

К. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА

Республика Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика–Солнце»  
E-mail: yodgorova@uzsci.net

Дата поступления в редакцию  
2.07 2009 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН  
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

## ЭФФЕКТ УСИЛЕНИЯ ФОТОТОКА В ФОТОДИОДНОЙ СТРУКТУРЕ С ПРЯМО- И ОБРАТНОВКЛЮЧЕННЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

*Произведена оценка коэффициента фотоэлектрического усиления по току двухбарьерной фотодиодной Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структуры. Такие структуры, обладая свойством усилителя, представляют интерес для создания устройств приема оптических сигналов.*

Качественный прием оптических сигналов возможен при условии высокой чувствительности приемников слабых оптических сигналов. Однако используемые в настоящее время лавинные фотодиоды не могут работать без стабилизации рабочего режима, и в лавинном режиме в них увеличиваются шумовые токи [1, с. 143—145]. В связи с этим, для повышения чувствительности приемников разработчики оптоэлектронных устройств стали обращаться к биполярным ( $n-p-n$ ,  $p-n-p$ ) и полевым транзисторам с управляющим  $p-n$ -переходом, обладающим внутренним усилением. Однако эффект накопления заряда в базе и сравнительно большие токи утечки ( $7 \cdot 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>) в биполярных фототранзисторах ограничивают их использование при низких уровнях входного сигнала [2, с. 488—507], т. к. полезный сигнал должен быть намного больше тока утечки. Кроме того, для увеличения коэффициента их усиления необходимо уменьшать толщину базы, а для увеличения fotocувствительности толщину базы необходимо увеличивать. Уйти от этого противоречия сложно, т. е. биполярный фототранзистор может иметь либо большую fotocувствительность, либо высокий коэффициент усиления.

Полевые фототранзисторы обладают высоким коэффициентом усиления, однако имеют ограничения в части повышения частотного диапазона. Необходимо отметить, что в режиме отсечки канала биполярный транзистор содержит два обратно- ( $n-p-n$ ) или прямо- ( $p-n-p$ ) включенных перехода (рис. 1, а), а полевой транзистор имеет два обратновключенных относительно рабочего напряжения ( $n-p-n$ ) перехода (рис. 1, б).

Авторы [3, 4], воспользовавшись этими свойствами полевого и биполярного транзисторов, разработали двух- и трехбарьерные фотодиодные структуры с прямо- и обратновключенными переходами, в которых один из полупроводниковых переходов заменен на металлополупроводниковый. При этом в зависи-

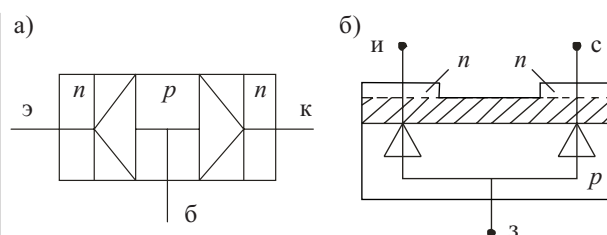


Рис. 1. Эквивалентные схемы биполярного (а) и полевого (б) транзисторов в режиме отсечки

мости от режима включения металлополупроводниковый или полупроводниковый переходы поочередно выполняют роль затвора, управляющего толщиной слоя объемного заряда, а напряжение затвора зависит от интенсивности падающего света. С помощью таких фотодиодов можно создавать оптоэлектронные устройства для приема и передачи слабых оптических сигналов.

В настоящей работе проводились исследования оптико-электрических характеристик двухбарьерной фотодиодной Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структуры с изотипным гетеропереходом, которая использовалась в качестве приемника оптических сигналов, а также была произведена оценка коэффициента фотоэлектрического усиления такого приемника. Технология изготовления и основные параметры двухбарьерной Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структуры приведены в ранее опубликованной работе [4].

Принципиальная схема приема и передачи оптического сигнала приведена на рис. 2. В качестве излучателя использовался светодиод АЛ1107А. По паспортным данным его рабочее напряжение лежит в интерва-

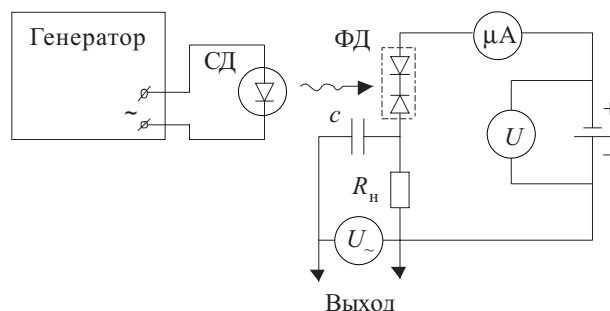


Рис. 2. Принципиальная схема, иллюстрирующая прием светового излучения фотодиодом

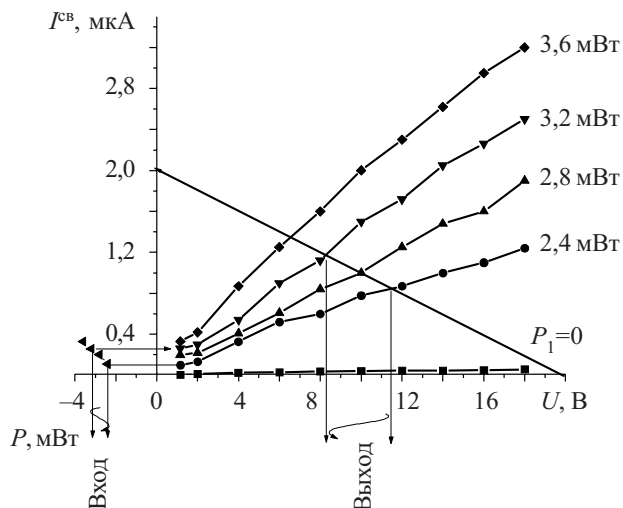


Рис. 3. Выходные характеристики двухбарьерной Ag-nGaAs-nGaInAs-Ag-структуры

ле от 0 до 1,5 В, максимальная мощность излучения составляет  $P=6$  мВт при длине волны  $\lambda=0,95$  мкм [5, с. 34—35]. Оптический сигнал на фотодиодную двухбарьерную структуру подавался от светодиода, возбуждаемого генератором синусоидальных импульсов с частотой 200 Гц. Без подсветки темновой ток, который определяется запираемым переходом «металл—полупроводник», составил 57 нА при напряжении питания 18 В. При подсветке с ростом рабочего напряжения наблюдалось увеличение светового тока, а темновой ток изменялся незначительно, т. е. при заданной интенсивности светового излучения выходной сигнал увеличивается. Было сформировано семейство выходных характеристик при фиксированных значениях интенсивности излучения по мере ее увеличения (рис. 3).

Токовая фоточувствительность  $S_I^\Phi$  при заданной интенсивности светового излучения и соответствующих значениях напряжения определяется отношением выходного фототока  $I_{\text{вых}}^\Phi$  к величине мощности светового возбуждающего сигнала:

$$S_I^\Phi = I_{\text{вых}}^\Phi / P_{\text{п}}$$

Как следует из рис. 3, выходная токовая фоточувствительность увеличивается с ростом рабочего напряжения, и, соответственно, выходной сигнал относительно входного светового сигнала (исходящего от светодиода) увеличивается. В данном случае за входной сигнал принимается первичный фототок  $I_{\text{п}}^\Phi$ , создаваемый при рабочем напряжении, равном контактной разности потенциалов освещаемого перехода, когда усиление еще не наступило. Входная токовая фоточувствительность — отношение фототока к поступающей мощности  $S_{\text{вх}}^\Phi = I_{\text{вх}}^\Phi / P_{\text{п}}$  — определяется для каждого фиксированного значения интенсивности светового излучения.

Для приведенной электрической схемы включения фотодиода (рис. 2) коэффициент усиления будет определяться отношением выходного сигнала к входному, т. е. отношением выходной токовой фоточувствительности к входной  $M_I = S_I^\Phi / S_{\text{вх}}^\Phi$ .

Значения светового тока и коэффициента усиления по току  $M_I$ , рассчитанного на основании экспериментально полученных кривых, представленных на рис. 3, сведены в таблицу.

Как видно из таблицы, коэффициент усиления по току увеличивается с ростом рабочего напряжения, а с ростом мощности светового сигнала — уменьшается. Это говорит о том, что исследуемая Ag-nGaAs-nGaInAs-Ag-структура эффективна для приема слабых оптических сигналов (рис. 4).

Следует отметить, что выходное напряжение, являясь произведением фоточувствительности и сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$ , имеет тем большее значение, чем больше выходное динамическое сопротивление  $R_{\text{д}}$ :

$$U_{\text{вых}}^\Phi = I_{\text{вых}}^\Phi R_{\text{з}}$$

$$R_{\text{з}} = \frac{R_{\text{д}} R_{\text{н}}}{R_{\text{д}} + R_{\text{н}}}$$

$$R_{\text{д}} = \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial I_{\text{вых}}}$$

где  $R_{\text{з}}$  — сопротивление эквивалентной нагрузки.

Световой ток  $I_{\text{вых}}^{\text{св}}$  и коэффициент усиления по току  $M_I$  при различной мощности светового излучения

$U_{\text{раб}}, \text{ В}$	$I_{\text{св}}^{\text{вх}}, \text{ мкА}$	$I_{\text{вых}}^{\text{св}}, \text{ мкА}$ , при различных $P_{\text{п}}$			$M_I$ при различных $P_{\text{п}}$		
		2,4 мВт	3,2 мВт	3,6 мВт	2,4 мВт	3,2 мВт	3,6 мВт
1,15	0,007	0,11	0,25	0,36	1,00	1,00	1,00
2	0,015	0,135	0,30	0,42	1,16	1,17	1,14
4	0,025	0,33	0,60	0,87	2,96	2,36	2,39
6	0,030	0,52	0,90	1,25	4,75	3,58	3,45
8	0,040	0,60	1,12	1,60	5,43	4,44	4,42
10	0,043	0,78	1,50	2,00	7,15	5,99	5,54
12	0,046	0,87	1,72	2,30	8,00	6,88	6,38
14	0,048	1,00	2,05	2,62	9,24	8,24	7,28
16	0,050	1,10	2,26	2,95	10,19	9,09	8,21
18	0,057	1,24	2,50	3,20	11,48	10,05	8,90

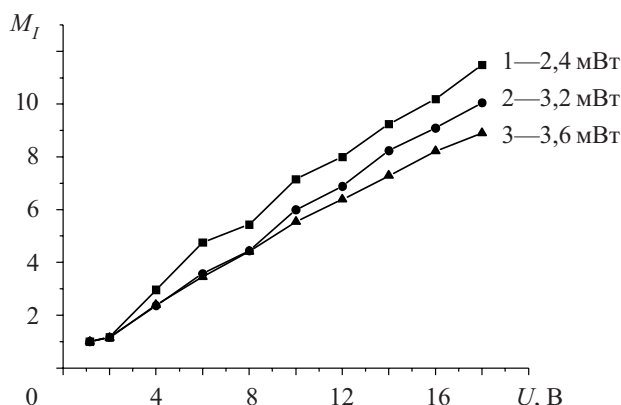


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления по току двухбарьерной структуры от рабочего напряжения при различной мощности падающего светового излучения

Слабую зависимость обратного темнового тока от рабочего напряжения можно объяснить генерационными процессами, протекающими в области объемного заряда запираемого потенциального барьера.

Рассматривая коэффициент усиления фотодиода, управляемого полем, следует учитывать зависимость толщины слоя объемного заряда от рабочего напряжения и процессов фотогенерации носителей. Как видно из выходных характеристик двухбарьерной фотодиодной структуры, пропорционально рабочему напряжению увеличивается фототок, т. е. темпы фотогенерации носителей. Соответственно, основной механизм усиления фототока связан с генерацией несомненных фотоносителей преимущественно в слое объемного заряда, а именно, пропорционально количеству носителей, фотогенерированных в запираемом переходе, переносятся темновые носители через прямовключенный переход.

Связь коэффициента усиления с рабочим напряжением можно выразить через толщину слоя объемного заряда  $W$  следующим эмпирическим выражением:

$$M = \frac{I^{\phi}}{I^{\phi} - I_{\text{п}}^{\phi}} = \left( \frac{W^{\text{раб}}}{W^{\text{исх}}} \right)^n,$$

где  $I^{\phi}$  — фототок при заданном напряжении;

$I_{\text{п}}^{\phi}$  — первичный фототок;

$W^{\text{раб}}$  — толщина слоя объемного заряда при заданном напряжении;

$W^{\text{исх}}$  — толщина слоя объемного заряда при нулевом смещении;

$n$  — определяется закономерностью зависимости толщины слоя объемного заряда от напряжения.

\*\*\*

Таким образом, экспериментально установлено, что двухбарьерная фотодиодная Ag–NGaAs–nGaInAs–Ag-структура обладает качеством усилителя, в котором малые изменения входного сигнала вызывают большие изменения выходного сигнала.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Основы волоконно-оптической связи / Под ред. Е. М. Дианова.— М.: Сов. радио, 1980.
2. Техника оптической связи / Под. ред. М. А. Трищенко.— М.: Мир, 1988.
3. А. с. 167399. Трехбарьерный фотодиод Каримова / А. В. Каримов.— 8.05 1991.
4. Каримов А. В., Едгорова Д. М., Гиясова Ф. А. и др. Особенности фотоэлектрических характеристик фотоэлектронпреобразовательных структур // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2007.— № 4.— С. 23—28.
5. Иванов В. И., Аксенов А. И., Юшин А. М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы.— М.: Энергоатомиздат, 1984.

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ефименко А. А., Симонов В. В. Конструирование электронных средств. Механические структуры: Справочник (на украинском языке.) — Одесса: Политехперіодика, 2009.— 548 с.

Справочник содержит широкую техническую информацию, которая поможет упорядочить и облегчить процесс конструирования деталей и сборочных единиц механических структур электронных средств. Это технологические требования, сведения о шероховатости и отклонениях формы и расположения поверхностей, о механических разъемных и неразъемных соединениях, обеспечении взаимозаменяемости, конструкционных материалах и покрытиях. В справочнике также имеются различные общие сведения, необходимые конструктору.

Справочник предназначен для инженеров электронного аппаратостроения, вместе с тем он может быть полезен студентам соответствующих специальностей технических вузов при курсовом и дипломном проектировании.

