

- [1] Барчуков А.И., Конюхов В.К. - ЖПС, 1968, т. 9, в. 4, с. 706-709.
- [2] Карабутов А.В., Платоненко В.Т., Чупрына В.А. - Квантовая электроника, 1985, 12, в. 10, с. 2126-2130.
- [3] Жаров В.П., Летохов В.С. Лазерная оптикоакустическая спектроскопия. М.: Наука, 1984. 320 с.
- [4] Хоникомб Р. Пластическая деформация. М.: Мир, 1972. 408 с.
- [5] Либенсон М.Н., Романов Г.С., Имас Я.А. ЖТФ, 1968, т. 3, в. 7, с. 1116-1119.
- [6] Бонч-Бруевич А.М., Имас Я.А., Либенсон М.Н., Шандыбина Г.Д. - Поверхность. Физика, химия, механика, 1985, в. 5, с. 102-105.

Поступило в Редакцию
14 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 17 12 сентября 1988 г.

СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (3-3.3 МКМ, 77 К)
ПРИ ИНЖЕКЦИИ ТОКА В ПЛАСТИЧЕСКИ
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ДГС $JnAsSbP/JnAs$

М.Ш. Айдаралиев Н.В. Зотова,
С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев,
Н.М. Стусь, Г.Н. Талапакин

Инжекционные лазеры, работающие в спектральном диапазоне 3-5 мкм и в области окон прозрачности атмосферы 8-12 мкм, играют важную роль в развитии таких направлений техники, как системы ВОЛС, газовый анализ и др. [1, 2].

Известен ряд полупроводниковых материалов, например, твердых растворов $Pb-Sn-Te$, $Cd-Hg-Te$, $Jn-As-Sb-P$, ширина запрещенной зоны которых соответствует данным спектральным областям, однако не все они одинаково перспективны для создания инжекционных лазеров с требуемыми характеристиками. Опубликованы сведения об инжекционных когерентных источниках света непрерывного действия на длины волн $\lambda \geq 3.5$ мкм (77 К), полученных, например, на основе $PbSnTe$ [3].

В области 3-4 мкм, где расположены полосы поглощения углеводородов и других промышленных газов, большой интерес представляют твердые растворы $JnAsSbP$. В работах [4, 5] сообщалось о получении стимулированного излучения при инжек-

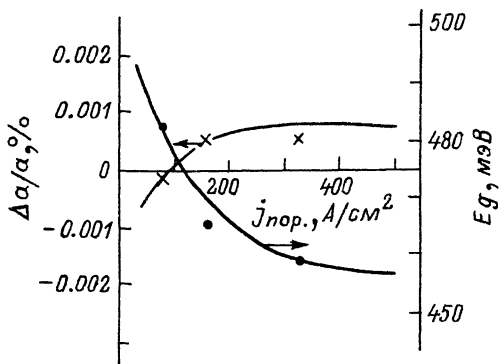


Рис. 1. Зависимость плотности порогового тока от ширины запрещенной зоны ограничивающих слоев $JnAsSbP$ и от несоответствия параметров решетки на гетерогранице $JnAsSbB/$ активный слой $p-JnAs$.

ции тока через гомо $p-p$ -переход в структурах $JnAsSbP/$ $JnAs$ в интервале длин волн 3,6–3,9 мкм. В работе [6] приведены результаты исследования стимулированного излучения в ДГС $p-JnAsSbP/p-JnAs/p-JnAsSbP$ в интервале температур 4,2–110 К с пороговыми токами ~ 3 кА/см² и $\lambda = 3,05$ мкм (77 К).

Настоящая работа посвящена исследованию влияния несоответствия периодов решетки и перепада ширины запрещенной зоны на гетерограницах с активным слоем и плотности наклонных дислокаций на параметры лазерного излучения в ДГС $JnAsSbP/$ $JnAs/JnAsSbP$. Определена критическая величина несоответствия ($\Delta a/a = 0,05\%$) для создания непрерывного инжекционного лазера с $\lambda = 3,1$ мкм при 77 К (пороговый ток ≤ 240 А/см²).

Исследованные ДГС были аналогичны описанным в работе [6], полученным на подложке $p-JnAs$ (111) и (100) с исходной плотностью дислокаций 10^4 см⁻², в которых ограничивающими излучение слоями являлись ЭС $p-JnAs_{1-x-y}Sb_xPy$ и $p-JnAs_{1-x-y}Sb_xPy (Zn)$ с толщинами соответственно 3–7 и 8–15 мкм и составом: $0,05 \leq x \leq 0,06$; $0,09 \leq y \leq 0,13$. Активным слоем был $p-JnAs$ с толщиной 3–5 мкм, специально не легированный в процессе роста. Омические контакты создавались напылением и вжиганием сплавов $(Au + Te)$ и $(Au + Zn)$. Параметры стимулированного излучения измерялись при 77 К на четырехсклотовых образцах размером 200 x 300 мкм².

По данным рентгеновской топографии в образцах наблюдалась регулярная сетка 60°-ных дислокаций несоответствия (ДН). Степень пластической деформации возрастала по мере увеличения рассогласования периодов решетки ЭС и подложки ($\Delta a/a = 0,05-0,2\%$), что приводило к изменению плотности наклонных дислокаций от 10^3 до 10^5 см⁻².

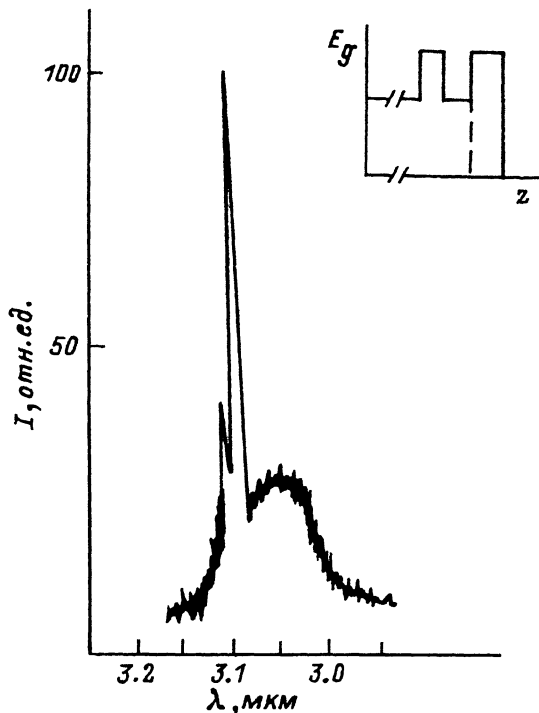


Рис. 2. Спектр инжекционного непрерывного лазера на ДГС $n\text{-JnAsSbP}/n\text{-JnAs}/p\text{-JnAsSbP}$ при 77 К, $j_{\text{пор}} = 240 \text{ А/см}^2$.

Исследовалась зависимость порогового тока при импульсном питании ($\tau = 5 \text{ мкс}$, $f = 500 \text{ Гц}$) от ширины запрещенной зоны ограничивающих слоев и от несоответствия параметров решетки на гетерогранице $p\text{-JnAsSbP}$ – активный слой $p\text{-JnAs}$ (рис. 1). Видно, что при увеличении ширины запрещенной зоны от 450 до 480 мэВ пороговый ток падает от 300 А/см^2 до 80 А/см^2 . При этом величины относительного рассогласования уменьшаются от 0.06 до 0.01 %.

В ДГС с минимальными пороговыми токами (E_g ограничивающего слоя 480 мэВ, $\Delta\alpha/\alpha \approx 0.05 \%$) было реализовано непрерывное стимулированное излучение (см. рис. 2). При этом величина порогового тока составляла 240 А/см^2 ; длина волны излучения $\sim 3.1 \text{ мкм}$ при 77 К.

В работе [7] приводится расчет внутреннего квантового выхода излучательной рекомбинации при лазерном режиме для JnAs в зависимости от температуры. Если при 77 К внутренний квантовый выход превышает 70 %, то при 300 К он падает до 1 %, что является препятствием для работы лазера при ком-

натных температурах. В работе [8] приводится расчет пороговой плотности тока для длинноволновых лазеров на основе A^3B^5 при 77 и 300 К. При 77 К эта величина для излучения ~ 3 мкм составляет 300 А/см^2 (для толщины активной области ~ 3 мкм), которая близка к экспериментально полученной нами величине 240 А/см^2 для непрерывного режима. Это свидетельствует о том, что в исследованных образцах влияние ДН на $J_{\text{пор}}$ незначительно. В работе [9] было показано, что в твердых растворах $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ P_y , близких по составу к арсениду индия, безызлучательная рекомбинация на ДН ($10^3\text{--}10^5 \text{ см}^{-2}$) не велика при малых значениях упругой деформации решетки.

Длина волны излучения при когерентном режиме работы изменялась от образца к образцу в пределах от 3.0 до 3.32 мкм, в спонтанном режиме от 3.06 до 3.23 мкм. Такое изменение количественно пока не объяснено. Его можно связать с изменением ширины запрещенной зоны в активном слое InAs вследствие тетрагонального искажения кристаллической решетки, обусловленного остаточными упругими напряжениями. Дополнительной причиной может являться „сужение“ энергетического зазора вследствие появления хвостов плотности состояний в запрещенной зоне.

Л и т е р а т у р а

- [1] Е с и н а Н.П., З о т о в а Н.В., М а р к о в И.И., М а т в е е в Б.А., Р о г а ч е в А.А., С т у с ь Н.М., Т а л а л а к и н Г.Н. – ЖПС, 1985, т. 42, № 4, с. 591–594.
- [2] G o o d m a n С.Н.L. – Solid State and Electr. Devices, 1972, v. 2, N 3, p. 129–137.
- [3] К е й с и Х., П а н и ш М. Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981, т. 2.
- [4] З о т о в а Н.В., К а р а н д а ш е в С.А., М а т в е е в Б.А., С т у с ь Н.М., Т а л а л а к и н Г.Н. – Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 23, с. 1444–1447.
- [5] А й д а р а л и е в М., З о т о в а Н.В., К а р а н д а ш е в С.А., М а т в е е в Б.А., С т у с ь Н.М., Т а л а л а к и н Г.Н. – Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 6, с. 329–331.
- [6] А й д а р а л и е в М., З о т о в а Н.В., К а р а н д а ш е в С.А., М а т в е е в Б.А., С т у с ь Н.М., Т а л а л а к и н Г.Н. – Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 9, с. 563–565.
- [7] S u g i m u r a А. – J. Appl. Phys., 1980, v. 51, N 8, p. 4405–4411.
- [8] S u g i m u r a А. – IEEE J. Quantum Electr., 1982, v. QE-18, N 3, p. 352–363.

[9] М а т в е е в Б.А., П е т р о в В.И., С т у с ь Н.М.,
Т а л а л а к и н Г.Н., Ш и б а л и н А.В. - ФТП, 1987,
т. 21, № 7, с. 1244-1247.

физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
4 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 17 12 сентября 1988 г.

НЕРАВНОВЕСНАЯ СМЕСЬ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО И КУБИЧЕСКОГО Ge , ВЫЯВЛЯЮЩАЯСЯ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ $\alpha-Ge$. БЛИЖНИЙ И ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ПОРЯДКИ В $\alpha-Ge$

В.Д. О к у н е в, З.А. С а м о й л е н к о

Несмотря на значительные успехи в изучении аморфных Ge и Si ($\alpha-Ge$, Si) [1, 2], в данной проблеме остается еще много неясного, связанного прямо или косвенно с сохраняющейся неопределенностью представлений о структуре данных материалов. При ее описании в рамках различных моделей для согласования экспериментальных и расчетных данных по дифракции приходится использовать элементы структуры, не свойственные кристаллу [1-3]. Последние могут быть в принципе выявлены на начальной стадии кристаллизации. Однако при кристаллизации $\alpha-Ge$, Si на дифракционной картине образцов обнаруживались только линии, свойственные нормальной кубической структуре. Вместе с тем, учитывая опыт многочисленных исследований, посвященных кристаллизации аморфных веществ различного состава, нельзя не обратить внимание на странный характер изменения дифракционной картины в процессе кристаллизации $\alpha-Ge$, Si . Кристаллизация $\alpha-Ge$, Si , структура которых характеризуется двумя диффузными максимумами (гало I и II), начинается с появления трех линий: (III) в центре гало I и (220), (311) на склонах гало II [3, 4]; в центре гало II линий нет. Странность изменения дифракционной картины заключается в том, что при последующем развитии кристаллизации, когда линии появляются по всей дебаеграмме, ни одна из них не попадает в центральную часть гало II. Отсюда следует опасение об утере значительной информации о структурных превращениях в пленках, без учета которой построение адекватной модели структуры аморфных Ge и Si оказывается невозможным.

Цель настоящей работы заключалась в детальном исследовании кристаллизации $\alpha-Ge$, связанном с поиском метастабильных