

изменяющихся начальных радиусах линзы R и $H/R=0.3$ показаны на рис.2.

Установлено, что при значении H/R более 0.5 для энергии рентгеновских фотонов 15 кэВ и случая бесконечного источника рентгеновские линзы не являются адиабатическими. Фокусное расстояние адиабатических микрокапиллярных линз уменьшается с уменьшением радиуса первой линзы и ограничивается максимальной длиной пути луча в веществе линзы и дифракцией. Расчеты показывают, что возможно изготовить адиабатическую микрокапиллярную линзу, характеризующуюся фокусным расстоянием менее 10 см.

Разработанное программное обеспечение “X-ray - AMRXL” позволяет рассчитывать геометрические размеры адиабатических микрокапиллярных рентгеновских линз и их рентгенооптические характеристики. Установлено, что адиабатическая микрокапиллярная линза имеет минимальное фокусное расстояние для энергий рентгеновских фотонов 15 кэВ.

Литература

1. *Schroer C. G., Lengeler B. Focusing Hard X Rays to Nanometer Dimensions by Adiabatically Focusing Lenses.*, Hamburg, Germany. 2005.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОРОГА ГЕНЕРАЦИИ ГЕТЕРОЛАЗЕРА В СИСТЕМЕ GAINASSB–ALGAASSB

Е. П. Сачков, В. М. Стецик, И. С. Манак

ВВЕДЕНИЕ

Величина порогового тока полупроводниковых инжекционных лазеров – одна из важных характеристик этих приборов. Как известно, с повышением температуры порог генерации возрастает. В общем случае график $j_{th}(T)$ можно разбить на два или три участка: от предельно низких температур до T_1 – участок постоянного или медленного роста $j_{th}(T)$, от T_1 до T_2 – пологий участок экспоненциального роста j_{th} , выше T_2 – участок более крутого экспоненциального роста. Второй и третий участки зависимости $j_{th}(T)$ аппроксимируются формулой

$$j_{th}(T \geq T_i) = j_{th}(T_i) \exp \frac{T - T_i}{T_{0i}} \sim \exp \frac{T}{T_{0i}}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2$; T_{0i} – параметры аппроксимации. Очевидно, чем меньше T_{0i} , тем быстрее увеличивается порог с ростом температуры. Параметры T_{0i} служат индивидуальной характеристикой каждого лазера [1].

Исследованию температурной зависимости порогового тока лазеров на основе гетероструктур с квантовыми ямами посвящено большое количество работ, например, [2–4]. В настоящей работе измерена плотность порогового тока и определена характеристическая температура для лазерных гетероструктур на основе GaInAsSb-AlGaAsSb в диапазоне температур 250–320.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальные исследования проводились на полупроводниковых лазерах на основе напряженной гетероструктуры GaInAsSb-AlGaAsSb с квантовыми ямами [5]. Длина волны излучения лазерных образцов при комнатной температуре составляет $\lambda = 2.38$ мкм. Параметры лазерных диодов следующие: длина резонатора Фабри-Перо $l = 1.56$ мм, ширина полоскового контакта $w = 100$ мкм, пороговый ток в импульсном режиме при комнатной температуре $I_{th} = 220$ мА.

На рисунках 1 и 2 приведены измеренные вольт- и ваттамперные характеристики исследуемого лазера. Рабочая температура полагалась равной 300 К.

Измерение порогового тока проводилось в температурном диапазоне 254–315 К в двух режимах: охлаждения и нагревания. В режиме охлаждения рабочую температуру понижали от 288 до 254 К, в режиме нагрева ее повышали от 254 до 315 К. Измерения проводились с помощью электронного осциллографа «Bordo».

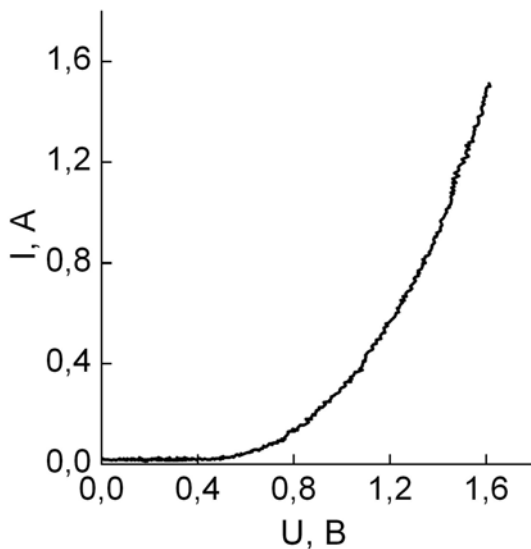


Рис.1. Вольтамперная характеристика лазерного диода GaInAsSb-AlGaAsSb

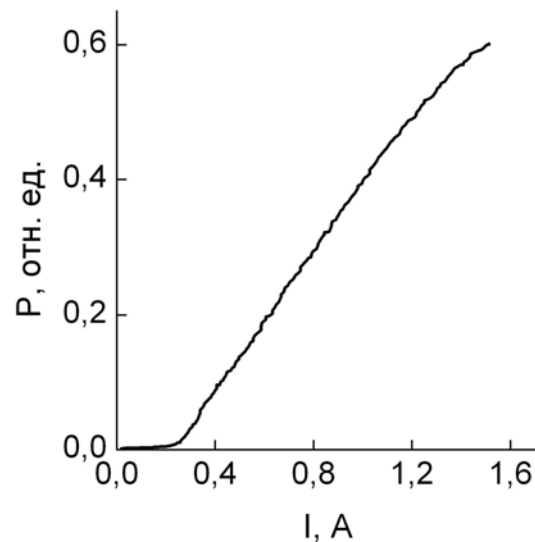


Рис.2. Ваттамперная характеристика гетеролазера GaInAsSb-AlGaAsSb

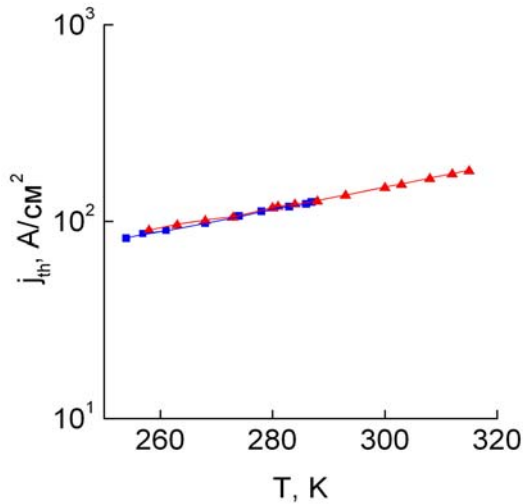


Рис.3. Температурная зависимость плотности порогового тока лазерного диода на основе гетероструктуры GaInAsSb–AlGaAsSb: ■ –режим охлаждения, ▲ –режим нагрева

На рисунке 3 представлена зависимость плотности порогового тока от температуры. Для исследуемого лазера наблюдается практически экспоненциальная зависимость $j_{th}(T)$ с одним характеристическим параметром T_{01} .

Следует иметь в виду, что рабочая температура активной области может отличаться от измеренной температуры на некоторую величину. Отметим, что в процессе измерений термомпара, с помощью которой определялась рабочая температура, не имела непосредственного контакта с активной областью.

Это может отразиться на полученной зависимости $j_{th}(T)$. Однако, по-видимому, существенные изменения наблюдаемой температурной зависимости порога генерации будут проявляться при более высоких температурах $T > 320$ К.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С помощью формулы (1) по экспериментальным данным рассчитаны значения характеристической температуры для шести областей рабочих температур. Данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1

T , К	T_0 , К	$\langle T_0 \rangle$, К
260	79,8	76,1
270	77,2	
280	71,3	
293	72,8	
300	77,3	
315	78,1	

Среднее значение характеристической температуры для данного типа лазеров оказалось равным $\langle T_0 \rangle = 76,1$ К. Это свидетельствует о достаточно сильной зависимости порога генерации от температуры в диапазоне 260–320 К. Причем в этом диапазоне рабочих температур можно использовать одно значение характеристической температуры.

В полупроводниках при высоких уровнях возбуждения носителей преобладают два процесса рекомбинации: излучательная рекомбинация и безызлучательная ударная рекомбинация (оже-процесс). При высоких температурах безызлучательные процессы уменьшают квантовый выход люминесценции, что увеличивает пороговый ток лазеров. Скорость оже-рекомбинации влияет не только на значение порогового тока лазера, но и отражается на его температурной зависимости. Чем выше скорость оже-рекомбинации, тем меньше характеристическая температура и хуже температурная стабильность лазера. Следовательно, можно сделать вывод, что в полупроводниковых лазерах на основе гетероструктуры GaInAsSb–AlGaAsSb при температурах выше 260 К существенна роль безызлучательных оже-процессов и их влияние на пороговый ток. Ослабление влияния безызлучательных оже-процессов на порог генерации возможно при изготовлении лазеров на основе асимметричных многослойных квантоворазмерных гетероструктур [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены исследования температурной зависимости порогового тока в лазерной гетероструктуре на основе GaInAsSb–AlGaAsSb в диапазоне температур 254–315 К. Величина характеристической температуры T_0 составляет порядка 80 К, что может быть обусловлено высокой скоростью оже-рекомбинации в активной области квантоворазмерной гетероструктуры.

Авторы выражают благодарность Кононенко В. К. за интерес к работе и полезное обсуждение результатов.

Литература

1. Грибковский В. П., Полупроводниковые лазеры. Мн., 1988.
2. Suchalkin S. et al., Mechanism of the temperature sensitivity of mid-infrared GaSb-based semiconductor lasers, Appl. Phys. Lett. 87, no. 4 (2005): 041102.
3. Баженов Н. Л. и др., Температурная зависимость порогового тока лазеров на квантовых ямах, ФТП 39, № 10 (2005): 1252–1256.
4. Adamiec P et al., Threshold currents under pressure in InGaAsSb/AlGaAsSb laser diodes, Phys. stat. sol. b 244, no. 1 (2007): 187–191.
5. Joullie A., Christol P., GaSb-based mid-infrared 2–5 μm laser diodes, C. R. Physique 4, no. 6. (2003): 621–637.
6. Kononenko V. K., Ushakov D. V., Sukhoivanov I. A., Mashoshina O. V. Control of influence of Auger recombination on the threshold in asymmetric quantum-well lasers, Proc. LFNM 2004, Kharkiv (2004): 107–111.