

лов Б.Н., Шевченко В.Г., Шешкова Г.В. -
Квантовая электроника, 1980, т. 7, № 9, с. 1990-1992.

[4] Hsieh J.J., Shen G.C. - Appl. Phys. Lett.,
1977, v. 30, N 8, p. 429-431.

[5] Matoba A., Oshiba S., Hozikawa
H., Imanaka K., Kawai Y. -
ЮОС-ЕСОС 85, Venezia, 1985, p. 148-149.

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

Поступило в Редакцию
27 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 2

26 января 1988 г.

ЭФФЕКТИВНЫЙ ЛАЗЕР НА СЕЛЕНИДЕ ЦИНКА, РАБОТАЮЩИЙ ПРИ $T = 300$ К

В.Я. Жулай, Т.Ю. Иванова,
Н.Н. Костин, Е.М. Красавина,
И.В. Крюкова, В.А. Новожилов,
Г.Т. Петровский

Последнее время достигнуты определенные успехи в создании мощных импульсных неохлаждаемых полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком [1]. Особый интерес представляют лазеры на основе соединений A^2B^6 , излучающие в сине-зеленой области спектра. Эти кристаллы также используются для создания лазерных экранов в электронно-лучевых трубках, на основе которых создаются системы проекционного телевидения [2]. Однако, если на лучших образцах сульфида кадмия при $T = 300$ К ($\lambda_r = 525$ нм) достигнуты КПД лазера 8-10% [1] (продольная геометрия накачки), то на кристаллах селенида цинка ($\lambda_r = 475$ нм) значения КПД оказались более низкими. Это связано с меньшим внутренним квантовым выходом излучения кристаллов селенида цинка, обусловленных несовершенством методов получения этого материала. Обычно кристаллы селенида цинка (независимо от способа их выращивания) имеют проводимость n -типа. Но они оказываются сильно компенсированными и высокоомными за счет высокой концентрации акцепторов, обусловленных присутствием большого числа вакансий цинка. Известным способом залечивания этих дефектов является отжиг в цинке [3] (в жидкой или газообразной фазе). В [2] показано, что отжиг кристаллов селенида цинка в жидком цинке (температура отжига 950 °С) позволил повысить КПД лазерных электронно-лучевых трубок, работающих при охлаждении жидким азотом, до 8-10%. Однако при комнатной температуре лазерное излучение было получено только на отдельных образцах с КПД не выше 3%.

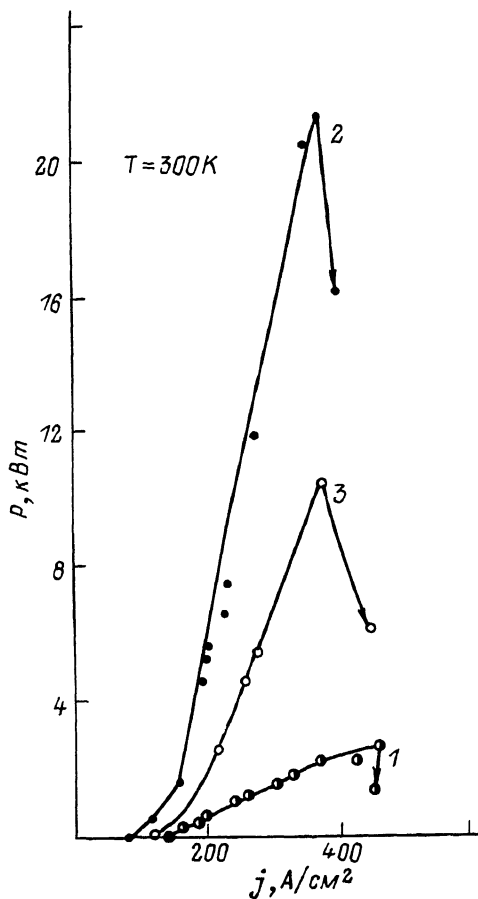
Ватт-амперные характеристики монокристалла селенида цинка: 1 - полученного из расплава под давлением паров цинка; 2 - полученного из расплава под давлением паров цинка после химического полирующего травления; 3 - полученного из расплава с последующим отжигом в жидком цинке.

В данной работе впервые сообщается о реализации высокоэффективного не охлаждаемого импульсного лазера с КПД = 14% на основе монокристаллов селенида цинка, выраженных при постоянном давлении паров цинка и не требующих дополнительного отжига.

Характеристики лазерного излучения монокристаллов селенида цинка исследовались при возбуждении электронным пучком с энергией 200 КэВ, длительностью импульса 10^{-8} с без специального охлаждения (режим одиночных импульсов). Использовалась продольная геометрия накачки. Кристаллы в виде плоскопараллельных, полированных с двух сторон пластин толщиной 150-200 мкм помещались между глухим (со стороны электронного пучка) R_1 и полупрозрачным (со стороны выходного излучения) R_2 зеркалами резонатора. Возбуждение электронами осуществлялось через круглую диафрагму диаметром 0.5 мм.

Было установлено, что после механического полирования на пластинах имеется нарушенный приповерхностный слой глубиной 15-20 мкм, удаление которого химически полирующим травлением приводит к значительному (в несколько раз) росту КПД лазера, а также к существенному снижению порога генерации (в 1.5-2 раза), к повышению (в 7-10 раз) оптической стойкости кристалла к воздействию собственного лазерного излучения.

На рисунке представлены ватт-амперные характеристики (ВАХ) кристалла селенида цинка, полученного под давлением паров цинка



Исходный материал	Отжиг	Обработка поверхности	Порог генерации, А/см ²	КПД, % при $J_{нак} = 350$ А/см ²	η_d , %	$P_{кр}$, МВт/см ²
Селенид цинка, выращенный под давлением паров цинка	без отжига	хим. полир.	100	14	22.5	10.7
Селенид цинка, выращенный под давлением паров цинка	без отжига	мех. полир.	150	1.4	2.5	1.2
Селенид цинка, выращенный из расплава	отжиг в расплаве цинка	хим. полир.	150	6.4	11.2	5.2

до (кривая 1) и после (кривая 2) химического полирующего травления. Для сравнения приведена ВАХ одного из лучших кристаллов селенида цинка, выращенных из расплава с последующим отжигом в жидком цинке (кривая 3). В таблице приведены параметры излучения образцов.

Результаты исследований показали, что выращивание монокристаллов селенида цинка при постоянном давлении цинка позволяет резко улучшить характеристики лазера, работающего без охлаждения: КПД возрос более чем в 2 раза и достиг 14%, дифференциальная эффективность увеличилась более чем в 2 раза и возросла до 22.5%, оптическая плотность повысилась в 2 раза и составила 10.7 МВт/см², порог генерации снизился в 1.5-2 раза и стал равен 80-90 А/см².

Улучшение параметров лазера на основе селенида цинка, выращенного под давлением паров цинка, мы связываем не только со значительным улучшением стехиометрии кристаллов за счет снижения концентрации вакансий цинка, но и за счет общего улучшения чистоты и совершенства структуры кристаллов. (В исследуемых образцах плотность дислокаций снизилась с $N_d \approx 10^5$ см⁻² до $N_d \approx 10^3-10^4$ см⁻²). Кроме того, то обстоятельство, что образцы селенида цинка стали низкоомными, указывает на введение в кристаллы значительного количества мелких донорных центров. В работе [4] на примере кристаллов сульфида кадмия показано, что присутствие в кристаллах мелких донорных и акцепторных уровней приводит к резкому увеличению КПД и снижению порогов генерации лазеров при $T = 300$ К. В таких кристаллах генерация была обусловлена не экситонными либо межзонными механизмами, а чисто примесным. Согласно расчетам [5], порог генерации для переходов через мелкие примесные состояния в другом соединении A^2B^6 при 300 К снижается практически на порядок по сравнению с чистыми и специально нелегированными кристаллами. Мы предполагаем,

что аналогичный эффект вследствие „самолегирования“ селенида цинка за счет собственных точечных дефектов (например, междоузельных атомов цинка, который образует донорные уровни) наблюдается и в кристаллах селенида цинка, выращенных под давлением паров цинка.

Л и т е р а т у р а

- [1] Богданкевич О.В., Зверев М.М., Костин Н.Н., Копыт С.П., Красавина Е.М., Крюкова И.В., Матвеевко Е.В., Певцов В.Ф., Ушахин В.А., Якушин В.К. - Квантовая электроника, 1985, т. 12, № 7, с. 1517-1519.
- [2] Ахекян А.М., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Насибов А.С., Попов Ю.М., Шапкин П.В. - Квантовая электроника, 1985, т. 12, № 5, с. 1113-1115.
- [3] A v e n M., W o o d b u r y H.H. - Appl. Phys. Lett., 1962, v. 1, N 3, p. 53-54.
- [4] Крюкова И.В., Купряшина Е.С., Прокофьева С.П. - Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, № 9, с. 525-531.
- [5] Крюкова И.В., Прокофьева С.П. - ЖТФ, 1982, т. 52, № 10, с. 2097-2099.

Поступило в Редакцию
16 июля 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 2

26 января 1988 г.

ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ТРЕХМЕРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

А.В. П р о к о п о в

При анализе распространения волны в неоднородных средах в ряде случаев используются законы преломления - соотношения, которые представляют собой первые интегралы лучевых уравнений геометрической оптики (ГО) и позволяют проследить за ходом лучей в неоднородной среде [1-3]. Однако эти законы (называемые иногда законами преломления Снеллиуса [3]) известны лишь для частных случаев плоскостной и сферически-слоистой сред, что существенно ограничивает возможности их эффективного практического применения.

В связи с этим в настоящей работе предпринята попытка обобщения законов преломления на случай произвольных (трехмерно-неоднородных) сред, в частности земной атмосферы. При этом используется метод, предложенный в [4] и базирующийся на переходе от известной дифференциальной формы лучевых уравнений [1] к уравнениям для усредненных вдоль лучей величин.