

УДК 621.317.7

Андреева Н. А., к.т.н.; Зингаева Е. И.;
Зуев В. А., д.ф.-м.н.; Муравьев В. М., к.ф.-м.н.

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАВИННОГО КРЕМНИЕВОГО ФОТОДИОДА С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

Andreyeva N. O., Zingayeva O. I., Zuyev V. O., Muravyev V. M. The frequency characteristics of avalanche silicon Shottki barrier photodiode.

This article studies frequency characteristics of avalanche silicon photodiode with Shottki barrier, which is useful to use in optical links. Physical equivalent scheme of photodiode proposed. We get the results of study spectrum and frequency characteristics of photodiode, that confirms to use device in fiber optical communication systems (FOCS) systems. For the first time investigated the frequency characteristics of this photodiode type in this work. And the threshold was determined on combination of photodiode and electrical power optical module. Silicon based diode detect sensitivity on range 1-2 micrometer. Studies with metals (Ag, Au, Cu) are applied to the silicon plate p-type to show that photo sensitivity stretching up to $\lambda=2,5$ micrometer. In the result, we get that in definite choice of contacting metal, silicon conductivity type and work temperature sensitivity range can be stretched to 4 micrometer that makes it possible to use the device in FOCS systems. FOCS used, as well known, in main, impulse mode of information transmission. Therefore, a new approach is made to analyze frequency characteristics photodiode and addiction experimental study, which ultimate goal is the development of new adoptive optical modules, that is devoted to the work.

Key words: photodiode, fiber optical communication systems, temperature sensitivity range, Shottki barrier, silicon

Андреева Н. О., Зингаева О. І., Зуев В. О., Муравйов В. М. Частотні характеристики лавинного кремнієвого фотодіода з бар'єром Шоттки.

В статті досліджуються частотні характеристики лавинного кремнієвого фотодіоду (ФД) з бар'єром Шоттки, придатного для використання в оптичному зв'язку. Запропонована фізична еквівалентна схема фотодіоду. Отримані результати дослідження спектральних і частотних характеристик фотодіоду, що підтверджують можливість використання приладу в системах волоконно-оптичного зв'язку. Вперше досліджені частотні характеристики вказаного типу ФД і на ґрунті комбінації ФД і електричного підсилювача розроблено і вивчено макет приймального оптичного модулю, визначено поріг його чутливості.

Ключові слова: фотодіод, волоконно-оптичний зв'язок, температурний діапазон чутливості, бар'єр Шоттки, кремній

Андреева Н. А., Зингаева Е. И., Зуев В. А., Муравьев В. М. Частотные характеристики лавинного кремниевого фотодиода с барьером Шоттки.

В статье исследуются частотные характеристики лавинного кремниевого фотодиода (ФД) с барьером Шоттки, пригодного для использования в оптической связи. Предложена физическая эквивалентная схема фотодиода. Получены результаты исследования спектральных и частотных характеристик фотодиода, подтверждающие возможность использования прибора в системах волоконно-оптической связи. Впервые исследованы частотные характеристики указанного типа ФД и, на основе комбинации ФД и электрического усилителя разработан и изучен макет приемного оптического модуля (ПРОМ), определен порог его чувствительности.

Ключевые слова: фотодиод, волоконно-оптическая связь, температурный диапазон чувствительности, барьер Шоттки, кремний

1. Введение

Для оптической информации в условиях световых потоков необходимо значительное повышение чувствительности фотодетекторов. Для этого необходимо как использование новых фоточувствительных материалов, так и модернизация приборов, изготавливаемых на основе этих материалов.

В настоящее время в волоконно-оптических системах связи (ВОСС) используются, главным образом, объемные лавинные фотодиоды (ФД) и *p-i-n* ФД. Разработаны ФД на основе узко зонных полупроводников [1-3]. В области видимой частоты и ближней инфракрасной (ИК) области наилучшей чувствительностью обладают ФД, выполненные на основе кремния. Однако, начиная с длины волны 1,1 мкм чувствительность очень быстро падает и уже при $\lambda=1,15$ мкм она практически равна нулю.

Сдвинуть спектральную характеристику кремниевых ФД в более длинную область (за край собственного поглощения) можно, используя приборы с барьером Шоттки. Диоды на основе кремния обнаруживают чувствительность в диапазоне длин волн 1–2 мкм [4], а при соответствующем выборе контактирующего металла, типа проводимости кремния и рабочей температуры область чувствительности может быть растянута до 4 мкм.

На Рис. 1 показаны схематическое устройство фотоприемника – а) и энергетическая схема перехода – б). Фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны кремния, проходят сквозь пластину 1 и поглощаются в металле 2, возбуждая в нем горячие электроны. Высота внутреннего барьера Шоттки на границе металл – полупроводник, обозначенная на рисунке через ψ_{ms} , определяется свойствами (работой выхода) металла.

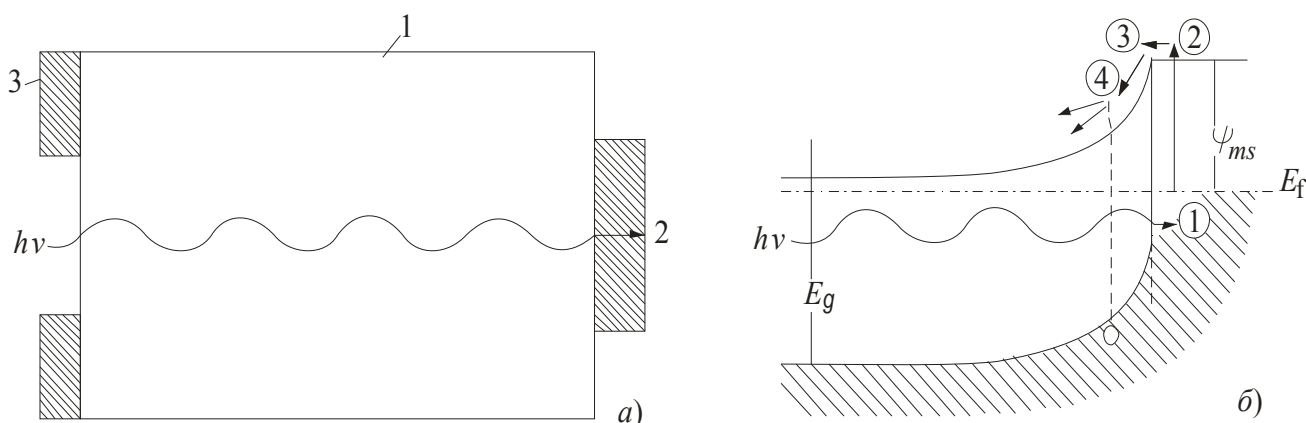


Рис.1. Лавинные фотоприборы с барьером Шоттки

1 – кремниевая пластина;

2 – слой металла, в контакте с которым образуется поверхностный барьер;

3 – омический контакт

В данной работе впервые изучены частотные характеристики указанного типа ФД и разработан макет приемного оптического модуля (ПРОМ).

2. Спектральная характеристика ФД

Нами исследовалась структура, аналогичная предложенной в [4]. Металлы (Ag, Au, Cu) наносились на пластину кремния *p*-типа. Барьер Шоттки составлял 0,54 В, 0,34 В, 0,46 В, соответственно.

На Рис. 2 изображена спектральная характеристика ФД для системы Si-Au. Видно, что фоточувствительность простирается до $\lambda=2,5$ мкм. Это обеспечивает возможность использования прибора в системах ВОСС. Действительно, в настоящее время наиболее предпочтительной для передачи оптической информации является длина волны 1,55 мкм [1, 2].

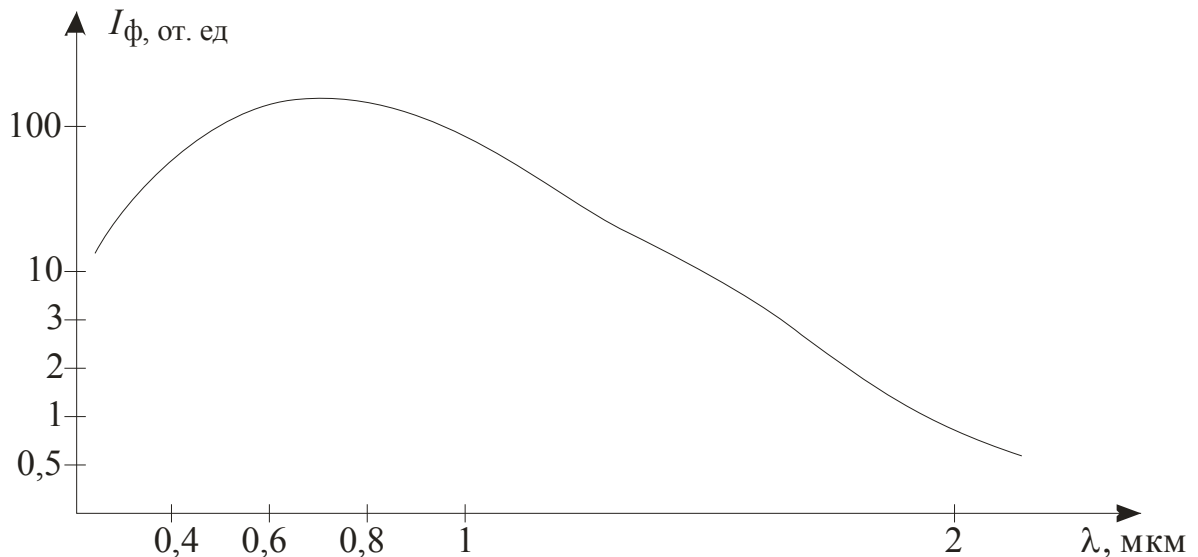


Рис. 2. Спектральная характеристика системы Si –Au

3. Эквивалентная схема фотодиода и частотная характеристика передачи

Физическая эквивалентная схема (ФЭС) фотодиода составлялась на основе известных методов [4, 5]. Для нашего случая ФЭС изображена на Рис. 3.

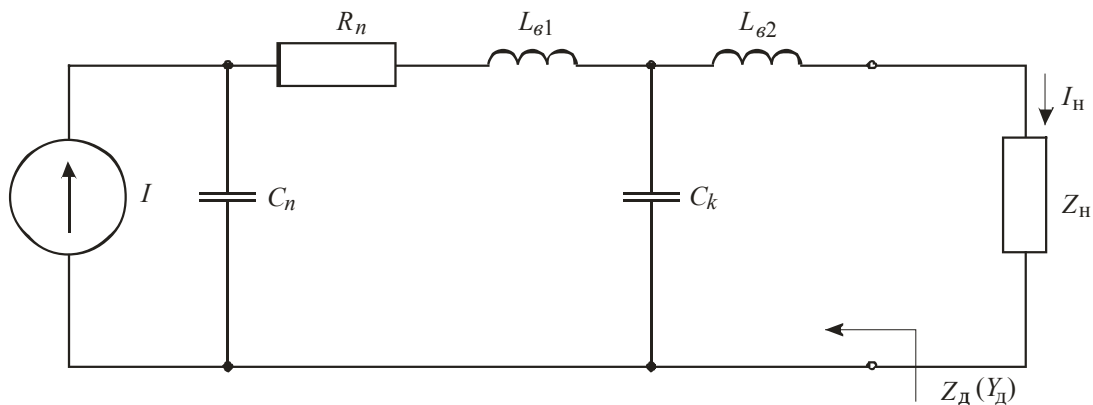


Рис. 3. Эквивалентная схема фотодиода

На Рис. 3 приняты следующие обозначения:

- C_n – емкость р-п перехода; R_n – сопротивление потерь ФД;
- $L_{\phi 1}$ – индуктивность выводов; C_k – емкость пакетного корпуса;
- $L_{\phi 2}$ – индуктивность внешних выводов; Z_d – полное сопротивление структуры;
- Y_d – проводимость на клеммах диода; Z_n – сопротивление нагрузки;
- I_ϕ – фототок; I_n – ток в нагрузке.

В нашем случае были установлены следующие значения параметров ФЭС: $C_n=4$ пФ, $C_k=1$ пФ, $L_{\phi 1}=15$ нГн, $L_{\phi 2}=8$ нГн, $R_n=60$ Ом.

На Рис. 4 изображена частотная характеристика (ЧХ) лавинного кремниевого ФД с барьером Шоттки.

Из литературных данных следует, что ЧХ в данном случае не уступает ЧХ для германиевого ФД [5]. Возможна дальнейшая оптимизация ФД путем улучшения корпуса прибора.

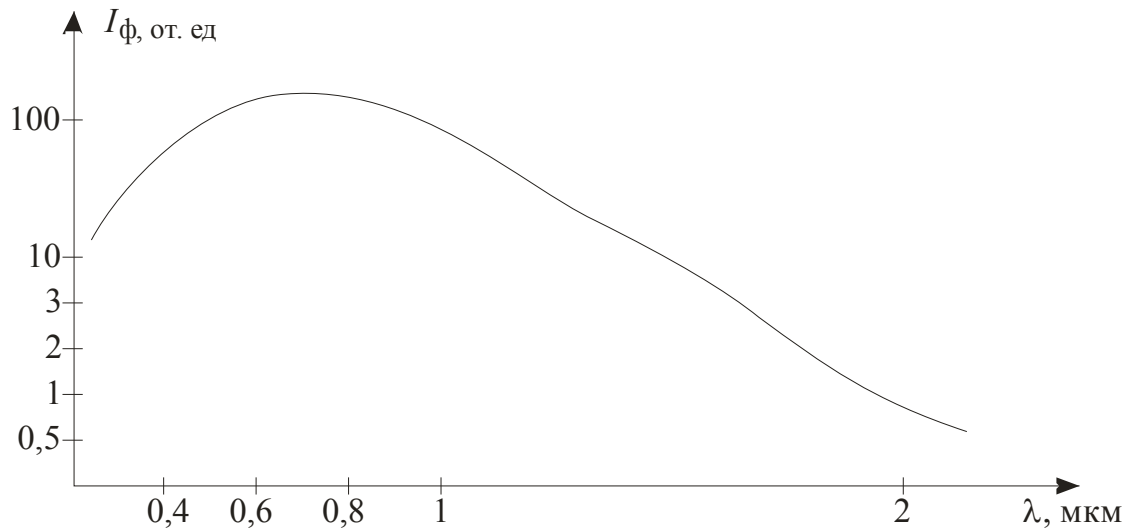


Рис. 4. Частотная характеристика фотодиода

4. Макет приемного модуля

Макет ПРОМ был изготовлен на основе комбинации ФД и электрического усилителя. Собственный шум ФД оказывается намного меньше шума усилителя. Поэтому реально достаточно измерить только шумы усилителя.

Коэффициент передачи мощности ПРОМ можно определить из следующего соотношения

$$K_{np} = \frac{P_{вых}}{P_{ном}}, \quad (1)$$

где $P_{вых}$ – мощность в нагрузке; $P_{ном}$ – номинальная выходная мощность.

Выражение (1) можно свести к следующей формуле

$$K_{np} = \frac{P_{вых}}{P_{ном}} = \frac{P_{ex.ном}}{P_{ном}} = K_{puc} K_{ex}, \quad (2)$$

где K_{puc} – реализуемый коэффициент передачи мощности усилителя;

K_{ex} – номинальный коэффициент передачи мощности входного усилителя.

В свою очередь величина K_{puc} выражается через S-параметр [5]:

$$K_{puc} = |S_{21}|^2 \frac{(1 - |\Gamma_2|^2)(1 - |\Gamma_n|^2)}{|1 - \Gamma_2 S_{11} - K_n S_{22} + \Delta S \Gamma_2|}. \quad (3)$$

Здесь:

$\Delta S = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21}$, где, S_{22} – входной и выходной коэффициенты отражения активного элемента;

S_{12}, S_{21} – коэффициенты передачи активного элемента в прямом и обратном направлении в тракте с волновым сопротивлением Z_B ;

Γ_2 – коэффициент отражения от первой согласующей цепи (согласование по максимуму передаваемой мощности выходного иммитанса ФД и входного иммитанса входного элемента);

Γ_n – коэффициент отражения от второй согласующей цепи (согласование выходного иммитанса и иммитанса нагрузки).

Измеренный порог чувствительности схемы оказался порядка 32 мДм, что является удовлетворительным для макета прибора. Он может быть улучшен при реализации реального ПРОМ [7].

5. Выводы

Предложена физическая эквивалентная схема фотодиода, изготовленного на основе системы металл – кремний и применимого для волоконно-оптических систем связи. Измерены спектральная и частотная характеристики фотодиода. Изучен макет оптического приемного модуля и определен порог его чувствительности.

Литература

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман ; пер. с англ. под редакцией Н. Н. Слепова. – Москва : Техносфера, 2006. – 496 с.
2. Складов О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О. К. Складов. – Москва : Салон-Пресс, 2004. – 272 с.
3. Слепов Н. Н. Современная технология цифровых оптоволоконных систем связи / Н. Н. Слепов. – Москва : Радио и связь, 2003. – 468 с.
4. Foss N. A. Large – areametal – oxide – semiconductor avalanche photodiodes / N. A. Foss, S. A. Ward // J. Appl. Phys. –1973. – Vol. 44, №2. – P. 728-731.
5. Тришенков М. А. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с *p-n* переходами / М. А. Тришенков, А. И. Фриман // В сб. Полупроводниковые приборы и их применение; под ред. Я. А. Фляпова. – Москва : Сов. Радио, 1971. – Вып. 25. – С. 159 – 203.
6. Шевцов Э. А. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи / Э. А. Шевцов, М. Е. Белкин. – Москва : Радио и связь, 1992. – 224 с.
7. Панфилов И. П. Формирование солитонов с помощью свободных электронов / И. П. Панфилов, М. И. Панфилов, Ю. В. Флейта // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №5 (52). – С. 48-50.

Автори статті

Андреева Наталья Алексеевна, к.т.н., доцент кафедры физики, Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев. Тел. +380 (67) 946 54 30. E-mail: natalii-andreeva@inbox.ru

Зингаева Елена Ивановна, ст.преподаватель кафедры физики, Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев. Тел. +380 (67) 409 86 97. E-mail: lenazing@rambler.ru

Зуев Владимир Алесеевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики, Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев. Тел. (044) 440 31 86. E-mail: volodya.zyev2015@yanltx.ru.

Муравьев Владимир Михайлович, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики, Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев. Тел. +380 (96) 288 11 87. myrav@imag.kiev.ua.

Дата надходження в редакцію: 4.10.2015 р.

Рецензент: д.т.н., доц. О. О. Манько