

УДК 621.383.4

Методы измерения вольт-амперных характеристик фотодиодов в многорядном ИК-фотоприемнике

Д. Л. Балиев, К. О. Болтарь

Исследованы методы измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) фотодиодов в многорядном фотоприемнике формата 6×576 на основе КРТ длинноволнового диапазона спектра. ВАХ строится по результатам измерений выходных сигналов большой интегральной схемы (БИС) считывания, гибридизированной с линейкой ИК-фотодиодов. Проведено сравнение метода независимого измерения тока в каждой точке ВАХ и метода аддитивного измерения тока. Предложен метод определения оптимальных рабочих точек фотодиодов путем построения и анализа зависимости дифференциального сопротивления фотодиода от напряжения смещения. Рассмотрены распределения токов фотодиодов для образца МФПУ формата 6×576 на основе КРТ-фотодиодов с подложкой р-типа проводимости с граничной длиной волны $\lambda_{0,5} = 10,5$ мкм.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz

Ключевые слова: ИК-фотоприемник, фотодиод, КРТ, ВАХ.

Введение

Результаты измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) ИК-фотодиодов позволяют получить основную информацию об их качестве [1]. Традиционные методы контроля качества фотодиодов состоят в выборочных измерениях ВАХ отдельных фотодиодов на пластине при охлаждении жидким азотом и измерениях ВАХ тестовых элементов при рабочих температурах в криостатах (для материала КРТ — 80 К). Большой интерес представляет распределение ВАХ в многорядных и матричных структурах при рабочих температурах, что даст информацию об однородности получаемых структур, позволит глубже понять природу дефектных фотодиодов и вычислить соотношение токов различной природы [2—9]. Эта информация может быть использована для улучшения процессов создания структур ИК-фотодиодов.

Цель данной работы состоит в исследовании методов измерения ВАХ фотодиодов многорядных ИК-фотоприемников по результатам измерений выходных сигналов большой интегральной схемы (БИС) считывания, гибридизированной с линейкой ИК-фотодиодов, получение распределения ВАХ в образце МФПУ формата 6×576 на основе твердых растворов КРТ, разброса токов вблизи рабочей точки фотодиодов вдоль образца и разброс рабочих точек фотодиодов.

Методика измерения ВАХ с использованием БИС считывания

Для осуществления поставленной задачи разработана система автоматизированного измерения ВАХ в многорядных структурах КРТ формата 6×576, стыкованных с БИС считывания сигналов. Поскольку для измерения используется БИС считывания, мы ограничены лишь обратной ветвью ВАХ. Однако последняя и представляет ключевой интерес для ИК-фотодиода. Кроме того, БИС считывания не позволяет напрямую измерять ток фотодиодов — на выходе мы получаем лишь данные о напряжении на накопительной емкости. Для получения тока необходимо измерить это напряжение при двух различных временах накопления и вычислить ток фотодиода по формуле:

Балиев Дмитрий Леонидович, инженер НТК¹, аспирант².
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².
¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт.
Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.

© Балиев Д. Л., Болтарь К. О., 2016

$$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{C\Delta U}{\Delta t} \quad (1)$$

где I — полный ток фотодиода, Δt — разница времен накопления, C — размер накопительной емкости, ΔU — разница выходного напряжения при разных временах накопления.

Постоянство потока ИК-излучения поддерживается с помощью протяженного АЧТ с температурой 300 К.

Для измерения ВАХ было исследовано два метода.

1) *Метод независимого измерения тока.*

При каждом напряжении смещения V измеряются напряжения сигнала U_1 и U_2 при двух временах накопления t_1 и t_2 ($t_2 > t_1$), затем ток вычисляется по формуле (1), где $\Delta t = t_2 - t_1$, $\Delta U = U_2 - U_1$;

2) *Метод аддитивного измерения тока.*

При каждом напряжении смещения V измеряется напряжение сигнала U при времени накопления t , а вблизи рабочей точки $V_{\text{раб}}$ снимаются

напряжения сигнала U_1 и U_2 при двух временах накопления t_1 и t_2 ($t_2 = t$).

По формуле (1) рассчитывается ток $I_{\text{раб}}$ при напряжении смещения $V_{\text{раб}}$, где $\Delta t = t_2 - t_1$, $\Delta U = U_2 - U_1$. Далее для каждого значения напряжения смещения V ток рассчитывается аддитивно к $I_{\text{раб}}$, т. е. по следующей формуле:

$$I(V) = I_{\text{раб}} + \frac{CU}{t} - \frac{CU_2}{t}.$$

Первый метод позволяет независимо вычислить значение тока в каждой точке ВАХ. Вторым методом позволяет работать при одном времени интегрирования БИС считывания, благодаря чему гладкость кривой ВАХ в $\sqrt{2}$ раз лучше, чем в первом методе, при случайной погрешности измерения выходного напряжения, или до 2 раз лучше при влиянии наводок на выходное напряжение. Примеры характеристик, полученных методами независимого и аддитивного измерения тока, приведены на рис. 1.

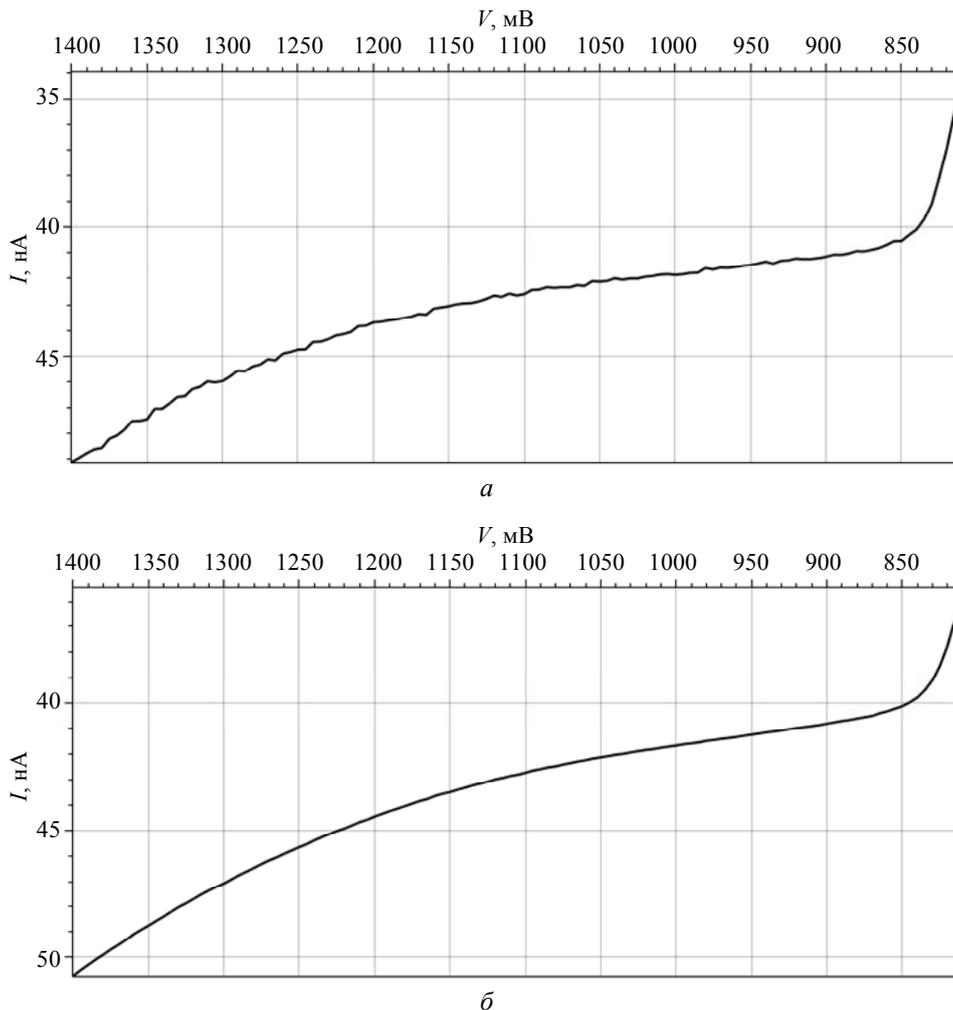


Рис. 1. Сравнение двух методик снятия ВАХ: а — метод независимого измерения тока; б — метод аддитивного измерения тока. По вертикали — ток фотодиода I , по горизонтали — напряжение смещения V .

Проведенные измерения

Для исследования распределения ВАХ был выбран образец МФПУ формата 6×576 на основе КРТ-фотодиодов с подложкой *p*-типа проводимости, изготовленных методом молекулярно-лучевой эпитаксии с граничной длиной волны $\lambda_{0,5} = 10,5$ мкм. Шаг между фотодиодами 42×56 мкм. Размер области *p-n*-перехода 16×16 мкм. Размер фоточувствительной площадки 25 ± 5 мкм. Относительное отверстие «холодной» диафрагмы составляло 1:1,5.

Сразу отметим особенность топологии МФПУ — она разделена на 4 субматрицы формата 6×144, расположенные в шахматном порядке, что обеспечивает шаг 14 мкм в направлении, перпендикулярном сканированию. В БИС считывания реализован режим ВЗН по 6 элементам (576 ВЗН-каналов). В рамках данного исследования использовался режим «bypass», позволяющий измерять сигналы с отдельных фотодиодов без ВЗН-суммирования.

Измерения проводились при следующих условиях:

температура криостатирования 80 К (заливной криостат с жидким азотом);

времена накопления $t_1 = 10$ мкс и $t_2 = 12$ мкс;

диапазон напряжений смещения (без учета порогов транзисторов) 810÷1400 мВ;

шаг изменения напряжения смещения 5 мВ.

В интересах повышения точности измерений для каждой точки было снято 512 выборок, после чего было проведено их усреднение.

Результаты исследования

Было получено распределение токов фотодиодов вдоль каждой субматрицы. Одно из таких распределений при напряжении смещения вблизи рабочей точки, определяемой по максимуму дифференциального сопротивления, приведено на рис. 2.

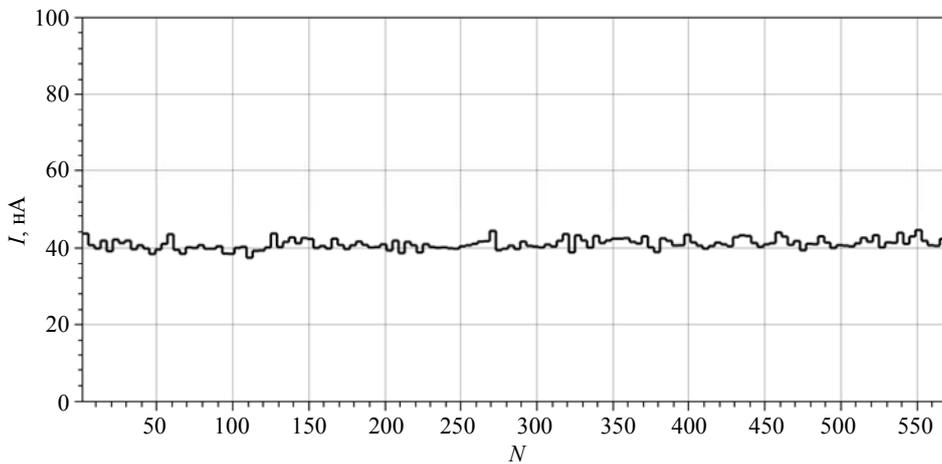


Рис. 2. Распределение тока фотодиодов вдоль субматрицы. По вертикали — ток фотодиода I , по горизонтали — номер канала N .

Полученное распределение показывает высокую равномерность токов вдоль субматрицы. Гистограмма распределения токов представлена на рис. 3. Разброс токов по уровню 0,5 составил 2,9 %.

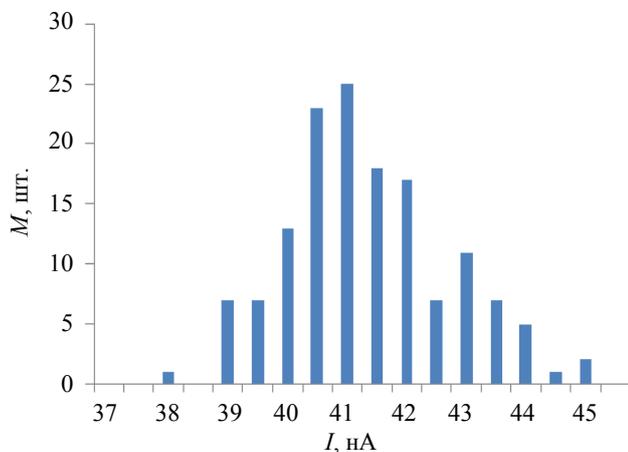


Рис. 3. Гистограмма распределения тока вдоль субматрицы. По вертикали — количество фотодиодов M с заданным током, по горизонтали — ток фотодиода I .

Распределение токов для поперечного направления вдоль ВЗН-каналов представляет особый интерес для крайних элементов каналов. На рис. 4 представлено распределение токов вблизи рабочей точки для 4 ВЗН-каналов, топологически расположенных подряд со сдвигом в шахматном порядке.

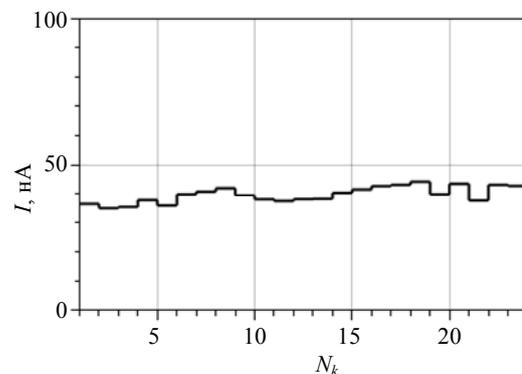


Рис. 4. Распределение тока вблизи рабочей точки вдоль направления ВЗН-каналов. По вертикали — ток фотодиода I , по горизонтали — номер фотодиода N_k .

Ток для крайних фотодиодов (1, 6, 7, 12, 13, 18, 19, 24) не отличается существенно от среднего, что свидетельствует об отсутствии перекрытия областей сбора фотогенерированных носителей в линейке фотодиодов.

Для определения рабочей точки представляет интерес изучение зависимости дифференциального сопротивления фотодиода от напряжения смещения. Для построения этой зависимости в каждой точке ВАХ бралось отношение dU/dI . Полученная кривая сглаживалась медианным фильтром. Пример характерной зависимости для одного из фотодиодов представлен на рис. 5. Высокое значение дифференциального сопротивления (более 100 МОм) в максимуме свидетельствует о высоком качестве изготовления ИК-фотодиодов. Существенное уменьшение дифференциального сопротивления при увеличении напряжения смещения свидетельствует о существенном вкладе в темновой ток фотодиодов туннельных механизмов протекания тока.

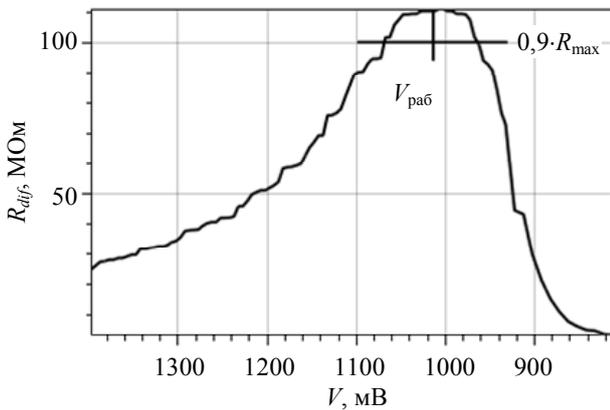


Рис. 5. Дифференциальное сопротивление элемента R_{diff} от напряжения смещения V .

Для каждого фотодиода была определена рабочая точка $V_{раб}$ путем нахождения максимума дифференциального сопротивления. Для нахождения максимума применялась следующая методика: бралось максимальное значение дифференциального сопротивления R_{max} на кривой, после чего выбиралась область, где $R > R_{max} \cdot 0,9$. В качестве рабочей точки выбиралось среднее значение напряжения смещения в этой области. Полученная гистограмма распределения рабочих точек представлено на рис. 6.

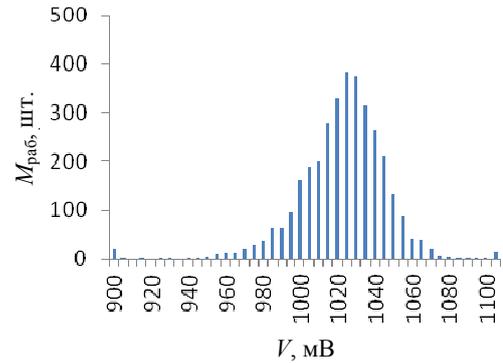


Рис. 6. Гистограмма распределения рабочих точек фотодиодов. По вертикали — количество фотодиодов $M_{раб}$ с заданной рабочей точкой, по горизонтали — напряжение смещения V .

Разброс оптимальных рабочих точек фотодиодов по уровню 0,5 составил порядка 20 мВ. Определение оптимальной рабочей точки для устройства в целом в рамках данной работы не исследовалось.

Заключение

Разработана методика измерения ВАХ с использованием БИС считывания для всех фотодиодов МФПУ формата 6×576 на основе КРТ длинноволнового диапазона спектра. Проведено сравнение двух возможных методов измерения значения тока, из них выбран метод аддитивного измерения тока, показавший лучшую линейность получаемой характеристики.

Разработана методика определения оптимальной рабочей точки для каждого фотодиода путем анализа зависимости дифференциального сопротивления от напряжения смещения. Характерное значение дифференциального сопротивления в рабочей точке превышает 100 МОм.

Проведено исследование образца МФПУ формата 6×576 на основе КРТ. Получены распределения токов вблизи рабочей точки фотодиодов вдоль субматриц и в направлении ВЗН-каналов. Они показали высокую равномерность вдоль субматрицы (отклонение от среднего $\sim 2,9\%$) и отсутствие существенных отличий токов в крайних элементах ВЗН каналов от среднего значения. Определены оптимальные рабочие точки фотодиодов. Их разброс составил порядка 20 мВ.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-2787.2014.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
2. Филиппов С. Н., Болтарь К. О. // Труды МФТИ. 2010. Т. 2. № 1. С. 52—66.
3. Косяченко Л. А., Марков А. В., Остапов С. Э., Раренко И. М. // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 11. С. 1326.
4. Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2004. № 3. С. 82.
5. Rosbeck J. P., Starr R. E., Price S. L., Riley K. J. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. No. 9. P. 6430.
6. Болтарь К. О., Соляков В. Н., Петров И. Н., Стафеев В. И., Бовина Л. А., Сагинов Л. Д. К / Материалы 8-го Всесоюзного симпозиума «Полупроводники с узкой запрещённой зоной и полуметаллы». 1991. Т. 2. С. 17.
7. Nemirovsky Y., Rosenfeld D., Adar R., Kornfeld A. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1989. Vol. 7. No. 2. P. 528.
8. Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Акимов В. М., Климанов Е. А., Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Мансветов Н. Г., Пономаренко В. П., Тимофеев А. А., Филачев А. М. // ФТП. 2005. Т. 39. Вып. 10. С. 1257.
9. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.

Methods for measuring current–voltage characteristics of photodiodes in scanning type focal plane arrays

D. L. Baliev^{1,2} and K. O. Boltar^{1,2}

¹Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received February 24, 2016

Methods for measuring current-voltage (I-V) characteristics of photodiodes in 6×576 LWIR FPA's are investigated. I-V characteristic are obtained by performing calculations from the output signal measurements of ROIC. Two methods of ROIC signal analysis are compared. Based on differential resistance analysis, a method for determining the optimal bias voltage is proposed. Current distribution is investigated for a 6×576 LWIR FPA with long wave cut off at $\lambda_{0.5} = 10.5 \mu\text{m}$.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz

Keywords: IR detector, photodiode, MCT, I-V curve.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. S. N. Fillipov and K. O. Boltar, *Trudy MFTI* **2** No. (1), pp. 52-66 (2010).
3. L. A. Kosyachenko, A. V. Markov, S. E. Ostapov, and I. M. Rarenko, *Semiconductors* **35**, 1326 (2001).
4. K. O. Boltar and N. I. Yakovleva, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 82 (2004).
5. J. P. Rosbeck, R. E. Starr, S. L. Price, and K. J. Riley, *J. Appl. Phys.* **53**, 6430 (1982).
6. K. O. Boltar, V. N. Solyakov, I. N. Petrov, V. I. Stafeyev, L. A. Bovina, and L. D. Saginov, in *Proc. 8-th All-Rus. Simp. «Semiconductors with Narrow Forbidden Band and Semimetals»*. Vol. 2, (Russia, 1991). P. 17.
7. Y. Nemirovsky, D. Rosenfeld, R. Adar, and A. Kornfeld, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **7**, 528 (1989).
8. V. I. Stafeyev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. M. Akimov, E. A. Klimanov, L. D. Saginov, V. N. Solyakov, N. G. Mansvetov, V. P. Ponomarenko, A. A. Timofeev, and A. M. Filachev, *Semiconductors* **39**, 1257 (2005).
9. A. Rogalski, *Infrared Detectors* (Nauka, Novosibirsk, 2003) [in Russian].