



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.311: 538.971

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9265>

Выращивание соединения InGaAsSb/GaSb для инфракрасных оптоэлектронных приборов

Тянь Дай Нгуен^{1,2✉}, Д. О. Ким³, С. Д. Ли^{3✉}

¹Институт теоретических и прикладных исследований, Университет Дуй Тан, Ханой 100000, Вьетнам

²Факультет естественных наук, Университет Дуй Тан, Дананг 550000, Вьетнам

³Метрология технологий будущего, Корейский научно-исследовательский институт стандартов и науки, Тэджон 34113, Южная Корея

Аннотация

В настоящем исследовании представлены результаты синтеза эпитаксиального слоя InGaAsSb для оптоэлектронных приборов в коротких инфракрасных волнах при комнатной температуре (КТ).

InGaAsSb с кристаллической решеткой, соответствующей подложке GaSb, выращивали методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с применением деформационной инженерии. Исследованы структурные и оптические свойства слоя InGaAsSb с применением рентгеновского спектрометра высокого разрешения и метода фотолюминесценции. Стандартной техникой фотолитографии и методом индуктивно связанного плазменного травления были изготовлены приборы размером 400×400 мкм. При комнатной температуре получен спектральный отклик с 90 % границей спектральной чувствительности фотодетектора InGaAsSb и спектрами электролюминесценции светодиода при 2.38 мкм при приложенном смещении –0.1 В и 2.25 мкм (пик спектрального излучения) при $J_{ic} = 500$ мА соответственно. При этом спектральный отклик детектора свидетельствует о повышенной интенсивности и низком уровне шума при высокой температуре.

Ключевые слова: InGaAsSb, молекулярно-лучевая эпитаксии, оптоэлектронный прибор, коротковолновое ИК-излучение

Источник финансирования: Работа выполнена при поддержке гранта № 10052824 Корейского института развития промышленных технологий, финансируемого правительством Кореи (Министерство торговли, промышленности и энергетики) и Институтом теоретических и прикладных исследований (Университет Дуй Тан).

Для цитирования: Нгуен Т. Д., Ким Д. О., Ли С. Д. Выращивание соединения InGaAsSb/GaSb для инфракрасных оптоэлектронных приборов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(.): 250–255. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9265>

For citation: Nguyen T. D., Kim J. O., Lee S. J. Growth of InGaAsSb/GaSb compound for infrared optoelectronic devices. *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(2): 250–255. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9265>

✉ Нгуен Тянь Дай, e-mail: nguyentidai@duytan.edu.vn

✉ Ли С. Д., e-mail: sjlee@kriss.re.kr

© Нгуен Т. Д., Ким Д. О., Ли С. Д., 2022



1. Введение

Инфракрасный (ИК) светодиод и коротковолновый ИК детектор (1.7–3 мкм) имеют широкую сферу применения (научные исследования, промышленность, военная техника и особенно дистанционное зондирование атмосферы и обнаружение газов) [1-7]. Полупроводниковые соединения III–V групп на основе сурьмы (Sb) являются перспективным материалом для разработки ИК детекторов и светодиодных приборов коротко- и средневолнового ИК диапазона. В частности, четвертичное соединение InGaAsSb представляет интерес для создания ИК оптоэлектронных приборов [8, 9]. Светодиоды и фотодетекторы на основе InGaAsSb могут использоваться для оптического зондирования (обнаружение газов CO, CO₂ и CH₄) благодаря более низкому уровню шума, высокой чувствительности и высокой выходной мощности [3, 10]. Для синтеза соединений InGaAsSb использовались различные технологии эпитаксиального выращивания, например, газофазная эпитаксия из паров металлоорганических соединений (МОС ГФЭ), [11] жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) [12] и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) [13]. МЛЭ обладает рядом преимуществ по сравнению с остальными методами, в частности, более низкая температура роста и прецизионное регулирование эпитаксиальной толщины и состава. Поэтому в настоящем исследовании для выращивания соединения InGaAsSb/GaSb для ИК детекторов и светодиодных приборов использовали технологию МЛЭ. Было проведено исследование кристаллических, морфологических и оптиче-

ских свойств эпитаксиальных слоев (InGaAsSb и Al(Ga)AsSb). На основе полученных результатов была создана полноценная структура фотодетектора и светодиода. Характеристики прибора на основе InGaAsSb (спектральный отклик, зависимость напряжения от тока и спектральные характеристики электролюминесценции) были изучены при комнатной температуре.

2. Экспериментальная часть

2.1. Выращивание инфракрасного фотодетектора

На рис. 1(а) показано схематическое изображение фотодетектора на основе InGaAsSb с барьерной *nIn* структурой. Этот слой InGaAsSb был предложен для регулирования решетки, соответствующей подложке *n*⁺-GaSb (100). Слои выращивали посредством молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) (RIBER 32P) с использованием источников крекинга As₂ и Sb₂. Пакет слоев состоял из нижнего контакта *n*⁺-In_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y} (2·10¹⁸ см⁻³) толщиной 300 нм, буфера *n*⁺-GaSb (2·10¹⁸ см⁻³) толщиной 300 нм и верхнего контакта *n*⁺-GaSb (2·10¹⁸ см⁻³) толщиной 200 нм. Активная структура типа сэндвича *n*-In_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y} (2·10¹⁶ см⁻³) толщиной 2 мкм между верхним и нижним контактами состояла из InGaAsSb, в котором содержание индия составляло 17 %, а содержание As – 15 %. На активном слое выращивали однополярный барьерный слой Al_{0.3}Ga_{0.7}Sb толщиной 60 нм. Исследование слоя InGaAsSb проводилось с применением рентгеновского дифрактометра высокого разрешения (РФА). Согласно результатам РФА, слой InGaAsSb соответствовал по пара-

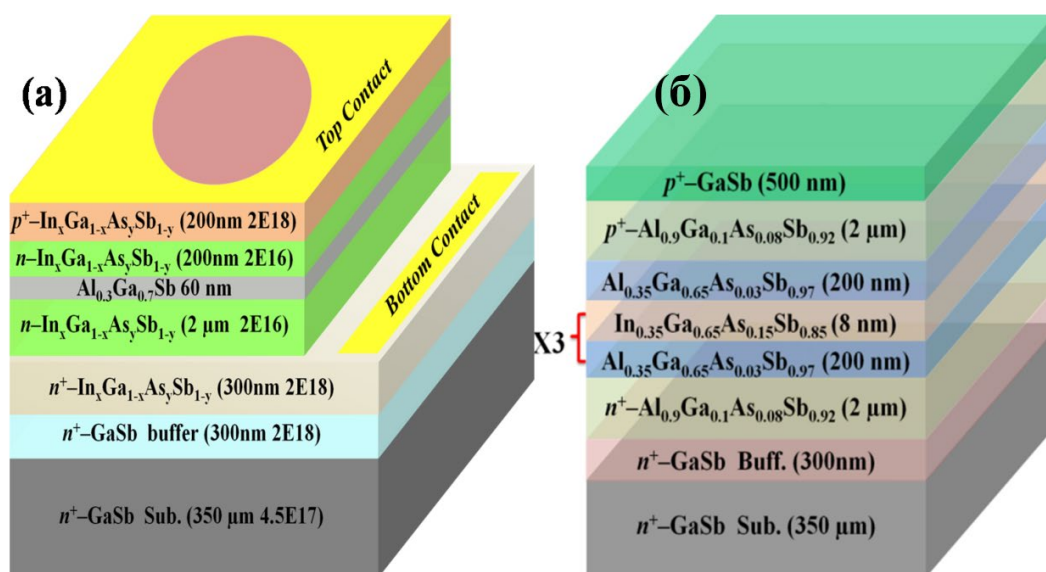


Рис. 1. (В цвете онлайн) (а) структура слоев ИК фотодетектора, (б) структура слоев ИК светодиода

метру кристаллической решетке подложки GaSb, как показано на рис. 2(а) [14].

2.2. Выращивание инфракрасного светодиода

На рис. 1(б) показана подробная схема структуры светодиода, которая состоит из трех квантовых ям $In_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.15}Sb_{0.85}/Al_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.03}Sb_{0.97}$ толщиной 8 нм/200 нм соответственно. После активного слоя $In_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.15}Sb_{0.85}$ толщиной 2 мкм располагается плакирующий и герметизирующий слои $n(p)-Al_{0.9}Ga_{0.1}As_{0.08}Sb_{0.92}$ ($1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 2 мкм. В качестве верхнего контакта выращивали слой p^+-GaSb ($1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 500 нм. Температура субстрата для выращивания слоя InGaAsSb составляла 460 °С, в то время как для других слоев (плакирующего слоя AlGaAsSb и барьера) она составляла 480 °С [14, 15].

2.3. Изготовление прибора

Фотодетектор с мезоструктурой размером 400×400 мкм был изготовлен техникой фотолитографии и методом индуктивно связанного плазменного травления. Металлы с омическим контактом со слоями Ge/Au/Ni/Au наносились на контактный слой электронно-лучевым испарением (ЭЛИ). Контакты отжигали при температуре 200 °С посредством быстрого термического отжига. Детектор имел круглую диафрагму с диаметром мезоструктуры 300 мкм, как показано на рис. 3(а). В целях исследования прибор был установлен на кристаллодержатель без выводов. Кроме того, контактные металлы Ti/Pt/Au также осаждались посредством ЭЛИ на контакте $p-GaSb$ для изготовления светодиодного прибор

ра. Подложку GaSb накладывали и полировали до толщины около 200 мкм и шероховатости 12 нм. Техниккой фотолитографии был изготовлен светодиодный кристалл размером 400×400 мкм, как показано на рис. 3(б). Были нанесены металлы верхнего контакта Ge/Au/Ni/Au. Затем образец был установлен в стандартный корпус ТО-18 и кристаллодержатель без выводов и соединен проволокой, как показано на рис. 3(в) [14].

3. Результаты и обсуждение

3.1. Описание характеристик ИК детектора

На рис. 4(а) показана плотность темнового тока детектора, измеренная при различных температурах с помощью Keithley 236. В температурном диапазоне 200–300 К кривые «напряжение-ток» приобретают асимметричную форму, которая обусловлена действием однополярного барьера ($Al_{0.3}Ga_{0.7}Sb$) [6]. На рис. 4(б) показан спектральный отклик детектора, измеренный ИК Фурье спектрометром FTIR Nicolet-5700 с использованием источника белого света и окна KBr. Прибор показал длинноволновое смещение спектра при повышении температуры со 100 до 300 К, при котором 90% граница спектральной чувствительности смещается с 1.95 до 2.38 мкм. Граница спектральной чувствительности прибора соответствует нашему расчету для соединения $In_{0.17}Ga_{0.83}As_{0.15}Sb_{0.85}$ при 300 К. Чтобы обеспечить соответствие данной границе спектральной чувствительности, состав InGaAsSb можно регулировать за счет изменения концентрации In и As [16, 17]. Также спектральный отклик де-

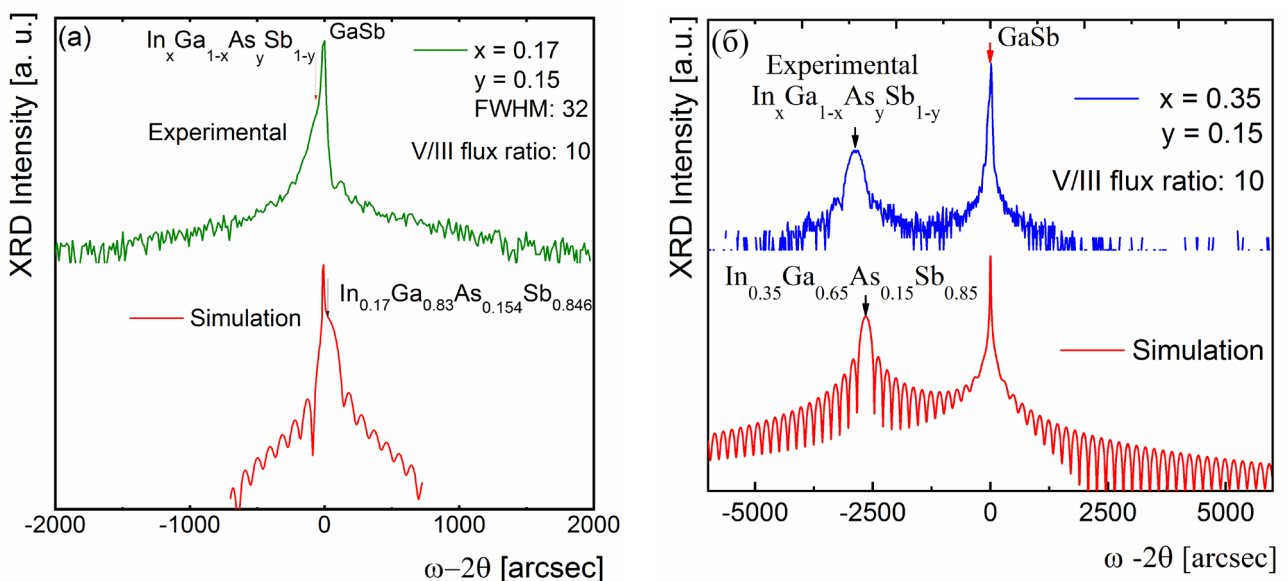


Рис. 2. (В цвете онлайн) (а) плоскости рентгенографической кривой качания (004) сплава $In_{0.17}Ga_{0.83}As_{0.15}Sb_{0.85}$ для детектора, (б) оптимизация сплава $In_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.15}Sb_{0.85}$ для светодиода

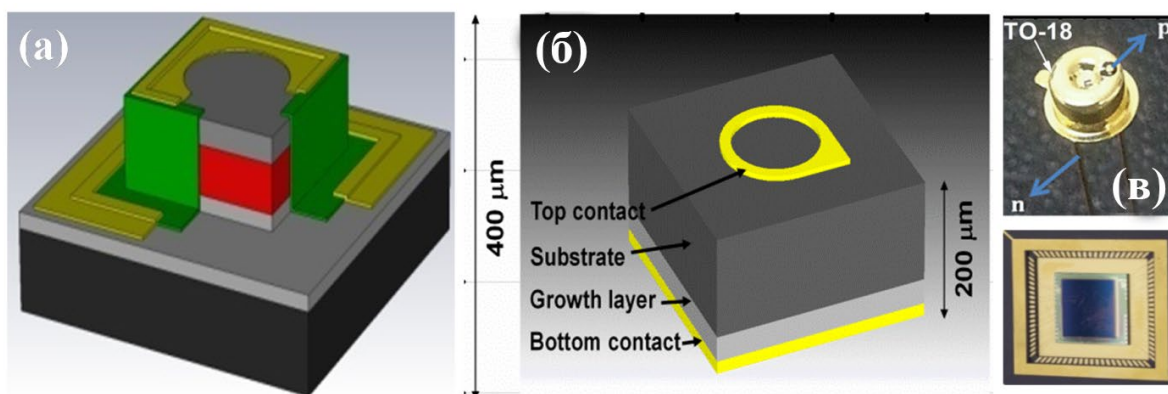


Рис. 3. (В цвете онлайн) (а) схематическое изображение одиночного фотодиода, (б) светодиодный прибор и (в) образец, установленный в стандартный корпус TO-18 и кристаллодержатель без выводов

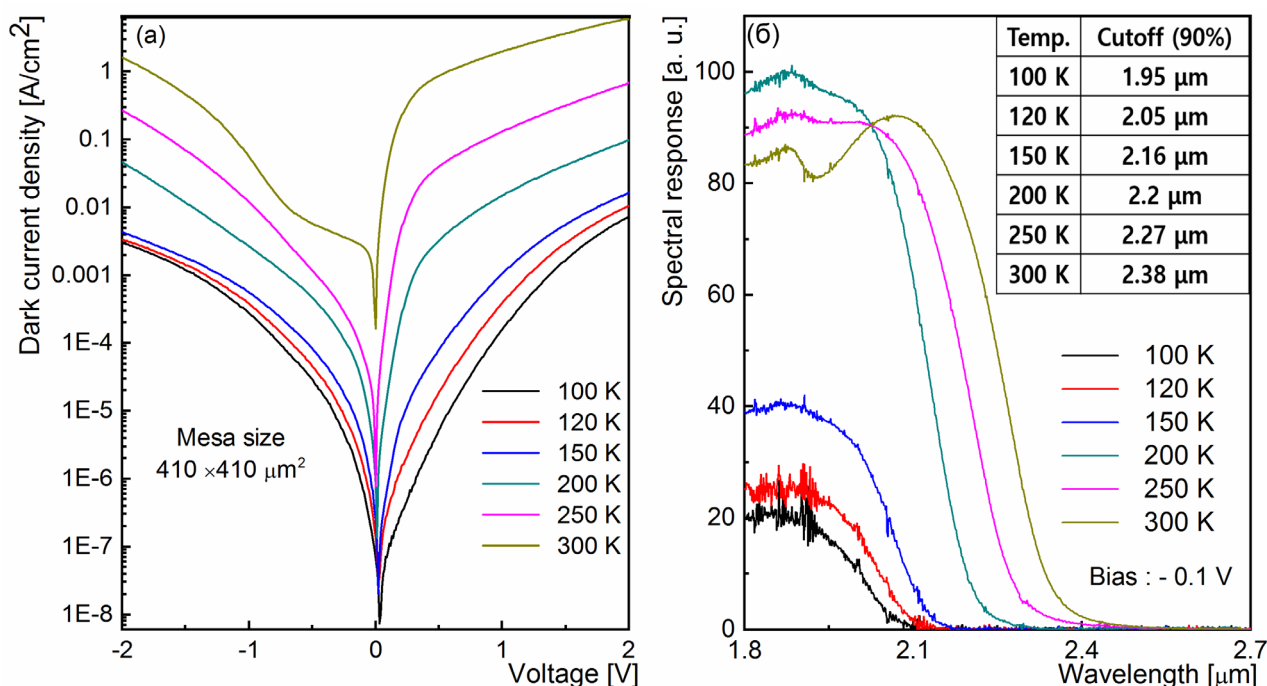


Рис. 4 (В цвете онлайн) (а) температура зависит от плотности темнового тока фотодетектора, (б) смещение спектрального отклика с 90 % границей спектральной чувствительности с 1.95 до 2.38 мкм при температуре 100–300 К

тктора свидетельствует о повышенной интенсивности и низком уровне шума при высокой температуре. Это явление объясняется тем, что кристаллодержатель блокирует действие барьерного слоя AlGaSb и выравнивает смещение валентной зоны. Таким образом, необходимо детальное изучение данного механизма с применением методов моделирования.

3.2. Характеристики светодиода

На рис. 5(а) показана зависимость тока от напряжения ($I-V$) светодиода при комнатной температуре, которая демонстрирует четкое выпрямляющее поведение при напряжении вклю-

чения около 0.35 В и экспоненциальное увеличение прямого тока при увеличении напряжения смещения вперед. Такое напряжение включения обеспечивает небольшое значение потенциала фотона в пределах активного слоя в условиях соответствующего тока инжекции (J_{ic}). Последовательное сопротивление R_s , измеренное по наклону кривой светодиодного прибора $I-V$ при комнатной температуре, составляет 12.3 Ом. Малое значение R_s подразумевает наличие хорошего омического контакта между GaSb и слоями металла. Тем не менее, это значение достаточно высоко по сравнению с коммерческим светодиодным прибором (~3-5 Ом), что обусловле-

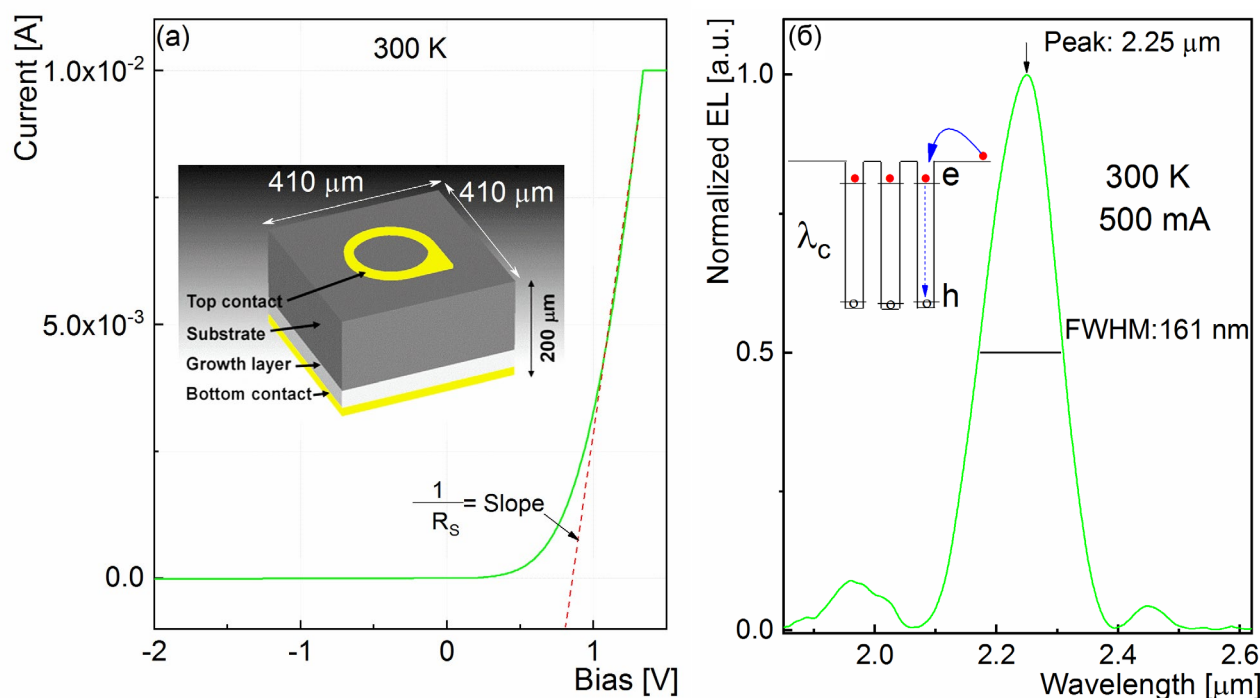


Рис. 5. (В цвете онлайн) (а) зависимость напряжения от тока, (б) спектральные характеристики электролюминесценции ИК светодиода, измеренные при температуре 300 К

но влиянием тока инжекции на эффективность выходной мощности светодиодного прибора.

На рис. 5(б) показана электролюминесценция (ЭЛ), характерная для ИК светодиода при комнатной температуре. Пик спектров ЭЛ наблюдается при 2.25 мкм, при этом полная ширина на уровне половинной амплитуды при токе инжекции 500 мА составляет 161 нм. Спектры ЭЛ представляют собой рекомбинацию электронно-дырочных пар первого квантованного уровня при переходе от зоны проводимости к валентной зоне квантовой ямы, как показано на вставленном рисунке на рис. 5(б). При 1.96 мкм и 2.45 мкм наблюдается два плечевых пика, что обусловлено тепловой генерацией при высоком токе инжекции светодиодного кристалла ($J_{ic} = 500$ мА). Как упоминалось в предыдущем абзаце, ток инжекции выше, чем у коммерческого светодиода (50 мА) благодаря большему последовательному сопротивлению. Этот параметр необходимо оптимизировать за счет обработки поверхности GaSb, оптимизации условий быстрого термического отжига и изменения металлических контактов для увеличения эффективности выходной мощности.

4. Заключение

Для создания инфракрасного фотодетектора и светодиода была выращена кристаллическая

решетка эпитаксиальных слоев InGaAsSb, соответствующая подложке GaSb. Посредством МЛЭ были синтезированы структурные приборы (nВп для фотодетектора и квантовая яма для светодиода). Для фотодетектора был получен спектральный отклик при 2.38 мкм при приложенном смещении 0.1 В, в то время как для светодиода наблюдался пик спектрального излучения при 2.25 мкм (полная ширина на уровне половинной амплитуды = 161 нм) при токе инжекции 500 мА и комнатной температуре. Полученные результаты позволяют использовать данные оптоэлектронные приборы в спектрометрах и недисперсионных инфракрасных газовых анализаторах.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта № 10052824 Корейского института развития промышленных технологий, финансируемого правительством Кореи (Министерство торговли, промышленности и энергетики) и Институтом теоретических и прикладных исследований (Университет Дуй Тан).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

References

1. Benoit J., Boulou M., Soulage G., Joullie A., Mani H. Performance evaluation of GaAlAsSb/GaInAsSb SAM-APDs for high bit rate transmissions in the 2.5 μm wavelength region. *Journal of Optical Communications*. 1988;9(2): 55. <https://doi.org/10.1515/joc.1988.9.2.55>
2. Carter B. L., Shaw E., Olesberg J. T., Chan W. K., Hasenberg T. C., Flatte M. E. High detectivity GaInAsSb pin infrared photodetector for blood glucose sensing. *Electronics Letters*. 2000;36(15): 1301–1303. <https://doi.org/10.1049/el:20000956>
3. Suchalkin S., Jung S., Kipshidze G., Shterengas L., Hosoda T., Westerfeld D., Snyder D., Belenky G. GaSb based light emitting diodes with strained InGaAsSb type I quantum well active regions. *Applied Physics Letters*. 2008;93(8): 081107. <https://doi.org/10.1063/1.2974795>
4. Gibson D., MacGregor C. A novel solid state non-dispersive infrared CO₂ gas sensor compatible with wireless and portable deployment. *Sensors*. 2013;13(6): 7079–7103. <https://doi.org/10.3390/s130607079>
5. Craig A. P., Jain M., Wicks G., Golding T., Hosain K., McEwan K., Howle C., Percy B., Marshall A. R. J. Short-wave infrared barrier detectors using InGaAsSb absorption material lattice matched to GaSb. *Applied Physics Letters*. 2015;106(20): 201103. <https://doi.org/10.1063/1.4921468>
6. Martyniuk P., Kopytko M., Rogalski A. Barrier infrared detectors. *Opto-Electronics Review*. 2014;22(2): 127–146. <https://doi.org/10.2478/s11772-014-0187-x>
7. Hoang A. M., Dehzingi A., Adhikary S., Razeghi M. High performance bias-selectable three-color short-wave/mid-wave/long-wave infrared photodetectors based on type-II InAs/GaSb/AlSb superlattices. *Scientific Reports*. 2016;6(1): 24144. <https://doi.org/10.1038/srep24144>
8. Scholz L., Perez A. O., Knobelspies S., Wöllenstein J., Palzer S. MID-IR LED-based, photoacoustic CO₂ sensor. *Procedia Engineering*. 2015;120: 1233–1236. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.837>
9. Refaat T. F., Abedin M. N., Koch G. J., Singh U. N. InGaAsSb detectors' characterization for CO₂ Lidar/DIAL applications. *NASA Langley Research Center; Hampton, VA, 23681-2199*. United States: 2003. p. 32.
10. Joullie A., Christol P. GaSb-based mid-infrared 2–5 μm laser diodes. *Comptes Rendus Physique*. 2003;4(6): 621–637. [https://doi.org/10.1016/s1631-0705\(03\)00098-7](https://doi.org/10.1016/s1631-0705(03)00098-7)
11. Cherng M. J., Jen H. R., Larsen C. A., Strigfellow G. B., Lundt H., Taylor P. C. MOVPE growth of GaInAsSb. *Journal of Crystal Growth*. 1986;77(1-3): 408–417. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(86\)90331-3](https://doi.org/10.1016/0022-0248(86)90331-3)
12. Gong X., Yang B., Ma Y., Gao F., Yu Y., Han W., Lui X., Xi J., Wang Z., Lin L. Liquid phase epitaxy growth and properties of GaInAsSb/AlGaAsSb/GaSb heterostructures. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1991;30(7R): 1343–1347. <https://doi.org/10.1143/jjap.30.1343>
13. Reddy M. H. M., Olesberg J. T., Cao C., Prineas J. P. MBE-grown high-efficiency GaInAsSb mid-infrared detectors operating under back illumination. *Semiconductor Science and Technology*. 2006;21(3): 267–272. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/3/009>
14. Kim J. O., Nguyen T. D., Ku Z., Urbas A., Kang S.-W., Lee S. J. Short wavelength infrared photodetector and light emitting diode based on InGaAsSb. *Infrared Technology and Applications XLIII*. 2017. <https://doi.org/10.1117/12.2264969>
15. Nguyen T. D., Hwang J., Kim Y., Kim E.-T., Kim J. O., Lee S. J. Dual-wavelength InGaAsSb/AlGaAsSb quantum-well light-emitting diodes. *Journal of the Korean Physical Society*. 2018;72(10): 1249–1253. <https://doi.org/10.3938/jkps.72.1249>
16. Nguyen T. D., Kim J. O., Kim Y. H., Kim E. T., Nguyen Q. L., Lee S. J. Dual-color short-wavelength infrared photodetector based on InGaAsSb/GaSb heterostructure. *AIP Advances*. 2018;8(2): 025015. <https://doi.org/10.1063/1.5020532>
17. Reddy M. H. M., Olesberg J. T., Cao C., Prineas J. P. MBE-grown high-efficiency GaInAsSb mid-infrared detectors operating under back illumination. *Semiconductor Science and Technology*. 2006;21(3): 267–272. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/3/009>

Информация об авторах

Тянь Дай Нгуен, к. ф.-м. н., (материаловедение), преподаватель/научный сотрудник, Институт теоретических и прикладных исследований, Университет Дуй Тан (Ханой, Вьетнам).

<https://orcid.org/0000-0002-9420-210X>

nguyentiendai@duytan.edu.vn

Ким Д. О., к. ф.-м. н., с. н. с., Институт современной контрольно-измерительной аппаратуры, Корейский научно-исследовательский институт стандартов и науки (Юсонг, Тэджон, Южная Корея). jokim@kriss.re.kr

Ли С. Д., к. ф.-м. н., гл. н. с., Корейский научно-исследовательский институт стандартов и науки, доцент, Университет науки и техники (Юсонг, Тэджон, Южная Корея).

sjlee@kriss.re.kr

Поступила в редакцию 24.01.2022; одобрена после рецензирования 04.03.2022; принята к публикации 15.03.2022; опубликована онлайн 25.06.2022.

Перевод на русский язык Чарычанской Ирины Всеволодовны