

УДК 621.382.3

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ ГИДРИРОВАННОГО АЛМАЗА

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. Набиев¹

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

¹Азербайджанский государственный педагогический университет, г. Баку
alexandr-mityagin@yandex.ru

Приводятся результаты расчета предельных параметров полевых транзисторов с затвором Шоттки на основе гидрированного алмаза. Показано, что при длине канала транзистора 0,2 мкм, напряжении смещения затвора –3 В и напряжении смещения стока –20 В данный транзистор может развивать удельную мощность 0,93 Вт/мм с единицы ширины затвора на частоте 15 ГГц. Для достижения выходной мощности 50 Вт необходима суммарная ширина затвора 54 мм.

Ключевые слова: гидрированный алмаз, широкозонные полупроводники, полевой транзистор, дельта-легирование.

Как известно, алмаз обладает сверхвысокой теплопроводностью, высокой скоростью дрейфа носителей тока, высокой пробивной напряженностью электрического поля и сравнительно низкой диэлектрической проницаемостью при высоком удельном сопротивлении нелегированного материала. Эти свойства делают алмаз перспективным материалом для мощных СВЧ-приборов [1]. Разработка технологии выращивания пластин алмаза [2] позволяет производить алмазные транзисторы в промышленном масштабе. Однако вопрос о предельно достижимых параметрах алмазных транзисторов по мощности все еще остается открытым.

Достигнутая удельная мощность полевых транзисторов на гидрированном алмазе [3] с единицы длины затвора составляет 2,1 Вт/мм на частоте 1 ГГц. В настоящей работе проведен расчет предельной мощности транзистора на основе гидрированного алмаза, которую можно достичь в случае если длина его канала будет иметь субмикронные размеры.

За основу была взята модель, описанная в [4]. На рис. 1 приведены расчетные вольтамперные характеристики (ВАХ) транзистора с длиной затвора $L = 0,2$ мкм, зазорами «исток — затвор» и «затвор — сток» 0,5 мкм с затвором Шоттки (удельная емкость барьерного слоя 1 мкФ/см², напряжение отсечки $V_{GS} = 0$ В), изготовленного на гидрированном алмазе с характерными значениями дырочной подвижности 100 см²/(В·с), поверхностной плотности дырок $5 \cdot 10^{12}$ см⁻², удельного сопротивления 12,5 кОм/□, скорости насыщения дырок 10⁷ см/с. Кривые отложены вплоть до напряжения затвора $V_{GS} = -5$ В, выше возможен пробой. Снизу ВАХ ограничены прямой линией $I_{DS} = V_{DS}/(R_{DS} + R_D + R_S)$, на которой весь ток течет через паразитное сопротивление R_{DS} .

В режиме переменного тока напряжения на затворе и стоке представляют сумму постоянных частей (смещений) и комплексных амплитуд:

$$V_{GS}(t) = V_{GS,0} + v_{GS} e^{i\omega t}, \quad V_{DS}(t) = V_{DS,0} + v_{DS} e^{i\omega t}.$$

В режиме слабых (линейных по амплитудам) сигналов соотношение амплитуд токов (i_{GS} , i_{DS}) и напряжений (v_{GS} , v_{DS}) определяется матрицей проводимости Y_{ij} транзистора, которая была получена в [5] в рамках разработанной модели. На высоких частотах становится существенным вклад паразитных емкостей, образуемых контактами затвора и истока-стока C_{GS} и C_{GD} . Они приводят к появлению проводимости обратной связи Y_{12} , которая может быть источником неустойчивой работы транзистора, поэтому в дальнейших расчетах предполагается, что транзистор включен в цепь нейтрализации обратной связи, которая имеет нулевую проводимость обратной связи. При согласовании сопротивлений генератора и нагрузки максимальный коэффициент усиления цепи рассчитывается по формуле

$$G_U = |Y_{21} - Y_{12}|^2 / (4(\operatorname{Re}Y_{11}\operatorname{Re}Y_{22} - \operatorname{Re}Y_{12}\operatorname{Re}Y_{21})).$$

В режиме больших сигналов нужно знать максимально допустимые значения амплитуд напряжений (v_{GS} , v_{DS}) и токов (i_{GS} , i_{DS}). При максимальном одностороннем усилении G_U ток и напряжение стока изменяются вдоль нагрузочной кривой, наклон которой определяется условиями согласования:

$$\frac{i_{ds}}{v_{ds}} = \frac{Z_{21} + Z_{12}^*}{Z_{22}Z_{12}^* - Z_{22}^*Z_{21}}$$

и при отсутствии обратной связи ($Z_{12} = 0$) сводится к проводимости нагрузки $1/Z_{22}^*$.

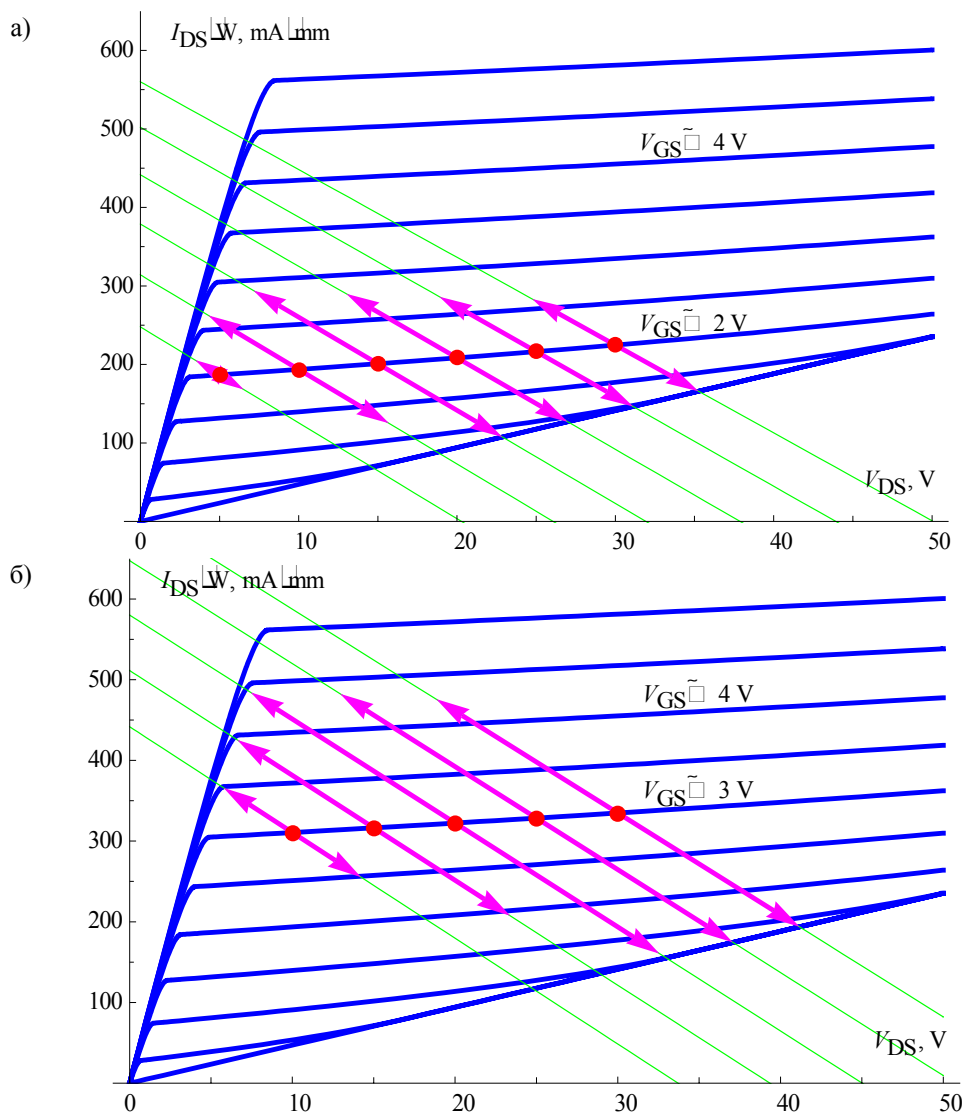


Рис. 1. ВАХ транзистора с длиной затвора 0,2 мкм ($V_{GS}=0 \dots -5$ В с интервалом 0,5 В) и нагрузочные кривые с наклоном при смещении затвора -2 В (а) и -3 В (б) и частоте 15 ГГц

На рисунке показаны нагрузочные кривые, соответствующие максимальному значению G_U , и проходящие через точки, соответствующие напряжению смещения затвора $V_{GS,0} = -2$ В (рис. 1, а) и $V_{GS,0} = -3$ В (рис. 1, б) и $V_{DG,0} = -5 \dots -30$ В.

Для определения максимально допустимых амплитуд тока естественными требованиями являются следующие:

1) ток стока I_{DS} должен находиться выше нижней границы вольт-амперных характеристик $V_{DS}/(R_{DS} + R_D + R_S)$;

2) транзистор не должен выходить за пределы режима насыщения;

3) напряжение затвора не должно превышать -5 В, где возможен пробой.

В противном случае работа транзистора будет существенно нелинейной. Границы амплитуд, удовлетворяющих этим требованиям, показаны стрелками вдоль нагрузочных кривых на рис. 1.

Максимальная выходная мощность транзистора рассчитывается по максимальным значениям амплитуд $W_{FET,out} = 0,5\text{Re}(i_{DS}v_{DS}^*)$. Она несколько превышает выходную мощность цепи W_{out} , так как часть мощности отводится на вход цепи для нейтрализации обратной связи.

Параметры транзистора с длиной затвора $0,2$ мкм, работающего в режиме максимальной мощности в цепи нейтрализации обратной связи на частоте 15 ГГц при напряжении затвора $V_{GS} = -3$ В и различных напряжениях стока представлены в таблице. Мощности нормированы на ширину затвора 1 мм. В ряде случаев выходная мощность отличается от $G_U \cdot W_{in}$ на 20 — 30 из-за нелинейности вольт-амперных характеристик и является оценкой точности расчета.

Параметры транзистора	Напряжение стока V_{DS} , В				
	-10	-15	-20	-25	-30
Коэффициент усиления G_U , дБ	14,3	14,2	14,0	13,9	13,7
Наклон нагрузочной кривой $ i_{DS}/v_{DS} $, мС/мм	13,1	13	12,9	12,7	12,6
Максимальная амплитуда напряжения затвора v_{DS} , В	0,49	0,95	1,41	1,91	1,79
Максимальная входная мощность цепи W_{in} , мВт/мм	2,5	9,6	21,4	40,1	36,0
Максимальная выходная мощность цепи W_{out} , мВт/мм	108	420	932	831	701

Из представленных данных видно, что при напряжении смещения стока -20 В транзистор может развивать выходную мощность $0,93$ Вт/мм с единицы длины затвора. Мощности нормированы на ширину затвора 1 мм.

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

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. – М.: ТЕХНОСФЕРА. 2011.
2. CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors”, ed. By R.S. Sussmann, John Wiley and Sons, 2009.
3. Shiomi, H.; Nishibayashi, Y.; Toda, N.; Shikata, S.-I., Pulse-doped diamond p-channel metal semiconductor field-effect transistor // Electron Device Letters, IEEE. – 1995. – V. 16. – P. 36–38.
4. Зяблюк К. Н., Митягин А. Ю., Талипов Н. Х. и др. Моделирование работы транзистора на основе алмаза с проводящим δ -легированным слоем // Труды МНПК «СИЭТ-2013». Т.2 — Украина, Одесса.— С. 230—232.
5. Алтухов А.А., Зяблюк 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. Kh. Talipov, G. V. Chucheva, A. E. Nabiev
Ultimate parameters of hydrogen-terminated diamond field-effect transistor

The paper presents the ultimate performance parameters of hydrogen-terminated diamond field-effect transistors with Schottky gate. It is shown that such FET with gate length 0.2 micrometers at gate voltage -3 В and drain voltage -20 В can reach the output power density of 0.93 W/mm from gate unit width at 15 GHz frequency. To achieve the total output power of 50 W, a 54 mm wide gate is required.

Keywords: *hydrogenated diamond, the wide-gap semiconductor, field-effect transistor, delta-doping.*