

07.2;07.3

Влияние температурной нестабильности на пороговую чувствительность фотоприемных устройств на основе фотодиодов A^3B^5

© С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Г.Ю. Сотникова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: g.sotnikova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 17 февраля 2015 г.

Представлен анализ зависимости чувствительности фотоприемных устройств (ФПУ) на основе фотодиодов A^3B^5 от случайных изменений температуры его элементов. Показано, что температурный дрейф уровня смещения во входных цепях операционных усилителей вносит существенный вклад в результирующие шумы ФПУ вплоть до частот порядка 1 МГц. Для достижения предельных значений чувствительности сенсоров необходимо стабилизировать температуру не только чипа фотодиода, но и микросхемы первого каскада усилителя. Для большинства применений требуемая точность стабилизации не превышает $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Результатом анализа явилась разработка макетов высокочувствительных средневолновых сенсоров (2–5 μm), работающих без принудительного охлаждения, с порогом детектирования десятки nW при полосе детектирования от 0 до 1 МГц.

Требования высоких быстродействия и чувствительности фотоприемных устройств (ФПУ) в средневолновом ИК-диапазоне определяют интерес к фотодиодам (ФД) на основе соединений A^3B^5 [1,2]. Эти ФД сочетают в себе хорошую обнаружительную способность и малую постоянную времени порядка десятков наносекунд. ФПУ на основе ФД A^3B^5 открывают возможность создания быстродействующих фотометрических сенсоров, обеспечивающих высокую чувствительность измерений в широкой полосе частот, начиная от постоянного уровня сигнала до регистрации его быстрых изменений (≥ 1 МГц).

Сенсоры на основе ФД A^3B^5 способны к измерению в режиме реального времени малых концентраций газовых компонент (на уровне ppm) [3] и низких температур объекта (десятки градусов) с

высоким пространственным (доли mm) и временным разрешением (единицы μs) [4].

Одной из основных метрологических характеристик фотометрических приборов является их временная стабильность, т.е. возможность поддержания заданной точности и обеспечение воспроизводимости результатов измерения в течение длительного времени. В качестве количественной оценки точности ФПУ служит неопределенность (погрешность) измерения фототока ФД, которую принято характеризовать шумами, приведенными к входу ФПУ.

В работах [5,6] был выполнен анализ шумов ФПУ, содержащих ИК-ФД на основе структур A^3B^5 с различной величиной динамического сопротивления R_0 и разными типами операционных усилителей (ОУ). Были рассмотрены ОУ, отличающиеся уровнем спектральных составляющих шума, включая низкочастотные (НЧ), к которым относятся дрейф напряжения смещения на входе ОУ и $1/f$ шум. Было показано, что малые значения R_0 (десятки Ω –единицы $k\Omega$), являющиеся свойством узкозонных p – n –структур A^3B^5 , требуют для реализации предельной пороговой чувствительности ФПУ усилителей с минимальными значениями спектральной плотности шума по напряжению ($\sqrt{e_n^2} \text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$) [5]. Для учета вклада НЧ-составляющих шума был предложен наглядный „векторный метод“ [6] выбора типа ОУ первого каскада усиления тока ФД, обеспечивающий максимальную чувствительность ФПУ при требуемом быстродействии.

В данной работе приведены количественные оценки влияния колебаний температуры на точность и чувствительность ФПУ на основе ФД A^3B^5 и определены требования к стабилизации температуры его элементов.

Как известно, шум ФПУ равен сумме тепловых шумов ФД ($\sqrt{4kTR_0} \text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$), определяемых величиной его динамического сопротивления $R_0(t)$, и шумов ОУ, характеризующихся, в первую очередь, спектральными плотностями шума по току ($\sqrt{i_{Op}^2} \text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$) и напряжению ($\sqrt{e_{Op}^2} \text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$). Температурный дрейф смещения нуля на входе ОУ, dU_{Op_d}/dt , и $1/f$ шум, описываемый параметром V_{Op_p-p} , в сумме представляют собой дрейфовую составляющую шумов ФПУ, которые зависят от диапазона изменения его рабочей температуры Δt . С учетом всех перечисленных факторов шум ФПУ в пересчете на его вход

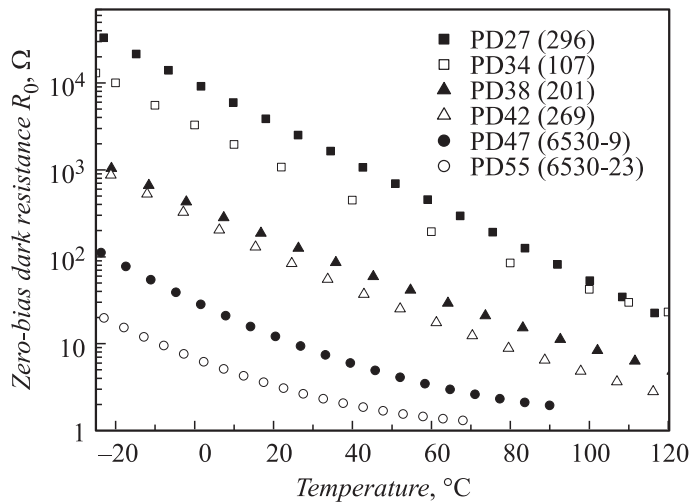


Рис. 1. Температурные зависимости сопротивления образцов средневолновых ФД, приведенные в [1].

определяет погрешность детектирования тока ФД и записывается в виде

$$I_n(\Delta f, t, \Delta t) = \sqrt{\left[(i_{OP})^2 + \left(\frac{e_{OP}}{R_0(t)} \right)^2 + \frac{4kT}{R_0(t)} \right] \Delta f + \left(\frac{1}{R_0(t)} \frac{V_{OP-p-p}}{6} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_0(t)} \frac{dU_{OP-d}}{dt} \Delta t \right)^2}, \quad (1)$$

где индексами „OP“ обозначены составляющие шумов, присущих ОУ.

Из выражения (1) видно, что величина и стабильность погрешности детектирования определяется значением $R_0(t)$, точностью его стабилизации и ограничена параметрами современных ОУ. На рис. 1 представлены зависимости динамического сопротивления лучших образцов ФД среднего ИК-диапазона от температуры [1].

Эти данные позволяют оценить величину температурной нестабильности $dR_0(t)$, которая в области рабочих температур $t = 20 \pm 40^\circ$ может быть аппроксимирована зависимостью $dR_0/R_0(t_0) = \exp(-\alpha_t(t-t_0))$ с температурным коэффициентом $\alpha_t \approx 0.045$.

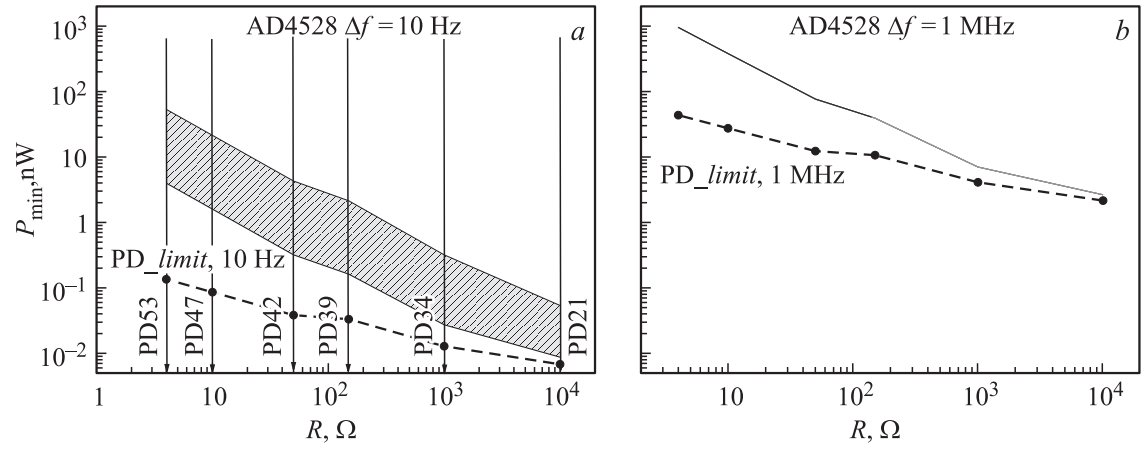


Рис. 2. Порог детектирования ФПУ на основе ФД A^3B^5 и ОУ с различными шумовыми характеристиками в полосе частот детектирования 10 Hz (a, c) и 1 MHz (b, d). Пунктирные линии соответствуют теоретическому пределу (Pd_limit) минимальной детектируемой мощности ФПУ в заданной полосе частот, определяемой только сопротивлением ФД. Нижние границы заштрихованных областей соответствуют совместной стабилизации температуры ФД и ОУ на уровне $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$, а верхние границы — изменению рабочей температуры ОУ на $\Delta t = 40^\circ\text{C}$. Символами (*) отмечены экспериментально измеренные значения дисперсии шумов ФПУ на основе AD4895 с различными ФД при совместной стабилизации ФД и ОУ на уровне $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$.

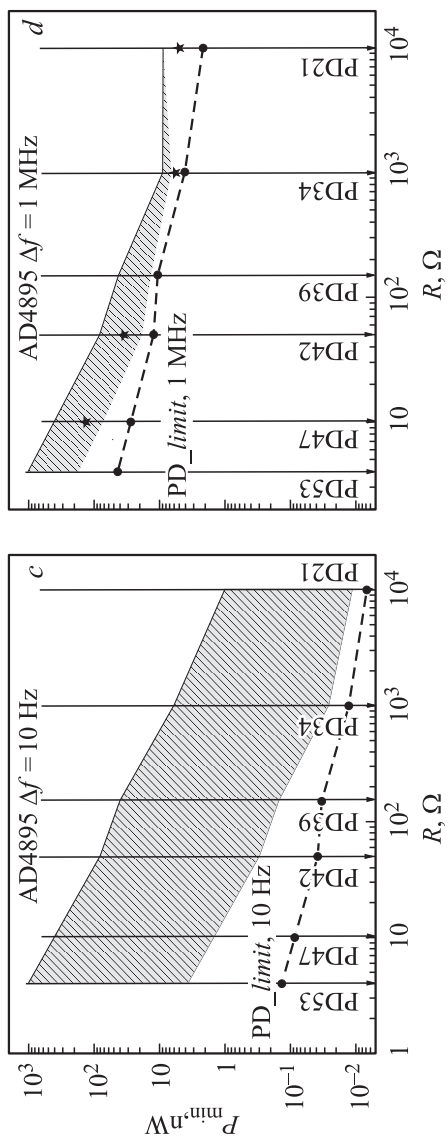


Рис. 2 (продолжение).

Дифференцируя (1), можно показать, что суммарный шум ФПУ возрастает пропорционально температурному коэффициенту α_t , т.е. на 4–5% при изменении температуры ФД на 1° . Таким образом, чтобы обеспечить стабильность характеристик ФПУ в пределах 1% необходимо, в первую очередь, обеспечить соответствующую стабильность значения $R_0(t)$, что может быть достигнуто поддержанием некоторой рабочей температуры ФД с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Однако в ряде случаев это условие не является достаточным. Так, последнее слагаемое под корнем в выражении (1) зависит от диапазона возможных изменений рабочей температуры ОУ первого каскада усилителя. Анализ характеристик ОУ различных производителей показывает, что типичные значения коэффициента температурного дрейфа (dU_{OP_d}/dt) нулевого уровня (U_{OP_d}) на входе прецизионных ОУ составляют величину порядка 200–500 $\text{nV}/^\circ\text{C}$, в то время как для „бытовых“ ОУ эти значения могут достигать единиц $\mu\text{A}/^\circ\text{C}$. На рис. 2 приведены результаты расчетов величины минимальной детектируемой мощности $P_{\min} = I_n/S_i$ с учетом параметров ФД, представленных в [1]. Значение P_{\min} определяет порог (нижний предел) и погрешность детектирования (точность и чувствительность) ФПУ. Расчеты выполнены для двух типов малощумящих ОУ фирмы Analog Device с „нулевым дрейфом“, различающихся уровнями спектральной плотности шумов и температурного дрейфа: AD4528 ($i_n = 0.7 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, $e_n = 5.6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, $dU_d/dt = 0.8 \text{ nV}/^\circ\text{C}$) и ADA4895/96 ($i_n = 1.6 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, $e_n = 1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, $dU_d/dt = 150 \text{ nV}/^\circ\text{C}$). Анализ проведен для „быстродействующих“ ($\Delta f = 1 \text{ MHz}$) и „медленных“ ($\Delta f = 10 \text{ Hz}$) ФПУ. Типичные значения $R_0(20^\circ\text{C})$ для рассматриваемых ФД отмечены стрелками на графиках рис. 2. Пунктирными линиями на графиках представлены пороговые значения (Pd_limit) минимальной детектируемой мощности ФПУ в полосе частот 10 Hz и 1 MHz, определяемой только сопротивлением R_0 ФД. Суммарные шумы ФПУ представлены в виде заштрихованных областей на графиках рис. 2 (a, b для AD4895 и c, d для AD4528), ограниченными линиями, соответствующими уровнями шумов при стабилизации температуры ОУ в пределах $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (нижние границы) и при ее изменении $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ (верхние границы). Видно, что для низкочастотных применений (полоса детектирования $\leq 10 \text{ Hz}$) дрейфовая составляющая шумов обоих ОУ вносит определяющий вклад в суммарные шумы ФПУ. Ее вклад тем меньше, чем меньше значение температурного коэффициента dU_{OP_d}/dt , и для обеспечения предельных значений чувствительно-

сти ФПУ необходима стабилизация температуры не только кристалла ФД, но и микросхемы ОУ первого каскада усиления. При этом оба типа ОУ обеспечивают примерно одинаковый уровень пороговой мощности детектирования ФПУ.

Для высокочастотных применений (полоса детектирования $\Delta f > 1$ МГц) определяющими для ФПУ на основе низкоомных ФД становятся шумы, характеризуемые значением спектральной плотности шума ОУ по напряжению: $I_n \sim (e_n/R_0)\Delta f$ А [5]. При этом температурный дрейф смещения на входе ОУ типа AD4528 с параметром $dU_d/dt = 0.8$ нВ/°С практически не влияет на чувствительность ФПУ при колебаниях его рабочей температуры в широких пределах вплоть до $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ (рис. 2, *b*). Для ОУ типа ADA4895/96 с параметром $dU_d/dt = 150$ нВ/°С влияние температурного дрейфа также оказывается существенно меньше, чем для НЧ-применений (см. границы области P_{\min} в полосе 1 МГц на рис. 2, *d*), и для большинства ФД оба типа ОУ обеспечивают примерно одинаковый уровень порога детектирования мощности без стабилизации температуры ОУ. Однако стабилизация температуры микросхемы ОУ типа ADA4895 может обеспечить лучшие параметры ФПУ для ФД с $R_0 \leq 500\Omega$, так как он обладает меньшим значением спектральной плотности мощности по напряжению, $e_n = 1$ нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Таким образом, на основе данных для значений динамических сопротивлений $R_0(t)$ и характеристик современных ОУ (на примере анализа ОУ фирмы Analog Device) теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что в задачах широкополосных измерений ФПУ на основе средневолновых ИК-ФД А³В⁵ обеспечивают высокую точность и стабильность характеристик чувствительности, близкую к теоретическому пределу. Этот предел ограничивается только тепловыми шумами ФД при условии стабилизации температуры ФД и ОУ с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что были разработаны быстродействующие ФПУ с полосой детектирования от 0 до 1 МГц на основе различных узкополосных ФД А³В⁵, чувствительных в области 2–5 μm [1] и ОУ AD4895 первого каскада усилителя, установленных на элементе Пельтье (ТЭП), который является элементом конструкции корпуса ФД. Внешнее электронное обрамление ФПУ содержит схемы дополнительного усиления тока и стабилизации температуры ФД и ОУ с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$ на уровне

температуры окружающей среды ($20 \pm 5^\circ\text{C}$), что обеспечивало минимальное энергопотребление ТЭП.

Значения пороговой чувствительности экспериментальных ФПУ, рассчитанные на основе измеренных значений дисперсии их шумов, представлены символами (*) на рис. 2, *d*. Полученные значения достаточно хорошо согласуются с результатами теоретического анализа. Имеющиеся отклонения можно объяснить некоторым отличием параметров ОУ и величины динамических сопротивлений образцов ФД от типичных значений, использованных в расчетах.

Авторы благодарят ООО „ИоффеЛЕД“ за предоставление образцов ФД и поддержку работы.

Список литературы

- [1] <http://www.ioffeled.com>,
- [2] <http://www.ibsg-st-petersburg.com>
- [3] *Kuusela T., Peura J., Matveev B.A., Remennyu M.A., Stus' N.M.* // *Vibrational Spectroscopy*. 2009. V. 51(2). P. 289–293.
- [4] *Sotnikova G.Yu., Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A.* // *Proc. SPIE*. 2011. V. 8073. P. 807 31A. *Optical Sensors Photonic Crystal Fibers V.* / Eds Francesco Baldini, Jiri Homola, Robert A. Lieberman, Kyriacos Kalli, doi: 10.1117/12.886309.
- [5] *Гаврилов Г.А., Матвеев Б.А., Сотникова Г.Ю.* // *Письма в ЖТФ*. 2011. Т. 37. В. 18. С. 50–57. [*Gavrilov G.A., Matveev B.A., Sotnikova G.Yu.* // *Tech. Phys. Lett.* 2011. V. 37. N 9. P. 866–869.]
- [6] *Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю.* // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40. В. 16. С. 58–64. [*Sotnikova G.Yu., Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A.* // *Tech. Phys. Lett.* 2014. V. 40. N 8. P. 704–707.]