

06

Широкоапертурный детектор терагерцового излучения на основе транзисторной структуры GaAs/InGaAs со щелевым решеточным затвором большой площади

© К.В. Маремьянин, Д.М. Ермолаев, Д.В. Фатеев, С.В. Морозов,
Н.А. Малеев, В.Е. Земляков, В.И. Гавриленко, В.В. Попов,
С.Ю. Шаповал

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых
материалов РАН, Черноголовка, Московская обл.
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: kirillm@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 15 ноября 2009 г.

Измерен терагерцовый фотоотклик транзисторной структуры с узкощелевым решеточным затвором большой площади. Пики фотоотклика идентифицированы с возбуждением плазмонных резонансов в структуре. За счет более эффективного возбуждения плазмонных резонансов в узкощелевой структуре величина фотоотклика возрастает на порядок величины.

На терагерцовый (THz) диапазон частот приходятся фоновые резонансы кристаллических решеток, а также вращательные спектры многих органических молекул, из чего следует необходимость в развитии новых методов THz спектроскопии биологических и полупроводниковых образцов [1,2]. На сегодняшний день для детектирования THz-излучения доступны широкополосные приемники, такие как болометры, пироэлектрические датчики, диоды Шоттки и фотопроводящие детекторы. Однако они не являются селективными и для работы с ними при спектральном анализе необходимо использование дифракционных решеток или механически перестраиваемых интерферометров. Селективные приемники со смесителями частоты перекрывают только узкий спек-

тральный диапазон около частоты гетеродина, который не превышает 50 GHz [3]. Таким образом, создание компактного селективного и в то же время перестраиваемого по частоте в широких пределах детектора с быстрым откликом является важной задачей.

Как известно [4], коллективные колебания плотности заряда (плазмоны) в двумерном (2D) электронном газе в канале субмикронных полевых транзисторов могут быть использованы для детектирования THz-излучения. Высокая скорость плазменных волн (более чем на порядок величины превышающая дрейфовую скорость электронов в канале транзистора) позволяет получить быстрый отклик плазмонного детектора [5]. Поскольку типичные значения концентрации 2D электронного газа составляют от 10^{10} до 10^{12} cm^{-2} , то при субмикронных длинах электронного канала транзистора резонансная частота плазменных колебаний может достигать нескольких THz. При этом концентрация 2D электронного газа может изменяться с помощью приложенного к затвору напряжения, что создает возможность перестройки частоты резонансного THz-фотоотклика. Возможность резонансного детектирования THz-излучения при плазмонном резонансе была продемонстрирована с использованием различных типов полевых транзисторов с одиночным затвором [6–8].

В реальных полевых транзисторах расстояние между затвором и 2D электронным каналом обычно значительно меньше длины затворного электрода W . В этом случае частота подзатворных плазменных мод хорошо аппроксимируется простой формулой [4]:

$$\omega = k_n \sqrt{\frac{e(U_{gs} - U_{th})}{m^*}}, \quad (1)$$

где U_{gs} — величина затворного напряжения, U_{th} — пороговое напряжение обеднения 2D электронного канала, e и m^* — соответственно заряд и эффективная масса электрона. Величины волновых векторов подзатворных плазменных мод определяются длиной затворного электрода: $k_n = (2n - 1)\pi/W$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Оценки, проведенные по формуле (1) для реальных параметров полевых транзисторов с одиночным затвором, дают значения частоты основной плазмонной моды ($n = 1$) порядка 5 THz при длине затворного электрода 100 nm. Дальнейшее повышение основной рабочей частоты плазмонного транзистора ограничивается технологическими трудностями изготовления нанометрового затвора. Высшие плазмонные моды ($n > 1$) даже в неэкранированном

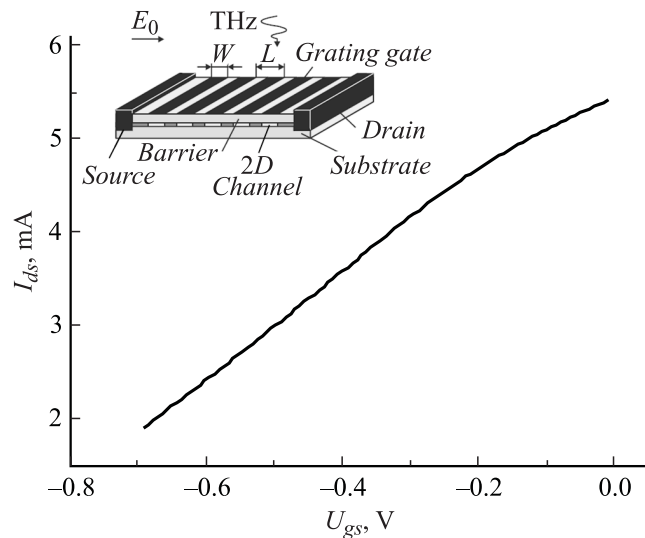


Рис. 1. Переходная характеристика транзисторной структуры GaAs/InGaAs с узкощелевым решеточным затвором при $T = 4.2\text{ K}$ для напряжения в канале транзистора $U_{ds} = 1\text{ V}$. На вставке: схематическое изображение полевого транзистора с решеточным затвором (вектор E_0 указывает направление вектора напряженности электрического поля в падающей электромагнитной волне).

одиночном канале имеют крайне малую эффективность возбуждения [9] и поэтому не могут быть использованы для повышения рабочей частоты устройства.

Важной проблемой при создании плазмонного детектора является обеспечение хорошей связи плазмонов с THz-излучением. Дело в том, что подзатворные плазмоны в канале полевого транзистора с одиночным затвором оказываются слабо связанными с THz-излучением [10], так как они сильно экранированы затворным электродом. К тому же суммарный дипольный момент подзатворной плазмонной моды крайне мал из-за акустической природы этой моды, что также значительно снижает эффективность связи подзатворных плазмонов с THz-излучением. В работе [11] было показано, что широкоапертурный решеточный затвор полевого транзистора (рис. 1, вставка) представляет собой эффективный элемент связи между плазмонными модами в

канале транзистора и THz-излучением. При этом эффективность связи значительно повышается при использовании решеточного затвора с узкими щелями (ширина щели значительно меньше периода решетки затвора). Это открывает возможность существенного повышения рабочей частоты плазмонных устройств на полевых транзисторах с решеточным затвором до 10 THz и выше [11]. Расчеты [11] показывают, что для достижения максимальной связи THz-излучения с плазменными колебаниями в электронном канале транзисторной структуры необходимо реализовать соотношение ширины щелей решеточного затвора к его периоду менее чем 1 : 10. Дальнейшее уменьшение ширины щелей сложнее достичь технологически, но не приводит к существенному увеличению связи.

В данной работе исследовалось детектирование THz-излучения в транзисторной структуре GaAs/InGaAs с узкощелевым решеточным затвором большой площади при $T = 4.2$ К. Резонансное детектирование THz-излучения в транзисторных структурах GaAs/AlGaAs с решеточным затвором наблюдалось ранее в работах [12,13]. Однако в указанных работах использовался решеточный затвор с широкими щелями (ширина щелей была равна ширине затворных электродов) и поэтому величина THz-фотоотклика была сравнительно невелика (порядка нескольких микровольт при мощности падающего THz-излучения несколько милливатт).

Исследуемая в данной работе транзисторная структура изготавливалась из выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) гетероструктуры GaAs/InGaAs с высокой подвижностью 2D электронного газа, который создавался в квантовой яме InGaAs толщиной 12 nm. Плотность электронов в квантовой яме составляла около $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ при подвижности $5400\text{--}5900 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ (при $T = 300$ К), период решетки затворных электродов $L = 3 \text{ }\mu\text{m}$, ширина затворных электродов $W = 2.7 \text{ }\mu\text{m}$ (зазор между ними составлял $0.3 \text{ }\mu\text{m}$), расстояние между решеточным затвором и каналом $d = 46 \text{ nm}$. Площадь всей транзисторной структуры с решеточным затвором составляла $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Структура имела общие контакты стока и истока, используемые для подачи постоянного тока смещения и снятия сигнала фотоотклика (рис. 2, вставка).

Переходные характеристики, вольт-амперные характеристики (ВАХ) и фотоотклик структуры на THz-излучение были измерены при $T = 4.2$ К. Кристалл с транзисторной структурой монтировался на

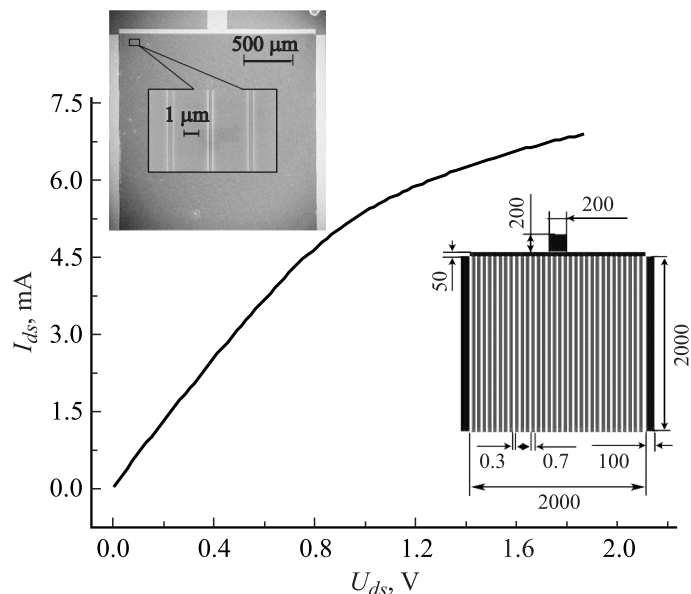


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика транзисторной структуры GaAs/InGaAs с узкощелевым решеточным затвором для напряжения между затвором и истоком $U_{gs} = 0$ V при $T = 4.2$ K. На вставке: изображение исследуемой планарной транзисторной структуры GaAs/InGaAs с узкощелевым решеточным затвором с указанием размеров (в микрометрах) и микрофотография структуры.

держателе для микросхем, расположенном в волноводном криогенном модуле, который, в свою очередь, размещался в транспортном гелиевом сосуде Дьюара СТГ-40. Контактные площадки транзисторной структуры соединялись алюминиевыми проволочками с выводами держателя. В качестве монохроматического источника излучения использовалась лампа обратной волны (ЛОВ) с непрерывной перестройкой частоты излучения в диапазоне от 0.415 до 0.72 THz. Выходная мощность излучения ЛОВ составляла около 1 mW. По сверхразмерному круглому волноводу, изготовленному из полированной нержавеющей стали, THz-излучение заводилось в транспортный гелиевый сосуд Дьюара и фокусировалось с помощью полированного латунного конуса с выходным отверстием $\varnothing 6$ mm на кристалл с транзисторной

структурой. Измерения проводились при постоянной частоте излучения и амплитудной модуляции с частотой 350 Hz. Измерялось напряжение на образце, пропорциональное величине THz-фотопроводимости между контактами истока и стока при развертке прикладываемого к затвору отрицательного постоянного напряжения относительно истока U_{gs} . Через канал пропускался небольшой (много меньше тока насыщения) постоянный ток смещения ~ 0.5 mA. Использовалась стандартная схема синхронного детектирования сигнала.

Типичная зависимость тока „исток–сток“ I_{ds} транзисторной структуры GaAs/InGaAs с решеточным затвором от напряжения на затворе U_{gs} показана на рис. 1. Хотя измерения проводились только до $U_{gs} = -0.7$ V, интерполяция зависимости, показанной на рис. 1, к нулевому значению тока в транзисторной структуре позволяет сделать вывод о том, что напряжение отсечки составляет $U_{th} \approx -1$ V. На рис. 2 представлена ВАХ структуры, измеренная при $U_{gs} = 0$, на которой при напряжении „исток–сток“ больше 1 V, виден участок насыщения тока.

На рис. 3, *a* представлены зависимости сигнала фотопроводимости транзисторной структуры GaAs/InGaAs с решеточным затвором от напряжения на затворе для пяти различных частот падающего излучения, измеренные при $T = 4.2$ K. Из совокупности представленных графиков видно, что для каждой из частот падающего излучения положение резонансного пика фотоотклика смещается с ростом частоты в область больших отрицательных напряжений на затворе. Величина фотонапряжения на образце составляла около 4μ V при падающей на детектор THz-мощности порядка десятых долей милливатта. Таким образом, детектор с узкощелевым решеточным затвором демонстрирует на порядок большую чувствительность по сравнению с аналогичным детектором, описанным в [12,13].

Для количественного описания экспериментально наблюдаемого поведения резонансов при изменении затворного напряжения и частоты излучения было проведено электродинамическое моделирование возбуждения плазмонных резонансов в исследуемой структуре с использованием строгого электродинамического подхода [14]. Для вычисления концентрации электронов в подзатворной области канала в зависимости от затворного напряжения использовалась общепринятая модель плавного канала [15]. В качестве единственного подгонного параметра использовалось значение подвижности электронов $\sim 30\,000$ cm²/(V·s) в канале транзисторной структуры. На рис. 3, *b*

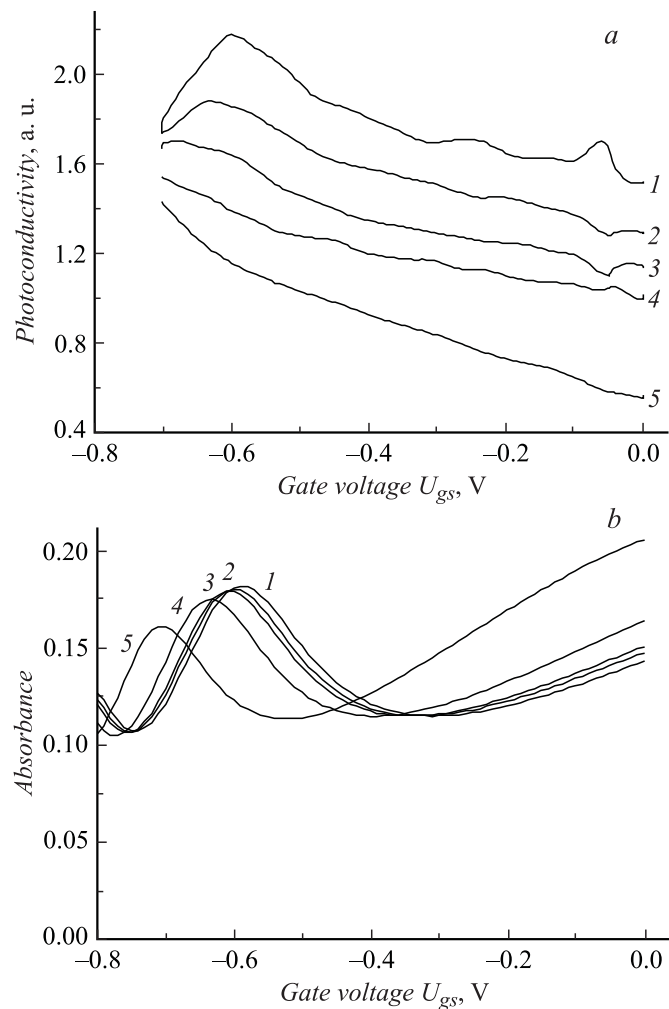


Рис. 3. *a* — фотопроводимость „исток–сток“ в зависимости от напряжения на затворе транзисторной структуры GaAs/InGaAs для различных частот падающего излучения (1 — 697, 2 — 688, 3 — 682, 4 — 659, 5 — 593 GHz), измеренная при $T = 4.2$ К. Спектры фотоотклика сдвинуты по вертикали для удобства восприятия. *b* — расчетные спектры поглощения полевого транзистора на основе структуры GaAs/InGaAs с решеточным затвором как функции величины затворного напряжения для тех же пяти частот излучения.

приведены расчетные зависимости коэффициента поглощения от величины затворного напряжения для пяти частот падающего излучения, используемых в эксперименте. Заметим, что коэффициент поглощения в резонансе достигает величины 0.2, близкой к теоретическому пределу $A_{\max} = 0.5(1 - \sqrt{R_0})$, где R_0 — коэффициент отражения транзисторной структуры в отсутствие решеточного затвора [16]. Этот факт свидетельствует об эффективной связи плазмонов с THz-излучением. Резонансы поглощения связаны с возбуждением второй ($n = 2$) подзатворной плазмонной моды в квантовой яме. Из сравнения рис. 3, *a* и *b* видно, что положение и форма расчетных резонансов поглощения хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными зависимостями для фотоотклика, что позволяет идентифицировать пики THz-фотоотклика с возбуждением плазмонного резонанса в структуре. Резонансные максимумы, связанные с пиком фотоотклика в плазмонном резонансе, не наблюдаются на экспериментальных кривых 4 и 5 (рис. 3, *a*), поскольку этот пик сглаживается на фоне более сильного нерезонансного фотоотклика, возникающего за счет сильной нелинейности переходной характеристики транзисторной структуры вблизи порога обеднения электронного канала.

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность существенного увеличения фотоотклика в транзисторной структуре с узкощелевым решеточным затвором большей площади за счет эффективного возбуждения плазмонных резонансов.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (08-02-00962, 08-02-97034, 08-02-92497 и 09-02-00395), программы поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-419.2008.2), программ фундаментальных исследований президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ и ОФН РАН IV.12 „Современные проблемы радиофизики“, федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы (ГК № П1211).

Список литературы

- [1] *Smye S.W., Chamberlain J.M., Fitzgerald A.J., Berry E.* // *Phys. Med. Biol.* 2001. V. 46. P. R101.
- [2] *Mittleman D.* (Ed.) *Sensing with Terahertz Radiation.* Berlin: Springer, 2003.
- [3] *Lee M., Pfeiffer L.N., West K.W.* // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 81(7). P. 1243.

- [4] *Dyakonov M.I., Shur M.S.* // IEEE Trans. on Electr. Devices. 1996. V. 43 (3). P. 380.
- [5] *Муравьев В.М., Кукушкин И.В., Смет Ю., фон Клитцинг К.* // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. С. 216.
- [6] *El Fatimy A., Terpe F., Dyakonova N., Knap W., Seliuta D., Valušis G., Shchepetov A., Roelens Y., Bollaert S., Cappy A., Rumyantsev S.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 131926.
- [7] *Гавриленко В.И., Демидов Е.В., Маремьянин К.В., Морозов С.В., Кнар W., Lusakowski J.* // ФТП. 2007. Т. 41 (2). С. 238.
- [8] *Антонов А.В., Гавриленко В.И., Маремьянин К.В., Морозов С.В., Терпе F., Кнар W.* // ФТП. 2009. Т. 43 (4). С. 552.
- [9] *Попов V.V., Tsybalov G.M., Shur M.S., Кнар W.* // ФТП. 2005. Т. 39 (1). С. 157.
- [10] *Попов V.V., Polischuk O.V., Shur M.S.* // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 033510.
- [11] *Попов V.V., Tsybalov G.M., Fateev D.V., Shur M.S.* // Int. J. High Speed Electronics and Systems. 2007. V. 17 (3). P. 557.
- [12] *Peralta X.G., Allen S.J., Wanker M.C., Harff N.E., Simmons J.A., Lilly M.P., Reno J.L., Burke P.J., Eisenstein J.P.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81 (9). P. 1627.
- [13] *Shaner E.A., Mark Lee, Wanke M.C., Grine A.D., Reno J.L., Allen S.J.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 81 (9). P. 193507.
- [14] *Матов О.Р., Мешков О.Ф., Полищук О.В., Попов В.В.* // ЖЭТФ. 1996. Т. 109. С. 876.
- [15] *Shur M.S.* Introduction to Electronic Devices. New York: Wiley, 1996.
- [16] *Попов V.V., Polischuk O.V., Teperik T.V., Peralta X.G., Allen S.J., Horing N.J.M., Wanke M.C.* // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. P. 3556.