

# Материалы со сменой агрегатного состояния: инновации в теплоотводе

**В электронике для повышения эффективности теплопередачи и снижения рабочей температуры устройства используются материалы теплового интерфейса (ТИМ). Они улучшают отвод тепла к радиатору, который рассеивает тепло в окружающую среду посредством конвекции. Спрос на улучшенное управление температурой в электронных устройствах постоянно растет, особенно в таких приборах, где в одном корпусе необходима как миниатюризация, так и высокая производительность. Сотрудник компании Electrolube China (Сучжоу) Бен Хан разработал новое поколение теплопроводных материалов со сменой агрегатного состояния (PCM), которые представляют собой практичные и эффективные альтернативы более традиционным решениям для управления температурным режимом, таким как неотверждаемые термопасты или смазки.**

Сергей Махлаков

msa@protehnology.ru

Материалы PCM способны изменять свое состояние при температуре фазового перехода, то есть переходят от твердого состояния к более жидкому при достижении температуры перехода. Это позволяет продукту адаптироваться к контурам поверхности, заполняя все пустоты и небольшие зазоры, такие как паста при нанесении, обеспечивая минимальную толщину линии соединения и минимальное тепловое сопротивление на границе раздела.

## Улучшение теплоотдачи

К типичным применениям, выигрывающим от повышения эффективности теплопередачи, относятся технологии, используемые в небольших электронных устройствах — смартфонах, игровых консолях, планшетах и т. д. Такие небольшие устройства выполняют множество задач с исключительной скоростью и для этого требуют повышенной мощности. Размер устройства предполагает, что тепло, выделяемое при увеличении мощности, отрицательно сказывается на производительности и/или долговечности самого устройства. Еще одна важная область, которая зависит от оптимизации управления температурой, — силовая электроника, широко распространенная в таких сферах, как распределение энергии, сенсорная техника, электромобили и мощные светодиоды, и это лишь некоторые из сфер применения. Выбор правильного ТИМ для данных направлений деятельности имеет решающее значение для долгосрочной надежности устройств.

Первоначальный выбор подходящих ТИМ для тестирования часто проводится на основе высокой объемной теплопроводности, что указывает на эффективность теплопередачи через сам ТИМ. Однако только объемная теплопроводность может создать ложное впечатление об ожидаемых характеристиках.

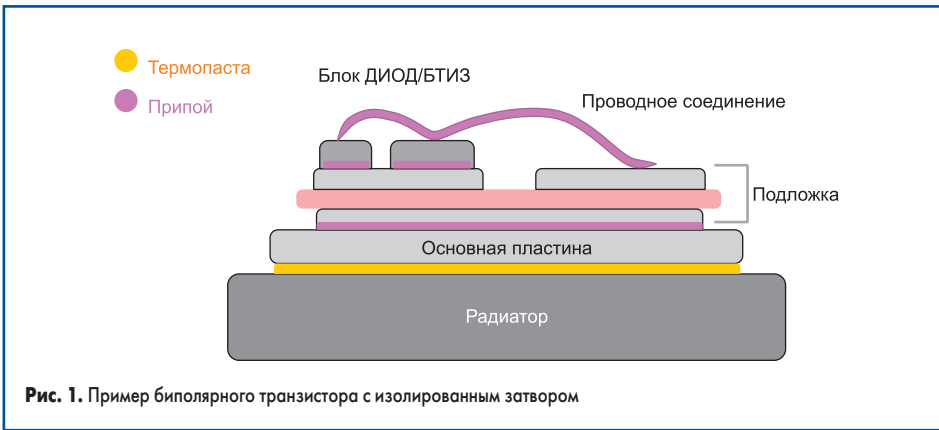
Когда испытания проводятся в условиях эксплуатации, низкое тепловое сопротивление устройства указывает на истинную эффективность теплопередачи ТИМ и может быть понято с помощью следующей формулы:

$$\text{Общее тепловое сопротивление устройства} = (BLT/K) + R_c$$

где  $BLT$  — толщина линии соединения ТИМ;  $K$  — объемная теплопроводность ТИМ;  $R_c$  — полное сопротивление теплового контакта на интерфейсах. Эта формула доказывает, что объемная теплопроводность важна, но только в сочетании с толщиной нанесенного ТИМ и однородностью ТИМ по интерфейсным поверхностям. Формула подчеркивает, почему термопасты продолжают оставаться популярным выбором, предлагая хорошее смачивание контактных поверхностей для низкого контактного сопротивления, а также минимальную толщину линии соединения, устраняя шероховатость поверхности сопрягаемых поверхностей. Тем не менее PCM были введены для обеспечения аналогичных харак-

**Таблица.** Сравнение теплопроводности и теплового сопротивления различных типов материалов

Тип продукта	Наименование	Теплопроводность (ISO22007-2)	Тепловое сопротивление (ASTM D5470)
PCM	TRM550	5,5	0,008
	TRM350	3,5	0,017
Термопаста	HTC	0,7	0,038
	HTCP	1,3	0,067
	HTSP	2,2	0,046
Термогель	HTCPX	2,5	0,045
	TCP400	3,6	0,189



теристик термопаст в этих областях, в то же время улучшая такие характеристики, как эффект откачки и термическая стабильность с течением времени.

### Откачка

Биполярные транзисторы с изолированным затвором, или БТИЗ (рис. 1), широко используются в силовой электронике и служат хорошим примером для понимания эффектов откачки. Они состоят из теплового пакета, который включает материалы с разными коэффициентами теплового расширения (СТЕ) и различной объемной теплопроводностью, что приводит к градиентам температуры по всему БТИЗ.

БТИЗ и большинство устройств в целом будут проходить через некоторый тепло-

вой цикл, даже если это столь же просто, как включение и выключение устройства. Когда происходят изменения температуры, все материалы в устройстве расширяются или сжимаются до определенной степени, в зависимости от температуры, которой устройство достигает во время работы, и в конечном итоге от температур, которых достигают отдельные компоненты. Коэффициент теплового расширения варьируется от компонента к компоненту, поэтому сжатие и расширение могут происходить с разной скоростью, в результате чего возникают такие неблагоприятные эффекты, как откачка.

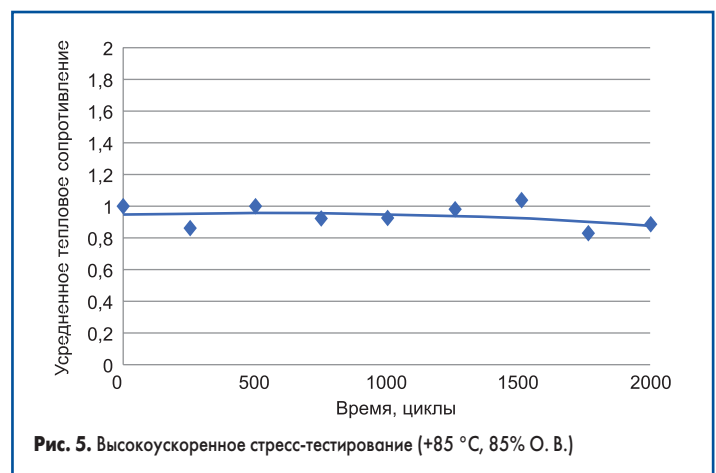
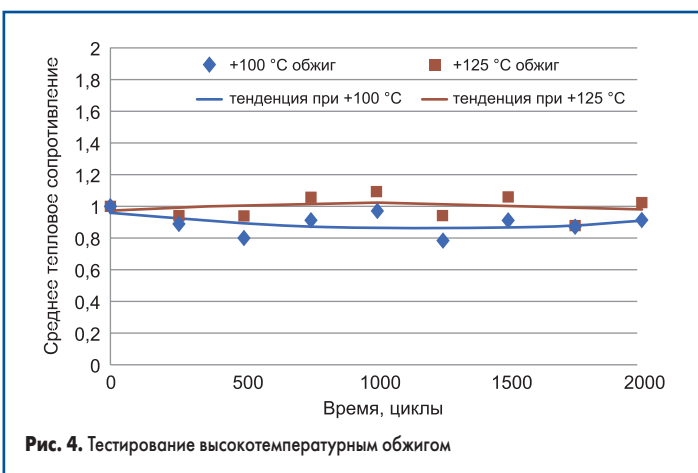
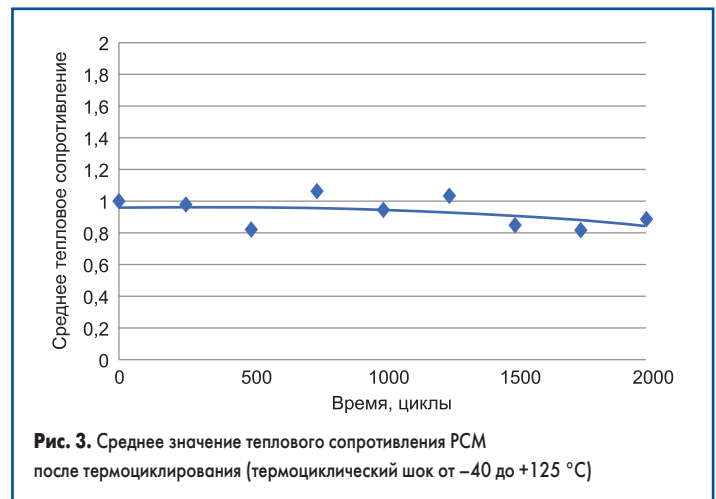
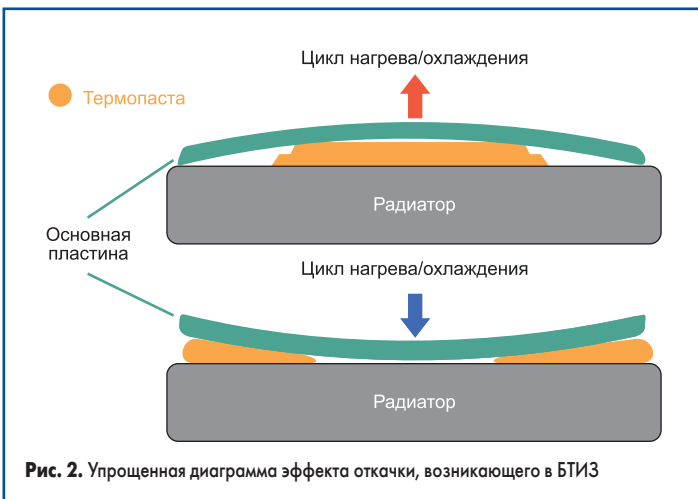
При решении проблем с откачкой важно понимать условия и используемые материалы. Откачка происходит на границе раздела сопрягаемых подложек, движущихся относительно друг друга при изменении температуры. Это

приводит к появлению сдвига на поверхности, который может вызвать изменения формы материала и перемещение этого материала из исходного положения (рис. 2). РСМ изменяют свое состояние выше и ниже температуры фазового перехода, поэтому они могут противостоять эффектам откачки и оставаться более стабильными в течение многих тепловых циклов (рис. 3).

### Другие тесты

Циклы питания также приводят к изменениям температуры устройства и, в свою очередь, температуры интерфейса. Устройства с питанием тоже демонстрируют собственный тепловой цикл во время эксплуатации, который может усугубляться внешними условиями окружающей среды. Какой бы ни была причина, тепловые изменения приведут к той или иной форме эффекта откачки, а потому стабильность выбранного материала в условиях конечного использования имеет для оценки решающее значение.

Поскольку требования к применению определяют ожидаемые условия окружающей среды, обычно проводится ряд испытаний с нестандартным набором условий. Подобный тест обычно выполняется в аналогичных рамках, демонстрируя термическую стабильность материала после циклического изменения температуры, высокотемпературного обжига (рис. 4) и HAST (рис. 5) — высокоускоренного стресс-тестирования, и используют значения



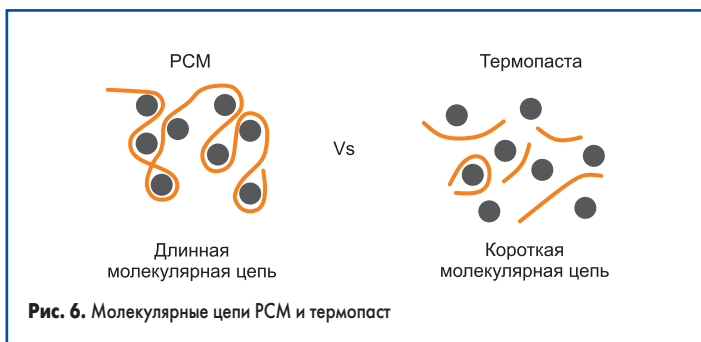


Рис. 6. Молекулярные цепи PCM и термопаст

термического сопротивления в качестве показателя стабильности. Как видно из приведенных графиков, ускоренное тестирование обеспечивает лучшее понимание срока службы материала по сравнению со стандартными тестами на цикл питания, проводимыми в условиях, точно соответствующих реальной эксплуатации.

### Важность стабильности

Стабильность ТИМ можно рассматривать как визуальный тест, проще говоря, здесь имеется в виду, остался ли продукт на месте после выполнения программы тестирования? Если материал интерфейса перемещается во время теплового испытания, либо из-за откочки, либо под действием силы тяжести в вертикальной ориентации, вероятно, что характеристики продукта также изменятся. Простые тесты могут включать нанесение продукта между двумя подложками и оценку любого движения или разделения материала во время испытания на тепловой удар. Такой простой тест может подчеркнуть важность применения теплопроводного материала, особенно в случае термопасты. Эти неотверждающиеся продукты предназначены для нанесения в виде тонких пленок толщиной около 50–100 мкм, но часто используются при гораздо большей толщине, что может привести к отделению или перемещению пасты относительно легко после того, как происходит сдвигающее действие откочки и общая эффективность теплопередачи снижается. Материал с фазовым переходом не подвержен такому воздействию откочки и демонстрирует большую физическую стабильность, чем термопаста.

В более широком контексте выбора материала и его стабильности важно упомянуть, какие альтернативные подходы может рассмотреть пользователь. Компания Electrolube представила несколько новых продуктов, которые обладают преимуществами традиционных решений по управлению температурным режимом, но при этом отличаются стабильностью, необходимой для применения в условиях высоких температурных циклов. Они обеспечивают только поверхностное отверждение и образуют устойчивый состав, который легко удалить, если потребуется доработка. Существуют и другие традиционные продукты, обеспечивающие полное отверждение с высоким уровнем стабильности, в частности однокомпонентные силиконы или двухкомпонентные эпоксидные смолы, однако доработка этих продуктов намного сложнее, и они вряд ли смогут достичь низкого термического сопротивления традиционной термопасты.

Независимо от того, как выглядит материал интерфейса после этих испытаний, наиболее важным моментом является то, остается ли тепловое сопротивление интерфейса низким и постоянным, поскольку это основной фактор, оказывающий влияние на производительность устройства.

PCM показали постоянное тепловое сопротивление при использовании в качестве материала интерфейса в различных условиях, поэтому их выбирают за стабильность и способность поддерживать низкое тепловое сопротивление. Но почему в столь сложных условиях они работают намного лучше, чем традиционная термопаста?

Материал с фазовым переходом изменяет свое состояние от твердого до более мягкого выше заданной температуры, обычно около +50 °С. Эта функция достигается за счет использования полимерного материала, а не базового масла в качестве основы рецептуры теплопроводного материала. Полимерные цепи обеспечивают повышенную стабильность дисперсии термического наполнителя как в твердом, так и в раз-

мягченном состоянии. Это приводит к повышенной теплопроводности и долгосрочному низкому термическому сопротивлению, поскольку материал сохраняется в более стабильном состоянии на протяжении всего срока службы в устройстве. С другой стороны, термопасты состоят из масел с более короткими молекулярными цепями (рис. 6), которые обеспечивают отличное смачивание при первоначальном нанесении, но со временем могут вызывать проблемы, включая откочивание, высыхание и просачивание масла.

Еще одно важное свойство PCM — их способность накапливать и выделять энергию при изменении состояния. Это приводит к некоторому поглощению тепла и защищает устройство от резких скачков температуры, например из-за быстрого изменения мощности.

При рассмотрении того, какое применение подходит для PCM, важно иметь правильное представление о температурах и температурных профилях, которым устройство будет подвергаться во время работы. Например, если устройство, подвергающееся термоциклированию или работе при постоянно стабильной температуре, будет определять, какой тип материала с наибольшей вероятностью обеспечит максимальную производительность, то при использовании PCM необходимо учитывать дополнительный фактор температуры фазового перехода. Если непрерывная рабочая температура устройства ниже температуры фазового перехода, продукт не будет работать на ожидаемом уровне.

### Представление новых продуктов

Компания Electrolube недавно добавила в свой портфель теплопроводных материалов два новых PCM — ТРМ350 и ТРМ550. ТРМ350 имеет теплопроводность 3,5 Вт/м·К и становится работоспособным при температуре примерно +50 °С. При этой температуре «размягчения» он меняет состояние, становясь более подходящим для эксплуатации, сводя к минимуму тепловое сопротивление на границе раздела и улучшая теплопередачу. После охлаждения он возвращается в исходное состояние. Усовершенствованный состав материала обеспечивает минимальное контактное термическое сопротивление.

ТРМ550 имеет более высокую теплопроводность 5,5 Вт/м·К и температуру размягчения +45 °С. Как и ТРМ350, ТРМ550 не создает беспорядка благодаря своим тиксотропным характеристикам, которые предотвращают поток за пределы интерфейса. Оба PCM можно перемешивать, и на каждый килограмм материалов можно обслуживать больше приложений, что снижает производственные затраты.

Эти новые PCM не содержат силикона, имеют диапазон рабочих температур –40...+125 °С и соответствуют требованиям RoHS. И ТРМ350, и ТРМ550 пригодны для трафаретной печати, и хотя они действительно содержат небольшое количество растворителя для улучшения смачиваемости при нанесении, он быстро испаряется после нанесения, оставляя на подложке материал в твердой фазе.

### Заключение

PCM, нагретые до температуры, превышающей их температуру фазового перехода, превращаются в тиксотропные жидкости, которые работают не хуже, а иногда и лучше, чем традиционные термопасты. Кроме того, их низкая температура фазового перехода обеспечивает низкое тепловое сопротивление в широком диапазоне температур, формируя минимальную толщину линии склеивания с улучшенной стабильностью и сопротивлением откочке. Методы применения PCM для крупносерийного производства подразумевают, что большинство из них можно использовать в существующих технологических процессах с минимальными изменениями, сохраняя многие преимущества традиционных термопаст. Поскольку они обладают большей долговременной стабильностью по сравнению с термопастами, PCM предпочтительны для сложных применений, где ожидаемый срок службы и надежность продукта могут иметь решающее значение, — это, например, автомобильная электроника или удаленные инверторы энергии ветра. Традиционные термопасты/смазки останутся популярным выбором, хотя для некоторых применений, особенно тех, что требуют большей долговременной стабильности, материал с фазовым переходом, вероятно, станет лучшим вариантом.