

## РЕАЛИЗАЦИЯ СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ СИГНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА

М.С. Матусевич, С.С. Гринько, А.А. Скребец, М.В. Лобанок,  
Е.В. Кадола

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*  
*E-mail: [lobanokMV@bsu.by](mailto:lobanokMV@bsu.by)*

Предложено программное и схемотехническое решение на базе микроконтроллера ESP32 для автоматизации измерений шумовых и сигнальных характеристик лавинного фотодиода. В тестовом режиме проведен анализ зависимости выходного сигнала фотодиода APD500um от нагрузочного сопротивления с целью увеличения коэффициента лавинного умножения.

**Ключевые слова:** микроконтроллеры; лавинный фотодиод; нагрузочное сопротивление.

Лавинные фотодиоды (ЛФД) являются одними из ключевых компонентов в современных оптических системах, применяемых в медицине и исследовательских целях. Способность лавинных фотодиодов к внутреннему усилению сигнала, высокие квантовая эффективность регистрации света (для Avalanche PhotoDiode более 50%) и временное разрешение (не хуже 1 нс) делает их незаменимыми для регистрации малых интенсивностей излучения [1]. Однако с увеличением усиления сигнала возрастает и уровень шума, что может снижать общую производительность прибора. Поэтому глубокое понимание шумовых и сигнальных характеристик ЛФД необходимо для оптимизации их работы и обеспечения высокой точности и надежности в различных приложениях. С другой стороны, автоматизация рутинных измерений выходного сигнала и вольт-амперных характеристик фотоприемников на основе перспективных гетероэпитаксиальных структур является важной задачей для развития оптоэлектроники.

Предложенное нами аппаратно-программное решение позволяет исследовать зависимость выходного сигнала от нагрузочного сопротивления детектора. При этом, применение микроконтроллера ESP32 позволило реализовать удаленное подключение и автоматическую запись измерений. Последующий анализ данных проводился с помощью MATLAB.

Принцип работы установки для изучения сигнальных и шумовых характеристик фотодетекторов основан на том, что оптическое излучение от He-Ne лазера мощностью 1мВт и длиной волны  $\lambda = 0,63$  мкм, проходит через модулятор и регулируемую систему ослабителей, а затем попадает на фотодиод. Ослабленный до необходимого уровня световой поток направляется на исследуемый фотоприемник и фокусируется на его рабо-

чей площадке с помощью объектива. Электрический режим работы фотоприемника устанавливается с помощью регулируемого источника напряжения. Режим счета фотонов реализуется по схеме пассивного гашения лавины [2], когда ЛФД включается последовательно с токоограничивающим резистором  $R$ . В качестве нагрузочного резистора включается модуль программируемого магазина сопротивлений для измерения зависимости сигнала от нагрузочного сопротивления. От источника питания на лавинный фотодиод подается напряжение питания близкое или превышающее напряжение пробоя  $p$ – $n$ -перехода. Если при таком напряжении в область микроплазменного пробоя  $p$ – $n$ -перехода попадает фото- или термогенерированный носитель заряда, то он инициирует лавинный пробой.

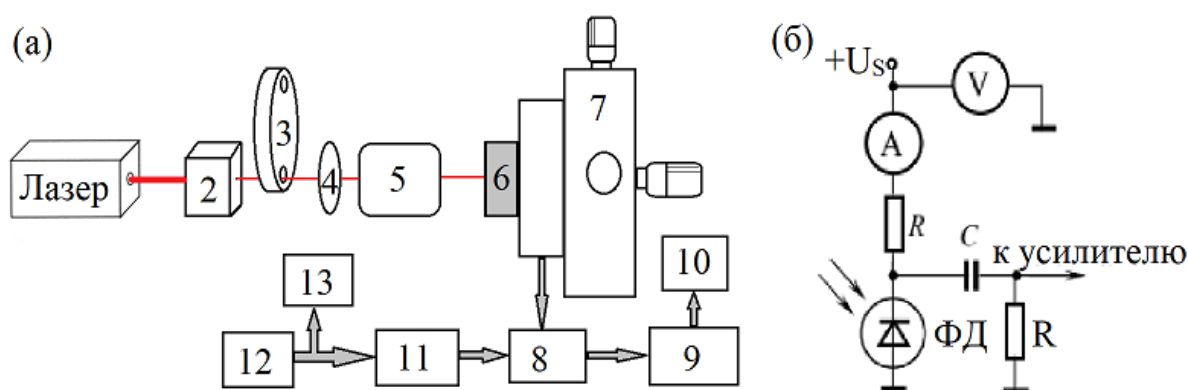


Рис. 1. Структурная схема установки для исследования сигнальных характеристик полупроводниковых фотоприемников (а) и схема включения фотодиода (б):

1 – лазер; 2 – система оптических ослабителей; 3 – диск механического модулятора; 4 – фокусирующая линза; 5 – микроскоп; 6 – исследуемый фотоприемник; 7 – трехкоординатный оптический столик; 8 – электрическая цепь фотоприемника; 9 – измерительный усилитель; 10 – осциллограф; 11 – амперметр; 12 – источник питания фотоприемника; 13 – вольтметр

Оптическое излучение преобразуется фотоприемником в электрический сигнал, который поступает на вход измерительного усилителя. В качестве последнего используется усилитель селективный У2-8. Контроль формы сигнала, с выхода усилителя, осуществляется с помощью осциллографа.

В данном случае чувствительность ЛФД  $P$  работающего в фотодиодном режиме рассчитывается из ВАХ фотодиода:

$$I = I_d \left( \exp \left[ \frac{e(U_R - U_S)}{kT} \right] - 1 \right) - I_{ph}, \quad (1)$$

где  $U_S$  – напряжение источника питания,  $U_R$  – падение напряжения на сопротивлении нагрузки  $U_R = IR$ ,  $I_{ph}$  – фототок ЛФД,  $I_d$  – темновой ток, роль которого в данном случае играет обратный ток  $p$ – $n$ -перехода.

Если абсолютная величина разности  $U_S - U_R \gg kT/e$ , а фототок выражается через мощность падающего излучения и токовую чувствительность фотодиода  $I_{ph} = SP$ , то напряжение на нагрузке фотодиода будет:

$$U_R = (I_d + SP)R. \quad (2)$$

Из формулы (2) можно определить дифференциальную вольтовую чувствительность по следующей формуле:

$$(S_U)_U = (I_d + SP)R. \quad (3)$$

Переключение между нагрузочными резисторами в модуле программируемого магазина сопротивлений реализовано по классической схеме декадного магазина с помощью герметичных реле, управляемых через микроконтроллер. Измерение выходного сигнала ЛФД происходит через 24-битное АЦП, затем полученный массив данных отправляются на компьютер для дальнейшей обработки. Чтобы подключить все реле к микроконтроллеру ESP используются дополнительные контроллеры Atmel 328, к которым подключаются реле. В свою очередь, внешнее АЦП подключено напрямую к ESP32 для лучшего быстродействия. Такая связка операционного усилителя и АЦП для измерения спектральной зависимости фототока гетероструктур (порядка десятка нА) [3]. Помимо реле, к контроллеру Atmel 328 можно подключить модуль MAX 6675 с термопарой, а также транзистор с элементом Пельте для термостабилизации фотодиода. Структурная схема измерителя представлена на рис. 2. Механический модулятор сигнала совместно с оптическим датчиком, подключенным к контроллеру, позволяет реализовать синхродетектирование, что позволяет повысить точность измерений и получить данные о фотоотклике приборной структуры [3].



Рис. 2. Структурная схема измерителя

Алгоритм работы измерителя включает следующие процедуры: Вначале при отключенном питании лазера производятся измерения темного тока. Далее включается лазер и производится серия измерений

выходного сигнала фотодиода с поочередным переключением нагрузочного сопротивления.

Итоговым результатом является передаваемые на компьютер среднеарифметическое значение  $U_R$  и  $I_{ph}$  за  $N$  измерений, которые в дальнейшем можно использовать для расчета чувствительности по формуле (3). На рис. 3 приведена зависимость выходного сигнала лавинного фотодиода APD500um от нагрузочного сопротивления.

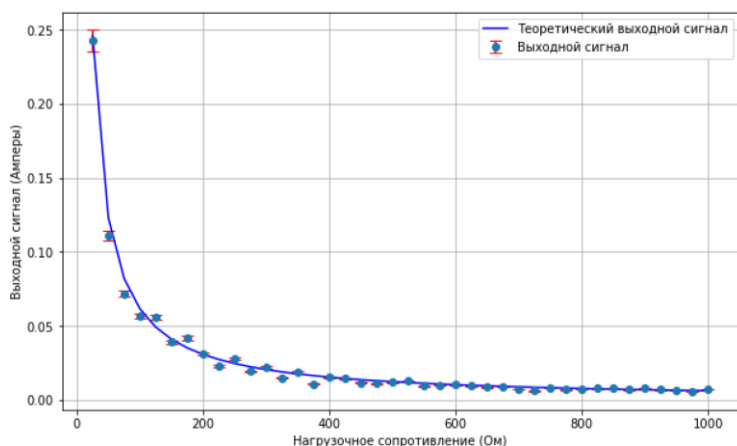


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала лавинного фотодиода от нагрузочного сопротивления

Из приведенного графика следует, что при увеличении сопротивления нагрузки, выходной сигнал фотодиода (фототок) нелинейно уменьшается, что говорит о снижении коэффициента лавинного умножения. Вероятно, это связано увеличением времени зарядки внутренней емкости фотодиода и тем самым снижением скорости реакции на изменение светового сигнала.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, О.В.Кочергина, Т.А. Матковская. Характеристики германиевых лавинных фотодиодов в режиме счета фотонов. Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2022. Т. 67, №2. С. 222–229.
2. Многоканальная квантовая система волоконно-оптической безопасной связи. / О.К. Барановский [и др.] // Укр. науч. журн. информ. технологий. 2016. Т. 22, №2. С. 156–162.
3. М.В. Лобанок, Н.В. Полонский, П.И. Гайдук. Фотозлектрические характеристики гетероструктур SiC/Si. Журнал прикладной спектроскопии. 2023. №5 (90). С.775–779.