

06.2

## **Предельная чувствительность фотоприемного устройства на основе фотодиодов $A^3B^5$ среднего ИК-диапазона спектра**

© Г.А. Гаврилов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: g.sotnikova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 апреля 2011 г.

Представлен анализ шумов фотоприемного устройства на базе фотодиода (ФД) среднего ИК-диапазона, выполненного по схеме трансимпедансного усилителя, и даны рекомендации по выбору типов усилительных элементов в зависимости от величины динамического сопротивления используемых фотодиодов. Показано, что современные малошумящие усилители позволяют реализовать потенциальную пороговую чувствительность фотоприемного устройства только с ФД, динамическое сопротивление которых более  $50 \Omega$ .

Фотометрия в ближней ( $\lambda \sim 1 \mu\text{m}$ ) и средней ( $\lambda = 2-5 \mu\text{m}$ ) областях ИК-спектра имеет большое количество практических приложений, включая газовый анализ, пирометрию, тепловидение и др. Низкий уровень собственных шумов фотоприемников на основе фотовольтаических детекторов, работающих без смещения, потенциально позволяет создавать прецизионные измерительные устройства с характеристиками точности и чувствительности, не достижимыми для приборов, использующих детекторы других типов. Для создания детекторов в указанных диапазонах спектра наряду с широко распространенным кремнием и  $\text{CdHgTe}$  [1] в последние годы все чаще используются узкозонные соединения и твердые растворы  $A^3B^5$  [2-8], для которых характерны металлургическая стабильность, невосприимчивость к влаге, а также однородность свойств по поверхности эпитаксиальных структур, например малый разброс значений динамического сопротивления при нулевом смещении для фотодиодов, получаемых из разных участков эпитаксиальной пластины.

Отношение сигнал/шум на выходе фотоприемного устройства (ФУ) определяется суммой собственного шума фотодиода (ФД) и шумов, вносимых электронной схемой преобразования и усиления сигнала. Пороговая чувствительность ФУ определяется минимальной мощностью излучения (NEP) на входе ФД, при которой отношение сигнал/шум на выходе ФУ равно 1. Предельная пороговая чувствительность ФУ достигается, если его шумы определяются только собственными шумами ФД.

Усилитель для ФД характеризуется спектральными плотностями шума по току ( $\sqrt{i_n^2}$ , А/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ) и по напряжению ( $\sqrt{e_n^2}$ , В/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ). Фототок является линейным откликом ФД на падающее излучение, поэтому при оценке отношения сигнал/шум в качестве параметров источников шумов ФУ приводят, как правило, их токовые эквиваленты. В частности, шумовое напряжение усилителя трансформируется в дополнительный токовый шум на фотодиоде  $\sqrt{e_n^2}/R_0$ . Для наиболее распространенных на сегодняшний день кремниевых ФД значение  $R_0$  очень велико ( $\sim 10^{12}\Omega$ ), поэтому токовая составляющая шумов оказывается пренебрежимо малой и, как правило, игнорируется, а при выборе усилителей обычно ориентируются на их минимальный токовый шум. Такой подход вполне оправдан для коротковолновых фотодиодов на основе широкозонных полупроводников (Si, GaAs), поскольку обеспечивает пороговую чувствительность ФУ, близкую к предельной. С уменьшением ширины запрещенной зоны возрастает концентрация собственных носителей и уменьшается высота потенциального барьера  $p$ - $n$ -перехода, поэтому принципиальным свойством средневолновых ФД на основе узкозонных полупроводников  $A^3B^5$  является их низкое динамическое сопротивление  $R_0$ . В этом случае вольтыые шумы усилителя вносят существенный вклад в шумы ФУ, и его пороговая чувствительность оказывается ниже потенциально возможной.

В данной работе выполнен анализ шумов ФУ, содержащих ФД на основе  $A^3B^5$  с различной величиной динамического сопротивления, оценен вклад шумов различных типов усилителей в суммарные шумы ФУ и определены условия, при которых указанные фотопремники позволяют реализовать предельную пороговую чувствительность ФУ.

Спектральные плотности шума ФД по напряжению и току в фотовольтаическом режиме описываются выражениями:

$$\sqrt{e_n^2} = \sqrt{4kTR_0}, \quad \sqrt{i_n^2} = \frac{\sqrt{4kTR_0}}{R_0} = \sqrt{\frac{4kT}{R_0}}, \quad (1)$$

где  $R_0$  — динамическое сопротивление ФД при отсутствии смещения,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура диода (К).

Опубликованные значения удельного динамического сопротивления  $R_0$  для ФД различных спектральных диапазонов и расчетная величина  $R_0A$  для площади активной области  $A \sim 0.1 \text{ mm}^2$

	Спектральный диапазон				
	видимый	ближний ИК	средний ИК		
	0.2–1 $\mu\text{m}$	1–2 $\mu\text{m}$	2–3 $\mu\text{m}$	3–4 $\mu\text{m}$	4–5 $\mu\text{m}$
$R_0A, \Omega \cdot \text{cm}^2$	$10^7 - 10^9$ [2]	$\sim 5 \cdot 10^3$ [2]	20 [4,8] 27 [2] 10–40 [7]	$(2-3) \cdot 10^{-2}$ [5] $(5-8) \cdot 10^{-2}$ [7] $\sim 0.2$ [9] 0.1–0.5 [1] 1–1.5 [8]	0.01–0.002 [1] 0.1–0.015 [3,8] $\sim 0.15$ [6]
$R_0, \Omega$ ( $A = 0.1 \text{ mm}^2$ )	$10^{10} - 10^{12}$	$\sim 5 \cdot 10^6$	$(10-40) \cdot 10^3$	$10^2 - 10^3$	2–150

Письма в ЖТФ, 2011, том 37, вып. 18

Шум ФД пропорционален квадратному корню из площади его чувствительного элемента ( $\sqrt{A}$ ), поэтому для сравнения пороговой чувствительности ФД различной площади обычно используют понятие удельной эквивалентной мощности  $NEP^*$ :

$$NEP^* = \frac{NEP}{\sqrt{A}} = \frac{\sqrt{i_n^2}}{S_i \sqrt{A}} = \frac{\sqrt{4kT}}{S_i \sqrt{AR_0}} \text{ [W}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \text{cm}], \quad (2)$$

где  $S_i$  [A/W] — токовая чувствительность фотодиода.

В таблице приведены значения одного из основных параметров, характеризующих качество ФД — произведения  $R_0A$ , для ФД различных спектральных диапазонов и величин динамического сопротивления  $R_0$  для ФД с характерной площадью чувствительной области  $A = 0.1 \text{ mm}^2$ , полученные из опубликованных описаний образцов (нижняя строка таблицы). Из таблицы видно, что величина динамического сопротивления ФД среднего ИК-диапазона на несколько порядков меньше, чем для диодов видимого и ближнего ИК-диапазонов, и изменяется от десятков  $k\Omega$  до единиц  $\Omega$ .

Для усиления сигнала ФД, который можно представить как идеальный источник фототока, шунтированный резистором  $R_0$ , общепринятым является использование трансимпедансной схемы усилителя, являющейся преобразователем ток—напряжение с резистивным измерительным элементом  $R_f$  [1,2,9] (рис. 1). Выходным сигналом ФУ

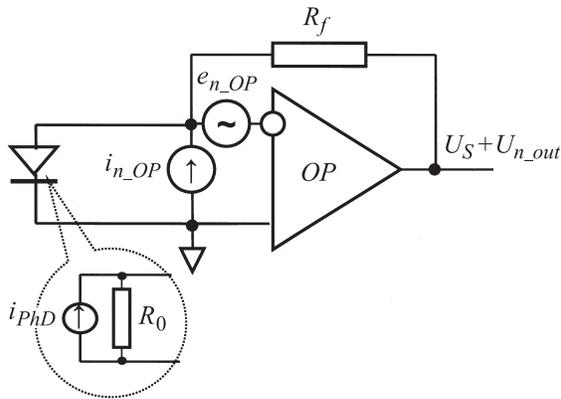


Рис. 1. Схема трансимпедансного усилителя тока фотодиода.

является напряжение  $U_S = R_f I_{PhD}$ . В качестве активного элемента такой схемы обычно используются операционные усилители (ОУ), при этом результирующий шум на входе ОУ можно записать в следующем виде:

$$i_{n-\Sigma} = \sqrt{i_{n-PhD}^2 + i_{OP}^2 + i_{R_f}^2}$$

$$= \sqrt{\frac{4kTR_0}{R_0^2} + i_{n-OP}^2 + i_{n-OP}^2 + \left(\frac{e_{n-OP}}{R_0}\right)^2 + \frac{4kTR_f}{R_f^2}} \text{ [A]}, \quad (3)$$

где индексом „OP“ обозначены шумы, относящиеся к ОУ.

Так как величина  $R_f$  обычно много больше  $R_0$ , то последним слагаемым под корнем в (3) можно пренебречь. Второе и третье слагаемые определяют шумы, неизбежно вносимые усилителем, причем их величина резко возрастает при малых значениях  $R_0$ . С учетом шумов усилителя эквивалентная пороговая мощность ФУ  $NEP_{\Sigma}$  увеличивается:

$$NEP_{\Sigma} = \frac{\sqrt{i_{n-PhD}^2 + i_{n-PO}^2 + e_{n-PO}^2/R_0^2}}{S_i} \text{ [W}/\sqrt{\text{Hz}}], \quad (4)$$

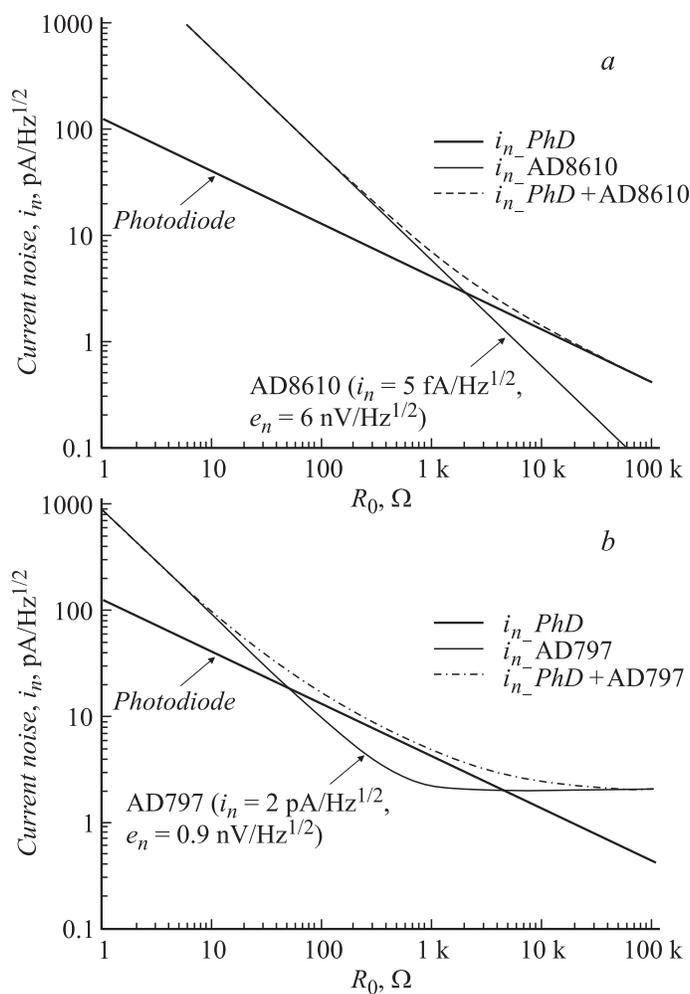
и соответственно результирующая пороговая чувствительность ухудшается.

В растоящее время используемые для усиления слабых сигналов малозумящие операционные усилители можно разделить на 2 класса:

— операционные усилители с входным каскадом на биполярных транзисторах, обладающие самыми низкими значениями шумов по напряжению (менее  $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ), но значительными токовыми шумами (единицы  $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ),

— операционные усилители с входным каскадом на полевых транзисторах, обладающие самыми низкими токовыми шумами (единицы  $\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ), но значительными значениями шумов по напряжению (единицы  $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ).

Проведем анализ результирующих шумов ФУ, выполненных на ОУ фирмы Analog Device: AD797 на биполярных транзисторах ( $e_{n-OP} = 0.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,  $i_{n-OP} = 2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) и AD8610 на полевых транзисторах ( $e_{n-OP} = 6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,  $i_{n-OP} = 5 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ), являющихся одними из лучших в своем классе. На рис. 2 представлены зависимости шумов



**Рис. 2.** Токовые шумы фотодиода, операционных усилителей (сплошные линии) и суммарные шумы фотоприемников (пунктирные линии) для ОУ на биполярных транзисторах AD797 (b) и ОУ на полевых транзисторах AD8610 (a) для фотодиодов с различным значением динамического сопротивления  $R_0$ .

ФД, шумов, вносимых ОУ, а также суммарных шумов ФУ от величины динамического сопротивления  $R_0$ . Из рис. 2, *a* видно, что при традиционном выборе усилителя (с минимальными токовыми шумами — ОУ на полевых транзисторах AD8610) его относительно высокие вольтовые шумы вносят определяющий вклад в суммарные шумы фотоприемника (третье слагаемое в выражении (3)) вплоть до сопротивлений фотодиода порядка  $3 \text{ k}\Omega$ . На практике средневолновые ФД с динамическим сопротивлением  $R_0 \geq 3 \text{ k}\Omega$  встречаются крайне редко, поэтому создание ФУ с использованием ОУ на полевых транзисторах нецелесообразно, так как не позволяет обеспечить предельную пороговую чувствительность. Для средневолновых диодов необходимо использовать усилители с меньшим уровнем вольтовых шумов, т.е. усилители с входными цепями на биполярных транзисторах. Действительно, как видно из рис. 2, *b*, шумы, вносимые ОУ AD797, не превышают собственные шумы диодов в диапазоне „типичных“ сопротивлений ФД ( $50 \Omega \leq R_0 \leq 3 \text{ k}\Omega$ ). Однако при сопротивлениях ФД менее  $50 \Omega$  даже данный усилитель не позволяет реализовать предельную пороговую чувствительность ФУ.

Зависимости  $i_{n\_phD}$  и  $i_{n\_Σ}$  от  $R_0$ , аналогичные приведенным на рис. 2, для любых других ОУ с известными шумовыми характеристиками, позволяют определить диапазон значений  $R_0$ , внутри которого могут быть реализованы предельные значения ФУ. Такой анализ особенно важен при рассмотрении работы ФД в условиях изменения температуры, сопровождающегося существенным изменением динамического сопротивления  $R_0$ .

Из вышесказанного ясно, что при выборе ФД для реализации высокочувствительного ФУ необходимо проводить анализ не только традиционных параметров, таких как обнаружительная способность ( $D$ ) или эквивалентная шумовая мощность (NEP), но и динамического сопротивления  $R_0$ . Такой анализ целесообразно проводить также и при разработке самих ФД. Так, при уменьшении размера области  $p$ - $n$ -перехода (мезы) можно целенаправленно добиться оптимального „высокого“ значения  $R_0$  для выбранной исследователем усилительной схемы; при этом потерю чувствительности из-за уменьшения площади мезы можно компенсировать за счет дополнительных оптических концентраторов — „встроенных“ [3] и/или иммерсионно сопряженных с ФД [4], увеличивающих площадь сбора излучения. Другая возможность увеличения  $R_0$  состоит в изменении дизайна внутренней структуры ФД, например путем увеличения числа гетеропереходов. Так, например, при переходе от одиночной  $p$ -InAsSbP/ $n$ -InAs к двойной гетероструктуре

$p$ -InAsSbP/ $n$ -InAs/ $n$ -InAsSbP происходят возрастание динамического сопротивления диода и изменение токопрохождения в структуре за счет дополнительного барьера, возникающего на изотипной гетерогранице  $n$ -InAs/ $n$ -InAsSbP [10]. Необходимо помнить, что достигаемое при этом увеличение  $R_0$  сопровождается некоторой потерей чувствительности ФД за счет уменьшения фототока. Увеличить динамическое сопротивление на 1–2 порядка, сохранив при этом высокую токовую чувствительность и достаточно большую площадь мезы, можно понижая температуру фотодиода до  $t \sim (-40^\circ \text{C})$ , что обеспечивается элементами Пельтье [8].

Таким образом, показано, что современная элементная база операционных усилителей позволяет реализовать предельную пороговую чувствительность ФУ в средней ИК-области спектра при комнатной температуре, но только при значениях динамического сопротивления фотодиода  $R_0 > 50 \Omega$ . Для достижения предельной пороговой чувствительности фотоприемников с меньшими значениями динамического сопротивления ФД необходимы усилители с вольтовыми шумами  $e_{n\_op} < 0.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Гц}}$ . ФУ среднего ИК-диапазона с предельными пороговыми характеристиками востребованы в низкотемпературной пирометрии, эмиссионной спектроскопии и оптическом детектировании газов с концентрациями на уровне единиц ppm.

## Список литературы

- [1] Каталог фирмы, [www.vigo.com.pl](http://www.vigo.com.pl)
- [2] Каталог фирмы, [www.hamamatsu.su](http://www.hamamatsu.su)
- [3] *Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д.* и др. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 3. С. 1389–1394.
- [4] *Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А.* и др. // ФТП. 2007. Т. 41. В. 11. С. 412–417.
- [5] *Михайлова М.П., Андреев И.А., Моисеев К.Д.* и др. // ФТП. 2011. Т. 45. В. 2. С. 251–255.
- [6] *Шерстнев В.В., Старостенко Д., Андреев И.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 1. С. 11–17.
- [7] Каталог фирмы, [www.ibsg.ru](http://www.ibsg.ru)
- [8] Каталог фирмы, [www.ioffeled.com](http://www.ioffeled.com)
- [9] Каталог фирмы, [www.teledynejudson.com](http://www.teledynejudson.com)
- [10] *Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А.* и др. // ФТП. 2011. Т. 45. В. 4. С. 554–559.