

УДК 537.312.5, 621.383.52

ФОТОДИОД, УСТОЙЧИВЫЙ К ФОНОВОМУ ОСВЕЩЕНИЮ

Ю. Г. Добровольский

Научно производственная фирма “Тензор”
58013, г. Черновцы, ул. Красноармейская, 226, т/ф (0372) 575052
e-mail: chtenz@chv.ukrpack.net

Резюме

ФОТОДИОД, УСТОЙЧИВЫЙ К ФОНОВОМУ ОСВЕЩЕНИЮ

Ю. Г. Добровольский

Приведены результаты разработки конструкции кремниевого фотодиода, устойчивого к фоновому излучению оптического диапазона. Показано, что при оптимизации конструктивных элементов кристалла фотодиода возможно устранить активное влияние фоновой засветки оптического излучения с длиной волны меньше рабочей на величину полезного сигнала.

Ключевые слова: Фотодиод, кремний, оптическое излучение, фоновое излучение, конструкция, р-п переход, чувствительность.

Резюме

ФОТОДІОД, СТІЙКИЙ ДО ФОНОВОГО ОСВІТЛЕННЯ

Ю. Г. Добровольський

Приведені результати розробки конструкції кремнієвого фотодіода, стійкого до фонового випромінювання оптичного діапазону. Показано, що при оптимізації конструктивних елементів кристалу фотодіода можливо усунути активний вплив фонового засвітлення оптичного випромінювання з довжиною хвилі менше робочої на величину корисного сигналу.

Ключові слова: Фотодіод, кремній, оптичне випромінювання, фонове випромінювання, конструкція, р-п перехід, чутливість.

Abstract

PHOTODIODE STEADY TO BACKGROUND ILLUMINATION

Yu. G. Dobrovolskiy

The results of development of construction of silicon photodiode steady to the background radiation of optical range are resulted. It is shown, that during optimization of structural elements of crystal of photodiode it is possible to remove the active influencing of background luminosity of optical radiation with a wave-length less working on the size of useful signal.

Keywords: Photodiode, silicon, optical radiation, background radiation, construction, p-n transition, sensitiveness.

Введение

Одним из факторов, определяющих надежность работы фотодиода, является его устойчивость к фоновому освещению, которое попадает на фоточувствительный элемент фотодиода вместе с излучением рабочей длины волны [1]. Влияние этого фактора способно осложнить работу фотодиода, особенно при работе в режиме регистрации постоянного потока излучения рабочей длины волны, когда уровень фотосигнала фонового происхождения способен «заглушить» фотосигнал рабочей длины волны.

Таким образом, задача обеспечения устойчивой работы фотодиода в условиях фонового освещения представляется актуальной научно-технической задачей, решение которой способно повысить надежность оптико-электронной аппаратуры.

В общем, защита фотодиода от воздействия фонового излучения осуществляется в основном тремя способами. К первому можно отнести оптические методы, т.е. использование различных оптических фильтров и диафрагм, которые устанавливаются перед входным окном фотодиода, и «отрезают» фоновую часть оптического излучения [2], в том числе и предусматривающие электронную модуляцию оптического сигнала с помощью соответствующего чипа [3]. Второй способ предусматривает использование различных электронных схем обработки фотосигнала, которые, например, обеспечивают токовую компенсацию сигнала фоновой засветки и темнового тока фотодиода [4] или частотную избирательность, отсекающую постоянную (фоновую) составляющую [5]. Третий способ предусматривает создание конструкции кристалла фотодиода, в которой влияние фоновой засветки было бы исключено. Такой результат достигается при использовании многоспектральных фотодиодов, состоящих из двух и более датчиков, каждый из которых чувствителен в своей области [6-8]. Описанные технические решения обладают одним общим недостатком — они усложняют конструкции оптико-электронного прибора в целом.

Наиболее надежной на наш взгляд, являются конструкции, в которых кристалл фотодиода, устойчивого к фоновому излучению, формируется в одном технологическом про-

цессе, как например в [9], где предложена конструкция фотодиода, чувствительного в двух спектральных диапазонах, или в [10], где конструкция фотодиода обеспечивает стойкость к фоновому излучению видимого света. Однако фоновое излучение может оказаться и более длинноволновым, чем видимое. В этом случае предложенное решение представляется неудовлетворительным.

Анализ конструкции фотодиода, устойчивого к фоновому освещению

Рассмотрим случай, когда рабочая длина волны, на которую оптимизируется работа фотодиода, составляет около 1 мкм. Например, длина волны 1,06 мкм, которая соответствует длине волны излучения твердотельного лазера на основе алюмоитриевого граната с примесью неодима, который широко используется в оптоэлектронике. Предложенная длина волны соответствует краю поглощения оптического излучения в кремнии. Поэтому в качестве исходного материала для разработки фотодиода можно использовать этот материал.

Оптическое излучение проникает в кремний на разную глубину. Уменьшение его интенсивности, согласно закону поглощения оптического излучения, в $e^{(2,7)}$ раз происходит на глубине $1/\alpha$, где α — коэффициент поглощения света (далее глубина поглощения) [11]. В частности, при освещении кремниевого фотодиода монохроматическим излучением с длиной волны ~ 1 мкм его поглощение, в основном, осуществляется на глубине также до 1 мкм [11].

Примером фонового излучения для фотодиодов, работающих в режиме регистрации монохроматического излучения, может быть как излучение с длиной волны менее рабочей, так и с более длинной, в том числе различные излучатели видимого, ближнего инфракрасного излучения и солнечный свет, максимум излучения которого находится в пределах 0,4 — 1,5 мкм. Перечисленные источники способны создать фоновую нагрузку на фотодиод от милливатт до нескольких сотен ватт. Для кремниевых фотодиодов засветки такой мощности могут создавать достаточно высокие уровни фотосигнала, вплоть до насыщения.

Поскольку инфракрасная граница поглощения оптического излучения в кремнии на-

ходится на длине волны около 1,1 мкм, очевидно, что более длинноволновое излучение не способно генерировать в нем достаточно большое количество носителей тока.

Таким образом, для устранения влияния фонового излучения и уверенной регистрации фотодиодом рабочей длины волны, достаточно чтоб глубина залегания р-п перехода в нем, была на таком расстоянии от поверхности фотодиода, которая принимает оптическое излучение, чтобы подавляющая часть оптического излучения поглощалась, не доходя до него. Тогда носители заряда, генерируемые таким светом, смогут достигнуть р-п перехода только за счет диффузионного механизма и количество их будет незначительно. Поэтому незначительным будет фототок, генерируемый фоновым излучением. Это условие может быть обеспечено, если кристалл фотодиода развернуть к источнику оптического излучения не фоточувствительной областью, а обратной стороной, на которой сформирована область высокой концентрации носителей тока для обеспечения омического контакта. Металлизация этой поверхности должна быть не сплошной, а иметь отверстие, которое должно соответствовать проекции фоточувствительной области на эту поверхность. При этом необходимо учитывать, что толщина полупроводниковой подложки фотодиода не должна превышать глубины поглощения оптического излучения с рабочей длиной волны, т.е. должно выполняться неравенство (1):

$$H \leq 1/\alpha_p, \quad (1)$$

где H — толщина полупроводниковой подложки фотодиода;

$1/\alpha_p$ — глубина поглощения рабочей длины волны.

Учитывая то, что глубина поглощения рабочей длины волны 1 мкм составляет около 1 мкм, диффузионная длина носителей заряда в кремнии может достигать нескольких сотен микрон, а ширина области пространственного заряда, в зависимости от рабочего напряжения и концентрации неосновных носителей заряда, может достигать от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров, толщину кристалла фотодиода можно выбирать в широких пределах, однако она должна быть не более глубины поглощения рабочей длины волны (неравенство 1) и не более суммы шири-

ны области пространственного заряда, диффузионной длины неосновных носителей заряда, глубины поглощения фонового излучения и глубины залегания р-п перехода. Это требование можно обеспечить при выполнении неравенства (2):

$$H > W_i + L_{HHZ} + 1/\alpha_\phi + h_{p-n}, \quad (2)$$

где W_i — ширина области пространственного заряда;

L_{HHZ} — диффузионная длина неосновных носителей заряда;

h_{p-n} — глубина залегания р-п перехода;

$1/\alpha_\phi$ — глубина поглощения длины волны фонового излучения.

Эффективность работы такого фотодиода обеспечивается при условии, что глубина поглощения рабочей длины волны больше глубины поглощения фонового излучения, т.е. при выполнении неравенства (3):

$$1/\alpha_p > 1/\alpha_\phi. \quad (3)$$

Таким образом, для обеспечения устойчивости фотодиода к влиянию фонового освещения оптического излучения с длиной волны меньшей, чем рабочая длина волны фотодиода необходимо, чтобы толщина полупроводниковой подложки фотодиода H , глубина поглощения рабочей длины волны $1/\alpha_p$, глубина поглощения длины волны фонового излучения $1/\alpha_\phi$, диффузионная длина неосновных носителей заряда L_{HHZ} , глубина залегания р-п перехода h_{p-n} и ширина области пространственного заряда W_i должны удовлетворять системе неравенств (4):

$$\begin{cases} H \leq 1/\alpha_p \\ H > W_i + L_{HHZ} + 1/\alpha_\phi + h_{p-n} \\ 1/\alpha_p > 1/\alpha_\phi \end{cases} \quad (4)$$

При этом омический контакт на обратной стороне полупроводниковой подложки должен иметь отверстие, проекция которого совпадает с плоскостью фоточувствительной области, а вся конструкция развернута к источнику оптического излучения обратной стороной.

Конструкция фотодиода

На рисунке 1 приведено схематическое изображение разреза предложенного фотодиода [12]. Фотодиод содержит полупроводни-

ковую подложку (1), в которой через маску в окисле кремния (2) сформирован фоточувствительный элемент (3). Над фоточувствительным элементом выращен защитный изолирующий слой из окиси кремния (4), через отверстие, в котором сформирован омический контакт (5). С обратной стороны полупроводниковой подложки сформирован изотопный к ней слой (6) для обеспечения омического контакта со слоем металлизации (7), в котором сформировано отверстие, площадь которого соответствует проекции фоточувствительной области на слой металлизации.

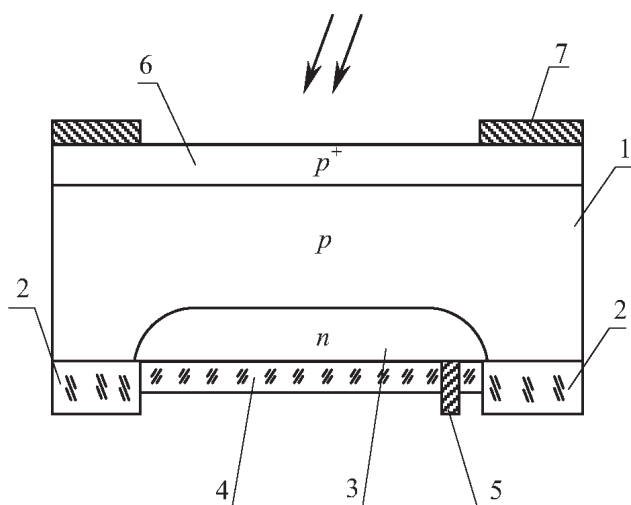


Рис. 1. Схематическое изображение разреза фотодиода, устойчивого к фоновому освещению. 1 — подложка; 2 — оксид кремния; 3 — фоточувствительный элемент; 4 — защитный изолирующий слой; 5, 7 — омические контакты; 6 — слой, изотопный с подложкой.

Технологические процессы изготовления предложенного фотодиода могут быть аналогичны процессам, которые используются при формировании так называемых р-і-п фотодиодов на основе кремния [13, 14]. Общие требования к конструкции фотодиода следующие. Он может быть выполнен на кремниевой подложке р-типа проводимости с удельным сопротивлением не менее 10 кОм·см толщиной не более 1 мм. Фоточувствительный элемент (область n-типа проводимости (2) на рисунке 1) может быть сформирован методами планарной технологии путем диффузии фосфора через отверстие в защитной маске из окиси кремния (2) толщиной 0,5-1 мкм. Глубина залегания р-п перехода может составлять 3 — 5 мкм. Над фоточувствительным элементом необходимо сформировать защитный слой из

окси кремния (4) толщиной около 150 нм. На обратной стороне кремниевой подложки для уменьшения сопротивления на границе металлизация (7) — кремний необходимо создать область р+ -типа проводимости (6) глубиной залегания до 1 мкм. Через окно в защитном слое (4) формируется контакт (5) из золота толщиной около 0,7 мкм. Толщина слоя металлизации из обратной стороны (7) должна находиться в пределах 0,5 — 1 мкм.

Предложенный фотодиод работает следующим образом. При попадании фонового излучения с длиной волны меньше рабочей длины волны на обратную сторону кремниевой подложки (кристалла фотодиода) оно поглощается на глубине $1/\alpha_{\phi}$, которая меньше, чем толщина кристалла фотодиода H . Поскольку толщина кристалла фотодиода больше, чем сумма глубины поглощения фонового излучения, диффузионной длины неосновных носителей заряда, ширины области объемного заряда и глубины залегания р-п перехода, подавляющее большинство генерируемых фоновым излучением носителей тока не достигает р-п перехода. Поэтому вклад фонового излучения в фототок практически сводится к нулю и он не может влиять на полезный сигнал, генерируемый излучением рабочей длины волны, которая поглощается на значительно большей глубине $1/\alpha_p$. Благодаря конструкции фотодиода все оптическое излучение рабочей длины волны поглощается в его объеме, а генерированные им носители заряда попадают к р-п переходу благодаря диффузионному и дрейфовому механизмам.

Исследование разработанного фотодиода

С учетом предложенных технических решений была изготовлена партия фотодиодов и проведены сравнительные исследования зависимости токовой монохроматической чувствительности разработанных и серийных фотодиодов от величины фоновой засветки. Величина токовой монохроматической чувствительности оценивалась на постоянном потоке рабочей длины волны (1,06 мкм) стандартным методом — сравнением с чувствительностью контрольного фотодиода.

Исследования показали, что в условиях, когда воздействие фоновой засветки отсутствовало, чувствительность разработанных

фотодиодов на длине волны 1,06 мкм составляла 0,25 — 0,27 А/Вт, в то время как у серийных фотодиодов типа ФДК-142-01 она составляла 0,29 — 0,32 А/Вт. Такая разница в чувствительности по нашему мнению, обусловлена тем, что толщина кристалла серийного фотодиода составляет 450 мкм, а разработанного 900 мкм. В связи с этим, влияние рекомбинационных процессов на сбор фотогенерированных носителей в случае нового фотодиода более существенен, чем в случае серийного фотодиода.

Оба типа фотодиодов исследовались в условиях воздействия фоновой засветки, генерируемой монохроматическим источником излучения с длиной волны 0,95 мкм мощностью до 100 мВт и при воздействии солнечного излучения с освещенностью 20000 — 40000 лк.

В первом случае, при засветке фотодиодов монохроматическим источником величина чувствительности обоих типов фотодиодов практически не изменилась, однако уровень шума серийных фотодиодов в рабочем режиме возрос. Во втором случае, при засветке фотодиодов солнечным светом, измерить чувствительность серийных фотодиодов по обычной методике оказалось сложно из-за высокого уровня фотосигнала, генерированного фоновой засветкой, который находился примерно на уровне фотосигнала, генерированного рабочей длиной волны. Чувствительность разработанных фотодиодов составляла примерно те же значения, что и измеренные в нормальных условиях. При этом уровень фотосигнала, генерированного фоновой засветкой, составлял примерно 2/3 от уровня фотосигнала, генерированного рабочей длиной волны.

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет устранить активное влияние оптического излучения с длинами волн, меньшими рабочей длины волны на величину полезного сигнала. При этом результат достигается за счет изменения конструкции кристалла фотодиода.

Выводы

1. Предложена конструкция фотодиода, устойчивого к фоновому освещению с длинами волн меньшими рабочей длины волны.

2. Устойчивость к фоновому излучению достигается за счет оптимизации конструктивных элементов кристалла фотодиода.

Литература

1. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. Радио, 1978. — с. 315-316.
2. А.А. Чернышев. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Радио и связь, 1988. — с.42.
3. Stefan F. Preble, Qianfan Xu, Bradley S. Schmidt, Michal Lipson. Ultrafast all-optical modulation on a silicon chip // Optics Letters — published by OSA. — Volume 30. — 2005. — Issue 21. — pp. 2891-2893.
4. Иванов А.И., Абрамов А.Д. TR Усилитель фототока с автоматической коррекцией нулевого уровня // Приборы и техника эксперимента. — №2. — 1998. — с.57-59.
5. Агишев Р.Р. Защита от фоновой помехи в оптико-электронных системах контроля состояния атмосферы. М.: Машиностроение, 1994. — 128 с.
6. Nikolaos J. Florous, Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Three-color photonic crystal demultiplexer based on ultralow-refractive-index metamaterial technology // Optics Letters — published by OSA. — 2005. — Issue 20. — pp. 2685-2810.
7. Пожарный извещатель пламени ИП332_1/2 “СК” // Схемотехника. — №3. — 2001. — с.2-3.
8. Гаврушко В.В., Раскин А.А., Лебедев А.С., Бондаренко Е.А., Сапожников А.А. Двухспектральный полупроводниковый фотоприемник ИК излучения — в диапазонах 3 — 5 и 8 — 14 мкм // Электронная техника. — Сер.10 Микроэлектронные устройства. — вып. 3, 4 (93, 94). — 1992. — с. 62.
9. <http://radiotekhnika.x99.ru/doc/radiofan/sxems/29>
10. Деклараційний патент України на винахід № 66666 А Фотодіод. Башкіров С.Ю., Годованюк В.М., Добровольський Ю.Г., Дудницький М.П., Рюхтін В.В. 2004. Заявка № 2003098260 від 05.09.2003. Обубл. 17.052004. Бюл. № 5.
11. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. М: Мир, 1984. — т. 2, 347с.
12. Ю.Г. Добровольський. Патент України на рисуну модель № 4877 Фотодіод. 15.02.2005. Заявка № 20040503568. Заявлено 13.05.2004. Бюл. №2.
13. Ащеулов А.А., Годованюк В.Н., Добровольський Ю.Г. та ін. Оптимізація надійності кремнієвих р-і-п фотодіодів по темновому току // ТКЭА. 1999. — №1-2. — с.18-21.
14. Ю.Г. Добровольський, А.А. Ащеулов. Особливості конструкції та технології кремнієвих р-і-п фотодіодів // Фізика і хімія твердого тіла. — Т.2. — №3. — 2001. — с.441-447.