

Рассмотрены проблемы прецизионных измерений мощности излучения светодиодов, связанные с нелинейностью спектральной чувствительности фотодиодов. В качестве решения проблемы, предложено использование трап детекторов. Описана новая модель трап детектора.

УДК 681.7.069

Д.Н. Татьянко

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

## ФОТОДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ

### Введение

Широкое применение светодиодов в науке и технике требует современного метрологического обеспечения данного вида источников оптического излучения. Одним из примеров применения светодиодов являются средства измерительной техники (СИТ) для работы на волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). Многие ведущие производители СИТ для ВОЛС используют в оптических тестерах и источниках оптического излучения наряду с лазерными источниками и светодиодами, излучающие в инфракрасном диапазоне спектра. Примерами могут служить прецизионные оптические тестеры моделей FOT-300-12D, FOT-600-12D и FOT-930-12D (компании EXFO, Канада), оптические тестеры моделей FOD1203A/B (КБ волоконно-оптических приборов, Россия) и другие.

Отличительной особенностью светодиодов от лазерных источников излучения, в частности, от полупроводниковых лазеров, является большая спектральная ширина излучения светодиодов. Например, ширина спектра светодиодов, используемых в оптических тестерах FOT-930-12D равна 135 нм (на уровне –3 дБ, на центральной длине волны излучения 1300 нм), тогда, как ширина спектра полупроводниковых лазеров составляет единицы нанометров. Большой диапазон спектра излучения поднимает проблему детектирования мощности излучения светодиодов.

Наибольшее распространение среди детекторов оптического излучения получили фотодиоды. Но недостатком фотодиодов является нелинейность (в общем случае) их спектральной чувствительности.

В пределах спектра излучения полупроводникового лазера, составляющего единицы нанометров, спектральная чувствительность фотодиода практически не изменяется. Но в пределах ширины спектра светодиодов изменение чувствительности фотодиода заметно меняется (1 - 5 дБм [1]). Причем, это изменение носит нелинейный характер. Таким образом, различные составляющие спектра светодиода детектируются с разной чувствительностью. Это затрудняет прецизионные измерения мощности излучения светодиодов. Для решения этой проблемы необходим спектрально “предсказуемый” детектор с хорошей линейностью спектральной характеристики.

Чувствительность фотодиода  $S$  характеризует фототок, генерируемый на единицу оптической мощности:

$$S = \frac{I}{P} = \frac{\eta ne \lambda}{hc}, \quad (1)$$

где  $P$  – мощность оптического излучения, падающая на поверхность фотодиода;  $I$  – измеряемый ток фотодиода;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме;  $e$  –

постоянная элементарного заряда;  $n$  – индекс преломления воздуха,  $\lambda$  – длина волны излучения, падающего на фотодиод;  $\eta$  – внешняя квантовая эффективность, то есть количество фотоэлектронов, которые внесли вклад в измеряемый ток, деленное на количество фотонов, падающих на поверхность фотодиода [2].

Внешнюю квантовую эффективность можно описать следующим выражением:

$$\eta = \eta_i(1 - \rho(\lambda)) = (1 - \rho(\lambda))\zeta(1 - e^{-\alpha(\lambda)\omega}), \quad (2)$$

где  $\eta_i$  – внутренняя квантовая эффективность фотодиода, которая определяется как количество фотоэлектронов, которые внесли вклад в измеряемый ток, деленное на количество поглощенных фотонов [2];  $\zeta$  – часть пар электрон-дырок, которая берет участие в фототоке (в относительных единицах);  $\alpha(\lambda)$  – зависящий от длины волны коэффициент поглощения;  $\omega$  – толщина слоя фотодиода, на которой поглощается оптическая мощность;  $\rho(\lambda)$  – зависящий от длины волны коэффициент отражения от поверхности фотодиода.

В выражении (2) для внешней квантовой эффективности присутствуют две нелинейные составляющие, зависящие от длины волны оптического излучения – это коэффициент отражения от поверхности фотодиода  $\rho(\lambda)$  и коэффициент поглощения фоточувствительного слоя фотодиода  $\alpha(\lambda)$ . Максимальную линейность спектральной чувствительности можно получить, минимизировав влияние этих двух составляющих. Спектральная чувствительность, в этом случае, будет только линейно зависеть от длины волны излучения.

Коэффициент поглощения фотодиода  $\alpha(\lambda)$  зависит от материала фоточувствительного слоя. Таким образом, для детектирования оптического излучения, в частности излучения светодиода, необходимо выбирать фотодиод с наилучшей линейностью коэффициента поглощения фоточувствительного слоя в заданном спектральном диапазоне.

Следующей возможностью минимизировать влияние нелинейной составляющей спектральной чувствительности фотодиодов, является уменьшение коэффициента отражения  $\rho(\lambda)$ . Отдельный фотодиод может иметь потери за счет отражения от поверхности до 50 %, в зависимости от длины волны детектируемого оптического излучения [3].

С целью снижения коэффициента отражения предлагается использовать так называемый «трап детектор».

#### **Трап детекторы оптического излучения**

Впервые трап детектор был предложен и описан Залевским и Дудой в 1983 году [4]. Он состоял из четырех расположенных последовательно фотодиодов (рисунок 1а). При этом луч, отражаясь от каждого фотодиода, попадает на последующий фотодиод и, отразившись от последнего в цепочке фотодиода, направляется на предыдущий фотодиод, таким образом, возвращаясь в систему фотодиодов. Токи от всех фотодиодов суммируются. На рисунке 1б показана более экономичная, хотя и менее эффективная модель, состоящая из трех фотодиодов.

За счет многократного попадания луча на фоточувствительные поверхности фотодиодов внутри трап детектора внешняя квантовая эффективность трап детектора достигает 99,9 % и выше, то есть практически все оптическое излучение поглощается, следовательно, уменьшаются потери, связанные с отражением излучения в детекторе. На рисунке 2 представлены результаты исследования спектральной чувствительности InGaAs фотодиода и трап детектора на базе таких фотодиодов, проведенные в институте Physikalisch-Technische Bundesanstalt (РТВ, Германия) [3].

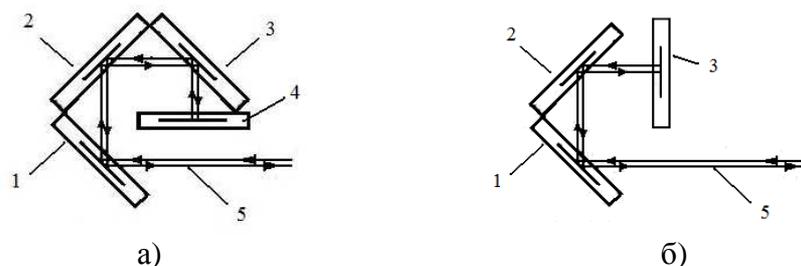


Рис. 1. Трап детектор на базе четырех (а) и трех (б) фотодиодов.  
1-4 – фотодиоды, 5 - направление падающего и отраженного оптического излучения.

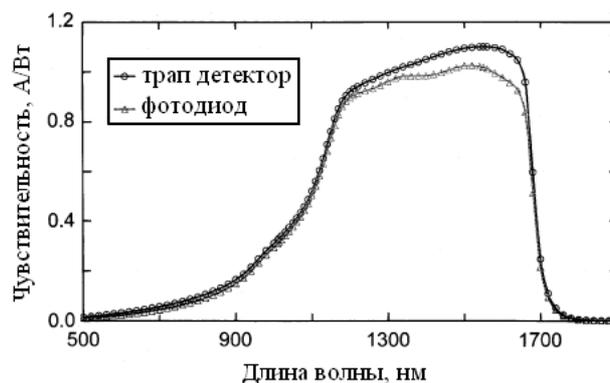


Рис. 2. Спектральная чувствительность InGaAs фотодиода и трап детектора на базе таких фотодиодов.

Уменьшение потерь вызванных отражением излучения, значительно улучшает линейность спектральной чувствительности трап детектора по сравнению с одиночными фотодиодами. Благодаря этому упрощается измерение мощности излучения светодиодов. Нет необходимости знать значение чувствительности каждой спектральной составляющей фотодиода внутри спектра излучения светодиода, а достаточно знать только линейную зависимость спектральной чувствительности, которую можно определить по измерениям в двух точках спектра и в результате найти калибровочный коэффициент для измерений.

Недостатком известных моделей трап детекторов является то, что все же не вся энергия оптического излучения преобразуется в электрическую. Небольшая ее часть возвращается обратно в оптическую систему, что уменьшает квантовую эффективность этих детекторов. Снижение данного недостатка путем увеличения числа фотодиодов, например до четырех или шести, и тем самым увеличения числа переотражений луча от поверхностей фотодиодов, часто экономически нецелесообразно из-за высокой стоимости фотодиодов. В связи с этим актуальной является задача усовершенствования конфигурации трап детекторов.

#### Новая модель трап детектора

Для уменьшения потерь, связанных с отражением излучения в фотодетекторах, рассмотренных выше, предлагается новая модель трап детектора [5], представленная на рисунке 3, которая обладает большим количеством переотражений луча в структуре детектора. Ближайший существующий аналог новой модели представлен на рисунке 1б.

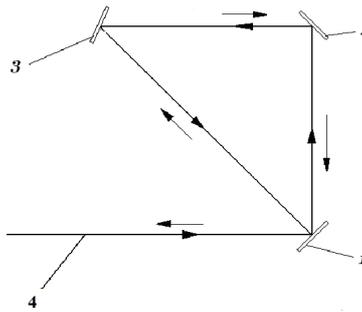


Рис. 3. Новая модель трап детектора на базе трех фотодиодов

В предлагаемой, новой конфигурации трап детектора, построенной на трех фотодиодах, луч 4 падает на фотодиод 1 и далее отражается на фотодиоды 2 и 3. Фотодиод 3 отражает луч не обратно на фотодиод 2, как в известных конфигурациях трап детекторов, а переотражает луч на фотодиод 1. Луч, при этом, падает на фотодиод 1 по нормали и затем возвращается обратно в систему фотодиодов, переотражаясь от фотодиода 1 на фотодиод 3 и далее на фотодиоды 2 и 1.

В известных схемах из трех фотодиодов луч переотражается 5 раз, а в предлагаемой схеме - 7 раз. Таким образом, в классической схеме происходит  $2N-1$  переотражение [6], а в предлагаемой схеме  $2N+1$  переотражение, где  $N$  – количество фотодиодов в трап детекторе.

Результаты компьютерного моделирования показали, что для трап детекторов с фотодиодами на основе кремния (Si) и индий-арсенид-галлия (InGaAs) отношение тока трап детектора к максимально-возможному току (при коэффициенте отражения фотодиодов равно нулю) у новой модели, при прочих равных условиях, на 0,26 % больше, чем у существующей модели, а в случае использования германиевых (Ge) фотодиодов – больше на 0,52 %.

При этом значение мощности оптического излучения, которая не была поглощена в детекторе и возвратилась в оптическую систему, у новой модели трап детектора, на порядок меньше, чем у известных аналогов. Это уменьшает отрицательное влияние остаточного излучения на работу оптической системы.

### Выводы

Таким образом, использование трап детекторов обеспечивает лучшую линейность спектральной чувствительности датчика в диапазоне спектра излучения светодиода по сравнению с единичными фотодиодами.

Предложена новая модель трап детектора, преимуществом которой является большее количество переотражений луча внутри детектора. В результате этого, большая часть оптической мощности поглощается фотодиодами, т.е. минимизируются потери, вызванные отражением излучения в детекторе.

Благодаря вышесказанному увеличивается точность и улучшается линейность фотодетектора, что позволяет использовать трап детекторы для прецизионных измерений мощности не только лазерного излучения, но и излучения светодиодов.

### Литература

1. Yu.P. Machekhin, D.N. Tatyanko, S.I. Zub. Taking into account of spectral characteristics of semiconductor photodiodes when measuring optical power in fiber-optic communication lines. 7th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. LFNМ'2006, С. 338-340
2. Alejandro Ferrero, Joaquin Campos, Alicia Pons, and Antonio Corrons. New model for the internal quantum efficiency of photodiodes based on photocurrent analysis. // Applied Optics, Vol. 44, No. 2, 10 January 2005. p. 208-216

3. K. D. Stock and R. Heine. Spectral characterization of InGaAs trap detectors and photodiodes used as transfer standards. // Metrologia, 2000, 37, p. 449-452
  4. Edward F. Zalewski and C. Richard Duda. Silicon photodiode device with 100 % external quantum efficiency. // 15 September 1983, Vol. 22, No. 18, Applied Optics, p. 2867-2873
  5. Д.Н. Татянюк. Трап детектор для измерения мощности лазерного излучения. / Сборник научных трудов 1-й Международной конференции «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития», Том 3, Харьков-Судак 2008, С. 293-295
  6. J. M. Palmer. Alternative Configurations for Trap Detectors. // Metrologia 1993, 30, p. 327-333
- 
- 

## ФОТОДЕКТОРИ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ СВІТЛОДІОДІВ

Д.Н. Татянюк

*Розглянуті проблеми прецизійних вимірювань потужності випромінювання світлодіодів, пов'язані з нелінійністю спектральної чутливості фотодіодів. В якості рішення проблеми запропоновано використання трап детекторів. Описана нова модель трап детектора.*

## PHOTODETECTORS FOR PRECISION MEASUREMENT OF CAPACITY OF RADIATION OF LIGHT-EMITTING DIODES

D.N. Tatjanko

*Problems of precision measurements of light-emitting diodes' radiation power, connected with nonlinearity of photodiodes' spectral sensitivity are considered. Using of trap detectors is offered as a decision of the problem. New model of the trap detector is described.*