

07;15

Детекторы на основе низкобарьерных диодов Мотта и их характеристики в диапазоне 150–250 GHz

© П.В. Волков¹, Н.В. Востоков^{1,¶}, А.В. Горюнов¹, Л.М. Кукин², В.В. Паршин², Е.А. Серов², В.И. Шашкин¹¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

¶ E-mail: vostokov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 29 ноября 2018 г.

Принято к публикации 13 декабря 2018 г.

Обсуждаются характеристики детекторов миллиметрового диапазона длин волн, изготовленные на основе планарных диодов Мотта с приповерхностным δ -легированием, работающих без подачи постоянного смещения. Детекторы демонстрируют вольт-ваттную чувствительность ~ 1000 V/W при величине NEP ~ 10 pW/GHz^{1/2} в диапазоне частот 150–250 GHz. Сделаны оценки, показывающие возможность дополнительного улучшения характеристик детектора на порядок величины при уменьшении площади барьерного контакта диода.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.05.47401.17613

Диоды с барьером Шоттки (Мотта) являются наиболее распространенными чувствительными элементами в неохлаждаемых приемниках микроволнового излучения [1]. Диоды широко используются в смесительных схемах. Существенно реже диоды с барьером Шоттки применяются как квадратичные и видеодетекторы [2]. Для обеспечения высокой чувствительности при детектировании нужно уменьшать эффективную высоту барьера Шоттки до значений, позволяющих не использовать постоянное смещение. Это упрощает конструкцию приемника и приводит к снижению уровня шумов из-за отсутствия постоянного тока смещения. В последнее время разрабатываются и используются другие виды нелинейных элементов для детекторов, работающих без постоянного смещения, например диоды с объемным барьером [3], гетероструктуры InAs/AlSb/AlGaSb с межзонным туннелированием [4], резонансно-туннельные диоды на основе AlAs/InGaAs/InAs [5], структуры с гетеробарьером InP/InGaAs [6], ASPAT-диоды [7] и др.

В настоящей работе обсуждаются характеристики детекторов миллиметрового диапазона длин волн, изготовленных на основе планарных диодов Мотта с пониженной эффективной высотой потенциального барьера на границе металл–полупроводник. Понижение эффективной высоты барьера достигается за счет δ -легирования полупроводникового i -слоя на расстоянии нескольких нанометров от металла [8]. В результате формируется потенциальный рельеф с туннельно-прозрачным барьером на границе с металлом, что уменьшает эффективную высоту барьера диода.

Планарные низкобарьерные диоды Мотта изготавливались на основе структур Al/GaAs. Рост эпитаксиальных слоев GaAs и осаждение Al для формирования барьерного контакта осуществлялись в установке металлоорганической газофазной эпитаксии в едином технологическом процессе [9]. Толщина i -слоя диодов

составляла около 100 nm, глубина залегания δ -слоя 3–5 nm до границы с металлом, концентрация легирующей примеси кремния в δ -слое $(5–10) \cdot 10^{12}$ cm⁻², площадь барьерного контакта $S \approx 10 \mu\text{m}^2$. Более подробно конструкция и технология изготовления диодов описаны в [10].

Для проведения измерений диоды монтировались в волноводные камеры (основное сечение волновода 0.55×1.1 mm) с устройством согласования. В качестве источника сигнала использовалась лампа обратной волны типа ОВ-24 со стабилизированной частотой во всем диапазоне измерений [11]. Уровень входной мощности контролировался измерителем мощности Erickson PM5 (Virginia Diodes).

Для измерений шумовых характеристик диодов использовался малошумящий операционный усилитель AD8065 в трансимпедансном включении. Усиленный шумовой сигнал с детектора подавался на карту сбора данных NI6225 с встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), работавшим на частоте 100 kHz. Полоса пропускания усилителя по уровню -6 dB составляла около 20 kHz, что гарантировало выполнение критерия Найквиста. Данные с АЦП передавались в компьютер, где осуществлялись их запись и обработка в среде NI LabVIEW. Шумовой спектр определялся с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье.

На рис. 1, а линией с точками показана измеренная зависимость вольт-ваттной чувствительности γ от частоты одного из детекторов. Уровень входной мощности излучения при измерениях составлял 4–14 μW . Как следует из рисунка, значение вольт-ваттной чувствительности детектора достигает величины $\gamma_{\text{max}} = 1000$ V/W. Линиями показаны соответствующие расчетные зависимости для случая идеального согласования диода с волноводом (штриховая линия) и без согласования (сплошная линия). Для расчета вольт-ваттной чувстви-

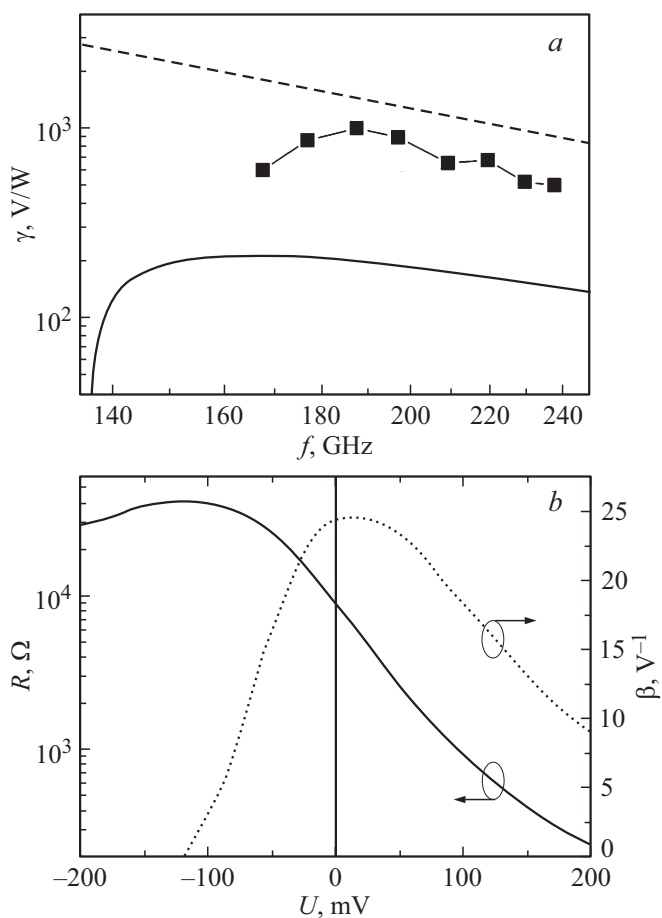


Рис. 1. *a* — зависимости вольт-ваттной чувствительности детектора от частоты. Линия с точками — эксперимент, штриховая линия — расчет для идеального согласования диода и волновода, сплошная линия — расчет без схемы согласования. *b* — зависимости дифференциального сопротивления и параметра квадратичной нелинейности диода от напряжения.

тельности использовался подход, основанный на определении параметра квадратичной нелинейности диода β и представлении диода малосигнальной эквивалентной схемой с параллельным соединением дифференциального сопротивления R и емкости C перехода Мотта и сопротивлением растекания r , включенным к ним последовательно [12]. На рис. 1, *b* показаны зависимости дифференциального сопротивления и параметра квадратичной нелинейности диода от напряжения, определенные численным дифференцированием статической вольт-амперной характеристики. Как следует из рисунка, при нулевом напряжении $R = 9 \text{ k}\Omega$, $\beta = 24 \text{ V}^{-1}$. Для величин емкости и сопротивления растекания были использованы характерные значения, измеренные методом микроволновой импедансной спектроскопии для аналогичных диодов [13]: $C = 17 \text{ fF}$, $r = 20 \Omega$.

На рис. 2 показан спектр среднеквадратичного шумового напряжения, приведенного к полосе 1 Hz, U_n на выходе усилителя. В диапазоне от 500 Hz до несколь-

ких kHz шумовой сигнал слабо зависит от частоты. Это усиленный тепловой шум диода и самого усилителя. На более высоких частотах шумовое напряжение падает из-за уменьшения коэффициента усиления. Величина среднеквадратичного шумового тока, приведенного к входу усилителя, вычисленного по U_n с помощью шумовой эквивалентной схемы [14], составляет $I_n^{\text{RTI}} = 1.5 \text{ pA/Hz}^{1/2}$. Эта величина почти совпадает расчетным значением для диода ($1.4 \text{ pA/Hz}^{1/2}$); следовательно, усилитель почти не вносит собственного шума. Из величин γ_{max} , R , I_n^{RTI} находим значение пороговой чувствительности детектора: $\text{NEP} = 14 \text{ pW/Hz}^{1/2}$.

Исследуемые диоды имеют критическую частоту порядка десятков гигагерц: $f_c \approx (2\pi C)^{-1}(rR)^{-1/2}$ [15]. Очевидным способом улучшения их характеристик детектирования является увеличение f_c за счет уменьшения площади барьерного контакта. На рис. 3 показаны расчетные зависимости вольт-ваттной и пороговой чувствительностей детектора от площади на частоте

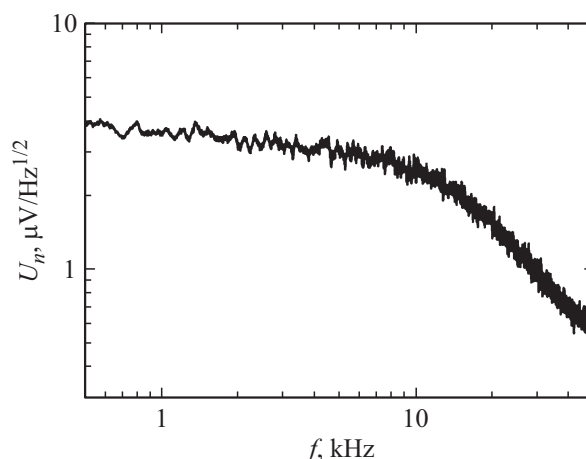


Рис. 2. Спектр усиленного шумового сигнала детектора.

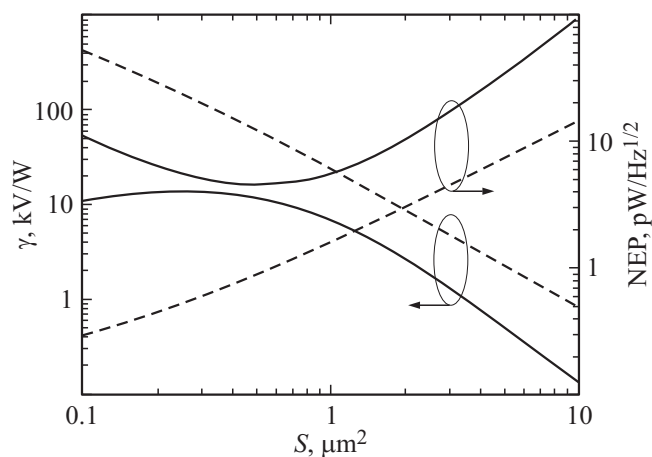


Рис. 3. Зависимости вольт-ваттной и пороговой чувствительностей детектора на частоте 250 GHz от площади барьерного контакта диода. Штриховые линии — расчет для идеального согласования диода и волновода, сплошные — расчет без схемы согласования.

250 GHz. Для расчета использовались те же параметры диода, что и на рис. 1. Предполагалось, что $R \propto S^{-1}$, $C \propto S$, $r \propto S^{-1/2}$. Штриховыми линиями показаны зависимости для случая идеального согласования диода с волноводом, сплошными линиями — без согласования. При площади барьерного контакта меньше или порядка $1 \mu\text{m}^2$ вольт-ваттная чувствительность детектора может достигать десятков kV/W , пороговая чувствительность — единиц $\text{pW/Hz}^{1/2}$.

Таким образом, в работе исследованы характеристики детектирования корпусных детекторов на основе планарных низкобарьерных диодов Мотта Al/GaAs с приповерхностным δ -легированием, работающих без подачи постоянного смещения. Результаты измерений в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн демонстрируют высокие значения вольт-ваттной чувствительности детекторов (до 1000 V/W) при величинах NEP от $14 \text{ pW/Hz}^{1/2}$, что вполне сопоставимо с известными достижениями [16]. Дальнейшее улучшение характеристик детектирования может быть достигнуто при уменьшении площади диодов. Сделанные оценки показывают, что при использовании диодов с площадью барьерного контакта порядка $1 \mu\text{m}^2$, изготовленных на основе той же гетероструктуры, вольт-ваттная чувствительность детектора может достигать десятков kV/W при величине NEP порядка единиц $\text{pW/Hz}^{1/2}$.

Работа подготовлена по итогам исследований, проведенных в рамках выполнения государственного задания ИФМ РАН (тема № 0035-2014-0205) и при частичной поддержке ИПФ РАН от РФФИ и Правительства Нижегородской области (проект № 18-42-520015 p_a).

Список литературы

- [1] Sizov F., Rogalski A. // Prog. Quant. Electron. 2010. V. 34. N 5. P. 278–347.
- [2] Brown E.R. // Solid-State Electron. 2004. V. 48. N 10–11. P. 2051–2053.
- [3] Vo V.T., Hu Z. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2006. V. 54. N 11. P. 3836–3842.
- [4] Su N., Rajavel R., Deelman P., Schulman J.N., Fay P. // IEEE Electron Dev. Lett. 2008. V. 29. N 6. P. 536–539.
- [5] Chahal P., Morris F., Frazier G. // IEEE Electron Dev. Lett. 2005. V. 26. N 12. P. 894–896.
- [6] Ito H., Ishibashi T. // Jpn. J. Appl. Phys. 2017. V. 56. N 1. P. 014101.
- [7] Zainul Ariffin K.N., Wang Y., Abdullah M.R.R., Muttlak S.G., Abdulwahid O.S., Sexton J., Ian K.W., Kelly M.J., Missous M. // IEEE Trans. Electron Dev. 2018. V. 65. N 1. P. 64–71.
- [8] Шашкин В.И., Мурель А.В., Данильцев В.М., Хрыкин О.И. // ФТП. 2002. Т. 36. В. 5. С. 537–542.
- [9] Shashkin V., Rushworth S., Daniltsev V., Murel A., Drozdov Yu., Gusev S., Khrykin O., Vostokov N. // J. Electron. Mater. 2001. V. 30. N 8. P. 980–986.
- [10] Шашкин В.И., Вакс В.Л., Данильцев В.М., Масловский А.В., Мурель А.В., Никифоров С.Д., Хрыкин О.И., Чеченин Ю.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. В. 6. С. 544–551.
- [11] Parshin V.V., Tretyakov M.Yu., Koshelev M.A., Serov E.A. // IEEE Sensors J. 2013. V. 13. N 1. P. 18–23.
- [12] Shashkin V.I., Drjagin Yu.A., Zakamov V.R., Krivov S.V., Kukin L.M., Murel A.V., Chechenin Y.I. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2007. V. 28. N 11. P. 945–952.
- [13] Vostokov N.V., Shashkin V.I. // IEEE Trans. Electron Dev. 2017. V. 64. N 1. P. 109–114.
- [14] Op amp applications handbook / Ed. W.G. Jung. Newnes, 2005. 878 p.
- [15] Cowley A.M., Sorensen H.O. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1966. V. 14. N 12. P. 588–602.
- [16] Liu L., Hesler J.L., Xu H., Lichtenberger A.W., Weikle R.M. // IEEE Microwave Wireless Comp. Lett. 2010. V. 20. N 9. P. 504–506.