

Мощный СВЧ-фотодиодный модуль с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне

Н.А. Чиж, К.Б. Микитчук

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

Аннотация: в данной работе предложена конструкция СВЧ-фотодиодного модуля на основе мощного InGaAs/InP $p-i-n$ СВЧ-фотодиода с частично обедненным поглощающим слоем и оптического усилителя на легированном эрбием волокне для радиотонных систем генерации и передачи СВЧ-сигналов. В статье исследуются частотные и энергетические характеристики разработанного СВЧ-фотодиодного модуля с оптическим усилителем, работающего в частотном диапазоне до 30 ГГц и в оптическом диапазоне длин волн от 1.53 до 1.57 мкм.

Ключевые слова: СВЧ-фотодиодный модуль, мощный СВЧ-фотодиод, оптический усилитель на легированном эрбием волокне, радиотоника

1. Введение

Системы радиотоники позволяют реализовать генерацию, передачу и обработку СВЧ-сигналов оптоэлектронными методами, что обеспечивает целый ряд преимуществ по сравнению с подходами традиционной электронной СВЧ-техники: сверхширокополосность, нечувствительность к электромагнитным помехам, малый вес и размеры [1,2]. СВЧ-фотодиоды с оптоволоконным вводом излучения используются в качестве оптоэлектронных преобразователей и являются одними из ключевых компонентов радиотонных систем, при этом, в отличие от цифровых волоконно-оптических систем связи, в системах оптической генерации и передачи СВЧ-сигналов важно, чтобы фотодиоды обладали как высокой предельной частотой, так и высокой линейностью энергетической характеристики, что обеспечивает минимизацию искажений сигнала и высокий динамический диапазон, улучшает коэффициент передачи и коэффициент шума. Под термином «мощные» в системах радиотоники рассматривают СВЧ-фотодиоды, способные обеспечивать выходную СВЧ-мощность свыше 1 мВт, которая оказывается в стандартном диапазоне входных мощностей СВЧ-усилителей и, обычно, не приводит к деградации отношения сигнал-шум [3]. Радиотонные системы обеспечивают работу в сверхширокой полосе частот, величина которой ограничивается произведением частотных характеристик каскада эквивалентных СВЧ-четырёхполосников, поэтому использование СВЧ-усилителя после фотодиода приводит к ухудшению частотной характеристики всей системы, как показано на рисунке 1. Так для СВЧ-фотодиода с предельной частотой 20 ГГц, использование СВЧ-усилителя с предельной частотой 20 ГГц уменьшает общую предельную частоту фотодиодного модуля до 14 ГГц. Оптический усилитель, напротив, обладает эквивалентной шириной полосы частот свыше 1 ТГц [4], поэтому использование оптического усилителя не искажает общую предельную частоту фотодиодного модуля. Насыщение оптического усилителя определяется мощностью оптической несущей и практически не зависит от величины мощности передаваемого СВЧ-сигнала, поэтому использование такого усилителя позволяет повысить эффективность оптоэлектронного преобразования и сохранить неизменной частотную характеристику фотодиодного модуля. В данной работе рассматривается мощный СВЧ-фотодиодный модуль с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне, а также приводятся экспериментально полученные характеристики модуля.

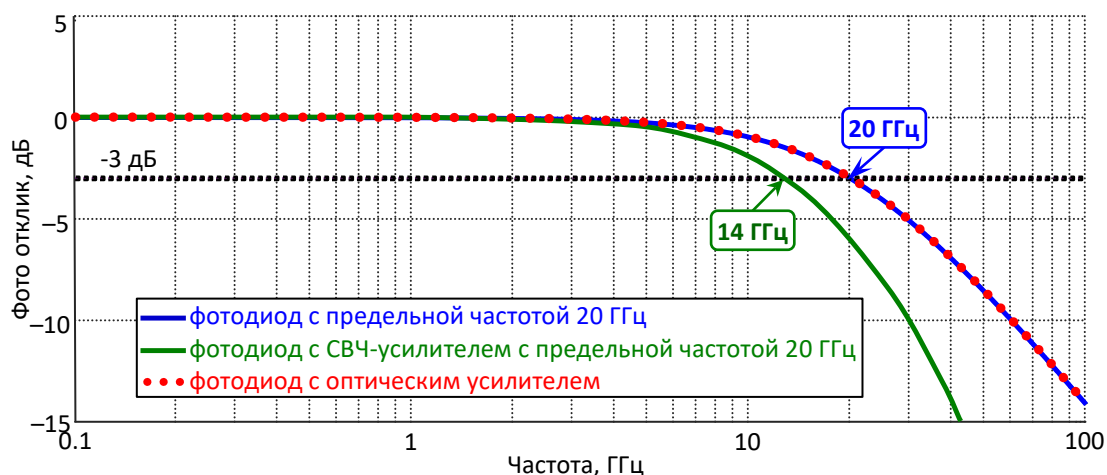


Рисунок 1. Рассчитанные частотные характеристики СВЧ-фотодиодных модулей с СВЧ- или оптическим усилителем

2. Конструкция СВЧ-фотодиодного модуля

На рисунке 2 представлена схема СВЧ-фотодиодного модуля на основе мощного фотодиода с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне. Оптический сигнал на длинах волн от 1.53 до 1.57 мкм подается на входной оптический разъем типа FC/APC, затем усиливается в легированном эрбием оптическом волокне. Для оптической накачки эрбиевого волокна используется двунаправленная схема на основе двух лазеров с длиной волны генерации 1.48 мкм. В качестве лазеров накачки используются лазерные диоды с распределенной обратной связью в режиме стабилизации мощности, что позволяет обеспечить высокую стабильность мощности на выходе СВЧ-фотодиода. Паразитная оптическая генерация в оптическом услителе на легированном эрбием волокне подавляется с помощью волоконно-оптических изоляторов. Далее усиленный оптический сигнал подается на мощный *p-i-n* СВЧ-фотодиод на основе двойной гетероструктуры InGaAs/InP с частично обедненным поглощающим слоем [5,6], припаянный методом перевернутого кристалла к копланарной СВЧ-линии передачи с волновым импедансом 50 Ом. На другом конце линии передачи установлен коаксиальный СВЧ-разъем типа К (2.92 мм).

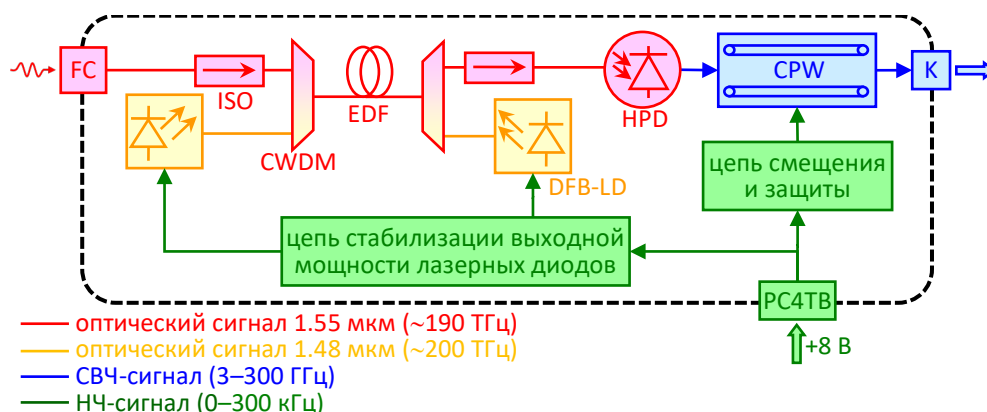


Рисунок 2. Схема СВЧ-фотодиодного модуля с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне: FC – волоконно-оптический разъем FC/APC, ISO – волоконно-оптический изолятор, CWDM – мультиплексор по длинам волн 1.48 и 1.55 мкм, DFB-LD – лазерный диод с распределенной обратной связью, EDF – легированное эрбием оптическое волокно, HPD – мощный СВЧ-фотодиод, CPW – копланарная СВЧ-линия передачи, К – коаксиальный СВЧ-разъем 2.92 мм, PC4TB – разъем питания

Напряжение смещения на фотодиод подается через цепь смещения, содержащую разделительный конденсатор и индуктивность, а также цепь защиты от теплового пробоя фотодиода (в случае, если на вход модуля подается оптическая мощность, превышающая 20 мВт). Напряжение питания модуля составляет 8 В, а потребляемый ток не превышает 500 мА. Таким образом, требуемая для работы модуля электрическая мощность не превышает 4 Вт. На рисунке 3 представлена фотография СВЧ-фотодиодного модуля, габаритные размеры которого составляют 150×123×30 мм.



Рисунок 3 Фотография СВЧ-фотодиодного модуля с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне

На рисунке 4 приведены измеренные энергетические характеристики мощного СВЧ-фотодиода и зависимость выходной оптической мощности от входной для оптического усилителя на легированном эрбием волокне для различных величин мощности накачки. Видно, что максимальная выходная мощность СВЧ-фотодиода достигается в маленьком интервале входных мощностей от 18 до 22 мВт, причем максимум достигается при входной мощности 20 мВт. Для того, чтобы получить эффективную энергетическую характеристику фотодиодного модуля, необходимо настраивать оптический усилитель так, чтобы его мощность насыщения совпадала с диапазоном мощностей входного оптического сигнала фотодиода, при котором наблюдается максимум выходной СВЧ-мощности.

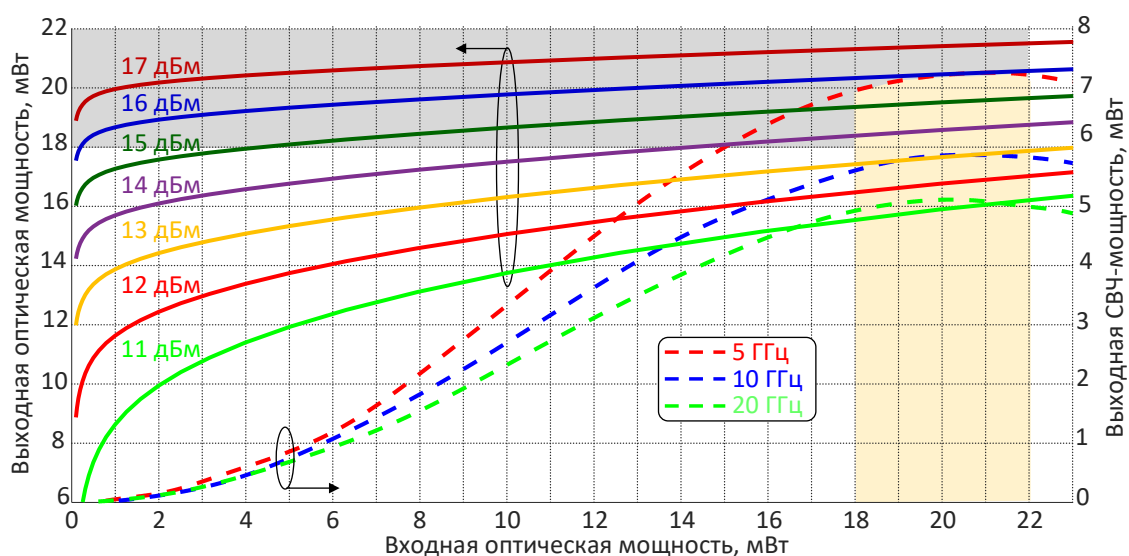


Рисунок 4. Измеренные энергетические характеристики мощного СВЧ-фотодиода (пунктир) и зависимость выходной оптической мощности от входной для оптического усилителя на легированном эрбием волокне (сплошные линии) для различных величин мощности накачки; цветная заливка — область насыщения СВЧ-мощности фотодиода, серая заливка — соответствующая выходная мощность оптического усилителя

3. Характеристики СВЧ-фотодиодного модуля

На рисунке 5 представлены измеренные энергетические характеристики мощного СВЧ-фотодиодного модуля с оптическим усилителем, а также, для сравнения, энергетические характеристики СВЧ-фотодиода на частотах 5, 10 и 20 ГГц. Видно, что использование оптического усилителя позволяет добиться эффективного режима работы от 100 мкВт до 23 мВт с изменением мощности на этом интервале не более чем на 5%. С увеличением частоты от 5 до 20 ГГц максимальная выходная СВЧ-мощность уменьшается с 7 до 5 мВт.

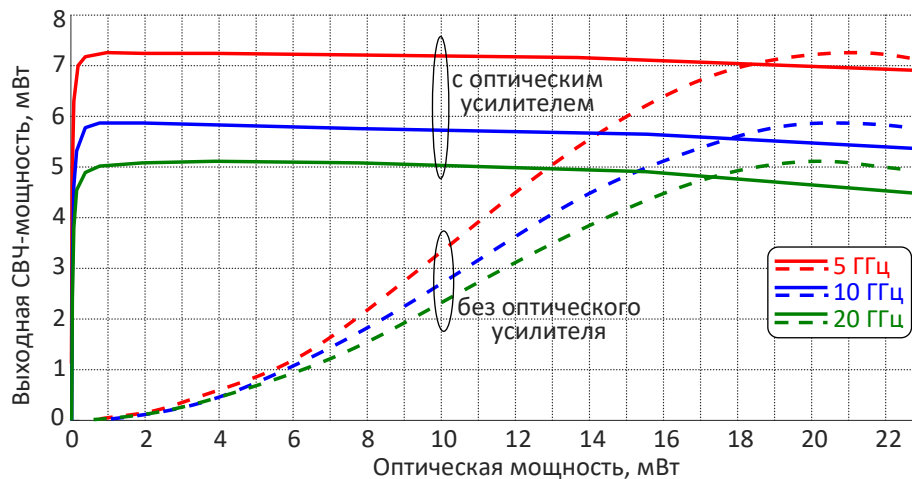


Рисунок 5. Измеренные энергетические характеристики мощного СВЧ-фотодиодного модуля с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне (сплошные линии) и без него (пунктирные линии) для различных частот при 100% глубине оптической модуляции

На рисунке 6 представлена зависимость выходной СВЧ-мощности фотодиодного модуля с и без оптического усилителя от частоты при мощности входного оптического сигнала 1 мВт и глубине оптической модуляции 100%. Видно, что рабочий частотный диапазон модуля составляет от 20 МГц до 30 ГГц. Провал частотной характеристики СВЧ-фотодиодного модуля на низких частотах обусловлен разделительной емкостью цепи смещения. Предельная частота СВЧ-фотодиодного модуля ограничена емкостью $p-n$ перехода, а также паразитными L - и C -элементами, возникающими между чипом фотодиода и копланарной СВЧ-линией, которые также приводят к незначительной неравномерности (± 1 дБ) частотной характеристики. Из графика также видно, что добавление оптического усилителя не изменяет вид частотной характеристики и не уменьшает предельную частоту, но значительно увеличивает мощность СВЧ-сигнала на выходе модуля.

4. Заключение

В данной работе предложена конструкция СВЧ-фотодиодного модуля на основе мощного InGaAs/InP $p-i-n$ СВЧ-фотодиода с частично обедненным поглощающим слоем и оптического усилителя на легированном эрбием волокне. Из измеренных на различных частотах входного сигнала энергетических характеристик мощного СВЧ-фотодиодного модуля видно, что при использовании оптического усилителя выходная мощность СВЧ-сигнала фотодиодного модуля изменяется менее, чем на 5% при изменении входной оптической мощности от 100 мкВт до 23 мВт, что позволяет использовать его в радиофотонных системах генерации и передачи СВЧ-сигналов.

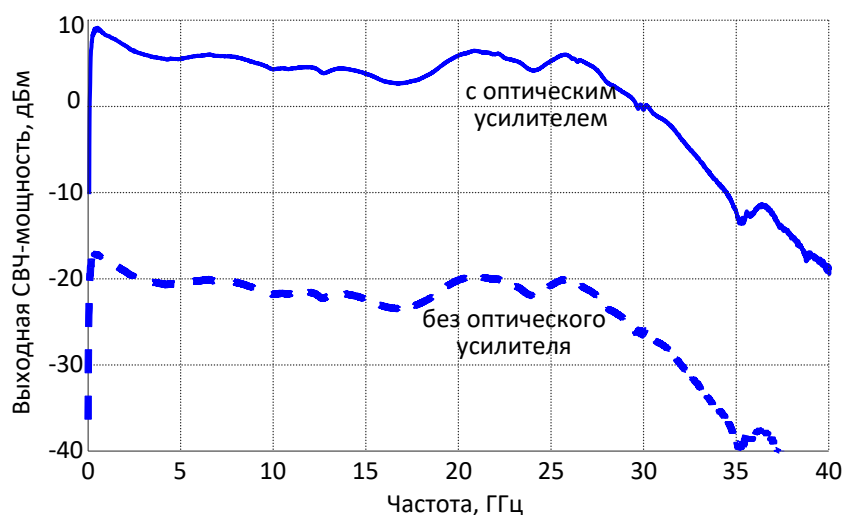


Рисунок 6. Зависимость выходной СВЧ-мощности СВЧ-фотодиодного модуля с (сплошная линия) и без (пунктирная линия) оптического усилителя от частоты при мощности входного оптического сигнала 1 мВт и глубине оптической модуляции 100%.

Список литературы

1. Beling A. et al. High-power, high-linearity photodiodes // *Optica*. – 2016. – Т. 3. – №. 3. – С. 328-338.
2. Малышев С.А. и др. Высокоскоростные фотодиоды на основе соединений АПВВ для волоконно-оптических линий связи // *Известия вузов. Северокавказский регион. Технические науки*. – 2002, Спецвыпуск. – С. 5-21.
3. Урик-мл. В. и др. Основы микроволновой фотоники // *Техносфера*, 2016. – 376 с.
4. К.Б. Микитчук и др. Радиофотонные модули для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов и методы формирования сигналов с линейно-частотной модуляцией на их основе // *Тр. 12-й Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*, Санкт-Петербург. – 2023. – С. 325-329.
5. Beling A. et al. High-power, high-linearity photodiodes // *Optica*. – 2016. – Т. 3. – №. 3. – С. 328-338.
6. Malyshev S. et al. High-power InGaAs/InP partially depleted absorber photodiodes for microwave generation // *Journal of Lightwave Technology*. – 2008. – Т. 26. – №. 15. – С. 2732-2739.