

Подавление влияния мощной фоновой засветки на точность координатуказания оптического сигнала

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: bgp.holo@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 11 февраля 2015 г.)

Проведено экспериментальное исследование влияния интенсивной фоновой засветки на крутизну вольт-амперной характеристики и точность определения положения слабого модулированного оптического сигнала для позиционно-чувствительного датчика Мультискан. Проведены оценки снижения влияния неравномерной фоновой засветки на точность координатуказания сигнала при применении метода двухапертурного синтеза.

Прецизионное измерение положения слабого модулированного оптического сигнала в условиях интенсивного солнечного излучения или других источников фоновых засветок является актуальной задачей. Большинство современных методов определения координаты сигнала базируется на использовании латеральных позиционно-чувствительных датчиков [1]. Определение положения оптического сигнала в позиционно-чувствительных датчиках латерального типа производится с помощью сравнения фототоков, снимаемых с контактов, расположенных на противоположных концах их фоточувствительного поля. При положении оптического сигнала вдали от центра светочувствительного поля датчика отношение величин измеряемых фототоков может превышать три порядка, что приводит к недопустимо большому влиянию шума большего из двух токов на точность измерения координаты сигнала [2,3]. Стандартное отклонение измерения положения координаты σ , возникающее вследствие шума для латеральных диодов, описывается выражением

$$\sigma \approx \frac{L\sqrt{4kTB_N/R}}{P_S S}, \quad (1)$$

где L — расстояние между контактами позиционно-чувствительного датчика, P_S — среднее квадратичное значение мощности сигнала, S — чувствительность, B_N — эквивалентная ширина полосы шума, R — межэлектродное сопротивление.

Для реализации хорошей однородности сопротивления, которая необходима для обеспечения необходимой линейности координатной характеристики, требуется достаточно низкая величина слоевого сопротивления (порядка $10 \text{ k}\Omega/\square$). В результате шумы латеральных позиционно-чувствительных датчиков достаточно велики, и в случае хорошей линейности практически невозможно минимизировать шум за счет оптимизации межэлектродного сопротивления, несмотря на то, что ширина полосы может удовлетворять этим требованиям [2].

В результате для латеральных позиционно-чувствительных датчиков известных фирм, таких как Hamamtsu, UDT Sensors Inc., OSI Optoelectronics и др., точность определения координаты сигнала составляет 10^{-3}

от поля зрения фоточувствительной области датчика. В случае длинных позиционно-чувствительных сенсоров ($\geq 10 \text{ mm}$) ошибка координатуказания десятков микрон.

Присутствие мощной посторонней засветки приводит к появлению дополнительной ошибки, обусловленной шумом фототока фоновой засветки, что значительно снижает точность координатуказания, особенно на краях измеряемого диапазона, где происходит сравнение разновеликих фототоков.

В разработанном нами позиционно-чувствительном датчике Мультискан определение положения оптического сигнала основано на принципиально ином подходе. Наличие в детекторе Мультискан подвижной вольт-амперной характеристики с положительной и отрицательной ветвями, разделенными точкой перегиба, обуславливает при воздействии светового сигнала формирование положительного и отрицательного фототоков. Положение точки перегиба вольт-амперной характеристики (ВАХ) управляется с помощью напряжения обратной связи U_{fb} .

Таким образом, в отличие от латеральных позиционно-чувствительных датчиков в Мультискане координаты каждого отсчета формируются как результат баланса интегральных значений положительного и отрицательного фототоков [4]. При этом координата медианы X_0 оптического сигнала определяется в масштабе напряжения, приложенного к датчику, и измеряется как величина потенциала обратной связи U_{fb} , при которой суммарное значение фототока на выходе датчика равно нулю. Такой подход позволяет перейти от традиционного вычисления координат сигнала в виде соотношения малых фототоков (порядка 10^{-6} A и меньше) к измерению выходного потенциала, шкала которого соответствует макроразмерам приложенного напряжения ($5-10 \text{ V}$). В результате точность определения координаты сигнала достигает 10^{-5} от поля зрения прибора.

В случае датчика с подвижной ВАХ, в котором производится сравнение равных по величине фототоков, влияние шумовой составляющей фототока фоновой засветки становится практически несущественным.

Помимо снижения точности измерения за счет влияния шумовой составляющей фототока посторонней засветки дополнительное искажение результата происходит в случае неравномерной фоновой засветки за счет ее влияния на крутизну ВАХ. Этот эффект в большей или меньшей степени проявляется для любых позиционно-чувствительных датчиков независимо от их принципа действия и особенно заметен при использовании щелевой оптики. В последнем случае возникает неравномерное „наполнение“ фона на оптический сигнал, вследствие чего различные участки фоточувствительного поля сенсора приобретают различное значение чувствительности.

Расчеты показывают, что в случае Мультискана для того, чтобы ошибка в определении координаты достигала $10\ \mu\text{m}$, достаточно, чтобы нелинейность люкс-амперной характеристики при воздействии фоновой засветки достигала 2%. Для латеральных датчиков, в которых производится сравнение неравных по величине фототоков, эта ошибка может быть существенно больше.

Этой проблеме посвящен ряд работ, где приведены результаты исследования линейности люкс-амперной характеристики различных фотодиодов и позиционно-чувствительных датчиков (в основном на примере приборов фирмы Hamamatsu) [5–7]. Показано, что при небольшой мощности падающего на прибор света (для значения фототоков до $10^{-6}\ \text{A}$) фотодиоды высокого качества демонстрируют строгую линейность этой характеристики. При средних уровнях освещенности (10^{-5} – $10^{-4}\ \text{A}$) появляется отклонение от линейности в сторону увеличения чувствительности, обусловленное наличием в кремнии рекомбинационных уровней, играющих роль ловушек (центров захвата свободных носителей тока), которые при повышении мощности освещения вносят дополнительный вклад в формирование фототока за счет процессов перезарядки ловушек. При высоких уровнях мощности освещения зависимость чувствительности от мощности отклоняется от линейности в противоположную сторону за счет действия процессов насыщения (рис. 1). Обычно это отклонение от линейности для кремниевых фотодиодов высокого качества начинается при значении фототока $\geq 10^{-4}\ \text{A}$, а выше $300\ \mu\text{A}$ нелинейность быстро нарастает, достигая для фотодиодов малой площади 2% [8,9].

Исследования нелинейности люкс-амперной характеристики, проведенные в компании „Remote sensing Flight Systems Branch“ для случая модулированного оптического сигнала [9], показали, что начиная с $20\ \mu\text{W}$ нелинейность люкс-амперной характеристики превышает величину 1%. Такая величина нелинейности может оказывать существенное влияние на точность определения положения медианы светового сигнала в случае неравномерного освещения зоны детектируемого сигнала для любого позиционно-чувствительного датчика. При этом предполагалось, что фотодиоды в составе позиционно-чувствительного датчика находятся под значительным

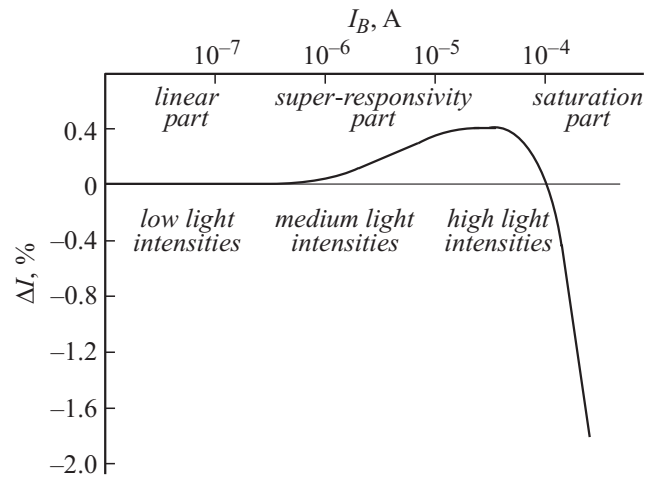


Рис. 1. Зависимость отклонения линейности фототока от мощности фоновой засветки.

потенциалом смещения (5–10 V). В случае малых потенциалов нелинейность люкс-амперной характеристики еще больше возрастает.

Особенностью Мультискана является формирование фототоков в области перегиба ВАХ, т.е. при малых напряжениях на p – n -переходах. Это обстоятельство снижает эффективность преобразования и одновременно усиливает влияние неравномерных фоновых засветок.

В связи с этим в настоящей работе было проведено экспериментальное исследование влияния фоновой засветки на крутизну ВАХ для позиционно-чувствительного датчика Мультискан, выполненного по технологии КСДИ на кремнии n -типа с номиналом $7\ \Omega \cdot \text{cm}$ и диффузионной длиной $L_d \leq 100\ \mu\text{m}$, при значении напряжения, приложенного к p – n -переходам от 0.5 до 10 V. Проведены оценки снижения влияния интенсивной фоновой засветки на точность координатуказания.

Как следует из результатов исследований, приведенных на рис. 2, наличие неравномерного фона различной мощности оказывает заметное влияние на крутизну ВАХ. На рис. 2 показана зависимость изменения фототока сигнала от величины фототока фоновой засветки при различных напряжениях смещения, приложенных к датчику. Видно, что с увеличением напряжения величина приращения сигнального фототока снижается, что подтверждает целесообразность приближения рабочей точки преобразования оптического сигнала в фототок к области насыщения ВАХ.

Для такого смещения рабочей точки и симметризации искажений фототоков, возникающих за счет воздействия фоновой засветки, нами предложен метод двухапертурного синтеза [10].

Для реализации этого принципа позиционно-чувствительный датчик Мультискан формируется в виде двух взаимосвязанных фотодиодных структур Z и V , объединенных общей сигнальной шиной и имеющих инди-

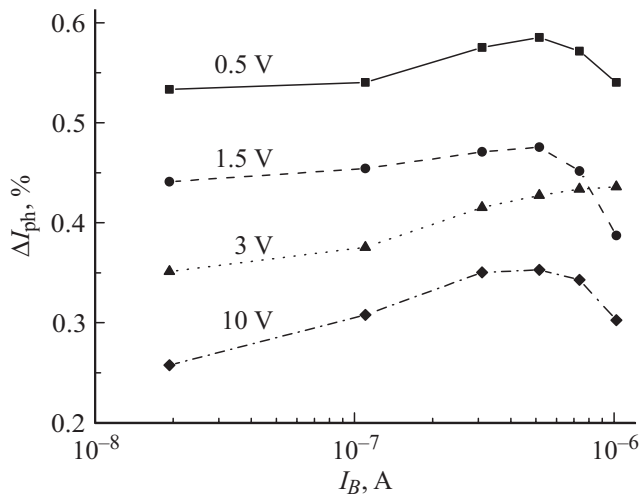


Рис. 2. Зависимость изменения фототока сигнала от интенсивности фоновой засветки при различных напряжениях смещения (0,5, 1,5, 3, 10 В), приложенных к Мультискану.

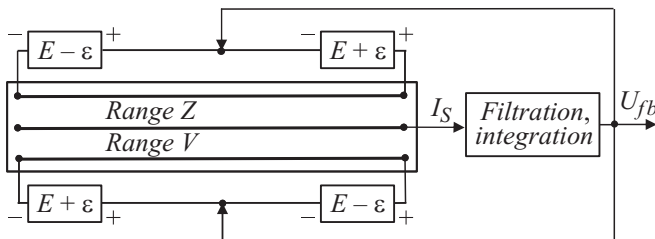


Рис. 3. Структурная схема управления двухапертурного сенсора.

видуальные распределенные делители напряжения. Такая полупроводниковая структура обладает свойством независимого формирования сигнальных фототоков I_Z и I_V в каждой из фотодиодных структур соответственно. Суммирование этих фототоков производится на общей сигнальной шине, а формирование управляющего сигнала производится во внешней цепи (рис. 3).

Принцип двухапертурного синтеза основывается на том, что идентично расположенные в пространстве областей Z и V зоны модулированного оптического сигнала и фоновой засветкой пространственно идентичны, а в пространстве напряжений, приложенных к их делителям напряжения, эти зоны сдвинуты друг относительно друга на некоторую величину $\pm \epsilon$. В результате двухапертурного синтеза формирование выходного тока I_S производится не на основе сравнения фототоков I_Z^+ и I_V^- от правой и левой частей оптического сигнала, разделенных вольт-амперной характеристикой сенсора, а на сравнении величины фототоков I_Z^+ и I_V^- , сформированных с помощью положительного участка насыщения ВАХ на фотодиодной структуре Z и отрицательного участка насыщения на фотодиодной структуре V . В этом случае влияние фона на фототоки I_Z^+ и I_V^- становится практически симметричным.

Поскольку формирование управляющего напряжения U_{fb} производится при значении тока сигнальной шины, равном нулю, уравнение баланса токов двух фотодиодных структур Z и V имеет следующий вид:

$$\int_{-E+\epsilon}^{E+\epsilon} f(u+\epsilon)th \frac{u+\epsilon-U_{fb}^z}{\Delta} du + \int_{-E-\epsilon}^{E-\epsilon} f(u-\epsilon)th \frac{u-\epsilon-U_{fb}^v}{\Delta} du = 0, \quad (2)$$

где $f(u)$ — оптический сигнал, заданный на интервале приложенного напряжения; $th \frac{u}{\Delta}$ — функция, описывающая ВАХ Мультискана, Δ — ширина переходной зоны ВАХ Мультискана.

Из уравнения (2) видно, что интегрирование оптического сигнала в структурах Z и V производится в соответствии со смещенными на $+\epsilon$ и $-\epsilon$ осями напряжения, где абсолютная величина ϵ определяет сдвиг точек перегиба ВАХ относительно нуля в пространстве напряжений. Поскольку пространственные координаты сигналов, спроецированных на области Z и V , совпадают, их расположение относительно вольт-амперных характеристик в каждой из областей будет сдвинуто на $\pm \epsilon$.

Из рис. 4 видно, что в случае если величина сдвига ϵ сопоставима с шириной переходной зоны ВАХ Δ , то преобразование оптического сигнала в фототок происходит вблизи зоны насыщения ВАХ при большом значении напряжения смещения на $p-n$ -переходах. В результате при любом положении фоновой засветки достигается ее близкое к симметричному влияние на фототоки обеих областей Мультискана, что приводит к существенному снижению величины ошибки координатоуказания в присутствии фона.

Исследование влияния мощной фоновой засветки на ошибку определения медианы слабого модулированного светового сигнала проводилось на стенде, позволяющем

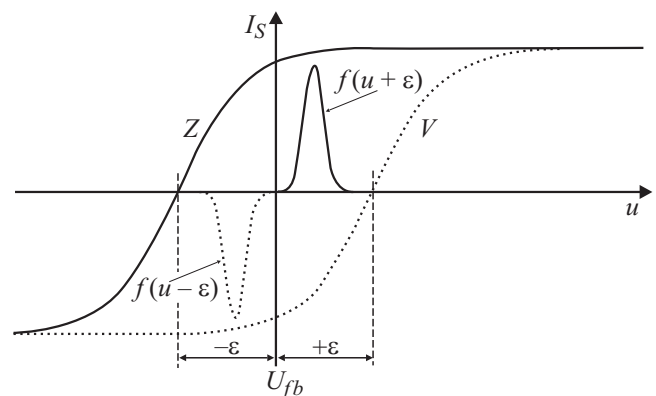


Рис. 4. Взаимное расположение оптического сигнала и ВАХ на фотодиодных структурах Z и V в пространстве напряжений.

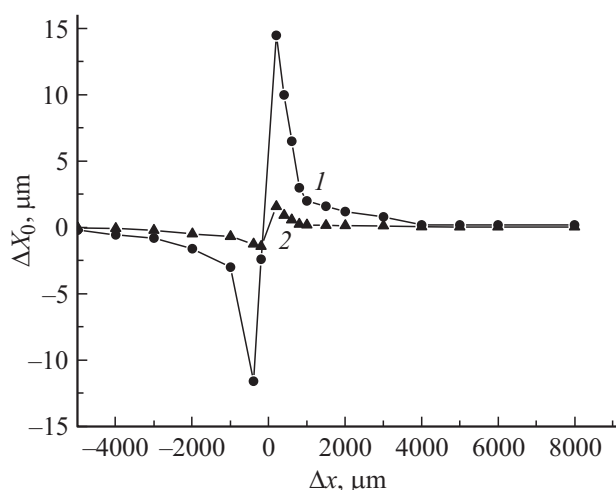


Рис. 5. Экспериментальная зависимость ошибки координатоуказания (ΔX_0) от взаимного расположения медиан (Δx) оптического сигнала и фоновой засветки. Кривая 1 — соответствует применению стандартного Мультискана, кривая 2 — условиям двухапертурного синтеза.

прецизионно сканировать оптическую щель фоновой засветкой при неподвижном сигнале. Величина модулированного светового сигнала составляла 10^{-8} А, величина тока фоновой засветки — 10^{-5} А.

На рис. 5, а приведена экспериментальная зависимость ошибки измерения медианы сигнала (ΔX_0) от взаимного расположения медиан (Δx) оптического сигнала и фоновой засветки. Как следует из рисунка, ошибка координатоуказания при использовании стандартной модификации Мультискана достигает $15 \mu\text{m}$. Зависимость величины ошибки от положения границы фона, переход ошибки через нуль в точке, где положение фона симметрично относительно положения сигнала, подтверждают влияние на ошибку измерений нарушения линейности люкс-амперной характеристики фотоприемника под действием мощной посторонней засветки. Экспериментальные результаты, полученные в условиях двухапертурного синтеза, т.е. при использовании Мультискана с двойной апертурой со смещенными ВАХ, демонстрируют снижение на порядок ошибки координатоуказания, обусловленной изменением взаимного расположения оптического сигнала и фоновой засветки (рис. 5, б).

Таким образом, в работе показано, что использование принципа двойной синтезированной апертуры, реализованное на структурной основе позиционно-чувствительного датчика Мультискан, позволяет существенно снизить влияние мощной фоновой засветки на точность определения положения медианы слабого модулированного сигнала. Снижение ошибки координатоуказания происходит в результате формирования фототоков сигнала на участках ВАХ, близких к областям насыщения, что приводит к симметричному воздействию фоновой засветки на обе части сигнала.

Список литературы

- [1] Mäkynen A., Kostamovaara J., Myllylä R. // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1996. Vol. 45. P. 324–325.
- [2] Mäkynen A., Kostamovaara J. // Opt. Eng. 1997. Vol. 36. P. 3119–3126.
- [3] Mäkynen A., Ruotsalainen T., Rahkonen T., Kostamovaara J. // Sensors and Actuators. A. 2003. Vol. 105. P. 261–270.
- [4] Подласкин Б.Г., Гук Е.Г. // Измерительная техника. 2005. Вып. 8. С. 31–34.
- [5] Podlaskin B., Guk E. // IEEE Proceedings of MECO. 2012. Jun. 2012. Vol. 1. P. 104–107.
- [6] Schaefer A.R., Salevski E.F., Geist J. // Appl. Optics. 1983. Vol. 22. P. 1232–1236.
- [7] Fischer J., Fu L. // Appl. Optics. 1993. Vol. 32. P. 4187–4190.
- [8] Kubarsepp T., Haapalinna A., Karha P., Ikonen E. // Appl. Optics. 1998. Vol. 37. P. 2716–2722.
- [9] Refaat T.F., Jonson D.G. // Appl. Optics. 2012. Vol. 51. P. 4420–4429.
- [10] Подласкин Б.Г., Васильев А.В., Гук Е.Г., Токранова Н.А. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 10. С. 110–116.