

Электронный транспорт и детектирование терагерцового излучения в субмикрометровом полевом транзисторе GaN/AlGaIn

© В.И. Гавриленко[†], Е.В. Демидов⁺, К.В. Маремьянин⁺, С.В. Морозов⁺,
 W. Кнар^{*}, J. Lusakowski^{*}

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

^{*} Group d'Etude de Semiconducteurs, CNRS — Université Montpellier 2
 Place E. Bataillon 34950 Montpellier, France

(Получена 27 июня 2006 г. Принята к печати 4 июля 2006 г.)

Исследованы электронный транспорт и фотоотклик в терагерцовом диапазоне в полевом транзисторе GaN/AlGaIn с субмикрометровым затвором (0.25 мкм) с двумерным электронным газом в канале (концентрация электронов $n_s \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) при 4.2 К. Подвижность носителей заряда в канале транзистора определялась по зависимости проводимости от магнитного поля и составила $\mu \approx 3500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Обнаружено, что зависимость фотоэдс на частоте излучения $f = 574 \text{ ГГц}$ от напряжения на затворе (т.е. от концентрации двумерных электронов) имеет характерный максимум, что связывается с резонансным откликом в подзатворной плазме транзистора.

PACS: 61.82.Fk, 68.65.Fg, 71.10.Ca

1. Введение

Терагерцовому 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 терагерцовых методов для неразрушающего контроля и визуализации в медицине, при мониторинге окружающей среды, в пищевой индустрии, борьбе с терроризмом [1]. На сегодняшний день для детектирования терагерцового излучения в основном применяются широкополосные приемники излучения. Использование же селективных и перестраиваемых детекторов при спектральном анализе позволяет отказаться от дифракционных решеток или механически перестраиваемых интерферометров. Таким селективным детектором может быть полевой транзистор с двумерным электронным газом в канале, перестраиваемый приложенным к затвору напряжением. Резонансное и нерезонансное детектирование в полевых транзисторах с двумерным электронным газом наблюдалось в работах [2–5]. В обычном режиме работы верхняя предельная частота полевого транзистора ограничена обратным временем пролета. Использование плазменных эффектов позволяет повысить рабочую частоту субмикрометровых полевых транзисторов вплоть до терагерцового диапазона частот [6,7], поскольку характерные скорости плазменных волн могут составлять 10^8 см/с , что существенно выше дрейфовой скорости электрона в канале транзистора. Резонансное детектирование терагерцового излучения уже реализовано для двух типов полевых транзисторов: коммерчески доступного

полевого транзистора GaAs/AlGaAs [2,3,8,9] и полевого транзистора с двойной квантовой ямой и решетчатым затвором [4].

Дисперсионное соотношение для поверхностных плазменных волн в случае, когда толщина оксидного слоя между каналом и затвором d мала по сравнению с длиной волны плазменных волн, дается следующим соотношением [10]:

$$\omega_p = sk, \quad s = \sqrt{\frac{n_s e^2 d}{m^* \epsilon_0}}, \quad (1)$$

где ω_p — частота, s — скорость плазменных волн, k — волновое число, n_s — концентрация электронов, m^* — эффективная масса, ϵ_0 — величина диэлектрической проницаемости оксидного слоя, e — заряд электрона.

Концентрация электронов n_s в первом приближении описывается простой формулой плоского конденсатора $n_s = CU_0/e$. Здесь C — емкость между затвором и каналом на единицу поверхности, $U_0 = U_{gs} - I_{ds}R_s - U_{th}$ — разность между напряжением на затворе U_{gs} , напряжением, падающем на контактное сопротивление R_s (I_{ds} — ток в канале транзистора), и напряжением отсечки транзистора U_{th} . В этом случае скорость плазменных волн определяется следующим выражением:

$$s = \sqrt{\frac{e}{m^*} (U_{gs} - I_{ds}R_s - U_{th})}. \quad (2)$$

Резонансная частота плазменных колебаний в подзатворном двумерном электронном газе определяется длиной затвора L и скоростью плазменных волн s .

$$\omega_r = \frac{\pi s}{2L}. \quad (3)$$

[†] E-mail: gavr@ipm.sci-nnov.ru

При больших U_0 справедливо следующее простое выражение для резонансной частоты:

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{e}{m^*} U_0} = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{e}{m^*} (U_{gs} - I_{ds} R_s - U_{th})}. \quad (4)$$

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

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. В настоящей работе исследовалась возможность резонансного детектирования терагерцового излучения в субмикрометровых полевых транзисторах, изготовленных из селективно легированной гетероструктуры GaN/AlGaIn, при температуре $T = 4.2$ К. Для определения параметров электронного газа были выполнены измерения транспортных и магнитотранспортных характеристик образцов.

2. Эксперимент

Исследуемые транзисторы изготавливались из выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктуры GaN/AlGaIn с высокой подвижностью двумерного электронного газа. В работе представлены результаты измерений для транзисторов с длиной затвора $L = 0.25$ мкм, ширина канала составляла 30 мкм. Кристалл с транзисторами монтировался на держателе для микросхем, который затем вставлялся 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 терагерцового излучения. В качестве источника излучения использовалась лампа обратной волны (ЛОВ) ОВ-74. По световоду, изготовленному из полированной трубки из нержавеющей стали, излучение заводилось в транспортный гелиевый дьюар и фокусировалось с помощью полированного латунного конуса на кристалле с транзисторами. Измерения проводились при постоянной частоте излучения f и амплитудной модуляции с частотой 200 Гц. Измерялась величина фотопроводимости 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 синхронного детектора и напряжение на затворе оцифровывались с помощью аналого-цифрового преобразователя и записывались в память персональной ЭВМ. Для характеристики транзисторов

проводились измерения магнитосопротивления транзистора и зависимости тока исток–сток от напряжения на затворе (переходная характеристика).

3. Результаты и обсуждение

Типичная зависимость тока исток–сток I_{ds} транзистора от напряжения на затворе, измеренная при температуре $T = 4.2$ К, показана на рис. 1. Видно, что транзистор закрывается при напряжении отсечки $U_{th} = -3.5$ В. При закрытии транзистора I_{ds} уменьшается не до нуля, что свидетельствует о наличии „паразитного“ канала проводимости в структуре. Для оценки подвижности измерялась зависимость проводимости транзистора $1/R$ от поперечного магнитного поля H (рис. 2). Подвижность μ может быть оценена исходя из условия $\mu H_{1/2}/c = 1$, где $H_{1/2}$ — поле, при котором проводимость в канале транзистора уменьшается в 2 раза. Аппроксимация из-

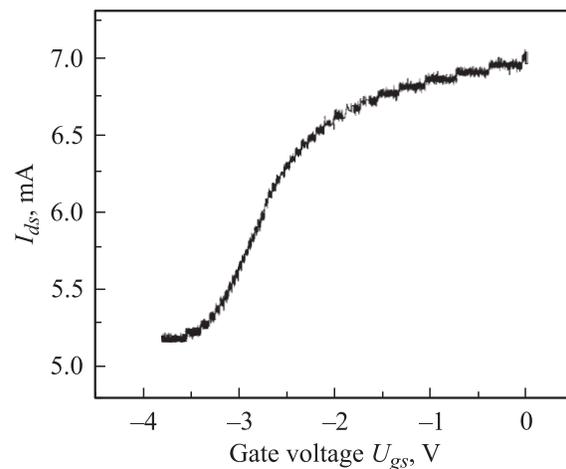


Рис. 1. Переходная характеристика транзистора при $T = 4.2$ К.

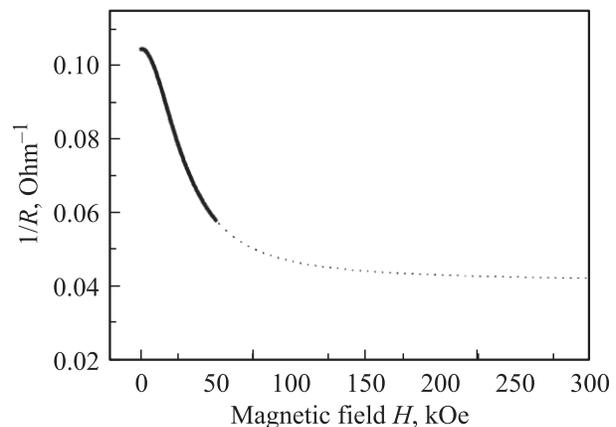


Рис. 2. Зависимость проводимости транзистора от магнитного поля при нулевом напряжении на затворе (данные измерения и аппроксимация).

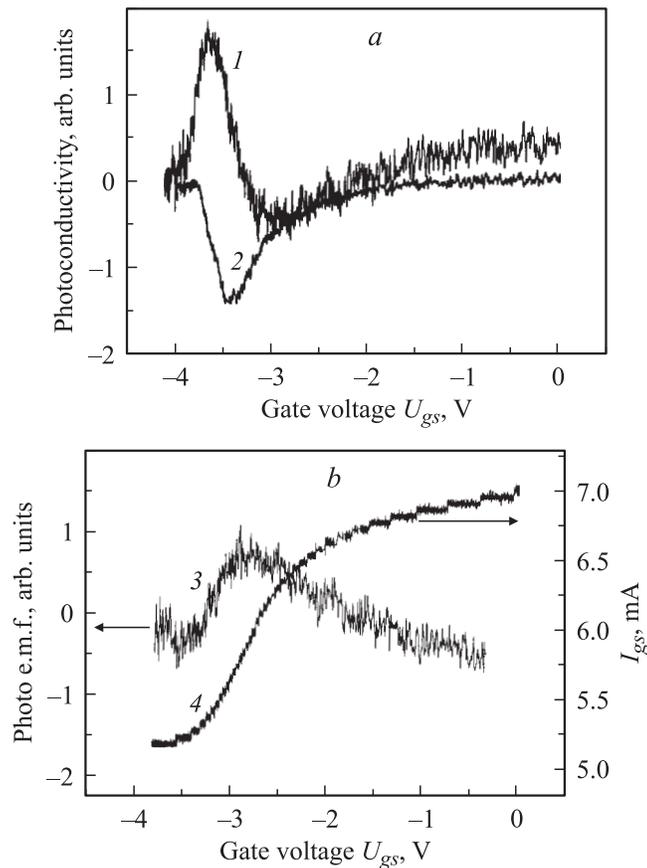


Рис. 3. *a* — зависимость фотоотклика транзистора от напряжения на затворе при положительном (1) и отрицательном (2) направлении тока сток–исток. *b* — результат вычитания кривой 1 из кривой 2 (см. *a*) после смещения 1 и 2 по шкале напряжений U_{gs} (3) и переходная характеристика транзистора (4). $f = 574$ ГГц.

меренных данных функцией

$$\frac{1}{R}(H) = \frac{1}{R_0} + \frac{2A}{\pi} \frac{W}{4(H-b)^2 + W^2},$$

где $1/R_0 = 0.04164 \text{ Ом}^{-1}$, $b = -0.22658 \text{ кЭ}$, $W = 59.25711 \text{ кЭ}$, $A = 5.90864$, дает значение $H_{1/2} = 28 \text{ кЭ}$. Тогда оценка дает $\mu \approx 3570 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $U_{gs} = 0$. Это позволяет оценить из условия $\omega\tau = 1$ нижний предел частоты для наблюдения резонансного отклика как 380 ГГц.

На рис. 3, *a* представлены зависимости фотопроводимости транзистора от напряжения на затворе, измеренные при положительном (1) и отрицательном (2) направлении тока сток–исток. Максимумы (по абсолютной величине) напряжения отсечки $U_{th} = -3.5 \text{ В}$ мы связываем с нерезонансным фотооткликом. Несовпадение экстремальных точек двух кривых связано с тем, что при противоположных направлениях тока сток–исток $I_{ds}R$ (см. (4)) имеет разный знак. Смещая кривые 1 и 2 на одинаковую величину соответственно вправо и влево на рис. 3, *a* и вычитая из сигнала фотопроводимости при

отрицательном смещении (кривая 2) сигнал при положительном смещении (кривая 1), получаем сигнал фотоэдс в зависимости от напряжения на затворе (рис. 3, *b*). Непосредственно величину фотоэдс при нулевом токе в канале измерить не удалось вследствие последовавшего пробоя. Измерения проводились при частоте излучения $f = 574$ ГГц. Наблюдаемой величине напряжения отсечки $U_{th} = -3.5 \text{ В}$ отвечает в соответствии с формулой (4) при нулевом напряжении на затворе резонансная частота $f_r = 1.5$ ТГц, и она должна уменьшаться до нуля при изменении U_{gs} от нуля до -3.5 В . Как видно из рис. 3, *b*, при напряжении на затворе $U_{gs} = -3 \text{ В}$ наблюдается максимум фотоэдс. Резонансная частота плазменных колебаний в подзатворной электронной плазме для данного напряжения на затворе составляет в соответствии с формулой (4) $f_r = 576$ ГГц, т.е. практически совпадает с частотой излучения, на которой проводились измерения. Определенному из магнетотранспортных измерений значению подвижности соответствует на этой частоте значение параметра $\omega_r\tau = 1.81$. Это позволяет предположить, что данная особенность фотоотклика связана с резонансом в подзатворной плазме транзистора.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 05-02-17374), РФФИ-CNRS (№ 05-02-22001) и Российской академии наук.

Список литературы

- [1] B. Ferguson, X.-C. Zhang. *Nature Mater.*, **1** (1), 26 (2002).
- [2] W. Knap, Y. Deng, S. Romyantsev, J.-Q. Lü, M.S. Shur, C.A. Saylor, L.C. Brunel. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (18), 3433 (2002).
- [3] W. Knap, Y. Deng, S. Romyantsev, M.S. Shur. *Appl. Phys. Lett.*, **81** (24), 4637 (2002).
- [4] 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).
- [5] W. Knap, V. Kachorovskii, Y. Deng, S. Romyantsev, J.-Q. Lü, R. Gaska, M.S. Shur, G. Simin, X. Hu, M. Asif Khan, C.A. Saylor, L.C. Brunel. *J. Appl. Phys.*, **91** (11), 9346 (2002).
- [6] M. Dyakonov, M.S. Shur. *Phys. Rev. Lett.*, **71** (15), 2465 (1993).
- [7] M. Dyakonov, M.S. Shur. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **43**, 380 (1996).
- [8] F. Teppe, W. Knap, D. Veksler, M.S. Shur, A.P. Dmitriev, V.Yu. Kachorovskii, S. Romyantsev. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 052 107 (2005).
- [9] F. Teppe, D. Veksler, V.Yu. Kachorovski, A.P. Dmitriev, X. Xie, X.-C. Zhang, S. Romyantsev, W. Knap, M.S. Shur. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 022 102 (2005).
- [10] A. Eguluz, T.K. Lee, J.J. Quinn, K.W. Chiu. *Phys. Rev. B*, **11**, 4989 (1975).

Редактор Л.В. Шаронова

Electron transport and detection of terahertz radiations in GaN/AlGaN submicron field effect transistor

V.I. Gavrilenko⁺, E.V. Demidov⁺, K.V. Maremyanin⁺,
S.V. Morozov⁺, W. Knap^{*}, J. Lusakowski^{*}

⁺ Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhniy Novgorod, Russia

^{*} Groupe d'Etude de Semiconducteurs,
CNRS–Université Montpellier 2 Place E. Bataillon
34950 Montpellier, France

Abstract Electron transport and photoresponse in the terahertz range in GaN/AlGaN field effect transistor with submicron gate length ($L = 0.25 \mu\text{m}$) with two-dimensional electron gas in the channel ($n_s \approx 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$) has been investigated at $T = 4.2 \text{K}$. Mobility of charge carriers in the transistor channel $\mu \approx 3500 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ has been determined from conductivity versus magnetic field measurements. A characteristic maximum of the photo-e.m.f. versus the gate voltage (i.e. versus the concentration of two-dimensional electrons) has been discovered at the radiation frequency of $f = 574 \text{GHz}$ that is related to the resonant response in the subgated electron plasma in the transistor channel.