

# Моделирование аналоговых устройств графеновой электроники

А.А. Целыковский<sup>1,2</sup>, И.А. Данилов<sup>1</sup>, Г.И. Зебрев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, [atsel@ya.ru](mailto:atsel@ya.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Аннотация** — Описаны особенности графеновой аналоговой электроники, позволяющие реализовывать новые схемотехнические решения. Представлена предназначенная для схемотехнических расчетов компактная модель графенового полевого транзистора. Приведены результаты моделирования схемы двухпозиционной фазовой манипуляции, умножителя частоты, смесителя.

**Ключевые слова** — графен, полевой транзистор, компактная модель, Verilog-A, амбиполярная электроника, схемотехника, моделирование, двухполупериодный выпрямитель, умножитель частоты, двухпозиционная фазовая манипуляция, смеситель.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Графеновые полевые транзисторы обладают существенными особенностями, определяющими возможную сферу их применения в электронике. Поскольку в графене отсутствует запрещенная зона, невозможно блокирование тока. Наличие большого тока утечки у закрытого транзистора ведет к высокому энергопотреблению. Это является ключевым недостатком с точки зрения использования графеновых транзисторов в традиционной КМОП-схемотехнике, важнейшим достоинством которой является малое энергопотребление. Однако в аналоговой электронике отсутствие барьера для тока не является принципиальным ограничивающим фактором. Еще одной особенностью графеновых транзисторов является амбиполярный характер проводимости в канале (способность изменять тип проводимости в зависимости от смещения на затворе). Это свойство открывает перспективы для развития амбиполярной электроники с новыми схемотехническими принципами. К настоящему времени изготовлены образцы графеновых транзисторов, демонстрирующие возможность использования амбиполярной проводимости для умножения частоты [1], двухпозиционной фазовой манипуляции [2, 3], смещения сигналов [4, 5]. Большая подвижность носителей дает возможность создавать высокочастотные транзисторы с рекордными для своих размеров частотами отсечки [6].

## II. КОМПАКТНАЯ МОДЕЛЬ ГРАФЕНОВОГО ТРАНЗИСТОРА

В связи с развитием графеновой электроники встает задача схемотехнического проектирования с использованием графеновых транзисторов. Для этого требуется создание простых аналитических «компактных моделей», подобных существующим для кремниевых транзисторов. Примером последних являются модели типа BSIM, являющиеся промышленным стандартом для КМОП-технологии. Такие модели хорошо подходят для быстрых компьютерных расчетов и интеграции в существующие системы автоматизированного проектирования, которые имеют набор стандартных инструментов моделирования, например, переходных процессов, облегчающих разработку и верификацию компактной модели. При этом компактные модели по возможности отражают процессы на физическом, феноменологическом или эмпирическом уровне.

В данной работе предложена ранее диффузионно-дрейфовая компактная модель [7, 8, 9] графенового полевого транзистора была реализована на языке Verilog-A. Этот язык предназначен для описания аналоговой аппаратуры и позволяет реализовывать модели объектов на различных уровнях абстракции. Одним из главных преимуществ Verilog-A с точки зрения разработки компактных моделей является его широкое распространение как составной части языка Verilog-AMS, являющегося расширением обычного Verilog на случай аналого-цифровой аппаратуры. Это обуславливает наличие необходимых для работы с Verilog-A средств в большинстве современных САПР. Также к достоинству языка Verilog-A следует отнести простоту его использования и интеграции написанных на нем моделей в программы моделирования типа SPICE, а также возможность работать с частными производными в символьном виде.

Диффузионно-дрейфовая модель основана на явном аналитическом решении уравнения непрерывности тока в канале и позволяет непрерывным образом в аналитической форме описывать вольтамперные характеристики транзистора

во всех режимах работы [8]. Следует отметить, что традиционно существующие модели, в том числе модели типа BSIM, пренебрегают решением уравнения непрерывности тока в канале, что приводит к нефизичной кусочной форме описания вольтамперных характеристик отдельно для линейного режима и режима насыщения тока, а также для подпорогового и надпорогового участков. Представленная модель учитывает физические особенности графеновых транзисторов (специфическую электростатику, важную роль квантовой емкости и т.д.) и экспериментально наблюдаемые специфические эффекты. Параметрами модели являются геометрические размеры канала транзистора (длина  $L$  и ширина  $W$ ), характеристики подзатворных диэлектриков (их диэлектрические проницаемости и толщины), удельная емкость поверхностных состояний  $C_{it}$ , соответствующее электронейтральности в канале напряжение  $V_{NP}$ , подвижность носителей заряда в графене  $\mu_0$ . При расчетах учитывается существенная роль квантовой емкости в графеновых полевых структурах. Модель позволяет описывать два типа насыщения тока в канале графенового транзистора: электростатическое запираение канала, при котором ток насыщения обратно пропорционален длине канала, и насыщение дрейфовой скорости на значении  $v_{opt}$  (параметр модели), при котором ток насыщения не зависит от длины канала [8].

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ГРАФЕНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

#### A. Двухполупериодный выпрямитель и умножитель частоты

Передаточная характеристика графенового транзистора отражает его амбиполярные свойства и напоминает передаточную характеристику выпрямителя (рис. 1, а).

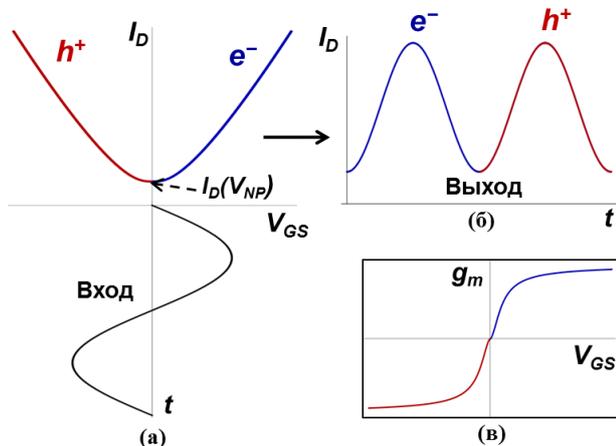


Рис. 1. Выпрямляющие свойства графенового транзистора: (а) передаточная характеристика  $I_D(V_{GS})$  и входной сигнал  $V_{GS}(t)$ ; (б) ток стока  $I_D(t)$ ; (в) крутизна  $g_m(t)$

Нулевая ширина запрещенной зоны является недостатком для цифровой электроники, но может стать преимуществом для амбиполярной электроники, поскольку не вносит разрыва в передаточную характеристику транзистора. Положением точки минимума тока можно управлять, подавая на затвор постоянное напряжение смещения. Если канал графенового транзистора смещен в состояние электронейтральности напряжением  $V_{NP}$ , при подаче на затвор синусоидального сигнала (рис. 1, а) происходит чередование электронной и дырочной проводимости в канале (рис. 1, б). При этом транзистор играет роль двухполупериодного выпрямителя и удвоителя частоты [1]. Благодаря отсутствию запрещенной зоны передаточная характеристика непрерывна. Это делает крутизну также непрерывной функцией, меняющей знак при изменении полярности приложенного к затвору смещения (рис. 1, в) [8]:

$$g_m = \left( \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right)_{V_{DS}} \cong \frac{W}{2L} \mu_0 C_{CH} V_{S0} \left( 1 - \exp\left(-\frac{2V_{DS}}{V_{S0}}\right) \right), \quad (1)$$

где  $I_D$  – ток стока,  $V_{GS}$  – напряжение затвор-исток,  $C_{CH}$  – емкость канала,  $V_{DS}$  – напряжение сток-исток,  $V_{S0}$  – характерное напряжение насыщения, объединяющее два типа насыщения тока в канале: за счет электростатического запираения канала и за счет насыщения дрейфовой скорости носителей заряда.

На рис. 2 представлена моделируемая схема двухполупериодного выпрямителя и умножителя (удвоителя) частоты. Предлагаемое схематическое изображение графенового транзистора демонстрирует его амбиполярные свойства, объединяя изображения п- и р-канального МОП-транзисторов.

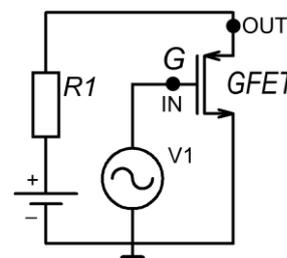


Рис. 2. Двухполупериодный выпрямитель и умножитель частоты на основе графенового транзистора

Свойства устройства обусловлены не только симметрией передаточной характеристики, но и ее нелинейностью, которая определяется соотношением емкостей подзатворного диэлектрика  $C_{ox}$  и поверхностных состояний  $C_{it}$  и описывается моделью (рис. 3). Линейность в окрестности точки электронейтральности возможна лишь при большой  $C_{ox}$  и малой  $C_{it}$ . Она негативно сказывается на характеристиках удвоителя частоты, приводя к искажению формы выходного сигнала из-за появления выраженных побочных гармоник (рис. 4). Но на практике [10] передаточная характеристика графенового транзистора в окрестности точки электронейтральности квадратичная, что дает

возможность эффективного удвоения частоты входного сигнала (рис. 5, 6). При моделировании на вход подавался сигнал частотой 250 МГц.

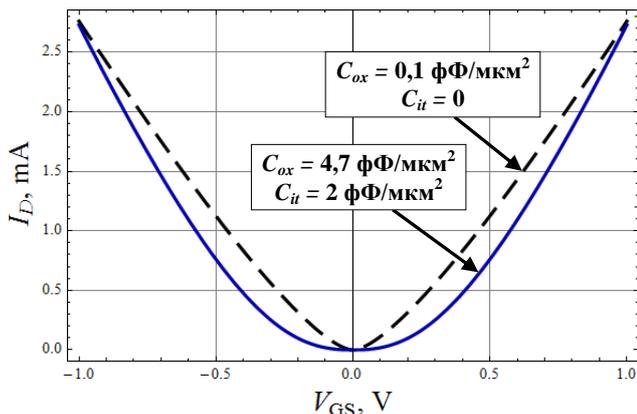


Рис. 3. Результаты моделирования передаточных характеристик графенового транзистора

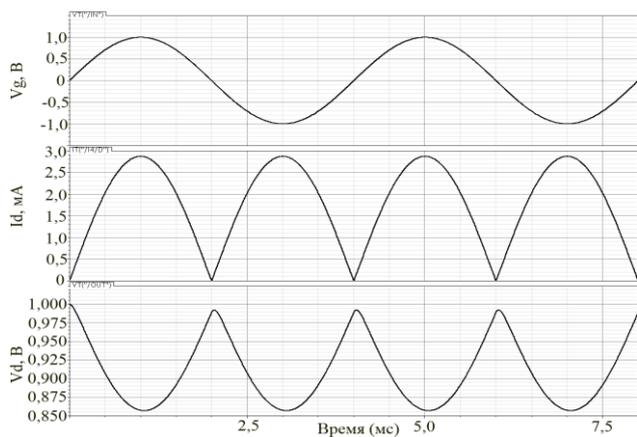


Рис. 4. Результаты моделирования (сверху вниз) напряжения на входе (затворе транзистора) схемы на рис. 2, тока стока транзистора, напряжения на выходе (стоке транзистора) в случае линейной передаточной характеристики

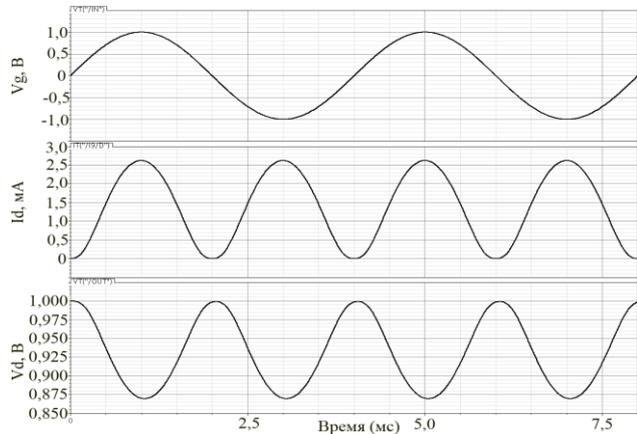


Рис. 5. Результаты моделирования (сверху вниз) напряжения на входе (затворе транзистора) схемы на рис. 2, тока стока транзистора, напряжения на выходе (стоке транзистора) в случае нелинейной передаточной характеристики

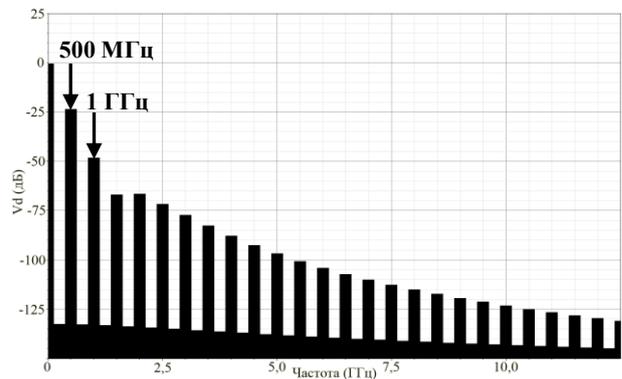


Рис. 6. Результаты моделирования спектра выходного сигнала умножителя частоты

### В. Схема двухпозиционной фазовой манипуляции

Амбиоплярная проводимость графенового транзистора может быть использована в схеме двухпозиционной фазовой манипуляции (рис. 7) [3].

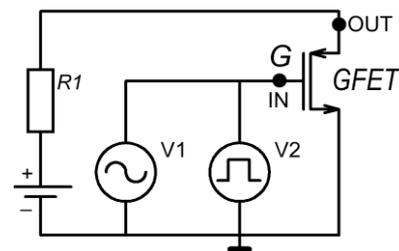


Рис. 7. Схема двухпозиционной фазовой коррекции на основе графенового транзистора

Данная схема позволяет изменять фазу несущего высокочастотного сигнала при помощи управляющего прямоугольного сигнала большой амплитуды. Результаты моделирования представлены на рисунке 8.

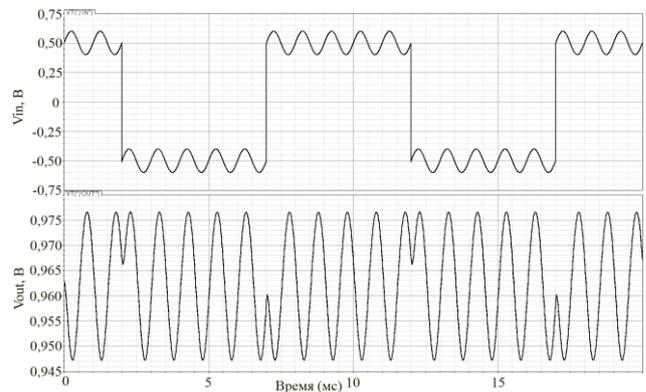


Рис. 8. Результаты моделирования напряжений на входе (IN) и выходе (OUT) схемы двухпозиционной фазовой манипуляции

На затвор графенового транзистора подаются цифровой прямоугольный сигнал данных, симметричный относительно точки электронейтральности (для определенности  $\pm 0,5$  В), и высокочастотный синусоидальный сигнал (меньшей амплитуды). В таком случае цифровой сигнал переключает канал между электронной

проводимостью (при положительном смещении) и дырочной проводимостью (при отрицательном смещении). На ветви передаточной характеристики с дырочной проводимостью крутизна отрицательная, а на ветви с электронной проводимостью крутизна положительная (рис. 1, в). Поэтому переключение между «1» и «0» ведет к изменению фазы выходного сигнала на 180°: при подаче отрицательной полуволны фаза сигнала на выходе повторяет фазу высокочастотного сигнала на входе, а при подаче положительной полуволны фаза сигнала на выходе сдвигается.

### С. Смеситель

Выраженная квадратичная компонента передаточной характеристики графенового транзистора позволяет использовать его в качестве смесителя, обладающего высокими характеристиками [4]. На вход смесителя (рис. 9) подаются два сигнала с частотами  $f_1$  и  $f_2$ . Предварительно канал необходимо сместить в состояние электронейтральности постоянным напряжением  $V_{NP}$ .

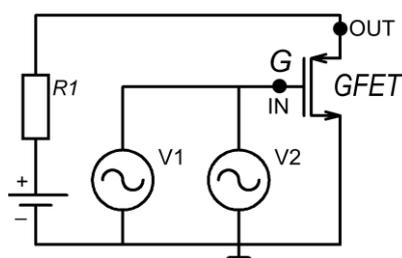


Рис. 9. Смеситель на основе графенового транзистора

На выходе получают сигнал, имеющий полезные гармоники  $f_1 + f_2$  и  $f_1 - f_2$ . Благодаря симметрии передаточной характеристики эффективно подавляются гармоники нечетных порядков, присутствующие в униполярных смесителях [11]. Результаты моделирования спектра выходного сигнала смесителя представлены на рис. 10. Частота входных сигналов составляет  $f_1 = 30$  МГц и  $f_2 = 10$  МГц.

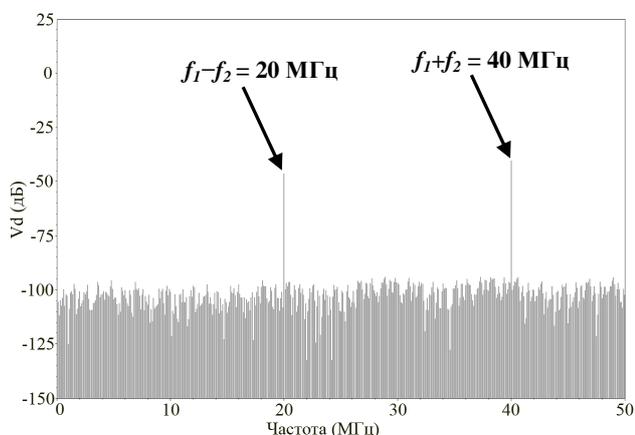


Рис. 10. Результаты моделирования спектра выходного сигнала смесителя

## IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная компактная модель на языке Verilog-A делает возможным схемотехническое проектирование с использованием графеновых транзисторов. Промоделированы двухполупериодный выпрямитель и умножитель частоты, схема двухпозиционной фазовой манипуляции, смеситель. Все эти устройства имеют простую схемотехнику и требуют лишь один графеновый транзистор, отличаясь между собой только подаваемыми на затвор транзистора сигналами. Возможность создания таких устройств обусловлена амбиполярной проводимостью графеновых транзисторов, появление которых дает возможность развития амбиполярной электроники. Это открывает перспективы для принципиально нового подхода к проектированию схем с использованием графеновых транзисторов.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] H. Wang D. Nezich, Kong J., Palacios T. Graphene frequency multipliers // IEEE Electron Device Letters. – 2009. – V. 30. – № 5. – P. 547–549.
- [2] Yang X., Mohanram K. Ambipolar electronics / Rice University TREE1002. – 2010. – URL: <https://scholarship.rice.edu/bitstream/handle/1911/27467/ambipolarTREE1002.pdf> (дата обращения: 30.01.2012).
- [3] Hsu A., Wang H., Kim K.K., Kong J., Palacios T. High Frequency Performance of Graphene Transistors Grown by Chemical Vapor Deposition for Mixed Signal Applications // Japanese Journal of Applied Physics. – 2011. – № 50.
- [4] Wang H., Hsu A., Wu J., Kong J., Palacios T. Graphene-Based Ambipolar RF Mixers // IEEE Electron Device Letters. – 2010. – V. 31. – № 9. – P. 906–908.
- [5] Habibpour O., Cherednichenko S., Vukusic J., Yhland K., Stake J. A Subharmonic Graphene FET Mixer // IEEE Electron Device Letters. 2012. – V. 33. – № 1. – P. 71–73.
- [6] Schwierz F. Graphene transistors // Nature Nanotechnology. – 2010. – V. 5. – P. 487–496.
- [7] Цельковский А.А., Батманова Д.К., Зебрев Г.И. Компактная модель графенового транзистора с двойным затвором, предназначенная для проектирования высокочастотных схем // Сборник научных трудов XV Международной телекоммуникационной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь и наука. – URL: [http://mn2011.mephi.ru/content/articles/5/07.12.2011\\_1727/tselykovskiy.doc](http://mn2011.mephi.ru/content/articles/5/07.12.2011_1727/tselykovskiy.doc) (дата обращения: 30.01.2012).
- [8] Zebrev G.I., Tselykovskiy A.A., Batmanova D.K., Melnik E.V. Small-Signal Capacitance and Current Parameter Modeling in Large-Scale High-Frequency Graphene Field-Effect Transistors // arXiv:1112.3856v1.
- [9] Zebrev G.I. Graphene Field Effect Transistors: Diffusion-Drift Theory. – A chapter in “Physics and Applications of Graphene – Theory”/ Ed. by S. Mikhailov – InTech, 2011.
- [10] Meric I., Han M.Y., Young A.F., Ozyilmaz B., Kim P., Shepard K.L. Current saturation in zero-bandgap, top-gated graphene field-effect transistors // Nature Nanotechnology. – 2008. – V. 3. – P. 654–659.
- [11] Garcia J., Pedro J.C., De La Fuente M.L., De Carvalho N.B., Sanchez A.M., Puente A.T. Resistive FET mixer conversion loss and IMD optimization by selective drain bias // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1999. – V. 47. – № 12. – P. 2382–2392.