

УДК 535.23:628.98:004.9:535-31:535.247

К. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Украина, г. Черновцы, НПФ «Тензор»

E-mail: yuriydr@gmail.com

ФОТОДИОД НА ОСНОВЕ GaP С ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ОБЛАСТИ УФ-СПЕКТРА

Разработан алгоритм для компьютерного моделирования и анализа параметров, определяющих чувствительность фотодиодов с поверхностно-барьерной структурой на основе $n^+ - n - \text{GaP} - \text{SnO}_2(\text{F})$. Показано, что токовая монохроматическая чувствительность к излучению с длиной волны 250 нм у такой структуры может достигать 0,1–0,12 А/Вт.

Ключевые слова: фотодиод, фосфид галлия, компьютерное моделирование, чувствительность.

Фосфид галлия (GaP) — эффективный материал для создания фотодиодов с барьером Шоттки, чувствительных в ультрафиолетовой (УФ) области спектра, которая сегодня активно осваивается оптоэлектроникой. Этот материал практически прозрачен для оптического излучения с длиной волны более 0,5 мкм. Поэтому фотодиоды (ФД) на основе фосфида галлия не требуют применения сложных светофильтров для «отрезания» видимого и инфракрасного излучения. По сравнению с более эффективным с точки зрения чувствительности материалом — нитридом галлия, фосфид галлия имеет существенно меньшую стоимость, что позволяет ему оставаться актуальным на рынке ФД, чувствительных в ультрафиолетовой области спектра. Такие фотодиоды используются, в частности, при создании радиометров УФ-излучения. Особенностью работы ФД в этом случае является фотогальванический режим. ФД должен иметь широкий диапазон спектральной чувствительности (200–380 нм), высокую чувствительность к потокам УФ-излучения с мощностью до 10^{-4} Вт/м² и динамическим диапазоном не менее 7–8 порядков. Для этой цели наиболее эффективны фотодиоды на основе эпитаксиальных $n^+ - n$ -структур с концентрацией носителей в эпитаксиальном слое около 10^{16} см⁻³ [1]. В качестве активного электрода в них используется пленка металла (чаще всего — полупрозрачный слой золота) [2, 3] или тонкие проводящие слои ИТО (смесь SnO₂ и In₂O₃), а также FTO (слой SnO₂, легированный фтором) [4], которые можно получать методом пульверизации [5, 6]. При этом обеспечивается высокая чувствительность — до 0,2 А/Вт — к излучению с длиной волны 450 нм (в максимуме спектральной характеристики чувствительности). К недостаткам такой конструкции отно-

сится высокая неравномерность чувствительности по поверхности фоточувствительного элемента (более 10%) даже в случае нанесения пленки оксидов металлов магнетронным распылением. Причина такого явления состоит в том, что пленка начинает расти островками, и при толщине пленки менее 30 нм не удается получить слой равномерной толщины [7, 8]. По этой же причине до 30% изготовленных фотодиодов в каждом цикле бракуются по надежности. При этом чувствительность фотодиодов на длине волны около 250 нм составляет не более 0,05 А/Вт.

Целью данной работы является оптимизация конструкции фотодиодов на основе $n^+ - n - \text{GaP} - \text{SnO}_2(\text{F})$ для увеличения токовой монохроматической чувствительности к излучению с длиной волны 250 нм.

Предварительная оценка конструкции и технологии нового фотодиода проводилась с помощью программного продукта [9], предназначенного для поиска путей повышения чувствительности ФД, работающих в фотодиодном режиме. Сравнение результатов расчетов с результатами измерений токовой монохроматической чувствительности на длине волны 450 нм показало, что, несмотря на эффективность предлагаемого в [9] метода оптимизации, он не в полной мере подходит для случая, когда фотодиод работает в фотогальваническом режиме. И хотя несложными доработками его можно адаптировать к данному режиму, он все же не предусматривает случая, когда ФД сформирован на основе эпитаксиальной структуры. Кроме того, в алгоритме не предусмотрен и расчет влияния оптических свойств поверхности ФД на его чувствительность. Поверхность фотодиода можно рассматривать как последовательное соединение минимум трех сред: воздуха,

просветляющего покрытия и поверхности полупроводника.

В нашем случае в рабочем диапазоне длин волн (200–500 нм) практически полное поглощение (до 86%) оптического излучения, попавшего в слой полупроводника, происходит в слое толщиной до 1,5 мкм [9]. Именно поэтому наиболее эффективной является конструкция ФД на основе эпитаксиальной структуры n^+-n -типа, в которой рабочим слоем, поглощающим оптическое излучение, является высокоомный слой n -типа, расположенный на низкоомной подложке.

Для определения максимально возможного в этом случае значения чувствительности воспользуемся подходом, изложенным в [10], где предложено для обеспечения максимальной чувствительности фотодиодной структуры обеспечить выполнение системы неравенств, в состав которых входят основные параметры конструкции ФД и физические параметры материала.

Основной вклад в фотосигнал в такой структуре вносят неосновные носители заряда, потому определяющей величиной будет диффузионная длина дырок L_p . Следует отметить, что ширину области сбора фотогенерированных носителей заряда определяет не только L_p , но и ширина области объемного заряда в эпитаксиальном слое x_0 , созданного барьером между полупроводником и слоем проводящего оксида металла.

Концентрация примеси в эпитаксиальном слое толщиной $h_{эс}$ экспоненциально уменьшается от границы раздела «подложка — эпитаксиальный слой» в результате процессов автолегирования [11]. Потому распределение напряженности электрического поля в слое обусловлено профилем распределения концентрации примесей [12]. Глубину распространения этого поля (h) также необходимо учитывать при расчете $h_{эс}$. Таким образом, толщину эпитаксиального слоя можно определить из условия

$$x_0 < h_{эс} \leq L_p + x_0 + h. \quad (1)$$

Очевидно, что низкоомная подложка эпитаксиальной структуры не должна влиять на чувствительность прибора. Выполнение этого требования обеспечивается неравенством

$$L_p < h_{эс} - x_0. \quad (2)$$

Для обеспечения сбора носителей заряда, генерируемых коротковолновым оптическим излучением, необходимо, чтобы ширина области объемного заряда x_0 в высокоомном слое была больше глубины поглощения такого излучения, которая в свою очередь определяется коэффициентом поглощения этого излучения α_λ и которая меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда (в нашем случае — дырок). Эти требования обеспечиваются выполнением условия

$$\alpha_\lambda < x_0 \leq L_p. \quad (3)$$

Условие (1) определяет область сбора носителей, которые генерируются в фотодиоде длинноволновой составляющей излучения, выполнение (2) обеспечивает изоляцию высокоомного эпитаксиального слоя от влияния носителей заряда, генерируемых в низкоомной подложке эпитаксиальной структуры, условие (3) позволяет учитывать вклад коротковолновой составляющей спектра падающего излучения.

Для обеспечения максимальной чувствительности ФД, кроме вышеперечисленных процедур, необходимо учесть явление отражения потока оптического излучения от поверхности оптически прозрачного проводящего электрода из оксида металла и от поверхности раздела пленки оксида металла и полупроводника (фосфида галлия). Правильный подбор толщины токопроводящей пленки (например, SnO_2) позволяет свести к минимуму потери фототока, связанные с тем, что часть потока оптического излучения, способного генерировать в полупроводнике неосновные носители заряда, отражается от поверхности оксида металла и от поверхности полупроводника. Толщина слоя оксида металла d подбирается такой, чтобы разность фаз ϕ излучения при двойном прохождении слоя была кратна $(2n+1)\pi$, то есть

$$d = \lambda(2n+1)/4, \quad (4)$$

где n — показатель преломления пленки оксида металла. В таком случае волны, отраженные от границ раздела «пленка — воздух» и «пленка — полупроводник», находятся в противофазе и подавляют друг друга [13, с. 426–430].

Следует учесть также площадь фоточувствительного элемента, поскольку от нее может зависеть величина фототока в случае, когда освещается вся площадка фотодиода:

$$I_{ph} \equiv \frac{S_{I\phi} P}{F} \quad \text{или} \quad I_{ph} F \equiv S_{I\phi} P, \quad (5)$$

I_{ph} — удельное значение фототока, генерируемого единичной площадкой, которая обеспечивает чувствительность S_{int} ;

$S_{I\phi}$ — токовая интегральная чувствительность, обусловленная интегральным потоком P оптического излучения, падающего на фотодиод;

F — площадь фоточувствительного элемента, освещаемая падающим на фотодиод оптическим излучением.

Объединение предложенных выражений (1)–(5) в систему позволяет оптимизировать конструкцию фотодиодов, которые работают в фотогальваническом режиме, для обеспечения максимальной чувствительности.

Используя полученные в [14] результаты, можно также оценить токовую монохроматиче-

скую чувствительность $S_{i\lambda}$ пленки толщиной d на определенной длине волны:

$$S_{i\lambda} = (1 - R_{i\lambda}) \frac{e_0 \gamma_\lambda \lambda}{hc} (1 - \exp(-\alpha_\lambda x_0)) / d =$$

$$= (1 - R_{i\lambda}) \frac{4e_0 \gamma_\lambda}{hc(2n + 1)} (1 - \exp(-\alpha_\lambda x_0)), \quad (6)$$

где $R_{i\lambda}$ — коэффициент отражения от структуры «воздух — оксид — полупроводник» для заданной длины волны;

e_0 — заряд электрона;

γ_λ — коэффициент использования фототока (внутренний квантовый выход);

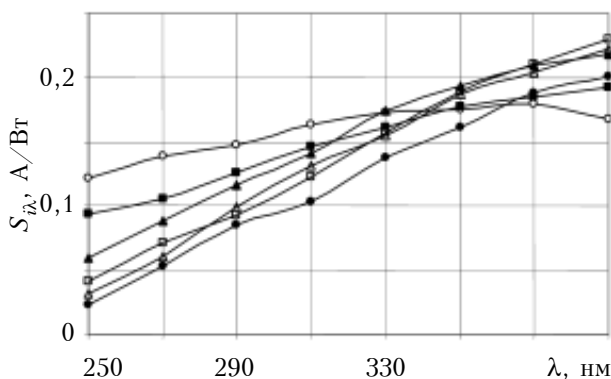
h — постоянная Планка;

c — скорость света в вакууме;

α_λ — коэффициент поглощения излучения с заданной длиной волны в полупроводнике.

Анализ полученных уравнений и неравенств (1)–(6), проведенный с помощью MS Office Excel 2003, показал, что максимальные значения чувствительности на длине волны 250 нм могут достигать 0,1–0,12 А/Вт при обеспечении толщины слоя диоксида олова, легированного фтором, около 20–30 нм. При расчете были использованы значения α_λ , γ_λ , $R_{i\lambda}$ и n , приведенные в [6]. Величина x_0 оценивалась в 0,1–0,3 мкм исходя из того, что фотодиод должен работать в фотогальваническом режиме без электрического смещения, и ширина области объемного заряда в этом случае обусловлена потенциальным барьером между слоем оксида металла и подложкой из GaP.

Как видно из результатов анализа, представленных на рисунке, наилучшие значения чувствительности можно получить при толщине пленки 20 нм. Однако это очень непростая технологическая задача, требующая сложного оборудования, к тому же пленка диоксида олова такой толщины очень плохо ложится на под-



Зависимость токовой монохроматической чувствительности фотодиода от длины волны излучения при разной толщине пленки $\text{SnO}_2(\text{F})$ (в нм):

○ — 20; ■ — 30; ▲ — 40; □ — 50; △ — 60; ● — 70

ложку ровным слоем. Лучшие из известных аналогов обладают на длине волны 250 нм токовой монохроматической чувствительностью 0,08–0,07 А/Вт. Причина такого явления, как указывалось выше, — маленькие островки, на которых начинается рост пленки, а также влияние плотности поверхностных состояний на границе «полупроводник — оксид металла». В предложенном расчете этот показатель — плотность поверхностных состояний на поверхности эпитаксиальной структуры фосфида галлия — не учитывается, и аналитический учет этого фактора требует дальнейших исследований.

Как известно, по физической природе различают четыре основных типа поверхностных состояний [15–17], которые так или иначе связаны с наличием дополнительного заряда, имеющегося на поверхности полупроводника или в его объеме в непосредственной близости от поверхности. Особенностью же эпитаксиальной структуры является то, что она создается в условиях естественного роста пленки полупроводника. При условии, что эта поверхность не нарушается перед нанесением барьерного слоя, наличие в ней поверхностных состояний по Тамму и Шокли маловероятно. Два других типа поверхностных состояний связаны практически с качеством технологической обработки поверхности эпитаксиального слоя (как правило — химико-динамической) перед нанесением проводящего электрода (барьерного слоя).

Наилучшие образцы фотодиодов типа $n^+ - n - \text{GaP} - \text{SnO}_2(\text{F})$, полученные в [7], обладают токовой монохроматической чувствительностью до 0,12 А/Вт на длине волны 250 нм при наличии просветляющего покрытия, рассчитанного на длину волны 300 нм, что учитывается в нашем случае уравнениями (1)–(3) и (6). Анализ представленных результатов показывает, что модифицированная система уравнений и неравенств позволяет более точно, чем в [7, 8], оценивать токовую монохроматическую чувствительность фотодиодов на основе эпитаксиального фосфида галлия. Кроме того, она позволяет получать оптимальные комбинации как конструктивных параметров структуры, так и фотоэлектрических свойств полупроводника и барьерного слоя для достижения максимальной токовой монохроматической чувствительности в коротковолновой области УФ-спектра оптического излучения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Малик А. И., Грушка Г. Г. Оптоэлектронные свойства гетеропереходов окисел металла-фосфид галлия // Физика и техника полупроводников. — 1991. — Т. 25, вып. 10. — С. 1891–1895. [Malik A. I., Grushka G. G. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1991. T. 25, iss. 10. P. 1891]

2. Анисимова И. Д., Стафеев В. И. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе широкозонных соединений A_3B_5 // Прикладная физика. — 1999. — Вып. 2. — С. 41–44. [Anisimova I. D., Stafeyev V. I. // Prikladnaya fizika. 1999. Iss. 2. P. 41]

3. Проспект фирмы «Hamamatsu Photonics K.K.» электронный ресурс. Режим доступа: <http://sales.hamamatsu.com/en/products/solid-state-division/compound-semiconductors/gaasp-gap/conductlist.php?&overview=13157904&view=productlist#productlist>

4. Malik A., Seco A., Fortunator E. et al. A new high ultraviolet sensitivity FTO-GaP Schottky photodiode fabricated by spray pyrolysis // Semicond. Sci. Technol. — 1998. — N 13. — P. 102–107.

5. Патент № 7145 України на корисну модель. Спосіб виготовлення поверхнево-бар'єрного фотодіоду / Шабашкевич Б. Г., Піроженко С. І., Добровольський Ю. Г. — 2005. — Бюл. № 6. [Patent № 7145 Ukrayini na korisnu model'. Spisib виготовлення поверхнево-бар'єрного фотодіоду / Shabashkevich B. G., Pirozhenko S. I., Dobrovol'skii Yu. G. 2005. Bull. N 6]

6. Биксей М. П., Добровольський Ю. Г., Шабашкевич Б. Г. Фотоприємник ультрафіолетового излучения на основе фосфида галлия // Прикладная физика. — 2005. — № 4. — С. 97–100. [Biksei M. P., Dobrovol'skii Yu. G., Shabashkevich B. G. // Prikladnaya fizika. 2005. N 4. P. 97]

7. Dobrovolskiy Yu. G., Perevertaylo V. L., Shabashkevich B. G., Pidkamin L. J. Clarifying coverages on the basis of tapes SnO_2 , SiO_2 , Si_3N_4 for photodiodes of ultraviolet and visible range // SPIE Proc. 2009. — Vol. 7388. — P. 63–69.

8. http://spie.org/x648.html?product_id=855112, Yu. Dobrovolskiy, L. Pidkamin and G. Prokhorov, «Photodiodes on the basis of gallium phosphide with increased sensitivity at a wavelength of 254 nm», Proc. SPIE 8338, 83380N (2011); doi:10.1117/12.920931 http://spie.org/x648.html?product_id=920931.

9. Воробець Г. І., Воропаєва С. Л., Добровольський Ю. Г., Іванушак М. Н. Алгоритм і програмне забезпечення оптимізації технічних параметрів фотодетекторів // Науковий вісник Чернівецького університету: Збірник наук. праць. — Вип. 446: Комп'ютерні системи та компоненти. — 2009. — С. 112–116. [Vorobets' G. I., Voropaeva S. L., Dobrovol'skii Yu. G., Ivanushak M. N. Algoritm i programne zabezpechennya optimizatsiyi tekhnichnikh parametriv fotodetektoriv // Naukovii visnik Chernivets'kogo universitetu: Zbirnik nauk. prats'. Iss. 446: Komp'yuterni sistemi ta komponenti. 2009. P. 112]

10. Добровольський Ю. Г. Фотодиод, устойчивый к фоновому освещению // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. — 2006. — № 4. — С. 33–37. [Dobrovol'skii Yu. G. // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2006. N 4. P. 33]

11. Джафаров Т. Д. Дефекты и дефектоскопия в эпитаксиальных слоях. — Москва: Наука, 1978. [Dzhafarov T. D. Defekty i defektoskopiya v epitaksial'nykh sloyakh. Moscow: Nauka, 1978]

12. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников Л. Г. Физика полупроводников. — Москва: Наука, 1977. [Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov L. G. Fizika poluprovodnikov. Moscow: Nauka, 1977]

13. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Том IV. Оптика. — Москва: Физматлит, 2005. [Sivukhin D. V. Obshchii kurs fiziki. Tom IV. Optika. Moscow: Fizmatlit, 2005]

14. Добровольський Ю. Г., Комаров Е. В., Биксей М. П. Двухспектральный фотоприемник // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 3. — С. 18–22. [Dobrovol'skii Yu. G., Komarov E. V., Biksei M. P. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2005. N 3. P. 18]

15. Nicollian E. H., Brews J. R. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology. — New York: Wiley, 1982.

16. Sah C.-T. Fundamentals of solid-state electronics. — World Scientific, 1991.

17. Гуртов В. А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие. — Москва, 2005. [Gurtov V. A. Tverdotel'naya elektronika: Ucheb. posobie. Moscow, 2005]

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.06 2012 г.

Dobrovol'skii Yu. G. Photodiode based on GaP sensitized to short-wave region of UV spectrum.

Keywords: photodiode, gallium phosphide, computer design, sensitivity.

An algorithm for the simulation and analysis of the parameters that determine the sensitivity of the photodiode surface-barrier structures based on $n^+ - n$ -GaP — $\text{SnO}_2(\text{F})$ has been developed. It has been shown that the monochromatic current sensitivity to radiation at wavelength of 250 nm in such a structure can reach 0,1–0,12 A/W.

Ukraine, Chernovtsi, SPF «Tensor».

Добровольський Ю. Г. Фотодіоди на основі GaP з підвищеною чутливістю у короткохвильовій області УФ-спектра.

Ключові слова: фотодіод, фосфід галію, комп'ютерне моделювання, чутливість.

Розроблено алгоритм для комп'ютерного моделювання та аналізу параметрів, що визначають чутливість фотодіодів з поверхнево-бар'єрною структурою на основі $n^+ - n$ -GaP — $\text{SnO}_2(\text{F})$. Показано, що струмова монохроматична чутливість до випромінювання з довжиною хвилі 250 нм у такій структурі може досягати 0,1–0,12 А/Вт.

Україна, м. Чернівці, НПФ «Тензор».