

УДК 621.317.7

Андреева Н.А., Зуев В.А.

Государственный университет телекоммуникаций

ЛАВИННЫЙ ФОТОДИОД НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛ-ОКИСЕЛ-ПОЛУПРОВОДНИК ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Andreyeva N.O., Zuyev V.O. Metal-oxide-semiconductor avalanche photodiode for fiber optical telecommunication. This article studies characteristics of avalanche photodiode (PD) on base metal-oxide-silicon structure. The frequency characteristics of this photodiode type are studied. And on combination of photodiode and electrical power optical module and was determined the threshold. Studies with metals (Ag, Au, Cu) which is applied to the silicon plate p-type show, that photosensitivity stretching to $\lambda=2,5$ micrometer. In the result, we get that in definite choice of contacting metal, silicon conductivity type and work temperature sensitivity region can be stretched to 4 micrometer. It makes possibility to use the device in fiber optical link systems. It is two layers of p-Si: high-doped layer for multiplication of charge carriers and low-doped layer. The first layer is created by ion-implantation. A physical equivalent chart is offered of PD. The coefficient of increase is measured. Frequency descriptions of the indicated type of PD are first investigational. The threshold of his sensitiveness is certain.

Keywords photodiode, fiber optical telecommunication systems, metal-oxide-semiconductor structure, silicon

Андреева Н.О., Зуев В.О. Лавинный фотодиод на основе системы металл-окисел-напівпровідник для волоконно-оптичної телекомунікації. У статті досліджуються різні характеристики лавинного фотодіода (ФД) на основі структури «металл-окисел-кремній», придатного для використання в оптичному зв'язку. Запропонована фізична еквівалентна схема ФД. Вимірний коефіцієнт множення. Вперше досліджені частотні характеристики вказаного типу ФД. На основі комбінації ФД і електричного підсилювача розроблений і вивчений макет приймального оптичного модуля. Визначений поріг його чутливості.

Ключові слова: фотодіод, системи волоконно-оптичної телекомунікації, структура «металл-окисел-напівпровідник», кремній

Андреева Н.А., Зуев В.А. Лавинный фотодиод на основе системы металл-окисел-полупроводник для волоконно-оптической телекоммуникации. В статье исследуются различные характеристики лавинного фотодиода (ФД) на основе структуры «металл-окисел-кремний», пригодного для использования в оптической связи. Предложена физическая эквивалентная схема ФД. Измерен коэффициент умножения. Впервые исследованы частотные характеристики указанного типа ФД. На основе комбинации ФД и электрического усилителя разработан и изучен макет приемного оптического модуля. Определен порог его чувствительности.

Ключевые слова: фотодиод, системы волоконно-оптической телекоммуникации, структура «металл-окисел-полупроводник», кремний

1. Введение

Для приема оптической информации в условиях малых световых потоков необходимо значительное повышение чувствительности фотодетекторов. Для этого необходимо как использование новых фоточувствительных материалов, так и применение новых типов приборов, в частности систем металл-диэлектрик-полупроводник (МДП).

В настоящее время в волоконно-оптических системах связи (ВОСС) используются объемные лавинные фотодиоды (ЛФД) [1] или фотодиоды (ФД) с барьером Шоттки. К недостаткам этих приборов относится микроплазменные пробои, ограничивающие пороговую чувствительность и рабочую площадь прибора. Этих недостатков можно избежать при использовании лавинных МДП-фотодиодов [2, 3].

В настоящее время исследованы лавинные МДП-фотодиоды применительно к их использованию в система ВОСС.

На рис. 1 изображена схема исследованной структуры. Принципиальным является существование высоколегированного слоя полупроводника (1) и слаболегированного слоя (2), который образует объем кремния.

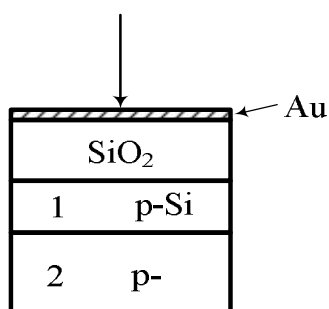


Рис. 1. Структура МДП-фотодиода

Первый слой создан с помощью ионной имплантации. Он также автоматически образуется в процессе химико-механической полировки при введении примесей и дефектов. Его толщина составляет $0,4 \div 0,5$ мкм, а концентрация акцепторов $10^{18} \div 10^{19}$ см³.

2. Анализ процессов лавинного умножения области пространственного заряда

К структуре (рис. 1) прикладывается импульс напряжения $U(t)$ с полярностью, соответствующей области пространственного заряда (ОПЗ) и длительностью, не превышающей времени возникновения слоя неравновесных носителей на границе полупроводник-диэлектрик. Приложенное напряжение делится между диэлектриком и ОПЗ:

$$U(t) = U_d + \varphi_s, \quad (1)$$

где U_d – напряжение в полупроводнике; φ_s – поверхностный потенциал полупроводника.

Выражения для φ_s и поверхностной напряженности поля можно получить, решая уравнение Пуассона для системы полупроводник-диэлектрик. Увеличение $U(t)$ ведет к увеличению U_d и φ_s . Если напряженность поля превышает некоторую критическую величину для данного полупроводника, а концентрация легирующей примеси полупроводника соответствует диапазону лавинного пробоя МДП-структуры, то в поверхностной области полупроводника развивается процесс умножения носителей посредством ударной ионизации. Поскольку распределение поля в ОПЗ МДП-структуры совпадает с распределением поля коллектора резкого p-n-перехода, процесс умножения может быть описан эмпирической формулой Миллера:

$$i_{\text{л}} / i_0 \left[1 - (\varphi_s / \varphi_{s \text{ пр}})^{n'} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $i_{\text{л}}$ – ток носителей, возникающий в результате лавинного умножения; i_0 – ток, индуцирующий лавинный процесс; $\varphi_{s \text{ пр}}$ – потенциал пробоя, при котором $i_{\text{л}} / i_0 = \infty$; n' – эмпирический показатель, зависящий от распределения i_0 в ОПЗ.

Рост ведет к возрастанию умножения и лавинного тока. Последний представляет собой сумму токов основных и неосновных носителей. Одновременно происходит накопление неосновных носителей на границе раздела полупроводник-диэлектрик и увеличение. Рост может быть связан также с процессами поверхностной генерации и подтоком неосновных носителей по поверхности. Две последние составляющие в большинстве случаев малы по сравнению с лавинным током, поэтому

$$\Delta Q_{\text{дн}}(t) = \frac{1}{S} \int_0^t i_{\text{л}} dt, \quad (3)$$

где $\Delta Q_{\text{дн}}$ – заряды границы раздела диэлектрик-полупроводник; S – площадь металлического электрода.

Следует ожидать замедление роста φ_s и i_l и установления, таким образом, некоторого самосогласованного процесса развития лавины. Для линейного закона нарастания импульса напряжения ($U(t) = at$) может быть устойчивый лавинный процесс, при этом квазиравновесное значение лавинного тока равно

$$i_l^0 = a \varepsilon_d \varepsilon_0 S d^{-1} = a C_d, \quad (4)$$

где ε_d – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ε_0 – электрическая постоянная.

Таким образом, существенным отличием развития лавинного процесса в МДП-фотодиодах от лавинного процесса в диодах на p-n-переходе является эффект стабилизации лавинного тока по внешнему напряжению. Коэффициент умножения лавинного процесса M , равный отношению i_l/i_0 , также стабилизируется на постоянном уровне. На рис. 2 приведена зависимость M от напряжения смещения U для ЛФД на основе Si с толщиной $\text{SiO}_2 \approx 100$ нм.

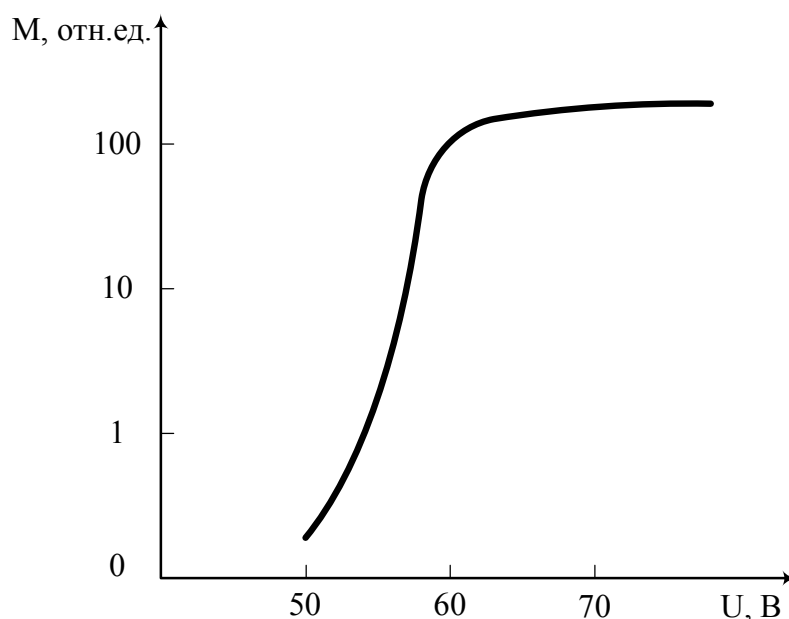


Рис. 2. Зависимость коэффициента умножения от напряжения смещения

3. Эквивалентная схема фотодиода и частотная характеристика передачи

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

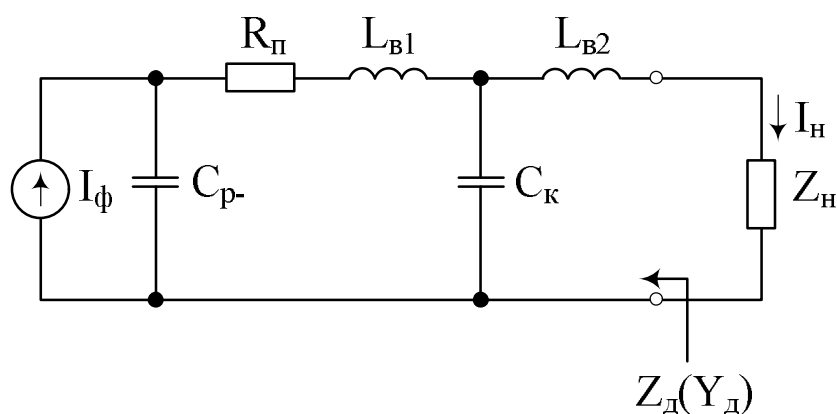


Рис. 3. Эквивалентная схема фотодиода

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

C_{p-n} – емкость p-n перехода; $R_{п}$ – сопротивление потерь фотодиода;
 $L_{в1}$ – индуктивность выводов; $C_{к}$ – емкость пакетного корпуса;
 $L_{в2}$ – индуктивность внешних выводов; $Z_{д}$ – полное сопротивление структуры;
 $Y_{д}$ – проводимость на клеммах диода; $Z_{н}$ – сопротивление нагрузки;
 $I_{ф}$ – фототок; $I_{н}$ – ток в нагрузке.

В нашем случае были установлены следующие значения параметров ФЭС: $C_{p-n}=4$ пФ, $C_{к}=1$ пФ, $L_{в1}=15$ нГн, $L_{в2}=8$ нГн, $R_{п}=60$ Ом.

На рис. 4 изображена частотная характеристика (ЧХ) лавинного ФД.

Из литературных данных следует, что ЧХ в данном случае не уступает ЧХ для германиевого ФД [6]. Возможна дальнейшая оптимизация ФД путем улучшения корпуса прибора.

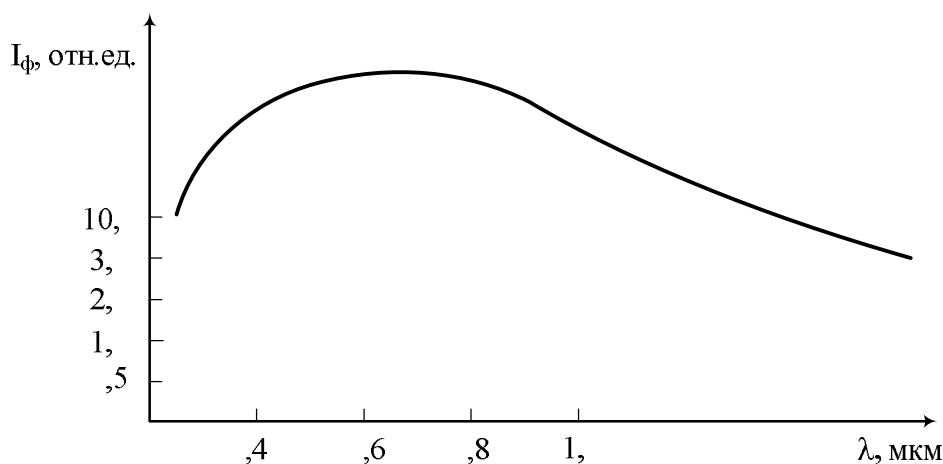


Рис. 4. Частотная характеристика фотодиода

4. Макет приемного оптического модуля (ПРОМ)

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

$$K_{пр} = \frac{P_{вых}}{P_{ном}}, \quad (5)$$

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

Выражение (5) можно свести к следующей формуле

$$K_{пр} = \frac{P_{вых}}{P_{вх.ном}} \cdot \frac{P_{вх.ном}}{P_{ном}} = K_{рел} K_{вх}, \quad (6)$$

где $K_{рел}$ – реализуемый коэффициент передачи мощности усилителя,

$K_{вх}$ – номинальный коэффициент передачи мощности входного усилителя.

В свою очередь величина $K_{рел}$ выражается через S-параметр [6]:

$$K_{рел} = |S_{21}|^2 \frac{(1 - |\Gamma_1|^2)(1 - |\Gamma_2|^2)}{|1 - \Gamma_1 S_{11} - K_{н} S_{22} + \Delta S \Gamma_1|}. \quad (7)$$

Здесь: $\Delta S = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21}$,

где S_{11} , S_{22} – входной и выходной коэффициенты отражения активного элемента;

S_{21} , S_{12} – коефіцієнти передачі активного елемента в прямому і зворотному напрямку в тракту з хвильовим опором Z_B ;

Γ_1 – коефіцієнт відбиття від першої узгодженої ланки (узгодження по максимуму передаваної потужності вихідного іммітанса ФД і вхідного іммітанса вхідного елемента);

Γ_2 – коефіцієнт відбиття від другої узгодженої ланки (узгодження вихідного іммітанса і іммітанса навантаження).

Виміряний поріг чутливості схеми виявився порядку 30 дБм, що є задовільним для макету пристрою. Він може бути покращений при реалізації реального ПРОМ [6].

5. Висновки

Представлено фізичну еквівалентну схему лавинного фотодіода, виготовленого на основі системи метал-діелектрик-кремній і застосованого для волоконно-оптичних систем зв'язу. Виміряні частотні характеристики фотодіода. Вивчено макет оптичного прийомного модуля і визначено поріг його чутливості.

Література

1. Фриман Р. Волоконно-оптичні системи зв'язу / Р. Фриман ; пер. з англ. під редакцією Н.Н. Слепова. – Москва : Техносфера, 2006. – 496 с.
2. Андреева Н.А. Частотні характеристики лавинного кремнієвого фотодіода з бар'єром Шоттки / Н.А. Андреева, Е.И. Зингаєва; В.А. Зуєв, В.М. Мурав'єв // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2016. – №3. – С. 61-65.
3. Foss N.A. Large – areametal – oxide – semiconductor avalanche photodiodes / N.A. Foss, A. Ward // J. Appl. Phys. – 1973. – Vol. 44. – №2. – P. 728-731.
4. Кравченко А.Б. О можливості створення імпульсного лавинного фотоприйомника з стійким внутрішнім опором на основі МДП-структури / А.Б. Кравченко, А.Ф. Плотников, В.З. Шубін // Квантова електроніка. – 1978. – Т.5. – №9. – С. 1918-1923.
5. Трищенко М.А. Фотоелектричні напівпровідникові пристрої з р-п переходами / М.А. Трищенко, А.И. Фрімер // В зб. Полупровідникові пристрої і їх застосування ; під ред. Я.А. Фляпова. – Москва : Сов. Радио, 1971. – Вип. 25. – С. 159-203.
6. Шевцов Э.А. Фотоприйомні пристрої волоконно-оптичних систем передачі / Э.А. Шевцов, М.Е. Белкін. – Москва : Радио і зв'язь, 1992. – 224с.

Автори статті

Андреева Наталія Олексіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (67) 946 54 30. E-mail: natalii-andreeva@inbox.ru

Зуєв Володимир Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики, Державний університет телекомунікацій, Київ. (Тел. +380 (44) 440 31 86. E-mail: volodya.zyev2015@yanltx.ru)

Authors of the article

Andreyeva Nataliya Oleksiyivna – candidate of sciences (technical), associate professor of physics department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (67) 946 54 30. E-mail: natalii-andreeva@inbox.ru

Zuyev Volodymyr Oleksiyovych – doctor of sciences (physics and mathematics), professor of physics department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (44) 440 31 86. E-mail: volodya.zyev2015@yanltx.ru

Рецензент:

Дата надходження
в редакцію: 21.07.2016 р.

доктор технічних наук, професор В.А. Дружинін
Державний університет телекомунікацій