

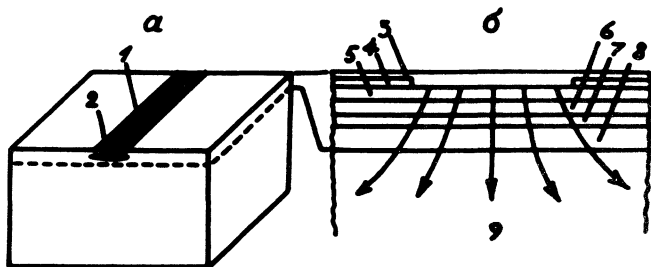
НЕПРЕРЫВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ  
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ  
ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Л. М. Долгинов, Л. В. Дружинина,  
П. Г. Елисеев, И. В. Красавин, Л. Д. Либов

Достижение непрерывного режима генерации в полупроводниковых лазерах при комнатной температуре /1-3/ стало возможным благодаря использованию симметричных (двойных) гетероструктур  $(Al, Ga)As-GaAs-(Al, Ga)As$ . В таких лазерах пороговая плотность тока ниже, чем в несимметричных гетероструктурах и обычных лазерах на p-n переходах, по крайней мере, на порядок величины /1,4/ и может составлять около 1 ка/см<sup>2</sup>. Однако постоянный ток плотностью несколько ка/см<sup>2</sup> вызывает довольно сильный разогрев диода, который может препятствовать получению непрерывной генерации вследствие роста порога с температурой. Таким образом, в лазерах непрерывного действия необходимо использовать наиболее низкопороговые диоды и создавать исключительно благоприятные условия теплоотвода от активной области. Это, например, достигается использованием диодов с малой толщиной p-областей и электродных материалов с высокой теплопроводностью, таких как алмаз /2/. В настоящем сообщении приводятся основные характеристики инжекционных лазеров на симметричных гетероструктурах с полосковой геометрией (показанных на рис. 1), работающих в непрерывном режиме при 300°K.

Гетероструктуры изготавливались методом жидкостной эпитаксии из растворов в галлии. На подложку

$n\text{-GaAs}$ , ориентированную по плоскости (100), наращивался слой  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , легированный оловом, толщиной 2 + 5 мкм ( $n$ -эмиттер), затем слой  $n\text{-GaAs}$  (нелегированный) или  $p\text{-GaAs}$ , легированный германием (активный слой) толщиной от 0,4 до 1,2 мкм, затем слой  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , легированный германием,



Р и с. 1. (а) Структура гетеролазера с полосковой геометрией. 1 - диод с полосковым контактом; 2 - светящаяся область на зеркале; штриховой линией обозначена граница гетероструктуры. (б) разрез гетероструктуры и контакта; 3 - слой металлического сплава  $\text{Au}+\text{In}$ ; 4 - маска  $\text{SiO}_2$ ; 5 - контактный слой  $p\text{-GaAs}$ ; 6 -  $p$ -эмиттер  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ; 7 - активный слой; 8 -  $n$ -эмиттер  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ; 9 - подложка  $\text{GaAs}$ .

толщиной 1,7 + 2,5 мкм ( $p$ -эмиттер), наконец, четвертый слой  $p\text{-GaAs}$  (с германием) для обеспечения низкоомного контакта толщиной не более 2 мкм. Иногда для уменьшения толщины последнего слоя проводилось легкое травление поверхности после выращивания. На  $p$ -сторону изготовленных таким путем многослойных гетероструктур осаждалась пленка  $\text{SiO}_2$ , в которой фотолитографическим способом вытравливались полоски шириной 15 мкм в направлении  $[110]$ , т.е. перпендикулярно плоскостям спайности кристалла. Затем на обе стороны пластинки наносились вакуумным распылением и вжигались слои золота и индия.

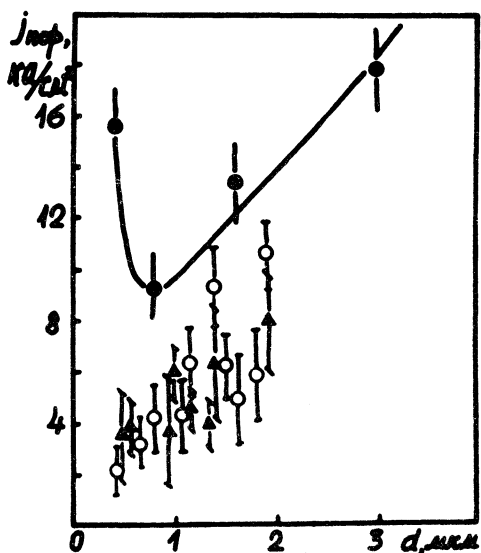
Предварительное исследование гетероструктур состояло в точном определении толщины слоев с помощью растрового электронного микроскопа и определении состава твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}As$  в эмиттерных слоях с помощью рентгеновского микроанализатора. Типичное значение  $x$  было от 0,2 до 0,4.

Резонаторы Фабри-Перо изготавливались скалыванием по спайности; боковые поверхности также скалывались. Диоды крепились в прижимных держателях /5/. Благодаря ограничению контакта к  $p$ -области с помощью маски  $SiO_2$  и малой толщине  $p$ -слоев ток возбуждалась лишь часть активной области в виде полосы от одного зеркала резонатора до другого. Измерения светящейся области показали, что основная мощность накачки выделяется в полосе шириной 18–20 мкм.

Влияние толщины активной области на пороговую плотность тока можно видеть на рис. 2, где приведены данные для симметричных гетероструктур с активной областью  $n$ - и  $p$ -типа и для несимметричных гетероструктур. В изученном интервале толщины наиболее низкие значения пороговой плотности тока (до величины от 1 до 2  $ка/см^2$ ) наблюдаются в симметричных гетероструктурах с обоими типами проводимости в активном слое при толщине его меньше 1 мкм. В отличие от них, в несимметричных гетероструктурах при толщинах менее 0,8 мкм порог резко возрастает /6/.

Непрерывная генерация наблюдалась на ряде образцов из разных исходных пластин. Длина резонатора была от 198 до 425 мкм. Длина волны была от 8650 до 8900 Å. Использовались медные держатели без принудительного охлаждения. На рис. 3 показана выходная мощность лазера в непрерывном режиме в зависимости от тока через диод (кривая 1). Для сравнения показана мощность в некогерентном режиме в совершенно идентичном диоде, не достигшем порога генерации (кривая 2). Пороговый ток 230 ма соответствовал плотности тока через контакт, равной 6470  $а/см^2$  и объемной пороговой накачке в активном слое

$7,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>3</sup> (объем активной среды составляет в данном случае  $4,3 \cdot 10^{-9}$  см<sup>3</sup> при объеме диода  $5,7 \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup> и весе 0,03 мг). В режиме максимального выхода с одного торца получено 3,2 мвт; при этом накачка в

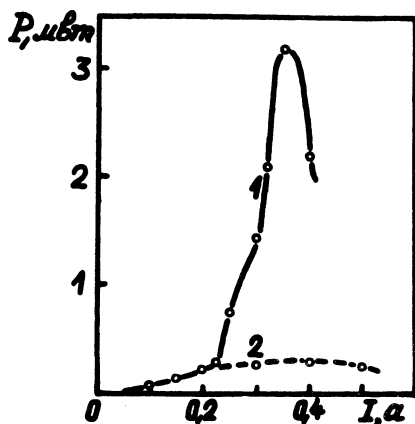


Р и с. 2. Влияние толщины активного слоя  $d$  на пороговую плотность тока при 300°К в гетеролазерах: ● - с несимметричной структурой, ○ - с симметричной структурой и нелегированной активной областью, ▲ - с симметричной структурой и активной областью р-типа, легированной германием.

1,5 раза выше пороговой. Эта выходная мощность более чем на порядок превышает выход в некогерентном режиме, но в три раза меньше, чем выход в импульсном режиме при том же токе. Остаточное сопротивление диода составило 1,85 ома и полное падение напряжения на диоде в режиме максимального выхода было 2,08 в. Джоулевы потери составляли 30% подводимой мощности. Полный КПД диода (с учетом излучения в

обе стороны) был около 1%. Плотность потока излучения на торце диода составила  $1,8 \cdot 10^4$  вт/см<sup>2</sup>.

Непрерывная генерация в других диодах наблюдалась при пороговых токах от 0,2 до 0,8 а; максимальная плотность тока через контакт, при которой можно



Р и с. 3. Выходная мощность излучения  $P$  в зависимости от тока через диод  $I$  в лазере непрерывного действия (1) и некогерентном диоде (2) при 300°К. Ширина контактной полоски 15 мкм; длина резонатора 237 мкм.

было наблюдать генерацию, составила около  $2 \cdot 10^4$  а/см<sup>2</sup>, однако при таком токе диод деградирует за короткое время. Важную роль играет толщина базы (от контактной поверхности до  $p-n$  перехода). Если эта толщина более 5 мкм, то ограничение контакта маской  $SiO_2$  играет вредную роль, увеличивая джоулевы потери (при данной ширине полоски). Требование малости этой толщины играет важную роль как с точки зрения оптимального возбуждения активной области (малого растекания тока), так и с точки зрения улучшения теплоотвода, который в данном случае практически осуществляется с одной стороны. Ранее было показано /7/, что диоды с полосковой геометрией имеют преимущество в том,

что в них реализуется наиболее простая для полупроводниковых лазеров структура типов колебаний.

Необходимыми условиями получения непрерывной генерации являются, таким образом, (1) низкие значения пороговой плотности тока, достижимые пока только в симметричных гетероструктурах, (2) малая толщина базы диода (т.е. слоев между активной областью и контактом), (3) малое последовательное сопротивление диода (приведенное к единице площади активной области). В настоящее время можно указать следующие конкретные значения упомянутых параметров: пороговая плотность тока — не более  $8 + 10$  ка/см<sup>2</sup>, толщина базы — не более 3,5 мкм, приведенное последовательное сопротивление — не более  $10^4$  ом см<sup>2</sup>. Диоды с полосковой геометрией имеют перед обычными диодами с однородным контактом значительное преимущество.

Поступила в редакцию  
28 декабря 1970 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, Д. З. Гарбузов, Ю. В. Жилиев, Е. П. Морозов, Е. Л. Портной, В. Г. Трофим. ФТП, 4, 1826 (1970).
2. I. Hayashi, M. V. Panish, P. W. Foy, S. Sumski. *Appl. Phys. Lett.*, 17, 109 (1970)
3. И. К. Бронштейн, Л. М. Долгинов, Л. В. Дружинина, П. Г. Елисеев, И. В. Красавин, Л. Д. Либов. Краткие сообщения "Цветметинформация", ГИРЕДМЕТ, Сер. У, № 52 (1970).
4. П. Г. Елисеев. "Краткие сообщения по физике", № 4, 3 (1970).

5. Б. И. Белов, П. Г. Елисеев, Ю. П. Захаров, И. Исмаилов, В. П. Страхов. ПТЭ, № 2, 187 (1968).
6. Л. М. Долгинов, П. Г. Елисеев, Л. Д. Либов, И. З. Пинскер, Е. Г. Шевченко. "Краткие сообщения по физике", № 9, 9 (1970).
7. T. H. Zachos, J. E. Ripper. **IEEE J. Quant. Electron.**, QE-5, 29 (1969).