53.089.68

Измерение вольт-амперных характеристик термостабилизированных кремниевых фотодиодов

А. А. КОВАЛЕВ, А. А. ЛИБЕРМАН, А. С. МИКРЮКОВ, С. А. МОСКАЛЮК

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: mrsergik@mail.ru

Приведены результаты высокоточных измерений вольт-амперных характеристик ряда кремниевых фотодиодов. Экспериментально установлено, что наибольшее влияние на точность измерения оказывают случайные колебания температуры фотодиода. Предложена методика термостабилизации, основанная на использовании самого фотодиода в качестве датчика температуры и позволившая уменьшить погрешность измерений напряжения и тока на фотодиоде в 10^3 раз. Проведено сравнение полученных результатов с известными теоретическими моделями. Показано, что одномерная модель фотодиода (PC1D) гораздо точнее уравнения Шокли.

Ключевые слова: *вольт-амперная характеристика, полупроводниковый фотодиод, внутренняя квантовая эффективность.*

The results of high-presicion measurements of several silicon photodiodes' volt-ampere characteristics are presented. It is established experimentally that the random fluctuations of photodiode temperature have the most significant effect on the measurement accuracy. The method of thermal stabilization based on the use of the photodiode as a sensor is proposed. The method allows to reduce the error of voltage and current on the photodiode measurement in ~10^3 times. The results are compared with known theoretical models. It is shown that one-dimensional model of the photodiode (PC1D) is much more accurate than Schottky equation.

Key words: *volt-ampere characteristic, semiconductor photodiode, internal quantum efficiency.*

В [1, 2] на основе модельных расчетов была показана принципиальная возможность определения внутренней квантовой эффективности и ряда других параметров фотодиодов путем сравнения «экспериментальных» вольт-амперных характеристик (ВАХ) с характеристиками, вычисленными по программе PC1D. В качестве «экспериментальных» ВАХ служили характеристики, полученные также по программе PC1D, но с наложением шумов как у реальных измерительных приборов. В [2] было установлено, что определение внутренней квантовой эффективности возможно при довольно высоких, но реализуемых точностях.

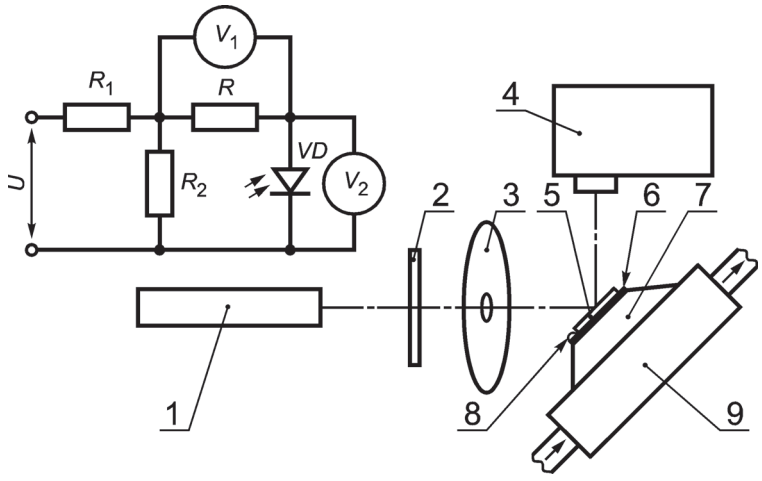

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — He—Ne-лазер; *2* — светофильтр; *3* — диафрагма; *4* — полупроводниковый приемник; *5* — исследуемый фотодиод *VD*; *6* — медная пластина; *7* — элемент Пельтье; *8* — термосопротивление; *9* — водяное охлаждение; *U* — напряжение источника питания; R_1, R_2 — сопротивления делителя напряжения; *R* — сопротивление для измерения тока фотодиода; V_1, V_2 — вольтметры, измеряющие силу тока и напряжение на фотодиоде

Для корректной проверки предложенного метода необходимо провести аналогичную процедуру сравнения с использованием реальных ВАХ, найденных экспериментально в условиях, максимально приближенных к расчетным. Для этого следует по возможности снизить влияние на результаты измерений колебаний температуры окружающей среды и нагрева полупроводника за счет джоулевых потерь. Ниже описана экспериментальная установка, проанализированы шумы отдельных элементов измерительной схемы и обоснована методика выполнения измерений.

Экспериментальная установка. Схема установки представлена на рис. 1. Излучение с длиной волны 632,8 нм, испускаемое He—Ne-лазером *1*, проходит через светофильтр *2* и диафрагму *3* на исследуемый фотодиод *5*. Светофильтр *2* служит только для измерения ВАХ под воздействием ослабленного излучения. Диафрагма *3* предназначена для отсечения второго пучка, возникающего на пластинке брюстера внутри лазера *1*. Излучение, отраженное от фотодиода *5*, попадает в трап-детектор *4* для измерения коэффициента отражения фотодиода. Главным элементом установки является исследуемый фотодиод *5*, расположенный на медной пластине *6* и охлаждаемый элементом Пельтье *7*, который подключен к водяному охлаждению *9*. Температуру фотодиода контролировали при помощи термосопротивления *8*. Вся установка размещается в зачерненном коробе, чтобы избежать паразитной засветки.

Чаще всего фотодиод подключают в токовом режиме через прецизионный операционный усилитель [3, 4]. В данном случае измерения необходимо проводить при различных напряжениях смещения, поэтому была выбрана другая схема. Напряжение источника *U* уменьшалось в 3 раза делителем напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2. Исследуемый фотодиод включался в цепь последовательно с высокоточным сопротивлением *R*,

предназначенным для измерения силы тока фотодиода с помощью вольтметра V_1. Напряжение фотодиода измерялось вольтметром V_2.

В качестве источника питания применяли прибор Agilent-6612C, а в качестве вольтметров — нановольтметр Agilent-34420A для измерения силы тока через сопротивление R и вольтметр Keithley 2002 для измерения напряжения на фотодиоде. Источник питания Agilent-6612C обладает довольно грубым шагом по напряжению 5 мВ. Чтобы уменьшить шаг источника питания, его подключали через делитель напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2. В представленной схеме ВАХ фотодиода определяются путем измерения силы тока и напряжения на фотодиоде при изменении напряжения U источника питания.

В качестве источника излучения использовали He—Ne-лазер фирмы Spectra Physics. Согласно паспортным данным его стабильность составляет 0,1 % после 20 мин прогрева. Однако по результатам измерений после 1,5 ч прогрева стабильность лазера была 0,004 %.

Для оценки влияния каждого элемента на точность измерений были определены шумы каждого элемента схемы в отдельности, например, шумы делителя напряжения на сопротивлениях R_1—R_2 при различных уровнях напряжения источника питания. Среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов этих измерений составило 6,6 мкВ или около 0,001 % измеряемого сигнала. Статистические шумы вольтметра 0,1 мкВ.

Помимо электрических шумов было оценено влияние температуры окружающей среды на работу фотодиода. Известно [5], что напряжение на полупроводнике при фиксированной силе тока линейно зависит от температуры с коэффициентом пропорциональности 3 мВ/К. На рис. 2, *а* приведен график изменения напряжения на фотододиоде от времени при отсутствии термостабилизации и постоянном напряжении источника питания. Изменения напряжения за 3 ч составили около 0,1 %, что не соответствует требуемой точности измерений, поэтому была использована термостабилизация на элементе Пельтье с обратной связью.

Исследуемый фотодиод с помощью термопасты закрепляли на медной пластине толщиной 0,5 мм и рядом с ним — термосопротивление для контроля температуры. Расстояние между фотодиодом и термосопротивлением составляло примерно 0,5 см. Медная пластина крепилась к холодной стороне элемента Пельтье. Обратная связь термостабилизации была реализована с помощью программного ПИД-регулятора [6]. Измерения времени установления стационарного тока в фотодиоде при быстром изменении приложенного напряжения показали, что благодаря этому регулятору система стабилизирует тепловой режим в течение 1—2 мин.

Дополнительная термостабилизация исследуемого фотодиода. Внешнего температурного контроля оказалось недостаточно, поскольку нельзя было точно контролировать температурные изменения на самом фотодиоде, что проявилось в нарушении повторяемости результатов при изменении на нем напряжения. Очевидно, это связано с тем, что на металлической пластине, охлаждаемой элементом Пельтье, фотодиод и термосопротивление разнесены пространственно. Максимальная разница между результатами измерений составила 0,18 мкА при уровне сигнала 465,25 мкА, т. е. 0,04 %.

Заметим также, что в результате протекания тока фотодиод является источником тепловыделения, и его температура должна отличаться от температуры охлаждающего элемента. Полностью избавиться от этого эффекта невозможно, можно только уменьшить влияние такого нагрева.

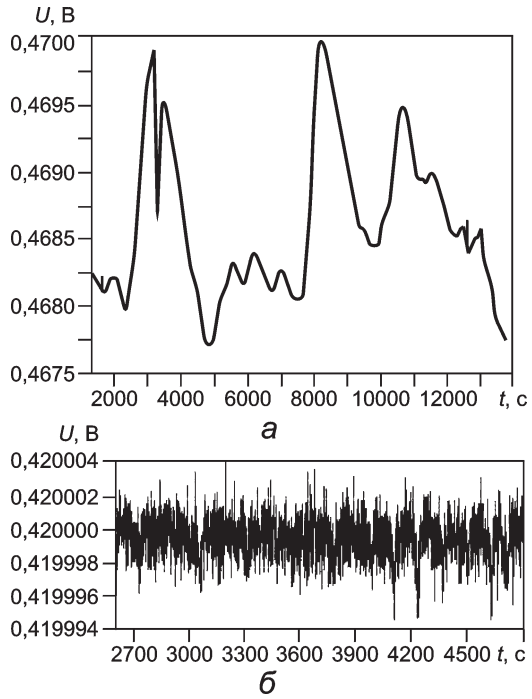

Рис. 2. Влияние температуры на измерение напряжения фотодиода:

а — без термостабилизации, амплитуда сигнала 2,5 мВ; *б* — с термостабилизацией, амплитуда сигнала 4 мкВ

В основу тонкой термостабилизации было положено условие постоянства температуры на границе подложка фотодиода — поверхность охлаждающего элемента. Это можно реализовать за счет большой разницы в постоянных времени установления температурного равновесия в фотодиоде (примерно 1 с) и охлаждающем элементе. Такой подход позволяет при необходимости программно учесть даже существенный нагрев полупроводника, поскольку известны граничные условия тепловой задачи.

Суть процедуры заключается в следующем. Для каждой ВАХ выбирали реперную точку с известными значениями силы тока и напряжения на фотодиоде. Обычно вблизи максимальных значений тока, чтобы его случайные флуктуации не сказывались на результате. Калибровку тока в реперной точке выполняли после установления температурного режима в течение 30 мин. Поскольку фотодиод является полупроводником, его можно использовать в качестве термодатчика. Отклонения силы тока от калиброванного значения характеризуют относительные отклонения температуры в системе фотодиод — термостат от равновесного калиброванного распределения.

После выбора реперной точки обратную связь между термосопротивлением и элементом Пельтье прерывали и управление температурным режимом осуществляли с использованием разности между измеренной силой тока на фотодиоде и его значением в реперной точке. Термосопротивление служило для измерения температуры только в момент измерения.

Таким образом, процедура измерений ВАХ представляла несколько последовательно сменяющих друг друга ста-

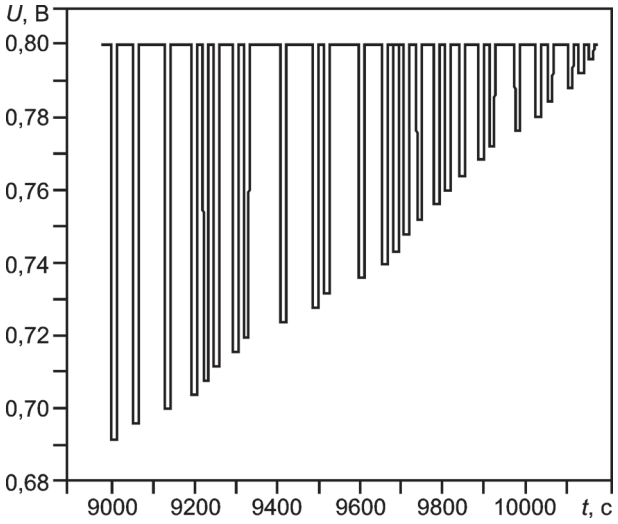

Рис. 3. Пример временной зависимости напряжения источника

дий. В течение первой стадии напряжение источника устанавливали по откалиброванному значению для выполнения тонкой термостабилизации. При достижении критерия тонкой термостабилизации, при котором значение измеряемой силы тока не должно отклоняться больше 5 нА относительно откалиброванного значения в течение последних 30 с, первая стадия заканчивается. На второй стадии устанавливается напряжение источника, необходимое для измерения следующей точки ВАХ, термостабилизация отключается и с использованием термосопротивления измеряется температура термостата. Через 10 с измерения прекращаются и вторая стадия заканчивается, после чего процесс повторяется. Вся описанная процедура выполнялась автоматически и контролировалась при помощи компьютера.

Экспериментально установлено, что при времени измерения 10 с температурный баланс на термостате не успевает нарушиться. Время коррекции температуры между измерениями определялось автоматически и составляло от 30 с до 2 мин. В то же время согласно оценкам в системе полупроводник—подложка характерное время установления нового температурного распределения $\tau << 10$ с, т. е. полученные данные соответствуют стационарному температурному распределению, установившемуся в фотодиоде при измеренных силе тока и падении напряжения и заданной температуре термостата.

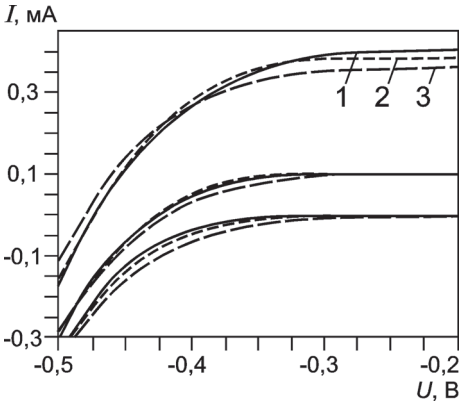

Рис. 4. Вольт-амперные характеристики:

1 — экспериментально измеренные; *2*, *3* — построенные по моделям PC1D и Шокли, соответственно

Следует отметить, что измерение силы тока на фотодиоде при постоянном напряжении более предпочтительно для измерения температуры, чем измерение напряжения на фотодиоде при постоянном токе, поскольку температурная зависимость силы тока нелинейная в отличие от аналогичной зависимости напряжения. Однако в рассматриваемом случае это не имеет значения, поскольку температуру корректировали относительно откалиброванного значения тока в реперной точке.

После включения тонкой термостабилизации амплитуда флуктуаций напряжения уменьшилась до 0,0013 % (см. рис. 2, *б*). Таким образом, термостабилизация фотодиода позволила увеличить точность измеряемого сигнала в 770 раз.

На рис. 3 приведен фрагмент изменения напряжения питания в процессе измерений. Увеличение промежутков между измерениями соответствует более длительному процессу тонкой термостабилизации на данных участках. Описанная процедура длилась 3 ч и выполнялась 2—3 раза для каждого фотодиода. Измеренные кривые накладывались друг на друга для подтверждения повторяемости результатов, после чего усреднялись и преобразовывались в одну для дальнейшей обработки.

Для каждого фотодиода снимались три кривые: под воздействием излучений мощностью $P_0 = 1{,}673 \pm 0{,}002$ мВт и $P_1 = P_0\eta$, где $\eta = 0{,}2482 \pm 0{,}0002$, а также в отсутствие излучения. При измерении темновых ВАХ влияние переходных процессов в области малых токов компенсировали увеличением времени измерения, которое определялось экспериментально. Угол падения излучения на фотодиод составлял 45°. Излучение имело S-поляризацию.

Объектом изучения был фотодиод Hamamatsu S6337 с рабочей площадкой 18×18 мм. Это обусловлено конечной целью исследований, которая заключается в независимой высокоточной калибровке трап-детоктора, состоящего из данных фотодиодов. Чтобы оценить корректность предложенной в [1, 2] процедуры определения внутренней квантовой эффективности фотодиода по его ВАХ, был использован фотодиод Hamamatsu S1337. Предполагали, что результат обработки его ВАХ можно будет сравнить с более ранними данными других авторов [7, 8]. Были также исследованы фотодиоды Hamamatsu S1336 и S3447, представляющие собой один и тот же фотодиод S1336 с различными площадками 6×6 и 2,4×2,4 мм, соответственно. Фотодиод S3447 имел собственную встроенную термостабилизацию, что существенно упростило процедуру измерений.

При определении внутренней квантовой эффективности фотодиода путем сравнения экспериментальных ВАХ с теоретическими [1, 2] находят, в частности, мощность поглощенного излучения. С целью независимого оценочного контроля этот параметр определяли экспериментально путем измерения коэффициента отражения для фотодиодов Hamamatsu S6337 и S1337. Измеряли коэффициент отражения в тех же условиях, что и ВАХ, при угле падения излучения 45°, соответствующем углу падения излучения на фотодиоды в трап-детекторе. При комнатной температуре коэффициент отражения фотодиода Hamamatsu S6337 составил (43,0 ± 0,3) %. Однако при включенной термостабилизации измеренные температура фотодиода и коэффициент отражения равнялись 9 °С и (39,9 ± 0,3) %. Коэффициент отражения фотодиода Hamamatsu S1337 в условиях термостабилизации составил (46,7 ± 0,3) %.

Обсуждение результатов. Для описания ВАХ фотодиодов в настоящее время широко используется модельное

уравнение Шокли (см., например, [9, 10]), которое можно представить в виде

$$I = I_F + I_s\left(1 - \exp\left(-V_D / V_T\right)\right), \qquad (1)$$

где $I_F = q\lambda eIQE/(ch)$ — фототок; q, λ — мощность и длина волны поглощенного излучения; e — заряд электрона, IQE — внутренняя квантовая эффективность; c — скорость света; h — постоянная Планка; I_s — ток насыщения; $V_T = nkT/e$ — «термическое» напряжение; n — коэффициент неидеальности; k — постоянная Больцмана; T — температура полупроводника; V_D — напряжение на фотодиоде.

В модели (1) неизвестны три параметра — I_F, I_s, V_T. Помимо них неизвестен еще параметр внешней цепи — сопротивление R контактов фотодиода. В этом случае модель фотодиода, участвующего в экспериментах, можно записать в виде системы двух уравнений:

$$\left.\begin{aligned} I &= I_F + I_s\left(1 - \exp\left(-V_D / V_T\right)\right); \\ V_D &= V - IR, \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где V — напряжение внешнего источника питания.

Решение системы (2) не выражается через элементарные функции.

Определение неизвестных параметров системы, в частности, IQE, заключается в аппроксимации методом наименьших квадратов трех экспериментально измеренных ВАХ одного фотодиода теоретическими кривыми $I(I_{F1}, I_s, V_T, R; V_D)$, $I(I_{F2}, I_s, V_T, R; V_D)$, $I(0, I_s, V_T, R; V_D)$, полученными из (2). Как упоминалось выше, две экспериментально измеренные ВАХ, которым соответствуют фототоки I_{F1} и I_{F2}, отличаются друг от друга только мощностью падающего излучения. Для третьей ВАХ падающее излучение отсутствовало. Таким образом, при решении обратной задачи имеем пять неизвестных параметров — I_{F1}, I_{F2}, I_s, V_T и R.

Задачу решали нелинейным методом Левенберга—Марквардта [11]. Найденное методом наименьших квадратов относительное СКО σ для фотодиодов Hamamatsu S1337 и S6337 составило 11,8 и 7,8 %, соответственно. Расчет выполняли по формуле

$$\sigma = \left[\int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left(I_{э1}(V) - I_{м1}(V)\right)^2 dV + \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left(I_{э2}(V) - I_{м2}(V)\right)^2 dV + \right.$$

$$\left. + \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left(I_{э3}(V) - I_{м3}(V)\right)^2 dV \right]^{1/2} \times$$

$$\times \left[\int_{V_{\min}}^{V_{\max}} I_{э1}^2(V)dV + \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} I_{э2}^2(V)dV \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} I_{э3}^2(V)dV\right]^{-1/2},$$

где $I_{э1}(V)$, $I_{э2}(V)$, $I_{э3}(V)$ и $I_{м1}(V)$, $I_{м2}(V)$, $I_{м3}(V)$ — экспериментально измеренные и модельные ВАХ; $V_{\min}$, $V_{\max}$ — границы диапазона измерения ВАХ.

Использование измеренного значения параметра η и уменьшение количества неизвестных параметров до четырех только увеличивает СКО. Аналогичная ситуация складывается и для фотодиода S6337. Результаты экспериментальных измерений для фотодиода Hamamatsu S1337 и их аппроксимации по формуле Шокли представлены на рис. 4. Для сравнения на том же рисунке приведены результаты расчетов ВАХ фотодиода S1337 по модели PC1D [7] с учетом параметров, характерных для данных фотодиодов [8], и измеренного значения η. При этом получены СКО 3,7 и 1,7 % для S1337 и S6337, соответственно. Сравнительный анализ показал, что для описания измеренных ВАХ предпочтительнее использовать модель, основанную на программе PC1D.

Заключение. По результатам проведенных исследований установлено, что наибольшее влияние на точность измерения ВАХ оказывает изменение температуры фотодиода. Включение самого фотодиода в качестве датчика температуры в систему термостабилизации позволяет значительно повысить точность таких измерений. Благодаря применению предложенной в настоящей работе методики термостабилизации погрешность измерения напряжения и тока на фотодиоде уменьшилась примерно в 10^3 раз и оказалась сопоставимой с погрешностями, допускаемыми в [2] для восстановления внутренних характеристик фотодиода. Показано, что полученные ВАХ наиболее точно описываются одномерной моделью (программа PC1D).

Литература

1. **Ковалев А. А. и др.** Определение внутренней квантовой эффективности фотодиода при помощи его вольт-амперных характеристик // Измерительная техника. 2011. № 2. С. 33—36; **Kovalev A. A. e. a.** Determination of the internal quantum efficiency of a photodiode by means of its current-voltage characteristic // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 2. P. 157—161.

2. **Ковалев А. А. и др.** Вычисление поглощенной фотодиодом мощности излучения по его экспериментальным вольт-амперным характеристикам // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 40—43; **Kovalev A. A. e. a.** Calculation of the radiation power absorbed by a photodiode from its experimental current-voltage characteristics // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 1. P. 57—62.

3. **Wei Gao.** Precision nanometrology: sensors and measuring systems for nanomanufacturing. N.Y.: Springer, 2010. P. 15—16.

4. **Porrovecchio G. e. a.** A transfer standard for the low power / few photon regime — the trap detector plus switched integrator amplifier.: 5th Single Photon Workshop. PTB, 2011.

5. **Гавриленко В. И. и др.** Оптические свойства полупроводников / Справочник. М: Наукова думка, 1987.

6. **King M.** Process control: a practical approach. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2010.

7. **Geist J., Baltes H.** High accuracy modeling of photodiode quantum efficiency // Appl. Opt. 1989. V. 28. N 18. P. 3929—3939.

8. **Geist J. e. a.** Numerical modeling of silicon photodiodes for high-accuracy applications. Pt 2. Interpreting oxide-bias experiments // J. Res. Inst. Stand. Technol. 1991. V. 96. N 4. P. 471—479.

9. **Забородин Ю. С.** Промышленная электроника. М.: Высшая школа, 1982.

10. **Бонч-Буревич В. Л., Калашников С. Г.** Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.

11. **Levenberg K. A.** Method for the Solution of Certain Non-Linear Squares // Quarterly of Appl. Math. 2. 1944. P. 164—168.

Дата принятия 16.07.2012 г.