

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО И ФОТОДИОДНОГО РЕЖИМОВ РАБОТЫ ФОТОДИОДОВ ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В МАЛОГАБАРИТНОМ ПРЕЦИЗИОННОМ ЛАЗЕРНОМ ИНКЛИНОМЕТРЕ

*Ю. В. Клемешов<sup>1</sup>, М. В. Ляблин<sup>2</sup>*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Один из способов увеличения чувствительности прецизионного лазерного инклинометра (ПЛИ) — переход на обратносмещенный режим работы фотодиодов (ФД) вместо фотovoltaического. Такой переход позволяет обеспечить больший диапазон линейности и увеличить отношение сигнал–шум. Кроме того, этот подход позволяет использовать АЦП с меньшей разрядностью (14–16 бит вместо 24 бит), что существенно снижает стоимость прибора. Проведено исследование фотодиодов Hamamatsu S12915-1010R/66R, Thorlabs FDS-100 и Hamamatsu S3204-08, в котором был определен линейный диапазон работы в фотovoltaическом и фотодиодном режимах. Также измерен уровень шума каналов системы считывания МПЛИ при использовании закрытых ФД, исследованы два режима работы ФД в МПЛИ на сигнальных каналах. Результаты исследования говорят о возможности применения этого режима работы ФД в МПЛИ.

One of the ways to increase the sensitivity of a Compact Precision Laser Inclinometer (CPLI) is a transition from the photovoltaic mode to the reverse-biased photodiode mode. This transition allows one a broader linear range and an improved signal-to-noise ratio. Additionally, this approach enables the use of lower-resolution ADCs (14 to 16 bits instead of 24 bits), which significantly reduces the cost of the device. A study was conducted on Hamamatsu S12915-1010R/66R, Thorlabs FDS-100, and Hamamatsu S3204-08 photodiodes to determine their linear operating range in photovoltaic and photodiode modes. The noise level of the CPLI's readout channels was also measured when using closed photodiodes, and two modes of operation of the photodiodes in the CPLI on the signal channels were investigated. The results of the research indicate the possibility of applying this mode of operation of photodiodes in the CPLI.

PACS: 42.55.Px; 42.62.–b

## ВВЕДЕНИЕ

В лазерной метрологической аппаратуре основой является «связка» лазерный луч – фотоприемник. Лазерный луч малой мощности является эффективным средством

---

<sup>1</sup>E-mail: klemeshov@jinr.ru

<sup>2</sup>E-mail: lyablin@jinr.ru

неразрушающего контроля в современном физическом эксперименте [1, 2]. Для достижения максимального разрешения регистрируемых сигналов с ФП необходимо знать его линейный диапазон световой характеристики (СВХ), частотную характеристику и уровень шумов в зависимости от режима работы.

Информация о линейности СВХ обычно не предоставляется производителями фотоприемника (ФП), что может являться недостатком при проведении конкретного физического эксперимента. Для достижения максимального разрешения регистрируемых сигналов в физическом эксперименте также требуется минимизировать шумы ФП. Это особенно важно при долговременных измерениях, когда в низкочастотной области ( $< 10^{-3}$  Гц) эти шумы являются определяющими [8, 9]. Например, в прецизионном лазерном инклинометре [3–7] минимальным требованием является высокоточная регистрация сигналов с относительной погрешностью  $< 10^{-4}$  в течение суток. В целом, достижение столь малых шумов зависит и от режима работы ФП.

В ПЛИ применялись разные ФП, включаемые обычно в фотовольтаическом режиме — это обусловлено его простотой и шумовыми показателями, однако при этом имелось ограничение линейного диапазона. Для повышения чувствительности малогабаритного ПЛИ (МПЛИ) необходим переход на фотодиодный режим работы, что обеспечит больший диапазон линейности, увеличение отношения сигнал–шум и применение регистрирующей электроники с меньшей разрядностью (14–16 бит вместо 24 бит).

## ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ И ФОТОДИОДНЫЙ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ФД

Основные уравнения ВАХ для идеального фотодиода с  $p$ - $n$ -переходом, пригодные для описания любого режима работы, могут быть представлены выражениями [10]:

$$I = I_0 \left( \exp \left( \frac{qU_R}{kT} \right) - 1 \right) - I_\Phi, \quad (1)$$

$$U_R = \frac{kT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_\Phi - I}{I_0} \right) - I_\Phi, \quad (2)$$

где  $I_0$  — обратный ток  $p$ - $n$ -перехода (темновой ток);  $I_\Phi$  — фототок носителей заряда, генерируемых излучением;  $R$  — сопротивление нагрузки;  $q$  — заряд электрона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура.

Типичный вид кривых ВАХ фотодиода в фотовольтаическом режиме представлен в квадранте IV (рис.1, а). В этом режиме фотодиод является источником тока для некоторой нагрузки  $R_n$ . Точка  $b$ , лежащая на оси ординат, соответствует току короткого замыкания  $I_{КЗ}$  ( $R_n = 0$ ), а точка  $d$ , лежащая на оси абсцисс, определяет напряжение холостого хода  $U_{ХХ}$  ( $R_n = \infty$ ).

Ток короткого замыкания у фотодиода, работающего в фотовольтаическом режиме, линейно зависит от потока излучения только на начальном участке характеристики. При больших потоках излучения линейность нарушается (кривая 3, рис. 1, б). Это объясняется влиянием изменяющегося под действием излучения сопротивления запирающего слоя  $p$ - $n$ -перехода на величину  $I_{КЗ}$ .

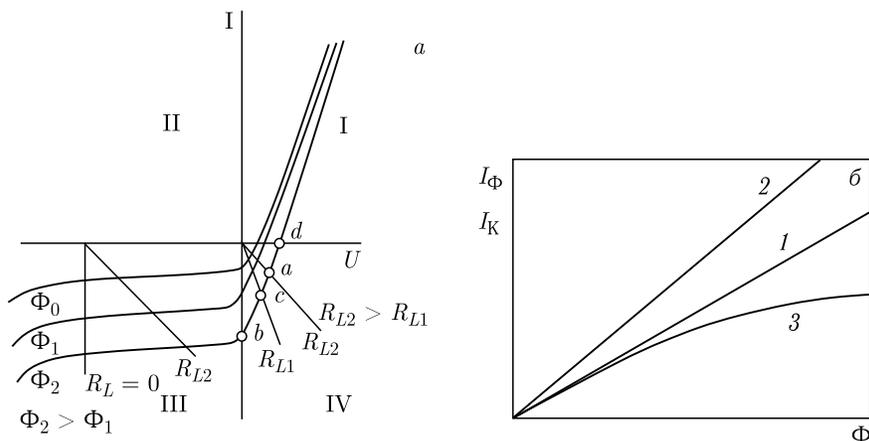


Рис. 1. Типичный вид: а) ВАХ фотодиода; б) СВХ фотодиода

Для определения зависимости тока фотодиода во внешней цепи от величины излучения необходимо рассмотреть эквивалентную схему фотодиода в фотовольтаическом режиме (рис. 2).

Генерируемый ток фотодиода  $I_\Phi$ , пропорциональный потоку излучения  $\Phi$ , делится на 2 тока — ток  $I$ , проходящий через нагрузку  $R_n$  и внутреннее сопротивление ФД, и ток утечки  $I_l$  запирающего слоя, проходящий через сопротивление  $r_{зс}$ . Ток  $I$  во внешней цепи будет определяться выражением

$$I = \frac{I_\Phi}{1 + \frac{R_n + r_b}{r_{зс}}} = \frac{s_I \Phi}{1 + \frac{R_n + r_b}{r_{зс}}}. \quad (3)$$

Аналитическая зависимость сопротивления запирающего слоя фотодиода от потока излучения при его небольших значениях определяется отношением  $U_{XX}/I_{КЗ}$ :

$$r_{зс} = \frac{U_{XX}}{I_{КЗ}} = \frac{kT}{q s_I \Phi} \ln \left( 1 + \frac{s_I \Phi}{I_0} \right). \quad (4)$$

Так как сопротивление  $r_{зс}$   $p$ - $n$ -перехода уменьшается при увеличении потока излучения, то при малых потоках излучения  $r_{зс} \gg r_b$  из выражения (3) следует, что в случае  $R_n = 0$  ток короткого замыкания  $I_{КЗ}$  линейно зависит от потока излучения, а при больших величинах линейность нарушается. При увеличении  $R_n$  будет наблюдаться более значительное отклонение от линейности (рис. 3). На рис. 3 также показана зависимость фото-ЭДС фотодиода от потока излучения, характер которой описывается выражениями (5) — при малых потоках и (6) — при больших потоках излучения:

$$U_X = 0,025 \frac{s_\lambda \Phi}{I_0}, \quad (5)$$

$$U_X = 0,025 \ln \frac{s_\lambda \Phi}{I_0}, \quad (6)$$

где  $s_\lambda$  — коэффициент монохроматической чувствительности фотодиода.

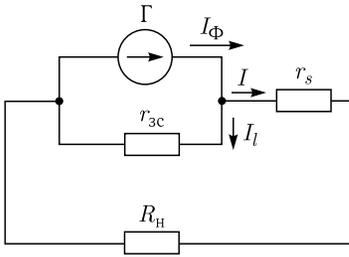


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная схема ФД в фотовольтаическом режиме

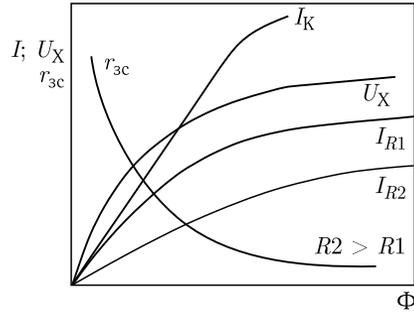


Рис. 3. СВХ ФД в фотовольтаическом режиме

Рассмотрим кратко физические основы фотодиодного режима ФД. При подаче на фотодиод напряжения смещения  $U$  в прямом направлении фототок  $I_{\Phi}$  становится неразличимым на фоне большого прямого диффузионного тока основных носителей заряда, уравнение (1) приобретает вид (7). Величина тока будет определяться преимущественно напряжением смещения (см. рис. 1, а, квадрант I). Исходя из уравнения (1) получаем

$$I = I_0 \left( \exp \left[ \frac{q(IR_{\text{н}} + U)}{kT} \right] - 1 \right) - I_{\Phi} \approx I_0 \exp \left( \frac{qU}{kT} \right). \quad (7)$$

При подаче на фотодиод напряжения смещения  $U$  в обратном (запирающем) направлении (рис. 4) внутреннее поле  $p$ - $n$ -перехода увеличится и резко возрастет потенциальный барьер для основных носителей, уравнение (1) приобретет вид (8):

$$I = I_0 \left( \exp \left[ \frac{q(IR_{\text{н}} - U)}{kT} \right] - 1 \right) - I_{\Phi} \approx -I_0 - I_{\Phi} = -I_0 - s_I \Phi. \quad (8)$$

Выражение (8) — это уравнение семейства ВАХ фотодиода в фотодиодном режиме. Из (8) следует, что направление фототока  $I_{\Phi}$  совпадает с темновым током  $I_0$ . Типичный вид кривых ВАХ фотодиода в фотодиодном режиме представлен в квадранте III (см. рис. 1, а).

Во внешней цепи фотодиода с  $R_{\text{н}} = 0$ , работающего в фотодиодном режиме, фототок пропорционален концентрации неосновных неравновесных носителей заряда, возникающих при облучении, т. е. потоку излучения. Энергетические характеристики фотодиода в фотодиодном режиме линейны в широких пределах изменения потока излучения (кривые 1, 2 на рис. 1, б) даже при наличии некоторой нагрузки  $R_{\text{н}} > 0$ .

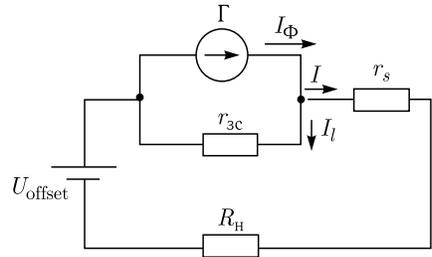


Рис. 4. Упрощенная эквивалентная схема ФД в фотодиодном режиме

## ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЛИНЕЙНОСТИ СВХ В ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОМ И ФОТОДИОДНОМ РЕЖИМАХ

Измерение энергетических/световых характеристик ФД проводится методами 4.19–4.20, описанными в ГОСТ 59607-2021 [11]. В данной работе измерения и обработка выполнялись похожим образом, описанным в ГОСТ, но с измененной конфигурацией экспериментальной установки. Для проверки диапазона линейности сигнала с фотодиода в фотovoltaическом режиме работы был собран лабораторный стенд, схема которого показана на рис. 5. В качестве источника излучения был взят полупроводниковый лазерный источник с оптоволоконным выходом — Thorlabs S1FC635. Его излучение поступает в коллиматор (Thorlabs F280APC-B) с выходным диаметром лазерного пятна  $\sim 3,4$  мм, после чего делится с помощью делительного куба (Thorlabs BS004) на два луча. Один регистрируется фотодиодом, который подключен к оптическому ваттметру Thorlabs PM100D, второй направляется на другой фотодиод с подключенным сопротивлением нагрузки, с которого снимается сигнал через систему сбора данных DT9824 в роли вольтметра. С помощью переключателей K1 и K2 задается необходимый режим работы: если замкнут переключатель K2 и разомкнут K1, то фотодиод будет работать в фотovoltaическом режиме, если наоборот — то в фотодиодном. Вся оптическая схема закрывалась темным боксом.

Оптический ваттметр и DAQ-система были подключены к ПК, на котором была реализована программа по сбору данных с этих приборов. При запуске программы каждую секунду ПК получает показания с измерительных приборов, через каждые 30 значений оператор изменяет значение мощности вручную на лазере, до момента записи 1500 значений (рис. 6). Таким образом, по завершении работы программы формируется таблица из трех колонок (отсчет, значение лазерной мощности, значение напряжения на нагрузке) и 1500 строк.

После получения всех данных значения лазерной мощности умножаются на коэффициент зависимости мощностей между двумя сторонами делительного куба. Среднее значение отношения мощности излучения отраженного луча к мощности излучения прямого луча с фокусирующей линзой составляет  $\sim 1,19$ , без фокусирующей линзы  $\sim 1,16$ .

Из 1500 значений формируется 50 значений с помощью усреднения выборок по 30 значений — через данный интервал периодически меняется мощность на лазере (см. выше). По итогу строится зависимость напряжения на сопротивлении от падаю-

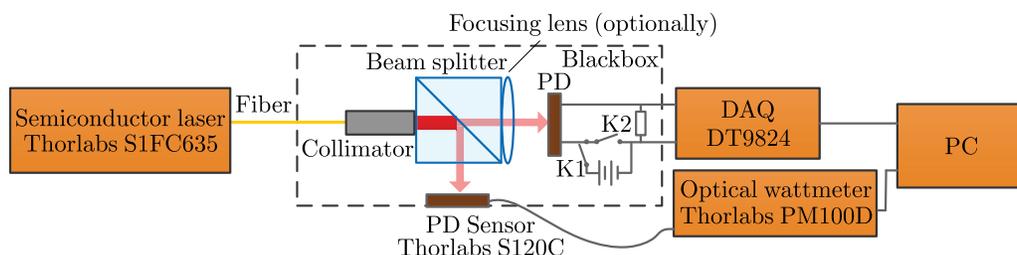


Рис. 5. Схема экспериментальной установки по измерению световых характеристик ФД

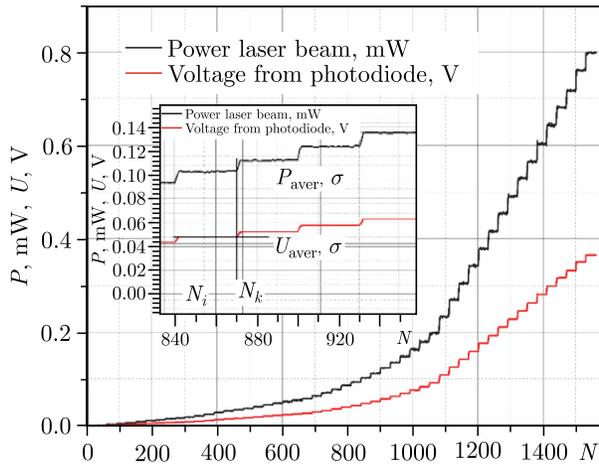


Рис. 6. Ступенчатое изменение мощности лазерного излучения и напряжения на нагрузочном сопротивлении ФД

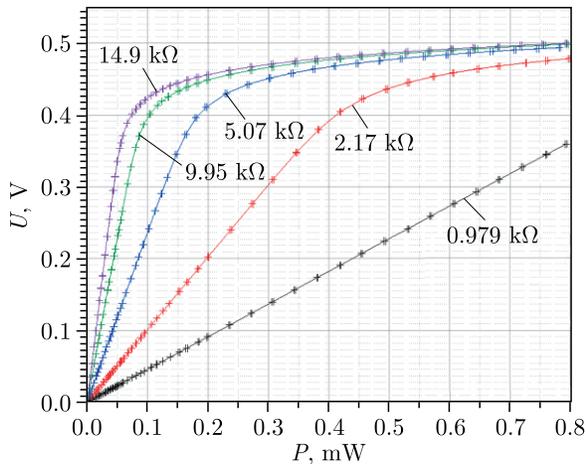


Рис. 7. Световые характеристики ФД S12915-1010R в фотовольтаическом режиме для различных нагрузочных сопротивлений

щей мощности лазерного излучения. Подобные зависимости при разных сопротивлениях показаны на рис. 7.

Для каждой кривой СВХ выделялись линейные участки, для которых определялась степень их линейности (отклонение от аппроксимированной прямой). Для этого рассчитывался коэффициент  $k$  — отношение напряжения к мощности (по значениям кривой на рис. 7) и его среднее значение в начальной области кривой СВХ. Для расчета коэффициентов аппроксимированной прямой ( $y = kx + b$ ) использовались точка с координатами (0,0) и точка, где происходит отклонение коэффициента  $k$  от его среднего значения более чем на 1%. На рис. 8, а показан график с аппроксимированной

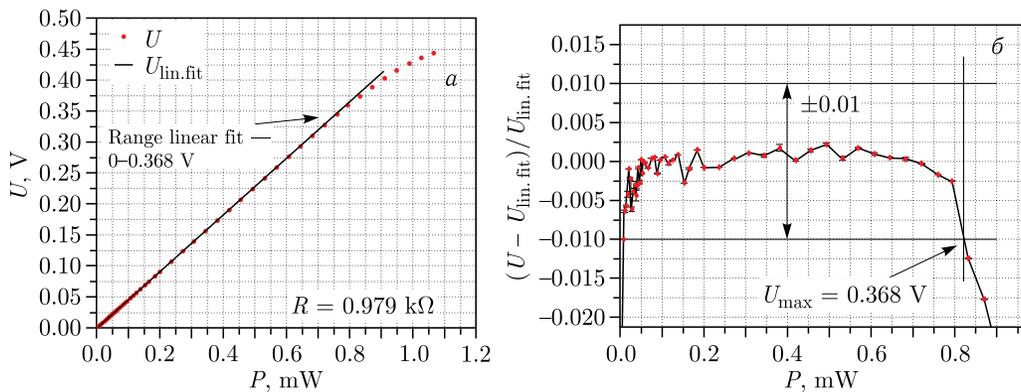


Рис. 8. а) Линейный участок световой характеристики для нагрузочного сопротивления  $R = 979$  Ом; б) относительная степень линейности световой характеристики для нагрузочного сопротивления  $R = 979$  Ом в фотовольтаическом режиме

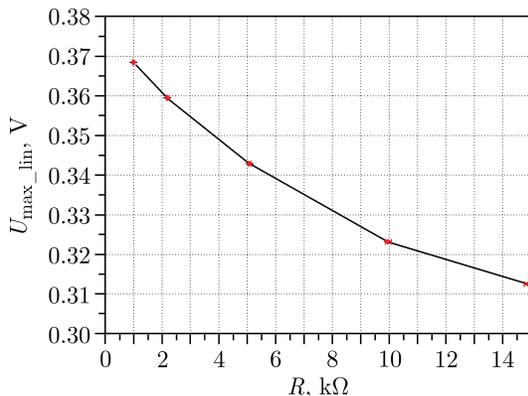


Рис. 9. Зависимость максимального напряжения на нагрузочном сопротивлении ФД S12915-1010R в линейном диапазоне от величины нагрузочного сопротивления в фотовольтаическом режиме

прямой для сопротивления  $R = 979$  Ом, а на рис. 8, б — график изменения степени линейности от величины мощности излучения. Как видно из рис. 8, а, максимальное напряжение линейной области для сопротивления  $R = 979$  Ом составляет  $\sim 0,368$  В. На рис. 8, б на основной график дополнительно нанесены планки погрешностей по оси  $X$  (мощность) и по оси  $Y$  (относительное отклонение от линеаризованной величины).

Также была построена зависимость максимального значения напряжения на сопротивлении фотодиода от величины сопротивления (рис. 9). Исходя из максимальных значений линейных участков на рис. 9, при подборе сопротивления нагрузки следует учитывать экспоненциальный характер снижения максимальной границы по мере роста сопротивления.

Проверка диапазона линейности сигнала с ФД в фотодиодном режиме работы выполнялась на том же лабораторном стенде, схема которого показана на рис. 5. Для

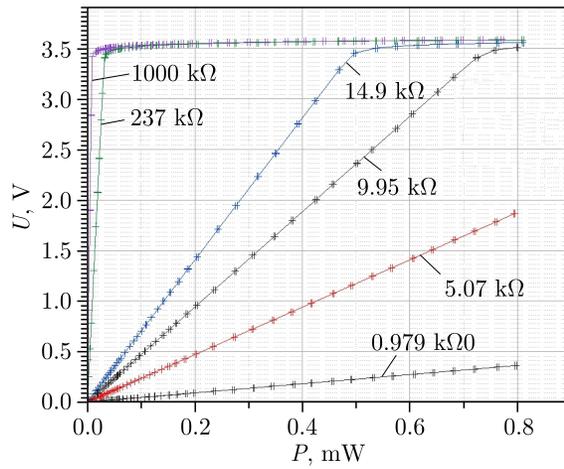


Рис. 10. Световые характеристики ФД S12915-1010R в фотодиодном режиме для различных нагрузочных сопротивлений

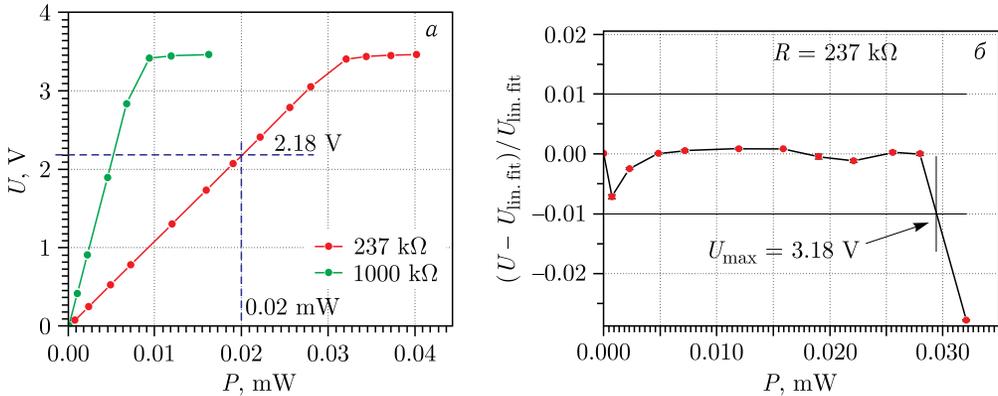


Рис. 11. а) Световые характеристики ФД S12915-1010R в фотодиодном режиме для нагрузочных сопротивлений  $R = 237 \text{ кОм}$  и  $R = 1 \text{ МОм}$  (увеличенный график); б) относительная степень линейности световой характеристики для нагрузочного сопротивления  $R = 237 \text{ кОм}$  в фотодиодном режиме

смещения фотодиода в обратном направлении использовался источник напряжения на двух последовательных батареях с параллельным конденсатором. По полученным данным построены кривые зависимости напряжения на сопротивлении от падающей мощности лазерного излучения при разных сопротивлениях (рис. 10).

Для каждой кривой зависимости напряжения от падающей на фотодиод мощности выделялись линейные участки. На рис. 11, а показаны такие области для двух сопротивлений —  $237 \text{ кОм}$  и  $1 \text{ МОм}$ . Для сопротивления  $1 \text{ МОм}$ , при падающей мощности излучения  $20 \text{ мкВт}$ , уровень постоянной составляющей сигнала равен  $\sim 2 \text{ В}$ . Таким образом, при больших величинах сопротивлений возможно регистрировать сигналы

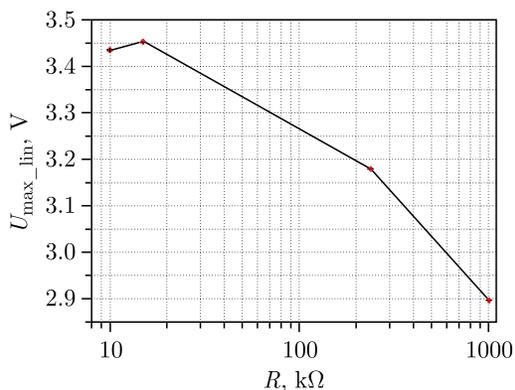


Рис. 12. Зависимость максимального напряжения на сопротивлении ФД S12915-1010R в линейном диапазоне от величины нагрузочного сопротивления в фотодиодном режиме

при лазерной мощности несколько микроватт. Для линейных участков определялась степень их линейности (отклонение от аппроксимированной прямой) (см. рис. 11).

Как видно из рис. 12, область линейности в диапазоне сопротивлений 0–20 кОм ограничена 3,4 В — напряжением смещения от источника питания. В целом у данного фотодиода максимальное обратное напряжение составляет 30 В [12].

### АНАЛИЗ ШУМА КАНАЛОВ DAQ-СИСТЕМЫ МПЛИ СО СВЕТОИЗОЛИРОВАННЫМИ ФД В ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОМ/ФОТОДИОДНОМ РЕЖИМАХ

Пороговый поток фотодиода с *p-n*-переходом зависит от уровня собственных шумов, к которым относятся тепловой, дробовой и токовый шум. Величины шумов зависят от режима работы фотодиода. Меньший шум в фотovoltaическом режиме по сравнению с фотодиодным режимом обусловлен отсутствием темнового тока, в то время как в фотодиодном режиме этот ток имеет заметную величину, и шумов чаще всего определяются его флуктуациями. Собственные шумы фотодиодов в фотovoltaическом режиме настолько малы, что пороговый поток ограничивается шумами усилителя или фонового излучения. Выбор фотодиода и режима его работы определяется требованиями, предъявляемыми к нему в зависимости от конкретной области применения.

В реальном фотодиоде существует несколько источников шума, они могут классифицироваться по частотной области в спектре мощности (рис. 13).

Спектральная плотность шума типа  $1/f$  зависит от частоты. С ростом частоты уровень шума  $1/f$  уменьшается, и наоборот.

Дробовой шум обычно связан с дискретностью потоков регистрируемых электронов (фотонов), его полоса частот практически неизменна до нескольких сотен мегагерц. В этой полосе частот дисперсия выходного тока фотодиода рассчитывается по выражению

$$\sigma_I^2 = 2q\bar{I}\Delta f, \quad (9)$$

где  $q$  — заряд электрона;  $\bar{I}$  — средний выходной ток;  $\Delta f$  — полоса частот.

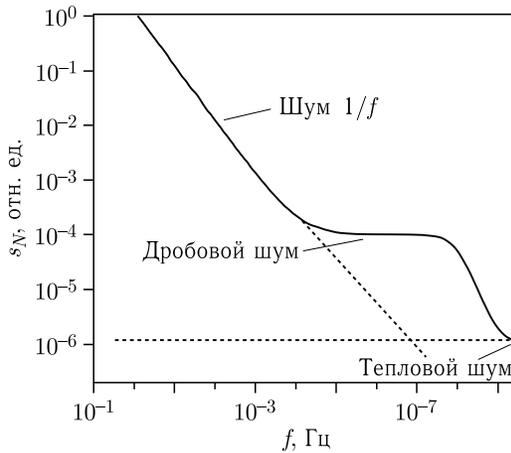


Рис. 13. Общий вид спектральной кривой мощности шума ФД

Тепловой шум фотодиода является «белым», и его спектральная плотность практически постоянна вплоть до частот  $\sim 10^{12}$  Гц. Источником теплового шума является любой элемент, имеющий температуру  $T$  выше абсолютного нуля. Для активного сопротивления  $R$  среднееквадратичное значение ЭДС шума может быть рассчитано по формуле Найквиста:

$$E_N^2 = 4kTR\Delta f, \quad (10)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана. Один из методов устранения тепловых шумов — охлаждение фотодиода до низких температур.

В области частот порядка нескольких сотен герц сильно сказывается генерационно-рекомбинационный шум. Он связан с флуктуациями процессов генерации и рекомбинации носителей тока (аналогичен дробовому шуму вакуумных приборов) и является основным видом шума в полупроводниках на промежуточных частотах. Его появление объясняется тем, что возникновение (генерация) свободных носителей заряда и их переход в связанное состояние (рекомбинация) — случайные процессы. Для этого типа шума характерно возрастание его величины при увеличении приложенного напряжения.

Для долговременного измерения шума фотодиода необходима экспериментальная установка, содержащая мал шумящий трансимпедансный усилитель с нулевым дрейфом, который позволяет «вытащить» шум ФД в область выше шума АЦП. Из-за невозможности обеспечить технические условия для подобного эксперимента была поставлена задача анализа шума канала DAQ-системы МПЛИ — DT9824 при подключенном ФД в фотовольтаическом и фотодиодном режиме за 24 ч. DT9824 применяется для регистрации сигналов с ФД в МПЛИ, и в данном случае необходима оценка величины шумовой составляющей сигнала при светоизолированных ФД. Для проведения эксперимента был собран лабораторный стенд, схема которого показана на рис. 14.

Два светоизолированных фотодиода включены соответственно в фотовольтаическом (ФД PD1) и фотодиодном (ФД PD2,  $U_{\text{батареи}} = 3$  В) режимах с сопротивлениями (14,9 или 240 кОм). Выбор величины сопротивлений соответствует номиналам, уста-

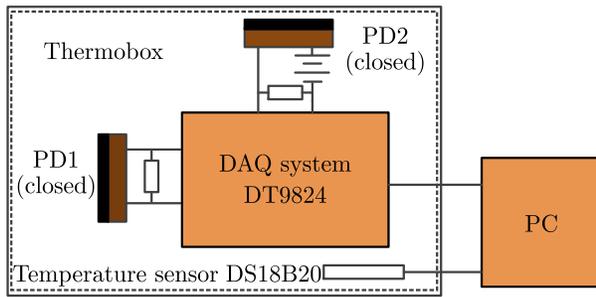


Рис. 14. Схема эксперимента по измерению шума канала DAQ-системы при подключенных ФД в двух режимах работы

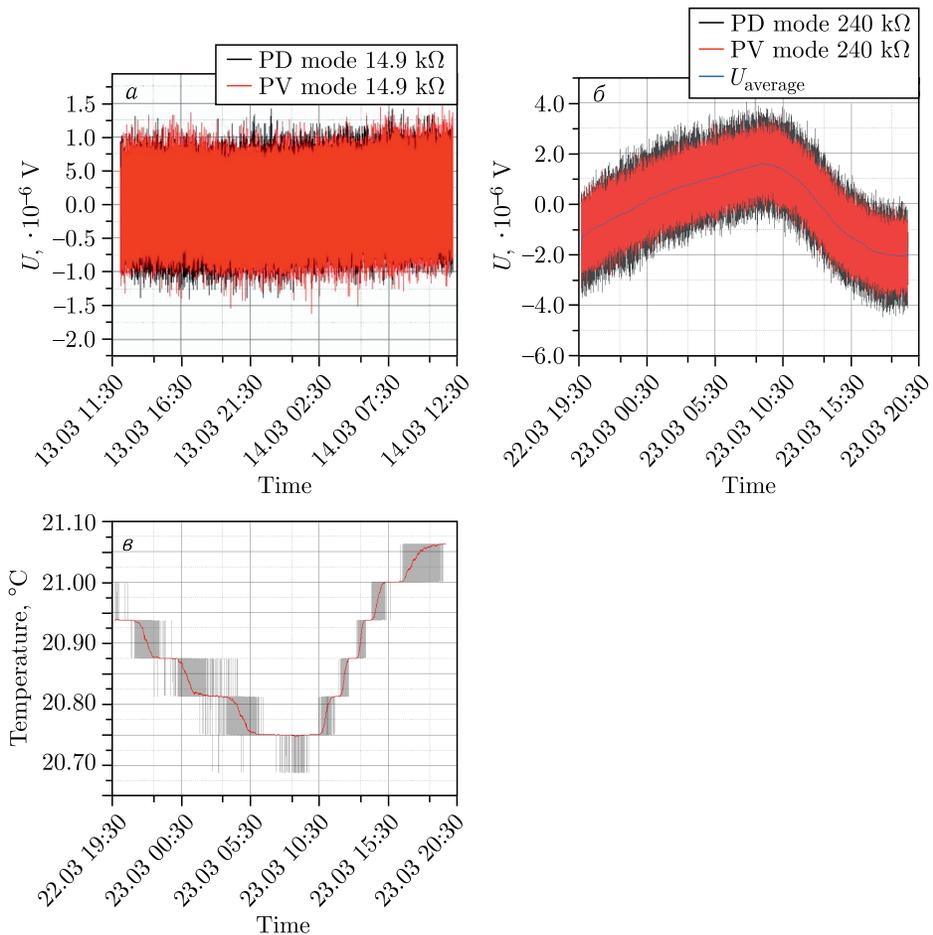


Рис. 15 (цветной в электронной версии). Изменение напряжения за 24 ч при фотовольтаическом и фотодиодном режимах на сопротивлении 14,9 кОм (а); 240 кОм (б). в) Изменение температуры внутри корпуса с экспериментальной установкой

Таблица 1. Сравнение показателей линейности для четырех образцов ФД

Сопротивление $R$ , кОм	$P \pm \sigma P$ (мВт), соответствующее $U_{\text{max}}/U_{\text{max}} \pm \sigma U$ (В) в линейной области			
	S12915-1010R	S12915-66R	FDS-100	S3204-08
Фотовольтаический режим				
0,979	(0,817 ± 0,0019) мВт (0,368 ± 1,26 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,987 ± 0,0017) мВт (0,4 ± 6,3 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(1,066 ± 0,0018) мВт (0,294 ± 9 · 10 <sup>-6</sup> ) В	(0,498 ± 0,0017) мВт (0,228 ± 2,63 · 10 <sup>-5</sup> ) В
2,17	(0,36 ± 0,001) мВт (0,359 ± 4,8 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,436 ± 0,0017) мВт (0,388 ± 7,36 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,459 ± 0,0021) мВт (0,282 ± 1,32 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,184 ± 0,0019) мВт (0,186 ± 1,11 · 10 <sup>-5</sup> ) В
5,07	(0,146 ± 9 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,343 ± 2,13 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,172 ± 0,0018) мВт (0,356 ± 8,38 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,183 ± 0,002) мВт (0,26 ± 1,64 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,071 ± 4 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,169 ± 6,4 · 10 <sup>-6</sup> ) В
9,95	(0,071 ± 3 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,323 ± 1,21 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,09 ± 3 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,36 ± 1,247 · 10 <sup>-4</sup> ) В	0,084 ± 3 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,235 ± 6,2 · 10 <sup>-6</sup> ) В	(0,033 ± 2 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,153 ± 1,132 · 10 <sup>-4</sup> ) В
14,9	(0,046 ± 5 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,313 ± 1,642 · 10 <sup>-4</sup> ) В	(0,051 ± 5 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,317 ± 6,46 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,054 ± 2,8 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,225 ± 1,56 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,022 ± 2,3 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (0,156 ± 3,72 · 10 <sup>-5</sup> ) В
Фотодиодный режим				
9,95	(0,737 ± 0,0019) мВт (3,436 ± 9,307 · 10 <sup>-4</sup> ) В	(0,764 ± 0,0016) мВт (3,446 ± 8,79 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(1,061 ± 0,0013) мВт (3,329 ± 3,37 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,674 ± 0,0017) мВт (3,281 ± 2,309 · 10 <sup>-4</sup> ) В
14,9	(0,497 ± 0,0016) мВт (3,454 ± 7,77 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,505 ± 0,0016) мВт (3,418 ± 1,116 · 10 <sup>-4</sup> ) В	(0,706 ± 0,0014) мВт (3,329 ± 6 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,446 ± 0,0015) мВт (3,256 ± 5,941 · 10 <sup>-4</sup> ) В
237	(0,029 ± 2 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (3,18 ± 5,333 · 10 <sup>-4</sup> ) В	(0,031 ± 2,2 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт 3,28 ± 1,161 · 10 <sup>-4</sup> В	(0,044 ± 3 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (3,215 ± 1,682 · 10 <sup>-4</sup> ) В	(0,028 ± 2 · 10 <sup>-4</sup> ) мВт (3,129 ± 0,001) В
1000	(0,007 ± 1,8 · 10 <sup>-5</sup> ) мВт (2,897 ± 1,258 · 10 <sup>-4</sup> ) В	(0,006 ± 1,6 · 10 <sup>-5</sup> ) мВт (2,541 ± 1,244 · 10 <sup>-4</sup> ) В	(0,01 ± 1,8 · 10 <sup>-5</sup> ) мВт (2,762 ± 9,03 · 10 <sup>-5</sup> ) В	(0,007 ± 1,5 · 10 <sup>-5</sup> ) мВт (3,167 ± 1,094 · 10 <sup>-4</sup> ) В

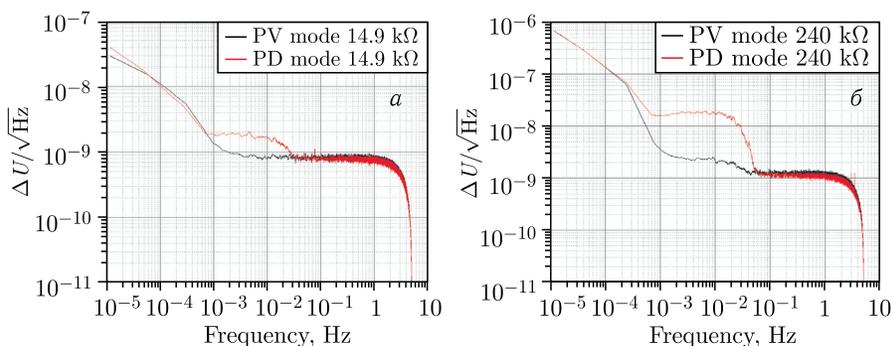


Рис. 16. Фурье-анализ по данным рис. 15

новленным в МПЛИ на референсных и сигнальных ФД. Фотодиоды подключаются к двум каналам системы сбора данных DT9824, которая передает данные на ПК. Частота оцифровки была установлена на уровне 10 Гц. DT9824 с ФД размещалась в термоизоляционном металлическом корпусе, температура в котором измерялась цифровым датчиком DS18B20. За сутки были получены данные, которые представлены на рис. 15.

На рис. 15 представлены графики переменной составляющей напряжения на сопротивлении в фотовольтаическом и фотодиодном режимах по времени при сопротивлении 14,9 кОм (рис. а) и 240 кОм (рис. б), а также изменение температуры внутри корпуса экспериментальной установки (рис. в) за 24 ч. Величины стандартных отклонений и размаха сигнала представлены в табл. 1. Величины размаха шумовых сигналов при сопротивлении 240 кОм в 2–3 раза больше, чем при сопротивлении 14,9 кОм.

Также на рис. 15, б, при сопротивлении 240 кОм, наблюдается температурный дрейф. Обычно узлы схемы с высоким импедансом имеют повышенное напряжение теплового шума и более подвержены влиянию электромагнитных помех. Поскольку дополнительно производилось измерение температуры, на рис. 15, в показан график температурных данных. При сравнении температурных данных с данными шумовых сигналов наблюдается отрицательная корреляционная связь. На рис. 15, б синим цветом показана кривая « $U_{average}$ », полученная с помощью фильтрации шумовых сигналов усредняющим фильтром. Если взять отношение изменения сигналов на линейных участках  $\Delta U_{average}$  к изменению температуры  $\Delta T$  на тех же участках, то данное отношение составит  $-63$  мкВ/°С.

На рис. 16, а, б показаны результаты фурье-анализа по данным рис. 15, а, б. При фотодиодном режиме работы наблюдается повышение амплитуды в диапазоне частот  $8 \cdot 10^{-4}$ – $3 \cdot 10^{-2}$  Гц по сравнению с фотовольтаическим режимом. На рис. 16, а видны пики на частоте 0,078 Гц, а на рис. 16, б — пики с малой амплитудой на частотах 3 и 3,5 Гц.

### СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧЕТЫРЕХ ОБРАЗЦОВ ФД

Кроме ФД Hamamatsu S12915-1010R, описанные выше эксперименты по определению линейности в двух режимах работы были разработаны для ФД Hamamatsu

Таблица 2. Сравнение показателей шума канала DT9824 при четырех подключаемых образцах ФД

Режим работы	Сопротивление $R$ , кОм	Размах амплитуды шума (peak-to-peak) $\pm \sigma$ (СКО) по данным за 24 ч, мкВ			
		S12915-1010R	S12915-66R	FDS-100	S3204-08
Фотовольтаический	14,9	$3,1 \pm 0,3$	$3,02 \pm 0,32$	$3,06 \pm 0,31$	$3,02 \pm 0,31$
	240	$7,53 \pm 1,3$	$8,04 \pm 1,17$	$5,9 \pm 0,66$	$6,07 \pm 0,72$
Фотодиодный	14,9	$2,94 \pm 0,31$	$3,1 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,3$	$3,02 \pm 0,31$
	240	$8,7 \pm 1,4$	$12,2 \pm 1,07$	$6,78 \pm 0,97$	$7,53 \pm 0,11$

S12915-66R [13], Thorlabs FDS-100 [14] и Hamamatsu S3204-08 [15]. При измерениях световых характеристик ФД с малой площадью (S12915-66R и FDS-100) после делительного куба была установлена линза (см. рис. 5), которая фокусирует регистрируемое излучение не на всю площадь светочувствительной области, а только на небольшой участок. Это может приводить к насыщению данного участка светочувствительного слоя при определенном потоке излучения [16].

Основные характеристики четырех ФД приведены в приложении, а результаты исследования линейности для них — в табл. 1. Ошибка по величинам  $U$  и  $P$  — средняя величина стандартных отклонений в области точки максимальной границы линейного диапазона, рассчитанных по каждой выборке из 30 значений (всего 50 выборок, общее количество значений 1500).

В табл. 2 приведены показатели шума для четырех образцов ФД. Как видно из табл. 2, при сопротивлении нагрузки 240 кОм показатели шума при фотодиодном режиме в среднем больше в 2,5 раза, чем при сопротивлении 14,9 кОм.

## СРАВНЕНИЕ ДВУХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ФОТОДИОДОВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ИХ В МПЛИ

В МПЛИ существует две группы каналов — сигнальные (для лучей, отраженных от поверхности жидкости) и референсные (для лучей, не попадающих на жидкость). Мощность сигнальных лучей меньше мощности референсных в  $\sim 25$  раз. В каждой группе есть 2 типа каналов для регистрации смещения лазерного луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях (рис. 17).

Для проверки обоих режимов работы фотодиодов в МПЛИ ФД горизонтального сигнального канала были подключены в фотодиодном режиме, а ФД вертикального сигнального — в фотовольтаическом. Получены данные за 24 ч, после чего производилась калибровка МПЛИ и рассчитывались калибровочные коэффициенты соотношения вольтовых сигналов МПЛИ и углов наклона в горизонтальной и вертикальной плоскостях. После обработки полученных данных был построен график угловых колебаний земной поверхности при двух режимах работы ФД.

Для сравнения на рис. 18 показана выборка из суточных данных, содержащая физический сигнал с частотой 2,77 Гц, предположительно от прохождения электрички — в данном случае наблюдается совпадение события по временной шкале с расписанием

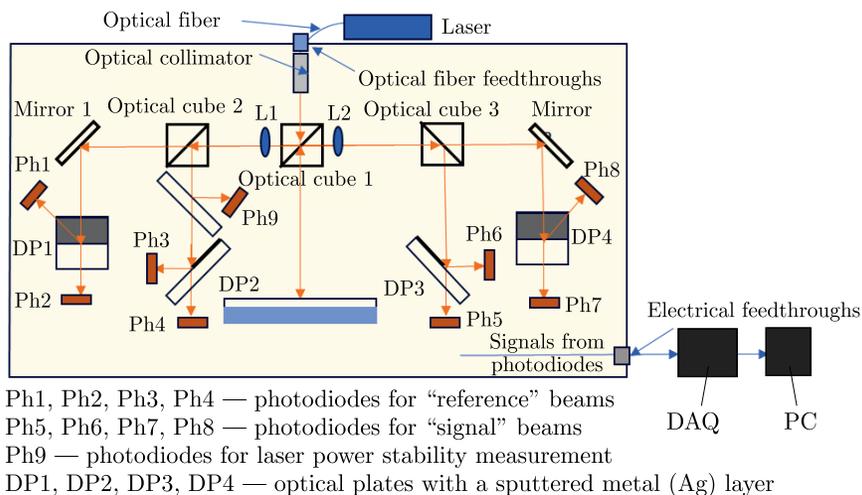


Рис. 17. Схема МПЛИ

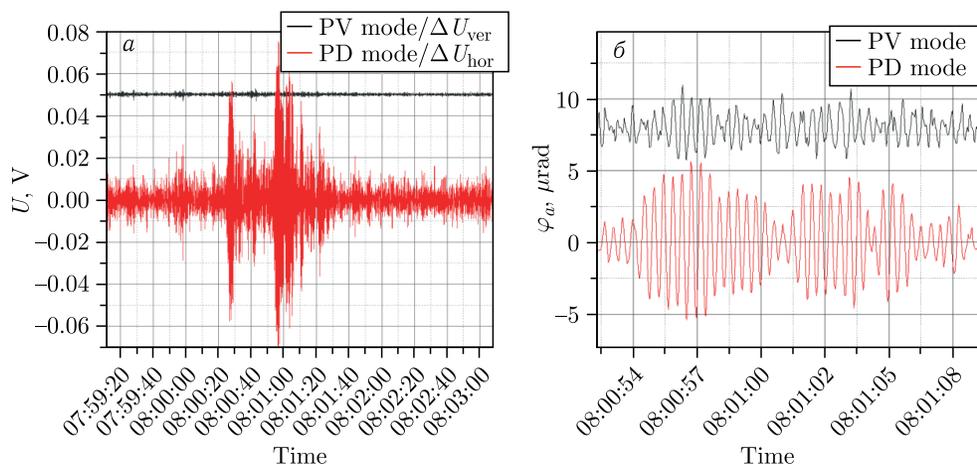


Рис. 18. Измерения угловых колебаний земной поверхности при разных режимах работы ФД: а) сигнал в вольтах после обработки; б) сигнал в микро радианах

проезда транспорта. Как видно из графика, уровень шумовой составляющей при фотодиодном режиме меньше по амплитуде, чем при фотовольтаическом. Это позволяет регистрировать колебания с малой амплитудой, которые в фотовольтаическом режиме находятся ниже уровня шума. При фотовольтаическом режиме наблюдается более явное наложение шума на основной сигнал.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим преимущества и недостатки двух режимов работы ФД.

Фотодиодный режим может использоваться при прецизионных измерениях малых потоков лазерного излучения, где требуется высокое разрешение сигнал–шум.

В относительной шкале величина постоянной составляющей сигнала больше, чем в фотовольтаическом режиме за счет напряжения смещения. Его величина ограничивается максимальным обратным напряжением, прикладываемым к фотодиоду. Работа в фотодиодном режиме характеризуется большими значениями темнового тока, величина которого зависит от материала полупроводника, приложенного обратного напряжения и изменения температуры. Также недостатками этого режима является возможный шум, добавляемый от источника напряжения смещения.

Фотовольтаический режим имеет меньшие собственные шумы в отсутствие необходимости применения внешнего источника смещения. Недостатками являются малая область линейности отклика и, как следствие, меньшая чувствительность. Работа в данном режиме, как правило, используется в солнечных батареях.

От изменения температуры зависят сигналы в обоих режимах работы ФД. Для получения предельных характеристик шума ФД нужна долговременная термостабилизация.

В МПЛИ все фотодиоды включены в фотовольтаическом режиме, для регистрации сигналов применяется DAQ-система, содержащая прецизионные 24-битные АЦП. В перспективе намечается переход к использованию фотодиодного режима, что позволит расширить диапазон амплитуды регистрируемых сигналов и при достижении отношения сигнал–шум  $\sim 1\%$  ( $10^{-2}$ ) использовать АЦП с меньшей разрядностью (14–16 бит вместо 24 бит). Стабильное напряжение смещения возможно получить от опорного источника напряжения, который должен будет располагаться на отдельной плате с АЦП. Опорный источник питания должен иметь величину дрейфа в рамках стабильности напряжения  $\sim 10^{-5}$  в относительном уровне.

В тех случаях, когда МПЛИ размещается в месте, где отсутствует сеть 220 В, встает вопрос об использовании автономного источника напряжения смещения, при использовании которого в фотодиодном режиме в МПЛИ важно рассчитать срок его службы [17]. При длине волны 635 нм токовая чувствительность ФД S12915-1010R равна 0,45. При общей мощности излучения  $\sim 2$  мВт используемой МПЛИ для «сигнальных» лучей, где средняя мощность излучения составляет  $\sim 1\%$  от общей, ток ФД будет равен  $\sim 9$  мкА. Для «референсных» лучей средняя мощность излучения составляет  $\sim 20\%$ , и, соответственно, ток ФД равен  $\sim 180$  мкА. Учитывая количество «сигнальных» и «референсных» ФД в МПЛИ (см. рис. 17), рассчитаем емкость источника напряжения смещения с учетом годовой эксплуатации:

$$Q = 8760 \text{ ч} (4 \cdot 0,009 \text{ мА} + 4 \cdot 0,18 \text{ мА}) = 6622 \text{ мА} \cdot \text{ч}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены эксперименты с ФД Hamamatsu (S12915-1010R, S12915-66R, S3204-08) и Thorlabs (FDS-100) по определению линейного диапазона СВХ в фотовольтаическом и фотодиодном режимах при разных сопротивлениях нагрузки. При фотовольтаическом режиме максимальный измеренный уровень линейного диапазона лежит в диапазоне 0,3–0,4 В, при фотодиодном — ограничивается напряжением источника смещения.

Выполнено измерение шума каналов DAQ-системы МПЛИ со светоизолированными ФД в двух режимах работы. Влияние изменения внешней температуры на сигналы

с ФД при 240 кОм составило  $\sim -63$  мкВ/°С. При фотодиодном режиме в диапазоне  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  Гц повышение амплитудного уровня спектра шума по сравнению с фотovoltaическим режимом при 14,9 кОм составило  $\sim$  в 1,3 раза, при 240 кОм — в 8,4 раза.

Проведен эксперимент по применению обоих режимов работы ФД в МПЛИ при измерениях колебаний земной поверхности в двух ортогональных направлениях. В фотovoltaическом режиме во временной области прослеживается наложение шумовой составляющей на основной сигнал, амплитуда «шумовой дорожки» больше в 1,8 раза по сравнению с фотодиодным режимом.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 3. Основные параметры используемых фотодиодов

Параметр	S12915-1010R	S12915-66R	FDS-100	S3204-08
Тип	Si	Si	Si PIN	Si PIN
Емкость, пФ	13000	4000	24	130
Площадь фоточувствительной области, мм <sup>2</sup>	100	33	13	324
Эквивалентная мощность шума, Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$	$2,8 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-15}$	$1,2 \cdot 10^{-14}$	$6,6 \cdot 10^{-14}$
Темновой ток	200 пА	50 пА	1 нА	20 нА
Максимальное обратное напряжение, В	30	30	25	100

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyer E. Atomic Force Microscopy // Prog. Surf. Sci. 1992. V. 41, Iss. 1. P. 3–49.
2. Dwivedi S., Vishwakarma M., Soni A. Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review // Materials Today: Proc. 2018. V. 5. P. 3690–3698.
3. Azaryan N., Budagov J., Lyablin M., Pluzhnikov A., Di Girolamo B., Gayde J.-Ch., Mergelkuhl D. The Compensation of the Noise Due to Angular Oscillations of the Laser Beam in the Precision Laser Inclinator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 6. P. 930–938.
4. Azaryan N., Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Pluzhnikov A., Seletsky A., Trubnikov G., Di Girolamo B., Gayde J.-C., Mergelkuhl D. The Seismic Angular Noise of an Industrial Origin Measured by the Precision Laser Inclinator in the LHC Location Area // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 4. P. 343–353.
5. Atanov N. V., Bednyakov I. V., Budagov Yu. A., Glagolev V. V., Klemeshov Yu. V., Krasnoперov A. V., Kuzkin A. M., Lyablin M. V., Nia R. V., Pluzhnikov A. A., Polyakov K. D., Seletsky A. A., Trubnikov G. V., Di Girolamo B. Compact Precision Laser Inclinator: Measurement of Signals and Noise // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54, Iss. 4. P. 788–800.
6. Di Girolamo B., Budagov J. A., Lyablin M. V., Vlachos S. // The Precision Laser Inclinator: Proc. of the 12th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2021), online, May 24–28, 2021. P. 3305–3308.

7. Azaryan N., Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Pluzhnikov A., Seletsky A., Trubnikov G., Di Girolamo B., Gayde J.-C., Mergelkuhl D. Professional Precision Laser Inclinometer: The Noises Origin and Signal Processing // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 3. P. 264–276.
8. Azaryan N., Budagov J., Vernikovskiy V., Lyablin M., Pluzhnikov A., Smykovskiy O., Di Girolamo B., Gayde J.-Ch., Mergelkuhl D. The Minimization of the Long Term Noises of the 24-Bit ADC for the Precision Laser Inclinometer // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18., No. 7. P. 773–785.
9. Lyablin M. V., Klemeshov Yu. V. Laser Power Stabilization in a Precision Laser Inclinometer // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 2. P. 140–155.
10. Жигарев А. А., Шамаева Г. Г. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1982. 463 с.
11. ГОСТ Р 59607-2021. Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик: дата введения 2021.10.12. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 58 с.
12. <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S12915-1010R.html>
13. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S12915-66R.html>
14. Lasers, Fiber Optics and Imaging Products. <https://www.gophotonics.com/products/photodiodes/thorlabs-inc/56-46-fds100>.
15. <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S3204-08.html>
16. Скворцов А. Ю., Борисов В. И. Световая характеристика фотодиода в вентильном и фотодиодном режимах включения // 48-я студен. научно-техн. конф. Белорус.-Рос. ун-та: Материалы конф. Белорус.-Рос. ун-т, 2012. С. 181.
17. Азимут Фотоникс — оптоэлектронные компоненты. <https://azimp.ru/articles/tech/39400/>.

Получено 10 февраля 2023 г.