

PACS 42.65.Ky; 42.55.Rz; 85.35.Be

Нелинейное смешение гармоник в InGaAs/InGaP/GaAs-лазере на германиевой подложке

Н.В.Дикарева, С.М.Некоркин, Б.Н.Звонков, В.Я.Алешкин, А.А.Дубинов

Представлены экспериментальные результаты исследования InGaAs/InGaP/GaAs-лазера с квантовыми ямами, выращенного на слаболегированной германиевой подложке. Проведено наблюдение генерации излучения на вторых и суммарной гармониках в данном лазере с составным резонатором, что подтверждает возможность эффективной генерации разностной гармоники.

Ключевые слова: лазер, германиевая подложка, вторая гармоника, суммарная гармоника, разностная гармоника.

В настоящее время есть потребность в компактных полупроводниковых источниках излучения в дальнем ИК диапазоне длин волн. Наилучшие результаты среди таких источников демонстрируют квантово-каскадные лазеры на основе GaAs и InP [1], которые, к сожалению, могут генерировать только при криогенных температурах. Кроме того, существует область длин волн (25–60 мкм) в дальнем ИК диапазоне, где они не могут работать из-за большого фоновое поглощения в твердых растворах на основе GaAs и InP [2].

Альтернативным источником дальнего ИК излучения могут стать генераторы, основанные на нелинейно-оптическом преобразовании (генерация разностной гармоники) двух длин волн ближнего ИК диапазона. В работе [3] была рассмотрена возможность генерации разностной гармоники благодаря решеточной нелинейности GaAs в двухчастотном лазере ближнего ИК диапазона, содержащем две разные квантовые ямы. Для обеспечения условия фазового синхронизма предлагалось возбуждать моду высокого порядка для меньшей длины волны и основную моду для большей длины волны. Справедливость такого подхода была подтверждена в лазерных диодах с составным резонатором, в которых была получена генерация разностной гармоники с длинами волн 8, 8.75 и 11.65 мкм [4, 5]. Однако использование мод разного порядка для достижения условия фазового синхронизма неэффективно для генерации разностной гармоники в дальнем ИК диапазоне [6–8]. Выполнить условие фазового синхронизма для двух основных мод и значительно снизить фоновое поглощение в GaAs позволяет использование слаболегированной германиевой подложки для лазера на основе GaAs [9].

В настоящей работе был исследован InGaAs/InGaP/GaAs-лазер с квантовыми ямами, выращенный на слаболегированной германиевой подложке, в котором возможна генерация разностной гармоники в режиме составного резонатора.

Лазерная гетероструктура InGaAs/GaAs/InGaP на слаболегированной подложке из Ge (100) с отклонением 6° к [111] была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. В качестве активной области использовались две квантовые ямы InGaAs, расположенные в центре волновода $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$. Параметры слоев структуры приведены в табл.1. На основе данной гетероструктуры был изготовлен лазерный диод с шириной активной области 100 мкм и длиной 1 мм путем химического травления контактного слоя вне активной полоски с последующей ионно-имплантационной изоляцией. Напыления просветляющих и отражающих покрытий на грани лазерного чипа не проводилось. Зеркалами служили сколотые грани структур. Во избежание перегрева прибора лазерный чип припаивался к медному теплоотводу посредством индиевого припоя. Теплоотвод монтировался на элемент Пельтье для того, чтобы получить возможность изменения температуры лазера.

Как было показано в работе [10], на электрофизические свойства Ge/GaAs-структуры очень сильное влияние оказывает граница гетероперехода между Ge и GaAs. Происходит взаимная диффузия атомов Ge в слой GaAs,

Табл.1. Параметры слоев лазерной гетероструктуры.

Номер слоя	Слой	Легирование и состав слоя	Толщина слоя (нм)
1	Подложка	n-Ge	150000
2	Буферный	$n^+ \text{-In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$	250
3	Ограничительный	$n^+ \text{-InGaP}$	700
4	Волноводный	$i \text{-In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$	350
5	Квантовая яма № 1	$i \text{-In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$	8
6	Волноводный	$i \text{-In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$	135
7	Квантовая яма № 2	$i \text{-In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$	8
8	Волноводный	$i \text{-In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$	350
9	Ограничительный	$p^+ \text{-InGaP}$	700
10	Контактный	$p^{++} \text{-GaAs}$	220

Н.В.Дикарева, С.М.Некоркин, Б.Н.Звонков. Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23

В.Я.Алешкин, А.А.Дубинов. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ГСП-105; Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; e-mail: sanya@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 7 октября 2014 г., после доработки – 25 ноября 2014 г.

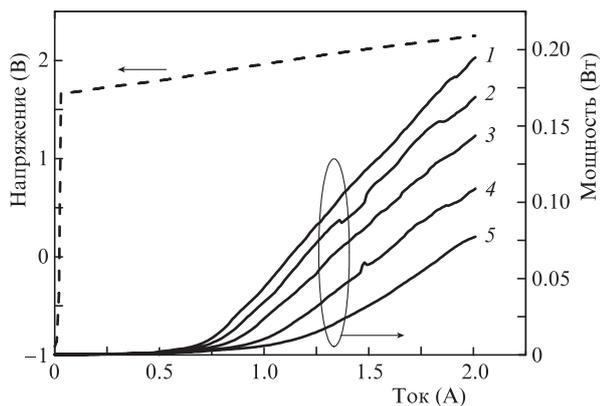


Рис.1. Вольт-амперная при $T = 273$ К и ватт-амперные характеристики лазера при $T = 233$ (1), 243 (2), 253 (3), 263 (4) и 273 К (5).

а Ga и As в германиевую подложку, что может сказаться на вольт-амперной характеристике диода (рис.1). Там же приведены ватт-амперные характеристики лазерного диода при различных температурах. Порог генерации составил 0.7–1 А в зависимости от температуры. Резкий спад интенсивности излучения при повышении температуры обусловлен, скорее всего, перегревом структуры вследствие высокого последовательного сопротивления, которое составило 0.2 Ом, что значительно больше, чем у подобных лазеров на подложке GaAs [11].

Измеренные при комнатной температуре спектральные характеристики и диаграммы направленности лазерного излучения в плоскостях, перпендикулярной и параллельной р–п-переходу, приведены на рис.2 и 3 соответственно. Спектральные зависимости измерялись с помощью решеточного монохроматора МДР-23. Для исключения разогрева активной области измерения проводились при накачке импульсами тока длительностью 360 нс с частотой повторения 1.5 кГц. Как видно из рис.2, лазерная генерация наблюдалась на длине волны 1 мкм, а ширина спектральной линии составила 4 нм. На рис.3 видно, что диаграмма направленности излучения в плоскости, параллельной р–п-переходу, уширена и имеет два максимума, что связано, по нашему мнению, с некачественными зеркалами, образованными при помощи скалывания структуры на германиевой подложке.

Для демонстрации нелинейного преобразования излучения во вторые и суммарную гармоники использовалась конструкция двухчипового лазера с составным резонатором, состоящего из расположенных на одном тепло-

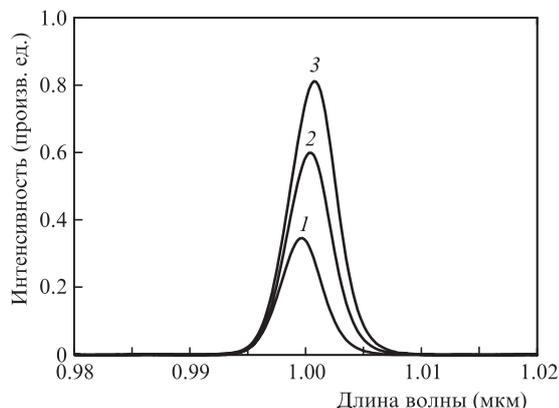


Рис.2. Спектры излучения лазерного диода при токах импульсной накачки $J = 10$ (1), 20 (2) и 30 А (3); $T = 300$ К.

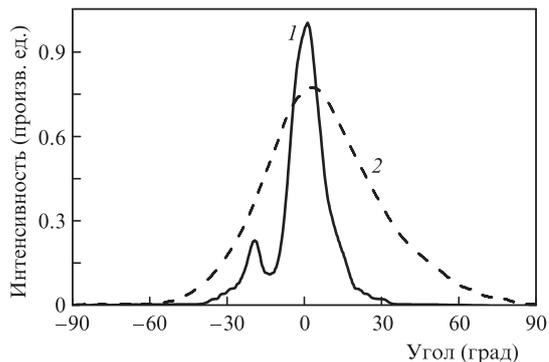


Рис.3. Диаграммы направленности излучения лазера в плоскостях, параллельной (1) и перпендикулярной (2) р–п-переходу; $T = 300$ К, $J = 2$ А.

отводе в непосредственной близости друг от друга двух лазеров с квантовыми ямами, генерирующих в непрерывном режиме. Измерения проводились при температуре жидкого азота. В этой схеме оба лазера генерировали на основной поперечной моде с разными длинами волн, и излучение одного вводилось в волновод другого лазера (по нормали к поперечной грани волновода). Такая конструкция позволяет вводить заметную (~30%) часть излучения одного лазера в другой лазер [12]. Лазером, в который вводилось излучение, служил описанный выше лазер на германиевой подложке ($\lambda = 0.93$ мкм и выходная мощность $P_{out} = 0.8$ Вт при $T = 77$ К), второй лазер представлял собой обычный лазер [13] на подложке GaAs ($\lambda = 1.03$ мкм, $P_{out} = 1$ Вт при $T = 77$ К и токе 2 А). Спектры двухчипового лазера приведены на рис.4 и демонстрируют присутствие вторых гармоник для мод с длинами волн 0.93 и 1.03 мкм, а также сигнала с суммарной частотой этих мод на длине волны 0.488 мкм. Мощность вторых и суммарных гармоник составила около 0.5 мкВт, что объясняется большим поглощением излучения этих длин волн в волноводном слое $In_{0.01}Ga_{0.99}As$ и в квантовых ямах лазера. Наблюдаемая суммарная гармоника является прямым доказательством возможности смешения частот внутри резонатора данного лазера. В дальнейшем это может позволить получить генерацию разностной гармоники в среднем и дальнем ИК диапазоне с выходной мощностью ~10 мкВт [9], что на два порядка больше

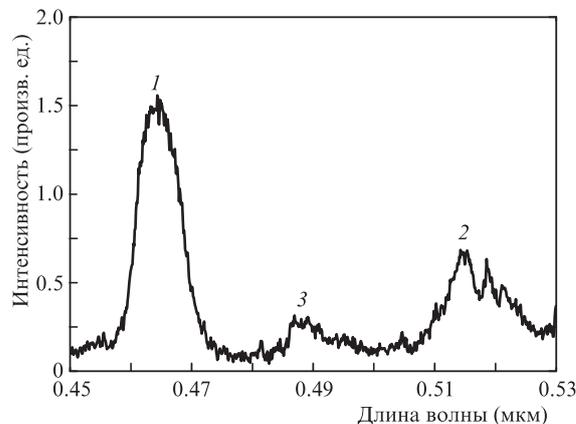


Рис.4. Спектр излучения двухчипового лазера с составным резонатором в видимом диапазоне длин волн при $T = 77$ К: вторая гармоника лазера на германиевой подложке (1), вторая гармоника лазера на GaAs-подложке (2) и суммарная гармоника (3).

мощности, достигнутой ранее лазером с модой высокого порядка [4, 5].

Итак, создан и исследован InGaAs/InGaP/GaAs-лазер с квантовыми ямами, выращенный на слаболегированной германиевой подложке и предназначенный для генерации разностной гармоники. Полученная генерация суммарной и вторых гармоник демонстрирует возможность нелинейного преобразования частоты в таком лазере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 14-02-31287 мол_а, 13-02-97062 р_поволжье_а).

1. Williams B.S. *Nat. Photonics*, **1**, 517 (2007).
2. Ohtani K., Beck M., Faist J. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 121115 (2014).
3. Алешкин В.Я., Афоненко А.А., Звонков Н.Б. *ФТП*, **35**, 1256 (2001).
4. Zvonkov B.N., Biryukov A.A., Ershov A.V., Nekorkin S.M., Aleshkin V.Ya., Gavrilenko V.I., Dubinov A.A., Maremyanin K.V., Morozov S.V., Belyanin A.A., Kocharovskiy V.V., Kocharovskiy V.I.V. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 021122 (2008).
5. Звонков Б.Н., Бирюков А.А., Некоркин С.М., Алешкин В.Я., Гавриленко В.И., Дубинов А.А., Маремьянин К.В., Морозов С.В. *ФТП*, **43**, 220 (2009).
6. Афоненко А.А., Алешкин В.Я., Дубинов А.А. *ФТП*, **38**, 244 (2004).
7. Afonenko A.A., Aleshkin V.Ya., Dubinov A.A. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 357 (2005).
8. Алешкин В.Я., Дубинов А.А. *Квантовая электроника*, **38** (2), 149 (2008).
9. Алешкин В.Я., Дубинов А.А. *Квантовая электроника*, **38** (9), 855 (2008).
10. Galiana B., Rey-Stolle I., Algora C., Volz K., Stolz W. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 152102 (2008).
11. Ладугин М.А., Коваль Ю.П., Мармалюк А.А., Петровский В.А., Багаев Т.А., Андреев А.Ю., Падалица А.А., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **43** (5), 407 (2013).
12. Biryukov A.A., Aleshkin V.Ya., Nekorkin S.M., Kocharovskiy V.V., Kocharovskiy V.I.V., Zvonkov B.N., Scully M.O. *J. Mod. Opt.*, **52**, 2323 (2005).
13. Авруцкий И.А., Батукова Л.М., Дианов Е.М., Звонков Б.Н., Звонков Н.Б., Максимов Г.А., Малкина И.Г., Медведева Л.В., Янькова Т.Н. *Квантовая электроника*, **21** (10), 921 (1994).