

УДК 621.383:621.315.5

Исследование электрофизических параметров высокотемпературного фотодиода Шоттки на основе Au/n-GaP

В.С. Рудневский

В статье представлены результаты исследований вольт-амперных характеристик высокотемпературного фотодиода Шоттки Au/n-GaP. Полученные значения высоты барьера Шоттки и коэффициента неидеальности соответствуют идеальному барьеру Шоттки и практически не зависят от температуры. Показано, что при токах $<10^{-12}$ А в вольт-амперной характеристике фотодиода наблюдается ток утечки, линейно зависящий от напряжения и экспоненциально от температуры. Этот ток существенным образом ограничивает удельную обнаружительную способность фотодиода Шоттки Au/n-GaP при температуре до +125 °С.

PACS 85.60.Gz; 42.79Pw

Ключевые слова: фотодиод Шоттки, ультрафиолетовый диапазон, фосфид галлия, вольт-амперная характеристика, удельная обнаружительная способность.

Введение

Для практической работы и научных исследований в тяжелых условиях эксплуатации требуется аппаратура, способная выдерживать воздействие высокой температуры в течение длительного времени (контроль за факелом пламени, наблюдение за атомными реакторами, управление термическими процессами, исследование планет, противопожарные системы). Наличие в такой аппаратуре оптических систем стало необходимым, поэтому исследования фотодиодов Шоттки Au/n-GaP, перекрывающих ультрафиолетовый и видимый диапазон спектра, при температурах до +250 °С представляют как научный, так и практический интерес.

Целью данной работы было исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) высокотемпературного фотодиода Шоттки (ФДШ) на основе фосфида галлия (GaP), аналогичного представленному в [1].

Подготовка образцов

При изготовлении фотодиода Шоттки использовались исходные полупроводниковые пластины, имеющие структуру np^+ -GaP, полученную выращиванием методом жидкофазной эпитаксии n -слоя толщиной ~ 10 мкм с концентрацией основных носителей $n \sim 10^{16}$ см⁻³ на подложке n^+ -типа

Рудневский Владимир Сергеевич, ведущий инженер.

ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел.: 8 499 374–82–51. E-mail: rudnevsky@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2014 г.

© Рудневский В.С., 2014

толщиной ~ 350 мкм с концентрацией носителей заряда $n^+ \sim (3-5) \times 10^{17}$ см⁻³.

Методом термовакуумного напыления на n -слой GaP наносился полупрозрачный слой золота толщиной ~ 10 нм. Затем на полупрозрачный слой золота через соответствующую металлическую маску напылялись золотые контакты толщиной 0,1 мкм и диаметром 300 мкм. После этого методами фотолитографии выделялись чувствительные площадки диаметром 1,5 мм. Сформированные на пластине мезаструктуры с чувствительными элементами «выкальвались» и монтировались в герметизированный корпус. Выводы от контактных площадок разваривались золотой проволокой диаметром 30 мкм.

Полученный таким образом исследуемый фотодиод Шоттки Au/n-GaP помещался в специально сконструированный измерительный криостат-термостат с системой управления, позволяющей регулировать температуру в диапазоне от минус 195 °С до +350 °С с точностью не хуже $\pm 0,5$ °С [2]. Перед измерениями вольт-амперных характеристик фотодиод был подвергнут предварительному отжигу при температуре +250 °С в течение 6 часов с целью стабилизации его параметров.

Экспериментальные результаты и анализ ВАХ

Выражение для прямой и обратной ветвей ВАХ диода Шоттки имеет следующий вид (без учета последовательного сопротивления) [3]:

$$I_{ID} = SA^*T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q\Phi}{kT}\right) \cdot \left(\exp\left(\frac{q}{nkT} \cdot V_{\text{пр}}\right) - 1\right), \quad (1)$$

$$I_{\text{обп}} = SA^*T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q\Phi}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{q}{kT} \cdot \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon}}\right), \quad (2)$$

где $E = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon} \cdot (V_{обр} + V_{bi} - \frac{kT}{q})}$. Остальные обозна-

чения имеют следующие значения:

- $I_{пр}$ — ток прямой ветви ВАХ;
- $V_{пр}$ — напряжение на диоде;
- $I_{обр}$ — ток обратной ветви ВАХ;
- $V_{обр}$ — напряжение на диоде;
- ϕ — высота барьера Шоттки;
- n — коэффициент неидеальности;
- S — площадь диода;
- A^* — эффективная постоянная Ричардсона;
- T — температура К;
- q — заряд электрона;
- k — постоянная Больцмана;
- ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника;
- N_D — концентрация носителей;
- V_{bi} — встроенный потенциал;

Исследования ВАХ ФДШ Au/n-GaP при различных температурах проводились согласно методам, изложенным в [3–5]. При разных температурах были определены высота барьера ϕ , коэффициент неидеальности n , эффективная постоянная Ричардсона A^* , сопротивление фотодио-

да $R_{SH}(T)$ (измеренное при напряжениях на фотодиоде ± 10 мВ, $R_{SH} = V(\pm 10 мВ) / I$).

На рис. 1 и 2 представлены маркерами типичные экспериментальные вольт-амперные характеристики прямых и обратных ветвей исследованного ФДШ Au/n-GaP при температурах от +18 °C до +250 °C с интервалом 25 °C.

Анализ прямых ветвей (экспериментальных) ВАХ ФДШ Au/n-GaP (рис. 1) показал, что высота барьера Шоттки находится в интервале 1,300–1,309 В и практически не зависит от температуры (её среднее значение равно 1,304 В). Коэффициент неидеальности в диапазоне температур от +18 °C до +250 °C тоже слабо зависит от температуры и его среднее значение равно 1,052. На рис. 3 представлены температурные зависимости этих параметров. Среднее значение эффективной постоянной Ричардсона, также полученное из анализа вольтамперных характеристик, равнялось ~ 53 А/см²×К².

Полученные значения высоты барьера и коэффициента неидеальности близки к значениям, присущим идеальному барьеру Шоттки Au/n-GaP. В этом случае выражения для прямой (1) и обратной (2) ветвей ВАХ ФДШ Au/n-GaP будут иметь

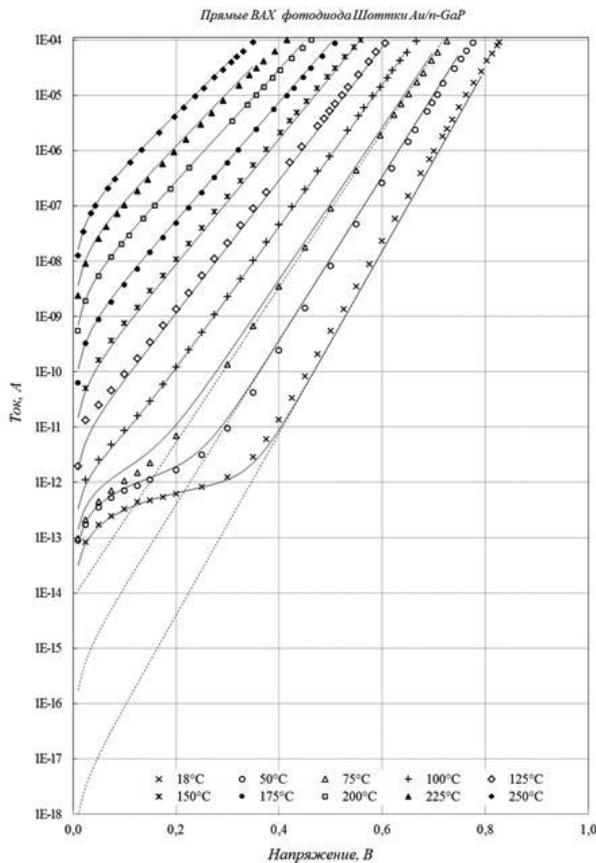


Рис. 1. Прямые ВАХ Au/n-GaP фотодиода Шоттки при различных температурах: маркеры — экспериментальные данные, штриховые линии — расчетные данные без учета R_{SH} по формуле (3), сплошные линии — расчетные данные с учетом R_{SH} по формуле (7).

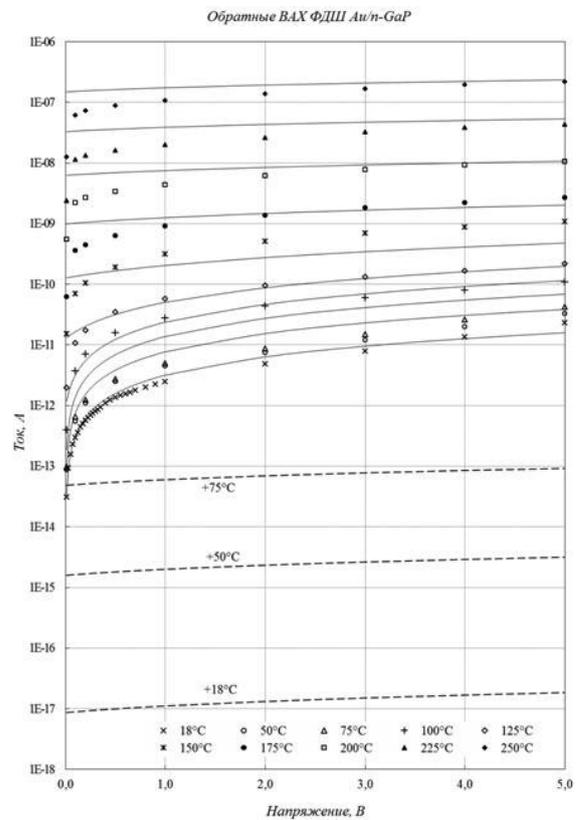


Рис. 2. Обратные ВАХ Au/n-GaP фотодиода Шоттки при различных температурах: маркеры — экспериментальные данные, штриховые линии — расчетные данные без учета R_{SH} по формуле (4), сплошные линии — расчетные данные с учетом R_{SH} по формуле (8).

вид (без учета последовательного сопротивления ФДШ):

$$I_{\text{ПР}} = SA^*T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot 1,304}{kT}\right) \times \left(\exp\left(\frac{q}{1,052 \cdot kT} \cdot V_{\text{ПР}}\right) - 1\right), \quad (3)$$

$$I_{\text{ОБР}} = SA^*T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot 1,304}{kT}\right) \times \exp\left(\frac{q}{kT} \cdot \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon}}\right), \quad (4)$$

где S — площадь ФДШ Au/n-GaP (0,0177 см²); A^* — эффективная постоянная Ричардсона (53 А×см⁻²×К⁻²);

ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника (11,6×8,854×10⁻¹⁴ Ф×см⁻¹);

Обратные вольт-амперные характеристики, построенные по формуле (4) (показанные тонкими штриховыми линиями на рис. 2), сильно отличаются от экспериментальных данных (представленных маркерами) и заметно приближаются к экспериментальным данным при температуре выше +100 °С.

Прямые вольт-амперные характеристики исследованного ФДШ Au/n-GaP, построенные по формуле (3) и показанные тонкими штриховыми линиями на рис. 1, имеют хорошее совпадение

с экспериментальными данными (представленные маркерами) только при температурах выше +100 °С.

При температурах до +100 °С и при малых напряжениях 0–0,3 В имеет место ток утечки, вызванный различными причинами. Когда ток утечки мал (<10⁻¹² А), он линейно зависит от приложенного к фотодиоду напряжения и нелинейно от температуры. На рис. 4 показана экспериментальная ВАХ ФДШ Au/n-GaP (представленная маркерами) в диапазоне напряжений –0,3 – +0,3 В, измеренная при температуре +18 °С. Штриховая прямая соответствует сопротивлению фотодиода R_{SH} (при 18 °С), измеренному при напряжениях на фотодиоде ±10 мВ. Зависимость $\ln(R_{\text{SH}}) = f(1/T)$ близка к линейной.

Если предположить, что $R_{\text{SH}}(T)$ зависит от температуры как

$$R_{\text{SH}}(T) \approx C_1 \cdot \exp\left(\frac{C_2}{T}\right), \quad (5)$$

где C_1, C_2 — некие константы, то тогда из экспериментальных данных $\ln(R_{\text{SH}}) = f(1/T)$ можно найти эти константы, которые в нашем случае имеют следующие значения:

$$C_1 \approx 2,2 \times 10^6 \text{ Ом}, C_2 \approx 2260 \text{ К},$$

Выражение (5) примет вид

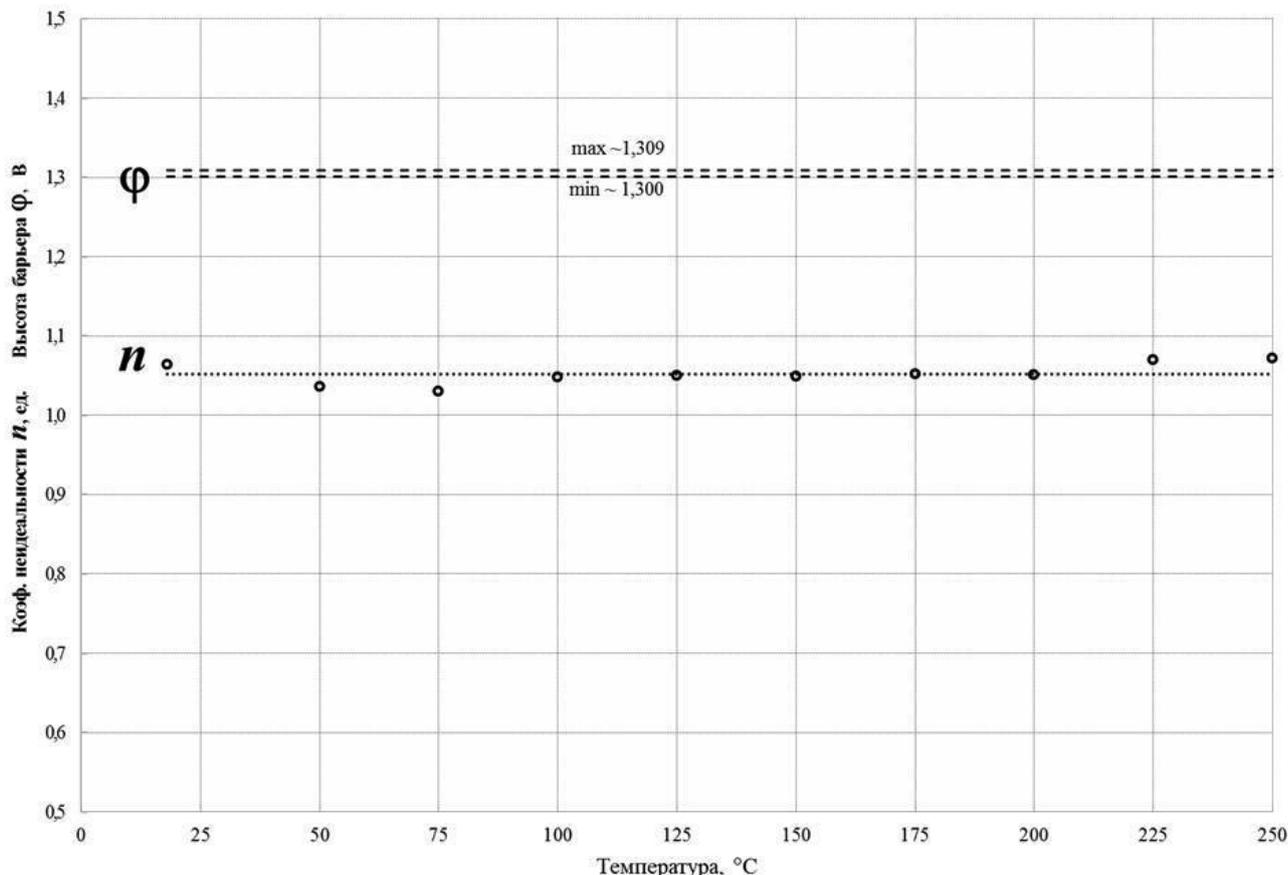


Рис. 3. Экспериментальные значения высоты барьера ϕ и коэффициента неидеальности n Au/n-GaP фотодиода Шоттки в температурном диапазоне +18÷250 °С. Экспериментальные данные обозначены маркерами.

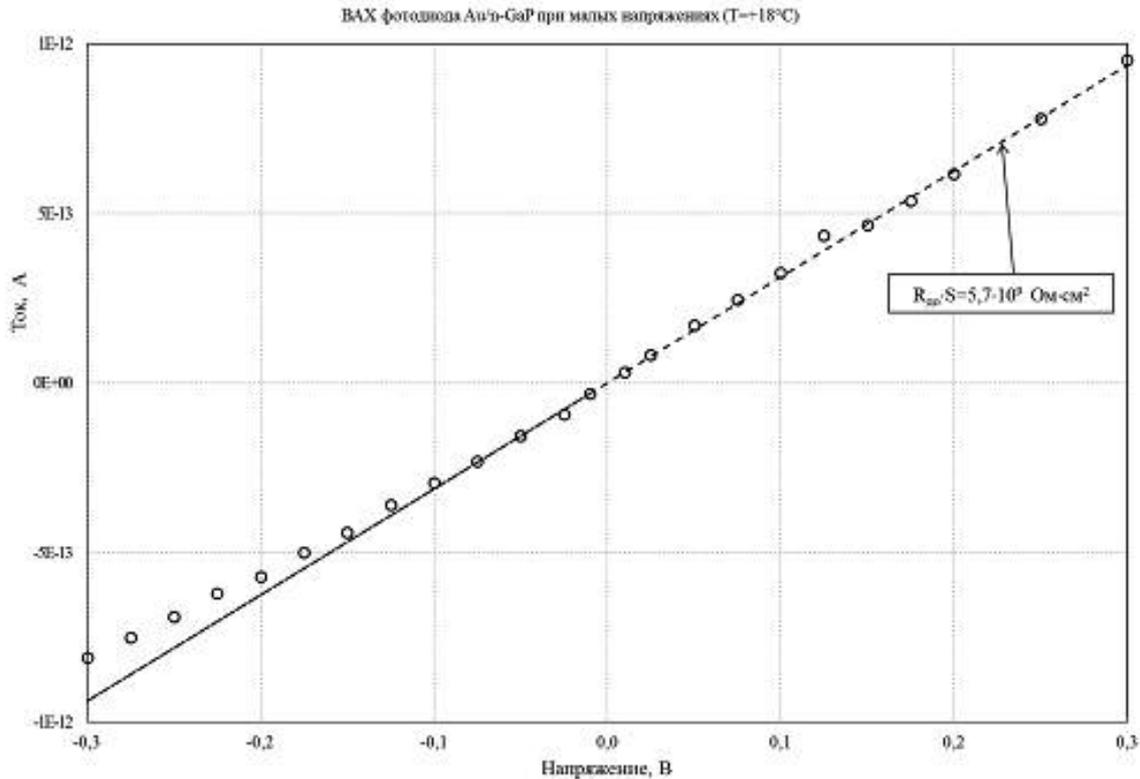


Рис. 4. Прямая и обратная ВАХ Au/n-GaP фотодиода Шоттки при температуре +18 °С и малых напряжениях.

$$R_{SH}(T) \approx 2,2 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{2260}{T}\right) \approx 2,2 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot 0,19}{kT}\right) \quad (6)$$

Следовательно, в уравнения ВАХ (3) и (4) необходимо ввести добавочный член, учитывающий дополнительный ток утечки, который вызван наличием дислокационных нарушений, точечных дефектов и проколов в эпитаксиальном слое n-GaP. Согласно [6, 7], можно предположить, что ток утечки в данном случае определяется в основном термоэлектронной эмиссией через барьер высотой ~0,19 эВ в дефектных областях эпитаксиального слоя полупроводника.

С учетом (6) уравнения (3) и (4) примут вид:

$$I_{ПП} \approx SA^*T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot 1,304}{kT}\right) \times \left(\exp\left(\frac{q}{1,052 \cdot kT} \cdot V_{ПП}\right) - 1\right) + \frac{V_{ПП}}{R_{SH}(T)}, \quad (7)$$

$$I_{ОБР} \approx SA^*T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot 1,304}{kT}\right) \times \exp\left(\frac{q}{kT} \cdot \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon}}\right) + \frac{V_{ОБР}}{R_{SH}(T)}. \quad (8)$$

ВАХ ФДШ Au/n-GaP, рассчитанные по формулам (7) и (8), показаны сплошными тонкими линиями на рис. 1 и 2. Они имеют хорошее совпадение с экспериментальными значениями ВАХ (маркеры) на всем температурном интервале от +18 °С до +250 °С. Таким образом, формулы (7) и (8) бо-

лее точно отображают прямые и обратные ВАХ исследуемого ФДШ Au/n-GaP, чем формулы (3) и (4).

Выражение (6) для $R_{SH}(T)$ имеет важное значение для фотодиода, т.к. параметр ($R_{SH} \times S$) произведение R_{SH} на площадь фотодиода существенно определяет удельную пороговую чувствительность фотодиода Шоттки или его удельную обнаружительную способность D^* при температурах ниже +100 °С. Из формулы (7) можно найти общее выражение для сопротивления ФДШ Au/n-GaP при $V = 0$ (R_{D0}):

$$1/R_{D0} = (dI_{ПП} / dV_{ПП})_{V=0} = SA^*T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot 1,304}{kT}\right) \cdot \frac{q}{1,052 \cdot kT} + \frac{1}{2,2 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot 0,19}{kT}\right)} \quad (9)$$

Следовательно,

$$(R_{D0} \cdot S) = \left(A^*T^2 \cdot \exp\left(-\frac{q \cdot 1,304}{kT}\right) \cdot \frac{q}{1,052 \cdot kT} + \frac{1}{S \cdot 2,2 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot 0,19}{kT}\right)} \right)^{-1} \quad (10)$$

На рис. 5 показаны зависимости параметра $R_{D0} \times S$ от температуры для разных случаев. Штриховая линия показывает идеальную (предельную) зависимость $R_{D0} \times S$ от температуры (при отсутствии тока утечки, $R_{SH}(T) \rightarrow \infty$). Маркерами показаны экспериментально измеренные значения

параметра $R_{SH} \times S$. Сплошная кривая представляет значения параметра $R_{D0} \times S$, рассчитанные по формуле (10). Данная кривая показывает, что при температурах выше $+125^\circ\text{C}$ удельная обнаружительная способность D^* исследованного фотодиода Шоттки Au/n-GaP совпадает с предельно-возможными значениями (т.к. $D^* \sim (R_{D0} \times S)^{1/2}$). При температурах ниже $+125^\circ\text{C}$ параметр $R_{D0} \times S$ ограничивается сопротивлением утечки, т.е. $R_{D0} \times S$ стремится к $R_{SH} \times S$. Это ограничение имеет принципиальное практическое значение, т.к. вырастить бездефектный полупроводник практически невозможно.

В настоящее время выражение (10) фактически определяет максимальную величину параметра $R_{D0} \times S$ для ФДШ типа Au/n-GaP. На рис. 5 представлены для сравнения (обозначены отдельными маркерами) значения параметра ($R_{SH} \times S$) лучших зарубежных аналогов промышленно-выпускаемых фотодиодов Шоттки на основе GaP: ФД G1961 фирмы Hamamatsu ($R_{SH} \times S$)_{G1961} $\approx 5 \times 10^8$ Ом \times см² (маркер — квадрат) [8], ФД EPD-365-0/1.4 фирмы Roithner Lasertechnik ($R_{SH} \times S$)_{EPD} $\approx 4 \times 10^9$ Ом \times см² (маркер — ромб) [9].

Из графика на рис. 5 видно, что фотодиоды Шоттки на основе фосфида галлия (как отечественные, так и зарубежные) в настоящее время

обладают удельной обнаружительной способностью D^* , которая не превышает 10^{14} см \times Гц^{1/2}/Вт.

Данные рассуждения и расчеты приведены для одного из типичных ФДШ Au/n-GaP, имеющего наилучшие ВАХ при малых напряжениях (наименьший ток утечки и наибольшее R_{SH}). В общем случае, высокотемпературные фотодиоды Шоттки имели большой разброс R_{SH} (на несколько порядков) даже для одной партии приборов, изготовленных из одной пластины полупроводника. В таблице приведены некоторые параметры разработанных высокотемпературных ФДШ Au/n-GaP, измеренные при комнатной температуре. Из приведенных данных видно, что связь между параметром $R_{SH} \times S$ и токовой чувствительностью фотодиода не прослеживается. Токовая чувствительность фотодиодов для разных партий практически не меняется от прибора к прибору, а параметр $R_{SH} \times S$ может отличаться на несколько порядков (например, приборы из одной партии и из одной пластины № 01 и № 04). Для каждого ФДШ имеется свое значение $R_{SH} \times S$, которое, возможно, определяется неравномерным распределением дефектов по пластине полупроводника, что существенным образом сказывается на величине R_{SH} и слабо влияет на токовую чувствительность фотодиодов.

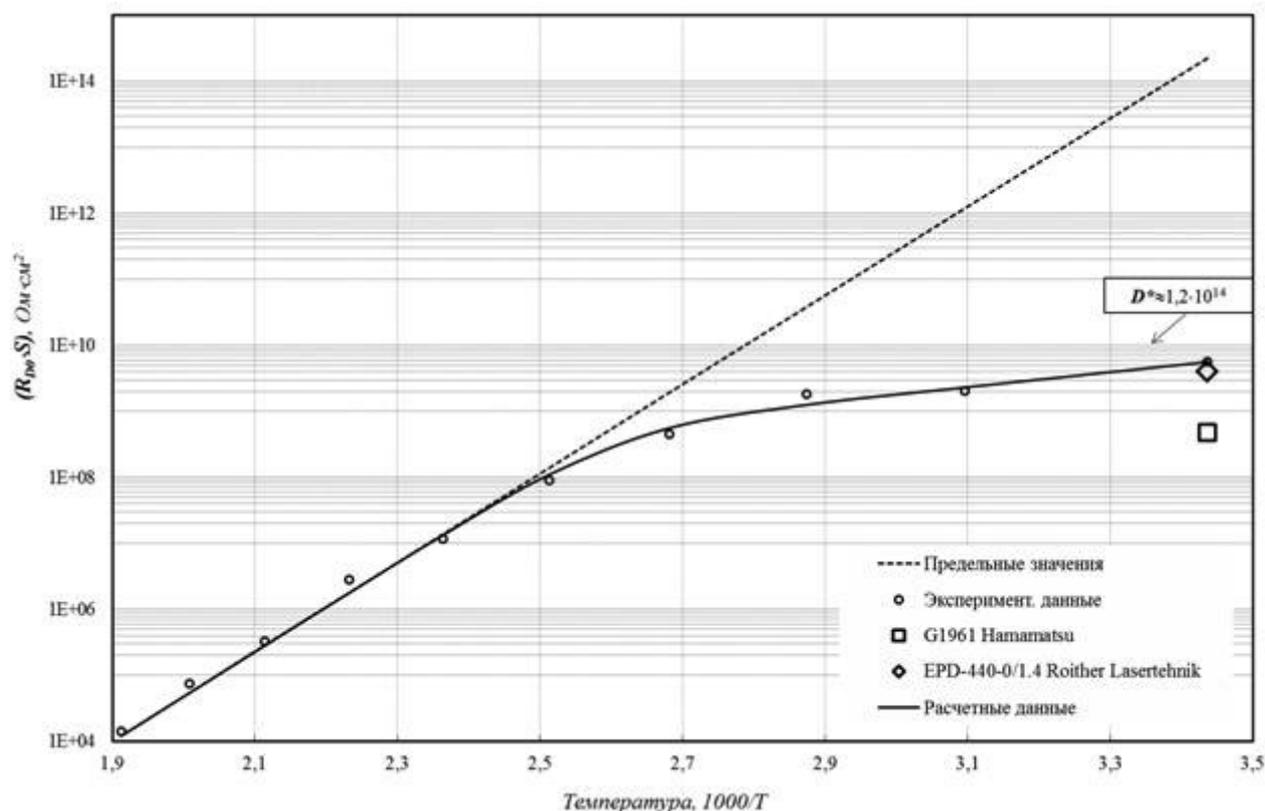


Рис. 5. Зависимость параметра ($R_{D0} \times S$) от температуры: круглые маркеры — экспериментальные данные ($R_{SH} \times S$), штриховая линия — расчетные значения ($R_{D0} \times S$) без учета R_{SH} по формуле (10), сплошная линия — расчетные значения ($R_{D0} \times S$) с учетом R_{SH} по формуле (10).

Таблица

Номер прибора	Параметр $(R_{SH} \times S)$, Ом \times см ²	Параметр D^* , см \times Гц ^{1/2} /Вт	Ток при ± 10 мВ, А	Кэф. неид., n	Токовая чувствит. в λ_{max} , А/Вт	Квант. эффект., η
01 (парт. 1)	$1,6 \times 10^8$	$1,4 \times 10^{13}$	$1,1 \times 10^{-12}$	1,04	0,144	0,42
02 (парт. 1)	$2,9 \times 10^9$	$5,9 \times 10^{13}$	6×10^{-14}	1,12	0,137	0,40
03 (парт. 1)	$1,4 \times 10^9$	$3,9 \times 10^{13}$	$1,3 \times 10^{-13}$	1,04	0,136	0,40
04 (парт. 1)	$2,2 \times 10^4$	$1,7 \times 10^{11}$	8×10^{-9}	1,06	0,148	0,44
05 (парт. 2)	$4,4 \times 10^9$	$6,7 \times 10^{13}$	4×10^{-14}	1,04	0,129	0,38
06 (парт. 3)	$2,9 \times 10^7$	$6,7 \times 10^{12}$	6×10^{-12}	1,58	0,156	0,46
07 (парт. 3)	$2,2 \times 10^9$	$5,8 \times 10^{13}$	8×10^{-14}	1,08	0,156	0,46

Заключение

В фотодиодах Шоттки, созданных напылением слоя золота толщиной 10 нм на полупроводник n-GaP, высота барьера и коэффициент неидеальности близки к значениям, присущим идеальному барьеру Шоттки Au/n-GaP и практически не зависят от температуры в диапазоне +18–250 °С. Удельная обнаружительная способность таких фотодиодов до температуры +125 °С ограничена током утечки, вызванным термоэлектронной эмиссией через дефекты в эпитаксиальном слое полупроводника.

Литература

1. Рудневский В.С., Стафеев В.И. // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 111.

2. Рудневский В.С. // Тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: НПО «Орион». 27–30 мая 2008. С. 224.

3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. — М.: Мир, 1984

4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. ВТ. 2. — М.: Мир, 1984.

5. Бурлаков И.Д., Рудневский В.С. АС № 1528160 (СССР) от 8 августа 1989 г.

6. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А., Константинов О.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 19. С. 17

7. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. // ФТП. 2007. Т. 41. Вып. 11. С. 1281

8. http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/g1961_etc_kgpd1007e02.pdf

9. http://www.roithner-laser.com/datasheets/pd/EPD-365-0-1_4.pdf

Investigations of electrophysical properties of the high-temperature Au/n-GaP Schottky photodiode

V.S. Rudnevsky

Orion R&P Association

46/2 Enthuziastov sh., Moscow, 111123, Russia

E-mail: rudnevsky@mail.ru

Received May 12, 2014

Investigations of current-voltage (I–V) characteristics of the high-temperature Au/n-GaP Schottky photodiode are presented. Received data have shown that an experimental data (the height of a barrier and the ideality factor) are close to the magnitudes of ideal Au/n-GaP Schottky barrier and practically do not depend on the temperature in a range of +18÷250 °C. The leakage current in the photodiode depend linearly on a voltage and exponentially on a temperature at currents 10^{-12} A. This leakage current essentially limits detectivity

PACS: 85.60 Dw; 85.60 Gz; 07.57 Kp

Keywords: current-voltage characteristics, Schottky photodiode, detectivity

References

1. V. S. Rudnevsky and V. I. Stafeev, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 111 (2009).
2. V. S. Rudnevsky, in *Proceedings of the XX International Conference on Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, May 27–30, 2008), p. 224.
3. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices, Vol. 1* (A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1981; Mir, Moscow, 1984)
4. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices, Vol. 2* (A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1981; Mir, Moscow, 1984)
5. I. D. Burlakov and V. S. Rudnevsky, USSR Patent No. 1528160, (August 8, 1989).
6. T. V. Blank, Yu. A. Goldberg, O. V. Konstantinov, et al., *Tech. Phys. Lett.* **30**, 17 (2004).
7. T. V. Blank and Yu. A. Goldberg, *Semiconductors* **41**, 1281 (2007).
8. http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/g1961_etc_kgpd1007e02.pdf
9. http://www.roithner-laser.com/datasheets/pdf/EPD-365-0-1_4.pdf