

## Технология низкотемпературного спекания в силовых модулях

Кристиан ГЕБЛ (Christian GÖBL)  
Перевод: Андрей КОЛПАКОВ  
Andrey.Kolpakov@semikron.com

**Разработка устройств большой мощности, к которым относятся транспортные и промышленные приводы, а также преобразователи энергетических станций, требует применения силовых модулей, отличающихся высокой надежностью и отличными электрическими и тепловыми характеристиками. Для удовлетворения этих требований необходимо широкое внедрение новых технологий силовой электроники, исключающих применение паяных соединений. Наиболее перспективно использование модулей прижимного типа с пружинными сигнальными контактами и применение технологии спекания. Перед департаментом новых технологий SEMIKRON была поставлена задача модернизации и внедрения этого производственного процесса для изготовления силовых модулей.**

Технология спекания серебра использовалась для установки полупроводниковых чипов на изолирующие подложки с 1994 г. Хорошие электромеханические свойства и высокая надежность серебряных соединений были известны и раньше, они в течение многих лет исследовались, а затем обсуждались на многочисленных международных конференциях. Однако широкому распространению подобной технологии препятствовала необходимость использования специального оборудования и их низкая пригодность для массового промышленного производства.

Спеченное соединение чипов с керамической подложкой образуется с помощью пасты, состоящей из зерен серебряного порошка. В определенных условиях частицы серебра формируют прочную однородную структуру, создающую высоконадежное соединение между элементами контактной пары.

На рис. 1 показан внешний вид порошкового серебряного слоя до и после спекания. Для получения однородной структуры очень важно, чтобы каждая частица исходного материала была окружена специальной органической покрывающей субстанцией. Принцип процесса спекания прост: паста необходимой толщины размещается между соединяемыми элементами, после чего данная конструкция подвергается воздействию определенной температуры и давления в течение некоторого промежутка времени. В результате образуется однородный спеченный слой, отличающийся очень стабильными термомеханическими свойствами.

Однако приведенное описание базовой технологии является крайне упрощенным и подходит только для общего понимания. На поиск механизма спекания, необходимого для массового промышленного производства, ушло несколько лет. Паста, обеспечивающая

необходимые контактные свойства в условиях серийного применения и пригодная для установки полупроводниковых чипов на керамическое основание, была разработана, испытана и внедрена компанией SEMIKRON. Фирмой также было разработано технологическое оборудование, позволяющее производить мультичиповые DCB-платы размером до 5×7". Спексающий пресс способен обеспечивать и регулировать давление, необходимое для выполнения конкретной операции. Соответствующим образом готовится и персонал, обеспечивающий работу оборудования.

Процесс спекания позволяет сформировать сверхпрочное соединение между кристаллами и керамикой, крайне высокая стойкость спеченного слоя к термоциклированию была подтверждена в ходе специальных испытаний на надежность. Еще одним важным преимуществом технологии спекания является исключение процесса промывки, необходимого для очистки DCB-платы от остатков припоя.

При спекании точность позиционирования чипов на изолирующей подложке, достижимая на современном оборудовании, составляет 50 мкм, при использовании паяных соединений точность установки не превышает 400 мкм. Этот факт говорит о том, что для обеспечения процесса спекания требуется меньше фотошаблонов (рис. 2), а качество и плотность нанесения изображения получается гораздо выше.

Необходимо отметить, что толщина спеченного слоя в 4,5 раза меньше, чем паяного. При этом его теплопроводность выше в 4 раза, что обеспечивает отличные тепловые характеристики подобного соединения и высо-

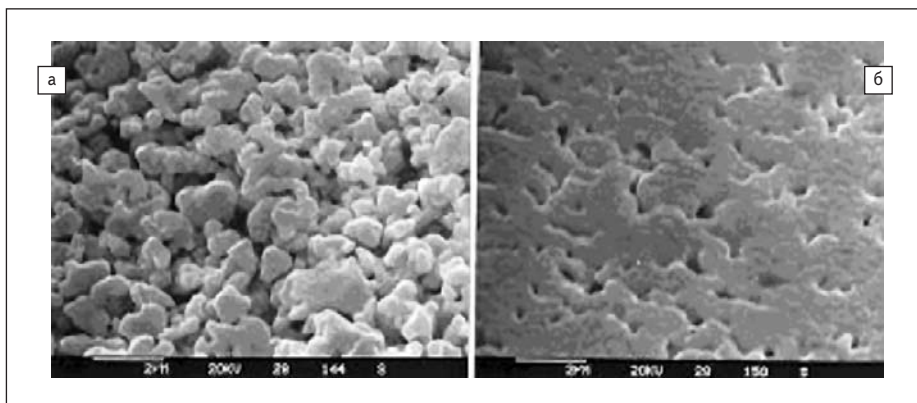


Рис. 1. Серебряный диффузионный слой: а) до процесса спекания; б) после процесса спекания

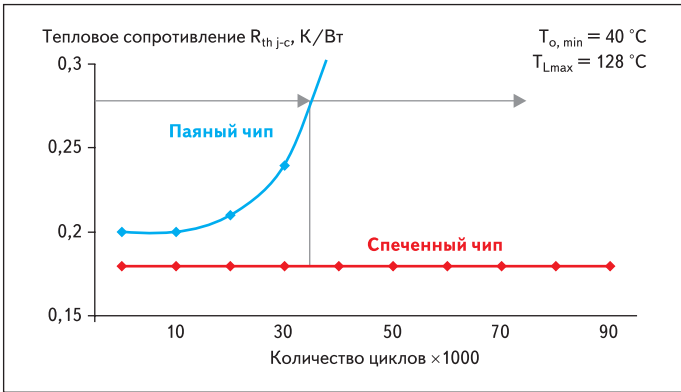


Рис. 2. Стойкость к термоциклированию паяного и спеченного соединения чипов

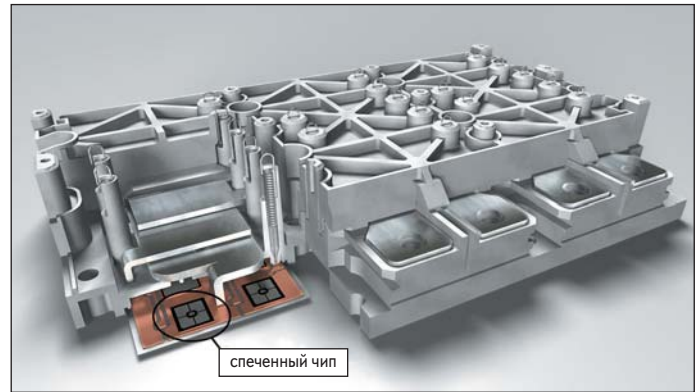


Рис. 3. Конструкция модуля нового поколения SKiM 63

Таблица. Свойства диффузионного спеченного слоя в сравнении со стандартными припоями. (Благодаря высокой температурной стабильности соединительных характеристик спеченный слой не подвержен эффекту старения.)

Параметр	Ед. изм	Ag (чистое серебро)	Ag (спеченный слой)	SnAg (паяный слой)	Кoeffициент улучшения
Температура ликвидуса	°C	961	961	221	4
Электропроводность	МСм/м	68	41	7,8	5
Теплопроводность	Вт/м·К	429	250	70	4
Плотность	г/см³	10,5	8,5	8,4	1
КТР	мкм/мК	19,3	19	28	1
Предел прочности на разрыв	МПа	139	55	30	2

кую стойкость к термоциклированию, в несколько раз превышающую этот показатель для стандартных технологий пайки. Объясняется это в первую очередь тем, что температура плавления серебра также примерно в 4 раза выше, чем у бессвинцовых припоев, широко используемых в настоящее время (таблица). Благодаря очевидному выигрышу от применения технологии спекания, компания SEMIKRON собирает широко внедрять эту инновацию в своем производстве и полностью отказаться от использования пайки.

### Практическое применение технологии спекания

Впервые технология спекания была использована при производстве модулей новейшего поколения SKiM 63/93, предназначенных для применения в приводах гибридного и электротранспорта мощностью 22–150 кВт. По сравнению со стандартными силовыми ключами с медной базовой платой и паяными терминалами стойкость к термоциклированию у компонентов новой генерации повышена более чем в 5 раз. В безбазовых модулях прижимного типа SKiM все электрические (сигнальные и силовые) и тепловые контакты обеспечиваются только за счет прижима (рис. 3).

Зоны теплового контакта DCB-платы расположены непосредственно рядом с чипами IGBT и диодов, что обеспечивает максимально однородное распределение тепла и его равномерную передачу на радиатор. Использование инновационных технологий сборки и отсутствие базовой платы обеспечивают модулям серии SKiM уникальные тепловые

характеристики и высокую стойкость к воздействию активных и пассивных термоциклов. Особенностью конструкции SKiM — прижимные силовые терминалы, пружинные сигнальные контакты и чипы, установленные на DCB-подложку методом спекания, — показаны на рис. 3.

Модули семейства SKiM являются первыми в мире силовыми ключами, в которых полностью устранены паяные соединения. Использование прижимной «безбазовой» конструкции и внедрение технологии низкотемпературного спекания позволили в 5 раз повысить стойкость компонентов данного типа к термоциклированию. Благодаря этому силовые ключи нового поколения являются наилучшим выбором при разработке современных транспортных приводов.

Последние 15 лет непрерывно происходило повышение рабочей температуры сило-

вых чипов. Современные кремниевые чипы, такие как IGBT 4/ CAL 4, способны надежно работать при температуре 175 °C. Применение карбида кремния в будущем позволит еще больше расширить рамки температурного диапазона, поскольку такие кристаллы могут работать до 300 °C. Для того чтобы обеспечить функционирование модулей при таких перегревах, потребуется кардинально пересмотреть существующие методы сборки силовых ключей. Технология спекания, внедренная SEMIKRON, способна решить эту задачу и обеспечить расширение диапазона рабочих температур без снижения надежности. Это утверждение основано на том факте, что температура плавления спеченного слоя составляет 961 °C, что примерно на 740 °C выше, чем у припоев, используемых в промышленности в настоящее время. Многочисленные испытания модулей нового типа подтвердили, что спеченные соединения имеют чрезвычайно высокую стабильность характеристик и не подвержены эффекту старения (рис. 4).

За последние годы чрезвычайно расширилась область применения силовых полупроводниковых модулей. В прошлом подобные компоненты могли надежно работать только в стационарных условиях, при определенных режимах и способах охлаждения. Современные силовые ключи находят применение в устройствах с предельно тяжелыми режимами

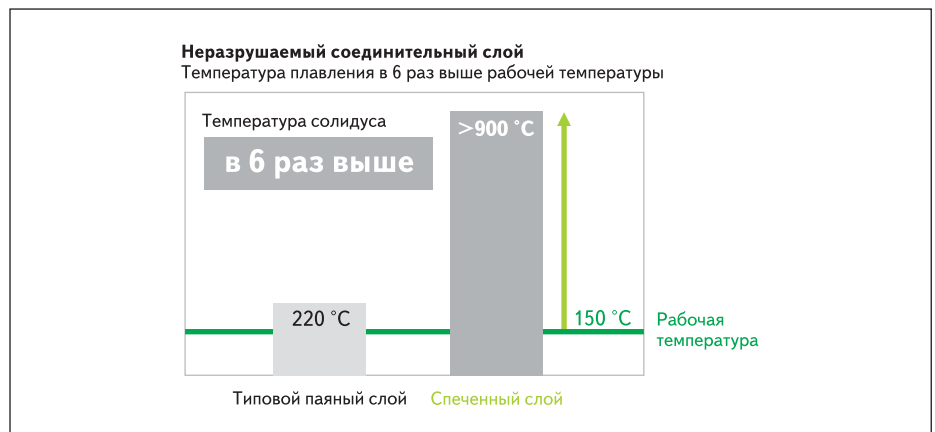


Рис. 4. Температура плавления спеченного соединительного слоя в 6 раз выше максимальной рабочей температуры

эксплуатации, к которым относятся приводы транспортных средств с одноконтурным жидкостным охлаждением. Основной задачей производителей электронных компонентов стало создание полупроводниковых модулей, способных функционировать в таких условиях с предельной токовой нагрузкой.

### **Настоящее и будущее технологии спекания**

Технология низкотемпературного спекания, усовершенствованная SEMIKRON и адаптированная для соединения полупроводни-

ковых чипов с керамикой, позволяет повысить отдачу мощности силовых ключей, увеличить их надежность и срок службы. Впервые данный метод был использован при разработке последнего поколения модулей SKiM, предназначенных для применения в приводах электрических и гибридных транспортных средств.

Новая технология будет использована при производстве новой генерации интеллектуальных силовых модулей SKiP 4, являющихся самыми мощными IPM на рынке силовой электроники. Предельный ток, который для компонентов 3-го поколения составляет 2400 А,

будет повышен до 3600 А. Безбазовая прижимная конструкция этих силовых ключей в сочетании со спеканием кристаллов позволит этим компонентам найти применение в преобразователях ветряных и солнечных энергетических станций, а также приводах наземного электротранспорта и метро. Преимущества, обеспечиваемые за счет использования технологии спекания в силовых ключах, очевидны: повышенная более чем в 5 раз стойкость к термоциклированию, неразрушаемое соединение чипов и DBC-подложки, а также высокая временная стабильность термомеханических характеристик. ■