

УДК 621.315.592

И.С. Набиуллин^{1,2}, А.Н. Клочков², А.Н. Виниченко², И.С. Васильевский²¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Российская Федерация²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДИФФУЗИИ ЦИНКА ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ НА ИЗЛУЧАЮЩИЕ И ТОКОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ INGAAS/ALGAAS/GAAS-СТРУКТУР

Исследованы излучающие и токовые параметры двойной гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs, слои которой одновременно подвергались легированию и перемешиванию путем быстрого термического отжига цинка из металлического слоя с покрытием SiO₂ при разных температурах и времени вжигания: 1) 700 °С, 5 мин; 2) 650 °С, 5 мин; 3) 650 °С, 15 мин. Сравнение образцов с различными температурами и временем вжигания цинка показало, что повышение времени и температуры процесса увеличивает сдвиг максимума излучения в коротковолновую область. Максимальный сдвиг составил 87 нм.

Ключевые слова: непоглощающее окно, коротковолновый сдвиг, быстрый термический отжиг, диффузия цинка, перемешивание квантовой ямы.

I.S. Nabiullin^{1,2}, A.N. Klochkov², A.N. Vinichenko², I.S. Vasilievsky²¹Perm Research and Production instrument-making company, Perm, Russian Federation²National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russian Federation

EFFECT OF ZINC DIFFUSION REGIMES FROM A METALLIC LAYER ON THE EMISSION AND CURRENT PARAMETERS OF INGAAS/ALGAAS/GAAS STRUCTURES

The study represents the light and current parameters of an InGaAs/AlGaAs/GaAs double heterostructure, the layers of which were simultaneously subjected to doping and intermixing by rapid thermal annealing of zinc from a metal layer with a SiO₂ coating at different temperatures and firing times: 1) 700 °C, 5 min; 2) 650 °C, 5 min; 3) 650 °C, 15 min. A comparison of samples with different temperatures and times of zinc annealing showed that an increase in the time and temperature of the process increases the shift of the luminescence maximum peak to the short-wavelength region. The best shift was 87 nm.

Keywords: non-absorbing window, blueshift, rapid thermal annealing, zinc diffusion, quantum well intermixing.

Введение

Внедрение примесей в полупроводниковые структуры может использоваться для двух важных технологических процессов изготовления фотонных и оптоэлектронных устройств: легирование (для создания p - n -перехода) и перемешивание квантовых ям (для изменения ширины запрещенной зоны слоев гетероструктуры). Последнее используется в технологиях создания ряда компонентов:

- модуляторы с подстройкой ширины запрещенной зоны [1–3];
- лазеры с подстройкой ширины запрещенной зоны [1, 3, 4];
- волноводы и переходные элементы для межсоединений компонентов на интегральной схеме [1, 4, 5];
- интегрированные расширенные резонаторы для узкополосных лазеров [1];
- одночастотные лазеры с распределенным брэгговским зеркалом [1, 5];
- лазеры с распределенной обратной связью [1];
- лазеры с синхронизацией мод [1, 6];
- непоглощающие зеркала торцевых лазеров [1, 7].

Классическим способом перемешивания квантовых ям является термическая диффузия цинка [1]. Существуют различные способы диффузии примесей в полупроводниковые слои вне процесса роста. Известен способ легирования примесью p -типа из различных соединений и материалов с содержанием цинка: ZnAs_2 , Ga/As/Zn [8], газовой фазы [9], Zn_3As_2 [10], Zn_3P_2 [11, 12], полимерных диффузانتов [13], SiO_2 [14].

Преимуществом использования металлического слоя в качестве источника примеси p -типа является возможность легирования слоев полупроводника одновременно с вжиганием контактов. Помимо этого способы легирования материалов вне процесса роста могут быть полезны на практике, чтобы исключить источник легирования p -типа из эпитаксиальной установки, поскольку наличие дополнительных источников материалов в установке эпитаксии может приводить к фоновому загрязнению n -области и активных слоев и, как следствие, к ухудшению качества производимых структур. Знание доступных по цене и технологически надежных способов легирования позволит снизить требования к набору оборудования и расширить инвентарий для производства излучающих приборов.

Данная работа призвана продемонстрировать возможность легирования полупроводниковых слоев путем вжигания металлического цинка из поверхностного слоя для получения электролюминесцентных приборов и исследования электролюминесценции структур с квантовыми ямами, а также возможность смещения пика люминесценции в коротковолновую область для создания непоглощающего окна в гетероструктуре. Метод создания непоглощающих окон позволяет в дальнейшем организовать на торце лазерного чипа прозрачную область, тем самым исключив нагрев дефектного края и увеличив максимальную мощность до наступления катастрофической оптической деградации излучающего торца лазерного чипа [7, 15].

Экспериментальные излучающие структуры

В качестве излучающей структуры была взята двойная гетероструктура InGaAs/AlGaAs/GaAs с раздельным ограничением (таблица), выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber Compact 21-T на подложке *n*-GaAs (100) со степенью легирования $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Номинальный состав гетероструктуры

Слой	Тип слоя	Материал	Состав	Толщина, нм	Легирование, см^{-3}
1	Подложка	<i>n</i> -GaAs(100)		4500	$1 \cdot 10^{18}$
2	Буферный слой	<i>n</i> -GaAs		300	$4,5 \cdot 10^{18}$
	Переходная CP AlGaAs/GaAs с варьиремым заполнением	GaAs (8 нм) Al _{0,4} GaAs (3 нм) GaAs (6 нм) Al _{0,4} GaAs (4 нм) GaAs (4 нм) Al _{0,4} GaAs (5 нм) GaAs (2 нм) Al _{0,4} GaAs (8 нм)	$x = \text{от } 0 \text{ до } 0,4$	40	$2,7 \cdot 10^{18}$
3	Ограничительный слой/эмиттер	<i>n</i> -Al _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} As	$x = 0,4$	850	$2,7 \cdot 10^{18}$
4	Слой прерывания для сглаживания состава	<i>i</i> -GaAs		1	—
5	Волновод	<i>n</i> -Al _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} As	$x = 0,3$	1050	$5 \cdot 10^{17}$
6	Волновод нелегированный	<i>i</i> -Al _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} As	$x = 0,3$	250	—

Окончание таблицы

Слой	Тип слоя	Материал	Состав	Толщина, нм	Легирование, см ⁻³
7	Встроенный волновод	<i>i</i> -GaAs		5	—
8	КЯ	<i>i</i> -In _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} As	<i>x</i> = 0,2	7	—
9	Встроенный волновод	<i>i</i> -GaAs		5	—
10	Волновод	<i>i</i> -Al _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} As	<i>x</i> = 0,3	300	—
11	Ограничительный слой/эмиттер	<i>i</i> -Al _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} As	<i>x</i> = 0,4	65	—
12	Переходная СР AlGaAs/GaAs с варьируемым заполнением	Al _{0,4} GaAs (8 нм) GaAs (2 нм) Al _{0,4} GaAs (5 нм) GaAs (4 нм) Al _{0,4} GaAs (4 нм) GaAs (6 нм) Al _{0,4} GaAs (3 нм) GaAs (8 нм)	<i>x</i> = от 0,4 до 0	40	—
13	Контактный слой	<i>i</i> -GaAs		10	—

Гетероструктура со стороны подложки *n*-GaAs имеет буферный слой GaAs 300 нм, эпитаксиально легированный кремнием до концентрации $4,5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Далее следует переходная сверхрешетка 40 нм со слоями GaAs (8 нм) / Al_{0,4}Ga_{0,6}As (3 нм) / GaAs (6 нм) / Al_{0,4}Ga_{0,6}As (4 нм) / GaAs (4 нм) / Al_{0,4}Ga_{0,6}As (5 нм) / GaAs (2 нм) / Al_{0,4}Ga_{0,6}As (8 нм). Затем Al_{0,4}Ga_{0,6}As-эмиттер 850 нм ($2,7 \cdot 10^{18}$ см⁻³) и GaAs-слой прерывания для сглаживания поверхности. После выращивались слои двойной гетероструктуры с отдельным ограничением и квантовой ямой In_{0,2}Ga_{0,8}As 7 нм, GaAs-барьерами 5 нм и окружающими барьерами Al_{0,3}Ga_{0,7}As.

Толщина волноводного слоя с обкладками Al_{0,3}Ga_{0,7}As составляет 1600 нм. Квантовая яма с барьерами располагается ближе к *p*-эмиттеру Al_{0,4}Ga_{0,6}As на расстоянии 250 нм, чтобы увеличить инжекцию дырок. Часть волновода (1050 нм) со стороны *n*-эмиттера дополнительно легирована для улучшения инжекции. Толщина *p*-эмиттера Al_{0,4}Ga_{0,6}As составляет 65 нм. После *p*-эмиттера идет слой сверхрешетки Al_{0,4}Ga_{0,6}As/GaAs 40 нм и контактный слой GaAs 10 нм.

Для *p*-легирования верхних слоев гетероструктуры использовался цинк в качестве акцепторной примеси. Слой металлического цинка

100 нм был нанесен методом резистивного испарения. Затем методом плазмохимического осаждения был нанесен защитный слой SiO_2 для предотвращения испарения цинка с поверхности при последующем отжиге структуры. После инкапсуляции пленкой SiO_2 диффузия цинка проводилась методом быстрого термического отжига в трех режимах: 1) 700°C , 5 мин; 2) 650°C , 5 мин; 3) 650°C , 15 мин. Режимы диффузии цинка были выбраны, исходя из предельной температуры, при которой в наших предыдущих опытах возникало размытие границ квантовой ямы InGaAs в отсутствие примесей. После отжига слой SiO_2 был удален методом плазмохимического травления. Затем на профилометре Bruker Dektak XT была измерена шероховатость поверхности, которая во всех режимах составила порядка 50 нм. После вжигания цинка на обе стороны пластины были нанесены контакты: на обратную сторону – n -типа Ni (5 нм) / Ge (20 нм) / Au (40 нм) / Ni (18 нм) / Au (120 нм), на верх структуры – p -типа – Ti (5 нм) / Au (25 нм) / Ti (20 нм) / Au (120 нм).

Измерение кривой дифракционного отражения

Для выходного контроля состава квантовой ямы исследуемой гетероструктуры была проведена съемка кривых дифракционного отражения (КДО) в геометрии 2θ - ω . Использовалась установка Rigaku Ultima IV с рентгеновским излучением медной трубки $\text{Cu K}\alpha 1$. Измерения велись в высокоразрешающем режиме (двухкристальная схема) с применением двухотражательного Ge монохроматора (220). На рис. 1 показаны экспериментальная КДО (004) (красная кривая) данного образца и расчетная модель (синяя кривая).

На КДО наблюдаются острый пик от слоев GaAs при $2\theta = 66,05^\circ$, а также расположенный слева двойной пик, соответствующий волноводным и ограничительным слоям AlGaAs с $x = 0,3$ и $x = 0,4$ соответственно. В диапазоне углов $63^\circ - 65^\circ$ расположен широкий пик, соответствующий слою InGaAs , по положению которого можно оценить параметр решетки и состав квантовой ямы. Также на КДО видны высокочастотные толщинные осцилляции, соответствующие интерференции рентгеновских лучей, отраженных от различных слоев гетероструктуры.

Поскольку большое количество различных слоев (около 20) в структуре образца существенно усложняло автоматическую подгонку

и увеличивало время моделирования, то подгонка осуществлялась в основном в ручном режиме по визуальному совпадению кривых модели и эксперимента. Подгонялись составы твердых растворов AlGaAs и параметры слоя InGaAs. Все остальные параметры в модели были равны номинальным значениям.

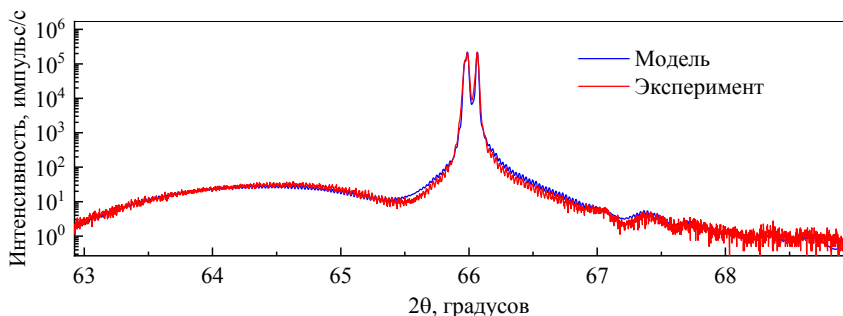


Рис. 1. Кривые дифракционного отражения структуры после роста (без отжига) и их модельная аппроксимация для контроля состава и толщины слоев

Отметим отклонение состава твердого раствора AlGaAs в барьерах в большую сторону: $0,3 \rightarrow 0,375$, $0,4 \rightarrow 0,49$. Слой InGaAs на КДО виден как широкий пик в области $63^\circ - 65^\circ$, его модельные параметры близки к номинальным ($7 \rightarrow 6,74$ нм, $x = 0,2 \rightarrow 0,21$).

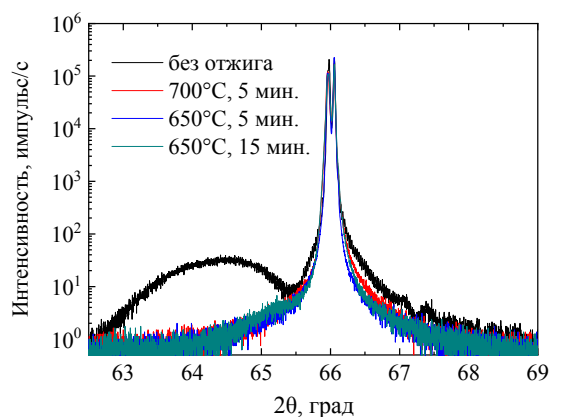
Также были измерены дифракционные кривые для образцов после отжига с цинком (рис. 2). на картинках 2θ мы наблюдаем следующие изменения после отжига с нанесенным Zn:

- 1) исчезновение пика InGaAs для всех условий отжига, что может свидетельствовать о том, что цинк диффундировал до слоя квантовой ямы InGaAs и привел к структурным изменениям (рис. 2, а);
- 2) слои AlGaAs на КДО обладают измененной формой пика в зависимости от условий отжига, что также свидетельствует об их структурных изменениях (рис. 2, б);
- 3) исчезновение толщинных осцилляций, что, вероятнее всего, связано с увеличением шероховатости слоев (рис. 2, б)

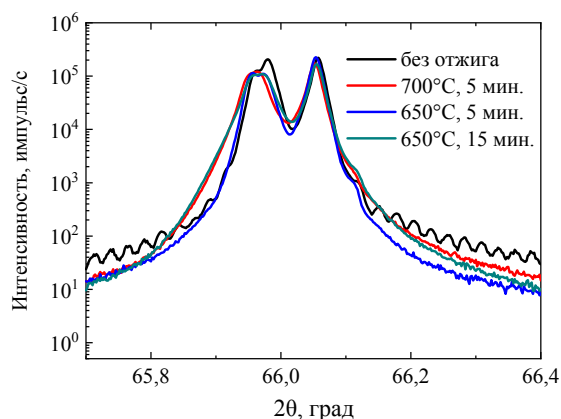
Измерение люминесценции

Спектры фото- и электролюминесценции были измерены при комнатной температуре с помощью спектрометра Horiba iHR-550 и кремниевого CCD детектора. Фотовозбуждение структур производи-

лось с помощью зеленого лазера на 532 нм. Токовая накачка производилась с помощью источника тока и микрозонда, подводимому к образцу, размещаемому на зондовой станции. Люминесценция структур собиралась через оптическое волокно с широким коллектором.



а



б

Рис. 2. КДО экспериментальных структур: черная линия – без отжига, красная линия – отжиг 700°C, 5 мин., синяя линия – 650°C, 5 мин., зеленая линия – 650°C, 15 мин.: а – в диапазоне двойных углов 63–69 град; б – в диапазоне двойных углов 65,7–66,4 град

Эксперимент по фотолюминесценции проводился до нанесения и вжигания металлического слоя цинка. Структуры as-grown показали максимум излучения на длине волны 1000 нм в центре пластины и 1004 нм – на краю (рис. 3), что может быть связано с неоднород-

ностью состава и/или толщины слоя квантовой ямы InGaAs по площади пластины. Второй пик люминесценции в области 930 нм связан со вторым уровнем в квантовой яме.

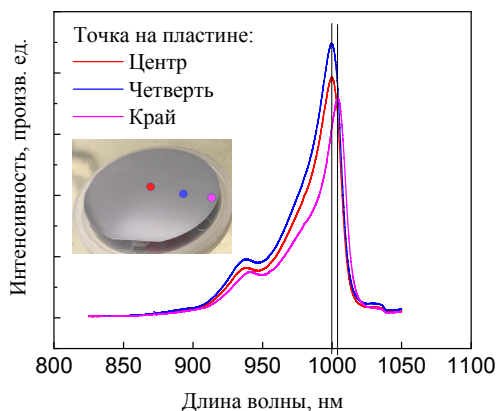


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции гетероструктуры, полученные в разных точках пластины; на краю пластины наблюдается неоднородность

Дополнительно был проведен отжиг as-grown-структур без цинка, чтобы отделить фактор влияния отжига на вид спектра фотолюминесценции. Как видно из рис. 4, отжиг не влияет на положение максимумов и форму спектров фотолюминесценции.

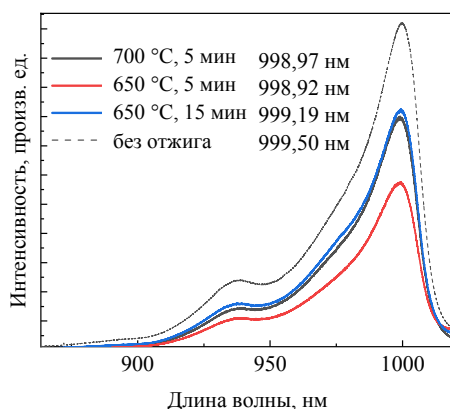


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции гетероструктуры: до отжига (пунктир); после отжига 700 °C, 5 мин (синяя линия); 650 °C, 5 мин (черная линия); 650 °C, 15 мин (красная линия)

На рис. 5 приведены спектры электролюминесценции структур, полученных путем диффузии цинка при трех различных режимах нагрева. Показано, что в двойной гетероструктуре, легированной *p*-типом с помощью вжигания цинка из металлического слоя, достижима электролюминесценция. По сравнению со спектрами фотолюминесценции наблюдается смещение положения пика излучения в коротковолновую область.

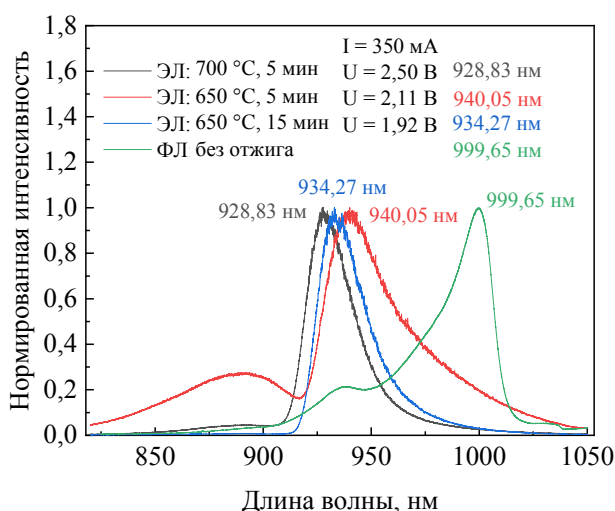


Рис. 5. Нормированные спектры электролюминесценции (ЭЛ) при фиксированном постоянном токе 350 мА и различных напряжениях для структур, легированных цинком, а также спектры фотолюминесценции (ФЛ) структуры без цинка и без отжига

В сравнении со спектрами фотолюминесценции на спектрах электролюминесценции наблюдается коротковолновый сдвиг максимума излучения квантовой ямы (рис. 5). Также при токовой накачке наблюдается более интенсивный пик люминесценции на длине волны излучения арсенида галлия. Предположительно, это связано с тем, что структуры, легированные цинком из металлического слоя, имеют относительно высокое сопротивление и, как следствие, – высокие токи накачки, при которых активнее проявляют себя пик арсенида галлия, а также смещенный пик второго уровня квантовой ямы.

Также можно заметить, что чем больше время отжига либо температура, тем больше наблюдаемый сдвиг максимума излучения в коротковолновую область.

Проведены исследования токовой зависимости спектров электролюминесценции и обнаружено, что с увеличением тока и напряжения увеличивается длина волны излучения (рис. 6).

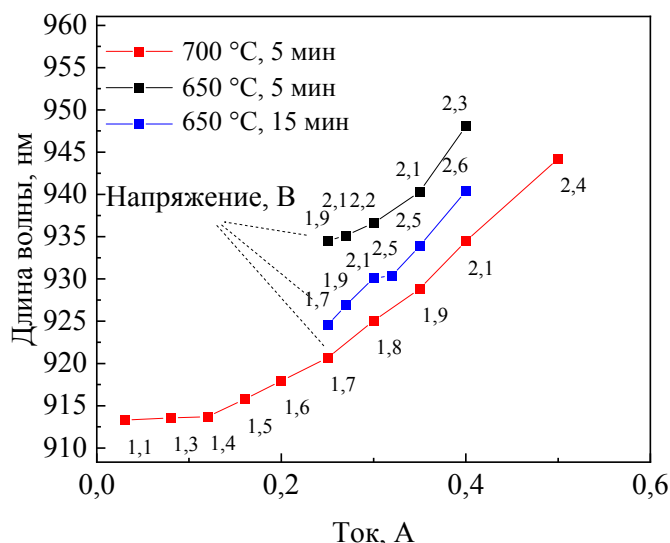


Рис. 6. Зависимость длины волны в максимуме мощности от тока и напряжения для образцов с разными временами отжига

Эффект может быть обусловлен разогревом области эмиссии, где типичный сдвиг от нагрева для квантовых ям InGaAs/GaAs составляет порядка 0,1 нм/°C [16]. Смещение электролюминесценции легированных структур относительно фотолюминесценции нелегированных не могло быть вызвано нагревом структуры, поскольку оно является коротковолновым. Также нельзя связать его с температурным размытием квантовой ямы при вжигании, поскольку образцы без цинка, отожженные при тех же режимах, не показали сдвига фотолюминесценции (см. рис. 4). Уход длины волны излучения структуры в коротковолновую область относительно фотолюминесценции, предположительно, связан с перемешиванием квантовой ямы за счет диффузии цинка [1], а разница в смещении для разных режимов отжига — в различном влиянии глубины и концентрации легирования на степень перемешивания слоев. Сдвиг максимума излучения в коротковолновую область составил 87 нм для структуры с режимом вжигания 700°C, 5 мин. Данный сдвиг соответствует уменьшению

состава по индию на 14 процентных пунктов в модели напряженной [17] бесконечной квантовой ямы, рассчитанной через уравнение Шредингера.

Была произведена оценка сдвига длины волны максимума излучения структур в длинноволновую область с ростом тока накачки (рис. 7–9).

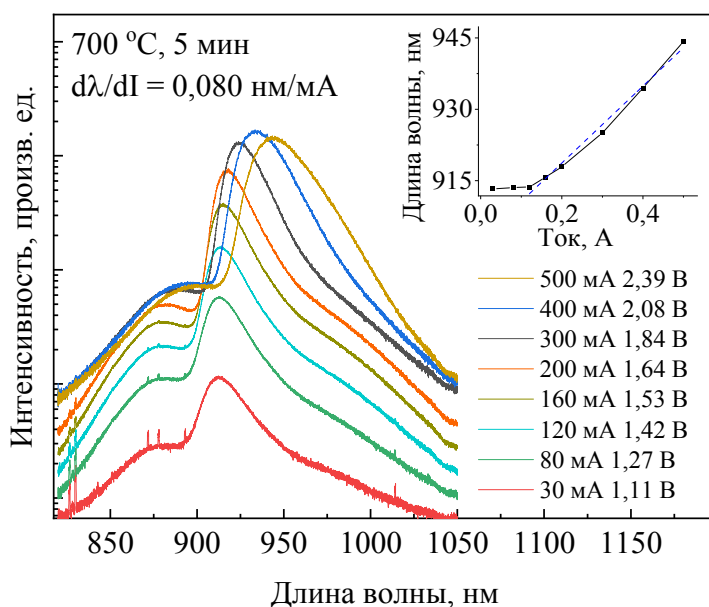


Рис. 7. Картина электролюминесценции образца с режимом 700 °C, 5 мин при разных токах накачки

Образец с режимом диффузии цинка 700 °C, 5 мин демонстрирует коротковолновый сдвиг максимума излучения в 87 нм и удельное смещение 0,08 нм/мА в длинноволновую область при накачке током. Полученный коротковолновый сдвиг является значительным для методов перемешивания квантовых ям [18]. Полученное удельное смещение максимума излучения гетероструктуры при токовой накачке является сопоставимым по порядку величины со смещением для лазера со стабилизацией длины волны излучения с помощью волоконной брэгговской решетки (ВБР) [19], что свидетельствует о потенциальной возможности достижения более высоких параметров стабильности длины волны при использовании ВБР.

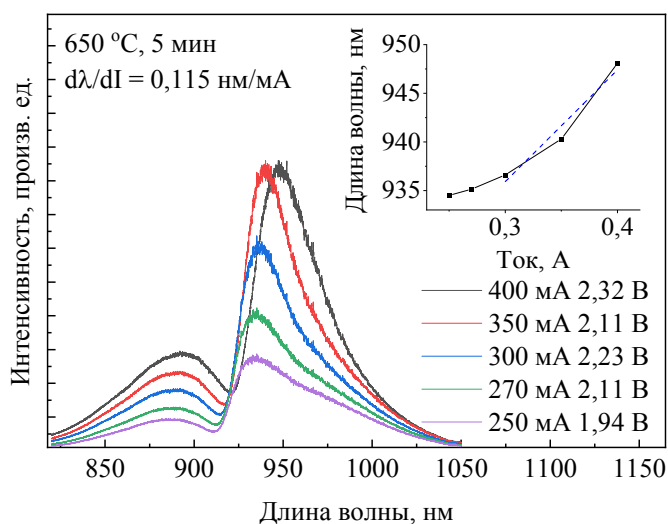


Рис. 8. Картина электролюминесценции образца с режимом 600 °C, 5 мин при разных токах накачки

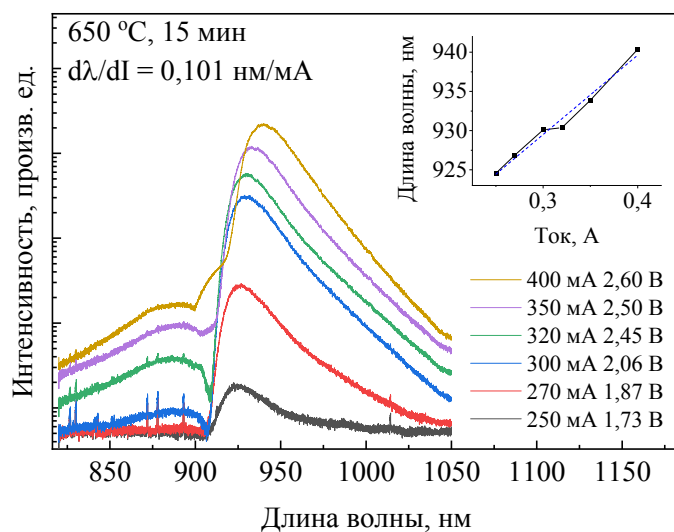


Рис. 9. Картина электролюминесценции образца с режимом 600 °C, 15 мин при разных токах накачки

Заключение

Таким образом продемонстрирована возможность одновременного достижения электролюминесценции и смещения пика в коротковолновую область двойной гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs ближнего инфракрасного диапазона с *p*-областью, созданной путем вжигания цинка из металлического слоя при разных температурах и времени вжигания.

Сравнение образцов, легированных при различных температурах и времени вжигания, показало, что чем больше время и температура процесса, тем значительнее наблюдается сдвиг максимума излучения в коротковолновую область. Среди изученных образцов максимальные характеристики продемонстрировал образец с режимом диффузии цинка 700 °С, 5 мин: коротковолновый сдвиг максимума излучения в 87 нм и удельное смещение в длинноволновую область при токовой накачке 0,08 нм/мА.

Список литературы

1. Marsh J.H. Quantum well intermixing // *Semicond. Sci. Technol.* – 1993. – Vol. 8, № 6. – P. 1136–1155.
2. Effects of damage accumulation on quantum well intermixing by low-energy ion implantation in photonic devices / M. Chicoine [et al.] // *Applications of Photonic Technology 6*. SPIE. – 2003. – Vol. 5260, № 15. – P. 423.
3. Control of multiple bandgap shifts in InGaAs-AlInGaAs multiple-quantum-well material using different thicknesses of PECVD SiO₂ protection layers / X.F. Liu [et al.] // *IEEE Photonics Technol. Lett. IEEE.* – 2000. – Vol. 12, № 9. – P. 1141–1143.
4. Novel quantum well intermixing in InGaAs-InGaAsP laser structure using argon plasma exposure / T.C.L. Wee [et al.] // *Conf. Lasers Electro-Optics Eur.* (2000). – Pap. CWF95. – Optica Publishing Group, 2000. – P. CWF95.
5. 980 nm DBR lasers monolithically integrated with EA modulators for optical interconnect applications / G.B. Morrison [et al.] // *Integr. Photonics Res. Appl. Inf. Syst.* – 2005. – Pap. IWF2. – Optica Publishing Group, 2005. – P. IWF2.
6. Output power limitations and improvements in passively mode locked GaAs/AlGaAs quantum well lasers / G. Tandoi [et al.] // *IEEE J. Quantum Electron.* – 2012. – Vol. 48, № 3. – P. 318–327.

7. Walker C.L., Bryce A.C., Marsh J.H. Improved catastrophic optical damage level from laser with nonabsorbing mirrors // IEEE Photonics Technol. Lett. – 2002. – Vol. 14, № 10. – P. 1394–1396.
8. Matsumoto Y. Study on Zn Diffusion in GaAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \leq 0.4$) at temperatures from 726° to 566°C // Jpn. J. Appl. Phys. IOP Publishing. – 1983. – Vol. 22, № 5. – P. 829.
9. Андреев В.М., Сулима О.В. Исследование диффузии цинка из газовой фазы в твердые растворы $\text{Al}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As}$ // Журнал технической физики. – 1984. – Т. 54, № 7. – С. 1320–1324.
10. Kahen K.B. Mechanism for the diffusion of zinc in gallium arsenide // MRS Online Proc. Libr. Springer. – 1989. – Vol. 163, № 1. – P. 681–684.
11. Метод диффузии цинка в InP через узкий зазор с использованием планарного источника на основе Zn-P_2 / М.О. Петрушков [и др.] // Письма в журнал технической физики. – 2018. – Т. 44, № 14. – С. 19.
12. Zn-diffusion-induced intermixing of InGaAs/InP multiple quantum well structures / K. Nakashima [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1988. – Vol. 52, № 17. – P. 1383–1385.
13. Диффузия легирующих примесей из полимерных диффузانتов и применение этого метода в технологии полупроводниковых приборов. Обзор / Е.Г. Гук [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 3. – С. 257–269.
14. Kalkur T.S., Lu Y.C., Paz de Araujo C.A. Rapid thermal diffusion of zinc in GaAs // MRS Online Proc. Libr. Springer. – 1987. – Vol. 92, № 1. – P. 461–468.
15. InGaAs/GaAsP/GaInP quantum well lasers with window structure fabricated by impurity free vacancy disordering / L. Zhou [et al.] // Solid. State. Electron. Elsevier Ltd. – 2013. – Vol. 89. – P. 81–84.
16. Edge-emitting InGaAs/GaAs laser with high temperature stability of wavelength and threshold current / N.Y. Gordeev [et al.] // Semicond. Sci. Technol. IOP Publishing. – 2010. – Vol. 25, № 4. – P. 045003.
17. Peter S. Zory J. Quantum well lasers. – Academic Press, 1993.
18. Liu N., Poulin S., Dubowski J.J. Enhanced photoluminescence emission from bandgap shifted InGaAs/InGaAsP/InP microstructures processed with UV laser quantum well intermixing // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2013. – Vol. 46, № 44. – P. 445103.
19. Facet and grating reflectivity effects in wavelength stabilised uncooled pump lasers / J. Li [et al.] // Electron. Lett. – 2005. – Vol. 40, № 1.

References

1. Marsh J.H. Quantum well intermixing. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, vol. 8, no. 6, pp. 1136–1155.
2. Chicoine M. et al. Effects of damage accumulation on quantum well intermixing by low-energy ion implantation in photonic devices. *Applications of Photonic Technology 6. SPIE*, 2003, vol. 5260, no. 15, 423 p.
3. Liu X.F. et al. Control of multiple bandgap shifts in InGaAs-AlInGaAs multiple-quantum-well material using different thicknesses of PECVD SiO₂ protection layers. *IEEE Photonics Technol. Lett.* IEEE, 2000, vol. 12, no. 9, pp. 1141–1143.
4. Wee T.C.L. et al. Novel quantum well intermixing in InGaAs-InGaAsP laser structure using argon plasma exposure. *Conf. Lasers Electro-Optics Eur. (2000)*. Pap. CWF95. Optica Publishing Group, 2000, CWF95 p.
5. Morrison G.B. et al. 980 nm DBR lasers monolithically integrated with EA modulators for optical interconnect applications. *Integr. Photonics Res. Appl. Inf. Syst.*, 2005. Pap. IWF2. Optica Publishing Group, 2005. Pap. IWF2.
6. Tandoi G. et al. Output power limitations and improvements in passively mode locked GaAs/AlGaAs quantum well lasers. *IEEE J. Quantum Electron*, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 318–327.
7. Walker C.L., Bryce A.C., Marsh J.H. Improved catastrophic optical damage level from laser with nonabsorbing mirrors. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2002, vol. 14, no. 10, pp. 1394–1396.
8. Matsumoto Y. Study on Zn Diffusion in GaAs and Al_xGa_{1-x}As (x≤0.4) at temperatures from 726° to 566°C. *Jpn. J. Appl. Phys. IOP Publishing*, 1983, vol. 22, no. 5, 829 p.
9. Andreev V.M., Sulima O.V. Issledovanie diffuzii tsinka iz gazovoi fazy v tverdye rastvory Al(x)Ga(1-x)As [Zinc diffusion study from the gas phase to solid solutions of Al(x)Ga(1-x)As]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1984, vol. 54, no. 7, pp. 1320–1324.
10. Kahen K.B. Mechanism for the diffusion of zinc in gallium arsenide. *MRS Online Proc. Libr. Springer*, 1989, vol. 163, no. 1, pp. 681–684.
11. Petrushkov M.O. et al. Metod diffuzii tsinka v InP cherez uzkkii zazor s ispol'-zovaniem planarnogo istochnika na osnove Zn-P₂ [Diffusion of zinc method into InP through a narrow gap using a planar source based Zn-P₂]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2018, vol. 44, no. 14. 19 p.
12. Nakashima K. et al. Zn-diffusion-induced intermixing of InGaAs/InP multiple quantum well structures. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, vol. 52, no. 17, pp. 1383–1385.

13. Guk E.G. et al. Diffuziia legiruiushchikh primesei iz polimernykh diffuzantov i primeneniye etogo metoda v tekhnologii poluprovodnikovykh priborov. Obzor [Diffusion of dopants from polymers diffusants and the application of this method in semiconductor technology nick devices. Review]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1999, vol. 33, no. 3, pp. 257-269.

14. Kalkur T.S., Lu Y.C., Paz de Araujo C.A. Rapid thermal diffusion of zinc in GaAs. *MRS Online Proc. Libr. Springer*, 1987, vol. 92, no. 1, pp. 461-468.

15. Zhou L. et al. InGaAs/GaAsP/GaInP quantum well lasers with window structure fabricated by impurity free vacancy disordering. *Solid. State. Electron. Elsevier Ltd.*, 2013, vol. 89, pp. 81-84.

16. Gordeev N.Y. et al. Edge-emitting InGaAs/GaAs laser with high temperature stability of wavelength and threshold current. *Semicond. Sci. Technol. IOP Publishing*, 2010, vol. 25, no. 4, 045003 p.

17. Peter S. Zory J. Quantum well lasers. Academic Press, 1993.

18. Liu N., Poulin S., Dubowski J.J. Enhanced photoluminescence emission from bandgap shifted InGaAs/InGaAsP/InP microstructures processed with UV laser quantum well intermixing. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2013, vol. 46, no. 44, 445103 p.

19. Li J. et al. Facet and grating reflectivity effects in wavelength stabilised uncooled pump lasers. *Electron. Lett.*, 2005, vol. 40, no. 1.

Сведения об авторе

НАБИУЛЛИН Ильдар Салихович

e-mail: ildar.s.n@yandex.ru

Аспирант кафедры 67 «Физика конденсированных сред», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, ведущий инженер-исследователь ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь.

КЛОЧКОВ Алексей Николаевич

e-mail: klochkov_alexey@mail.ru

Кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

About the author

NABIULLIN Ildar Salikhovich

e-mail: ildar.s.n@yandex.ru

KLOCHKOV Aleksey Nikolaevich

e-mail: klochkov_alexey@mail.ru

Ph.D, associate professor, NRNU MEPhI, Moscow.

ВИНИЧЕНКО Александр Николаевич VINICHENKO Alexandr Nikolaevich,
e-mail: *ANVinichenko@mephi.ru* e-mail: *ANVinichenko@mephi.ru*

Кандидат физико-математических наук, Ph.D., senior researcher, NRNU MEPhI, Moscow.
старший научный сотрудник, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

ВАСИЛЬЕВСКИЙ Иван Сергеевич VASIL'EVSKII Ivan Sergeevich
e-mail: *ivasilevskii@mail.ru* e-mail: *ivasilevskii@mail.ru*

Доктор физико-математических наук, Holder of an advanced doctorate (doctor of science) in physico-mathematical sciences, full professor, leading research officer, NRNU MEPhI, Moscow.
г. Москва.

Финансирование: работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: равноценен.

Получена: 05.07.2023

Одобрена: 07.07.2023

Принята к публикации: 10.07.2023

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Authors Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 05/07/2023

Approved: 07/07/2023

Accepted for publication: 10/07/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Набиуллин, И.С. Влияние режимов диффузии цинка из металлического слоя на излучающие и токовые параметры InGaAs/AlGaAs/GaAs-структур / И.С. Набиуллин, А.Н. Клочков, А.Н. Виниченко, И.С. Васильевский // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 4. – С. 102–119.

Please cite this article in English as: Nabiullin I.S., Klochkov A.N., Vinichenko A.N., Vasil'evskii I.S. Effect of zinc diffusion regimes from a metallic layer on the emission and current parameters of InGaAs/AlGaAs/GaAs structures // Applied photonics, 2023, no. 4, pp. 102-119.