

УДК 621.382.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ АЛМАЗА С ПРОВОДЯЩИМ $\delta$ -ЛЕГИРОВАННЫМ СЛОЕМ

К. ф.-м. н. К. Н. Зяблюк, д. ф.-м. н. А. Ю. Митягин, к. ф.-м. н. Н. Х. Талипов,  
д. ф.-м. н. Г. В. Чучева, к. ф.-м. н. А. Э. Набиев<sup>1</sup>

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. академика В. А. Котельникова  
Россия, г. Фрязино;

<sup>1</sup> Азербайджанский государственный педагогический университет, г. Баку  
alexandr-mityagin@yandex.ru

*Рассчитаны параметры алмазных полевых транзисторов с затвором Шоттки, необходимые для работы в усилителях ГГц-диапазона. Установлено, что алмазный транзистор с длиной затвора 0,2 мкм может обеспечить коэффициент усиления 13 дБ на частоте 15 ГГц в цепи с нейтрализацией обратной связи и имеет частоту отсечки 60 ГГц.*

*Ключевые слова:* алмаз, широкозонные полупроводники, полевой транзистор.

Монокристаллический алмаз обладает рекордной теплопроводностью 22 Вт/(см·К), которая в 4–5 раз превышает теплопроводность популярных широкозонных полупроводников SiC и GaN, а напряженность пробоя алмаза 5–10 МВ/см в 1,5–3 раза выше, чем у SiC и GaN. Измеренные подвижности электронов и дырок в чистом CVD-алмазе достигают 4500 и 3800 см<sup>2</sup>/(В·с), а скорости насыщения находятся в пределах (1,5–2,7)·10<sup>7</sup> и (0,85–1,2)·10<sup>7</sup> см/с соответственно [1]. Это делает алмаз перспективным материалом для изготовления мощных высокочастотных транзисторов.

Однако здесь имеются проблемы, основная из которых состоит в получении проводящего алмаза. Единственным известным акцептором в алмазе является бор. Низкая степень активации бора в алмазе требует высокой степени легирования (около 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>) для получения проводимости, достаточной для изготовления мощных транзисторов. Но при такой проводимости подвижность дырок, как правило, не превышает нескольких единиц см<sup>2</sup>/(В·с). Для увеличения подвижности необходимо изготовление  $\delta$ -легированного слоя толщиной менее 1 нм с концентрацией бора свыше 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>, чтобы большая часть дырок диффундировала в чистый алмаз. Изготовление такого  $\delta$ -слоя с достаточной подвижностью является технически сложной задачей, которая пока еще не решена.

Альтернативой являются полевые транзисторы, изготовленные на гидрированном алмазе. После обработки водородной плазмой (гидрирование) алмаз приобретает поверхность, обладающую дырочной проводимостью с поверхностной концентрацией около 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup> и подвижностью около 50–150 см<sup>2</sup>/(В·с). Предположительно, проводимость возникает за счет изгиба вверх границы валентной зоны алмаза вплоть до уровня Ферми и формирования дырочного газа вблизи поверхности. Толщина изгиба энергетических зон имеет порядок 1 нм, поэтому на поверхности гидрированного алмаза формируется естественный проводящий  $\delta$ -слой (иногда его называют двухмерный дырочный газ). Проводимостью слоя можно управлять с помощью эффекта поля, изготовив на нем полевой транзистор с барьерным затвором (Шоттки) или слоем изолятора. Полевые транзисторы обоих типов на гидрированном алмазе были успешно изготовлены рядом научных групп (см. обзор [2]). В частности, продемонстрирована удельная мощность с единицы длины затвора 2,1 Вт/мм на частоте 1 ГГц, что уже превышает соответствующий показатель GaAs-транзисторов. Дальнейшему развитию таких транзисторов препятствует недостаточная адгезия контактов с гидрированной поверхностью, а также ее ограниченная стабильность, но в последнее время виден определенный прогресс в решении данных проблем.

Относительно невысокая подвижность дырок на гидрированной поверхности алмаза означает, что для работы в ГГц-диапазоне транзистор должен иметь длину затвора менее 1 мкм. Изготовление такого транзистора требует перехода к сложным и дорогостоящим субмикронным технологиям. Поэтому полезно иметь модель, позволяющую рассчитать характеристики алмазного транзистора, зная лишь физические свойства кристалла, которые могут быть легко измерены. Такая модель была разработана в [3] на основе известной модели плавного канала. В модели плавного канала затвор и про-

дящий канал полевого транзистора представлены как обкладки конденсатора с удельной емкостью  $C_i$ . Зная подвижность  $\mu$  и скорость насыщения  $v_s$  дырок, длину  $L$  и ширину  $W$  затвора, модель позволяет рассчитать вольт-амперную характеристику (ВАХ) транзистора. В [3] было произведено обобщение модели плавного канала на случай переменного тока в режиме слабых (линейных) сигналов и получены компоненты матрицы проводимости транзистора  $Y_{ij}$  как функции частоты  $f$  сигнала. Однако модель плавного канала не учитывает ряд характеристик реального транзистора, в частности зазоры и «исток — затвор» и «затвор — сток» пр. Поэтому модель реального транзистора представлена на рис. 1 эквивалентной схемой.

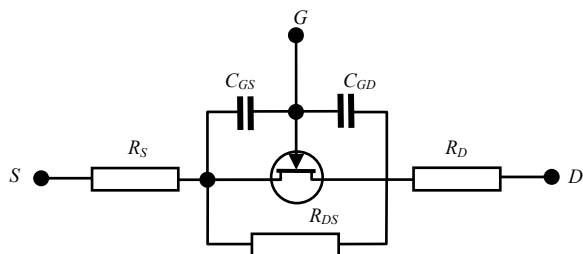


Рис. 1. Эквивалентная схема реального транзистора

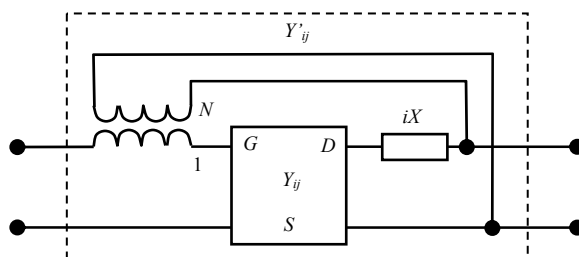


Рис. 2. Простейшая цепь нейтрализации обратной связи

В центре схемы стоит «идеальный» транзистор с характеристиками, определяемыми моделью плавного канала. Сопротивления  $R_S$  и  $R_D$  моделируют зазоры «исток — затвор» и «затвор — сток» и равны произведению поверхностного сопротивления  $\rho$  гидрированного алмаза на отношение величины зазора к ширине затвора  $W$ . В режиме насыщения «идеальный» транзистор имеет горизонтальные ВАХ и нулевые компоненты матрицы проводимости  $Y_{12} = Y_{22} = 0$  (независимость от напряжения стока  $V_{DS}$ ). Условие согласования с нагрузкой означает, что максимальный коэффициент усиления такого транзистора достигается при нагрузке с нулевой проводимостью  $Y_L = Y_{22}^* = 0$ , что на практике недостижимо. Поэтому необходимо учитывать наклон ВАХ в режиме насыщения, который наблюдается на реальных алмазных транзисторах с гидрированной поверхностью [2]. Такой наклон может быть смоделирован включением в схему сопротивления  $R_{DS}$ , которое учитывает возможные утечки под модулируемым каналом в теле кристалла. На основании анализа экспериментальных ВАХ транзисторов на гидрированном алмазе с различными размерами затвора в [3] было предложено эмпирическое выражение  $R_{DS} = 10^6 \cdot L/W$  Ом. Кроме того, при работе на высоких частотах становится существенной емкость, образуемая контактом затвора и контактами истока-стока. В эквивалентной схеме она моделируется конденсаторами  $C_{GS}$  и  $C_{GD}$ . На основании общих соображений по порядку величины они равны  $\epsilon \epsilon_0 W$  ( $\epsilon = 5,7$  — диэлектрическая проницаемость алмаза) и слабо (логарифмически) зависят от величины зазора. В [3] использовалось эмпирическое выражение  $C_{GD}/W = 0,5$  пФ/см, получено хорошее согласование рассчитанных коэффициентов усиления алмазных транзисторов с различными размерами затвора в зависимости от частоты с измерениями в режиме слабых сигналов.

Емкость контактов затвор-сток  $C_{GD}$  приводит к появлению на высоких частотах проводимости обратной связи:  $Y_{12} = -i\omega C_{GD}$ . Обратная связь может являться источником неустойчивой работы транзистора, поэтому ее желательно нейтрализовать. Простейшая цепь нейтрализации обратной связи показана на рис. 2, она включает в себя идеальный трансформатор с повышающим коэффициентом  $N$  и комплексное сопротивление  $iX$  (транзистор на схеме показан как четырехполюсник с матрицей проводимостей  $Y_{ij}$ ).

Параметры  $N$  и  $X$  подбираются таким образом, чтобы матрица проводимостей всей цепи  $Y_{ij}'$  имела блочно-диагональный вид  $Y_{12}' = 0$ . В этом случае условия согласования на проводимость генератора и нагрузки приобретают простой вид  $Y_G = (Y_{11}')^*$ ,  $Y_L = (Y_{22}')^*$ , а максимальный коэффициент усиления  $G_U = |Y_{21}'|^2 / (4 \operatorname{Re} Y_{11}' \operatorname{Re} Y_{22}')$ .

В данной работе с помощью модели [3] произведен расчет полевого транзистора на гидрированном алмазе в цепи с нейтрализацией обратной связи. Для расчета брались следующие характерные параметры алмаза с гидрированной поверхностью:

- подвижность носителей заряда  $\mu$  100 см<sup>2</sup>/(В·с);
- поверхностная плотность носителей заряда  $n_s$  5·10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>;
- скорость насыщения носителей заряда  $v_s$  10<sup>7</sup> см/с;
- поверхностное сопротивление канала  $\rho$  12,5 кОм/□;
- удельная емкость подзатворного слоя  $C_i$  1 мкФ/см<sup>2</sup>.

Удельная емкость  $C_f=1$  мкФ/см<sup>2</sup> соответствует удельной емкости барьерного слоя затвора Шоттки, полученного путем термического осаждения в вакууме алюминия на гидрированную поверхность алмаза. Она получена путем измерения вольт-фарадных характеристик [3].

Напряжение отсечки (при котором  $I_{DS}=0$ ) транзисторов на гидрированном алмазе с затвором Шоттки составляет 0...+1 В, для определенности в расчете оно принято равным 0. При напряжениях затвора свыше  $-(6...7)$  В наблюдался пробой. Напряжение смещения затвора  $V_{GS,0}$  должно находиться в середине этого диапазона: при работе в режиме больших сигналов  $V_{GS}$  меняется от 0 до  $2V_{GS,0}$ , которое не должно превышать напряжения пробоя затвора. Расчет произведен для напряжения смещения затвора  $V_{GS,0} = -2$  В и напряжения смещения стока  $V_{DS,0} = -5$  В, при котором транзистор находится в режиме насыщения.

Величины зазоров «исток — затвор» и «затвор — сток» взяты равными 0,5 мкм. Следует учитывать, что из-за зазора «исток — затвор» напряжение затвора относительно проводящего канала со стороны стока (напряжение затвора, которое должно учитываться в модели плавного канала, в таблице — это управляющее напряжение затвора) отличается от  $V_{GS,0}$  на величину падения напряжения на сопротивлении  $R_S$ . В таблице приведены результаты расчета транзистора и параметров цепи при различной длине затвора:  $L = 0,5—0,2$  мкм (сопротивления нормированы на ширину затвора  $W = 1$  мм).

Параметры полевого транзистора на гидрированном алмазе с затвором Шоттки

| Длина затвора $L$ , мкм                         | 0,5      | 0,3       | 0,25      | 0,2       |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|
| Управляющее напряжение затвора, В               | -1,14    | -0,97     | -0,91     | -0,83     |
| Сопротивление генератора $Z_G W$ , Ом·мм        | 3,0+i4,2 | 2,5+ i9,4 | 2,4+i11,8 | 2,3+i15,2 |
| Сопротивление нагрузки $Z_L W$ , Ом·мм          | 145+i16  | 115+i8,1  | 100+i5,7  | 82+i3,6   |
| Коэффициент $N$                                 | 16,6     | 13,2      | 11,5      | 9,6       |
| $X \cdot W$ , Ом·мм                             | 104      | 38,4      | 25,7      | 15,4      |
| Коэффициент усиления при $f=15$ ГГц, $G_U$ , дБ | 6,4      | 10,6      | 11,8      | 13,3      |
| Частота отсечки $f_{max}$ , ГГц                 | 28,4     | 44,8      | 51,9      | 61,2      |

Видно, что полевой транзистор на гидрированном алмазе с затвором Шоттки с длиной затвора 0,2 мкм в режиме слабых сигналов может обеспечить коэффициент усиления 13 дБ на частоте 15 ГГц и имеет частоту отсечки 60 дБ при условии нейтрализации. Вещественные части сопротивлений генератора  $Z_G$  и нагрузки  $Z_L$  положительны, что означает устойчивую работу транзистора.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 11-07-00288

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wort C.J.H., Balmer R.S.. Diamond as an electronic material // Materials today. – 2008. – V. 11. – P. 22.
2. Kasu M., Ueda K., Yamauchi Y. et al. Diamond-based RF power transistors: Fundamentals and applications // Diamond and Related Materials. – 2007. – V. 16. – P. 1010.
3. Алтухов А.А., Зяблук К.Н., Митягин А.Ю. и др. Модель алмазного транзистора // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. – № 6. – С.13.

K. N. Zyablyuk, A. Yu. Mityagin, N. H. Talipov, G. V. Chucheva, A. E. Nabiev

#### Operation model of diamond-based field effect transistor with conducting $\delta$ -doped layer.

Parameters of diamond-based field effect transistors with Schottky gate necessary for operation in GHz-range amplifiers have been calculated. The diamond FET with 0.2 micrometers gate length is found to provide 14 dB unilateral gain on 15 GHz working frequency and has 60 GHz cutoff frequency.

Keywords: *diamond, wide band gap semiconductors, FET.*