

Резонансное детектирование терагерцового излучения в субмикронных полевых транзисторах GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом

© А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, К.В. Маремьянин[¶], С.В. Морозов, Ф. Терре*, W. Кнар*

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

* Groupe d'Etude de Semiconducteurs, CNRS—Université Montpellier 2,
34095 Montpellier, France

(Получена 7 августа 2008 г. Принята к печати 2 сентября 2008 г.)

Исследовано резонансное детектирование терагерцового излучения субмикронными полевыми транзисторами GaAs/AlGaAs (длина затвора $L = 250$ нм) с двумерным электронным газом в канале при $T = 4.2$ К. Для таких транзисторов впервые продемонстрировано смещение максимума отклика (фотоэдс сток—исток) с ростом частоты в область больших напряжений на затворе в соответствии с моделью Дьяконова—Шура. Показано, что при повышении температуры до 77 К зависимость фотоэдс от напряжения на затворе становится нерезонансной, что связано с уменьшением подвижности.

PACS: 85.30.Tv, 85.35.Be, 72.30.+q, 73.40.Kp, 73.63.Hs

1. Введение

Спектр возможных практических приложений излучения терагерцового диапазона частот чрезвычайно широк, что обуславливает значительный интерес к нему многих исследовательских групп в различных странах мира. Электромагнитные волны терагерцового диапазона отражаются металлами, но они проникают через пластмассы, бумагу, сухую древесину. В терагерцовом диапазоне лежат вращательные спектры многих органических молекул, включая колебания биологически важных коллективных мод ДНК и белков, а также фоновые резонансы кристаллических решеток, что позволяет развить новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых образцов [1]. Отраженные, поглощенные в среде или прошедшие сквозь нее терагерцовые волны несут в себе богатейшую информацию об объекте.

Для детектирования терагерцового излучения на сегодняшний день в основном применяются широкополосные приемники излучения, такие как болометры [2–4], пирозлектрические датчики, диоды Шоттки [5,6] и фотопроводящие детекторы [7]. Аналога селективного и перестраиваемого, компактного полупроводникового детектора, покрывающего достаточно широкий диапазон частот с подходящим быстродействием, на сегодняшний день не существует. Его создание позволило бы отказаться при спектральном анализе от дифракционных решеток или механически перестраиваемых интерферометров. Таким селективным детектором может быть полевой транзистор с двумерным электронным газом в канале.

Рабочая частота субмикронных полевых транзисторов может быть значительно повышена с использованием

плазменных эффектов, поскольку характерные скорости плазменных волн на порядок превышают дрейфовую скорость электрона в канале транзистора [8]. Типичные значения концентрации двумерного электронного газа, составляющие от 10^{10} до 10^{12} см⁻², и субмикронные размеры транзисторов приводят к тому, что резонансная частота плазменных колебаний в подзатворной плазме транзистора лежит в терагерцовом диапазоне. При этом концентрация двумерного электронного газа может изменяться приложенным к затвору напряжением, что дает возможность перестройки резонансной частоты.

Резонансное детектирование терагерцового излучения удалось наблюдать для различных типов полевых транзисторов: полевого транзистора с квантовой ямой и решетчатым затвором [9,10], полевых транзисторов InGaP/InGaAs/GaAs [11], InGaAs/AlInGa [12] и AlGaAs/InGaAs [13,14] и GaN/AlGaN [15]. В данной работе исследовалось детектирование терагерцового излучения субмикронными полевыми транзисторами GaAs/AlGaAs при $T = 4.2$ К. Резонансное детектирование терагерцового излучения в подобном транзисторе уже было продемонстрировано в работе [16], где измерения проводились на одной фиксированной частоте 600 ГГц. Резонансный фотоотклик на фоне нерезонансного удалось зарегистрировать только при низких температурах. При увеличении температуры измерений резонансный фотоотклик исчезал за счет уменьшения подвижности и соответственно фактора $\omega\tau$, где $\omega/2\pi$ — частота излучения, а τ — время релаксации импульса носителей заряда в канале транзистора.

2. Эксперимент

Исследовались коммерчески доступные субмикронные полевые транзисторы GaAs/AlGaAs (Fujitsu FHX06X) с двумерным электронным газом в канале с длиной

[¶] E-mail: kirillm@ipm.sci-annov.ru

затвора 250 нм. Переходные характеристики и фотоотклик на терагерцовое излучение в транзисторе были измерены при $T = 4.2$ К. Кристалл с транзистором монтировался на держателе для микросхем, расположенном в световодной вставке в транспортный гелиевый сосуд Дьюара СТГ-40. Контактные площадки транзисторов золотыми проволочками соединялись с лепестками держателя. Эти же контактные площадки вместе с подводящими металлическими полосками играли роль приемной антенны для терагерцового излучения. В качестве монохроматического и перестраиваемого источника излучения использовалась лампа обратной волны. По световоду, изготовленному из полированной трубки из нержавеющей стали, излучение заводилось в транспортный гелиевый сосуд Дьюара и фокусировалось с помощью полированного латунного конуса на кристалл с транзисторами. Измерения проводились при постоянной частоте излучения и при амплитудной модуляции с частотой 200 Гц. Измерялась величина фотоэдс между стоком и истоком при развертке прикладываемого к затвору отрицательного постоянного напряжения относительно истока U_{gs} . Использовалась стандартная схема синхронного детектирования сигнала.

3. Результаты и обсуждение

Типичные зависимости тока „исток–сток“ I_{ds} транзистора GaAs/AlGaAs от напряжения на затворе U_{gs} при различных значениях напряжения между стоком и истоком U_{ds} , измеренные при температуре $T = 4.2$ К, показаны на рис. 1. Видно, что транзистор закрывается при напряжении отсечки $U_{th} \approx -0.3$ В.

На рис. 2, *a* представлены зависимости фотоотклика транзистора GaAs/AlGaAs от напряжения на затворе при отсутствии напряжения сток–исток (т.е. фотоэдс)

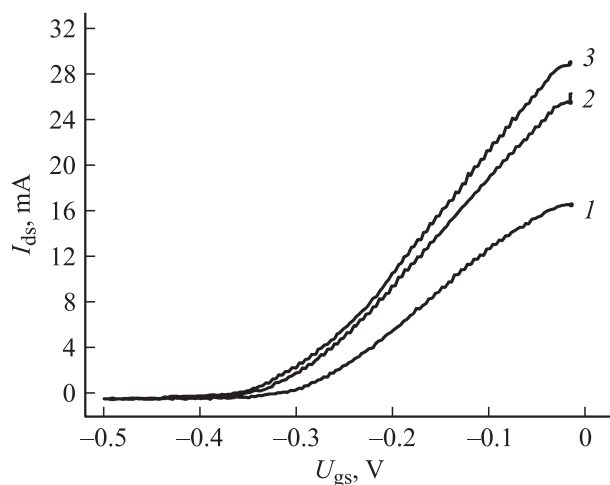


Рис. 1. Переходные характеристики транзистора GaAs/AlGaAs для трех различных значений напряжений на стоке U_{ds} , В: 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.3. $T = 4.2$ К.

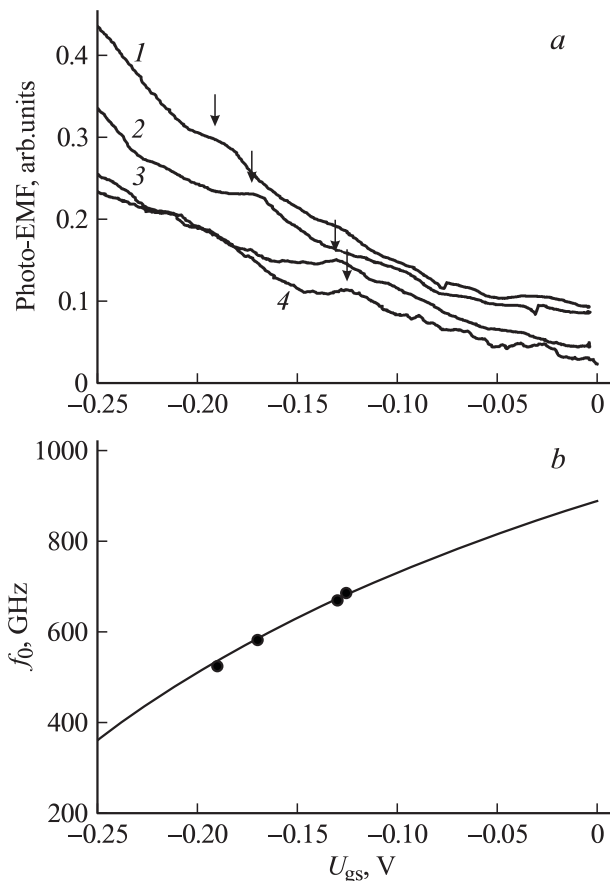


Рис. 2. Фотоэдс сток–исток (*a*) в зависимости от напряжения на затворе транзистора GaAs/AlGaAs при $T = 4.2$ К для различных частот излучения f , ГГц: 1 — 520, 2 — 578, 3 — 667, 4 — 680. Резонансные значения напряжения (*b*) на затворе транзистора GaAs/AlGaAs, соответствующие 4-м различным частотам падающего излучения — точки. Сплошная кривая — результат расчета по формуле (1) зависимости резонансной плазменной частоты f_0 от напряжения на затворе.

для четырех различных частот падающего излучения, измеренные при $T = 4.2$ К. Легко видеть, что для каждой из четырех частот помимо типичного „фоновое“ нерезонансного сигнала типа $1/x$, максимум которого приходится на напряжение отсечки между затвором и стоком, присутствует и резонансный пик, положение которого с ростом частоты смещается в область больших напряжений на затворе. Теория Дьяконова–Шура предсказывает [8], что падающее электромагнитное излучение, которое индуцирует переменное напряжение (или ток в зависимости от схемы), вызывающее плазменные колебания в канале транзистора, должно приводить к резонансной постоянной эдс ΔU между истоком и стоком. Как показано в работе [8], данное напряжение ΔU имеет резонансную зависимость от частоты излучения с максимумами, приходящимися на частоту плазменных колебаний в подзатворном двумерном электронном газе f_0 , и ее нечетные гармоники. Частота f_0 определяет

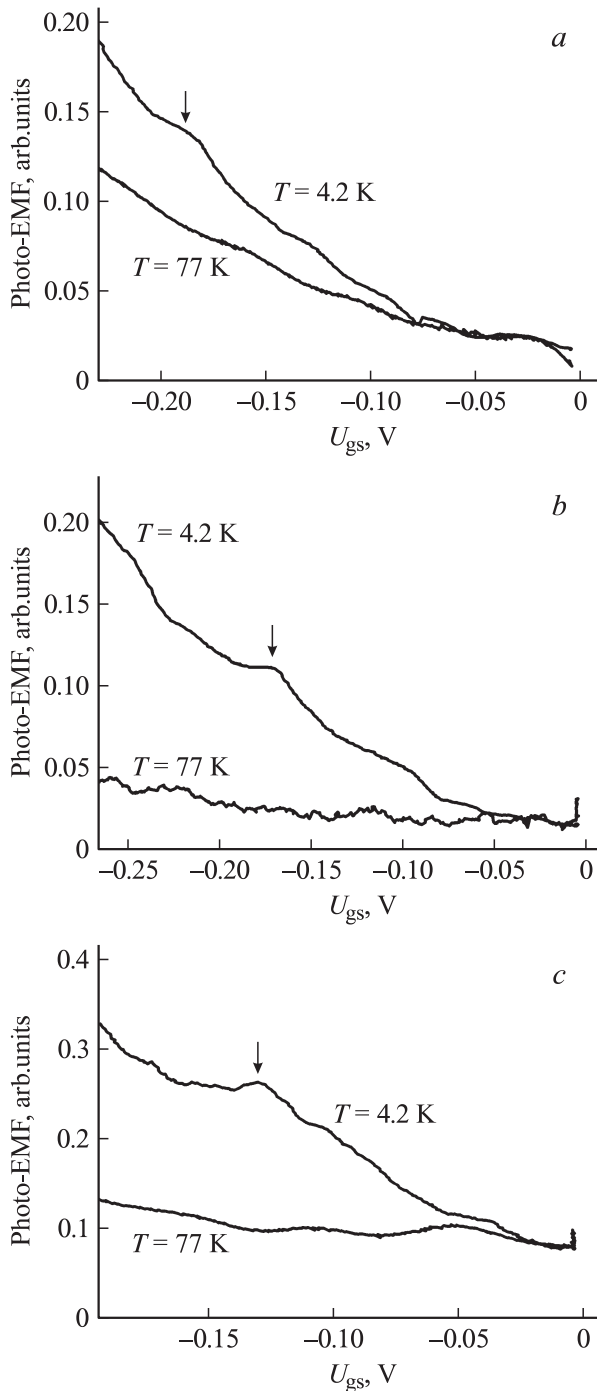


Рис. 3. Фотоэдс сток–исток в зависимости от напряжения на затворе транзистора GaAs/AlGaAs при $T = 4.2$ К и $T = 77$ К для различных частот падающего излучения f , ГГц: *a* — 520, *b* — 578, *c* — 678.

ся длиной затвора L и скоростью плазменных волн:

$$f_0 = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{e}{m} (U_{gs} - U_{th})}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, а m — эффективная масса электрона (для GaAs $m \approx 0.067m_0$). Наблюдаемой величине напряжения отсечки $U_{th} = -0.3$ В отвечает, в

соответствии с формулой (1), при нулевом напряжении на затворе резонансная частота $f_0 = 890$ ГГц, которая уменьшается до нуля по мере приближения U_{gs} к напряжению отсечки.

На рис. 2, *b* сопоставлены рассчитанная зависимость резонансной частоты плазменных колебаний в подзатворной двумерной электронной плазме f_0 от напряжения на затворе в соответствии с выражением (1) для напряжения отсечки $U_{th} = -0.3$ В (сплошная кривая) и результаты измерений — значения напряжения на затворе транзистора, при которых наблюдаются резонансные пики фотоэдс для каждой из 4-х частот падающего излучения (точки). Можно видеть, что экспериментальные результаты хорошо соответствуют ожидаемым положениям резонанса.

Одним из основных факторов, определяющих возможность резонансного детектирования, является частота столкновений электронов, которая фактически задает нижнюю граничную частоту, на которой транзистор может работать как резонансный приемник. Для получения резонансного отклика необходимо выполнение условия $\omega\tau > 1$, где ω — частота падающего излучения (резонансная частота), $\tau = \mu t/e$, где μ — подвижность носителей заряда в канале. В данной работе подвижность в канале транзистора не измерялась, но такие измерения в транзисторах GaAs/AlGaAs (Fujitsu FHR20X), подобные нашим, были проведены в работе [16], где была получена оценка $\mu \approx 10^4$ см²/(В·с) при $T = 4.2$ К. В соответствии с этой оценкой в исследованном диапазоне частот величина $\omega\tau$ составляла от 1.1 до 1.9.

С ростом температуры измерения падает подвижность носителей заряда в канале транзистора и соответственно падает время релаксации импульса, что приводит к уменьшению фактора $\omega\tau$. На рис. 3, *a–c* показаны фотоэдс сток–исток в зависимости от напряжения на затворе транзистора GaAs/AlGaAs для трех различных частот падающего излучения (соответствующих рис. 2) при $T = 4.2$ и 77 К. Из сопоставления измеренных фотоэдс для всех частот при температуре жидкого гелия и жидкого азота хорошо видно, что при увеличении температуры измерений до 77 К фотоотклик становится нерезонансным.

4. Заключение

Таким образом, в отличие от работы [16], где измерения проводились на одной фиксированной частоте 600 ГГц, нами для транзистора GaAs/AlGaAs впервые была продемонстрирована перестройка максимума отклика с ростом частоты в область больших напряжений на затворе в соответствии с моделью Дьяконова–Шура.

Работа проводилась при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 08-02-00962-а и № 08-02-97034-р_поволжье_а), INTAS (YS 05-109-4705), Программы поддержки ведущих научных школ РФ (№ НШ-419.2008.2) и Российской академии наук.

Список литературы

- [1] S.W. Smye, J.M. Chamberlain, A.J. Fitzgerald, E. Berry. *Phys. Med. Biol.*, **46**, R101 (2001).
- [2] M. Kroug, S. Cherednichenko, H. Merkel, E. Kollberg, B. Voronov, G. Gol'tsman, H.W. Huebers, H. Richter. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11**, 962 (2001).
- [3] P.J. Burke, R.J. Schoelkopf, D.E. Prober, A. Skalare, B.S. Karasik, M.C. Gaidis, W.R. Mc Grath, B. Bumble, H.G. Le Duc. *J. Appl. Phys.*, **85**, 1644 (1999).
- [4] B.S. Karasik, W.R. Mc Grath, M.E. Gershenson, A.V. Sergeev. *J. Appl. Phys.*, **87**, 7586 (2000).
- [5] T.W. Crow, R.J. Mattauch, R.M. Weikle, U.V. Bhapkar. *Compound Semiconductor Electronics*, ed. by M. Shur (Singapore, World Scientific Publishing, 1996) c. 209.
- [6] S.M. Marazita, W.L. Bishop, J.L. Hesler, K. Hui, W.E. Bowen, T.W. Crowe. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **47**, 1152 (2000).
- [7] E.E. Haller, J.W. Beeman. *Proc of Far-IR, Sub-mm & mm Detector Technology Workshop* (Monterey, USA, 2002) p. 201.
- [8] M.I. Dyakonov, M.S. Shur. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **43** (3), 380 (1996).
- [9] 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).
- [10] E.A. Shaner, A.D. Grine, M.C. Wanke, Mark Lee, J.L. Reno, S.J. Allen. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **18** (18), 1925 (2006).
- [11] T. Otsuji, M. Hanabe, O. Ogawara. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2119 (2004).
- [12] A.El Fatimy, F. Teppe, N. Dyakonova, W. Knap, D. Seliuta, G. Valušis, A. Shchepetov, Y. Roelens, S. Bollaert, A. Cappy, S. Rumyantsev. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 131 926 (2006).
- [13] F. Teppe, M. Orlov, A. El Fatimy, A. Tiberj, W. Knap, J. Torres, V. Gavrilenko, A. Shchepetov, Y. Roelens, S. Bollaert. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 222 109 (2006).
- [14] J. Torres, P. Nouvel, A. Akwoue-Ondo, L. Chusseau, F. Teppe, A. Shchepetov, S. Bollaert. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 201 101 (2006).
- [15] A. El Fatimy, S. Boubanga Tombet, F. Teppe, W. Knap, D.B. Veksler, S. Rumyantsev, M.S. Shur, N. Pala, R. Gaska, Q. Fareed, X. Hu, D. Seliuta, G. Valusis, C. Gaquiere, D. Theron, A. Cappy. *Electron. Lett.*, **42** (23), 1342 (2006).
- [16] W. Knap, Y. Deng, S. Rumyantsev, J.-Q. Lü, M.S. Shur, C.A. Saylor, L.C. Brunel. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 3433 (2002).

Редактор Т.А. Полянская

Resonant detection of terahertz radiations in submicron field effect GaAs/AlGaAs transistor with two-dimensional electron gas

A.V. Antonov, V.I. Gavrilenko, K.V. Maremyanin, S.V. Morozov, F. Teppe*, W. Knap*

Institute for Physics of Microstructures
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhniy Novgorod, Russia
* Group d'Etude de Semiconducteurs,
CNRS-Université Montpellier 2,
34095 Montpellier, France

Abstract Detection of terahertz radiation by submicron effect GaAs/AlGaAs transistor (gate length $L = 250$ nm) with two-dimensional electron gas in the channel has been investigated at $T = 4.2$ K. The response (drain-to-source photo-EMF) maximum is shown to shift to a higher gate voltage with the frequency of incident radiation in accordance with Dyakonov–Shur theory. The photo-EMF dependence on the gate voltage becomes nonresonant at the temperature increase up to 77 K due to the decreasing of the electron mobility.