

Детекторы терагерцового излучения на основе массивов полевых наногетероструктурных AlGaAs/InGaAs/GaAs транзисторов

*Д.М. Ермолаев¹, В.Е. Земляков², В.И. Егоркин²,
А.А. Горбачевич², С.Ю. Шаповал¹*

¹*Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых
материалов РАН (г. Черноголовка)*

²*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

Terahertz Radiation Detectors Based on Arrays of Field Nanoheterostructure AlGaAs/InGaAs/GaAs Transistors

*D.M. Ermolaev¹, V.E. Zemlyakov², V.I. Egorkin²,
A.A. Gorbatsevich², S.Yu. Shapoval¹*

¹*Institute of Technology of Microelectronics and Particularly Pure Mate-
rials Of RAS, Chernogolovka*

²*National Research University of Electronic Technology, Moscow*

Приведены результаты исследований терагерцовых детекторов с пространственной последовательно и параллельно соединенной транзисторной структурой на основе арсенид-галлиевой наногетероструктуры с асимметричным Т-образным затвором в каждом транзисторе. Показано, что детекторы демонстрируют фототоковый и фотовольтаический/фотопроводящий терагерцовые отклики без использования дополнительных антенных элементов. Измерена чувствительность свыше 1000 В/Вт и 50 мА/Вт соответственно для последовательного и параллельного соединения транзисторов. Получена эквивалентная мощность шума ниже 10^{-11} Вт/Гц^{0,5}.

Ключевые слова: терагерцовый детектор; наногетероструктура; арсенид галлия.

The study results for the THz detectors with a spatial serial and parallel connected transistor structure based on GaAs heterostructure with an asymmetric T-shaped gate in each transistor have been presented. It has been shown that the photovoltaic/photoconductive detectors demonstrate terahertz responses without using additional antenna elements. The sensitivity of up to 1000 V/W and 50 mA/W for the serial and parallel connection of transistors has been measured. An equivalent noise power below 10^{-11} W/Hz^{0.5} has been obtained.

Keywords: terahertz detector nanostructures; gallium arsenide.

Введение. Нелинейные свойства плазмонных возбуждений в двумерном электронном канале полевого транзистора (ПТ) могут использоваться для детектирования терагерцового излучения [1]. Плазмонные терагерцовые детекторы на ПТ могут работать в широком диапазоне терагерцовых частот и температур окружающей среды и имеют хороший баланс между чувствительностью и добротностью [2, 3]. Для получения ненулевого терагерцового отклика на ПТ обязательно наличие асимметрии электронного канала ПТ. Обычно такая асимметрия создается путем асимметрии ввода терагерцового излучения в канал ПТ со стороны истока или со стороны стока [4] либо путем задания постоянного тока стока через канал ПТ [5]. Размеры ПТ на два или даже три порядка величины меньше длины волны терагерцового излучения, поэтому требуются специальные антенные элементы для эффективного связывания терагерцового излучения с плазмонными колебаниями в канале ПТ [2, 3, 6]. Однако дополнительная антенна не является необходимой, если ПТ образуют пространственно развитую транзисторную структуру. Например, ПТ соединяются в плотный массив с последовательным или параллельным соединением, который является эффективной терагерцовой антенной в результате электромагнитного связывания между различными ПТ [7, 8].

В настоящей работе представлены результаты исследований терагерцового отклика последовательной цепочки из четырех ПТ и массива параллельно соединенных 192 ПТ. Исследована зависимость терагерцового фотонапряжения от постоянного тока смещения стока и шумовые характеристики детектора.

Изготовление образцов. Во всех образцах использовалось соединение одних и тех же элементов (единичный ПТ) в вертикальном сечении. При изготовлении образцов применялся один тип наногетероструктуры – GaAs/InGaAs/AlGaAs. Двумерный (2D) электронный канал формировался в нелегированном слое InGaAs толщиной 12 нм с δ -легированным барьерным слоем AlGaAs толщиной 40 нм и нелегированным буферным слоем GaAs толщиной 400 нм, сформированным на (100) поверхности полуизолирующей подложки GaAs толщиной 450 мкм. Контактный слой GaAs толщиной 50 нм легировался с содержанием Si до $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Плотность электронов в канале составляла $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ с эффективной массой электрона $m = 0,061m_0$, где m_0 – масса свободного электрона, и подвижностью при комнатной температуре, равной $5900 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (соответствует времени рассеяния электрона $\tau = 0,2 \text{ пс}$). Омические контакты истока и стока сделаны путем осаждения слоя AuGe-Ni-Au (30/10/300 нм) с дальнейшим отжигом при 400°C в течение 30 с в атмосфере азота.

Затвор единичной детекторной ячейки имеет Т-образную форму с длиной затвора 0,2 мкм и последовательностью слоев Ti-Au 650 нм (150/500 нм). Ножка Т-образного затвора задает пространственную асимметрию, разделяя канал ПТ под симметричной шляпкой Т-образного затвора в отношении 1/2. На рис.1 показан вертикальный разрез элемента и приведена фотография затвора в электронном микроскопе. Все металлические слои затвора осаждались испарением металлов электронным лучом. Металлические контакты формировались методом взрывной литографии. Верхняя поверхность образца пассивировалась посредством осаждения слоя нитрида кремния. На основе таких элементов изготовлены детекторы с параллельным и последовательным соединением: детектор с параллельным соединением имеет 192 элемента, с последовательным – 4.

На рис.2 схематически показан планарный детектор с параллельным соединением элементов. Схематическое изображение вида сверху на разводку контактов детектора с последовательным соединением показан на рис.3. Структура имеет два боковых и три свободных омических контакта между различными ПТ в цепочке. Свободные омические контакты являются одновременно стоком и истоком двух расположенных рядом ПТ.

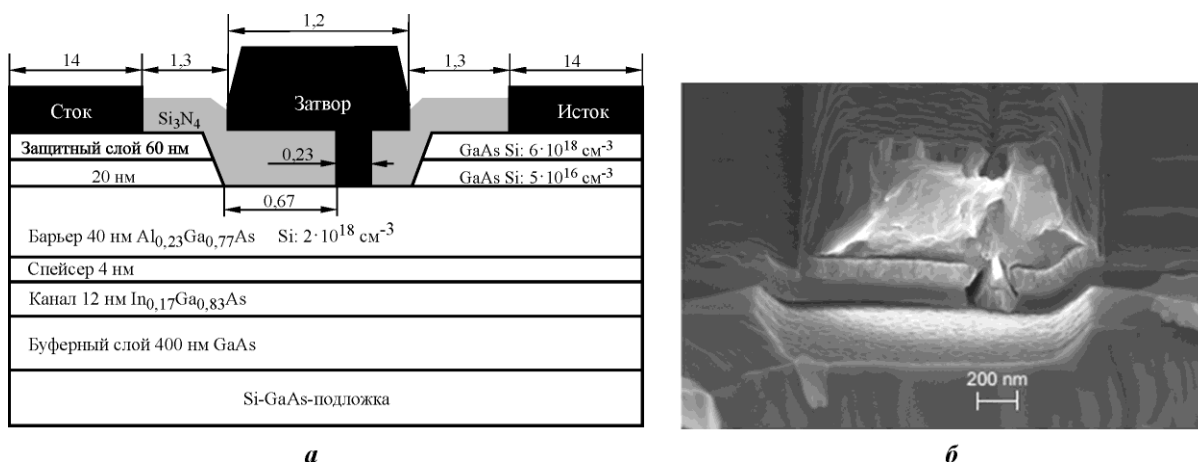


Рис. 1. Вертикальный разрез элемента в массивах, размеры даны в мкм (а) и фотография затвора в электронном микроскопе (б)

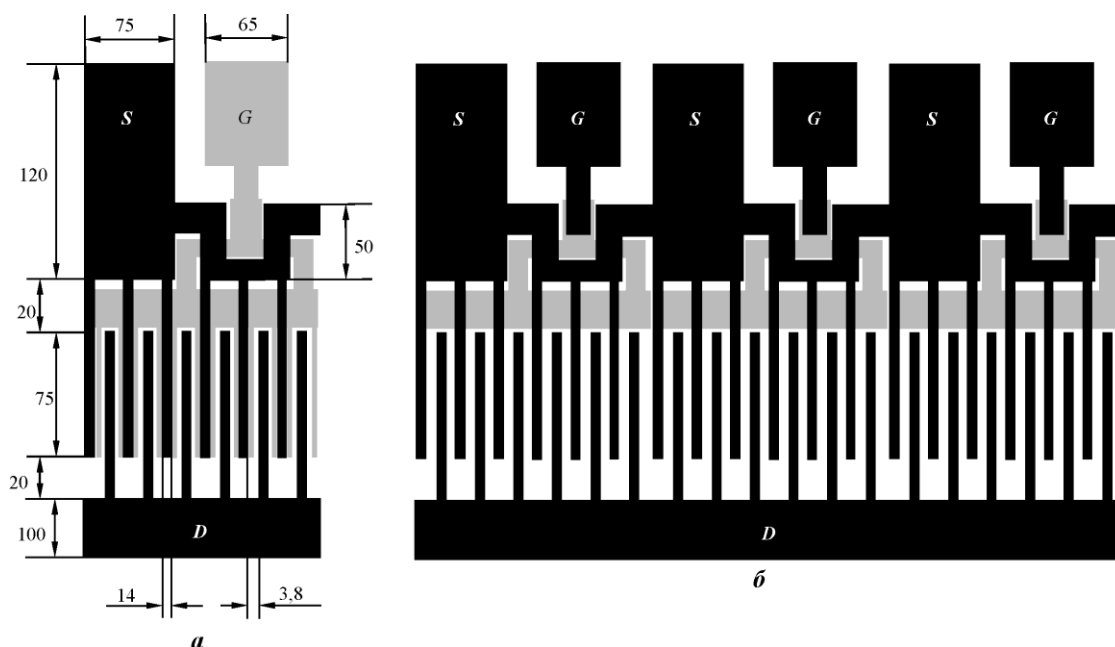


Рис. 2. Схематическое изображение элементов в ячейке, латеральные размеры даны в мкм (а) и вид сверху на транзистор с контактами стока *D*, истока *S* и затвора *G* (б)

Кристаллы с образцами монтировались в кристаллодержатель, позволяющий прикладывать постоянное смещение на затвор к общему затворному контакту и постоянный ток смещения стока между боковыми (истоковым и стоковым) контактами цепочки ПТ.

Измерения детекторов. Лампа обратной волны использовалась в качестве монохроматического источника субтерагерцового излучения в диапазоне частот 415–720 ГГц. Измерения проводились на частоте около 0,6 ТГц, на которой выходная мощность лампы максимальна и составляет 1 мВт.

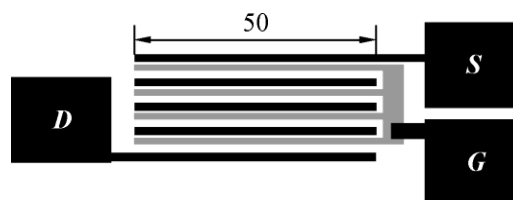


Рис. 3. Вид сверху контактной разводки цепочки ПТ с общим затворным контактом *G* и боковых контактов истока *S* и стока *D*

Выходная мощность прокалибрована при помощи пироэлектрического детектора DTGS, который является авторизованным инструментом, поставляемым с ИК-фурье-спектрометром BOMEM DAS.36. Терагерцовое излучение лампы обратной волны механически модулировалось на частоте 400 Гц и принималось образцом через сверхразмерный полый круглый медный волновод с усеченным конусным концом, имеющим выходную апертуру 6 мм в диаметре, которая полностью покрывает кристалл с цепочкой ПТ. Ослабление мощности в сверхразмерном полом круглом медном волноводе, измеренное пироэлектрическим детектором DTGS, составляло около 10 дБ. Выходная апертура этого волновода расположена чуть выше образца, так что падающая терагерцовая мощность распределялась однородно по всей площади образцов.

Детектор с параллельным соединением элементов. Зависимость измеряемого фототока детектора с параллельным соединением элементов от напряжения на затворе U_g для двух значений температуры $T = 77$ К и $T = 300$ К, а также зависимость проводимости канала транзисторной структуры от затворного напряжения показаны на рис.4.

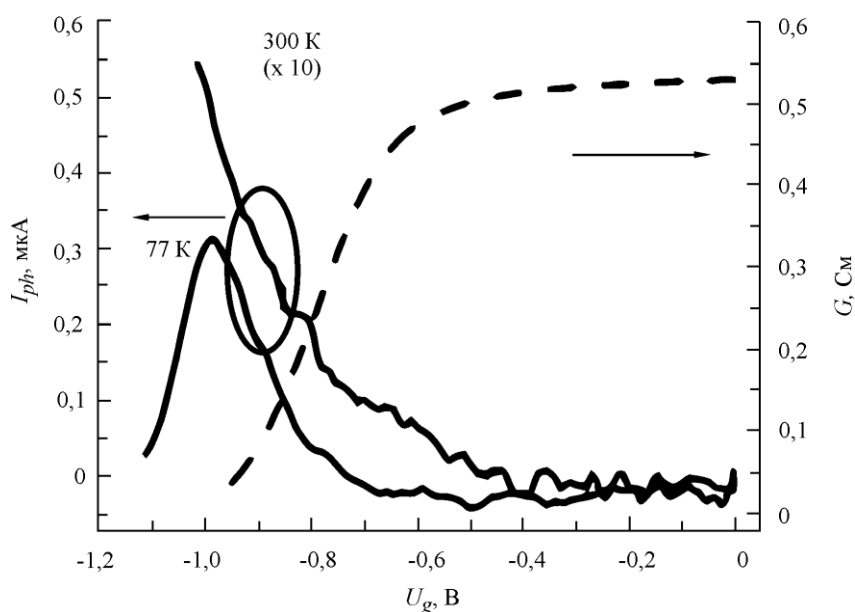


Рис.4. Фототок при различных температурах (сплошная линия) и проводимость исток–сток (пунктирная линия) массива полевых транзисторов как функции затворного напряжения

Различные ПТ в массиве взаимодействуют электромагнитным образом, но они развязаны электрически, поскольку электронные каналы транзисторов изолированы друг от друга. Следовательно, фототок I_{ph} генерируется в каждом ПТ независимо от других транзисторов в массиве. Так как все ПТ в массиве соединены параллельно, измеряемый фототок I_{ph} является суммой фототоков, генерируемых в каждом транзисторе. Относя измеряемый фототок к мощности терагерцового излучения, падающей на всю площадь массива полевых транзисторов $3,6 \cdot 0,075 \text{ мм}^2$, можно оценить фототоковую чувствительность массива ПТ как 0,3 А/Вт при $T = 77$ К и 0,05 А/Вт при $T = 300$ К для $U_g = -1$ В. Проводимость массива параллельно соединенных транзисторов при $U_g = -1$ В равна $G = 0,01$ См (при $T = 300$ К). Тогда фотовольтаическая чувствительность массива (определяется как отношение между фотонапряжением, генерируемым каждым транзистором, и терагерцовой мощностью, падающей на площадь одного транзистора) равна 5 В/Вт при $T = 300$ К, что соответствует фотовольтаической чувствительности 960 В/Вт на каждый транзистор.

На частоте 0,6 ТГц добротность $Q \approx 0,7$ при $T = 300$ К, так что реализуется режим нерезонансного детектирования. Из рис.4 видно, что фотоотклик сильно увеличивается, когда полевые транзисторы близки к режиму отсечки канала (при $U_g \approx -1$ В). Это является характерным признаком режима нерезонансного детектирования [1, 9]. Охлаждение детектора до температуры жидкого азота может увеличить отклик на порядок, при этом существенно уменьшаются шумы детектора (см. рис.4).

Детектор с последовательным соединением элементов. Напряжение отсечки канала транзистора с последовательным соединением четырех элементов равно $U_{th} = -0,9$ В. Терагерцовая мощность, падающая на площадь образца 50×90 мкм, может быть оценена как 15 нВт. Электрическое поле падающей терагерцовой волны поляризовано поперек полосок затворов ПТ. Контакт истока заземлен, и затворное напряжение приложено между контактами затвора и истока. Все измерения проводились при комнатной температуре $T = 300$ К.

На рис.5 показано терагерцовое фотонапряжение U_{ph} как функция затворного напряжения и постоянного тока смещения стока в цепочке ПТ. Фотонапряжение достигает максимума вблизи напряжения отсечки канала ПТ $U_{gs} \approx U_{th} = -0,9$ В.

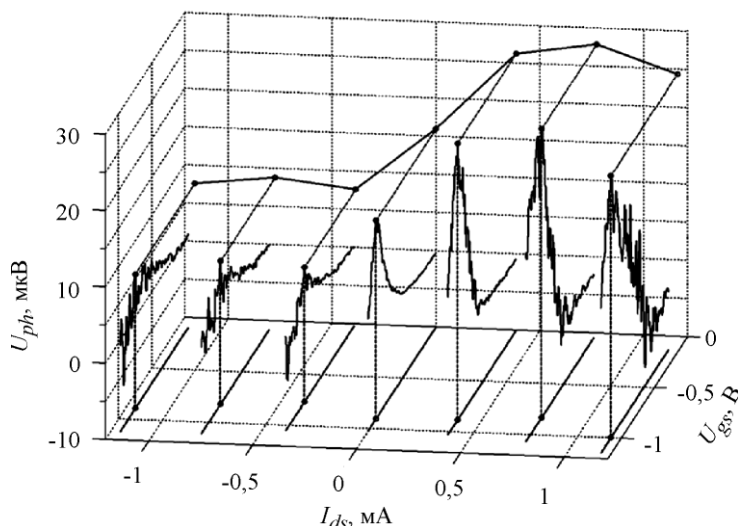


Рис.5. Фотонапряжение U_{ph} как функция затворного напряжения и тока смещения стока. Проекция кривых фотонапряжения на плоскости $(I_{ds} - U_{gs})$ и $(U_{ph} - U_{gs})$

Фотонапряжение резко уменьшается для постоянного отрицательного тока стока (направленного от истока к стоку на рис.3) и растет с увеличением положительного тока смещения стока, проявляя насыщение при токе сток–исток $I_{ds} \approx 1$ мА с дальнейшим падением. Эти результаты могут интерпретироваться следующим образом. Поскольку добротность плазменных колебаний в канале ПТ $\approx 0,8$ на рабочей частоте $\omega/2\pi = 0,6$ ТГц, нерезонансное терагерцовое детектирование [2] имеет место в цепочке ПТ при комнатной температуре. Скорость плазмона $s = \sqrt{em^{-1}(U_{gs} - U_{th})}$, где e и m – соответственно заряд электрона ($e > 0$) и его эффективная масса, является довольно маленькой вблизи обеднения канала ПТ. Поэтому длина распространения плазмона $L_0 = s\sqrt{\tau\omega^{-1}}$ [2] становится короче длины затвора $L_g = 200$ нм в каждом ПТ из цепочки. Следовательно, нерезонансное плазмонное детектирование в режиме длинного канала [2] имеет место в цепочке ПТ. Как известно [5], положитель-

ный/отрицательный постоянный ток смещения стока усиливает/подавляет отклик (см. рис.5). Однако отклик фотонапряжения насыщается и падает, когда значение положительного постоянного тока смещения стока приближается к соответствующему значению электронной скорости насыщения в канале ПТ [5], что происходит при $I_{ds} \approx 1$ мА (см. рис.5).

Чувствительность по напряжению терагерцового детектора на основе цепочки ПТ можно оценить как $R_U = U_{ph}/P_{in}$, где $P_{in} = 15$ нВт – терагерцовая мощность падающей на площадь цепочки ПТ. Получаем $R_U \approx 1,1$ кВ/Вт для $I_{ds} = 0$. Так как чувствительность по напряжению не зависит от числа ПТ, соединенных последовательно (поскольку общий отклик фотонапряжения растет пропорционально числу ПТ в цепочке) [10], чувствительность по напряжению на каждый ПТ в цепочке также равна 1,1 кВ/Вт. Измеренное значение чувствительности по напряжению хорошо совпадает со значением, вычисленным из чувствительности по току массива ПТ, соединенных параллельно [8]. Последовательно соединенная цепочка из четырех ПТ с суммарной длиной 120 мкм, которая короче, чем полдлины волны терагерцового излучения (244 мкм на частоте работы 615 ГГц), обеспечивает сильное связывание с падающим терагерцовым излучением. Этот факт делает последовательно соединенную цепочку нескольких ПТ перспективным терагерцовым детектором для использования в качестве пикселей в матричном фотоприемном устройстве терагерцовой системы видеоизображения, так как в этом случае можно избавиться от дополнительных антенных элементов в каждом пикселе.

Хотя чувствительность растет с увеличением положительного постоянного тока смещения стока (см. рис.5) почти в два раза, режим работы детектора без смещения является более предпочтительным с точки зрения шумовых характеристик и потребления энергии детектором. Без постоянного тока смещения стока шумы детектора полностью определяются тепловыми шумами.

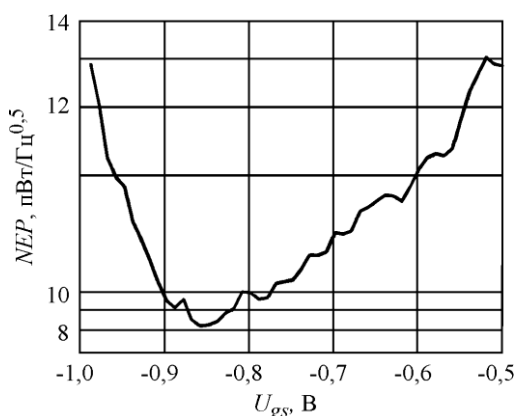


Рис.6. Эквивалентная шумовая мощность детектора на основе цепочки ПТ в зависимости от затворного напряжения

Поэтому эквивалентная шумовая мощность NEP детектора может вычисляться как $NEP = R_U^{-1} \sqrt{4k_B T r_{sd}}$, где k_B – константа Больцмана; T – рабочая температура; r_{sd} – сопротивление сток–исток цепочки ПТ, которое определяется из переходной характеристики. Минимальное значение $NEP = 8 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц^{0,5} достигается при напряжении на затворе $U_{gs} = -0,86$ В (рис.6).

Результаты и их обсуждение. Причина появления фотовольтаического отклика в исследуемых структурах заключается в асимметричном расположении затвора в каждом элементе исследуемых структур. Так как ножка Т-образного затвора сдвинута к контакту истока в каждом ПТ, постоянное напряжение U_{THz} , индуцируемое терагерцовым излучением на металлических контактах, прикладывается, главным образом, между контактами затвора и истока в каждом полевом транзисторе (рис.7). Это происходит в результате того, что емкость сток–затвор C_d эффективно шунтирует ввод терагерцового напряжения.

Из рис.7 следует, что помимо различающихся емкостей стока и истока ($C_d > C_s$) отличается и ток зарядки этих емкостей. Ток, который заряжает емкость сток–затвор, меньше, так как сопротивления и индуктивности участков под шляпками затвора разные ($R_d > R_s, L_d > L_s$).

Отметим, что короткопериодная металлическая решетка (с периодом гораздо короче, чем длина волны терагерцового излучения) является широкополосной антенной, поскольку амплитуда ближнего поля такой антенны, связываемой с каналами полевого транзистора, является независимой от частоты падающей терагерцовой волны [11].

В работе [10] исследован терагерцовый отклик фотонапряжения электромагнитно-развязанных ПТ, соединенных последовательно внешними проводами. Полученное в настоящей статье значение чувствительности по напряжению в несмещенном режиме детектирования превышает на порядок значение чувствительности, полученное в режиме смещения в работе [10]. В то же время значение NEP на порядок меньше, чем значение NEP , оцененное в работе [10] для нулевого тока смещения стока. Эти преимущества предложенного субтерагерцового детектора на основе плотноупакованных ПТ являются результатом его следующих характерных особенностей:

- асимметричная форма Т-образного затворного контакта в каждом ПТ дает эффективный фотовольтаический отклик даже в несмещенном режиме работы детектора;
- различные ПТ электромагнитно связаны (длина элемента существенно меньше длины волны терагерцового излучения), поэтому такие массивы можно использовать как антенну;
- изготовление цепочки ПТ на одном кристалле позволяет избежать использования внешних проводов для соединения различных ПТ в цепочку.

Заключение. Плотноупакованные массивы ПТ могут использоваться как терагерцовые детекторы с высокой чувствительностью без применения дополнительных антенных элементов. Короткопериодная решетка металлических контактных пальцев ПТ служит эффективной антенной, связывающей падающее терагерцовое излучение с каждым транзистором. Асимметричное расположение ножки затвора в каждом ПТ обеспечивает приложение наводимого терагерцового напряжения антенной из пальцев транзистора между затворными и истоковыми контактами в каждом транзисторе, что делает возможным получение сильного фотовольтаического отклика. Массив ПТ может демонстрировать сильный фототоковый или фотовольтаический отклик в зависимости от параллельного или последовательного электрического соединения транзисторов в массиве.

Ампер-ваттная чувствительность массива параллельно соединенных плотноупакованных ПТ составляет 50 мА/Вт. Измеренная вольт-ваттная чувствительность цепочки последовательно соединенных ПТ составляет более 1 кВ/Вт при отсутствии постоянного тока смещения и достигает значения 2 кВ/Вт при оптимальном токе смещения. Эквивалентная мощность шума таких детекторов может быть менее 10^{-11} Вт/Гц^{0,5}.

Полученные результаты могут быть использованы для улучшения характеристик плазмонных терагерцовых детекторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Развитие электронной элементной базы и радиоэлектроники» (ГК № 14.427.11.0004).

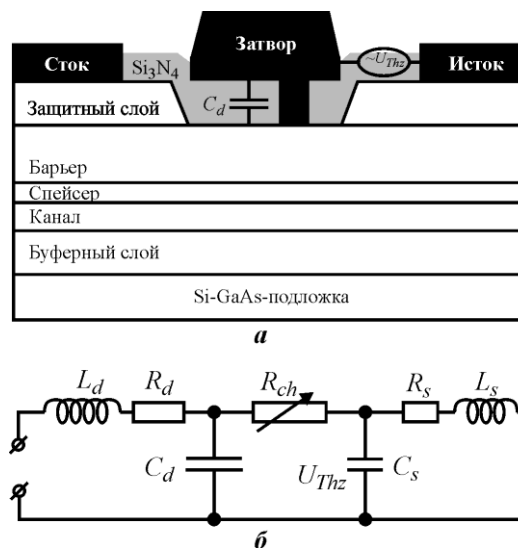


Рис. 7. Схематическое сечение (а) и эквивалентная схема (б) единичного полевого транзистора

Литература

1. **Dyakonov M., Shur M.** Detection, mixing and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1996. – Vol. 43. – P. 380–387.
2. Field effect transistors for terahertz detection: physics and first imaging applications / **W. Knap, M. Dyakonov, D. Coquillat et al.** // J. of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2009. – Vol. 30. – P. 1319–1337.
3. Nanometer size field effect transistors for terahertz detectors / **W. Knap, S.Rumyantsev, M.S. Vitiello et al.** // Nanotechnology. – 2013. – Vol. 24. – N. 21. – P. 214002.
4. Broadband terahertz imaging with highly sensitive silicon CMOS detectors / **F. Schuster, D. Coquillat, H. Videlier et al.** // Optics Express. – 2011. – Vol. 19. – Iss. 8. – P. 7827–7832.
5. Detection of terahertz radiation in gated two-dimensional structures governed by dc current / **D. Veksler, F. Teppe, A.P. Dmitriev et al.** // Physical Review B. – 2006. – Vol. 73. – P. 125328.
6. Rational design of high-responsivity detectors of terahertz radiation based on distributed self-mixing in silicon field-effect transistors / **A. Lisauskas, U. Pfeiffer, E. Ojefors et al.** // J. of Appl. Phys. – 2009. – Vol. 105. – P. 114511.
7. **Popov V.V., Tsymbalov G.M., Fateev D.V., Shur M.S.** Cooperative absorption of terahertz radiation by plasmon modes in an array of field-effect transistors with two-dimensional electron channel // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89. – P. 123504.
8. High-responsivity terahertz detection by on-chip InGaAs/GaAs field-effect-transistor array / **V.V. Popov, D.M. Ermolaev, K.V. Maremyanin et al.** // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 98. – № 153504.
9. Nonresonant detection of terahertz radiation in field effect transistors / **W. Knap, V. Khcharovskii, Y. Deng et al.** // J. of Appl. Phys. – 2002. – Vol. 91. – P. 9346.
10. Enhanced plasma wave detection of terahertz radiation using multiple high electron-mobility transistors connected in series / **T.A. Elkhatib, V.Y. Kachorovskii, W.J. Stillman et al.** // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2010. – Vol. 58. – Iss. 2. – P. 331–339.
11. **Theis T.H.** Plasmons in inversion layers // Surface Science. – 1980. – Vol. 98. – P. 515.

Статья поступила
16 июня 2015 г.

Ермолаев Денис Михайлович – младший научный сотрудник Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка). *Область научных интересов:* плазмоника, микроэлектроника, наноэлектроника.

Земляков Валерий Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектрики (КФН) МИЭТ. *Область научных интересов:* технология СВЧ-приборов на широкозонных полупроводниках, акустоэлектроника, микроэлектроника, физика полупроводников.

Егоркин Владимир Ильич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры КФН МИЭТ. *Область научных интересов:* акустоэлектроника, микроэлектроника, наноэлектроника, физика полупроводников.
E-mail: egorkin@qdn.miee.ru

Горбачевич Александр Алексеевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Физического института РАН, заведующий КФН МИЭТ. *Область научных интересов:* теория конденсированного состояния, наноэлектроника.

Шановал Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка). *Область научных интересов:* плазмоника, микроэлектроника, наноэлектроника, физика полупроводников, плазма.