

Метод измерения параметров быстродействия фотоприёмников

С. Б. Бычков¹, И. В. Волков¹, А. И. Глазов¹, И. С. Королёв¹,
К. Б. Савкин¹, Н. П. Хатырев²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Российская Федерация, e-mail: vniofi@vniofi.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: office@vniiftri.ru

Рассмотрены проблемы, возникающие при измерении параметров быстродействия современных широкополосных фотоприёмных устройств методом, основанным на результатах измерений времени нарастания переходной характеристики. Предложен метод количественной оценки быстродействия, использующий результаты определения импульсной характеристики исследуемого фотоприёмника. Источником испытательных сигналов служит импульсный волоконный лазер, работающий в режиме самосинхронизации мод и обеспечивающий генерацию сверхкоротких (около 3 пс) оптических импульсов. Представлена измерительная установка, позволяющая реализовать предложенный метод измерения. Приведены некоторые результаты экспериментального апробирования метода.

Ключевые слова: фотодиод, фотоприёмник, быстродействие фотоприёмника, импульсная характеристика, амплитудно-частотная характеристика, пикосекундный импульсный лазер.

Введение. Быстродействующие фотоприёмные устройства (оптоэлектронные преобразователи) широко распространены в волоконно-оптических системах связи, системах лазерной дальнометрии и локации, спутниковых лазерных дальнометрах, радиофотонных системах. Для разработчиков и производителей этих устройств крайне важным является знание динамических характеристик фотоприёмников. Под фотоприёмниками здесь и далее понимаются системы, на оптический вход которых подаётся оптический (в том числе модулированный) сигнал, при этом сигнал электрического выхода пропорционален мощности входного оптического сигнала. В качестве преобразователя оптической мощности в электрический сигнал в таких системах могут использоваться *pin*-фотодиоды, лавинные полупроводниковые фотодиоды, а также некоторые вакуумные и пироэлектрические приёмники.

К параметрам быстродействия (динамическим характеристикам фотоприёмников) согласно действующему ГОСТ 17772-88 (СТ СЭВ 3789-82) «Приёмники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприёмные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик» относят время нарастания и спада выходного сигнала при входном «ступенчатом» оптическом импульсе. Кроме того, в технической документации на фотоприёмные устройства часто приводят их частотные характеристики или нормированные значения неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания и ширины полосы пропускания.

Наиболее распространенным критерием быстродействия фотоприёмников является время нарастания переходной

характеристики фотоприёмника в диапазоне 0,1–0,9 установившегося значения. Для этого на вход фотоприёмника подаётся оптический импульс прямоугольной формы, длительность которого многократно превышает предполагаемое время нарастания выходного сигнала фотоприёмника. Время нарастания переднего фронта этого испытательного импульса должно составлять, по крайней мере, не более 30 % ожидаемого времени нарастания переходной характеристики испытываемого фотоприёмника (по ГОСТ 17772-88). Однако считать, что изменение мощности оптического импульса во времени имеет прямоугольную или хотя бы трапецидальную форму можно только с определённым приближением. Время нарастания современных фотоприёмников может достигать до десятков и даже до единиц пикосекунд. При этом неизбежно возникает вопрос о том, как контролировать параметры формы испытательного лазерного импульса и, в частности, длительность его переднего фронта. Для этого потребуются более быстродействующие приёмники, время нарастания переходной характеристики которых тоже необходимо измерять. Возникает замкнутый круг. Заметим, что для быстродействующих фотоприёмников с постоянной времени менее 20 пс требуется более строгое соблюдение прямоугольности формы импульса задающего оптического генератора, а осуществление этого требования на практике оказывается сложной задачей. В противном случае неидеальность формы оптического импульса (например, выброс на переднем фронте) может привести к уменьшению измеренного значения времени нарастания переходной характеристики приёмника по сравнению с его действительным значением.

Таким образом, результат измерений будет недостоверным и количественная оценка быстродействия приёмника излучения будет необоснованно увеличена.

Для систем радиофотоники, в которых используется лазерное излучение, модулированное сверхвысокочастотным (СВЧ) сигналом, такой критерий, как время нарастания переходной характеристики, обычно не применяется. Более подходящей характеристикой является неравномерность АЧХ фотоприёмника.

Таким образом, существуют различные области применения быстродействующих фотоприёмников, для которых стандартизированные методы измерений динамических характеристик не реализуемы на практике.

В настоящей работе предложен метод, позволяющий получить количественную оценку быстродействия высокоскоростных приёмников излучения и лишённый описанных недостатков.

Предложенный метод измерения параметров быстродействия фотоприёмников. В теории линейных систем импульсной характеристикой называют реакцию системы при воздействии на её вход сигнала, описываемого единичной импульсной функцией (дельта-функцией Дирака). Эта функция имеет нулевое значение во всех точках, кроме одной, в которой её значение стремится к бесконечности, а определённый интеграл этой функции равен единице. Такой подход можно применить и по отношению к быстродействующим приёмникам оптического излучения, работающим в линейном ненасыщенном режиме. При подаче на вход фотодиода ультракороткого лазерного импульса, моделирующего дельта-функцию Дирака, на выходе будет наблюдаться импульс напряжения некоторой длительности, зависящей от быстродействия фотоприёмника. Под длительностью импульсной характеристики фотоприёмника будем понимать длительность электрического импульса на выходе приёмника, равную половине максимума амплитудного значения импульса.

В рассматриваемом случае для получения достоверного результата критически важным параметром является только длительность испытательного оптического импульса, которая должна быть значительно (хотя бы на порядок) меньше ожидаемой длительности импульсной характеристики приёмника. В отличие от метода измерений длительности фронта переходной характеристики, предлагаемый метод позволяет абстрагироваться от динамики флуктуаций мощности лазерного излучения в пределах длительности сверхкоротких испытательных импульсов. Сверхкороткий испытательный лазерный импульс имеет только один значимый динамический параметр – длительность. Получить верхнюю оценку для длительности сверхкоротких лазерных импульсов

можно с помощью широко используемых для этих целей автокорреляторов [1].

Предлагаемый метод стал актуальным и практически целесообразным в связи со значительными успехами, достигнутыми в последние десятилетия в области создания волоконно-оптических лазеров, работающих в режиме самосинхронизации мод. Такие лазеры могут генерировать последовательности оптических импульсов, длительность которых не превышает нескольких пикосекунд, и давно уже не являются уникальными на рынке лазерной техники.

Основным допущением в предлагаемом методе является линейность режима работы фотоприёмников при входном сверхкоротком лазерном импульсе. Однако это допущение справедливо при известном ограничении энергии испытательных импульсов. Область рабочих режимов источника сверхкоротких лазерных импульсов может быть достоверно установлена с помощью хорошо развитых методов измерений линейности преобразования приёмников излучения [2].

Описание измерительной установки. Для получения импульсных характеристик фотоприёмников и проведения измерений их длительностей, авторами настоящей статьи была разработана экспериментальная установка, состоящая из генератора сверхкоротких импульсов и регистрирующей аппаратуры. Для реализации стабильного импульсного режима работы в качестве генератора оптических импульсов создан иттербиевый волоконно-оптический лазер с линейным резонатором, генерирующий импульсное излучение на длине волны 1,03 мкм (близкой к длине волны неодимового лазера 1,06 мкм) длительностью импульсов порядка 3 пс. Генерация излучения лазером может происходить в режимах модулированной добротности (Q-switch) или самосинхронизации мод.

Схема лазера приведена на рис. 1. Требуемые параметры генерации лазерного излучения достигнуты с использованием режима пассивной самосинхронизации мод. Резонатор лазера состоит из зеркала 2 с напылённым

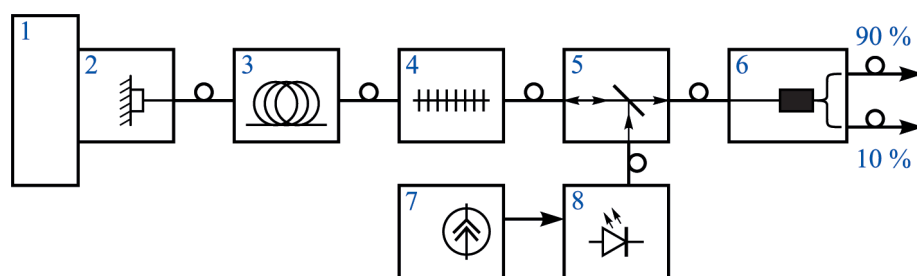


Рис. 1. Схема источника сверхкоротких лазерных импульсов:

1 – радиатор; 2 – зеркало с насыщенным поглотителем SESAM; 3 – оптическое волокно, легированное иттербием; 4 – брэгговская решётка; 5 – WDM-фильтр; 6 – волоконный разветвитель; 7 – драйвер лазерного диода; 8 – лазерный диод накачки

Fig. 1. The source of ultrashort laser pulses scheme:

1 – radiator; 2 – mirror with saturable absorber SESAM; 3 – ytterbium-doped optical fiber; 4 – Bragg grating; 5 – WDM filter; 6 – fiber splitter; 7 – laser diode driver; 8 – laser pump diode

полупроводниковым покрытием из InGaAs/InP (поглотитель SESAM – semiconductor saturable absorber mirror), поглощение которого насыщается лазерным излучением в резонаторе, и брэгговской решётки 4. Решётка, по сути, представляет собой зеркало для длины волны $\lambda=1,03$ мкм, и свободно пропускает все прочие длины волн. В качестве активной среды использовано оптическое волокно 3, легированное иттербием Yb. Накачка осуществляется мощным лазерным диодом с волоконным выходом, диод работает на длине волны 980 нм. Излучение лазерного диода проходит через спектральный WDM-фильтр (WDM – wavelength division multiplexer), содержащий диэлектрическое зеркало 5, и направляется в волокно 3. В этом волокне излучение поглощается активной примесью (атомами иттербия) и возникает спонтанное излучение. Часть спонтанного излучения с длиной волны 1,03 мкм отражается от зеркал резонатора и усиливается за счёт многократного прохождения через активную среду. Выбор длины волны осуществляется путём селективного отражения на длине волны 1,03 мкм брэгговской решётки, играющей роль одного из зеркал резонатора. С помощью драйвера 7 лазерного диода стабилизируется ток лазерного диода и регулируется выходная мощность излучения накачки.

Особенностью зеркала SESAM является зависимость его коэффициента отражения от интенсивности приходящего импульса. В течение одного периода резонатора – времени двойного прохода (туда и обратно вдоль резонатора)

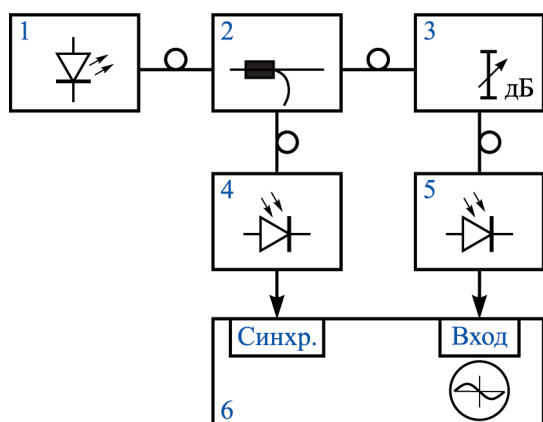


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения импульсных характеристик фотоприёмников:

1 – источник сверхкоротких лазерных импульсов; 2, 3 – волоконные оптические разветвитель и аттенуатор соответственно; 4 – фотоприёмное устройство, генерирующее синхроимпульсы; 5 – исследуемое фотоприёмное устройство; 6 – стробоскопический осциллограф

Fig. 2. The structural diagram of the installation for measuring the pulse characteristics of photodetectors:

1 – source of ultrashort laser pulses; 2, 3 – fiber optic splitter and attenuator, respectively; 4 – photodetector for generating clock pulses; 5 – investigated photodetector; 6 – stroboscopic oscilloscope

будет сформирован один импульс. Интенсивность оптических импульсов внутри резонатора при прохождении между зеркалами через активное волокно, легированное иттербием, будет неоднородной во времени. Максимальная интенсивность достигается в середине длительности импульса, а наименьшая – в начале и конце. Импульс внутри резонатора будет укорачиваться до тех пор, пока его длительность не будет ограничена шириной спектральной линии усиления иттербиевого волокна. Зеркало на основе брэгговской решётки частично пропускает падающее на него излучение с длиной волны 1,03 мкм, поэтому часть энергии каждого импульса выходит из резонатора, и проходя через WDM-фильтр, направляется на выход лазера. На выходе лазера расположен волоконный делитель мощности 6 с коэффициентом деления 90:10. Описанный способ обеспечивает режим пассивной синхронизации мод и является удобным способом формирования импульсов длительностью от сотен фемтосекунд до десятков пикосекунд. Применение зеркала с насыщающимся поглотителем SESAM позволяет реализовать в волоконном лазере механизм самозапуска пассивной синхронизации мод. Для отвода избыточного тепла от поглотителя SESAM служит радиатор 1.

Конструкция данного волоконного лазера позволяет изменять длину линейного резонатора, а вместе с ней и частоту следования импульсов. В рассматриваемом случае длина резонатора составляет 2 м, что обеспечивает частоту следования импульсов порядка 50 МГц. Средняя мощность излучения на выходе лазера, измеренная оптическим ваттметром, порядка 1,5 мВт.

Автокорреляционная функция импульсов, генерируемых установкой, получена с использованием автокоррелятора. Верхняя граничная оценка длительности импульсов лазера в режиме самосинхронизации мод составляла около 3 пс.

Значение пороговой мощности разрушения тестируемого фотоприёмника ограничивает среднюю мощность излучения и период следования импульсов измерительной установки. Энергия E одного импульса определяется отношением средней мощности P_{cp} на выходе лазерного источника к частоте f следования импульсов:

$$E = P_{cp} / f. \quad (1)$$

В предположении, что мощность импульса одинакова во времени, можно сделать грубую нижнюю оценку пиковой мощности $P_{имп}$ в импульсе:

$$P_{имп} = E / \tau, \quad (2)$$

где τ – длительность оптического импульса.

Средняя выходная мощность лазера составляет около 1,5 мВт, частота следования импульсов – 50 МГц. Тогда из формул (1), (2) получим максимальную мощность излучения в каждом импульсе $P_{имп} = 10$ Вт и энергию $E = 30$ пДж.

Для определения импульсной характеристики фотоприёмного устройства собрана установка, её схема приведена

на рис. 2. Волоконно-оптический лазер (источник сверхкоротких оптических импульсов) 1 генерирует оптические импульсы длительностью около 3 пс, которые затем поступают на волоконный делитель 2 оптической мощности. Один канал делителя подключается к быстродействующему фотоприёмному устройству ФПУ1 4, подключённому ко входу синхронизации стробоскопического осциллографа 6. Оптические импульсы, выходящие из второго выхода делителя 2, через оптический аттенюатор 3 поступают в тестируемое фотоприёмное устройство ФПУ2 5. Сигнал ФПУ2 поступает на измерительный вход стробоскопического осциллографа 6.

Таким образом, последовательность сверхкоротких оптических импульсов синхронно поступает в ФПУ1, ФПУ2, преобразуясь в последовательности электрических импульсов. Сигнал ФПУ2, близкий по форме к импульсной характеристике фотоприёмника, регистрируется стробоскопическим осциллографом. ФПУ1 выполняет функцию генерации синхросигналов для работы стробоскопического осциллографа.

ФПУ2 представляет собой фотодиодный модуль с InAsGa-фотодиодом с волоконным входом. Модуль имеет трансимпеданс 50 Ом, выход, согласованный на нагрузку 50 Ом, и внешнее питание. С помощью оптического аттенюатора достигается режим, когда оптический импульс не вводит фотодиод модуля в насыщение, т. е. фотодиод работает в линейном режиме, и его работа может быть описана с позиций теории линейных систем. Для фотодиодных фотоприёмников без активных элементов предел линейности обычно находится в районе 5 мВт. В общем случае перед началом работы на установке необходимо определить предел линейности конкретного фотоприёмника. Если максимальная мощность оптического импульса источника 10 Вт (как было показано выше), а предел линейности модуля 10 мВт, то вносимое ослабление аттенюатора должно быть не менее 30 дБ.

Характеристики ФПУ1 и ФПУ2 должны быть близкими. Линейный режим работы ФПУ1 не обязателен, но предпочтителен для уменьшения джиттера канала синхронизации. При этом ФПУ1 должен формировать импульс синхронизации достаточной для осциллографа амплитуды. При подключении фотоприёмников к осциллографу важно, чтобы соединения выполнялись как можно более короткими СВЧ-кабелями с малыми потерями на высоких частотах, фотоприёмные устройства, кабель и осциллограф должны быть согласованы.

Для сравнения результатов измерений использованы осциллографы двух типов: стробоскопический осциллограф DCA-X 86100D с модулем N1055 с полосой 50 ГГц и осциллограф прямого осциллографирования DSO-Z594A с полосой 59 ГГц (оба прибора производства Keysight technologies, США). Использование осциллографа прямого осциллографирования позволяет немного упростить схему измерительной установки, исключив из неё канал синхронизации (ФПУ1), а также устранить влияние джиттера синхросигнала, заметное на рассматриваемых частотах.

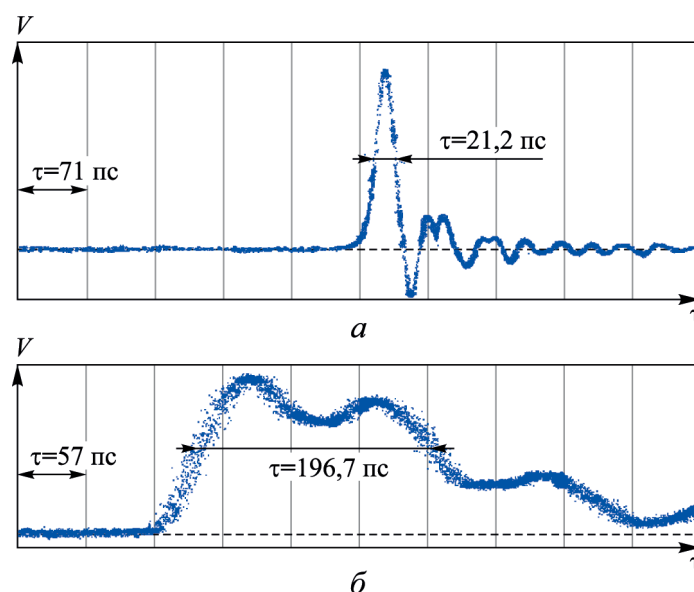


Рис. 3. Результаты измерений импульсной характеристики (осциллограммы) фотоприёмников ФПУ-А (а) и ФПУ-Б (б)

Fig. 3. The measurement results of the impulse response (waveform) of the photodetectors FPU-A (a) and FPU-B (b)

Заметим, что полученные двумя осциллографами импульсные характеристики и их длительности для одних и тех же фотоприёмников фактически не различались.

Описание и результаты эксперимента. Эксперименты состояли в измерениях длительностей импульсных характеристик двух быстродействующих фотоприёмников: ФПУ-А – фотоприёмника ДФДМШ40 (ООО НПФ «ДиЛаз», Россия) с полосой не менее 20 ГГц; ФПУ-Б – преобразователя измерительного ПР-3И (ВНИИОФИ, Россия) с полосой 1,5 ГГц. Осциллограммы импульсных характеристик, полученные на установке со стробоскопическим осциллографом, представлены на рис. 3. Длительность импульсной характеристики, определённая по полувысоте импульса, для ФПУ-А и ФПУ-Б составила (21 ± 1) и (196 ± 3) пс соответственно.

Согласно осциллограммам на рис. 3 некоторое время после окончания импульса продолжается колебательный процесс. Очевидно, что причина этого состоит не в форме оптического импульса, а в так называемом «звоне» электрического сигнала на выходе фотоприёмника, возникающем из-за неидеальности согласования фотодиода с линией передачи электрического сигнала. Характер «звона» зависит от параметров (в частности, длины) подключённого к выходу фотоприёмника высокочастотного кабеля. На осциллограммах, полученных на двух разных осциллографах, этот «звон» отличается.

На рис. 4, а приведена переходная характеристика фотоприёмника ФПУ-А, где точками 1, 2 отмечены моменты, когда переходной процесс минует соответственно 0,1 и 0,9 уровня «полки» переходного процесса, точка 3

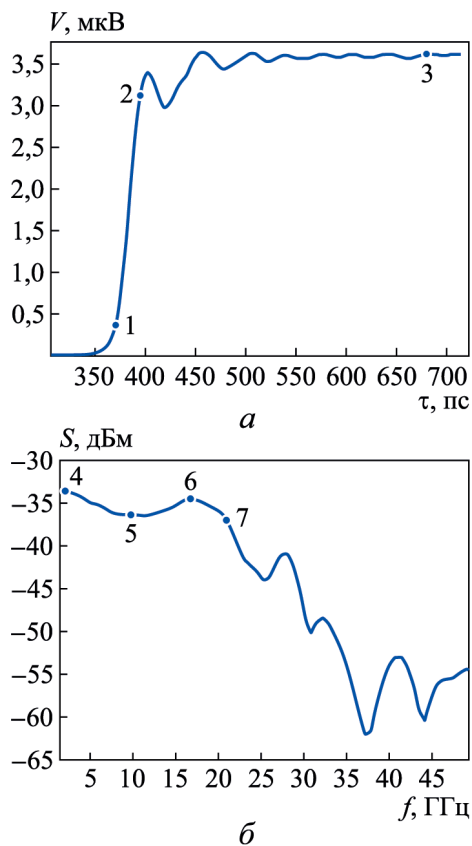


Рис. 4. Характеристики фотоприёмника ФПУ-А:

a – переходная характеристика, полученная интегрированием импульсной характеристики; b – амплитудно-частотная, рассчитанная из импульсной характеристики; координаты точек 1 (13,25; $3,603 \cdot 10^{-7}$); 2 (38; $3,124 \cdot 10^{-6}$); 3 (305,1; $3,615 \cdot 10^{-6}$); 4 (2,101; -33,61); 5 (9,804; -36,33); 6 (16,81; -34,51); 7 (21,01; -37,03)

Fig. 4. FPU-A photodetector characteristics:

a – transient response obtained by integrating the impulse response; b – amplitude-frequency, calculated from the impulse response; 1 (13,25; $3,603 \cdot 10^{-7}$); 2 (38; $3,124 \cdot 10^{-6}$); 3 (305,1; $3,615 \cdot 10^{-6}$); 4 (2,101; -33,61); 5 (9,804; -36,33); 6 (16,81; -34,51); 7 (21,01; -37,03)

обозначает уровень, принятый за установившийся режим переходного процесса. Данная переходная характеристика получена из импульсной характеристики (см. рис. 3, a) путём интегрирования во времени. Время нарастания переходной характеристики в диапазоне 0,1–0,9 значений установившегося режима соответствует половине максимального времени длительности импульсной характеристики $\tau = 218$ пс.

Приведённые на рис. 3, 4, a зависимости иллюстрируют главную проблему, возникающую при практическом использовании метода измерения времени нарастания переходной характеристики, описанного в ГОСТ 17772-88. Расчётная переходная характеристика ФПУ-А является колебательной (см. рис. 4, a). При непосредственном измерении скорости нарастания переходной характеристики

график, аналогичный приведённому, невозможно рассматривать как информативный, поскольку не определена природа колебаний (причиной может быть форма испытательного оптического импульса). Предложенный метод количественной оценки быстродействия по импульсной характеристике фотоприёмника позволяет с уверенностью утверждать, что колебания наблюдаются из-за несовершенства электрического согласования выхода фотоприёмника, а не из-за колебаний мощности оптического импульса.

В задачах радиофотоники, когда по оптическому каналу передаётся аналоговый СВЧ-сигнал, характеристикой фотоприёмника, не менее важной чем времена нарастания и спада, является неравномерность его чувствительности внутри полосы пропускания, т. е. неравномерность его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Для непосредственного измерения АЧХ оптоэлектронного преобразователя требуется специальный набор аппаратуры – векторный анализатор цепей и источник оптического излучения с внешней модуляцией оптического сигнала и точно измеренной АЧХ. Точность определения АЧХ исследуемого фотоприёмника будет определяться главным образом точностью определения АЧХ опорного излучателя. В настоящее время в нашей стране отсутствует эталонная база, позволяющая обеспечить единство измерений АЧХ фотоприёмников в СВЧ-диапазоне. Это делает актуальными различные косвенные методы измерений АЧХ.

Частотные характеристики линейных систем связаны с импульсными характеристиками через преобразование Фурье [например, 3]. Искомая АЧХ – это спектральная плотность импульсной характеристики ФПУ [4]. Если оптоэлектронный преобразователь согласован с коаксиальным входом 50 Ом измерительного прибора, то спектральная плотность $S(f)$ его импульсной характеристики вычисляется по формуле

$$S(f) = 10 \log_{10} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \exp(-j2\pi f t) dt \right|^2 / 50 - 30, \quad (3)$$

где $g(t)$ – функция, описывающая импульсную характеристику оптоэлектронного преобразователя.

На рис. 4, b представлена АЧХ, рассчитанная по формуле (3). Этот график был также получен при помощи осциллографа, работающего в режиме «преобразование Фурье» (на рис. 4, b не показан). По уровню АЧХ -3 дБ можно приблизительно оценить полосу пропускания. Точками 4–6 отмечены локальные максимумы и минимум АЧХ, достигаемые при значениях частот 2,1; 9,8 и 16,8 ГГц соответственно. Точке 7 соответствует значение АЧХ на частоте 21 ГГц. Таким образом, неравномерность АЧХ превышает 3 дБ в окрестности частоты 21 ГГц, что соответствует паспортным данным фотоприёмника. К недостаткам данного метода можно отнести низкую точность,

связанную со сравнительно низкой точностью получаемых показаний осциллографа.

Необходимо также отметить, что если в качестве системы регистрации в данной установке использовать не осциллограф, а радиочастотный спектроанализатор, стоимость которого существенно ниже стоимости цифрового осциллографа для того же частотного диапазона, то на экране можно наблюдать линейчатый спектр, огибающая которого совпадает с графиком, показанным на рис. 4, б.

Таким образом, в случае линейного режима работы фотоприёмника и при условии, что испытательные оптические импульсы существенно короче длительностей его импульсной характеристики, можно получить численные оценки быстродействия фотоприёмника и неравномерности его АЧХ.

Заключение. Импульсная характеристика фотоприёмника менее подвержена изменениям, обусловленным флуктуациями мощности излучения испытательного импульса, нежели переходная характеристика. При уменьшении длительности испытательного импульса с его помощью можно получать импульсные характеристики более быстродействующих приёмников. Поэтому перспективно использование импульсов фемтосекундного волоконного лазера с длительностью импульсов менее 100 фс. Это значительно меньше времени нарастания выходного сигнала самых быстродействующих на сегодняшний день фотодиодов. До этого существовали попытки применения в метрологии твердотельных фемтосекундных лазеров [5, 6]. Однако волоконные лазеры имеют преимущество перед ними из-за меньшего объёма, простоты изменения конструкции, что имеет первостепенное значение для количественной оценки быстродействия приёмников лазерного излучения в условиях как производства, так и эксплуатации импульсных лазерных систем. Недостатком описанного в настоящей статье метода является необходимость использования дорогостоящего широкополосного осциллографа. Однако экспериментально установлено, что при незначительном усложнении измерительной установки можно заменить этот прибор значительно более дешёвым стробоскопическим осциллографом.

Предложенный авторами настоящей статьи метод измерения параметров быстродействия фотоприёмников лишён многих недостатков «классического» метода и хорошо зарекомендовал себя при работе со скоростными фотоприёмниками. Переходная характеристика фотоприёмника может быть легко получена из импульсной путём интегрирования последней по времени, что позволяет сравнивать результаты измерений, найденные обоими методами. Также можно оценивать и неравномерность АЧХ фотоприёмника. Созданную экспериментальную установку можно использовать для количественной оценки быстродействия фотоприёмников лазерных дальнометров, а также телекоммуникационных приёмников и других устройств. На основании предложенного метода во ВНИИОФИ разработана и аттестована Методика измерений амплитудно-частотных характеристик в диапазоне от $4,5 \cdot 10^7$ до $4 \cdot 10^{10}$ Гц и длительности

импульсных характеристик в диапазоне от $2 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-8} с быстродействующих фотоприёмников.

Работа выполнена с применением оборудования Центра коллективного пользования высокоточными измерительными технологиями в области фотоники (ср.vniiofi.ru), созданного на базе ВНИИОФИ и поддерживаемого Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

Список литературы

1. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 2. С. 95–119.
2. Бычков С. Б., Глазов А. И., Светличный А. Б. Установка для измерения нелинейности градуировочной характеристики приёмников оптического излучения для ВОСП // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение фотоники», Москва, 14–17 апреля 2015 г. М.: ВНИИОФИ, 2015. С. 136–138.
3. Ким Д. П. Теория автоматического управления. В 2-х т. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
4. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2007.
5. Кабанов В. Ф., Литвинов В. Ф., Никитин В. В. и др. Использование полупроводникового инжекционного лазера для определения временных характеристик скоростных фотоумножителей // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 2. С. 420–422.
6. Поврозин А. И., Онищенко И. Н. и др. Фемтосекундный лазер – широкие возможности применения // Сборник докладов IX Международной конференции «Метрология-2014», Харьков, 15–17 октября 2014, Харьков: Институт метрологии, 2014.

References

1. Kryukov P. G., *Quantum electronics*, 2001, vol. 31, no. 2, pp. 95–119. <https://doi.org/10.1070/QE2001v031n02ABEH001906>
2. Bychkov S. B., Glazov A. I., Svetlichny A. B., *Abstracts of the all-Russian scientific and technical conference "Metrologicheskoe obespechenie fotoniki"*, Moscow, 14–17 April, 2015, Moscow, VNIIOFI Publ., 2015. pp. 136–138 (in Russian).
3. Kim D. P., *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*, in 2 vol., vol. 1, Moscow, Fizmatlit Publ., 2003 (in Russian).
4. Sergienko A. B., *Cifrovaya obrabotka signalov*, Saint Petersburg, Piter Publ., 2007 (in Russian).
5. Kabanov V. F., et al, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1974, vol. 4, no. 2, p. 236. <http://doi.org/10.1070/QE1974v004n02ABEH006706>
6. Povrozin A. I., et al, *Abstracts of the IX International Scientific & Technical Conference "Metrology and measurement techniques" ("Metrology-2014")*, 15–17 October, 2014, Kharkiv, National Scientific Centre "Institute of Metrology".

Дата поступления: 21.05.2020.

Дата принятия: 21.06.2020.

Method for measuring the speed parameters of photodetectors

Stepan B. Bychkov¹, Igor V. Volkov¹, Aleksander I. Glazov¹, Ivan S. Korolev¹, Konstantin B. Savkin¹, Nikolay P. Khatyrev²

¹All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements,
Moscow, Russian Federation, e-mail: vniofi@vniofi.ru

²Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI),
Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation, e-mail: office@vniiftri.ru

The article discusses the difficulties that arise when measuring the speed parameters of modern broadband photodetector devices by a method based on the measurement results of the rise time of the transition characteristic are considered. As a solution of the described problems a method is proposed for quantitatively evaluating of speed parameters using the results of determining the impulse response of the studied photodetector. The source of the test signals is a pulsed fiber laser operating in the self-mode locking mode and generating ultrashort (about 3 ps) optical pulses. The article describes in detail the method itself, the measuring setup that allows it to be implemented, and presents some results of experimental testing of the method.

Key words: photodiode, photodetector, response speed, impulse response, amplitude-frequency characteristic, picosecondspulsed laser.