

## GaN мощные СВЧ транзисторы на подложках из полиалмаза

*Иванов К. А., Курмачёв В. А., Филатов А. Л.*

*Представлены результаты теплового моделирования HEMT на базе AlGaIn/GaN гетероструктур, выращенных на различных подложках. Показано, что перегрев активной области транзистора на подложке полиалмаз-кремний ниже, чем у транзистора на подложке карбида кремния при длинных импульсах, и выше – при коротких. Нанесение дополнительного слоя полиалмаза на поверхность транзистора уменьшает перегрев активной области транзистора.*

### **Введение**

Мощные СВЧ транзисторы С- и Х-диапазонов широко применяются в радиолокационной технике. Из технических характеристик современных РЛС, особенно с АФАР, вытекает совокупность требований к параметрам мощных СВЧ транзисторов, а именно, обеспечение максимальной абсолютной и удельной мощности с высоким КПД при повышенных рабочих температурах с заданными параметрами надёжности. В этих диапазонах частот невозможно использование ни LDMOS, ни SiC MESFET [1] и, как правило, применяются FET и HEMT, изготавливаемые на широкозонных полупроводниках. Одним из способов увеличения выходной мощности с целью достижения рекордных результатов является уменьшение теплового сопротивления  $R_T$  транзистора. Так, например, рекордная выходная мощность  $P_{\text{ВЫХ}} = 220$  Вт в С-диапазоне была представлена в работе [2].

Большая эффективность мощных AlGaIn/GaN HEMT обусловлена большими рабочими напряжениями по сравнению с допустимыми напряжениями GaAs HEMT при одновременном увеличении быстродействия [1]. Величины КПД до 60% достигаются при  $V_{\text{СИ}} = 40$  В с удельной плотностью мощности 6,8 Вт/мм [3]. При увеличении удельной мощности на первый план выдвигается проблема отвода тепла от активной области приборов. Рассмотрение тепловых проблем и некоторые способы их решения представлены в [4].

Как известно, наибольшие значения выходной СВЧ мощности достигнуты при использовании теплопроводящих подложек из карбида кремния. При этом достигнута мощность в С- и Х-диапазонах до 80 Вт в непрерывном и до 400 Вт в импульсном режимах работы [1].

Дальнейшее повышение уровня выходной СВЧ мощности может быть достигнуто при использовании в мощных GaN СВЧ транзисторах подложек из CVD поликристаллического алмаза [5, 6].

### **Условия для моделирования тепловых процессов**

В целях исследования минимизации  $R_T$  проведено моделирование тепловых режимов кристалла AlGaIn/GaN HEMT с различными конструкциями теплопроводящих систем:

- на кремнии Si толщиной 100 мкм;
- на карбиде кремния SiC толщиной 100 мкм;
- на структуре Si (20 мкм) + полиалмаз (100 мкм);
- на структуре Si (10 мкм) + полиалмаз (100 мкм).

Кроме того, проведено моделирование возможности дополнительного снижения

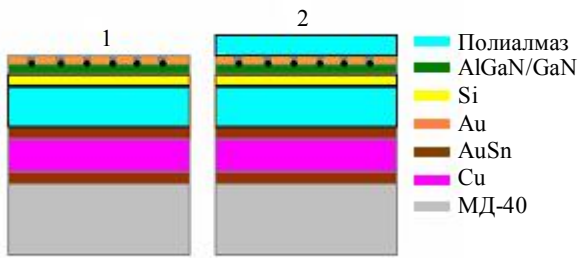


Рис. 1

Конструкции GaN СВЧ транзистора:

1 – с одним слоем полиалмаза; 2 – с двумя слоями полиалмаза

перегрева рабочей области за счёт нанесения слоя изолирующего полиалмаза на поверхность между истоком, затвором и стоком GaN СВЧ транзистора (рис. 1).

При расчётах учитывались параметры тепловых переходов и материалов кристалла транзистора, элементов корпуса (Au, Cu, МД-40) и паяных соединений (AuSn).

Моделирование тепловых процессов проводилось для условий импульсного режима работы СВЧ транзистора.

### Результаты моделирования

Результаты моделирования температуры саморазогрева  $\Delta T$  рабочей области СВЧ транзистора для четырёх конструкций теплопроводящих систем при изменении длительности импульсов  $\tau$  и скважностях  $Q = 5$  и  $Q = 50$  показаны на рис. 2.

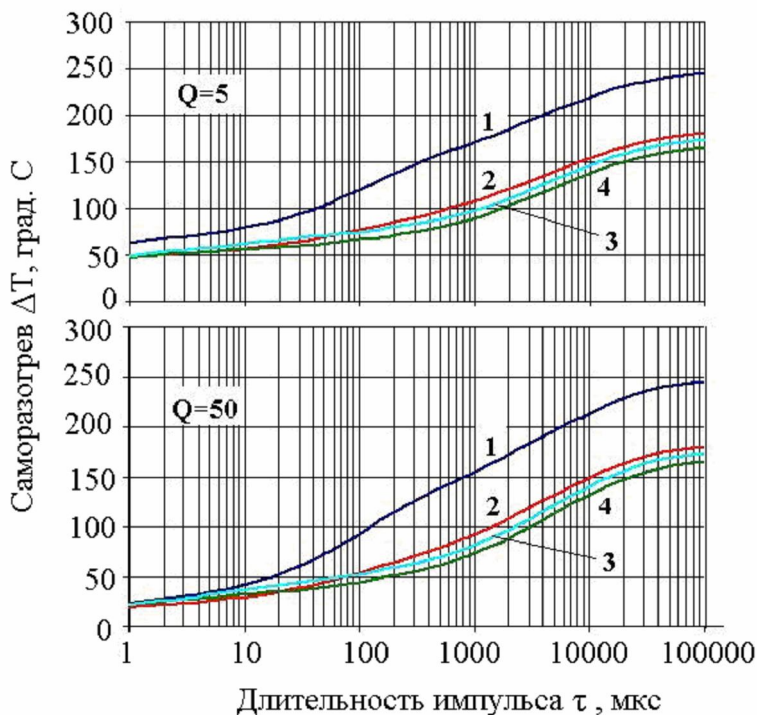


Рис. 2

Расчётные зависимости температуры саморазогрева  $\Delta T$ :

- 1 – Si (100 мкм); 2 – SiC (100 мкм);
- 3 – Si (20 мкм) + полиалмаз (100 мкм);
- 4 – Si (10 мкм) + полиалмаз (100 мкм)

конструкций на основе полиалмаза с тонким слоем кремния имеет преимущества по сравнению с SiC подложками при длинных импульсах ( $\tau \geq 200$  мкс).

Для конструкций, представленных на рис. 1, был проведён расчёт саморазогрева активной области транзистора при различных длительностях импульсов СВЧ мощности и скважности  $Q = 5$ . Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Использование конструкции, обеспечивающей дополнительный отвод тепла в кристалле СВЧ транзистора через слой полиалмаза толщиной 20 мкм на поверхности между истоком, затвором и стоком GaN СВЧ транзистора, имеет безусловные

Проведённое моделирование показало, что:

1. при длительностях импульсов  $\tau \geq 200$  мкс применение в GaN СВЧ транзисторе теплопроводящих подложек на основе полиалмаза, выращенного на кремнии, обеспечивает значения теплового сопротивления транзисторной структуры меньше, чем для структуры, выращенной на SiC;

2. при длительности импульса  $\tau = 10$  мс перегрев рабочей области GaN СВЧ транзистора на подложке полиалмаза с кремниевым слоем 10 мкм на 15% меньше, чем у СВЧ транзистора с теплопроводящей подложкой на основе карбида кремния.

Таким образом, применение теплопроводящих

преимущества перед конструкциями без него и при длительности СВЧ импульса 200 мкс уменьшает тепловой перегрев транзисторной структуры на 18% (рис. 3).

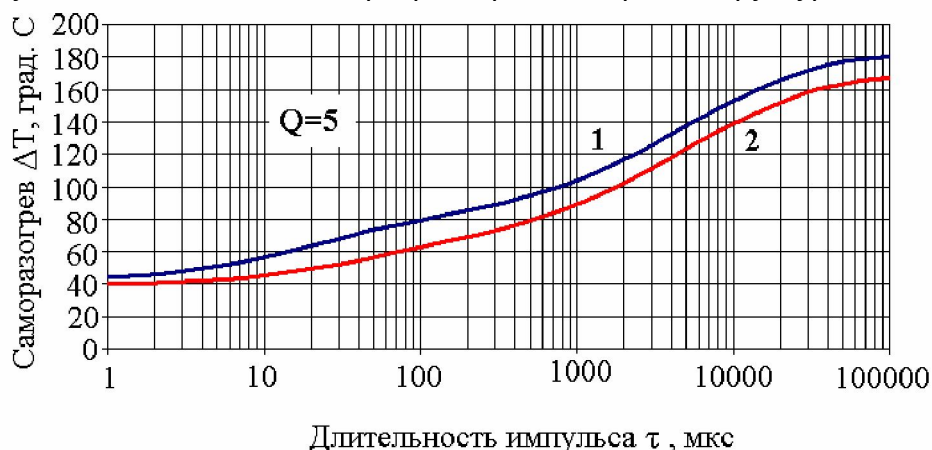


Рис. 3

Расчётные зависимости температуры саморазогрева  $\Delta T$ :  
 1 – AlGaIn/GaN/Si (40 мкм)/полиалмаз (100 мкм);  
 2 – полиалмаз (20 мкм)/AlGaIn/GaN (3 мкм)/Si (40 мкм)/полиалмаз (100 мкм)

### Исследование пробивного напряжения

Использование слоя полиалмаза на поверхности между истоком, затвором и стоком GaN СВЧ транзистора увеличивает пробивное напряжение на 20% (рис. 4).

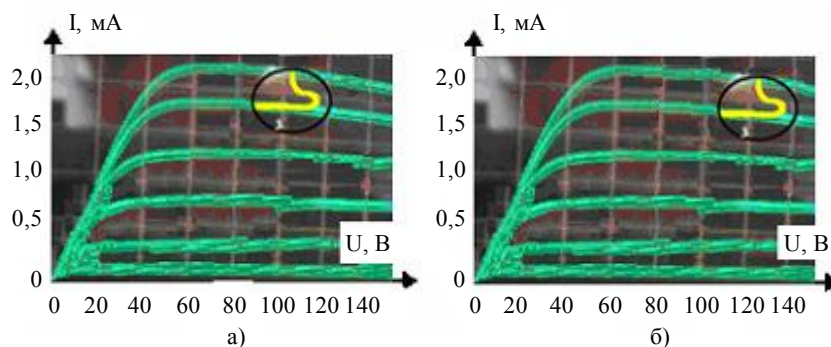


Рис. 4

Вольт-амперные характеристики GaN СВЧ транзистора:  
 а) без слоя полиалмаза на поверхности; б) со слоем полиалмаза на поверхности

Проведённое моделирование тепловых режимов GaN СВЧ транзисторов показало, что применение теплопроводящих подложек на основе полиалмаза, выращенного на кремнии, обеспечивает значения теплового сопротивления транзисторной структуры меньше, чем у СВЧ транзисторов с теплопроводящими подложками на основе карбида кремния при толщинах кремниевого слоя менее 10 мкм, а нанесение слоя изолирующего полиалмаза на поверхность GaN СВЧ транзистора уменьшает тепловое сопротивление транзисторной структуры и увеличивает величину пробивных напряжений.

Перепад температуры на подложках кремний-алмаз при малой длительности СВЧ импульса выше, чем на подложках карбида кремния, а при больших длительностях СВЧ импульса ниже, чем на подложках карбида кремния. Это связано с тем, что при малых длительностях СВЧ импульса тепловое сопротивление связано с

---

теплопроводностью кремния, которая ниже, чем теплопроводность карбида кремния, а тепловой поток не успевает рассеиваться в алмазе.

### **Выводы**

В результате проведенного анализа установлено, что:

- применение в GaN СВЧ транзисторе теплопроводящих подложек на основе полиалмаза, выращенного на кремнии, обеспечивает значения теплового сопротивления транзисторной структуры меньшие, чем у СВЧ транзисторов с теплопроводящими подложками на основе карбида кремния при толщинах кремниевого слоя менее 10 мкм;
- нанесение слоя изолирующего полиалмаза на поверхность между истоком, затвором и стоком GaN СВЧ транзистора при толщине кремния 40 мкм уменьшает тепловое сопротивление транзисторной структуры на 18%, а величину пробивных напряжений увеличивает на 20%.

### **Литература**

1. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия // Пер. с англ. Под ред. А. Г. Васильева – М.: Техносфера. – 2011. – 592 с.
2. Yamanala K, Mori K, Ohtsuka H et al. // IEEE International Microwave Symposium Digest. – Honolulu. – 2007. – P. 1251-1254.
3. Mehandru R., Carlin J., Feltn E. et al. // Solid-State Electron. – 2004. – V. 48. – P. 351.
4. Rosker M. // Compound Semiconductor IC Symposium Technical Digest, Palm Springs. – 2005. – P. 13-16.
5. А. А. Арендаренко, А. Г. Васильев, В. Н. Данилин, Т. А. Жукова, В. И. Конов, В. Г. Ральченко, А. В. Петров, Ю. В. Колковский, А. Л. Филатов. Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов с использованием микро- и нанокристаллических алмазных плёнок и пластин // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы докладов 5-й Всероссийской конференции. – СПб.: – 2007. – С. 48-49.
6. А. А. Арендаренко, В. И. Конов, В. Г. Ральченко, В. Н. Данилин, А. В. Петров, А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, Т. А. Жукова, В. А. Сидоров. Способ изготовления полупроводникового прибора // Патент №2368031. Приоритет от 01.04.2008.