

*Пашковский А.Б., Куликова И.В., Лапин В.Г.,
Лукашин В.М., Приступчик Н.К.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»*

Теплопроводящее покрытие для мощных арсенид-галлиевых гетероструктурных полевых транзисторов

Теоретически исследованы потенциальные возможности охлаждения мощных гетероструктурных арсенид-галлиевых полевых транзисторов при помощи теплопроводящего покрытия. Согласно проведенным расчетам, введение поверхностного теплопроводящего покрытия позволяет уменьшить величину перегрева канала от двух до пяти раз - в зависимости от толщины покрытия, конструкции транзистора и режима его работы при сохранении базовой технологии транзисторов и без дополнительных мер по уменьшению теплового сопротивления подложки.

Ключевые слова: Теплопроводящее покрытие, гетероструктурный полевой транзистор.

Хорошо известно, что большое тепловое сопротивление является одним из важных механизмов ограничения СВЧ мощности полупроводниковых приборов на основе арсенида галлия. Из-за относительно малой величины теплопроводности GaAs, в мощных GaAs полевых транзисторах основной вклад в тепловое сопротивление «канал – теплоотводящее основание корпуса» дает GaAs подложка. С одной стороны, температура канала растет при увеличении толщины подложки и уменьшении расстояния между секциями транзистора «исток – затвор – сток» (периодом структуры), что приводит к падению подвижности электронов. Следствием этого является уменьшение максимальной величины тока стока, и соответственно уменьшение коэффициента усиления и выходной мощности. С другой стороны, при разработке мощных полевых транзисторов и мощных монолитных СВЧ усилителей повышенного быстродействия на основе арсенид-галлиевых гетероструктур часто требуется обеспечить максимально допустимую плотность упаковки элементов конструкции транзистора. Как правило, это обеспечивается путём минимизации расстояния между секциями транзистора, что уменьшает как паразитные емкости прибора, так и фазовые набеги между разными секциями. Величина максимальной плотности упаковки ограничена максимальной температурой канала, при превышении которой начинаются интенсивные деградиционные процессы (для GaAs транзисторов эту температуру принимают равной 150 С). Поэтому во многих, применяемых в настоящее время конструкциях приходится уменьшать толщину GaAs подложки до 25-30 мкм, а для сохранения механической прочности - наращивать снизу толстый слой золота (~30 мкм). Многие годы при работе в X – диапазоне частот и выше, удельная выходная мощность GaAs гетероструктурных полевых транзисторов из-за многочисленных физических и технологических ограничений не превосходила существенно величину 1 Вт/мм, а используемая конструкция транзисторов была ориентирована на соответствующее тепловыделение. Однако, с появлением НЕМТ гетероструктур с донорно – акцепторным легированием [1-3] эта величина выросла в разы, что сделало режимы работы таких приборов гораздо более напряженными.

Существует много идей улучшения теплоотвода из канала в теплоотводящее основание корпуса через подложку (отвод тепла вниз) [4], и некоторые варианты успешно используются, например, в нитрид - галлиевых полевых транзисторах [5,7], однако они или сталкиваются со значительными технологическими трудностями, или требуют кардинальной перестройки технологии изготовления прибора. Следует отметить, что тривиальное уменьшение толщины GaAs подложки НЕМТ транзистора, конечно, дает уменьшение ее теплового сопротивления, но приводит к недопустимо сильному увеличению паразитных емкостей «затвор – основание корпуса» и «сток – основание корпуса». В данной работе анализируется совершенно другая идея – вместо того чтобы пытаться уменьшать теплое сопротивление подложки, предлагается тепло из канала дополнительно отводить вверх, затем в стороны, а затем вниз - через поверхностный тепловой интерфейс. При этом обеспечивается дополнительная передача тепла по этому интерфейсу на периферию поверхности чипа транзистора – за пределы области максимального тепловыделения и далее теплопередача вниз через GaAs подложку в теплоотводящее основание корпуса. Поскольку область максимального тепловыделения занимает малую часть площади чипа транзистора, организация дополнительного теплоотвода по поверхностному тепловому интерфейсу может обеспечить эффективный отвод тепла в основание корпуса на гораздо большей площади – практически по всей площади теплового контакта чипа транзистора с теплоотводящим основанием корпуса.

Ранее подобные идеи уже высказывались, например, метод обратного монтажа кристаллов [8]. Как альтернатива – использование алмазоподобного покрытия в нитрид - галлиевом транзисторе [9,10], однако в первом случае способ не слишком эффективен из-за очень узкой области тепловыделения в полевых транзисторах [11,12]. Во втором случае проблема связана с тем, что теплопроводность нитрида галлия весьма велика - она больше теплопроводности арсенида галлия примерно в пять раз, поэтому сильный полезный эффект проявится только при очень больших толщинах алмазоподобного покрытия. По этим причинам для GaN транзисторов более предпочтительным представляется применение посадки очень тонкого транзистора непосредственно на алмазное основание [5,6].

Рассмотрим типичный мощный НЕМТ транзистор, структура которого выращена, например, на GaAs подложке. Активная область рассматриваемого транзистора имеет характерную встречно-штыревую структуру см. рис.1.

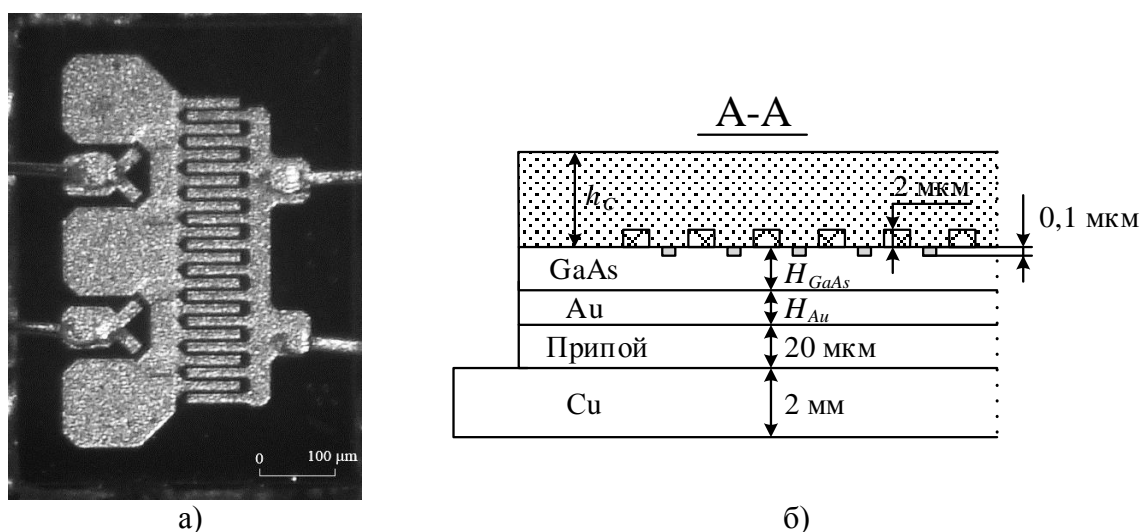


Рис.1. Мощный СВЧ полевой транзистор типа на основе GaAs гетероструктуры: а) фотография полевого транзистора; б) схематический упрощённый продольный разрез транзистора.

Предполагается, что диэлектрическое покрытие с высокой теплопроводностью, образующее поверхностный тепловой интерфейс, нанесено как на сам транзистор, так и на всю поверхность кристалла (в данном случае на всю область фотографии). Область тепловыделения длиной 0.3 мкм и толщиной 0.1 мкм расположена вплотную к трапециевидному затвору длиной 0.25 мкм. На рис.2 приведены результаты расчетов максимальной температуры в канале транзистора при различной выделяемой им выходной мощности (предполагается, что транзистор работает с КПД 50 %, то есть, сколько мощности выделяется, столько же идет на разогрев кристалла).

Как следует из расчетов, для данного транзистора в зависимости от толщины покрытия величина перегрева транзистора, после введения поверхностного теплового интерфейса, может уменьшиться от двух до пяти раз. Этот результат был получен при ширине истока, затвора и стока в каждой секции (длине пальца) транзистора равных 50 мкм, при периоде структуры равной 14 мкм и толщине подложки 25 мкм. Естественно, уменьшение перегрева транзистора сильно зависит от топологии прибора и толщины подложки, однако во всех случаях расчеты показали, что нанесение теплопроводящего покрытия сильно сказывается на тепловом режиме транзистора. На рис.2 приведены результаты расчётов для покрытия с теплопроводностью 1000 Вт/мК, что соответствует поликристаллическому алмазоподобному покрытию.

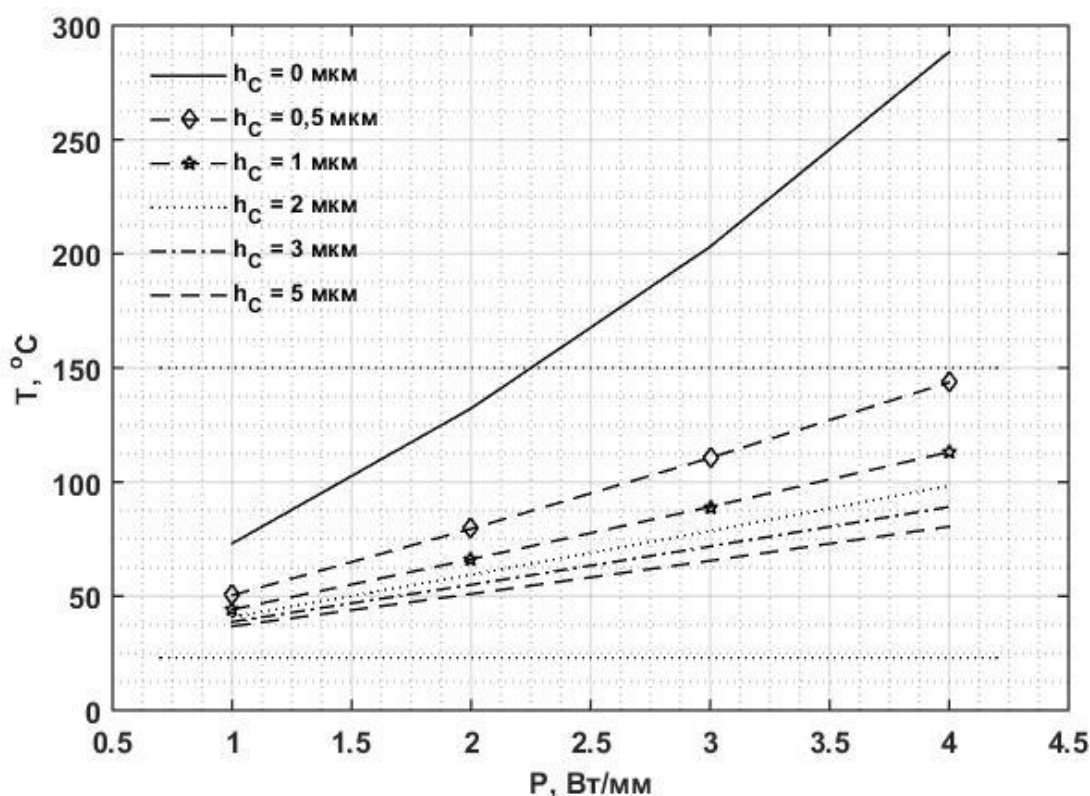


Рис.2 Зависимость максимальной температуры в канале транзистора от удельной мощности тепловыделения. Горизонтальные линии – критическая температура, с которой начинаются интенсивные процессы деградации (150 С) и – температура окружающей среды (23 С).

Однако аналогичный эффект получается и при меньших величинах теплопроводности, если при этом задать соответствующее пропорциональное увеличение толщины покрытия. Весьма привлекательным вариантом представляется после монтажа транзистора на теплоотводящее основание корпуса холодное нанесение на поверхность

кристалла, эффективно проводящего тепло (с теплопроводностью около 50 Вт/м/К или больше) лака или клея – изолятора. Это позволило бы полностью избежать термических напряжений при монтаже (пайке) а термические напряжения, возникающие в процессе работы транзистора, были бы несущественны из-за малой величины перегрева. К сожалению, в настоящее время с высокой теплопроводностью (порядка 50 - 80 Вт/м/К) имеется лишь широкая номенклатура клеев с серебряным наполнителем, которые являются хорошими проводниками и поэтому совершенно непригодны для данной цели. С другой стороны, существует как способы получения алмазоподобных покрытий [13, 14] при достаточно низких температурах, совместимые с арсенид-галлиевыми технологиями, так и варианты получения лаков – изоляторов с достаточно высокой теплопроводностью.

Физическое объяснение столь сильного уменьшения перегрева транзистора оказывается довольно простым. Известно, что из-за малых размеров областей локального тепловыделения в секциях НЕМТ транзистора на GaAs подложке, распределение температуры поверхности кристалла в направлении длин каналов в каждой транзисторной секции сильно неоднородно [4]. Проведенные нами расчеты показали, что на поверхности транзистора имеются локальные выбросы температуры, привязанные к расположению областей локального тепловыделения, но на глубине всего в несколько микрон амплитуда локальных выбросов сильно (во много раз) уменьшается см.рис.3.

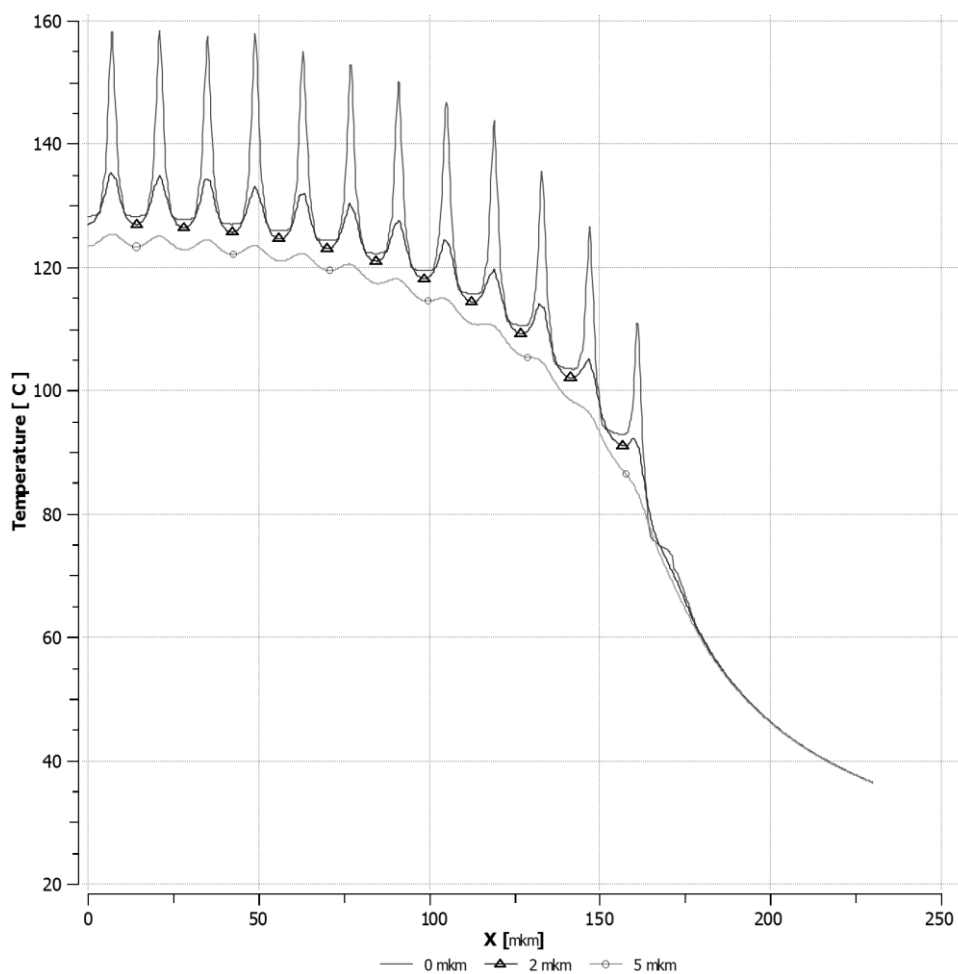


Рис.3. Распределение температуры в центре транзисторной структуры без поверхностного теплового интерфейса в сечении перпендикулярном затворам. (-----) температура на поверхности, (---Δ---Δ---) на глубине 2 мкм, (---●---●---) на глубине 5 мкм

Температура корпуса 23 °С. Толщина GaAs подложки 100 мкм. Удельная мощность тепловыделения 1Вт/мм.

Поэтому введение в конструкцию транзистора поверхностного теплового интерфейса вплотную к областям локального тепловыделения, во-первых, сразу сглаживает распределение температуры на поверхности кристалла и всей активной области прибора в направлениях, продольных и поперечных по отношению к длинам каналов, устраняя все перепады. Во-вторых, при наличии теплопроводящего покрытия открывается второй и из-за высокой теплопроводности покрытия очень эффективный канал отвода тепла – из областей сильного тепловыделения вверх, далее в стороны на периферию кристалла транзистора с последующим переносом тепла через подложку в теплоотводящее основание корпуса. Даже если рассмотреть абсолютно симметричную задачу – всю структуру отобразить относительно верхней поверхности транзистора, мощность тепловыделения оставить прежней, то величина максимального перегрева канала уменьшится в 2 раза. В техническом решении с поверхностным тепловым интерфейсом сверху оказывается материал интерфейса, имеющий существенно большую, по сравнению с GaAs подложкой, теплопроводность. Естественно, конечный перенос тепла на корпус все равно происходит через арсенид-галлиевую подложку с относительно низкой теплопроводностью, но после введения теплового интерфейса перенос тепла происходит через контакт «подложка – основание корпуса», имеющий площадь, гораздо больше, чем площадь, занимаемая активной областью прибора. Совокупность этих механизмов приводит к тому (см. рис.2), что перегрев прибора может уменьшиться в несколько раз, и что важно: при этом вся базовая технология изготовления мощных полевых транзисторов и монолитных усилителей практически не меняется и, как показывают оценочные трехмерные электродинамические расчёты, не меняются и схемы согласования приборов.

Библиографический список

1. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Соколов А.Б. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 84–89.
2. Журавлев К.С., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Соколов А.Б., Торопов А.И. // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2012, В.1(512), С. 55- 61.
3. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Голант Е.И., Капралова А.А. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 5. С. 684–692.
4. Воробьев, А.В. Галдецкий. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 42-54.
5. P.C. Chao et.al. // MRS Advances / Volume 1 / Issue 02 / January 2016, pp 147 - 155.
6. P.C.Chao et.al. // CS MANTECH Conference Digest, 2013, p. 179-182.
7. D. Altman. //Engineering the thermal properties of micro and nanomaterials// Raytheon Technology Today, 2012, №1, p. 18.
8. Воробьев А.А., Воробьева Е.В., Галдецкий А.В.//Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 3 (510). – С. 37-41.
9. IEEE Electron Device Letters, 2014, v.35, №10, p. 1013-1015.
10. MORGaN final brochure Nov-2011.
11. Дудинов К. В., Ипполитов В. М., Пашковский А. Б. //Электронная техника, Сер.1,СВЧ-техника, 2006, В.2(488), С.5 - 7.
12. Бережнова П.В., Лукашин В.М., А.К.Ратникова, А.Б.Пашковский //Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2007, В.4(492), С.21 – 24.
13. Гиппиус А.А. и др. Патент № 2244983 С1 (RU) от 14.07.2003.
14. O.Seok et.al. // CS MANTECH Conference, May 17th-20th, 2010, Portland, Oregon, USA, p.229-231