

06.3;07;12

©1994

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-СВЕТОВОГО ОТЖИГА ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ СУЛЬФИДА КАДМИЯ

Е.А.Жуков, М.М.Зверев, Е.М.Красавина, М.О.Рижель

Электронно-световой отжиг дефектов в приповерхностных слоях пластин сульфида кадмия был впервые предложен в работе [1] в качестве объяснения эффекта существенного увеличения эффективности полупроводникового CdS лазера с накачкой импульсным электронным пучком при определенном уровне возбуждения.

Основными характерными особенностями этого эффекта были следующие:

— многоступенчатое возрастание мощности лазера в 2–3 раза за несколько электронных импульсов определенной интенсивности;

— устойчивый необратимый характер эффекта;

— пороговый характер эффекта;

— участие в эффекте как электронного пучка, так и собственного лазерного излучения.

Предполагалось, что это явление связано с процессами, происходящими в приповерхностном слое активного элемента толщиной 15–30 мкм, в котором имеются структурные дефекты, внесенные при механической обработке пластины. При удалении дефектного слоя полирующим травителем эффект скачкообразного возрастания мощности исчезал, а дифференциальная квантовая эффективность лазера на основе такого кристалла после травления так же, как и после электронного облучения, возрастала в 2–3 раза.

Целью данной работы было выявление возможных модификаций структуры приповерхностных слоев активного элемента лазера с электронной накачкой на основе сульфида кадмия в результате его работы в режиме предполагаемого радиационного отжига.

Нами были исследованы люминесцентные и структурные характеристики кристаллов CdS до и после электронно-светового отжига. Параметры электронного пучка соответствовали рабочим режимам лазера: ускоряющее напряжение 200 кВ, плотность тока в электронном пучке до 600 А/см^2 , длительность импульса 10 нс, частота повторения не более 1 Гц.

Учас- ток	Диа- метр участ- ка, мм	Коли- чество импуль- сов об- лучения	Плот- ность тока эл. пучка $j_{обл},$ A/cm^2	Плотность лазерной мощности $P_{лаз},$ $MВт/cm^2$		Отношение интенсивности ФЛ $I_r/I_z,$ отн.ед.	
				до обл.	после обл.	до обл.	после обл.
1	0.5	10	550	2.0	4.0	1.1	2.2
2	0.5	13	270	1.0	1.0	1.2	1.3
3	0.5	18	350	1.5	1.5	1.3	1.3
4	0.5	12	550	2.0	4.0	0.9	1.6
5	1.5	10	550	—	—	1.4	0.76
6	1.5	—	—	—	—	1.1	1.0

Исследуемые образцы представляли собой плоскопараллельные, механические полированные с двух сторон пластины CdS толщиной 200 мкм. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) образцов до и после отжига регистрировались на двойном решеточном монохроматоре ДФС-24 фотоэлектрическим способом с применением синхронного детектирования. Возбуждение ФЛ осуществлялось непрерывным излучением аргонового лазера ЛГН-401 ($\lambda = 4765 \text{ \AA}$) мощностью 15 мВт с использованием механического прерывателя с частотой 400 Гц.

Измерения ФЛ проводились при охлаждении жидким азотом. Исследуемый образец имел на поверхности маску с шестью диафрагмами диаметром 0.5 мм (участки 1–4) и 1.5 мм (участки 5 и 6). При этом участки 1–4 после измерения ФЛ подвергались совместному воздействию электронов и собственного лазерного излучения, но участки 1 и 4 в режиме, соответствующем отжигу, а участки 2 и 3 — при уровне накачки, когда интенсивность излучения $P_{лаз} \approx 0.5 P_{отж}$. Два участка с большим размером диафрагмы (1.5 мм) были контрольными. Участок 5 облучался электронным пучком с уровнем возбуждения, соответствующем участкам 1 и 4, но не подвергался воздействию лазерного излучения, которое в нем не возникало из-за сброса инверсии вдоль поверхности пластины. Участок 6 вообще не облучался.

Условия облучения приведены в таблице. Спектры ФЛ представлены на рис. 1. Из сравнения этих спектров следует, что на участках 1 и 4, которые облучались в режимах электронно-светового отжига, наблюдается изменение соотношения интенсивностей голубой I_r и зеленой I_z полос ФЛ

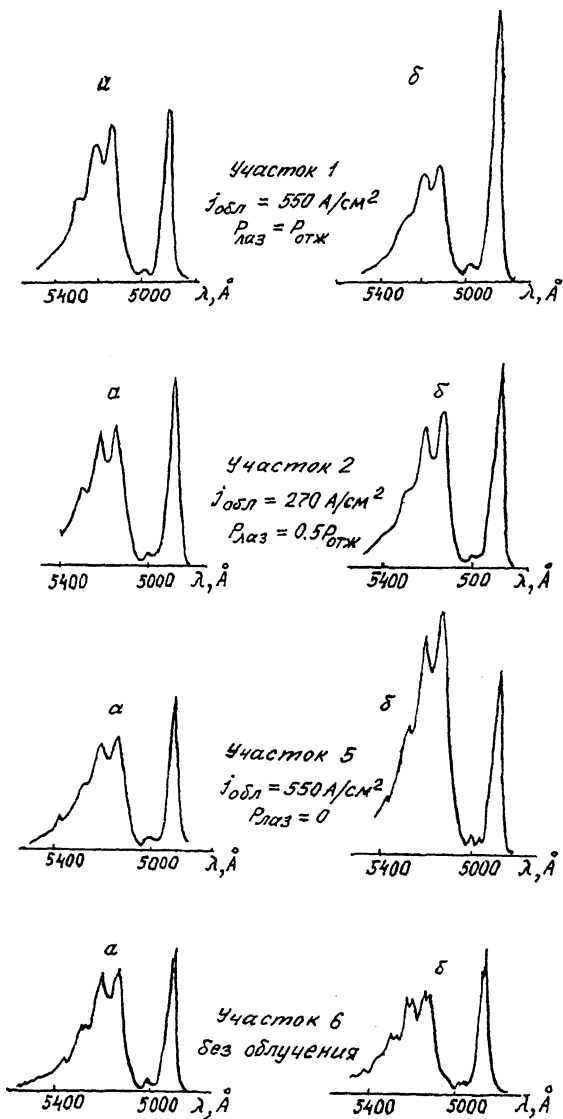


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции различных участков кристалла CdS до (а) и после (б) облучения электронным пучком в различных режимах.

в пользу интенсивности голубой полосы примерно в два раза. В то же время на других участках, также облучаемых в лазерном режиме, но при вдвое меньшей плотности тока, это соотношение практически не изменялось (участки 2 и 3). Таким образом, подтверждается пороговый характер отжига. На участке 5, облученном в отсутствие лазерного режима, соотношение интенсивностей полос ФЛ изменилось в обратную сторону, т.е. без участия лазерной генерации отжига не наблюдается, а на контрольном участке 6, как и следовало ожидать, не наблюдается существенных изменений, что исключает возможность случайных эффектов.

Известно, что соотношение интенсивностей полос краевой ФЛ в CdS характеризует его частоту и кристаллическое совершенство.

Высокая интенсивность экситонной голубой полосы ФЛ по отношению к зеленой полосе, связанной с дефектами структуры, свидетельствует о более высоком совершенстве кристалла. В нашем эксперименте увеличение интенсивности голубой ФЛ по отношению к зеленой на участках 1 и 4, где наблюдался электронно-световой отжиг, подтверждает предположение о снижении концентрации дефектов в поверхностном слое, что обуславливает снижение эффективности безызлучательной рекомбинации и повышает выходную мощность лазера в два раза.

Подтверждается пороговый характер отжига — на участках 2 и 3 ($j < j_{отж}$) практически нет изменений в спектрах ФЛ.

Снижение интенсивности голубой ФЛ по отношению к зеленой на участке 5 (без лазерной генерации) можно объяснить возникновением напряжений в кристалле под действием электронного пучка при увеличении диаметра облучаемой области, что ранее наблюдалось в кристаллах CdS [2].

Исследование спектров ФЛ дополняют проведенные нами рентгеновские исследования кристаллической структуры приповерхностных слоев активных элементов до и после облучения. Структура монокристаллов CdS изучалась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0 с использованием монохроматизированного CuK_α излучения. Измерялись кривые качания и дифракции до и после облучения кристалла CdS в режиме электронно-светового отжига (плотность тока пучка электронов $\sim 500 \text{ А/см}^2$, плотность лазерной мощности до отжига $\sim 2.5 \text{ МВт/см}^2$, после отжига $\sim 5 \text{ МВт/см}^2$).

Кривые качания (кривые зависимости интенсивности отражения от угла поворота образца ω) показали, что исходные кристаллы имеют блочную структуру, причем размер блоков, оцененный по изменению количества пиков на кри-

вой качания при изменении площади исследуемого участка, меняется от образца к образцу в пределах от 50 мкм до 1 мм.

На кривых дифракции в соответствии с законом погасания значительную интенсивность имели рефлексы типа $(00l)$ с четными l , однако во всех кристаллах детектировался также “запрещенный” пик (001) с малой интенсивностью ($I_{001}/I_{002} \sim 10^{-3}$), что может свидетельствовать об имеющихся отклонениях от стехиометрии кристалла.

На рис. 2 приведены кривые качания (крайние левые спектры) и кривые дифракции, соответствующие наиболее сильному рефлексу (002) , при отклонении кристалла от отражающего положения по кривой качания (дискретное изменение угла поворота на величину $\Delta\omega$). *Верхний ряд* спектров соответствует образцу до облучения, а *нижний* — после электронно-светового отжига.

Основное характерное отличие этих спектров состоит в том, что до облучения в них с ростом $\Delta\omega$ появляется вторая компонента при значении угла дифракции $2\theta \approx 26.35^\circ$, интенсивность которой меняется значительно слабее, чем у основной компоненты (угол дифракции $2\theta \approx 26.35^\circ$, интенсивность которой меняется значительно слабее, чем у основной компоненты (угол дифракции $2\theta \approx 26.5^\circ$).

Из факта медленного спадания интенсивности второй компоненты с ростом $\Delta\omega$ следует, что она относится к приповерхностной части кристалла, имеющей большую дефектность и разориентацию по сравнению с основным его объектом. После электронно-светового отжига на том же образце CdS не наблюдалось появления пика при $2\theta = 26.35^\circ$ с ростом $\Delta\omega$, что свидетельствует об упорядочении структуры решетки и снижении концентрации дефектов в приповерхностных слоях сульфида кадмия в результате электронно-светового отжига.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что в лазерах с электронной накачкой на основе кристаллов сульфида кадмия имеет место отжиг дефектов, сопровождаемый упорядочением кристаллической структуры в приповерхностном слое активного элемента и обусловленный совместным воздействием электронного пучка и собственного лазерного излучения.

Авторы выражают благодарность К.В.Киселевой за предоставленную возможность проведения рентгеновских измерений.

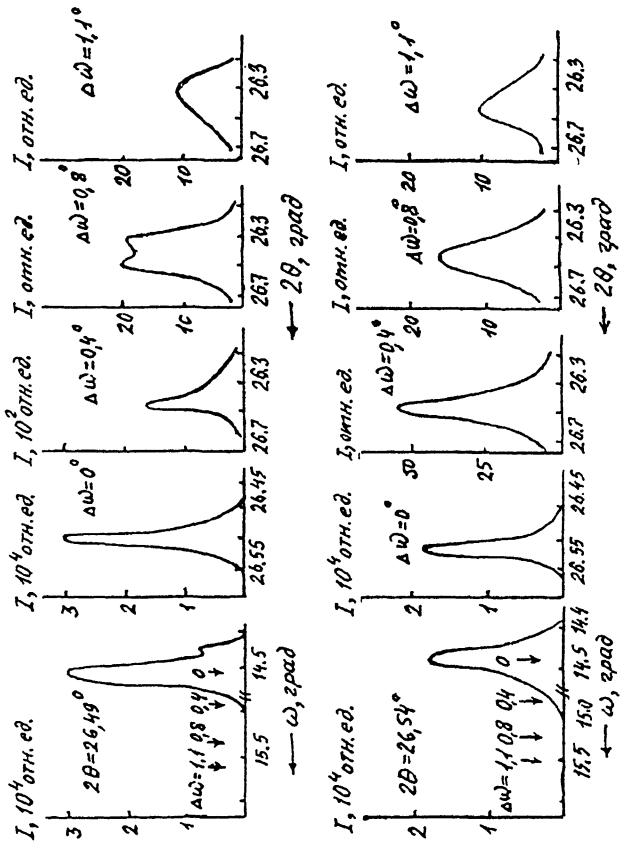


Рис. 2. Кривые качания рефлекса (002) $I(\omega)$ и дифракционные пики (002) $I(2\theta)$ при разных отклонениях $\Delta\omega$ от максимума кривой качания в необлученном (верхний ряд) и облученном (нижний ряд) участках кристалла CdS.

Список литературы

- [1] *Богданкевич О.В., Костин Н.Н., Красавина Е.М., Крюкова И.В., Теплицкий В.А.* // Физика и химия обработки материалов. 1987. В. 4. С. 42-49.
- [2] *Богданкевич О.В., Зверев М.М., Иванова Т.Ю., Костин Н.Н., Красавина Е.М., Крюкова И.В.* // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. В. 10. С. 2132-2135.

Научно-исследовательский центр
по изучению свойств
поверхности и вакуума
Москва

Поступило в Редакцию
14 ноября 1993 г.
