

Флип-чип светодиоды на основе InAs с буферными слоями из InGaAsSb

© Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев[†], М.А. Ременный,
Н.М. Стусь, В.В. Шустов, Н.Г. Тараканова *

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* ООО «Иоффе-ЛЕД»,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 19 декабря 2005 г. Принята к печати 30 декабря 2005 г.)

Исследованы электрические и оптические свойства эпитаксиальных слоев InGaAsSb с электронным типом проводимости, близких по составу к арсениду индия и согласованных с ним по периоду решетки, полученных на подложках InAs методом жидкофазной эпитаксии из расплавов, легированных теллуром. Слои прозрачны в области 3 мкм благодаря эффекту Мосса–Бурштейна. Приводятся и обсуждаются вагг-амперные и пространственные характеристики электролюминесценции светодиодов на основе InAs, изготовленных в конструкции типа флип-чип, в которых вывод излучения осуществляется через буферные слои n^+ -InGaAsSb.

PACS: 85.60.Jb, 78.40.Fy

1. Введение

Последнее десятилетие было отмечено существенным прогрессом в создании неохлаждаемых светодиодов и лазеров, работающих в средней инфракрасной области спектра (3–6 мкм), которые предполагается использовать для тестирования фотоприемных систем и для измерений пропускания среды с целью определения содержания в ней вредных для здоровья человека компонентов, например, окиси азота [1]. Для светодиодов наиболее успешные приборные реализации связаны с использованием прозрачных подложек, позволяющих как упростить конструкцию оптически возбуждаемых источников при обеспечении фотолюминесценции „на просвет“, так и реализовать конструкции типа флип-чип с электрической инжекцией носителей, например, при использовании сильно легированных подложек n^+ -InSb [2]. Было показано, что для приемников [3,4] и источников излучения с оптическим [5] или электрическим [4] возбуждением с рабочей длиной волны вблизи 3 мкм в качестве материала подложек можно использовать сильно легированный арсенид индия с концентрацией электронов $n > 10^{18} \text{ см}^{-3}$, обеспечивающей вырождение электронов в зоне проводимости и сдвиг края поглощения в коротковолновую сторону в соответствии с эффектом Мосса–Бурштейна. С другой стороны, в спецификациях на подложки из арсенида индия, предлагаемых подавляющим большинством производителей, не содержится данных о спектрах их прозрачности, что не позволяет сделать правильный выбор материала для изготовления и исследования диодов с выводом излучения через подложку в диапазоне длин волн 2.9–3.4 мкм. В этой связи актуальным является исследование прозрачности слоев твердых растворов, близких по периоду решетки к арсениду индия, которые

можно было бы использовать в качестве буферных слоев, расположенных между световыводящей поверхностью и активным слоем с рабочей длиной волны $\lambda = 2.9\text{--}3.4$ мкм. При большой толщине таких слоев, достаточной для обеспечения механической прочности гетероструктуры, непрозрачная подложка n -InAs может быть впоследствии удалена (в химическом травителе). Подобная гетероструктура с удаленной частью n -InAs по своим оптическим свойствам является аналогом структуры n^+ -InAs/ n -InAsSbP/ n -InAs/ p -InAsSbP, описанной ранее в ряде наших работ [3,4], и может рассматриваться как ее альтернатива при создании эффективных свето- и фотодиодов конструкции флип-чип.

В данной работе мы приводим результаты исследований оптических и электрофизических свойств эпитаксиального твердого раствора InGaAsSb, выращенного на подложках n -InAs и легированного теллуром в широком диапазоне концентраций, и светодиодов (СД) конструкции флип-чип с прозрачными буферными слоями из InGaAsSb(Te) с рабочей длиной волны 3.4 мкм.

2. Описание эксперимента

Эпитаксиальные структуры выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложках InAs (111) p - и n -типа проводимости толщиной 350 мкм. Слои $\text{In}_{0.936}\text{Ga}_{0.064}\text{As}_{0.937}\text{Sb}_{0.063}$ имели толщину 30–40 мкм и характеризовались низкой плотностью наклонных дислокаций ($N < 10^5 \text{ см}^{-2}$), что соответствовало нашему ожиданию близости периодов решетки слоя и подложки. Для проведения измерений по методу Холла выращивались образцы–спутники на подложках p -типа проводимости, при этом образцы–спутники представляли собой прямоугольники длиной 10 и шириной 5 мм с шестью вплавленными точечными контактами. Проводимость и постоянная Холла измерялись при температурах $T = 77$

[†] E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

и 300 К, токе через образец 10 мА и напряженности магнитного поля 5 кЭ. Расчеты были проведены в предположении незначительности тока, протекающего через *p*-подложку, в рамках однослойной модели [6]. Оценки, проведенные в рамках двухслойной модели [6], показали, что расхождение в вычисляемых величинах для двух указанных случаев не превышает 4%.

Спектры фотолюминесценции при 77 К измерялись в геометрии „на отражение“ при возбуждении с помощью матрицы лазеров из арсенида галлия (ЛПИ-14, $\lambda = 0.8$ мкм, мощность в импульсе $P \approx 50$ Вт), фотосигнал регистрировался охлаждаемым фотодиодом из InSb. Спектры пропускания измерялись при комнатной температуре с помощью охлаждаемого фотодиода из HgCdTe.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость концентрации свободных электронов в InGaAsSb(Te) и их подвижности от концентрации теллура в жидкой фазе (расплаве) для образцов одной серии экспериментов. Как видно из рис. 1, увеличение концентрации Te с $2.7 \cdot 10^{-5}$ до $18 \cdot 10^{-5}$ ат% сопровождается ростом концентрации доноров с $7.8 \cdot 10^{17}$ до $4.8 \cdot 10^{18}$ см⁻³ при одновременном снижении подвижности носителей заряда с 9500 до 1820 см²/В·с (при 300 К). По нашим оценкам, выполненным по упрощенной модели [7] в предположении о полной ионизации примесей при 77 и 300 К, преобладали рассеяния на ионизованных примесях при 77 К и с использованием расчетного значения подвижности при 77 К из работы [4], одновременно с возрастанием в эпитаксиальных слоях концентрации электронов несколько увеличивалась концентрация акцепторов N_a и ионизованных примесей N_I . При этом степень компенсации уменьшалась: например, с 0.16 до 0.09 при типичных значениях параметров, если концентрация доноров изменяется от $N_d = 7.8 \cdot 10^{17}$ см⁻³ ($N_a = 1 \cdot 10^{17}$ см⁻³)

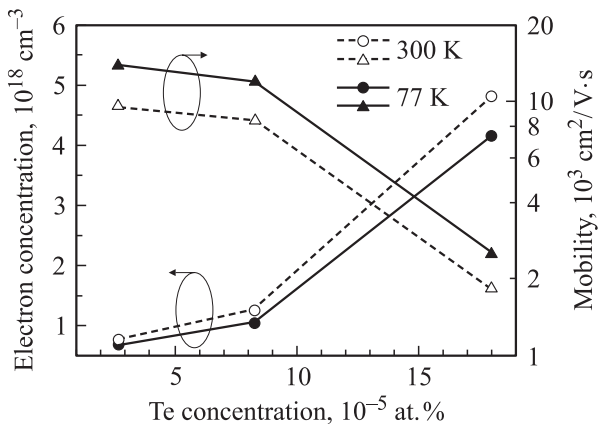


Рис. 1. Зависимость подвижности и концентрации носителей заряда в эпитаксиальных слоях InGaAsSb(Te) от концентрации Te в жидкой фазе.

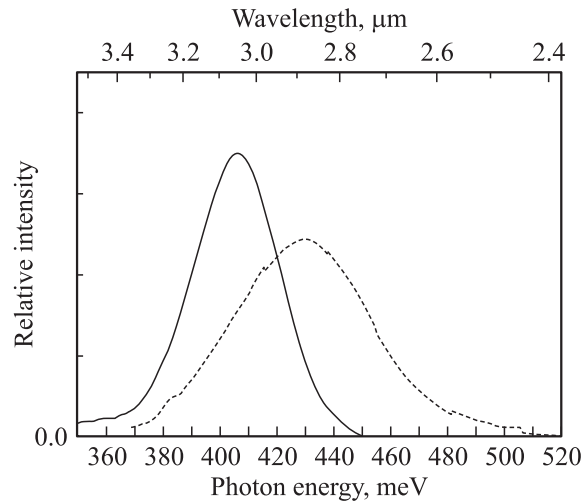


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции слоев InGaAsSb(Te) с концентрацией электронов $n = 7.8 \cdot 10^{17}$ см⁻³ (штриховая линия) и $1 \cdot 10^{17}$ см⁻³ (сплошная). $T = 77$ К.

до $N_d = 4.8 \cdot 10^{18}$ см⁻³ ($N_a = 4 \cdot 10^{17}$ см⁻³). В соответствии с данными [8] достигнутое увеличение концентрации электронов (до $n \approx 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³) обеспечивает подъем уровня Ферми $\Delta E \approx 90$ мэВ, в связи с чем можно ожидать соответствующий сдвиг края поглощения пропускания в коротковолновую область спектра благодаря эффекту Мосса-Бурштейна. Действительно, максимум спектра фотолюминесценции при 77 К (рис. 2) сильно легированного образца ($n = 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³, $h\nu_{\max} = 435$ мэВ) сдвинут в коротковолновую область по сравнению с максимумом спектра нелегированного образца ($n = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $h\nu_{\max} = 410$ мэВ), что соответствует подъему уровня Ферми на 50 мэВ выше дна зоны проводимости. Другим характерным признаком высокой степени вырождения электронов является большая ширина спектра фотолюминесценции сильно легированного образца, достигающая в данном случае значения 52 мэВ, исходя из которого с учетом экспериментальных данных работы [8] можно заключить, что концентрация составляет $n \approx 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Последнее значение удовлетворительно согласуется с нашими данными, полученными из электрических измерений ($n = 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³). Для сравнения на рис. 2 приведен также спектр фотолюминесценции образца с концентрацией электронов $1 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Приведенные данные по фотолюминесценции и вывод о подъеме уровня Ферми в зоне проводимости в сильно легированных образцах дополняются спектральными зависимостями пропускания (см. рис. 3), измеренными на ряде слоев InGaAsSb (с удаленной подложкой InAs) с параметрами, приведенными в таблице. Из рис. 3 и таблицы видно, что с увеличением концентрации электронов слои становятся прозрачными для коротковолнового излучения с энергиями 338–479 мэВ, поглощаемого нелегированным арсенидом индия. Отметим падение

Параметры слоев InGaAsSb

Номер образца	Концентрация Te в расплаве, ат%	Толщина слоя, мкм	Энергия фотона для пропускания 50%, мэВ	Энергия уровня Ферми, мэВ (77 К)	Концентрация электронов, см ⁻³
746(5)	0	20	338	429	$1 \cdot 10^{17}$
746(4)	$8.7 \cdot 10^{-5}$	14	397	479	$5 \cdot 10^{17}$
746(2)	$15.1 \cdot 10^{-5}$	20	413	495	$9 \cdot 10^{17}$
745(4)	$24.4 \cdot 10^{-5}$	14	479	561	$2.5 \cdot 10^{18}$

пропускания в длинноволновой части спектра, возрастающее с длиной волны и связанное с поглощением на свободных носителях, хорошо проявляющееся и в спектрах объемного арсенида индия [4].

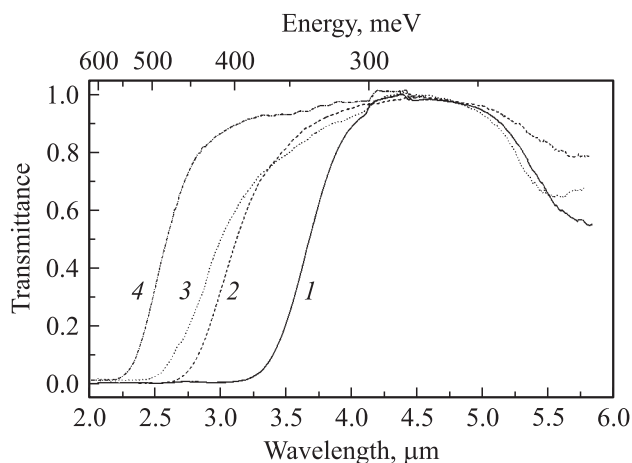


Рис. 3. Спектры прозрачности слоев InGaAsSb(Te) толщиной ~ 30 мкм. Концентрация электронов n , см⁻³: 1 — 10^{17} , 2 — $5 \cdot 10^{17}$, 3 — $9 \cdot 10^{17}$, 4 — $2.5 \cdot 10^{18}$. $T = 300$ К.

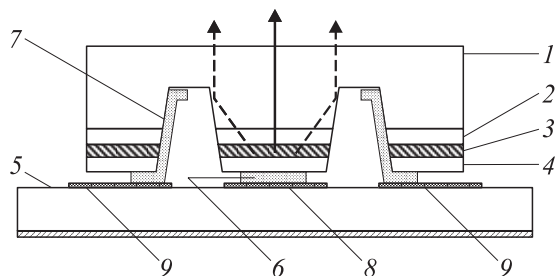


Рис. 4. Схема (разрез) флип-чип диода, смонтированного на кремниевом носителе: 1 — буферный слой n^+ -InGaAsSb, 2 — слой n -InAsSbP, 3 — слой n -InAs, 4 — слой p -InAsSbP, 5 — носитель из Si, 6 — анодный контакт, 7 — U-образный катодный контакт, 8, 9 — контактные площадки с нанесенным покрытием из Sn + Pb.

Полученные нами данные по оптическому пропусканию сильно легированных слоев n -InGaAsSb(Te) были использованы при создании светодиодов, излучающих на длине волны 3.3 мкм. Структуры для таких светодиодов создавались последовательным наращиванием „буферного“ слоя n -InGaAsSb(Te), прозрачного

для излучения вблизи 3.3 мкм, имеющего толщину 30–40 мкм, ограничительного нелегированного широкозонного слоя n -InAsSbP толщиной 2–3 мкм, активного слоя из нелегированного арсенида индия n -типа проводимости толщиной 2–3 мкм и контактного широкозонного слоя p -InAsSbP(Zn) толщиной 4–5 мкм. Для получения конструкций типа флип-чип с круглыми мезами диаметром 300 мкм использовалась стандартная „мокрая“ фотолитография. Круглые анодные (диаметр $D_a = 150, 240$ мкм) и U-образные катодные контакты (см. рис. 4) наносились напылением в вакууме с последующим „упрочнением“ при электрохимическом осаждении золота. По окончании процессов фотолитографии подложка n -InAs стравливалась в химическом травителе; полученная пластина толщиной 40–45 мкм раскалывалась на отдельные чипы размерами 0.8×1.0 мм, которые паялись, как показано на рис. 4, на кремниевые носители с контактными площадками, аналогичными описанным в [3]. Смонтированные на кремниевых подложках чипы паялись на корпуса TO-18.

На рис. 5 представлен спектр электролюминесценции светодиода, в котором видны характерные моды резонатора Фабри–Перо, аналогичные наблюдавшимся ранее в диодах на основе арсенида индия с удаленной

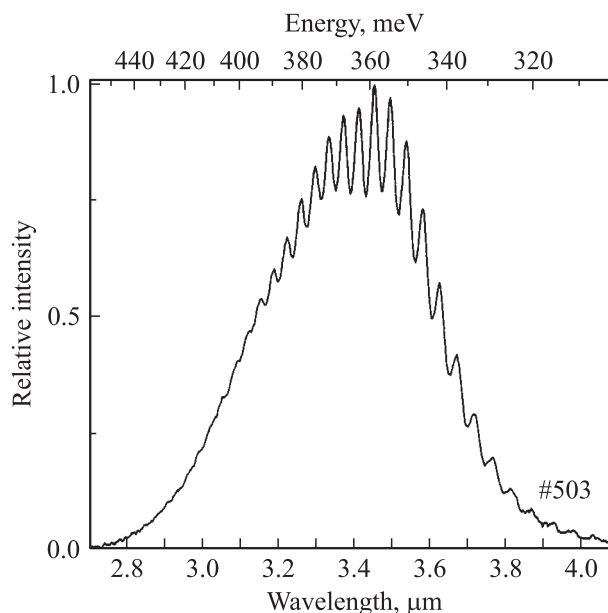


Рис. 5. Спектр электролюминесценции светодиода при комнатной температуре и токе 1 А.

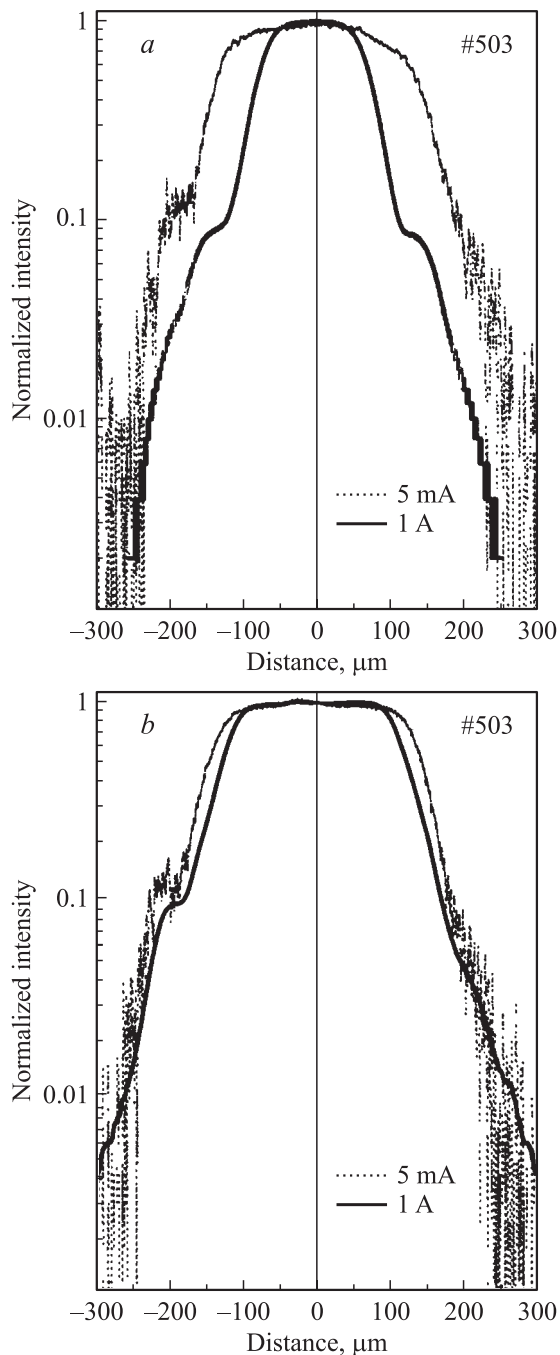


Рис. 6. Распределение интенсивности электролюминесценции вблизи от излучающей поверхности (картина „ближнего поля“) в светодиодах с диаметром анода 150 мкм (*a*) и 240 мкм (*b*) при токах 5 мА (точечная линия) и 1 А (сплошная толстая линия).

подложкой [9] и соответствующие толщине структуры L (межмодовое расстояние $\Delta\lambda = \lambda^2/2nL$, $n = 3.52$ — показатель преломления). Наличие таких мод свидетельствует о высокой планарности структуры с буферным слоем n^+ -InGaAsSb. Другой вывод, который можно сделать из факта существования вертикальных мод, — это высокий коэффициент отражения от анода, составляющий, по

оценкам [9], не менее 0.9. В нашем случае диаметр анода меньше диаметра мезы, а расстояние от активной области диода (от p - n -перехода) до анода не превышает нескольких микрометров, поэтому можно ожидать, что яркость локальных областей, сопряженных с анодом, будет выше, чем областей, удаленных от анода, в соответствии с ожидаемым увеличением выхода излучения из кристалла из-за отражений от анода [10]. Действительно, распределение интенсивности вблизи от излучающей поверхности (картина „ближнего поля“) имеет ярко выраженное плато в областях над анодом, как показано на рис. 6. Вместе с тем высокую яркость „анодных“ областей не следует связывать только лишь с отражением от контакта, поскольку имеет место существенная зависимость картины ближнего поля от тока через диод: широкое поле свечения при малых токах сужается при увеличении тока, что особенно зримо проявляется в образце с малым диаметром анода (150 мкм). По аналогии с данными наших более ранних работ (см., например, [11]) и многочисленными исследованиями, выполненными на диодах в ближнем инфракрасном диапазоне [12], будем полагать, что причина изменения картины ближнего поля состоит в сгущении линий тока вблизи анода при увеличении тока. Отметим, что в распределении ближнего поля имеются „плечи“, соответствующие отражению излучения от стенок мезы в направлении световыводящей поверхности, как показано штриховыми стрелками на рис. 4.

Характерной чертой длинноволновых светодиодов ($\lambda > 3$ мкм), в том числе на основе InAs, является

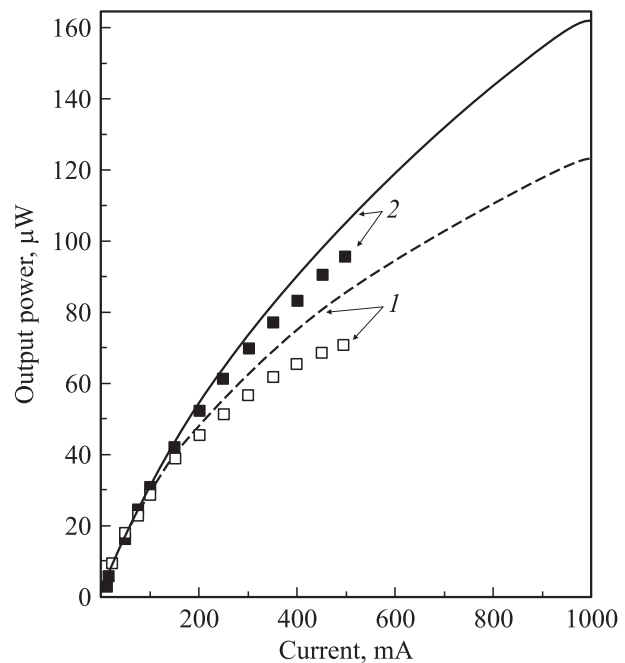


Рис. 7. Мощность излучения светодиодов на основе InAs с диаметром мезы 300 мкм и диаметрами контактов 150 мкм (1) и 240 мкм (2) при импульсном (линии) и постоянном (точки) питании. $T = 300$ К.

сублинейность ватт-амперной характеристики, связанная в основном с особенностями рекомбинационных процессов в активной области, главным образом с ожереккомбинацией. Последняя усиливается с ростом плотности тока, поэтому можно ожидать, что в образцах с меньшей площадью контакта сублинейность ватт-амперной характеристики будет проявляться сильнее, а интегральная мощность будет меньше, чем в образцах с широким контактом. Сказанное иллюстрирует рис. 7, из которого видно, что при токе 1 А выходные импульсные мощности составляют 124 и 162 мкВт для светодиодов с диаметром анода 150 и 240 мкм соответственно. Большая площадь контакта оказывается более выгодной и при работе светодиода в непрерывном режиме, что видно из заметного отклонения „непрерывной“ мощности от „импульсной“ для светодиода с диаметром анода 150 мкм и связано, очевидно, с разогревом в области протекания тока, и гораздо меньшего отклонения при $D_a = 240$ мкм. Понятно, что в светодиоде с большим контактом тепло отводится более эффективно, чем в светодиоде с малым анодом, и различия между непрерывным и импульсным режимом стираются. Отметим, что равенство мощности в непрерывном и импульсном режимах сохраняется вплоть до токов 200 мА, что является показателем эффективного теплоотвода в наших светодиодах. Вместе с тем описанные конструкции светодиодов не являются оптимальными и их эффективность может быть повышена, например, за счет углубления мезы и (или) создания антиотражающего рельефа на поверхности [13], что будет являться предметом наших дальнейших исследований.

4. Заключение

В работе проанализированы оптическое пропускание и люминесцентные свойства эпитаксиальных слоев n^+ -InGaAsSb с различной степенью легирования донорной примесью Те и получены образцы с концентрацией носителей до $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $2 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, прозрачные для излучения в диапазоне 3–3.3 мкм благодаря эффекту Мосса–Бурштейна. Указанные слои были использованы в качестве буферных в светодиодах с выводом излучения в направлении от анода (конструкции типа флип-чип), имевших мощность излучения 160 мкВт при импульсном токе 1 А и 100 мкВт в непрерывном режиме при токе 500 мА. Показано сужение площади свечения при увеличении тока через светодиод, связанное с локализацией тока в областях, примыкающих к аноду.

Работа частично поддержана Фондом содействия развитию МП НТС РФ (№ 3828р/5982 и 06-2-Н4.2-0201).

Двое из авторов (Н.В. Зотова и М.А. Ременный) выражают благодарность Совету по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ Российской Федерации

за поддержку проекта № МК-1804.2005.02, а также Конкурсному центру фундаментального естествознания за поддержку проекта № PD06-2.0-225.

Список литературы

- [1] J.G. Crowder, T. Ashley, C.T. Elliott, G.J. Pryce, A.D. Johnson. *Electron. Lett.*, **36**, 1867 (2000).
- [2] T. Ashley, D.T. Dutton, C.T. Elliott, N.T. Gordon, T.J. Phillips. *Proc. SPIE*, **3289**, 43 (1998).
- [3] B.A. Matveev, M. Aydaraliev, N.V. Zotova, S.A. Karandashov, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *Proc. SPIE*, **4650** (Photodetector Mater. and Dev. VII) 173 (2002).
- [4] B.A. Matveev, M. Aydaraliev, N.V. Zotova, S.A. Karandashov, N.D. Il'inskaya, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin. *IEE Proc. Optoelectron.*, **150**, 356 (2003).
- [5] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин, В.В. Шустов, ФТП, **35**, 371 (2001).
- [6] R.L. Petritz. *Phys. Rev.*, **100**, 1254 (1958).
- [7] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **27**, 421 (1993).
- [8] О. Аллаберенов, Н.В. Зотова, Д.Н. Наследов, Л.Д. Неуймина. ФТП, **4**, 1939 (1970).
- [9] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, В.В. Шустов. ФТП, **38**, 1270 (2004).
- [10] H. Benistry, H. De Neve, C. Weibuch. *IEEE J. Quant. Electron.*, **34**, 1612 (1998).
- [11] V.K. Malyutenko, O.Yu. Malyutenko, A.D. Podoltsev, I.N. Kucheryavaya, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus'. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 4228 (2001).
- [12] Ж.И. Алфёров, А.Т. Гореленок, И.Г. Груздов, А.Г. Джигасов, Н.Д. Ильинская, И.С. Тарасов, А.С. Усиков. *Письма ЖТФ*, **8** (5), 257 (1982).
- [13] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь. ФТП, **40** (6), 717 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

InAs flip-chip LEDs with InGaAsSb buffer layers

N.V. Zotova, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', V.V. Shustov, N.G. Tarakanova *

loffe Physicotechnical Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
* „Ioffe-LED“ Ltd.,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract We present electrical and optical properties of heavily doped n^+ -InGaAsSb(Te) layers grown from Te containing melts by the LPE method, that are transparent for the radiation in the 3 μm region due to Moss-Burstein effect. Described also are I–V and L–I characteristics as well the near-field measurements in the InAs-based flip-chip LEDs with radiation extraction through n^+ -InGaAsSb(Te) buffer layers.