

УДК 621.387

doi: 10.53816/23061456_2025_5–6_137

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА ТЕМНОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ФОТОПРИЕМНИКАХ

METHOD FOR CALCULATING THE NUMBER OF DARK ELECTRONS IN SOLID-STATE PHOTODETECTORS

Канд. техн. наук Р.С. Володин, канд. техн. наук А.Л. Камышев, канд. техн. наук Е.А. Федяй

Ph.D. R.S. Volodin, Ph.D. A.L. Kamyshev, Ph.D. E.A. Fedyai

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Рассмотрены физические процессы, определяющие образование темновых электронов в твердотельных фотоприемниках. Представлена методика, позволяющая определить количество темновых электронов в твердотельных фотоприемниках. Определены температурные режимы и диапазоны, при которых происходит образование темновых электронов, как за счет ионизации примеси, так и за счет термогенерации. Приведены количественные оценки числа темновых электронов, величины накопленного заряда и темнового тока от таких параметров, как температура, ширина запрещенной зоны материала и длительность временного интервала накопления. Показано, что снижение уровня темновых электронов и соответствующего тока до минимальных значений при фиксированном времени накопления достигается за счет оптимизации типа фотоприемника и рабочих температур.

Ключевые слова: твердотельные фотоприемники, чувствительность фотоприемника, темновые электроны, темновой ток, ионизация примесных атомов, термогенерация, ширина запрещенной зоны примесных полупроводников, время накопления.

The physical processes determining the formation of dark electrons in solid-state photodetectors are considered. A technique is presented that allows one to determine the number of dark electrons in solid-state photodetectors. Temperature regimes and ranges are determined at which dark electrons are formed, both due to impurity ionization and due to thermal generation. Quantitative estimates of the number of dark electrons, the value of the accumulated charge and the dark current from such parameters as temperature, the width of the forbidden band of the material and the duration of the accumulation time interval are given. It is shown that a decrease in the level of dark electrons and the corresponding current to minimum values at a fixed accumulation time is achieved by optimizing the type of photodetector and operating temperatures.

Keywords: solid-state photodetectors, photodetector sensitivity, dark electrons, dark current, ionization of impurity atoms, thermal generation, band gap of impurity semiconductors, accumulation time.

Введение

В настоящее время оптико-электронные приборы и системы используются при решении са-

мых разнообразных задач, возникающих в различных отраслях народного хозяйства, науки, техники, а также при обеспечении обороноспособности страны. При проектировании оптико-

электронных приборов одной из часто возникающих проблем является выбор фотоприемного устройства. На выбор того или иного типа фотоприемника (ФП), как правило, влияет большое количество факторов и параметров, определяемых назначением ФП, условиями его функционирования, технико-экономическими требованиями, доступностью для разработчика того или иного вида приемника и многое другое [1].

В космической технике одним из важнейших параметров ФП является его чувствительность. Повышение чувствительности ФП достигается, как повышением реакции ФП на полезный сигнал, так и снижением помеховой составляющей. Существенной из таких составляющих является темновой ток, обусловленный темновыми электронами.

Проблеме темновых электронов и темнового тока посвящено большое количество работ, к числу которых можно отнести, например [2–4]. Однако в указанных работах и ряде других в недостаточной мере изложены физические процессы, лежащие в основе происхождения темновых электронов и порождаемого ими темнового тока. В недостаточной мере также отражены возможности получения количественных оценок темновых электронов и величин темнового тока для конкретных практических приложений. Для устранения указанных недостатков предлагается методика расчета количества темновых электронов в твердотельных фотоприемниках.

Основная часть

Чувствительность ФП является одной из главных характеристик.

Известно, что повышение чувствительности ФП достигается как повышением реакции ФП на полезный сигнал, так и снижением помеховой составляющей.

Одной из помеховых составляющих является темновой ток, обусловленный темновыми электронами.

Если полезный сигнал в ФП связан с образованием электронно-дырочных пар под действием падающих на ФП квантов света, то темновые электроны и порождаемый ими темновой ток появляются в отсутствии квантов света и определяются действием тепла.

Их можно представить в виде двух составляющих:

– диффузную, обусловленную ионизацией примесных атомов;

– дрейфовую, обусловленную термогенерацией валентных электронов.

Так как темновые электроны образуются в обеих составляющих за счет действия тепла на ФП и носят случайный характер, то в соответствии с [5, 6], их число, генерируемое за время накопления t_n , можно описать распределением Пуассона, при котором их дисперсия равна среднему значению.

В приведенных ниже расчетах определяются средние значения темновых электронов и темнового тока.

Диффузная составляющая темнового тока определяется ионизацией примесных атомов и происходит при низких температурах, когда выполняется условие

$$kT \leq E_n - \frac{E_d}{2},$$

где k — постоянная Больцмана;

E_n — энергетический уровень дна зоны проводимости;

E_d — энергетический уровень донорной примеси.

Концентрация электронов в зоне проводимости может быть определена как [7, 8]

$$n_e = 2N_e \exp\left(\frac{-\left(E_n - \frac{E_d}{2}\right)}{kT}\right),$$

где N_e — плотность энергетических уровней в зоне проводимости, определяемая из выражения

$$N_e = \left(\frac{2\pi mkT}{h^2}\right)^{3/2},$$

где h — постоянная Планка;

m — масса электрона.

Дрейфовая составляющая темнового тока возникает при высокой температуре, когда выполняется условие

$$kT \geq E_n - E_f,$$

где E_f — уровень Ферми собственного полупроводника.

В этом случае происходит термическое возбуждение электронов валентной зоны и возникает собственная концентрация электронов в зоне проводимости, которая определяется выражением

$$n_i = 2N_e \exp\left(\frac{-(E_n - E_f)}{kT}\right).$$

Тогда при $kT \geq E_n - E_f$ суммарная концентрация электронов в зоне проводимости может быть представлена как

$$n = n_e + n_i = 2N_e \exp\left(\frac{-(E_n - E_d)}{2kT}\right) + 2N_e \exp\left(\frac{-(E_n - E_f)}{kT}\right).$$

Для определения температуры T_i , при которой происходит полная ионизация атомов примеси (истощение примеси) и превышение которой ($T > T_i$) приводит к термогенерации собственных электронов n_i , принимают, что уровень Ферми совпадает с уровнем донорной примеси [6, 7].

Тогда T_i определится как

$$T_i = \frac{E_n - E_f}{k \ln\left(\frac{2N_e}{n_e}\right)}.$$

ФП используются в различных областях, отличающихся с точки зрения количества темновых электронов прежде всего температурой, при которой приходится работать ФП. Так ФП, используемые в высокотемпературных телевизионных системах, должны работать при температурах, превышающих сотни градусов Цель-

сия [9–11]. ФП, используемые в инфракрасных системах обнаружения объектов на предельных дальностях, должны работать при сверхнизких температурах, измеряемых десятками градусов Кельвина [12].

Оценим концентрацию темновых электронов в зоне проводимости при различных температурах и различной ширине запрещенной зоны примесных полупроводников, используемых в ФП.

Возьмем для расчета пример:

– пусть температура ФП будет 70 К;

– ширина запрещенной зоны $\Delta E = 0,2$ эВ.

Тогда концентрация темновых электронов определится как

$$n_e = 2N_e \exp\left(\frac{-(E_n - E_d)}{2kT}\right), \quad (1)$$

где $N_e = \left(\frac{2\pi mkT}{h^2}\right)^{3/2} = 1,4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$.

Подставим конкретные значения в общую формулу (1) получим концентрацию темновых электронов в зависимости от ширины запрещенной зоны. Для этого данные для n_e , полученные при различных ΔE при $T = 70$ К, сведем в табл. 1.

Оценим концентрацию темновых электронов в зависимости от температуры. Для этого значения для n_e , полученные при различных T при $\Delta E = 0,2$ эВ, сведем в табл. 2.

Полученные значения концентрации темновых электронов определяются ионизацией примесных атомов.

Для определения концентрации темновых электронов, обусловленных термической генерацией валентных электронов, определим

Таблица 1

Данные расчетов концентрации темновых электронов в зависимости от ширины запрещенной зоны

ΔE , эВ	0,1	0,2	1,0
n_e , м^{-3}	$9,3 \cdot 10^{18}$	$3,2 \cdot 10^{14}$	0

Таблица 2

Данные расчетов концентрации темновых электронов в зависимости от температуры

T , К	40	70	120	300
n_e , м^{-3}	$7,2 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^{14}$	$2,7 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{22}$

температуру, при которой это происходит, используя выражение

$$T \geq (E_{\text{н}} - E_f) / k,$$

при $E_{\text{н}} - E_f = 0,5$ эВ получим $T \geq 560$ К.

Оценим температуры, приводящие к генерации валентных электронов для различных собственных полупроводников, отличающихся шириной запрещенной зоны. Данные расчетов сведем в табл. 3.

Рассмотрим пример расчета количества темновых электронов и темнового тока для варианта использования ФП в инфракрасных (ИК) оптических системах.

Размер площадки матричного ФП (пикселя) определим, исходя из размера пятна изображения. Принимая, что диаметр пятна d согласован с размером площадки b , то есть $b = d$, а диаметр пятна в первом дифракционном максимуме определяется из выражения

$$d = 1,24 \lambda / D,$$

где λ — длина волны падающего на ФП излучения;

D — диаметр объектива.

Определим размер площадки в линейной мере, принимая $\lambda = 10$ мкм, $D = 0,3$ м:

$$b = 2dF = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 24,8 \text{ мкм},$$

где F — фокусное расстояние объектива, принимаемое равным 0,3 м.

Толщину площадки принимаем равной ее линейному размеру $h = b$.

Таблица 3

Данные расчетов оценки температуры

ΔE , эВ	0,7	1,0	1,5
T , К	410	560	870

Тогда объем одного пикселя, принимая $b = 30$ мкм,

$$V = b^3 = 27 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3.$$

Определим количество носителей темнового тока в объеме пикселя при температуре ФП $T = 70$ К.

$$N_0 = n_e V = 9.$$

Заряд носителей темнового тока

$$Q = N_0 q = 14 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Величину темнового тока определим, задавая время накопления заряда $t_{\text{н}}$

$$I = Q / t_{\text{н}} = 14 \cdot 10^{-19} \text{ А},$$

при времени накопления 1 с.

Рассчитаем количество темновых электронов, накопленный от них заряд, величину темнового тока в зависимости от температуры ФП, ширины запрещенной зоны при заданном времени накопления. Данные расчетов сведем в таблицы.

В табл. 4 сведены данные расчетов для ширины запрещенной зоны $\Delta E = 0,2$ эВ, времени накопления $t_{\text{н}} = 1$ с в диапазоне температур от 40 К до 120 К.

В табл. 5 сведены данные расчетов для ширины запрещенной зоны $\Delta E = 0,1$ эВ, времени накопления $t_{\text{н}} = 1$ с в диапазоне температур от 40 К до 120 К.

Для наглядности полученных результатов приведены графики зависимостей количества темновых электронов от температуры и ширины запрещенной зоны ΔE , $\lg N_0 = f(T)$, рисунок.

Снижение скорости нарастания количества темновых электронов у кривой, соответствующей $\Delta E = 0,1$ эВ, связано с истощением примесных атомов и с повышением температуры.

Таблица 4

Данные расчетов для ширины запрещенной зоны при $\Delta E = 0,2$ эВ

T , К	40	70	80	120
N_0	0	9	62	730
Q , Кл	0	$14 \cdot 10^{-19}$	$99 \cdot 10^{-19}$	$12 \cdot 10^{-17}$
I , А	0	$14 \cdot 10^{-19}$	$99 \cdot 10^{-19}$	$12 \cdot 10^{-17}$

Таблица 5

Данные расчетов для ширины запрещенной зоны при $\Delta E = 0,1$ эВ

T, K	40	70	80	120
N_0	$164 \cdot 10^2$	$25,4 \cdot 10^6$	$92 \cdot 10^6$	$13,5 \cdot 10^7$
$Q, Кл$	$262 \cdot 10^{-17}$	$41 \cdot 10^{-15}$	$14,7 \cdot 10^{-14}$	$21,6 \cdot 10^{-12}$
I, A	$262 \cdot 10^{-17}$	$41 \cdot 10^{-15}$	$14,7 \cdot 10^{-14}$	$21,6 \cdot 10^{-12}$

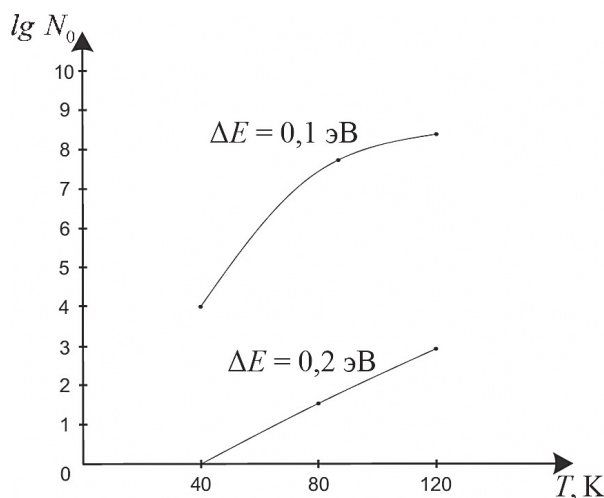


Рис. Зависимость количества темновых электронов от температуры и ширины запрещенной зоны

Заключение

Рассмотрение процессов, определяющих образование темновых электронов и темнового тока в твердотельных ФП, возможно только с использованием зависимостей, отражающих физическую суть этих процессов. Использование этих зависимостей позволяет с достаточным обоснованием определять количество темновых электронов и значение темнового тока в твердотельных ФП, определять температуры и их диапазон, при которых происходит образование темновых электронов, как за счет ионизации примеси, так и за счет термогенерации.

В представленной методике расчета количества темновых электронов и темнового тока для варианта использования ФП в ИК оптических системах показано, что их минимальных значений можно добиться, при заданном времени накопления, выбором типа ФП (определяемый шириной запрещенной зоны) и его температуры.

Список источников

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход: учебник; под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Университетская книга, 2016. 488 с.
2. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х кн.; пер. с англ. В.А. Гергеля; под ред. Р.А. Суриса. Изд. 2-е. М.: Мир, 1984. 456 с.
3. Спиридонов О.П. Физические основы твердотельной электроники: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2008. 191 с.
4. Формозов Б.Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасных диапазонах: учеб. пособие. СПб.: СПбГУАП, 2002. 120 с.
5. Гудмен Дж. Статистическая оптика; пер. с англ. М.: Мир, 1988. 528 с.
6. Приборы с зарядовой связью; под ред. М. Хоуза и Д. Моргана; пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1981. 456 с.

7. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1979. 448 с.
8. Смирнов Ю.А., Соболев С.В., Титов Е.В. Физические основы электроники. СПб.: Лань, 2013. 560 с.
9. Челпанов В.И., Родионов О.Ф. Жаростойкие телевизионные системы для наблюдения высокотемпературных процессов // Бурение и нефть. 2004. № 7–8. С. 42–44.
10. Стрижнев К.В., Белоус Д.А., Баранов П.С. и др. Анализ количества темновых электронов твердотельных фотоприемников при высокой рабочей температуре // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2017. Вып. 2. С. 31–39.
11. Белоус Д.А. Чувствительность твердотельных фотоприемников в ближней инфракрасной области спектра при высокой температуре // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2017. Вып. 2. С. 41–47.
12. Камышев А.Л., Володин Р.С. Определение параметров вывода управляемого объекта в задачах сближения космических объектов на догонных и встречных курсах // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 5–6 (179–180). С. 11–18.
3. Spiridonov O.P. Physical Foundations of Solid-State Electronics: Textbook. Moscow: Higher school, 2008. 191 p.
4. Formozov B.N. Aerospace Photodetectors in the Visible and Infrared Ranges: Textbook. SPb.: SPbGUAP, 2002. 120 p.
5. Goodman J. Statistical Optics: Translation from English. Moscow: Mir, 1988. 528 p.
6. Charge-coupled devices. Ed. M. Howes and D. Morgan: Trans. from English. M. Energoizdat, 1981. 456 p.
7. Sobolev V.D. Physical foundations of electronic engineering: textbook for universities. M.: Higher school, 1979. 448 p.
8. Smirnov Yu.A., Sobolev S.V., Titov E.V. Physical foundations of electronics. St. Petersburg: Lan, 2013. 560 p.
9. Chelpanov V.I., Rodionov O.F. Heat-resistant television systems for monitoring high-temperature processes // Drilling and Oil, 2004. No 7–8. Pp. 42–44.
10. Strizhnev K.V., Belous D.A., Baranov P.S. et al. Analysis of the Number of Dark Electrons of Solid-State Photodetectors at High Operating Temperatures // Issues of Radio Electronics. Series: Television Engineering, 2017. Issue 2. Pp. 31–39.
11. Belous D.A. Sensitivity of Solid-State Photodetectors in the Near Infrared Spectrum at High Temperatures // Issues of Radio Electronics. Series: Television Engineering, 2017. Issue 2. Pp. 41–47.
12. Kamyshev A.L., Volodin R.S. Determination of the parameters of the output of a controlled object in the problems of the approach of space objects on catch-up and collision courses // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 5–6 (179–180). Pp. 11–18.
1. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. Introduction to the design of optical-electronic devices: a systematic approach: textbook; ed. Yu.G. Yakushenkova. M: University Book, 2016. 488 p.
2. Zi S.M. Physics of Semiconductor Devices. In 2 books. Trans. from English by V.A. Gergel et al. ed. by R.A. Suris. Moscow: Mir, 1984. 456 p.

Resources