

УДК 536.241

И. А. Хорунжий, кандидат физико-математических наук, доцент (БНТУ);**Д. С. Доманевский**, доктор физико-математических наук, профессор (БНТУ);**С. А. Малышев**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией (ИФ НАН Беларуси);**А. Л. Чиж**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (ИФ НАН Беларуси)**ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МОЩНОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ
InGaAs/InP *p-i-n*-ФОТОДИОДЕ С БАЛОЧНЫМИ ВЫВОДАМИ**

Методом компьютерного моделирования исследованы тепловые процессы в высокоскоростном фотодиоде с балочными выводами и малой фоточувствительной областью. Установлено, что основной отвод тепла от активной светочувствительной области фотодиода происходит через анодный контакт. Показано, что в результате изменения толщины и ширины анодного контакта, а также при наличии остаточного слоя подложки InP толщиной 2 мкм можно повысить мощность, рассеиваемую прибором, в ~7,5 раза при сохранении прежней температуры активной области прибора, работающего в непрерывном режиме.

Thermal processes in the high-speed photo diode with balk contacts and small photosensitive area have been investigated by computer simulation method. It was found out that the main heat removal from active photosensitive area of the photo diode happens through anode contact. It is shown that as a result of changes of thickness and width of anode contact, and also in the presence of a residual 2 μm thick layer of InP substrate it is possible to increase the power disseminated by the device by ~7.5 times at the same as former temperature of active area for the device working in continuous mode.

Введение. Стремительное развитие волоконно-оптической элементной базы и, как следствие, появление дешевых оптоэлектронных приборов вызвало интенсивное внедрение оптоэлектронных технологий в СВЧ-технику. Аналоговые волоконно-оптические линии оказались весьма удобными для использования в распределенных удаленных антенных системах, радарх с фазированными антенными решетками, а также в радиоастрономии благодаря низким потерям в оптическом волокне, его малому размеру и весу, а также невосприимчивости оптического волокна к электромагнитным помехам [1]. В высококачественных аналоговых волоконно-оптических линиях с высоким динамическим диапазоном при отсутствии интермодуляционных искажений требуются мощные высокоскоростные фотодиоды с областью спектральной чувствительности 1250–1650 нм [2]. Известно, что для таких фотодиодов характерно насыщение фототока при большой падающей оптической мощности [3]. Существует несколько физических механизмов, оказывающих влияние на насыщение фототока в фотодиодах, среди которых наиболее значительными являются экранирование внутреннего электрического поля носителями заряда, генерированными под воздействием падающего оптического излучения (эффект пространственного заряда), нагрев джоулевым теплом вследствие протекания фототока (эффект саморазогрева) и последовательное контактное сопротивление [4, 5]. Следует отметить, что еще до насыщения фототока, эффект пространственного заряда может привести к электрическому пробоем из-за высокой напряженности электрического поля в

обедненной области [6], а эффект саморазогрева может привести к термическому пробоем [7].

Для снижения влияния эффекта пространственного заряда в традиционном *p-i-n*-фотодиоде были предложены конструкции *p-i-n*-фотодиода с переносом одного типа носителей заряда [8] и с частично обедненной поглощающей областью [9]. В уже готовой фотодиодной структуре на насыщение фототока также сильное влияние оказывает напряжение обратного смещения, с увеличением которого возрастает и нагрев обедненной области фотодиода джоулевым теплом. Таким образом, более эффективная передача тепла из обедненной области приводит к увеличению фототока насыщения [10]. С увеличением предельной частоты фотодиода в миллиметровом диапазоне длин волн требования к эффективному отводу тепла еще больше увеличиваются, так как такие фотодиоды имеют диаметр фоточувствительной области не более 25 мкм, при этом эффект саморазогрева и высокое последовательное сопротивление контактов уменьшают фототок насыщения [11]. Для спектрального диапазона 1250–1650 нм обычно используются высокоскоростные фотодиоды на основе гетероструктур InGaAs/InP. Если используемую для выращивания таких гетероструктур подложку InP заменить на подложку с большей теплопроводностью, то эффективность передачи тепла из активной области фотодиода значительно повысится. Например, методами планарного сращивания пластин металлическими слоями [12] или непосредственно слоями полупроводников [13] возможен перенос слоев мощных InGaAs-фотодиодов на кремниевые подложки. Также

для увеличения эффективности отвода тепла из активной области можно использовать монтаж фотодиода методом перевернутого кристалла на теплопроводящую AlN-подложку [14].

InGaAs/InP-фотодиод с балочными выводами представляет собой *p-i-n*-фотодиод с мезаструктурой, освещаемый со стороны удаленной подложки, в котором *p*- и *n*-контакты изготовлены в виде металлических балок (рис. 1). Благодаря использованию балочных выводов фотодиод может быть непосредственно смонтирован на микрополосковую или копланарную СВЧ-линию передачи, которая также является теплоотводом.

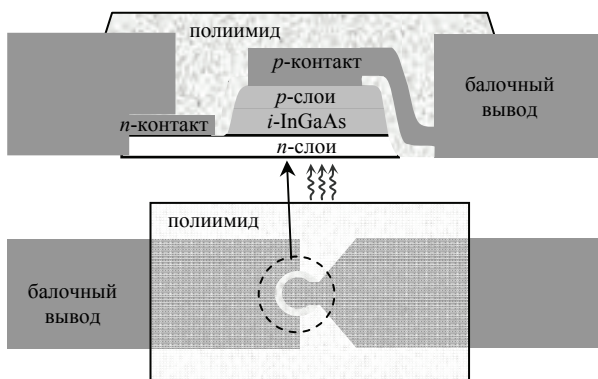


Рис. 1. Зонная диаграмма и структура фотодиода с частично обедненной поглощающей областью и балочными выводами

Главным преимуществом фотодиода с балочными выводами является малое тепловое сопротивление вследствие того, что передача тепла из обедненной области фотодиода происходит одновременно через *p*- и *n*-контакты.

Основная часть. Для детального изучения особенностей теплообмена в высокоскоростном фотодиоде была разработана тепловая модель фотодиода с использованием программного пакета ANSYS. При разработке компьютерной модели были использованы реальные размеры фотодиода и его составных частей. Общий вид фотодиода, сгенерированный компьютерной программой, представлен на рис. 2.

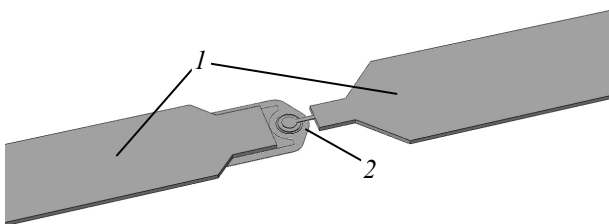


Рис. 2. Общий вид центральной части фотодиода, сгенерированный компьютерным пакетом ANSYS (полиимид не показан, балочные выводы показаны не полностью):

1 – балочные выводы, 2 – мезаструктура

В разработанной компьютерной модели предполагается, что равномерное тепловыделение происходит только в обедненной области нелегированного поглощающего *i*-InGaAs-слоя, имеющего цилиндрическую форму диаметром 22 мкм и толщиной 0,5 мкм, вследствие протекания через эту область фототока (джоулево тепло), суммарная мощность тепловых источников (мощность, рассеиваемая фотодиодом) полагалась равной 10 мВт, за исключением особо оговариваемых случаев. Все расчеты проводились для стационарного режима теплообмена, при расчетах зависимость теплопроводности материалов фотодиода от температуры описывались формулой

$$k(T) = k_{300} \left(\frac{T}{300 \text{ К}} \right)^\alpha,$$

где k_{300} – теплопроводность материала при температуре 300 К. Значения коэффициентов k_{300} и показателей степени α для материалов, используемых в фотодиоде, приведены в таблице

Значения коэффициентов k_{300} и показателей степени α для материалов, используемых в фотодиоде

Материал	Теплопроводность при 300 К, k_{300} , Вт/К·м	α
Полиимид	0,5	0,33
InP	68	-1,4
InGaAs	4,8	-1,17
InGaAsP	16,4	-1,34
Au	318	-0,08
Ti	21,9	-0,25

При монтаже балочные контакты фотодиода должны припаиваться к плате, на которую устанавливается фотодиод, они работают как мощные тепловые радиаторы. В качестве граничных условий в тепловой модели полагалось, что температура поверхности верхней стороны балочных контактов от их середины и до внешних концов стабилизирована и равна температуре окружающей среды, которая полагалась равной 20°C. Таким образом, если учитывать очень низкую теплопроводность полиимида, то отвод тепла от активной области мезаструктуры к охлаждаемым участкам балочных контактов возможен в основном через металлический анод и через катодный контакт, представляющий собой тонкую пластину InGaAsP с относительно низкой теплопроводностью.

Расчет нагрева фотодиода в стационарном режиме при использовании указанных параметров

производился методом конечных элементов. Распределение температуры в центральной части фотодиода при стационарном режиме нагрева, полученное методом компьютерного моделирования, представлено на рис. 3. Максимальная температура активной области фотодиода, в соответствии с расчетом, при рассеиваемой мощности 10 мВт составляет 133,4°C.

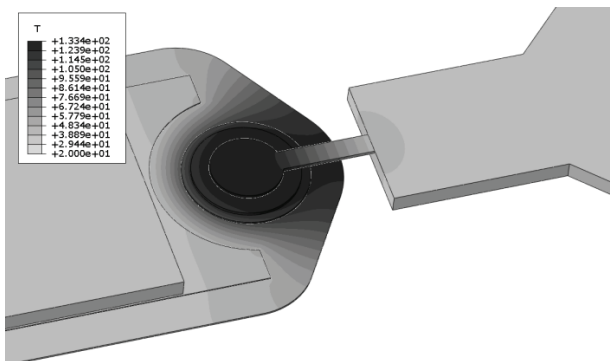


Рис. 3. Распределение температуры в центральной части фотодиода при стационарной работе. Рассеиваемая мощность 10 мВт

На рис. 4 представлено распределение тепловых потоков в центральной части фотодиода при стационарном теплообмене.

Из приведенного распределения видно, что наибольшая плотность теплового потока имеет место в контактной дорожке из золота, соединяющей анод фотодиода с балочным контактом. Отвод тепла через катодный контакт (на рис. 4 нижняя сторона фотодиода) также имеет место и вносит заметный вклад в общий теплообмен, несмотря на то, что теплопроводность подложки InGaAsP имеет довольно низкое значение. Заметный вклад в теплообмен через катодный вывод достигается благодаря большой площади этого контакта.

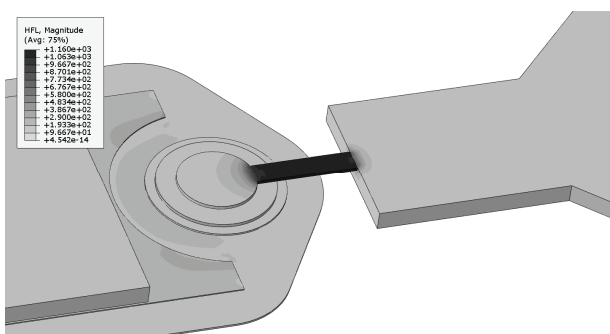


Рис. 4. Распределение тепловых потоков в центральной части фотодиода при стационарном режиме. Рассеиваемая мощность 10 мВт

Точно оценить долю тепла, отводимого по каждому из путей, довольно сложно, но для примерной оценки было проведено два расчета

с помощью описанной выше модели при очередном отключении отвода тепла через анод и катод. Если отключить отвод тепла через анод, то максимальная температура активной области фотодиода достигает значения 390,4°C, т. е. перегрев увеличивается почти в 3,3 раза, а если отключить теплоотвод через катод, то температура активной области достигает значения 219,1°C, т. е. перегрев по сравнению с исходным вариантом расчета увеличивается в 1,76 раза. Исходя из этих оценочных результатов, можно заключить, что интенсивность теплообмена через анодный контакт почти вдвое превышает интенсивность теплообмена через катод. Следовательно, при нормальной работе обоих каналов теплообмена примерно две трети тепла отводится через анод и одна треть через катод.

Высокая температура нагрева активной области является одним из главных факторов, ограничивающих максимальную мощность, рассеиваемую прибором. При достижении активной областью прибора температуры порядка 200°C и выше скорость диффузии легирующих примесей в полупроводнике значительно возрастает, что приводит к резкому сокращению срока службы прибора и быстрому выходу его из строя. Расчеты показали, что при значении рассеиваемой мощности 15 мВт температура активной области фотодиода достигает значения 197,6°C. Таким образом, для рассмотренной конструкции фотодиода максимальная рассеиваемая мощность должна быть ограничена примерно 10 мВт. При более высоких мощностях нагрев активной области приближается к температурам, при которых время жизни прибора становится неприемлемо малым.

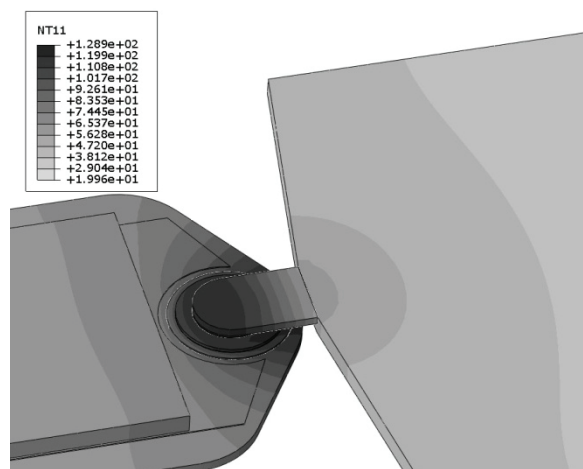


Рис. 5. Распределение температуры в центральной части оптимизированного фотодиода при стационарной работе. Рассеиваемая мощность 75 мВт

Для дальнейшего повышения рассеиваемой мощности была выполнена оптимизация конструкции. В частности, была увеличена толщина и ширина контактной дорожки, соединяющей анод фотодиода с балочным контактом, конструкция центральной части фотодиода сделана более компактной, а также предложено не стравливать до конца подложку из InGaAsP, которая имеет сравнительно высокую теплопроводность и высокую прозрачность для длины волны, принимаемой фотодиодом. На рис. 5 приведено распределение температуры в центральной части оптимизированного фотодиода, при толщине подложки InGaAsP 2 мкм при стационарном режиме и рассеиваемой мощности 75 мВт. Максимальная температура активной области фотодиода достигает в данном случае 128,9°C. Таким образом, в результате предложенных изменений конструкции рассеиваемую мощность удалось увеличить в 7,5 раза.

Заключение. В работе рассмотрена новая конструкция высокоскоростного *p-i-n*-фотодиода, которая базируется на использовании технологии балочных выводов для снижения теплового сопротивления последовательного контактного сопротивления. Показано, что фотодиод с балочными выводами обладает низким значением теплового сопротивления из-за передачи тепла из объема обедненной области через *p*- и *n*-области. При использовании более плотной компоновки, увеличении толщины и ширины анодного контакта, а также сохранении подложки InGaAsP толщиной 2 мкм мощность, рассеиваемую фотодиодом, можно довести до ~75 мВт.

Литература

1. Berceci, T. Microwave photonics – a historical perspective / T. Berceci, P. Herczfeld // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2010. – Vol. 58, No. 11. – P. 992–3000.
2. Photodiode linearity requirements for radio-frequency photonics and demonstration of increased performance using photodiode arrays / V. J. Urick [et al.] // IEEE Internation. Topical Meeting on Microw. Photonics. – 2008. – P. 86–89.
3. Saturation characteristics of fast photodetectors / L. Pao-Lo [et al.] // IEEE Trans.

Microw. Theory Tech. – 1999. – Vol. 47, No. 7. – P. 1297–1303.

4. Williams, K. J. Design considerations for high-current photodetectors / K. J. Williams, R. D. Esman // J. Lightw. Technol. – 1999. – Vol. 17, No. 8. – P. 1443–1454.

5. Malyshev, S. High-power InGaAs/InP partially depleted absorber photodiodes for microwave generation / S. Malyshev, A. Chizh, Y. Vasileuski // J. Lightw. Technol. – 2008. – Vol. 26, No. 15. – P. 2732–2739.

6. Kato, K. Ultrawide-band / high-frequency photodetectors / K. Kato // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1999. – Vol. 47, No. 7. – P. 1265–1281.

7. Comparison of power dissipation tolerance of InP/InGaAs UTC-PDs and Pin-PDs / T. Yasui [et al.] // IEICE Trans. Electron. – 2003. – Vol. E86-C, No. 5. – P. 864–866.

8. Improved response of uni-traveling-carrier photodiodes by carrier injection / N. Shimizu [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 37, No. 3B. – P. 1424–1426.

9. High-saturation-current InP-InGaAs photodiode with partially depleted absorber / Li Xiaowei [et al.] // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2003. – Vol. 15, No. 9. – P. 1276–1278.

10. Williams, K. J. High-power photodiodes / K. J. Williams, D. A. Tulchinsky, J. C. Campbell // IEEE Internation. Topical Meeting on Microw. Photonics. – 2007. – P. 9–13.

11. A comparison of front- and backside-illuminated high-saturation power partially depleted absorber photodetectors / Li Xiaowei [et al.] // IEEE J. Quantum Electron. – 2004. – Vol. 40, No. 9. – P. 1321–1325.

12. High power photodiode wafer bonded to Si using Au with improved responsivity and output power / Li Ning [et al.] // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2006. – Vol. 18, No. 23. – P. 2526–2528.

13. Infrared-sensitive InGaAs-on-Si *p-i-n* photodetectors exhibiting high-power linearity / A. Pauchard [et al.] // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2004. – Vol. 16, No. 11. – P. 2544–2546.

14. High-current backside-illuminated InGaAs/InP *p-i-n* photodiode / S. Itakura [et al.] // IEEE Internation. Topical Meeting on Microw. Photonics (MWP). – 2009. – P. 1–4.

Поступила 01.03.2013