому тончайшие полупроводниковые структуры на кристаллах карбида кремния на практике могут преобразовывать ток более высокой плотности. Кроме того, одновременно сокращаются затраты на охлаждение.

КАРБИД КРЕМНИЯ (SiC)

По сравнению с монокристаллическим кремнием, карбид кремния отличается не только превосходящими полупроводниковыми свойствами. Благодаря в три раза большей ширине запрещенной зоны в сравнении с кремнием потери при переключении сокращаются на 90%. КПД высоковольтных элементов достигает почти 100%. Одновременно карбид кремния может работать с током значительно более высокой плотности. В пользу материала говорит и его высокая термостойкость. Его разложение начинается только при 2300°C, тогда как кремний плавится уже при 1410°C. Поэтому элементы из карбида кремния выдерживают гораздо более высокие рабочие температуры. Поскольку в данном случае можно полностью отказаться от систем охлаждения или по крайней мере значительно уменьшить их, появляется возможность создания значительно более компактных конструкций, экономящих рабочее пространство.

Высоковольтные элементы на основе карбида кремния надежно работают даже при рабочих температурах более 250°C. Во многих областях применения это дает огромные преимущества: например, при эксплуатации ветроэнергетических установок можно, наконец, в нормальных производственных условиях преобразовывать многие сотни киловатт электрической мощности. Поэтому при плановой модернизации электрических сетей высоковольтные элементы на основе карбида кремния пользуются приоритетом. Они позволяют создавать значительно более эффективные, дешевые и компактные электрические схемы.



Рис.2. Контроль качества пластины карбида кремния

ДА БУДЕТ СВЕТ!

С коммерческой точки зрения все внимание приковано к белым светодиодам на основе карбида кремния. Просто потрясающая сила света при минимальном расходе энергии почти всегда объясняется свойствами этого полупроводникового материала. Светоотдача чипов светодиодов на основе карбида кремния/нитрида кремния значительно превышает 100 лм/Вт (в лабораторных условиях до 200 лм/Вт), что в десять раз выше, чем у традиционных ламп накаливания. Но вначале широкому признанию светодиодов препятствовал их холодный, синевато-белый свет. Однако благодаря нанесению слоев фосфора удалось получить ступенчато регулируемые оттенки белого света – от теплого белого до почти дневного уровня. Таким образом, светодиодная техника в последние годы все шире используется не только в прожекторах для освещения массовых мероприятий, но и в жилых помещениях. Экономия до 90% электроэнергии и почти неограниченный срок службы являются решающими аргументами в пользу их приобретения.

КЛЮЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

"Привод" – ключевое слово для еще одной области, где карбид кремния находит все более широкое применение. Транспортные средства с электроприводом, все электромобили и гибридные автомобили – везде требуется силовой преобразователь. Он управляет электродвигателем и тем самым, аналогично системам управления двигателем внутреннего сгорания в традиционных автомобилях, оказывает решающее влияние на ходовые качества электромобилей. Одновременно он подает регенерированную энергию в аккумулятор при торможении (рекуперация), поэтому

запас хода транспортного средства в значительной степени зависит от эффективности этого агрегата. Здесь используются те же достоинства карбида кремния, что и для фотогальванических установок: высокая частота переключения, незначительные потери, снижение массы за счет уменьшения потребности в охлаждении и, следовательно, малогабаритная, компактная конструкция. Все эти критерии являются основными в автомобилестроении. Такие выпрямители тока почти на 25% меньше и легче, чем их кремниевые конкуренты. Благодаря КПД более 95% модули преобразователей на основе карбида кремния, установленные в легковых автомобилях и автобусах, уже сегодня позволяют достичь экономии энергии в отрасли около 60%!

ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТ – МЕГАТРЕНД

Эксперты уже давно пришли к единому мнению, что электротранспорту принадлежит будущее. Матиас Виссманн, президент Ассоциации автопроизводителей Германии (VDA), на Международном автосалоне (IAA) во Франкфурте недавно заявил, что уже к концу 2014 года число серийных моделей с гибридным или чисто электрическим приводом с маркировкой "Сделано в Германии" увеличится до 16. Ведущую роль в этой сфере отводит Германии и Международная консалтинговая компания по вопросам управления McKinsey. По мнению экспертов, в 2018 году в стране сойдут с конвейера 370 тыс. электромобилей. С большим отрывом за Германией последуют США и Франция. Но основной производственной площадкой, по прогнозам экспертов, станет Япония, где выпуск таких транспортных средств достигнет почти 950 тыс. единиц. Кроме автомобилей, огромные перспективы открывает рынок электрического рельсового транспорта.

SiCube – УСТАНОВКА ВЫРАЩИВАНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ

HTCVT/HTCVD-система разработана для выращивания кристаллов карбида кремния методом сублимации/пиролиза источников газов при высокой температуре. Благодаря высокому вакууму системы до начала процесса роста обеспечиваются сверхчистые поверхности, не содержащие влагу и кислород. Конструкция системы позволяет выращивать кристаллы

диаметром до 100 мм. Давление системы в рабочем режиме составляет 5–900 мбар, при незагруженном реакторе – $5 \cdot 10^{-6}$ мбар, максимальная рабочая температура – 2600°C. Мощность источника питания – 80 кВт, частота 6–8 кГц. Скорость откачки безмасляного насоса равна примерно 180 м³/ч.

Размер системы – 2,0×2,5×3,725 м, масса – 3,8 т.



baSiC-T – УСТАНОВКА ВЫРАЩИВАНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Система транспорта пара к субстрату baSiC-T предназначена для выращивания кристаллов карбида кремния методом сублимации исходного порошка при высоких температурах. Модульная конструкция системы позволяет выращивать кристаллы диаметром 100 и 150 мм. Мощность, требуемая для индукционного нагрева до температуры 2200°C и ее устойчивого регулирования, составляет ~10 кВт. Благодаря высокой степени автоматизации системы управления

возможны визуализация процесса и отслеживание его отклонений; автономный набор параметров процесса из множества вариантов, запись и поиск данных, собранных за длительный период. Системы управления и визуализации работают независимо друг от друга.

Давление в рабочем режиме составляет 1–900 мбар, максимальная рабочая температура – 2600°C. Максимальная мощность источника питания – 60 кВт, частота 6–12 кГц.



Размер системы – 2,0×1,2×2,8 м, масса – 1,3 т (с блоком управления – 2 т).

ОЧЕНЬ СЛОЖНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

У любого человека, прочитавшего об убедительных достоинствах карбида кремния, обязательно возникнет вопрос: почему этому далеко не новому материалу удалось добиться успеха на рынке полупроводниковых приборов только в последние десять лет? На самом деле в течение длительного времени этот успех тормозили проблемы производства. В качестве технической керамики карбид кремния получают путем простой агломерации – спрессовывания порошка под очень высоким давлением и при высокой температуре. Эта технология достаточно проста и широко распространена. Но получить первый кристаллический материал, пригодный для использования в полупроводниковой технике, удалось лишь в 1977 году. До середины девяностых годов продолжался процесс совершенствования технологии, в результате чего стало возможным изготовление кристаллов диаметром 3 дюйма (75 мм) в достаточно больших количествах. Но для большинства областей применения они были все еще слишком дорогими.

НА СТАРТ С ДВУМЯ ТИПАМИ УСТАНОВОК

Сегодня стандартом являются 4- и 6-дюймовые (100- и 150-мм) установки. В зависимости от области применения, из монокристаллических слитков длиной до 3 см можно вырезать от 20 до 40 пластин. Компания PVA TePla AG представляет на этом растущем рынке установки двух типов. Наряду с установкой SiCube, в 2013 году была внедрена модель baSiC-T, созданная специально с учетом современных условий применения и требований в области силовой электроники (рис.4). Она работает по методу PVT (физический перенос из газовой фазы) и позволяет

производить кристаллы SiC диаметром до 6 дюймов (150 мм). При этом высококачественные кристаллы карбида кремния создаются за счет сублимации исходного порошка при высоких температурах. Достоинства установки baSiC-T – модульная конструкция, низкие эксплуатационные расходы и высокая степень автоматизации. Это уже оценили многие клиенты в Европе и Азии.

Почти 40% всего энергопотребления приходится на электрическую энергию. Львиную долю (около 50%) потребляют электроприводы. За ними следуют светотехнические установки, системы отопления и охлаждения, а также информационные технологии, доля которых соответственно равна 19, 16 и 14%. Перспектива значительного сокращения энергопотребления за счет использования усовершенствованных материалов, например карбида кремния, разумеется, способствует росту спроса на него. Кроме того, карбид кремния успешно применяется на всех растущих рынках: возобновляемые источники энергии, "умные" электросети, электромобили и светодиодная техника. Эти мегатенденции, безусловно, сохранят свои ведущие позиции и в будущем. Их "двигателем" является рост цен на электроэнергию. Поэтому неудивительно, что специалисты прогнозируют рост рынка карбида кремния в следующем десятилетии почти в десять раз. В долгосрочной перспективе такие установки, как baSiC-T или SiCube компании PVA TePla AG, будут применяться для экономичного производства пользующегося спросом материала.

NORSTEL – ПИОНЕР В ПРОИЗВОДСТВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Рассказывает ведущий специалист отдела роста кристаллов
Александр Эллисон



Компания Norstel AB является производителем пластин из карбида кремния и эпитаксиальных структур на их основе. Она основана в 2005 году в результате выделения части компании по производству кремниевых пластин Okmetic. Однако история компании уходит корнями в 1993 год, когда началось сотрудничество между фирмами АВВ, Okmetic и Университетом Линчёпинга с целью разработки SiC-подложек и устройств для электропитания.

Завод Norstel был торжественно открыт в августе 2006 года в Норчёпинге (Южная Швеция). Это предприятие тщательно спроектировано и оснащено самой современной инфраструктурой,

технологическими средствами и контрольно-измерительным оборудованием. Это делает его одним из наиболее современных и совершенных промышленных объектов в мире, нацеленных исключительно на производство монокристаллических SiC-материалов. Персонал компании представлен 35 высококвалифицированными сотрудниками.

Основными технологиями Norstel для выращивания монокристаллов SiC являются высокотемпературное химическое парофазное осаждение (High Temperature Chemical Vapour Deposition – HTCVD) и транспорт пара к субстрату (Physical Vapour Transport – PVT), а для выращивания эпитаксиальных слоев – химическое

парофазное осаждение методом горячей стенки (hot-wall CVD). Запатентованный способ HTCVD был разработан в 1995 году. Концепция HTCVD основывается на постоянной подаче очищенных газообразных прекурсоров на затравочный кристалл, нагретый до достаточно высокой температуры (>1900°C), чтобы обеспечить возможность эпитаксиального выращивания для массового производства. Применение очищенных газов в качестве исходного материала при температурах выше 2000°C в методе HTCVD позволяет выращивать кристаллы высокой степени чистоты для производства полупроводниковых подложек и цветных камней.

Norstel также разработал технологию на основе хорошо известного метода PVT (транспорт пара к субстрату, также известный как сублимация на затравке), при котором поликристаллический порошок SiC используется в качестве исходного материала для производства подложек n-типа для силовых устройств.

Одним из учредителей Norstel является Александр Эллисон, работающий в сфере производства карбида кремния с 1994 года. Сегодня А.Эллисон руководит отделом роста кристаллов. Он рассказал о своей компании, а также об основных особенностях технологии SiC, приборов на его основе и перспективах этого материала.

Проект SiC компании Norstel был запущен в 1993 году, более 20 лет назад. Как вам в то время удалось осознать, что карбид кремния может стать важным материалом в полупроводниковой промышленности?

Ну, SiC имеет длинную историю. Уильям Шокли, соавтор изобретения транзистора – изобретения, положившего начало полупроводниковой промышленности, – предсказал потенциал SiC в качестве полупроводникового материала еще в 1950-х годах. Однако выяснилось, что SiC изготовить куда сложнее, чем кремний. В 1980-х интерес к карбиду кремния снова возрос после изобретения в СССР способа сублимации на затравке (1978, метод ЛЭТИ – прим. ред.), а также успешного запуска коммерческого производства SiC-пластин

в США. Когда в Швеции, в университете Линчёпинга, запустили исследовательскую программу по SiC-материалам мирового класса в сотрудничестве с компаниями ABB и Okmetic, многие из нас были сильно мотивированы тем, что SiC – лучший материал, когда речь заходит об энергосбережении. В 1990-х в Университете Линчёпинга была разработана технология химического парофазного осаждения методом "горячей стенки", которая обеспечивала формирование лучших эпитаксиальных слоев для силовых устройств.

Сочетание успехов в области SiC-технологии и растущей промышленной поддержки ясно показывало, что SiC является важным полупроводниковым материалом.

Использовался ли в то время карбид кремния вообще?

Тогда этот материал еще не применялся для производства силовых и микроволновых устройств, однако исследовательские проекты в этих направлениях уже велись в Европе, США и Японии – как в университетах, так и в компаниях, занимающихся производством полупроводниковых приборов. Однако уже тогда монокристаллический SiC использовался для подложек светодиодов в промышленных

ТРАНСПОРТ ПАРА К СУБСТРАТУ (PHYSICAL VAPOR TRANSPORT – PVT)

Выращивание кристаллов методом сублимации на затравке – метод, также известный как транспорт пара к субстрату. Его историческое название – модифицированный метод Лели. Сегодня процесс сублимации на затравке – стандартная технология промышленного выращивания монокристаллического карбида кремния. Идея метода основана на сублимации поликристаллического SiC из исходного материала (измельченный порошок поликристаллического SiC) при высокой температуре (1800–2600°C) и низком давлении. Возникающие при этом газы благодаря термодинамическим механизмам переноса достигают "холодной" затравки, где десублимируют – так происходит рост кристалла. Затравочный кристалл обычно находится в верхней части тигля, чтобы предотвратить загрязнение падающими частицами.

масштабах. Такая ситуация сохранялась до 2001 года, когда на рынке появилось первое поколение мощных выпрямителей на основе SiC.

С другой стороны, поликристаллический карбид кремния долгое время использовался для производства абразивных материалов и покрытий.

Какие основные преимущества карбида кремния можно выделить по сравнению с кремнием? Каковы свойства этого материала?

Карбид кремния более эффективно использует электрическую энергию по сравнению с кремнием за счет снижения потерь тока. У SiC намного более высокое напряжение пробоя, что позволяет производить устройства с более низким сопротивлением во включенном состоянии, с меньшими размерами кристаллов и с более низкими потерями при переключении, чем у полупроводниковых приборов на основе кремния. Обладая более высокой теплопроводностью, чем медь, SiC обеспечивает более эффективное охлаждение. Также SiC тверже, чем Si (он обладает твердостью, сопоставимой с алмазом), а кристаллы SiC высокой степени очистки обладают непревзойденными оптическими свойствами, поэтому их используют в ювелирных изделиях.

Диаметр промышленных кристаллов SiC намного меньше кристаллов Si. Каковы основные проблемы при производстве SiC?

Что касается размеров, рынок движется к тому, чтобы перейти с 4-дюймовых пластин SiC к 6-дюймовым. Это является важной вехой. Кроме того, до сих пор диаметр SiC-пластин увеличивался с такой же скоростью, что и Si-пластин, но со смещением на 30 лет. Однако в отношении длины кристаллов ситуация сложнее – кристаллы SiC гораздо короче, чем Si. Как правило, длина выращенного кристалла SiC – всего несколько сантиметров, тогда как длина кристаллов кремния, выращенных методом Чохральского, составляет несколько метров. Это связано с тем, что скорость выращивания SiC – менее

миллиметра в час – гораздо ниже, чем Si (от миллиметра в минуту).

Одна из проблем выращивания кристаллов SiC – их нельзя растить из расплава. Действительно, SiC не существует как стехиометрический расплав, если давление не превышает 10^5 атмосфер, а температура – 3000°C . Таких параметров процесса очень сложно достичь в промышленном производстве. Вместо этого SiC осаждается из газовой фазы при температурах свыше 2000°C . Это означает, что на текущий момент мы не можем использовать высокоскоростной метод роста кристаллов SiC из расплава и вынуждены применять методы парофазного осаждения. Низкая скорость выращивания и небольшая длина кристалла объясняет более высокую стоимость производства SiC-пластин по сравнению с кремниевыми подложками.

Другим серьезным препятствием в производстве высококачественного монокристаллического SiC является отсутствие техники снижения плотности дислокаций на этапе начала ростового процесса, в противоположность наличию такой в процессах роста по методу Чохральского. В промышленном ростовом процессе SiC диаметр и плотность дислокаций кристалла находятся в строгой зависимости от диаметра и плотности дислокаций в затравочном кристалле. Индустрия требует увеличения диаметра пластин и их качества. Для решения этой задачи необходима разработка надлежащих процессов увеличения диаметра затравочных кристаллов и снижения плотности дислокаций.

И последнее – полиморфизм кристаллического SiC очень высок, при кристаллизации может образовываться около 200 различных политипов. Но только некоторые из них (как, например, 6H и 4H) пригодны для полупроводниковых подложек. Представляете, как много интересных задач стоит перед производителями кристаллов!

Каковы основные применения SiC, помимо ювелирной промышленности?

Сегодня в полупроводниковой отрасли в промышленных масштабах

Искусственный драгоценный камень – карбид кремния (два карата) в бриллиантовой огранке



производятся быстропереключающиеся SiC-диоды Шоттки, которые используются, в частности, в корректорах коэффициента мощности, в фотоэлектрических инверторах, в источниках бесперебойного питания. В силовых модулях используются и SiC МОП-транзисторы, а также полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом. На SiC-подложках производятся СВЧ-транзисторы, используемые в радиолокации и устройствах беспроводной связи.

Сегодня объем рынка SiC-устройств составляет около 75 млн. долл. и ежегодно растет примерно на 25%. Он будет расти еще быстрее, когда SiC-диоды и транзисторы начнут применяться в производстве таких устройств, как ветрогенераторы, промышленные электродвигатели, интеллектуальные сети электропередачи, гибридные автомобили и электромотоциклы. Это наиболее впечатляющие области применения, в которых SiC позволит достичь недостижимых ранее уровней эффективности.

Звучит так, что SiC ожидает светлое будущее?

Да, особенно если производители SiC-подложек продолжают увеличивать диаметр пластин, понижать число дефектов и стоимость. Я надеюсь, что компания PVA TePla, являясь поставщиком ростовых установок кристаллов, поспособствует скорейшему наступлению этого будущего. В себестоимости SiC-прибора стоимость эпитаксиальной SiC-подложки составляет примерно 50% – по сравнению с несколькими процентами в случае Si. Конечно, эта более высокая цена компонента компенсируется на уровне готовых систем, однако производительность и стоимость

являются очень важными показателями на рынке.

Какую роль играют системы выращивания кристаллов производства PVA TePla в стратегии компании Norstel?

Стратегия Norstel основывается на трех основных технологиях: эпитаксия, выращивание кристаллов по методу HTCVD для полужолирующих подложек и ювелирных изделий, а также выращивание кристаллов по методу PVT для подложек n-типа. Являясь поставщиком оборудования для основных технологий, компания PVA TePla играет ключевую роль для наших разработок и производства. Наши ростовые установки работают 24 часа в сутки, 7 дней в неделю, практически весь год без перерывов. Они являются опорой нашего завода, а потому должны отличаться повышенной надежностью, особенно с учетом воздействия высоких температур при выращивании кристаллов SiC.

Как вы можете охарактеризовать сотрудничество между компаниями PVA TePla и Norstel?

Наше сотрудничество началось в 2005, когда мы строили свой завод. Мы искали промышленного, гибкого производителя ростовых установок, который мог бы помочь нам в создании надежных экономичных печей, адаптированных под наши нужды. В сотрудничестве мы с нуля создали установки SiCube и baSiC-T. Мы были очень удовлетворены гибкостью и профессионализмом, проявленными сотрудниками PVA TePla. Объединение усилий в сочетании с нашими ноу-хау и интеллектуальной собственностью было и остается ключом к нашему успеху.

Вы также производите ювелирные кристаллы SiC. Если купить жене ожерелье из искусственных SiC-кристаллов вместо алмазов, заметит ли она разницу? Каковы их блеск и сверкание?

Ее подруги заметят, что ожерелье блестит и сверкает ярче других, оно будет просто восхитительным. Она поймет, что вы сделали ей особенный подарок.

Интервью провел д-р Герт Физан

