С.А. Малышев¹, А.Л. Чиж¹, А.А. Тептеев², А.С. Шуленков²

¹ Институт физики НАН Беларуси ² ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Мощный InAlAs/InGaAs/InP СВЧ-фотодиод Шоттки

Представлена новая конструкция мощного CBЧ-фотодиода Шоттки с балочными выводами на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InP, позволяющими получить низкое тепловое сопротивление фотодиода. Максимальная выходная CBЧ-мощность экспериментальных образцов фотодиода Шоттки составила величину 15 дБм на частоте 20 ГГц, что позволяет использовать такие фотодиоды в аналоговых волоконно-оптических линиях с широким линейным динамическим диапазоном, а также для генерации CBЧ-сигналов оптическими методами в системах радиолокации, радиосвязи и измерительной CBЧ-техники.

Ключевые слова: мощный СВЧ-фотодиод, барьер Шоттки, балочные выводы

Аналоговые волоконно-оптические линии оказались весьма удобными для использования в распределенных удаленных антенных системах радиосвязи, радиолокационных системах с фазированными антенными решетками, а также в измерительной СВЧ-технике так как имеют очень низкие потери, небольшой вес и размер, а также невосприимчивы к электромагнитным помехам [1,2]. В аналоговых волоконно-оптических линиях с широким линейным динамическим диапазоном требуются мощные высокоскоростные фотодиоды, работающие в спектральном диапазоне 1250-1650 нм, в котором оптическое волокно имеет минимальные потери [3]. Хорошо известно, что для фотодиодов характерно насыщение фототока при большой мощности падающего оптического излучения, которое обусловлено последовательным сопротивлением фотодиода, экранированием внутреннего электрического поля фотоносителями (эффект пространственного заряда), а также джоулевым нагревом фотодиода вследствие протекания фототока (эффект саморазогрева) [4-6]. Следует отметить, что еще до насыщения фототока, эффект пространственного заряда может привести к электрическому пробою из-за высокой напряженности электрического поля в обедненной области [7], а эффект саморазогрева может привести к термическому пробою [8] и тем самым ограничить максимальную мощность СВЧ-сигнала на выходе фотодиода. На насыщение фототока в любой конструкции СВЧ-фотодиода сильное влияние оказывает напряжение обратного смещения, с увеличением которого ослабляется эффект пространственного заряда, однако при этом возрастает джоулевый нагрев фотодиода. Таким образом, более эффективный отвод тепла из обедненной области СВЧ-фотодиода приводит к увеличению фототока насыщения [9]. Для СВЧ-фотодиодов с предельной частотой свыше 10 ГГц требования к эффективному отводу тепла еще больше увеличиваются, так как такие фотодиоды имеют диаметр фоточувствительной области не более 25 мкм, что приводит к увеличению последовательного сопротивления контактов и плотности фототока, тем самым увеличивая влияние эффекта саморазогрева на фототок насыщения [10]. Для спектрального диапазона 1250-1650 нм обычно используются фотодиоды на основе гетероструктур InGaAs/InP. Если в конструкции такого фотодиода подложку InP заменить материалом с большей теплопроводностью, то отвод тепла через подложку может быть улучшен. Так, например, отвод тепла от InGaAs фотодиода на кремниевую подложку

можно улучшить в конструкции с пайкой металлического контакта фотодиода к теплопроводящей подложке кремния через золотой контакт [11], либо создавая фотодиод на основе эпитаксиальных слоев InGaAs/InP, выращенных непосредственно на кремниевой подложке [12], что позволяет улучшить отток тепла из активной зоны фотодиода. Для увеличения эффективности отвода тепла из активной области можно также использовать монтаж фотодиода методом перевернутого кристалла на теплопроводящую AlN подложку, что позволяет значительно снизить тепловое сопротивление фотодиода [13].

В данной работе представлена новая конструкция высокоскоростного мощного фотодиода, который представляет собой InAlAs/InGaAs/InP фотодиод Шоттки с мезаструктурой, освещаемый со стороны удаленной подложки, в котором контакт Шоттки и *n*контакт изготовлены в виде металлических балок. Благодаря использованию балочных выводов фотодиод может быть непосредственно смонтирован на микрополосковую или копланарную СВЧ-линию передачи, которая также является теплоотводом. Фотодиодная структура содержит меза-структуру круглого сечения с диаметром рабочей площадки 20 мкм и прямоугольные Au балочные выводы (Puc. 1a). Такая конструкция обладает низким тепловым сопротивлением, потому что отвод тепла из области пространственного заряда фотодиода происходит через оба контакта.

На рис. 1б приведена гетероструктура СВЧ-фотодиода Шоттки, которая была выращена методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке InP. Гетероструктура состоит из следующих слоев: n^+ -InGaAsP стоп-слой толщиной 400 нм и с концентрацией легирующей примеси $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³, контактный n^+ -InP слой толщиной 2000 нм и с концентрацией легирующей примеси $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³, поглощающий n^+ -InGaAs слой толщиной 30 нм и с концентрацией легирующей примеси $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³, нелегированный поглощающий n^0 -InGaAs слой толщиной 400 нм (концентрация остаточной донорной примеси менее 10^{15} см⁻³), нелегированный варизонный n^0 -InGaAlAs слой толщиной 50 нм, нелегированный барьерный n^0 -InAlAs слой толщиной 30 нм, нелегированный защитный n^0 -InGaAs слой толщиной 30 нм. Широкозонный n^+ -InGaAsP слой используется для защиты фотодиода в качестве стоп слоя при селективном химическом травлении подложки InP. Толстый контактный n^+ -InP слой используется для формирования



Рисунок 1. Сечение (а) и гетероструктура (б) мощного СВЧ-фотодиода Шоттки с балочными выводами на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InP

В фотодиоде Шоттки с балочными выводами барьерный контакт покрывает всю фоточувствительную область, поэтому такой фотодиод имеет меньшее контактное сопротивление по сравнению с фотодиодом с традиционным кольцевым контактом, имеющим отверстие по центру для ввода оптического излучения. Более того, в фотодиоде с балочными выводами при его освещении со стороны контактного n^+ -слоя металлический контакт Шоттки представляет собой зеркало для падающего оптического излучения, что значительно увеличивает эффективную длину поглощения для СВЧ-фотодиодов, имеющих тонкий поглощающий слой. Кроме того, индуктивность балочных выводов может быть использована для увеличения в 1,5 раза предельной частоты фотодиода [14].

Изготовление фотодиода начинается с формирования меза-структуры с помощью анизотропного химического травления защитного n^0 -InGaAs слоя, барьерного n^0 -InAlAs слоя и варизонного n^0 -InAlGaAs слоя вплоть до поглощающего n^0 -InGaAs слоя. Другая меза-структура формируется путем селективного травления поглощающего n^0 -InGaAs слоя вплоть до контактного n^+ -InP слоя. Омический контакт на контактном n^+ -InP слое формируется путем электрохимического осаждения сплава AuGe и последующего вжигания. Контакт Шоттки формируется путем последовательного напыления на барьерный n^0 -InGaAs слой пленок Ti и Au общей толщиной 300 нм. Затем контактный n^+ -InP слой и n^+ -InGaAsP стоп-слой вытравливаются до подложки n^+ -InP для формирования периферийного меза-профиля вокруг InAlAs/InAlGaAs/InGaAs фоточувствительной области фотодиода и пассивируются пленкой SiO₂ толщиной 500 нм, наносимой методом химического осаждения при низком давлении и температуре 320°C. После этого через вытравленные окна в пассивирующей пленке SiO₂ проводится разводка металлизации от n-контакта и контакта



Рисунок 2

Шоттки путем напыления пленок Ti и Au. Затем формируются прямоугольные балочные выводы размером 420×420 мкм и толщиной 5 мкм путем электрохимического осаждения Au, после чего на верхнюю часть фотодиода наносится полиимидная пленка, контур которой формируется с помощью фотолитографии и последующего плазменного травления в среде кислорода. Полиимидная пленка закрывает меза-структуру фотодиода и часть балочных выводов с целью придания фотодиоду Шоттки механической прочности. Микрофотографии InAlAs/InGaAs/InP фотодиода Шоттки с балочными выводами перед удалением подложки InP приведена на Puc. 2. Удаление подложки проводится методом селективного химического травления.

В данной работе были изготовлены экспериментальные образцы InAlAs/InGaAs/InP CBЧ-фотодиодов Шоттки с балочными выводами и диаметром фоточувствительной области 20 мкм. Спектральная чувствительность фотодиодов составляет 0.45 А/Вт на длине волны 1550 нм и 0.65 А/Вт на длине волны 1310 нм, что соответствует внешней квантовой эффективности 36% и 62%, соответственно. Фотодиоды имеют пробивное напряжение 10 В, однако, для исключения туннелирования зона – зона в узкозонном InGaAs поглощающем слое фотодиоды должны работать при напряжении смещения ниже 5 В. Исследуемые фотодиоды имеют темновые токи ниже 2 нА при напряжении обратного смещения не выше 3 В.

На рис. За приведена относительная частотная характеристика экспериментального образца СВЧ-фотодиода Шоттки, установленного в копланарную СВЧ-линию с волновым сопротивлением 50 Ом при напряжении обратного смещения 3 В. Предельная полоса частот фотодиода на уровне 3 дБ составляет величину 28 ГГц. Спад частотной характеристики на частотах ниже 1 ГГц связан с малой разделительной емкостью в цепи питания фотодиода, а колебания на частотной характеристик связаны с неполным согласованием копланарной линии и выходного коаксиального СВЧ-коннектора типа К на высоких часто-тах. На рис. Зб приведена зависимость выходной СВЧ мощности исследуемого фотодиода Шоттки от мощности входного оптического сигнала с частотой модуляции 20 ГГц при

различных напряжениях обратного смещения. Из рисунка видно, что при мощности входного оптического сигнала 18 дБм и при напряжении смещения 1 В на начинается насыщение выходной СВЧ-мощности фотодиода. При напряжении смещения 2 В насыщение выходного сигнала, обусловленное эффектом пространственного заряда, начинает проявляться при мощности входного оптического сигнала 20 дБм. Увеличение напряжение смещения до 3 В приводит к термическому разрушению фотодиода, которое происходит при мощности входного оптического сигнала 18 дБм, при этом мощность рассеиваемая фотодиодов составляет 80 мВт. Таким образом, максимальная выходная СВЧ-мощность исследуемого СВЧ-фотодиода Шоттки равна 15 дБм на частоте 20 ГГц, что позволяет использовать такие фотодиоды в аналоговых волоконно-оптических линиях с широким линейным динамическим диапазоном, а также для генерации СВЧ-сигналов оптическими



Рисунок 3. Относительная частотная характеристика при напряжении обратного смещения 3 В (а) и зависимость выходной СВЧ-мощности (б) InAlAs/InGaAs/InP фотодиода Шоттки с балочными выводами, установленного в копланарную СВЧ-линию, от входной оптической мощности при 100% глубине модуляции на частоте 20 ГГц и различных напряжениях обратного смещения

методами в системах радиолокации, радиосвязи и измерительной СВЧ-техники. Библиографический список

1. Berceli T. Microwave photonics – a historical perspective / T. Berceli, P. Herczfeld // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2010. – V.58. – №11. – pp. 2992-3000.

2. Seeds A.J. Microwave photonics / A.J. Seeds, K.J. Williams // J. Lightwave Technology. – 2006. – V.24. – №12. – pp. 4628-4641.

3. Urick V.J. Photodiode linearity requirements for radio-frequency photonics and demonstration of increased performance using photodiode arrays / V.J. Urick, A.S. Hastings, J.D. McKinney, P.S. Devgan, K.J. Williams, C. Sunderman, J.F. Diehl, K. Colladay // IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics. – 2008. – pp. 86-89.

4. Pao-Lo Liu Saturation characteristics of fast photodetectors / Pao-Lo Liu, Williams K.J., Frankel M.Y., Esman R.D. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1999. – V.47. – №7. – pp. 1297-1303.

5. Williams K.J. Design considerations for high-current photodetectors / K.J. Williams, R.D. Esman // J. Lightwave Technology. – 1999. – V.17. – №8. – pp. 1443-1454.

6. Malyshev S.A. High-power InGaAs/InP partially depleted absorber photodiodes for microwave generation / S.A. Malyshev, A.L. Chizh, Yu.G. Vasileuski // J. Lightwave Technology. – 2008. – V.26. – №15. – pp. 2732-2739.

7. Kato K. Ultrawide-band/high-frequency photodetectors // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1999. – V.47. – №7. – pp. 1265-1281.

8. Xiaowei Li High-saturation-current InP-InGaAs photodiode with partially depleted absorber / Xiaowei Li, Ning Li, Xiaoguang Zheng, S. Demiguel, J. Campbell, D. Tulchinsky, K. Williams // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2003. – V.15. – №9. – pp. 1276-1278.

9. Williams K.J. High-power photodiodes / K.J. Williams, D.A. Tulchinsky, J.C. Campbell // IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics. – 2007. – pp. 9-13.

10. Xiaowei Li A comparison of front- and backside-illuminated high-saturation power partially depleted absorber photodetectors / Xiaowei Li, Ning Li, S. Demiguel, J. Campbell, D. Tulchinsky, K. Williams // IEEE J. Quantum Electron. – 2004. – V.40. – №9. – pp. 1321-1325.

11. Ning Li High power photodiode wafer bonded to Si using Au with improved responsivity and output power / Ning Li, Hao Chen, Ning Duan, Mingguo Liu, S. Demiguel, R. Sidhu, A. Holmes, J. Campbell // IEEE Photon. Technol. Lett. $-2006. - V.18. - N_{2}23. - pp. 2526-2528.$

12. Pauchard A. Infrared-sensitive InGaAs-on-Si p-i-n photodetectors exhibiting high-power linearity / A. Pauchard, M. Bitter, Zhong Pan, S. Kristjansson, L. Hodge, K. Williams, D. Tulchinsky, S. Hummel, Y.H. Lo // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2004. – V.16. – №11. – pp. 2544-2546.

13. Itakura S. High-current backside-illuminated InGaAs/InP p-i-n photodiode / Itakura S., Sakai K., Nagatsuka T., Akiyama T., Hirano Y., Ishimura E., Nakaji M., Aoyagi T. // IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). – 2009. – 4 p.

14. Lewen R. Design of inductive p-i-n diode matching for optical receivers with increased bit-rate operation / R. Lewen, U. Westergren, R. Schatz, E. Berglind // J. Lightwave Technology. – 2001. – V.19. – №12. – pp. 1956-1963.