

07.2;07.3

Грибовидная меза-структура для лавинных фотодиодов на гетероструктурах InAlAs/InGaAs

© Н.А. Малеев^{1,2}, А.Г. Кузьменков³, М.М. Кулагина¹, А.П. Васильев³, С.А. Блохин^{1,2}, С.И. Трошков¹, А.В. Нащекин¹, М.А. Бобров¹, А.А. Блохин¹, К.О. Воропаев⁴, В.Е. Бугров², В.М. Устинов³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴ АО „ОКБ-Планета“, Великий Новгород, Россия

E-mail: maleev@beam.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 28 июня 2021 г.

В окончательной редакции 28 июня 2021 г.

Принято к публикации 19 июля 2021 г.

Предложен и исследован вариант грибовидной конструкции меза-структуры для лавинных фотодиодов на основе InAlAs/InGaAs, формируемой с использованием селективного травления. Гетероструктуры для лавинных фотодиодов выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Изготовленные образцы тестовых лавинных фотодиодов с диаметром фоточувствительной области $\sim 30 \mu\text{m}$ после пассивации поверхности слоем SiN демонстрируют пробивные напряжения в диапазоне 70–80 V, уровень темновых токов 75–200 nA при величине приложенного напряжения 90% от пробивного и величину фотоотклика в линейном режиме более 0.5 A/W при стыковке с одномодовым волокном.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, InAlAs/InGaAs, меза-структура, темновой ток.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51627.18939

Лавинные фотодиоды (ЛФД) широко применяются в оптических телекоммуникационных системах, лазерных радарах и дальномерах, детекторах одиночных фотонов [1]. Для спектральных диапазонов 1310 и 1550 nm в настоящее время преимущественно используются ЛФД планарной конструкции на основе гетероструктур InGaAs/InP с отдельными областями поглощения (слой InGaAs) и умножения (слой InP) [2], в которых области $p-n$ -перехода формируются с помощью локальной диффузии примеси p -типа (как правило Zn) в слабо легированный слой InP n -типа [3]. Альтернативный подход основан на использовании гетероструктур InAlAs/InGaAs, в которых в качестве области умножения используется слой InAlAs. По сравнению с ЛФД на основе InGaAs/InP отношение коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок в InAlAs-области умножения выше, чем отношение коэффициентов ударной ионизации двух типов носителей в InP, что позволяет снизить уровень шумов лавинного умножения [4]. Кроме того, коэффициенты ударной ионизации в InAlAs менее чувствительны к вариациям температуры, что обеспечивает улучшение температурной стабильности напряжения пробоя [5]. В то же время ЛФД на основе InGaAs/InP обеспечивают очень низкие уровни темнового тока, однако это достигается использованием сложной конструкции с охранными кольцами и прецизионной двухступенчатой диффузии для подавления краевого пробоя. В большинстве вариантов конструкций ЛФД на основе InAlAs/InGaAs изоляция активной области прибора в латеральном направлении осуществляется с помощью травления меза-структуры. Ключевой проблемой при этом является уменьшение уровня темнового тока, в частности поверхностного тока утечки, для чего ис-

пользуются различные подходы: травление двухступенчатой мезы с пассивацией поверхности бензоциклобутеном [6] или полиамидом [7], комбинация травления мезы и локальной диффузии Zn [8], трехступенчатая меза-структура [9]. Эффективность используемых подходов сильно зависит от особенностей конструкции гетероструктуры, которая в свою очередь оптимизируется под требования для конкретных приложений.

В настоящей работе предложен и исследован вариант грибовидной конструкции меза-структуры для ЛФД на основе InAlAs/InGaAs, формируемой с использованием селективного травления.

Форма боковой стенки меза-структуры оказывает существенное влияние на характеристики ЛФД. В частности, было показано, что многоступенчатые меза-структуры обеспечивают существенное снижение поверхностных токов утечки. Грибовидная форма меза-структуры может быть потенциально интересна для снижения поверхностной утечки, перераспределения напряженности электрического поля с его концентрацией в слое умножения и уменьшения паразитной площади $p-n$ -перехода, не попадающей в область засветки при использовании схемы с вводом излучения через лицевую сторону, где располагается металлизация p -контакта. Для практической апробации возможности изготовления ЛФД с грибовидной меза-структурой в настоящей работе использована концепция двухступенчатого травления в неселективном и селективном травителях.

Гетероструктуры для ЛФД были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках полупроводникового InP и состояли из сильно легированного контактного слоя InGaAs n -типа толщиной 800 nm, сильно легированного слоя InAlAs n -типа толщиной 600 nm,

нелегированного умножительного слоя InAlAs толщиной 850 nm, заряженного слоя InAlAs *p*-типа толщиной 75 nm, нелегированного слоя InAlGaAs с градиентным изменением состава толщиной 75 nm, нелегированного поглощающего слоя InGaAs толщиной 1700 nm, нелегированного слоя InAlGaAs с градиентным изменением состава толщиной 75 nm, сильно легированного слоя InAlAs *p*-типа толщиной 75 nm и тонкого сильно легированного контактного слоя InGaAs *p*-типа. Относительно толстые поглощающий и умножительный слои требуются при использовании ЛФД в качестве детектора одиночных фотонов [10].

Изготовление кристаллов ЛФД начиналось с формирования кольцевых контактов Ti–Pt–Au, после чего в два этапа проводилось травление меза-структуры. На первом этапе под защитой маски из фоторезиста диаметром 40 μm проводилось травление в H₃PO₄:HBr:K₂Cr₂O₇ (1:1:1) с заглаблением в сильно легированный слой InAlAs *n*-типа, при этом размер мезы в верхней части составлял ~ 30 μm, а у внешних краев мезы формировалось кольцевое углубление (рис. 1). При травлении второй мезы внешний край фоторезистивной маски располагался вблизи от внешнего края стенки меза-структуры, защищая ее боковую поверхность. Второй этап травления мезы проводился в селективном

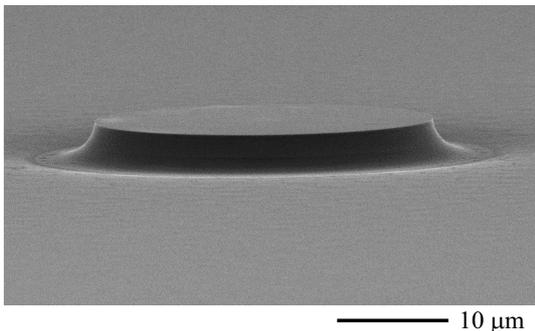


Рис. 1. Изображение в сканирующем электронном микроскопе меза-структуры ЛФД на основе InAlAs/InGaAs после первого шага травления в неселективном травителе H₃PO₄:HBr:K₂Cr₂O₇.

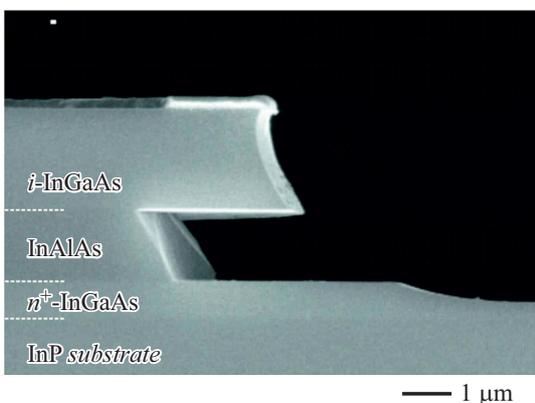


Рис. 2. Изображение в сканирующем электронном микроскопе профиля меза-структуры ЛФД на основе InAlAs/InGaAs после второго шага травления в селективном травителе HCl:H₂O.

травителе HCl:H₂O до вскрытия сильно легированного контактного слоя InGaAs *n*-типа по всему полю структуры. При этом происходил подтрав слоев InAlAs в латеральном направлении. Изображение профиля края получаемой грибовидной меза-структуры в сканирующем электронном микроскопе показано на рис. 2. Электронно-микроскопические исследования были выполнены с использованием оборудования ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург) на микроскопе JSM-7001F. После этого формировались омические контакты AuGe–Ni–Au к вскрытому слою InGaAs *n*-типа, травилась изолирующая меза-структура до подложки InP, селективно травилась окна в сильно легированном контактном слое InGaAs *p*-типа и проводились измерения характеристик ЛФД на пластине. Затем на поверхность пластин методом плазмохимического осаждения наносился слой SiN_x с толщиной ~ 190 nm, соответствующей просветлению на длине волны 1550 nm, в нем вскрывались окна к контактам *p*- и *n*-типа, проводились планаризация поверхности полиамидом и формирование контактных площадок. Характеристики изготовленных ЛФД выборочно измерялись на пластине до разделения на кристаллы с использованием зондовой станции. В качестве источника при измерениях фототока использовался лазерный диод ML976H6F-E01 спектрального диапазона 1550 nm, излучение которого вводилось в многомодовое оптическое волокно. Засветка исследуемого фотодиода осуществлялась через линзу, сформированную на конце волокна, с настройкой на максимум тока ЛФД в линейном режиме. После этого пластины разделялись на кристаллы и проводилась выборочная сборка кристаллов ЛФД на держатели с последующей стыковкой с одномодовым оптическим волокном и измерением их фотоотклика в линейном режиме. В этом случае в качестве источника излучения использовался вертикально-излучающий лазер, состыкованный с одномодовым оптическим волокном, что позволяло количественно оценить величину оптической мощности и оценить нижнее значение величины фотоотклика в линейном режиме, так как часть мощности теряется при стыковке ЛФД с волокном.

На рис. 3 приведены измеренные зависимости темного тока и фототока от приложенного напряжения для одного из изготовленных ЛФД на основе InAlAs/InGaAs с грибовидной меза-структурой. Здесь же показана зависимость величины коэффициента лавинного умножения, рассчитанная по экспериментальным данным. По результатам аналогичных измерений, выполненных для большой выборки кристаллов на пластине, изготовленные ЛФД демонстрируют пробивные напряжения в диапазоне 70–80 V и уровень темновых токов 75–200 nA при величине приложенного напряжения 90% от пробивного. Такие уровни темновых токов уступают лучшим опубликованным данным, что может быть связано с неоптимизированной технологией пассивации поверхности меза-структуры и неоптимальным уровнем легирования заряженного слоя *p*-InAlAs. До пассивации слоем SiN_x измеренный уровень темновых токов на лучших

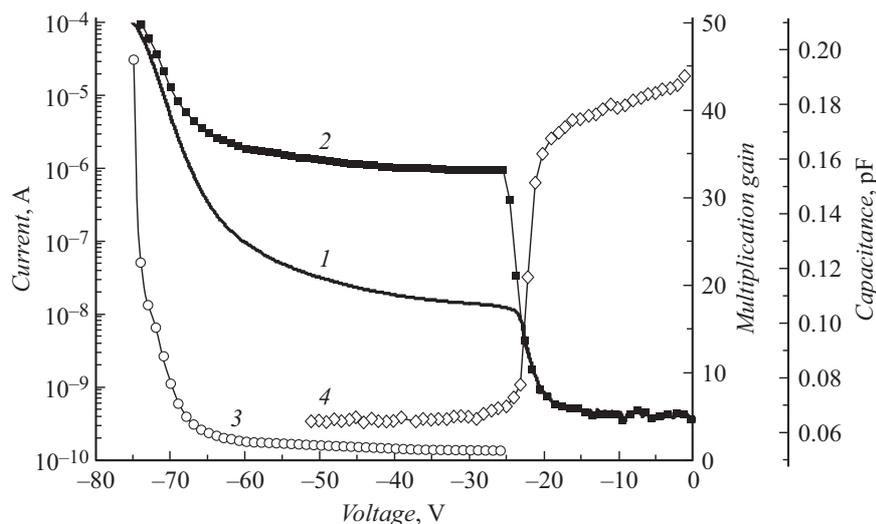


Рис. 3. Характеристики изготовленного ЛФД на основе InAlAs/InGaAs с грибовидной меза-структурой: зависимости темного тока (1) и фототока (2) от приложенного напряжения; соответствующая зависимость величины коэффициента лавинного умножения (3); вольт-фарадная характеристика тестового диода (4).

образцах ЛФД, изготовленных из той же гетероструктуры, составлял 20–40 нА при аналогичных условиях измерений.

Для ЛФД с отдельными областями поглощения и умножения носителей характерны изменение темного тока и начало эффективного фотоотклика при достижении напряжения прокола, когда обедненная область распространяется за пределы слоя лавинного умножения в поглощающий слой. Изготовленные ЛФД демонстрируют такое поведение при напряжениях около 20–25 В. Для уточнения величины напряжения прокола проводились измерения вольт-фарадных характеристик тестовых диодов, сформированных рядом с рабочими. Одна из измеренных вольт-фарадных характеристик приведена на рис. 3 и имеет характерную ступеньку при напряжениях 20–23 В, что хорошо коррелирует с результатами измерений темного тока.

При измерениях кристаллов ЛФД, состыкованных с одномодовым оптическим волокном, фототок в линейном режиме составлял 1350–1400 нА при мощности лазерного излучения $2.6 \mu\text{W}$ в волокне, что дает минимальную оценку величины фотоотклика на уровне 0.54 A/W .

Предложенный вариант грибовидной конструкции меза-структуры, формируемой с использованием селективного травления, позволил изготовить ЛФД на основе InAlAs/InGaAs с диаметром фоточувствительной области $\sim 30 \mu\text{m}$, пробивными напряжениями в диапазоне 70–80 В и уровнем темновых токов 75–200 нА при величине приложенного напряжения 90% от пробивного после пассивации поверхности слоем SiN. При этом величина фотоотклика в линейном режиме превышает 0.5 A/W при стыковке с одномодовым волокном. Оптимизация конструкции гетероструктуры и технологии изготовления ЛФД, в частности пассивации поверхности грибовидной меза-структуры, может существенно улучшить их характеристики.

Финансирование работы

Н.А. Малеев, С.А. Блохин, В.Е. Бугров выражают благодарность за поддержку экспериментальных исследований характеристик изготовленных ЛФД Министерству науки и высшего образования РФ (проект тематики научных исследований № 2019-1442).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.C. Campbell, *IEEE J. Lightwave Technol.*, **34** (2), 278 (2016). DOI: 10.1109/JLT.2015.2453092
- [2] F. Capasso, A.Y. Cho, P.W. Foy, *Electron. Lett.*, **20** (15), 635 (1984). DOI: 10.1049/el:19840437
- [3] Y. Liu, S.R. Forrest, J. Hladky, M.J. Lange, G.H. Orsen, D.E. Ackley, *J. Lightwave Technol.*, **10** (2), 182 (1992). DOI: 10.1109/50.120573
- [4] Y.L. Goh, A.R.J. Marshall, D.J. Massey, J.S. Ng, C.H. Tan, M. Hopkinson, J.P.R. David, S.K. Jones, C.C. Button, S.M. Pinches, *IEEE J. Quant. Electron.*, **43** (6), 503 (2007). DOI: 10.1109/JQE.2007.897900
- [5] L.J.J. Tan, D.S.G. Ong, J.S. Ng, C.H. Tan, S.K. Jones, Y. Qian, J.P.R. David, *IEEE J. Quant. Electron.*, **46** (8), 1153 (2010). DOI: 10.1109/JQE.2010.2044370
- [6] B.F. Levine, R.N. Sacks, J. Ko, M. Jazwiecki, J.A. Valdmanis, D. Gunther, J.H. Meier, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (18), 1898 (2006). DOI: 10.1109/LPT.2006.881684
- [7] J.-J. Liu, W.-J. Ho, J.-Y. Chen, J.-N. Lin, C.-J. Teng, C.-C. Yu, Y.-C. Li, M.-J. Chang, *Sensors*, **19** (15), 3399 (2019). DOI: 10.3390/s19153399
- [8] A. Rouvié, D. Carpentier, N. Lagay, J. Décobert, F. Pommereau, M. Achouche, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20** (6), 455 (2008). DOI: 10.1109/LPT.2008.918229
- [9] Y. Yuan, Y. Li, J. Abell, J. Zheng, K. Sun, C. Pinzone, J.C. Campbell, *Opt. Express*, **27** (16), 22923 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.022923
- [10] X. Meng, S. Xie, X. Zhou, N. Calandri, M. Sanzaro, A. Tosi, C.H. Tan, J.S. Ng, *R. Soc. Open Sci.*, **3** (3), 150584 (2016). DOI: 10.1098/rsos.150584