

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА СЕЛЕНИДА ЦИНКА, ЛЕГИРОВАННОГО ИНДИЕМ

Махний В. П., Мельник В. В., Собищанский Б. М.

Селенид цинка является перспективным материалом для создания инжекционных светодиодов, работающих во всем видимом спектральном диапазоне. При этом в первую очередь необходимо решить проблему получения в нем дырочной проводимости [1]. В настоящее время для этих целей используют ряд методов: ионное легирование кристаллов  $n$ -ZnSe акцепторными примесями [2], отжиг в молекулярных [3] либо активированных [4] парах селена, диффузию элементов I или V группы таблицы Менделеева [5, 6]. В этих случаях удается получать слои с дырочной проводимостью  $\sigma_p \approx 10^{-3} \div 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Далее приведены результаты исследования электрических и люминесцентных свойств слоев  $p$ -ZnSe, полученных путем легирования индием.

Исходные монокристаллы ZnSe, выращенные из расплава под давлением и специально не легированные, обладали при 300 К электронной проводимостью  $\sigma_n \approx 10^{-10} \div 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и слабой оранжевой фотолюминесценцией (ФЛ). Образцы (размером  $5 \times 5 \times 2$  мм) отжигались в парах индия при разных температурах (от 1000 до 1300 К) в течение 3 ч. Данные измерений термоэдс и знака выпрямления на точечном контакте свидетельствуют о дырочной проводимости отожженных образцов. Дополнительным подтверждением инверсии типа проводимости служит также тот факт, что к отожженным кристаллам хорошим омическим контактом является напыленный никель, который на образцах  $n$ -ZnSe обладает выпрямляющими свойствами [7]. Результаты рентгеноструктурного анализа и измерений ФЛ свидетельствуют о том, что в результате термообработки на поверхности ZnSe не образуется другого соединения.

На рис. 1 для одного из образцов показана температурная зависимость электропроводности. Энергии активации акцепторных примесей  $\epsilon_a$ , определенные на различных прямолинейных участках этой зависимости, составляют 0,6, 0,17 и 0,09 эВ. Первые два уровня, согласно [1, 2], соответствуют собственно-дефектным акцепторам: положительно заряженной вакансии селена  $V_{\text{Se}}^{2+}$  и отрицательно заряженной вакансии цинка  $V_{\text{Zn}}^-$ . Самый мелкий наблюдаемый уровень с  $\epsilon_a \approx 0,09$  эВ обычно связывают с ассоциатами типа  $V_{\text{Zn}}^- - V_{\text{Se}}^{2+}$  [1]. Электрическая активность того или иного уровня определяется технологическими условиями получения  $p$ -слоя. При этом в исследуемом интервале  $T_{\text{отж}}$  понижение последней приводит к стимулированию активности более мелких акцепторов. Максимальная концентрация свободных дырок в валентной зоне, рассчитанная из величины электропроводности, при 300 К составляет  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . При расчете подвижности принималась равной  $30 \div 50 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  [3].

Эффективность излучательной рекомбинации через акцепторные центры зависит от положения уровня Ферми, определяющего их зарядовое состояние, и от их концентрации. Исходные монокристаллы в области комнатных температур обладали слабой ФЛ, спектр которой представлен широкой асимметричной полосой с максимумом  $\sim 1,95$  эВ (рис. 2). Отжиг образцов в парах индия приводит к резкому увеличению интенсивности ФЛ ( $I$ ), однако ее зависимость от  $T_{\text{отж}}$  носит немонотонный характер. Сложным образом зависит от  $T_{\text{отж}}$  также и спектральное распределение ФЛ. Применение метода Аленцева—Фока [8] позволило выделить при 300 К по крайней мере три полосы с максимумами вблизи 1,95, 2,07 и 2,25 эВ, соотношение между которыми изменяется с изменением  $T_{\text{отж}}$ , уровня возбуждения и температуры измерений. Эти факты свидетельствуют о сложной зависимости процессов дефектообразования в  $p$ -ZnSe от техно-

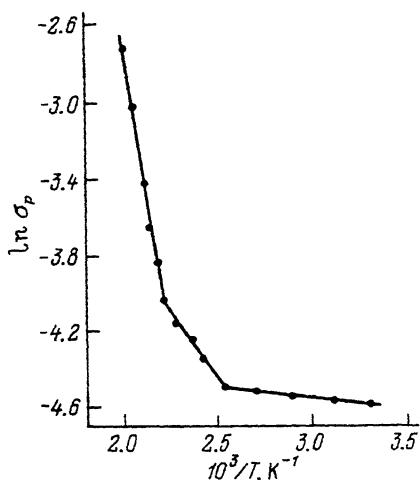


Рис. 1. Температурная зависимость проводимости селенида цинка ( $T_{отж} = 1100$  К).

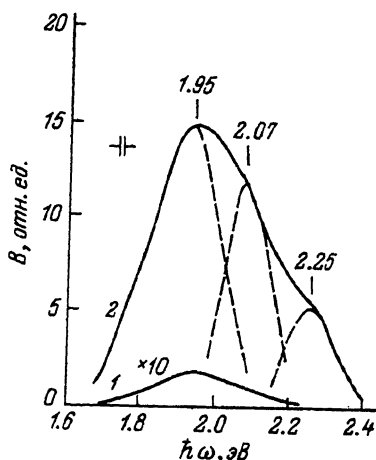


Рис. 2. Спектры ФЛ исходного (1) и отожженного в парах индия ZnSe при 1100 К (2).

логических условий его получения и требуют дополнительных исследований, выходящих за рамки данной работы.

Следует отметить, что в исследуемых  $p$ -слоях при 300 К отсутствуют «краевые» полосы ФЛ даже при преобладающей активности мелких акцепторных центров, что противоречит выводам работы [1]. Это, по-видимому, обусловлено используемой технологией получения кристаллов, приводящей к большой концентрации неконтролируемых примесей. Последнее подтверждается данными работы [9], в которой применение дополнительной очистки исходного сырья позволило получить кристаллы  $p$ -ZnSe, излучающие преимущественно в «голубой» области спектра, хотя их проводимость была не более  $10^{-7}$  Ом $^{-1}$  · см $^{-1}$ .

Таким образом, из приведенных результатов следует возможность получения дырочной проводимости в селениде цинка путем легирования его индием. Вместе с тем дальнейшее улучшение электрических и люминесцентных свойств (главным образом в коротковолновой области спектра) связано с улучшением чистоты исходных кристаллов ZnSe и оптимизацией технологических условий получения  $p$ -слоев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Георгобиани А. Н., Котляревский М. Б. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49. В. 10. С. 1916—1922.
- [2] Георгобиани А. Н., Котляревский М. Б. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1979. Т. 43. В. 6. С. 1179—1185.
- [3] Ju P. W., Park J. S. // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22. N 7. P. 345—347.
- [4] Георгобиани А. Н., Котляревский М. Б., Пегов А. А., Чернявский Б. Г. // Изв. вузов СССР. Физика. 1986. Т. 28. В. 10. С. 105—107.
- [5] Георгобиани А. Н., Стеблин В. И. // Тр. ФИ АН СССР. 1970. Т. 50. С. 27—59.
- [6] Nojima K., Iwaki S. // Japan. J. Appl. Phys. 1966. N 5. P. 253.
- [7] Козак Е. Н., Махний В. П., Собищанский Б. М. // Физ. электрон. № 40. С. 41—47.
- [8] Фок М. В. // Тр. ФИ АН СССР. 1972. Т. 59. С. 3—24.
- [9] Агелъменев М. Е., Левит А. Д., Панасюк Е. Н., Сердюк Н. В. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1986. Т. 22. В. 3. С. 387—391.