

07.3

Пространственно-временные процессы в позиционно-чувствительном детекторе с подвижной вольт-амперной характеристикой

© Б.Г. Подласкин, Е.Г. Гук, А.Г. Оболенсков, А.А. Сухарев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bgr.holo@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 20 апреля 2022 г.

Принято к публикации 5 мая 2022 г.

Рассмотрены особенности переходных процессов при формировании сигнала в позиционно-чувствительных датчиках с подвижной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Исследована зависимость линейного и экспоненциального участков траектории движения ВАХ от величины напряжения, распределенного на резистивном делителе. Показано, что оптимизация режимов работы исследованных датчиков с целью получения максимального быстродействия и сохранения заданной разрешающей способности датчика требует соблюдения баланса между минимальной величиной приложенного напряжения и крутизной ВАХ в области апертуры.

Ключевые слова: позиционно-чувствительный датчик, подвижная вольт-амперная характеристика, быстродействие.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.13.52736.19226

Известно, что среди позиционно-чувствительных детекторов (ПЧД) с различным принципом действия [1–3] наиболее высокая разрешающая способность реализуется в ПЧД с подвижной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) [4]. Способ формирования сигнала в этих приборах принципиально отличается от способа формирования сигнала в латеральных и сегментных ПЧД. Выходной сигнал датчика, соответствующий положению медианы оптического сигнала в ПЧД с подвижной ВАХ, формируется в виде потенциала, накопленного в процессе заряда фототоком суммарной емкости p – n -переходов детектора.

Структура ПЧД с подвижной ВАХ и принцип его действия подробно описаны в ряде работ [4,5]. Однако вне внимания остаются динамические процессы установления напряжения на выходе прибора, их зависимости от величины оптического сигнала и от величины напряжения, приложенного к резистивному делителю. В настоящей работе рассматривается влияние этих факторов на скорость установления выходного сигнала в зависимости от величины напряжения, приложенного к резистивному слою прибора.

Основой датчика с подвижной ВАХ является матрица встречно включенных фотодиодов, подключенных одним концом к резистивному делителю, а другим — к низкоомной сигнальной шине. В результате ВАХ прибора описывается функцией гиперболического тангенса с положительной и отрицательной ветвями, разделенными точкой перегиба u_0 , которая соответствует нулевому значению фототока, протекающего через прибор. Пары встречно включенных p – n -переходов, подключенных к резистивному делителю, находятся под воздействием

напряжения E , линейно распределенного вдоль рабочей области датчика (от 0 до $+E$). Это напряжение связано с пространственной системой координат прибора взаимно однозначным соответствием между пространственным положением каждой точки вдоль фоточувствительной области датчика и соответствующей ей величиной линейно распределенного напряжения:

$$x = \frac{uL}{E}, \quad (1)$$

где x — линейная координата прибора, u — напряжение, распределенное вдоль резистивного делителя напряжения, L — длина рабочей области детектора, E — величина напряжения, приложенного к резистивному делителю.

При попадании на датчик оптического сигнала генерируется фототок, направление которого определяется тем, в какой (положительной или отрицательной) области напряжения, распределенной вдоль датчика ВАХ, находится световое пятно. Под воздействием фототока на суммарной емкости фотодиодов накапливается напряжение, которое изменяет потенциал сигнальной шины прибора. Суммируясь с пространственно распределенным напряжением резистивного делителя, потенциал сигнальной шины вызывает изменение пространственного положения точки перегиба ВАХ u_0 . Этот процесс продолжается до тех пор, пока точка перегиба ВАХ не совместится с положением медианы светового сигнала $u_0(M)$, значение суммарного фототока при этом становится равным нулю, и процесс изменения пространственного положения на поверхности детектора точки перегиба ВАХ прекращается. Таким образом,

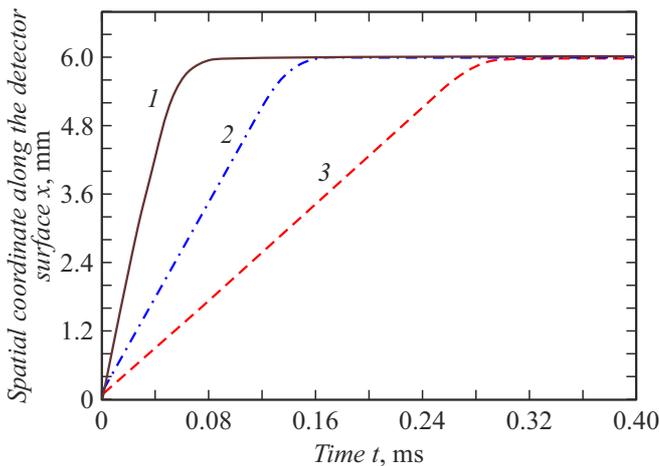


Рис. 1. Расчетные траектории $x(t)$ движения точки перегиба ВАХ при значениях приложенного напряжения $E = 2$ (1), 5 (2) и 10 В (3).

сформированное на емкости напряжение соответствует положению медианы оптического сигнала в масштабе напряжения, приложенного к резистивному делителю.

Дифференциальное уравнение, описывающее движение точки перегиба ВАХ от начального положения в точке $u_0(0)$ до значения, равного координате медианы оптического сигнала, имеет вид

$$u_0(t) = \frac{1}{C} \int_0^E f(u) \operatorname{th} \frac{u - u'_0(t)}{A_u} du, \quad (2)$$

где $f(u)$ — оптический сигнал с координатой положения его медианы в точке $u(M)$, спроецированный на фоточувствительную область прибора. Аргументом $f(u)$ является напряжение, распределенное вдоль резистивного слоя, $A_u = 0.26$ В — ширина аперттуры ВАХ, константа, определенная шириной переходной зоны ВАХ встречно включенных p – n -переходов. В пространство X ширина аперттуры пересчитывается через отношение длины прибора L к величине приложенного напряжения E как $x = uL/E$.

Решения уравнения (2), соответствующие движению точки перегиба ВАХ от начального положения в точке $x(0)$ до значения, равного координате медианы оптического сигнала x_M , при различной величине приложенного напряжения E , переведенные в пространство X , приведены на рис. 1.

Результатом решения в пространстве координат X является траектория движения во времени точки перегиба ВАХ u_0 от ее начального положения в точке $x_0 = 0$ до точки $x_0 = X_M$, соответствующей положению медианы сигнала. Видно, что на большей части траектории движение ВАХ носит линейный характер, что объясняется постоянством фототока в зоне обратного смещения фотодиодов. Крутизна траектории движения ВАХ определяется величиной фототока и, как видно из рис. 1,

не зависит от напряжения E . Независимость величины фототока от напряжения в процессе движения ВАХ вдоль оси x прибора значительно ускоряет процесс установления координаты сигнала по сравнению с обычными экспоненциальными процессами заряда емкости. Также видно, что при фиксированной мощности оптического сигнала угол, под которым происходит движение ВАХ вдоль фоточувствительной области ПЧД, тем больше, чем ниже значение напряжения E , приложенного к резистивному делителю. Кроме того, видно, что вблизи медианы сигнала образуется экспоненциальный участок движения аперттуры, который связан с попаданием оптического сигнала в зону перегиба ВАХ.

Из рис. 1 следует, что чем меньше приложенное к датчику распределенное напряжение, тем выше скорость установления координаты. Это объясняется тем, что величина приложенного напряжения является в нашем случае эквивалентом расстояния, на которое должна сместиться точка перегиба ВАХ.

При этом величина экспоненциальной части процесса (область нелинейности) слабо зависит от величины приложенного напряжения, что свидетельствует о том, что разрешающая способность прибора при уменьшении напряжения практически не изменяется. Этот вывод подтверждается поведением производных d^2x/dt^2 , приведенных на рис. 2 и описывающих форму переходных процессов вблизи медианы оптического сигнала.

Из рис. 2 можно сделать вывод, что уменьшение напряжения E , приложенного к резистивному делителю датчика, существенно повышает скорость установления координатного отсчета, несущественно влияя при этом на длительность и величину нелинейных процессов в области аперттуры ВАХ. Из этого следует, что снижение напряжения E не влияет на разрешающую способность ПЧД. Подробный анализ взаимосвязи величины E , мощности сигнала и ширины аперттуры A_u должен стать предметом дополнительного исследования.

Проведенный анализ подтверждается представленными на рис. 3 осциллограммами, иллюстрирующими переходные процессы установления медианы оптиче-

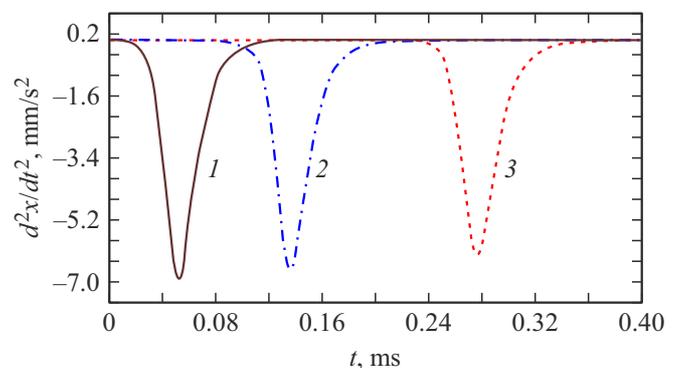


Рис. 2. Величина нелинейных участков траекторий движения ВАХ при значениях приложенного напряжения $E = 2$ (1), 5 (2) и 10 В (3).

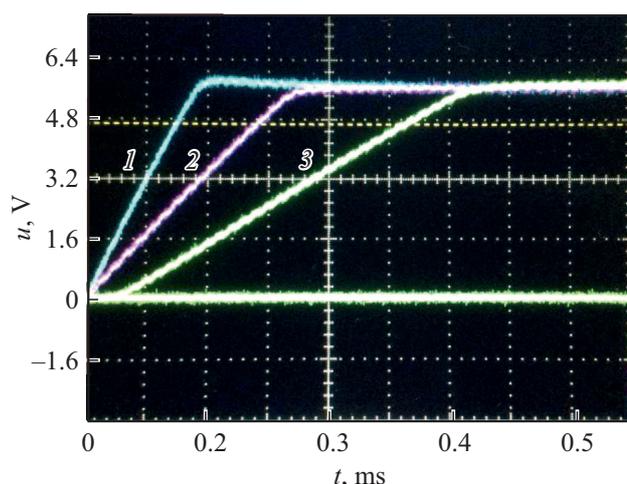


Рис. 3. Экспериментальные траектории движения точки перегиба ВАХ при значениях приложенного напряжения $E = 2$ (1), 5 (2) и 10 V (3).

ского сигнала при перемещении этого сигнала вдоль поверхности ПЧД из точки $x_1 = 0$ в точку $x_2 = 6$ mm в пределах его длины L . В соответствии с произведенными расчетами эксперимент проводился на ПЧД „Мульти-скан“ длиной 10 mm при трех значениях приложенного напряжения: $E = 2, 5$ и 10 V. Для нормировки результата установления координатного отсчета осциллограммы сняты при различных коэффициентах усиления k для различных E : $k = 1.75$ div/V для $E = 2$ V, $k = 0.7$ div/V для $E = 5$ V и $k = 0.35$ div/V для $E = 10$ V.

Таким образом, получены экспериментальные траектории $u(t)$ движения точки перегиба ВАХ от начального положения в точке $u_0(0)$ до значения, равного координате медианы оптического сигнала $u(M)$, соответствующего точке X_M в пространстве координат.

Следует отметить, что до проведения исследования переходных процессов в ПЧД с подвижной ВАХ основная парадигма заключалась в стремлении работать с большими величинами приложенного к датчику напряжения. Это представление базировалось на увеличении крутизны ВАХ в переходной области с ростом приложенного к датчику напряжения, что обеспечивало повышение разрешающей способности. Однако проведенный в работе анализ показал, что скорость формирования координатного отсчета тем выше, чем меньше величина приложенного напряжения. Таким образом, показано, что оптимизация режимов работы исследованных ПЧД с целью получения максимального быстродействия и сохранения заданной разрешающей способности датчика требует соблюдения баланса между минимальной величиной приложенного напряжения и крутизной ВАХ в области апертуры.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Andersson, *Position sensitive detectors: device technology and applications in spectroscopy*, Ph.D. thesis (Mid Sweden University, 2008).
- [2] D. Fontani, P. Sansoni, F. Francini, D. Jafrancesco, L. Mercatelli, E. Sani, *Int. J. Photoenergy*, **2011**, 806518 (2011). DOI: 10.1155/2011/806518
- [3] M. Norgia, A. Magnani, A. Pesatory, *Rev. Sci. Instrum.*, **83** (4), 045113 (2012). DOI: 10.1063/1.3703311
- [4] B.G. Podlaskin, E.G. Guk, A.G. Obolenskov, A.A. Sukharev, *JINST*, **13** (8), P08005 (2018). DOI: 10.1088/1748-0221/13/08/P08005
- [5] E. Guk, B. Podlaskin, in *IEEE SENSORS Proc.* (IEEE, 2011), p. 436. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6126910