

Двухчастотный GaAs/InGaP лазерный диод с квантовой ямой GaAsSb

© Н.В. Дикарева¹, Б.Н. Звонков¹, О.В. Вихрова¹, С.М. Некоркин¹, В.Я. Алешкин^{1,2}, А.А. Дубинов^{1,2}

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

² Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: dnat@ro.ru

(Получена 14 марта 2017 г. Принята к печати 20 марта 2017 г.)

Представлены результаты исследования GaAsSb/GaAs/InGaP лазерной структуры, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии. Получена устойчивая двухполосная генерация, обусловленная прямыми и непрямыми в пространстве оптическими переходами. Наблюдение суммарной частоты продемонстрировало эффективное внутрирезонаторное смешение мод в полупроводниковых лазерах такого типа.

DOI: 10.21883/FTP.2017.10.45022.8580

1. Введение

В настоящее время перспективным подходом для расширения спектрального диапазона лазерной генерации GaAs-структур является использование вместо соединения $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в качестве квантово-размерного слоя активной области полупроводниковых лазеров твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. Новая система позволяет создавать излучающие оптоэлектронные приборы, работающие вблизи 1.3 мкм, что соответствует второму окну прозрачности оптического волокна. Данный диапазон может быть достигнут при содержании сурьмы в составе материала $\sim 35\%$, поскольку в таком случае большая часть разрыва энергетических зон приходится на валентную зону [1]. Однако существуют и определенные сложности в создании таких структур. В частности, в качестве причин, осложняющих их создание, указывают на различие периодов кристаллических решеток GaAs и GaSb, которое составляет 7.8% [1], и существование зоны несмешиваемости для твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ с молярной долей сурьмы x примерно от 0.25 до 0.7 [2]. В работе [3] было отмечено, что понижение температуры роста слоя GaAsSb увеличивает долю встраиваемой сурьмы, однако сообщений о создании лазерных диодов с такой активной областью обнаружено очень мало [4,5]. Главным препятствием для создания эффективно работающих при комнатных температурах полупроводниковых лазеров с квантовой ямой GaAsSb в активной области является высокая температура роста низкодефектных широкозонных слоев (InGaP, AlGaAs, GaAsP), выполняющих как роль эмиттеров, так и роль слоев, обеспечивающих оптическое ограничение волноводной моды лазера. Повышенные температуры роста могут приводить к существенной сегрегации сурьмы из квантовой ямы. Поэтому представляют интерес исследования излучательных свойств квантовых ям GaAsSb в составе активной области лазерного диода.

В настоящей работе представлены результаты подробных экспериментальных исследований лазерной

GaAs/InGaP-гетероструктуры с активной областью на основе GaAsSb, генерирующей в области 1 мкм, и изучаются особенности генерации в таких лазерах.

2. Методика эксперимента

Исследуемая лазерная структура была выращена на подложке n -GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии в горизонтальном кварцевом реакторе при атмосферном давлении и содержала следующие эпитаксиальные слои: n -InGaP (610 нм), i -GaAs (510 нм), GaAsSb (10 нм), i -GaAs (490 нм), p -InGaP (570 нм), p^{++} -GaAs (270 нм). В качестве источника Sb использовалась триметилсурьма. Квантовая яма GaAsSb толщиной 10 нм формировалась при 580°C. Отношение элементов V/III групп при этом было ≈ 1.3 , отношение потоков триметилгаллия/арсин ≈ 0.95 .

Оптическое качество структур исследовалось методом спектроскопии фотолюминесценции при температуре 300 К. Излучение возбуждалось He–Ne (632.5 нм) лазером мощностью 30 мВт. Анализировались спектры фотолюминесценции активной области структур.

На основе выращенной гетероструктуры были изготовлены лазерные диоды с шириной активной области 100 мкм, сформированной путем химического травления контактного слоя вне активной полоски с последующей протонной имплантацией вскрытой поверхности InGaP. Металлические омические контакты наносились на GaAs-подложку и на контактный слой p^{++} -GaAs методом термического испарения в вакууме. Зеркалами служили сколотые грани структуры. Длина резонатора исследуемых лазеров составляла 1 мм. Спектральные зависимости излучения лазера с квантово-размерной областью GaAsSb измерялись с помощью решеточного монохроматора МДР-23 при комнатной температуре в импульсном режиме накачки (360 нс, 1.5 кГц). Измерения мощности излучения лазерных диодов проводились с помощью лабораторного комплекса Lab Max Top

(Coherent). Поляризационные измерения проводились с помощью призмы Глана–Тейлора.

3. Экспериментальные результаты

Спектры фотолюминесценции, электролюминесценции в допороговом режиме и стимулированного излучения исследуемой структуры вблизи порога представлены на рис. 1. Видно, что спектр фотолюминесценции имеет максимум с длиной волны 1.12 мкм. Этот переход соответствует непрямому в пространстве переходу электрона, при котором начальное состояние электрона находится в GaAs около гетероперехода II рода GaAs/GaAsSb, а конечное состояние в квантовой яме GaAsSb. Отметим, что из-за разделения электронов и дырок на таком переходе возникает электрическое поле, образующее квантовую яму для электронов.

Спектры электролюминесценции также содержат особенности на длине волны 1.12 мкм. С ростом тока возбуждения линия электролюминесценции расширяется в область более коротких длин волн. Это расширение связано с заполнением подзон размерного квантования. Из сравнения спектров люминесценции и стимулированного излучения вблизи порога видно, что стимулированное излучение соответствует переходам из возбужденных электронных состояний. Причина этого состоит в том, что для таких состояний больше коэффициент усиления за счет большего перекрытия волновых функций электронов и дырок, а также увеличения плотности состояний (вклада более низких подзон).

Спектральные характеристики стимулированного излучения, снятые при комнатной температуре, приведены на рис. 2. При токе накачки 9 А наблюдалась лазерная генерация на одной частотной полосе — длина волны излучения 1.054 мкм. Порог однополосной генерации был зафиксирован при значении тока 5 А. С увеличением

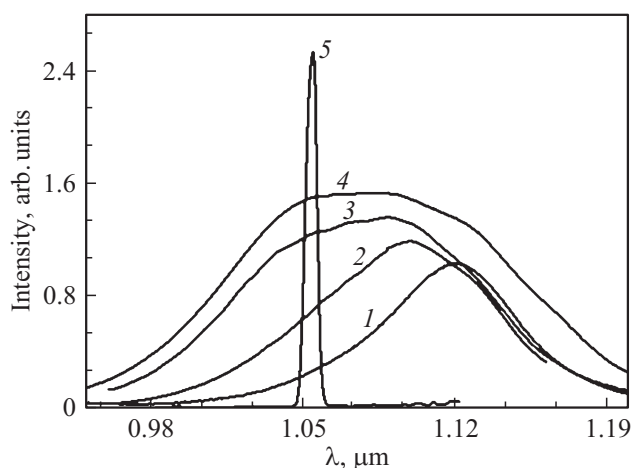


Рис. 1. Спектральные зависимости фотолюминесценции (1), электролюминесценции (2–4) и стимулированного излучения (5) лазерной гетероструктуры GaAsSb/GaAs/InGaP при 300 К. Токи возбуждения, А: 2 — 0.5, 3 — 2, 4 — 4.5, 5 — 9.

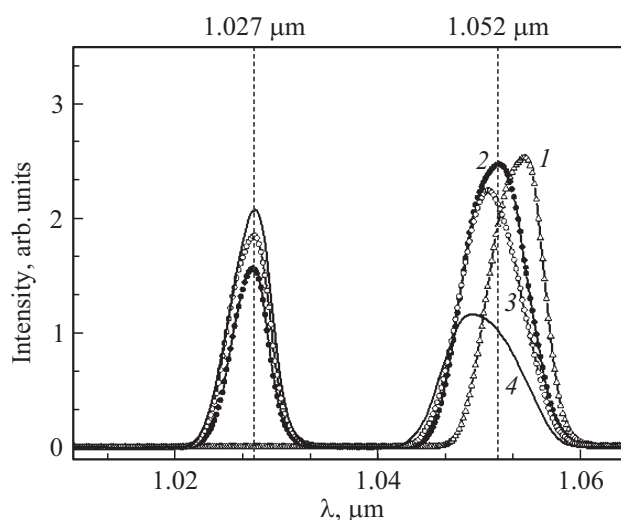


Рис. 2. Спектры генерации GaAsSb/GaAs/InGaP полупроводникового лазера при 300 К. Токи импульсной накачки, А: 1 — 9, 2 — 14, 3 — 15, 4 — 17.

тока накачки до 11 А начиналась генерация второй полосы излучения (длина волны 1.027 мкм). В малом диапазоне тока накачки от 11 до 12 А интенсивности линий генерации возрастают. Увеличение тока накачки более 12 А приводило к дальнейшему росту интенсивности коротковолновой линии и одновременному уменьшению интенсивности длинноволновой линии, при этом с увеличением тока накачки максимум длинноволновой линии генерации смещался в коротковолновую область. Такое смещение наблюдалось как при однополосном, так и при двухполосном режиме генерации. При этом длина волны максимума коротковолновой полосы генерации не изменялась. Наблюдалось уширение длинноволновой полосы генерации (от 6 до 8.8 нм) в широком диапазоне накачки, при этом ширина коротковолновой полосы генерации не изменялась и составляла 3.5 нм.

Наблюдаемые эффекты можно объяснить, если предположить, что коротковолновая линия генерации обусловлена прямым переходом в слое GaAsSb. Смещение длинноволновой линии с ростом тока возбуждения можно объяснить изменением положения уровней размерного квантования электронов в GaAs, возникающих за счет электрических полей, появляющихся в результате разделения электронов и дырок на гетеропереходе II рода. Аналогичное смещение линии фотолюминесценции многократно наблюдалось при изменении мощности возбуждения в квантовых ямах с гетеропереходом II рода [6].

Диаграммы направленности излучения, представленные на рис. 3, а, б, имеют однолепестковый вид с угловым положением 0°, что свидетельствует о том, что генерация в двух частотных полосах осуществляется на основной волноводной моде. Ширина пиков на полувысоте максимумов в плоскости, перпендикулярной *p-n*-переходу, составила 29 угл.град., а в плоскости перехода 9 и 12 угл.град. соответственно. Суммарная

мощность излучения при условии одновременной генерации в двух частотных полосах составила 1 Вт.

Двухчастотные лазеры на основе GaAs, обладающего квадратичной решеточной нелинейностью, представляют интерес для генерации суммарной и разностной частот путем нелинейных преобразований [7–9]. В связи с этим, с целью исследования эффективности смешения мод были проведены исследования нелинейного внутрирезонаторного взаимодействия полей полупроводникового GaAsSb/GaAs/InGaP-лазера, генерирующего на прямых и не прямых оптических переходах в двух частотных полосах при комнатной температуре. Спектральные максимумы вторых гармоник и суммарной частоты представлены на рис. 4. Внутрирезонаторное взаимодействие мод, связанное с квадратичной нелинейностью решетки GaAs, было достаточно сильным, наблюдалось уже при достаточно малом 5 А импульсном токе и проявлялось в широких пределах накачки. Поляризационные измерения показали, что вектор электрического поля вторых гармоник и суммарной частоты перпен-

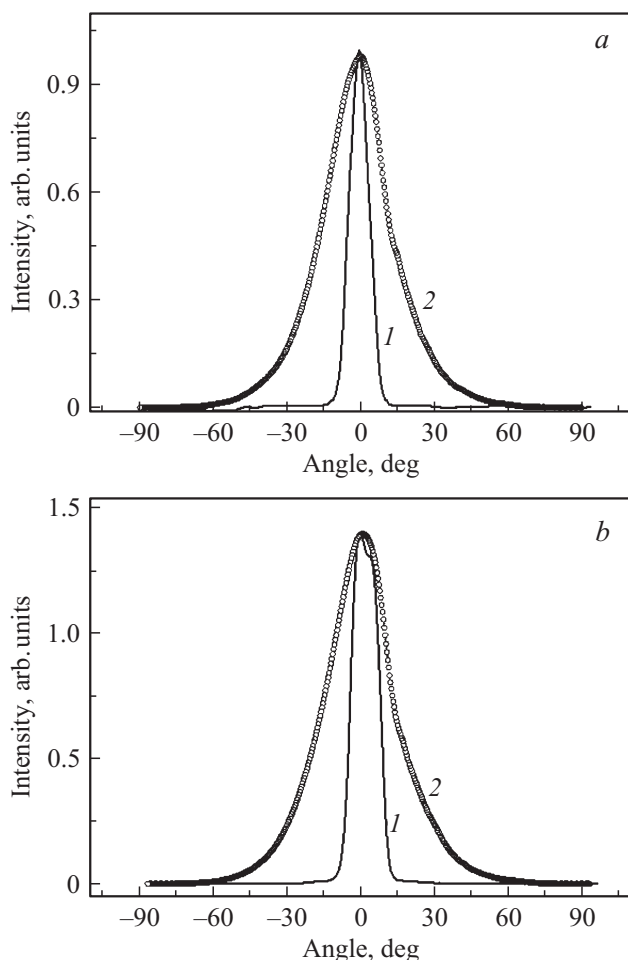


Рис. 3. Диаграммы направленности излучения GaAsSb/GaAs/InGaP полупроводникового лазера при 300 К в плоскости, параллельной (кривая 1) и перпендикулярной (кривая 2) p - n -переходу на длинах волн 1027 нм (а) и 1054 нм (b).

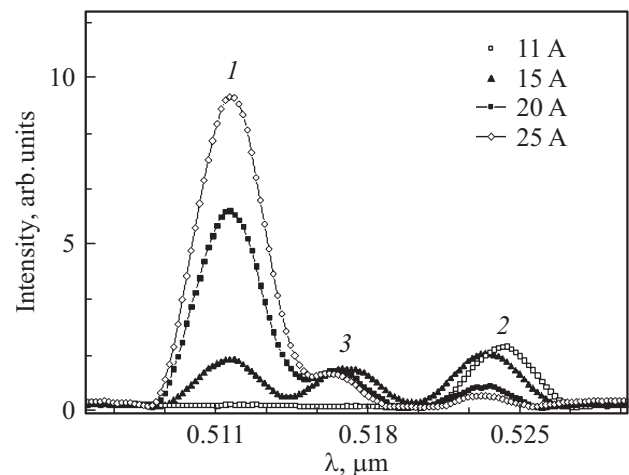


Рис. 4. Зависимость спектральных характеристик вторых гармоник и суммарной частоты при 300 К при разных тока импульсной накачки.

дикулярна плоскости квантовых ям, что соответствует ТМ-моду. Наблюдения генерации суммарной частоты указывают на одновременную генерацию обеих линий лазерного излучения и на их эффективное нелинейное взаимодействие, обусловленное большим перекрытием мод, поскольку они являются основными, что видно из диаграмм направленности.

4. Заключение

Таким образом, лазерные GaAs/InGaP-гетероструктуры с активной областью на основе GaAs_{1-x}Sb_x перспективны для обогащения спектра благодаря преобразованиям лазерного излучения за счет квадратичной решеточной нелинейности GaAs и наличию двухполосной генерации на прямых и не прямых оптических переходах при эволюции зонной диаграммы от I ко II типу гетероперехода с изменением доли сурьмы в твердом растворе GaAs_{1-x}Sb_x. В работе продемонстрирована возможность создания лазера, одновременно генерирующего две линии вблизи длины волны 1 мкм, одна из которых перестраивается изменением тока возбуждения.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики № СП-109.2016.

Список литературы

- [1] I. Vurgaftmana, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys., **89** (11), 5815 (2001).
- [2] J.R. Pesetto, G.B. Stringfellow. J. Cryst. Growth, **62** (1), 1 (1983).

- [3] С.В. Морозов, Д.И. Крыжков, В.И. Гавриленко, А.Н. Яблонский, Д.И. Курицын, Д.М. Гапонова, Ю.Г. Садофьев, Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова. ФТП, **46** (11), 1402 (2012).
- [4] K. Hild, S.J. Sweeney, S. Wright, D.A. Lock, S.R. Jin, I.P. Marco, S.R. Johnson, S.A. Chaparro, S.Q. Yu, Y.H. Zhang. Appl. Phys. Lett., **89**, 173509 (2006).
- [5] А.Н. Яблонский, С.В. Морозов, Д.М. Гапонова, В.Я. Алешкин, В.Г. Шенгуров, Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Н.В. Байдусь, З.Ф. Красильник. ФТП, **50** (11), 1455 (2016).
- [6] N.N. Ledentsov, J. Böhrer, M. Beer, F. Heinrichsdorff, M. Grundmann, D. Bimberg, S.V. Ivanov, B.Ya. Meltser, S.V. Shaposhnikov, I.N. Yassievich, N.N. Faleev, P.S. Kor'ev, Zh.I. Alferov. Phys. Rev. B, **52**, 14058 (1995).
- [7] А.А. Афоненко, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов. ФТП, **38** (2), 244 (2004).
- [8] S.M. Nekorkin, A.A. Biryukov, P.B. Demina, N.N. Semenov, B.N. Zvonkov, V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, V.I. Gavrilenko, K.V. Maremyanin, S.V. Morozov, A.A. Belyanin, V.V. Kocharovsky, V.I.V. Kocharovsky. Appl. Phys. Lett., **90**, 171106 (2007).
- [9] B.N. Zvonkov, A.A. Biryukov, A.V. Ershov, S.M. Nekorkin, V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, A.A. Dubinov, K.V. Maremyanin, S.V. Morozov, A.A. Belyanin, V.V. Kocharovsky, V.I.V. Kocharovsky. Appl. Phys. Lett., **92**, 021122 (2008).

Редактор Г.А. Оганесян

The dual-frequency GaAs/InGaP laser diode with GaAsSb quantum well

N.V. Dikareva¹, B.N. Zvonkov¹, O.V. Vikhrova¹,
S.M. Nekorkin¹, V.Ya. Aleshkin^{1,2}, A.A. Dubinov^{1,2}

¹ Physicotechnical Research Institute,
Nizhny Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

² Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The study results of the grown by MOCVD GaAsSb/GaAs/InGaP laser structure are presented in this article. We obtained the stable laser generation on two frequencies, conditioned by direct and indirect optical transitions in space. Observation of the sum frequency showed the effective intracavity mixing of modes in semiconductor lasers of this type.