

07.2

Аномалии частотной отсечки полупроводниковых диодов на сверхвысоких частотах

© Г. Абдурахманов^{1,2}, А. Есбергенова^{1,2}, С. Рейимбаева¹¹ Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан² Научно-технический центр АО „Узбекэнерго“, Ташкент, Узбекистан

E-mail: gulmirzo@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 июля 2020 г.

В окончательной редакции 15 сентября 2020 г.

Принято к публикации 15 сентября 2020 г.

Представлены результаты экспериментального исследования частотной зависимости детектированного напряжения полупроводниковых диодов различного назначения (СВЧ-детекторы, параметрический усилитель, низкочастотный выпрямитель). Обнаружено, что диоды с частотой отсечки менее 100 МГц проявляют детекторные свойства на 10 GHz.

Ключевые слова: полупроводниковый диод, детектирование, частота отсечки, СВЧ-колебания.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.01.50449.18460

Механизм детектирования (выпрямления) низкочастотных (примерно до 10–100 МГц) колебаний полупроводниковыми диодами хорошо изучен [1,2] и состоит в модуляции сопротивления области пространственного заряда (ОПЗ) при инжекции и вытягивании носителей заряда внешним электрическим полем. Однако при дальнейшем увеличении частоты поля эти процессы во многих типах полупроводниковых диодов не успевают установиться, и их детекторные (выпрямительные) свойства резко ухудшаются: наступает частотная отсечка.

Обычно для того, чтобы высота потенциального барьера в ОПЗ заметно изменилась для движения носителей, амплитуда приложенного напряжения должна быть сравнима с шириной запрещенной зоны полупроводника, что для кремниевых диодов соответствует амплитуде сигнала $V_0 \approx 0.1$ В и более. Поэтому большинство детекторных и смесительных диодов СВЧ работает при небольшом прямом смещении, за исключением низкобарьерных диодов Шоттки [3]. Характерно, что близость прямой вольт-амперной характеристики диодов с барьером Шоттки к теоретической при комнатной температуре не является достаточным критерием совершенства диода, а значит, и эффективной работы на СВЧ [4].

Отметим также, что в некоторых СВЧ-детекторных диодах (например, диод Д605) выпрямленное напряжение оказывается в 4–6 раз больше, чем V_0 падающей волны [5].

Оценка показывает, что в типичном кремниевом СВЧ-диоде (ширина ОПЗ $w \approx 1$ мкм, амплитуда сигнала $V_0 \approx 1$ мВ, подвижность дырок в кремнии $\mu_p \approx 500$ см²/(В·с)) частота отсечки $f_c = \mu_p V_0 / 2w^2 \approx 25$ МГц. Следовательно, такие диоды независимо от площади перехода должны перестать детектировать на частотах выше 100 МГц. Однако на практике диоды с аналогичными параметрами работают

в диапазоне СВЧ в качестве детекторов, смесителей и параметрических усилителей [2,6–8].

Интересные особенности детектирования (смена знака детектированного напряжения при росте V_0 , влияние ориентации плоскости поляризации относительно плоскости диода) наблюдались в диодах металл–изолятор–металл (МИМ) [9–11]. Однако нам неизвестны подобные исследования на диодах с p – n -переходом.

Поэтому представляет интерес исследование частотной зависимости детекторных свойств диодов в широком диапазоне частот от сотен кГц до десятков GHz, чтобы выяснить, как сказывается на таких свойствах диода переход через область частотной отсечки.

Для экспериментов были выбраны детекторные диоды, диоды для параметрического усиления СВЧ, а также выпрямительные (см. таблицу).

На частотах до 1 GHz источником сигнала служил измеритель амплитудно-частотных характеристик Х1-50 (коаксиальная линия), на частотах 9–10 GHz — амплитрон М-857 (волновод). Диод располагался в высокочастотной (СВЧ) линии так, чтобы электрическое поле СВЧ-волны было параллельно оси диода (т.е. перпендикулярно плоскости p – n -перехода или плоскости полупроводника, которой касается металлическая игла). Осциллограммы тока через диоды снимались на осциллографе С1-70 со стробоскопическим блоком 1У71 (Я40-1700, полоса пропускания 3.5 GHz) и блоком развертки 1Р71 (Я40-2700).

Исследования показали, что в диодах ГА402 режим холостого хода нарушается при сопротивлении нагрузки $R_L < 10^6 \Omega$. Поэтому для измерения детектированного напряжения использовался вольтметр-электрометр ВК2-16 при входном сопротивлении $R_{in} \approx 100$ МΩ.

Экспериментальная частотная зависимость детектированного напряжения холостого хода $V_{oc}(f)$ диода

Типы, технология, предельная частота и назначение исследованных диодов

Тип диода (материал)	Технология и контакт	f_c , Hz	Назначение
ГА402(Ge)	Диффузионный $p-n$ -переход	10^{12}	Параметрический усилитель
ДК-В4(Si)	Точечный контакт	10^{12}	Видеодетектор
ДК-В8 (Si)	»	10^{12}	»
Д604 (Si)	»	10^{10}	»
Д602(Ge)	»	10^{10}	»
ДКИ-1М (Si)	»	$3 \cdot 10^9$	»
2Ц106 (Si, отдельный элемент)	Диффузионный $p-n$ -переход	$2 \cdot 10^4$	Выпрямитель

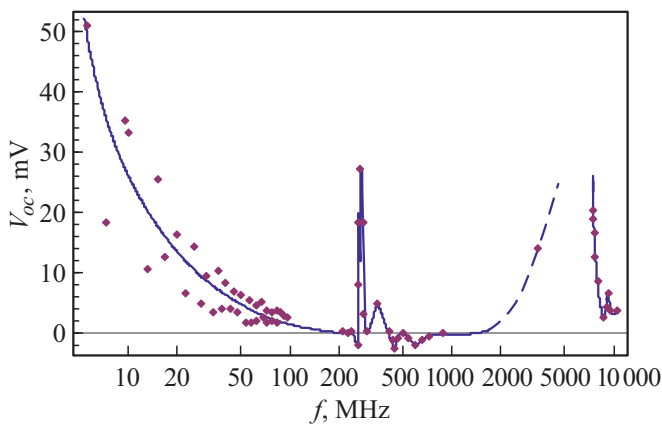


Рис. 1. Частотная зависимость выпрямленного напряжения холостого хода V_{oc} диода ГА402Б при $P = 1 \text{ mW}$ и $T = 300 \text{ K}$. Точки — экспериментальные результаты, кривая — аппроксимация.

ГА402Б при постоянной мощности $P = 1 \text{ mW}$ генератора показана на рис. 1.

В диапазоне частот от 1 до 8.7 GHz (кроме частоты 3 GHz, штриховой участок) измерения не проводились из-за отсутствия соответствующего генератора. На частотах 0.5–100 MHz напряжение холостого хода $V_{oc}(f)$ уменьшается по мере повышения частоты как f^{-1} согласно описанному выше и исчезает при $f > 200 \text{ MHz}$. Однако около 300 MHz в узком интервале частот возникает детектированное напряжение, причем оно несколько раз меняет знак с ростом частоты и при $f \geq 800 \text{ MHz}$ снова исчезает. На частотах более 8.7 GHz наблюдается немонотонно уменьшающееся детектированное напряжение $V_{oc}(f)$.

При этом с уменьшением подводимой мощности $V_{oc}(f)$ становится положительным на всех частотах. Такое поведение V_{oc} примечательно тем, что изменение знака V_{oc} происходит при $P < 1 \text{ mW}$, в то время как в 3-сантиметровом диапазоне для этого требуется мощность более 100 mW. Физическая природа этих особенностей пока не установлена, но предполагается, что они

связаны с неоднородностью плазмы полупроводниковых структур.

Величина детектированного напряжения V_{oc} на частотах около 300 MHz и 9 GHz сравнима с таковой

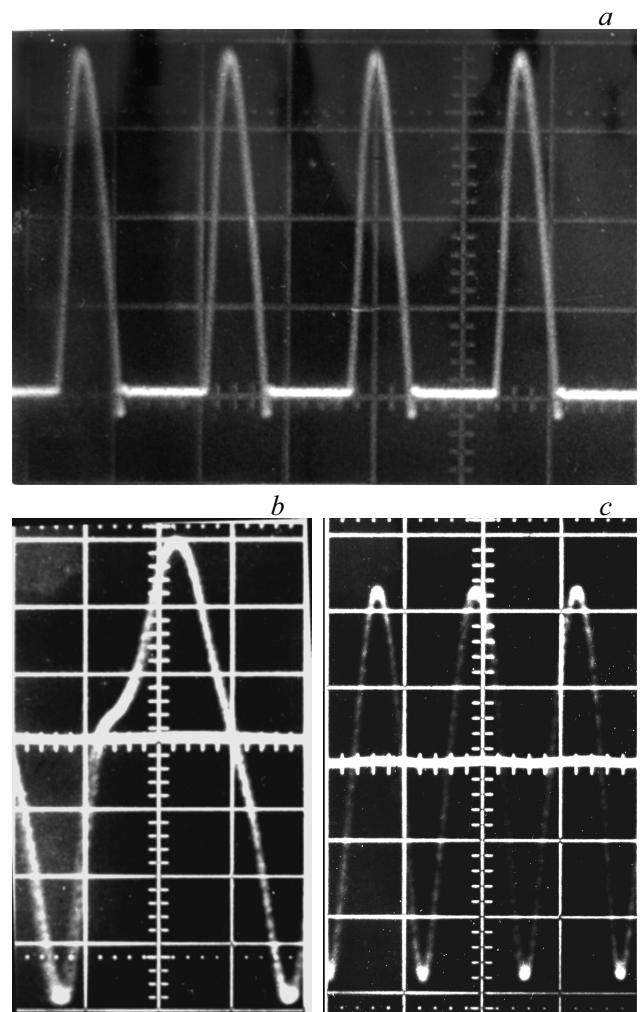


Рис. 2. Оциллограммы высокочастотного тока через диод ГА402Б на частоте 0.3 (a), 300 (b) и 900 MHz (c). Цена деления по горизонтали: $2 \mu\text{s/div}$ (a), 1 ns/div (b, c). Цена деления по вертикали: 0.65 mA/div .

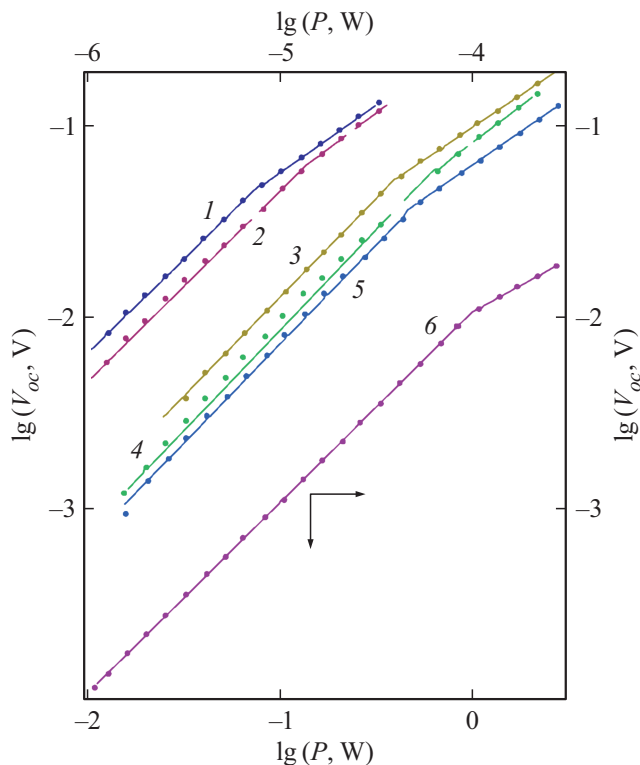


Рис. 3. Зависимость от мощности P детектированного напряжения холостого хода V_{oc} диодов Д604 (1), ГА402Б (2), Д602А (3), ДКИ-1М (4), ДК-В4 (5) и 2Ц106 (6). $\omega = 6 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$, $T = 300 \text{ K}$. Параметры диодов приведены в таблице.

на частотах ниже 1 МГц при одинаковой мощности сигнала.

Исчезновение детекторных (выпрямляющих) свойств диода ГА402Б на частотах более 200 МГц подтверждается и осциллограммами тока через диод в том же диапазоне частот (рис. 2).

Как видно из этих осциллограмм, в диоде ГА402Б на частотах порядка 1 МГц действительно имеет место выпрямление (рис. 2, а), но по мере повышения частоты обратный ток через диод возрастает (рис. 2, б) и на частотах около 1 ГГц (в 10^3 раз ниже предельной частоты, рис. 2, с) становится практически синусоидальным, диод уже не проявляет выпрямительных свойств (асимметрии высокочастотного тока).

Аналогично меняется на тех же частотах высокочастотный ток через СВЧ-видеодетектор ДК-В8 с тем отличием, что обратный ток имеет форму полусинусоиды, амплитуда которой на частоте 0.15 МГц в 5 раз меньше, чем для положительной полуволны, но с ростом частоты это отношение уменьшается до 1.

Тем не менее эти диоды, а также диоды, предназначенные для выпрямления на частотах порядка десятков кГц, проявляют детекторные свойства на частоте $\omega = 6 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ (рис. 3). Здесь примечательно, что у всех диодов, включая даже выпрямительный диод 2Ц106,

начальный участок зависимости $V_{oc}(P)$ линейный, т.е. детектирование квадратичное, и при достижении некоторой величины P наблюдается излом $V_{oc}(P)$, после чего наклон уменьшается.

Эти результаты показывают следующее.

1. Возникновение участков детектирования высокочастотного сигнала $V_{oc}(f)$ выше частоты отсечки (ГА402Б) и выше предельной рабочей частоты (2Ц106) не согласуется с общепринятой теорией выпрямления и связанной с ней частотной отсечкой, а физический механизм такого поведения остается неясным.

2. Влияние ориентации плоскости поляризации падающего излучения относительно плоскости МИМ-диода указывает на то, что в детектировании оптического и теплового излучения важна не только энергия фотона, но и его волновые свойства.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.M. Sze, *Modern semiconductor device physics* (Wiley, N.Y., 1998). [С. Зн, *Физика полупроводниковых приборов* (Мир, М., 1984), кн. 2].
- [2] *Microwave semiconductor devices and their circuit applications*, ed. by H.A. Watson (McGRAW-Hill Book Company, N.Y., 1969). [СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение, под ред. Г. Уотсона (Мир, М., 1972)].
- [3] *RF and microwave power detection with Schottky diodes. Application Notes*. (Infineon, 2018).
- [4] В.Г. Божков, В.С. Лукаш, *Вестн. Томск. гос. ун-та*, №285, 129 (2005). <http://sun.tsu.ru/mminfo/000063105/285/image/285-129.pdf>
- [5] *Сверхвысокочастотные детекторные диоды для детектирования сигналов СВЧ-диапазона, технические характеристики, параметры*. <https://eandc.ru/news/detail.php?ID=18813>
- [6] https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN_1807_PL32_1808_132434_RF_and_microwave_power_detection-AN-v01_00-EN.pdf
- [7] S.K. Roy, M. Mitra, *Microwave semiconductor devices* (Prentice-Hall of India, New Delhi, 2006).
- [8] J.A. Hagerty, *Nonlinear circuits and antennas for microwave energy conversion, PhD Thesis* (University of Colorado, 2003).
- [9] S.P. Kwok, G.I. Haddad, G. Lobov, *J. Appl. Phys.*, **42** (2), 554 (1971). <https://doi.org/10.1063/1.1660062>
- [10] M. Pyee, J. Uebersfeld, J. Auvray, C. Gastaud, *Proc. IEEE*, **62** (4), 526 (1974). DOI: 10.1109/PROC.1974.9462
- [11] T.K. Gustafson, R.V. Schmidt, J.R. Perucca, *Appl. Phys. Lett.*, **24** (12), 620 (1974). <https://doi.org/10.1063/1.1655078>