

# Электронный транспорт и детектирование терагерцевого излучения субмикронными полевыми транзисторами с двумерным электронным газом GaAs/AlGaAs

© А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, Е.В. Демидов, С.В. Морозов, А.А. Дубинов,  
*J. Lusakowski*\*\*\*, *W. Knap*\*\*\*\*, *N. Dyakonova*\*, *E. Kaminska*\*\*\*,  
*A. Piotrowska*\*\*\*, *K. Golaszewska*\*\*\*, *M.S. Shur*\*\*\*\*

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
 603950 Нижний Новгород, Россия

\* GES-UMR, CNRS-Université Montpellier 2,  
 34950 Montpellier, France

\*\* Institute of Experimental Physics, University of Warsaw,  
 00-681 Warsaw, Poland

\*\*\* Institute of Electron Technology,  
 02-668 Warsaw, Poland

\*\*\*\* Rensselaer Polytechnic Institute, Troy,  
 N. Y. 121180-3590, USA

E-mail: more@ipm.sci-nnov.ru

Исследуются электронный транспорт и отклик в терагерцевом диапазоне в полевых транзисторах GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом с высокой подвижностью. Особый интерес к таким транзисторам связан с возможностью создания на основе этих приборов приемников и генераторов, работающих в ТГц-диапазоне. Измерения величины и зависимости сопротивления сток–исток от магнитного поля используются для оценки электронной плотности и подвижности в канале транзистора. Результаты магнитотранспортных измерений используются для интерпретации наблюдаемого нерезонансного детектирования в транзисторах с шириной затвора от 0.8 до 2.5  $\mu\text{m}$ .

В последнее время отмечается большой интерес к детектированию терагерцевого излучения полупроводниковыми приборами с использованием плазменных эффектов. Резонансное и нерезонансное детектирование в полевых транзисторах с двумерным электронным газом наблюдалось в работах [1–4]. Эти исследования нацелены на создание управляемых напряжением быстрых детекторов терагерцевого излучения. Терагерцевому диапазону (0.3–10 ТГц) соответствуют частоты многих возбуждений в конденсированных средах, таких как фононы, переходы с участием мелких примесей, циклотронный и парамагнитный резонансы, вращательные и колебательные возбуждения в жидкостях, а также газах и биологических объектах. Значительный интерес представляет использование терагерцевого излучения для неразрушающего контроля и визуализации, в медицине, мониторинге окружающей среды, пищевой индустрии, борьбе с терроризмом [5,6]. В настоящее время для детектирования терагерцевого излучения в основном применяются широкополосные приемники излучения. Использование селективных и перестраиваемых детекторов при спектральном анализе позволяет отказаться от дифракционных решеток или механически перестраиваемых интерферометров. Перестройка полосы чувствительности может быть реализована для фоторезистивных полупроводниковых приемников (GaAs [7], InP [8], InSb [9], GaAs/AlGaAs [10,11]), помещенных в магнитное поле. Однако такие детекторы всегда требуют охлаждения до температуры жидкого

гелия и приложения магнитных полей порядка нескольких тесла. Во многих случаях предпочтительнее иметь приемник терагерцевого излучения, перестраиваемый приложенным напряжением. Таким приемником может быть полевой транзистор с двумерным электронным газом в канале. В обычном режиме работы верхняя предельная частота полевого транзистора ограничена обратным временем пролета электроном подзатворной области. Использование плазменных эффектов позволяет повысить рабочую частоту субмикронных полевых транзисторов вплоть до терагерцевого диапазона частот [12], поскольку характерные скорости плазменных волн могут составлять  $10^8$  см/с, что существенно выше дрейфовой скорости электрона в канале транзистора. Резонансное детектирование терагерцевого излучения уже продемонстрировано для двух типов полевых транзисторов: коммерчески доступного полевого GaAs/AlGaAs-транзистора [1,2] и полевого транзистора с двойной квантовой ямой и решетчатым затвором [3].

Резонансная частота плазменных колебаний в подзатворном двумерном электронном газе определяется длиной затвора  $L$  и концентрацией электронов  $n$ , которая в первом приближении описывается простой формулой плоского конденсатора  $n = CU_0/e$ . Здесь  $C$  — емкость между затвором и каналом на единицу поверхности,  $U_0 = U_{\text{GS}} - U_{\text{th}}$  — разность между напряжением на затворе и напряжением отсечки транзистора,  $e$  — заряд электрона. Для больших  $U_0$  справедливо следующее

простое выражение для резонансной частоты:

$$f_0 = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{eU_0}{m}}. \quad (1)$$

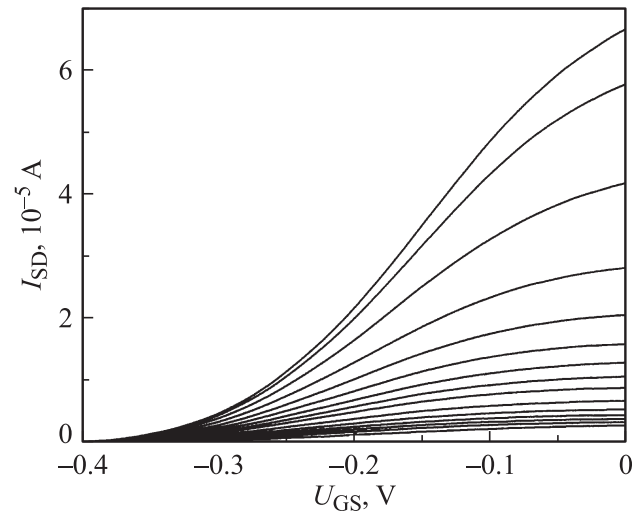
Резонансная частота максимальна для нулевого напряжения на затворе и уменьшается до нуля по мере приближения  $U_{GS}$  к напряжению отсечки.

## 1. Эксперимент

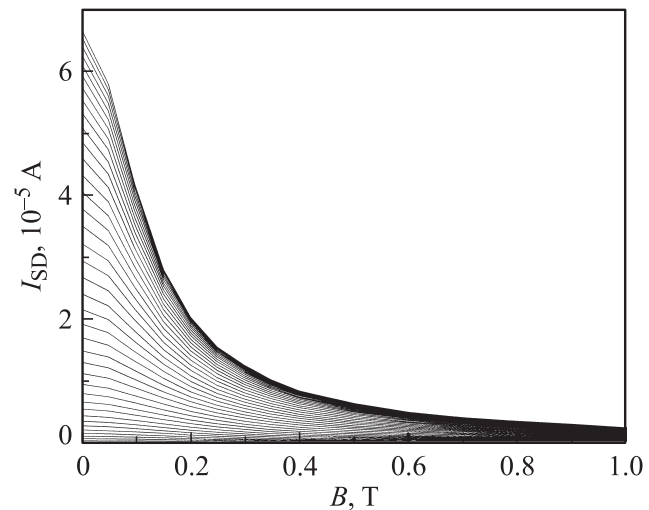
Исследуемые транзисторы изготавливались из выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктуры GaAs/AlGaAs с высокой подвижностью двумерного электронного газа. Расстояние от поверхности до проводящего канала было порядка 160 nm, а расстояние сток–исток для всех транзисторов составляло 10  $\mu\text{m}$ . В работе представлены результаты измерений для двух транзисторов с длиной затвора 0.8  $\mu\text{m}$  ( $T2$ ) и 2.5  $\mu\text{m}$  ( $T3$ ,  $T3^*$ ); ширина канала составляла 50  $\mu\text{m}$  ( $T2$ ,  $T3^*$ ) и 100  $\mu\text{m}$  ( $T3$ ). Затвор располагался в непосредственной близости от истока. Кристалл с транзисторами монтировался на держателе для микросхем, который затем помещался в ответный модуль, расположенный в световодной вставке, в транспортный гелиевый дьюар СТГ-40. Все измерения проводились при  $T = 4.2$  К. Контактные площадки транзисторов золотыми проволочками соединялись с лепестками держателя. Эти же контактные площадки вместе с подводящими металлическими полосками играли роль приемной антенны для терагерцевого излучения. В качестве источников излучения в диапазоне  $f = 50\text{--}700$  GHz использовались лампы обратной волны (ЛОВ) ОВ-74, ОВ-32 и ОВ-30 и генераторы сигналов на основе ЛОВ Г4-161 и Г4-142. По световоду, изготовленному из полированной трубы из нержавеющей стали, излучение вводилось в транспортный гелиевый дьюар и фокусировалось с помощью полированного латунного конуса на кристалл с транзисторами. Измерения проводились при постоянной частоте излучения и амплитудной модуляции с частотой 200–1000 Hz. Измерялась величина фотоэда в цепи исток–сток при развертке прикладываемого к затвору отрицательного постоянного напряжения относительно истока  $U_{GS}$ . Использовалась стандартная схема синхронного детектирования сигнала. Сигнал с выхода синхродетектора и напряжение на затворе с помощью аналогоцифрового преобразователя записывались в память персональной ЭВМ. Для определения характеристик транзисторов осуществлялись измерения на постоянном токе проводимости канала в зависимости от напряжения на затворе и от нормального магнитного поля.

## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены типичные зависимости тока исток–сток  $I_{SD}$  транзистора от напряжения на затворе при различных значениях магнитного поля. На рис. 2

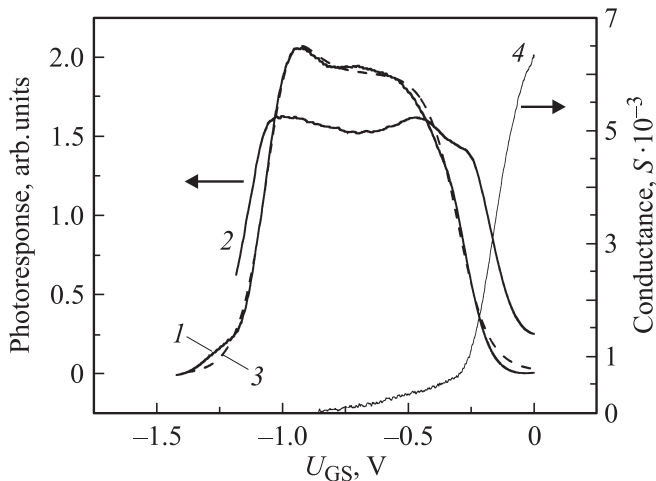


**Рис. 1.** Переходные характеристики транзистора  $T3^*$ , измеренные при значениях магнитного поля от 0 (верхняя кривая) до 0.4 Т с шагом 0.05 Т и от 0.4 до 1 Т с шагом 0.1 Т. Напряжение исток–сток составляет 20 мВ.



**Рис. 2.** Зависимости тока исток–сток транзистора  $T3^*$  от магнитного поля при напряжениях за затворе  $U_{GS}$  от 0 (верхняя кривая) до  $-0.4$  В (с шагом 0.01 В), полученные на основании рис. 1.

эти данные перестроены в зависимости от магнитного поля при постоянном напряжении на затворе. Видно, что транзистор закрывается при напряжении отсечки  $U_{th} = -(0.35\text{--}0.4)$  В. Зависимость тока от магнитного поля позволяет оценить подвижность носителей заряда в канале исходя из условия  $\mu B_{1/2} = 1$ , где  $B_{1/2}$  — поле, при котором ток уменьшается в 2 раза. Для данных, представленных на рис. 2, эта оценка дает  $\mu \approx 7.5 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  при  $U_{GS} = 0$ . Это позволяет оценить из условия  $\omega\tau = 1$  нижний предел частоты для наблюдения резонансного отклика как 50 GHz.



**Рис. 3.** Измеренные (1,2) и рассчитанная по формуле (22) из работы [4] (3) зависимости фотоотклика транзистора *T2* от напряжения на затворе. 4 — измеренная переходная характеристика транзистора. *f*, GHz: 1, 3 — 329, 2 — 228.

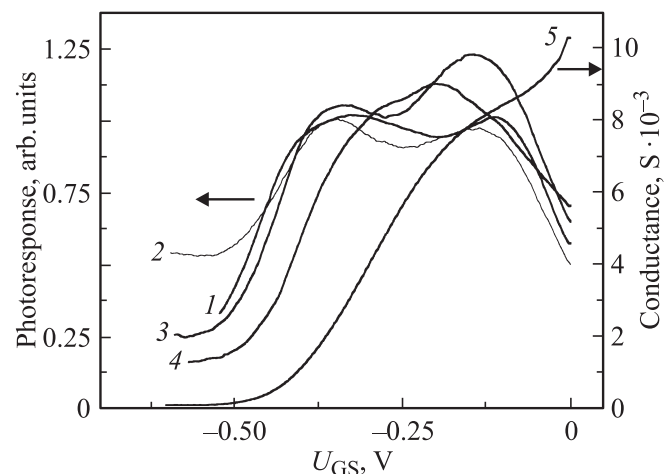
На рис. 3 представлены типичные зависимости фотоотклика транзистора от напряжения на затворе, а также измеренная переходная характеристика. Наблюдаемой величине напряжения отсечки  $U_{th} = -0.3$  V при нулевом напряжении на затворе отвечает, согласно (1), резонансная частота  $f(0) = 270$  GHz, которая должна уменьшаться до нуля при изменении  $U_{GS}$  от нуля до  $-0.3$  V. Таким образом, частота 329 GHz (см. кривую 1) превышает максимальную резонансную частоту. Напротив, частота 228 GHz (см. кривую 2) меньше  $f(0)$  и в соответствии с (1) при  $U_{GS} \approx -0.1$  V сравнивается с частотой плазменных колебаний в подзатворной электронной плазме. Однако, как видно из рис. 3, в этой области напряжений на затворе на кривой 2 не регистрируется никаких особенностей, которые можно было бы связать с резонансным откликом.<sup>1</sup> Наблюдаемый фотоотклик носит нерезонансный характер. Грубая оценка чувствительности приемника дает величину  $10^3$  V/W. Как видно из рис. 3, форма зависимости сигнала от напряжения на затворе хорошо согласуется с рассчитанной в модели нерезонансного отклика [4]. Качественно спад сигнала в области больших напряжений на затворе можно объяснить полным обеднением канала. Спад, наблюдаемый при уменьшении  $U_{GS}$ , связывается с ростом проводимости канала и ухудшением согласования прибора с антенной.

На рис. 4 представлены зависимости фотоотклика от напряжения на затворе для транзистора *T3* с нетипичной переходной характеристикой (кривая 5). Этот

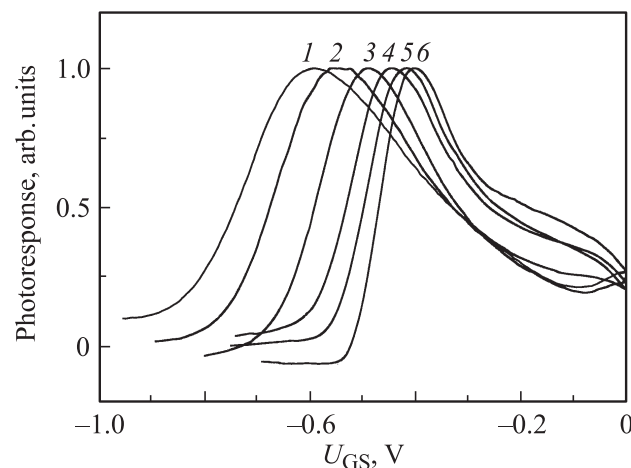
<sup>1</sup> По мнению авторов, отсутствие резонансного отклика (в отличие от результатов работ [1,2]) может быть обусловлено недостаточно сильной связью „плазменного резонатора“ с другими элементами эквивалентной электрической схемы транзистора. В результате резонансный отклик (который должен наблюдаться при изменении  $U_{GS}$  от нуля до напряжения отсечки) может теряться на фоне нарастающего нерезонансного отклика.

транзистор имел расщепленный на две равные части канал (ширина каждой части  $50 \mu\text{m}$ ). Хорошо видно, что переходная характеристика имеет два участка, которым соответствуют два напряжения отсечки (около  $-0.2$  и  $-0.4$  V). С каждым из напряжений отсечки связаны наблюдаемые особенности нерезонансного отклика как функции напряжения на затворе.

Рис. 5 иллюстрирует работу транзистора как детектора микроволнового излучения в нелинейном режиме. Хорошо видно, что с ростом мощности излучения кривая зависимости фотоотклика от напряжения на затворе „затягивается“ в область больших отрицательных значений  $U_{GS}$ , что связано, по-видимому, с соразмерным увеличением амплитуды высокочастотного напряжения на затворе.



**Рис. 4.** Зависимости фотоотклика (1–4) транзистора *T3* от напряжения на затворе. 5 — переходная характеристика транзистора. *f*, GHz: 1 — 597, 2 — 629, 3 — 655, 4 — 682.



**Рис. 5.** Зависимости фотоотклика транзистора *T3* от напряжения на затворе при различных уровнях мощности излучения. 1 — при максимальном уровне мощности, 2–6 — при последовательном уменьшении уровня мощности в 2 раза. Все кривые нормированы на максимальный отклик.  $f = 78$  GHz.

## Список литературы

- [1] W. Knap, Y. Deng, S. Rumyantsev, J.-Q. Lü, M.S. Shur, C.A. Saylor, L.C. Brunel. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 18, 3433 (2002).
- [2] W. Knap, Y. Deng, S. Rumyantsev, M.S. Shur. *Appl. Phys. Lett.* **81**, 24, 4637 (2002).
- [3] X.G. Peralta, S.J. Allen, M.C. Wanker, N.E. Harff, J.A. Simmons, M.P. Lilly, J.L. Reno, P.J. Burke, J.P. Eisenstein. *Appl. Phys. Lett.* **81**, 9, 1627 (2002).
- [4] W. Knap, V. Kachorovskii, Y. Deng, S. Rumyantsev, J.-Q. Lü, R. Gaska, M.S. Shur, F. Simin, X. Hu, M. Asif Khan, C.A. Saylor, L.C. Brunel. *J. Appl. Phys.* **91**, 11, 9346 (2002).
- [5] A.C. Samuels, D.L. Woolard, T. Globus, B. Gelmont, E.R. Brown, J.O. Jensen, R. Suenram, W.R. Loerop. *Environmental Sensing of Chemical and Biological Warfare Agents in the THz Region. WOFE-0.2 Proc. / Ed. by Michael S. Shur, William Tang, Yoon Soo Park* (2002).
- [6] B. Ferguson, X.-C. Zhang. *Nature Mater.* **1**, 1, 26 (2002).
- [7] G.E. Stillman, C.M. Wolfe, J.O. Dimmock. *Solid State Commun.* **7**, 7 (1969).
- [8] W. Knap, J. Lusakowski, K. Karpierz, B. Orsal, J.L. Robert. *J. Appl. Phys.* **72**, 2, 680 (1992).
- [9] G. Strasser, K. Bochter, M. Witzany, E. Gornik. *Infrared Phys.* **32**, (1991).
- [10] Y. Kawano, Y. Hisanaga, H. Takenouchi, S. Komiyama. *J. Appl. Phys.* **89**, 7, 4037 (2001).
- [11] B.A. Andreev, I.V. Erofeeva, V.I. Gavrilenko, A.L. Korotkov, A.N. Yablonskiy, O. Astafiev, Y. Kawano, S. Komiyama. *Semicond. Sci. Technol.* **16**, 5, 300 (2001).
- [12] M. Dyakonov, M.S. Shur. *Phys. Rev. Lett.* **71**, 15, 2465 (1993).