

Особенности использования золота и алюминия в мощных СВЧ-транзисторах, работающих в импульсном режиме

Станислав ДИДИЛЕВ
sd@etsc.ru

В середине 1970-х годов в США в рамках программы создания РЛС раннего оповещения PAVE PAWS (Precision Acquisition Vehicle Entry Phased Array Warning System — точное определение местоположения подвижного объекта на основе системы предупреждения с фазированной решеткой) широко применялись мощные СВЧ-транзисторы, используемые в импульсном режиме. Однако через некоторое время (1–2 млн импульсов) данные транзисторы стали массово выходить из строя. Причину удалось определить лишь спустя несколько месяцев кропотливых исследований: алюминиевые соединительные проводники внутри транзисторов разрывались, что приводило к отказу. Сначала параметры транзистора ухудшались незначительно, а затем этот процесс лавинообразно ускорялся. Во многом момент отказа зависел от условий работы конкретного транзистора, что существенно усложнило анализ причины неисправности. В результате было упущено много времени и выброшен на ветер не один миллион долларов.

Приведенная ситуация является одним из ярких примеров того, как незнание специфики применения того или иного металла в конструкции транзистора приводит к быстрому выходу из строя последнего. Самое интересное заключается в том, что данная проблема вновь стала актуальной для разработчиков, использующих в импульсном режиме мощные СВЧ-транзисторы, выполненные по CMOS (КМОП) технологии.

Причина кроется в том, что некоторые крупные производители стали выпускать СВЧ-транзисторы, пользуясь тем же техпроцессом (КМОП), что и при производстве обыкновенных микроконтроллеров, не в полной мере учитывая специфику использования данных транзисторов в импульсных применениях.

Каким же образом надежность работы транзистора зависит от входящих в его структуру металлов? Давайте попробуем разобраться.

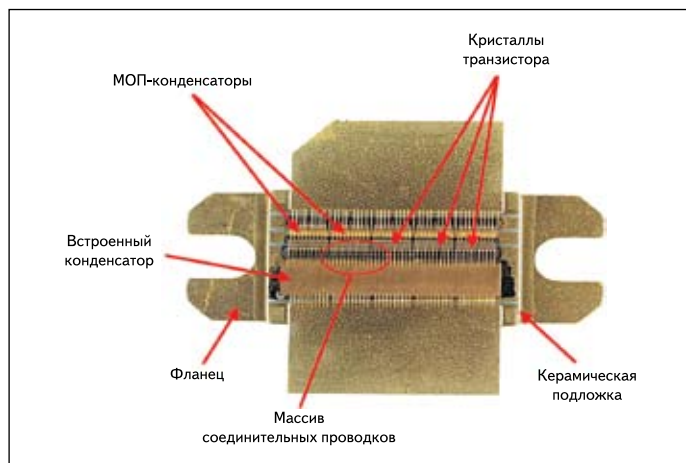


Рис. 1. Структура мощного СВЧ-транзистора Integra Technologies

Поможет нам в этом изображение внутренней структуры мощного СВЧ-транзистора Integra Technologies, приведенное на рис. 1 (в кристалле транзистора, соединительных проводниках и напылении корпуса и выводов используется только золото). Как нетрудно заметить, основными элементами структуры транзистора являются его кристалл, несколько МОП-конденсаторов, используемых в цепях согласования, а также массив соединительных проводников (100–200 проводников). Поскольку мы не рассматриваем ситуации, где выход транзистора из строя вызван нарушением его электрического или теплового режима, у нас остается одна, наиболее вероятная причина возникновения неисправности: нарушение электрического контакта между кристаллом транзистора и прочими элементами его структуры. Почему же происходит это нарушение? Для того чтобы ответить на этот вопрос, вначале необходимо совершить небольшой экскурс в историю.

В 1970-х годах каждый из производителей мощных СВЧ-транзисторов в США расхваливал применяемую им систему металлизации. Один из производителей (Power Hybrids Inc.) даже запустил рекламу, в которой говорилось, что «алюминий хорош лишь для стремянок и мебели для лужаек, но никак не для мощных СВЧ-транзисторов». Данная реклама была довольно близка к истине, поскольку еще не были решены проблемы, связанные с электромиграцией внутри структуры транзистора, использующей алюминий. В то время мощные СВЧ-транзисторы, работающие на частотах 1–3 ГГц и в структуру которых входил алюминий, сохраняли работоспособность лишь в течение нескольких недель, в лучшем случае — месяцев.

Однако время шло. Разработчики и производители транзисторов стали лучше понимать процесс электромиграции и научились с ним бороться (в основном за счет увеличения сечения токоведущих областей кристалла и использования специальных структур, например, таких как Al-Cu-Si). Это позволило создать транзисторы, с алюминием в структуре кристаллов, с теоретическим сроком службы (ограниченным эффектом электромиграции) порядка 50–150 лет. Затем на рынке появилась LDMOS-технология (смещенно-диффузная МОП-

Таблица. Сравнение свойств золота и алюминия применительно к использованию данных металлов в структуре транзисторов

Золото	Алюминий
Удельное сопротивление: $2,1 \times 10^{-6}$ Ом-см	Удельное сопротивление: $2,6 \times 10^{-6}$ Ом-см
Теплопроводность: 300 Вт/(м·К)	Теплопроводность: 220 Вт/(м·К)
Химически относительно инертно	Химически активен: легко окисляется и корродирует
Температура плавления: ~1063 °С	Температура плавления: ~660 °С
Атомная масса: 197	Атомная масса: 27
Отличный коэффициент заполнения ступеньки (step coverage — отношение толщины пленки на кромке элемента (шины) к толщине этой пленки на плоской поверхности элемента или подложки)	Не всегда хороший коэффициент заполнения ступеньки, плохая однородность травления
Отличная сопротивляемость усталости при изгибе (особенно важно для соединительных проводников)	Плохая сопротивляемость усталости при изгибе
КТР (коэффициент теплового расширения) — 14×10^{-6} /°С	КТР — 24×10^{-6} /°С
В конструкции транзистора используется только один металл, что полностью устраняет проблемы с интерметаллическими соединениями	В конструкции транзистора используются различные металлы (выводы, соединительные проводники внутри транзистора, сам кристалл). Возможны проблемы в интерметаллических соединениях

технология на основе кремния), и борьба золота с алюминием продолжилась с новой силой. Появились даже заявления о системах металлизации, совсем не использующих золото, как будто металлизация золотом стала чем-то устаревшим, хотя, конечно, это не так. Сейчас и золото, и алюминий активно применяются в кристаллах и элементах конструкции СВЧ-транзисторов. Просто необходимо тщательно учитывать особенности того или иного металла.

Если сравнивать электрические и физические свойства золота и алюминия (представленные в таблице), не принимая во внимание их стоимость, то, несомненно, золото окажется в выигрыше. Технологически более удобный, с хорошими электрическими и физическими свойствами, данный металл применяется в тех случаях, когда от транзистора требуется повышенная надежность. Алюминий же занимает свою нишу и используется в основном там, где не требуется высокая надежность, зато критична цена.

Теперь вернемся к причинам, вызывающим нарушение электрического контакта между кристаллом транзистора и прочими элементами его конструкции. Можно выделить две основных причины: разрушение соединительных проводников и проблемы в интерметаллическом соединении в точке крепления соединительного проводника на кристалле транзистора или других элементах его конструкции (например, выводах).

Что касается проводников, то причина их разрушения достаточно очевидна: при протекании по ним импульсного тока (приводя-

щего к их нагреву) они расширяются, а затем при остывании сжимаются. В случае если проводники выполнены из алюминия, который не обладает высокой стойкостью к усталости металла при изгибе, со временем (порядка 10^6 – 10^7 циклов) из-за механических напряжений они обрываются. В 2006 году группа инженеров из исследовательского центра Philips Semiconductors в Голландии опубликовала работу под названием “Prediction of high cycle fatigue in aluminum bond wires: A physics of failure approach combining experiments and multi-physics simulations” («Предсказание усталости материала алюминиевых соединительных проводников при многократной циклической нагрузке: определение параметров процесса путем объединения экспериментальных данных и математического моделирования физических процессов»). В своей работе инженеры постарались проанализировать физику процесса и выявить основные факторы, приводящие к обрыву проводников, а также разработать математические модели, достоверно описывающие данный процесс. Эту работу сложно привести здесь целиком, поэтому ограничимся изложением ее основных моментов. Тем же из читателей, кто желает изучить эту работу более детально, стоит обратиться напрямую к первоисточнику [2].

В работе демонстрируется внутренний вид LDMOS-транзистора, и на его примере показывается, какие именно соединительные проводники подвержены обрыву из-за усталости материала (рис. 2). Также приводится профиль одного из соединительных проводников и демонстрируется, как он меняет

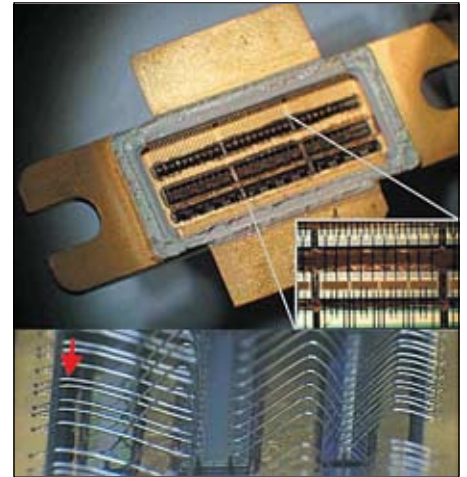


Рис. 2. Вид LDMOS-транзистора со снятой крышкой (фрагмент соединительных проводников, использующихся в транзисторе, увеличен; красной стрелкой отмечены проводники наиболее подверженные обрыву из-за усталости материала)

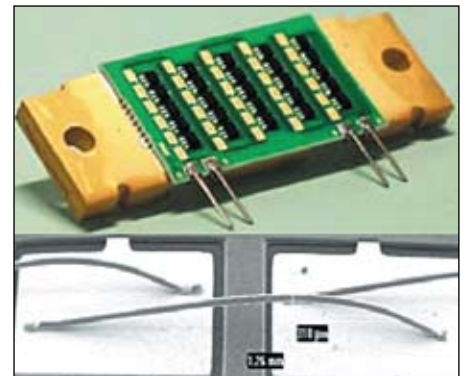


Рис. 4. Тестовая сборка, использованная для получения экспериментальных данных (крупно показан фрагмент сборки с разваренными алюминиевыми перемычками)

свою форму при нагревании под действием проходящего через него тока (рис. 3). Для получения экспериментальных данных была специально создана тестовая сборка (рис. 4), состоящая из 25 разваренных алюминиевых перемычек, соединенных последовательно и установленных на медное основание, которое, в свою очередь, крепилось к радиатору (рис. 5). Параллельно каждой перемычке был

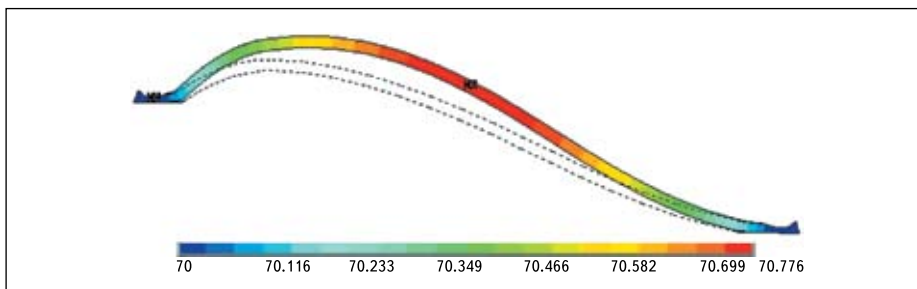


Рис. 3. Изменение формы соединительного проводника при его нагревании (пунктиром показана начальная форма проводника)



Рис. 5. Общий вид экспериментальной установки

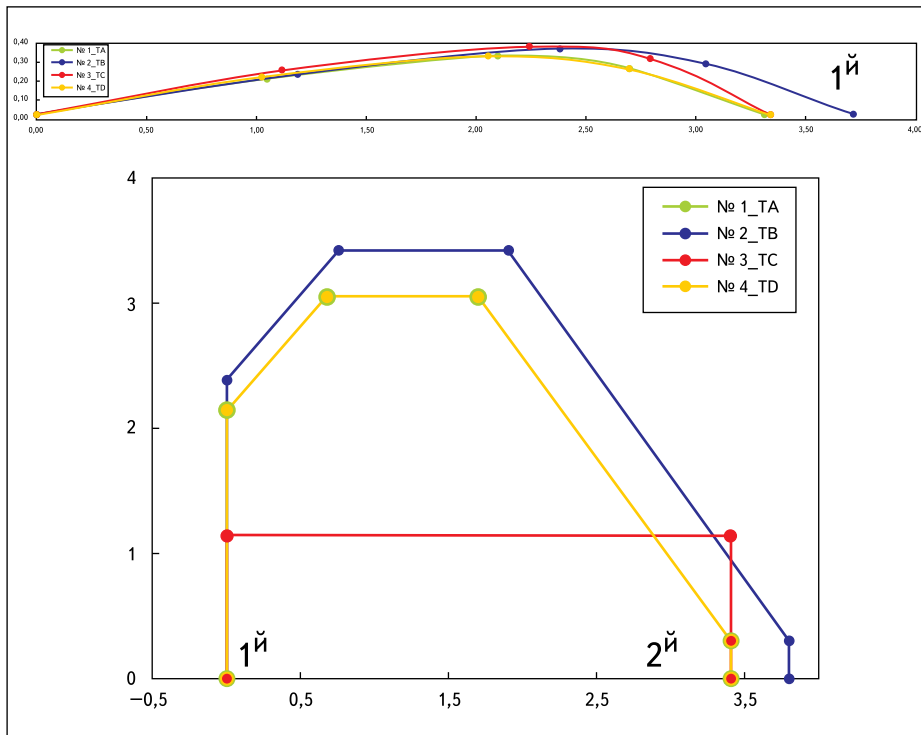


Рис. 6. Профили соединительных проводников (вверху) и соответствующие им траектории сварочного механизма (внизу)

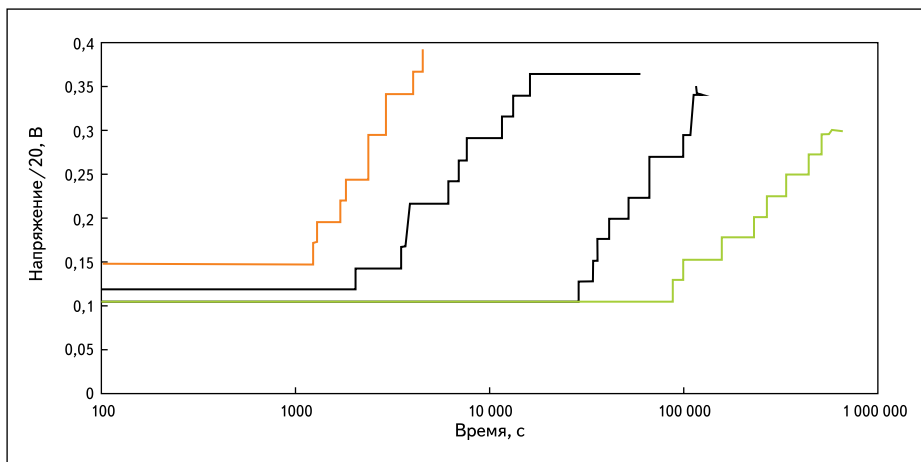


Рис. 7. Зависимость напряжения на тестовой сборке от времени

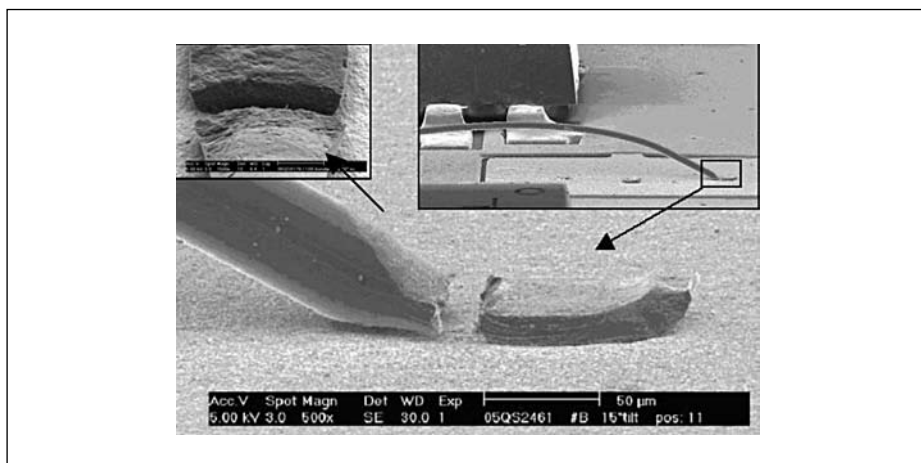


Рис. 8. Разрыв алюминиевого проводника под электронным микроскопом (увеличение в 500 раз)

подключен диод, который должен начать проводить ток, как только происходит обрыв данной перемычки. Перемычки подвергались воздействию импульсного напряжения постоянного тока с длительностью импульса в диапазоне 10–100 мс и коэффициентом заполнения 50%. Данные условия были выбраны для того, чтобы, с одной стороны, перемычки успевали нагреться, а с другой — чтобы за приемлемое время можно было выявить 70% отказов. В ходе эксперимента использовались четыре по-разному разваренных алюминиевых проводника (рис. 6) и постоянно контролировалось напряжение каждой тестовой сборки. Как только одна из перемычек обрывалась, это приводило к скачкообразному увеличению напряжения (на графике появлялась своеобразная «ступенька», хорошо видная на рис. 7, где представлены результаты эксперимента).

Большую часть работы авторы уделяют созданию различных математических моделей, которые смогли бы достоверно описать исследуемый процесс, и сравнению результатов, полученных экспериментальным путем, с результатами моделирования. Нам же более интересуют их выводы. Проведя после окончания эксперимента осмотр поврежденных проводников, авторы отметили интересную деталь: у некоторых проводников в середине появились бороздки, свидетельствующие об усталости материала (что хорошо согласуется с результатами моделирования), однако разрыв всегда происходил в точке первого крепления проводника к поверхности (рис. 8). В завершение своей работы авторы приводят рекомендации по выбору оптимального угла разварки соединительного проводника в зависимости от протекающего через него тока (при определенных параметрах импульса), а также проводят анализ разработанных ими моделей.

Однако приведенное выше исследование не затрагивает вторую причину, вызывающую нарушение электрического контакта между кристаллом транзистора и прочими элементами его конструкции, а именно: проблемы в интерметаллическом соединении в точке крепления соединительного проводника на кристалле. Откуда же возникает такое соединение? Например, если мы используем кристалл транзистора, выполненный по КМОП-технологии (то есть с применением алюминия), и корпус с золотым напылением (большинство мощных СВЧ-транзисторов имеют золотое напыление на корпусе и выводах для улучшения электрических параметров и обеспечения лучшей теплопередачи между кристаллом транзистора и теплоотводом), то неизбежно происходит контакт золота и алюминия, и мы получаем классическое интерметаллическое соединение. К сожалению, подобные соединения не отличаются высокой надежностью. В процессе работы в месте контакта золота и алюминия возможно появление так называемой «пурпурной чумы» — красноватого соединения $AuAl_2$ с низкой ме-



Рис. 9. Появление «пурпурной чумы» в месте контакта золота и алюминия

ханической прочностью (рис. 9). Увы, не все производители СВЧ-транзисторов полностью принимают во внимание последствия этого

эффекта. Некоторые из них все же используют связку золота и алюминия, что пагубно сказывается на надежности транзисторов. С другой стороны, использование в конструкции транзистора (кристалл, соединительные проводники, корпус) только одного металла (золота) позволяет полностью избежать подобных эффектов и вдобавок ко всему улучшить параметры транзистора. Тем более что использование золота позволяет избежать многих технологических проблем, свойственных алюминию (например, неравномерности травления).

Итог всего вышесказанного очевиден: если в вашем приложении требуется повышенная надежность, и вы к тому же работаете с импульсным сигналом, не стоит применять

транзисторы с алюминием. Лучше присмотреться к золоту. И может быть, стоит еще раз взглянуть на таблицу сравнения свойств этих металлов, когда вы будете выбирать транзистор для вашей новой разработки? ■

Литература

1. Bartlow H. The Gold vs. Aluminum War Revisited // Applied Microwave and Wireless. October 2000.
2. Bielen J., Gommans J., Theunis F. Prediction of high cycle fatigue in aluminium bond wires: A physics of failure approach combining experiments and multi-physics simulations // Eurosime IEEE, 2006.
3. Garboushian V., Tanielian A. Gold: The new standard in transistor reliability // Microwaves. July 1972.