

## СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА ЦИНКА

Т.В. Бутхузи, А.Н. Георгобиани, Т.Г. Хулордава,  
У.А. Аминов, Б.Т. Эльгазаров

*Проведено исследование электролюминесценции структур In-ZnSe-ZnO-Au, полученных методом радикало-лучевой гетерирующей эпитаксии.*

Решение целого ряда задач полупроводниковой оптоэлектроники связано с продвижением в видимый и ультрафиолетовый диапазоны спектра. Этим обусловлен возросший интерес к исследованию широкозонных соединений группы  $A^2B^6$ , используемых в качестве базовых материалов. Высокий квантовый выход фотолюминесценции, хорошая излучательная способность, обусловленная большой вероятностью излучательной рекомбинации при наличии прямых межзонных переходов, высокая фоточувствительность обеспечивают перспективность применения этих соединений для создания источников и приемников света, работающих в широком диапазоне длин волн  $10,4 - 0,7$  мкм [1]. Однако полупроводниковые соединения  $A^2B^6$  имеют тенденцию к компенсации и самокомпенсации дефектов, что затрудняет инверсию типа проводимости в этих материалах. Как правило, эти соединения обладают монополярной, а именно электронной проводимостью, а для создания основных элементов оптоэлектроники, в частности, эффективных свето- и фотодиодов требуются p-n переходы.

Все вышеизложенное относится и к селениду цинка, ширина запрещенной зоны которого  $E_g \cong 2,7$  эВ при  $T = 300$  К, что позволяет создавать на его основе источники света с сине-голубым свечением. Проблема создания инжекционных светоизлучающих структур тесно связана с задачей получения p-n переходов

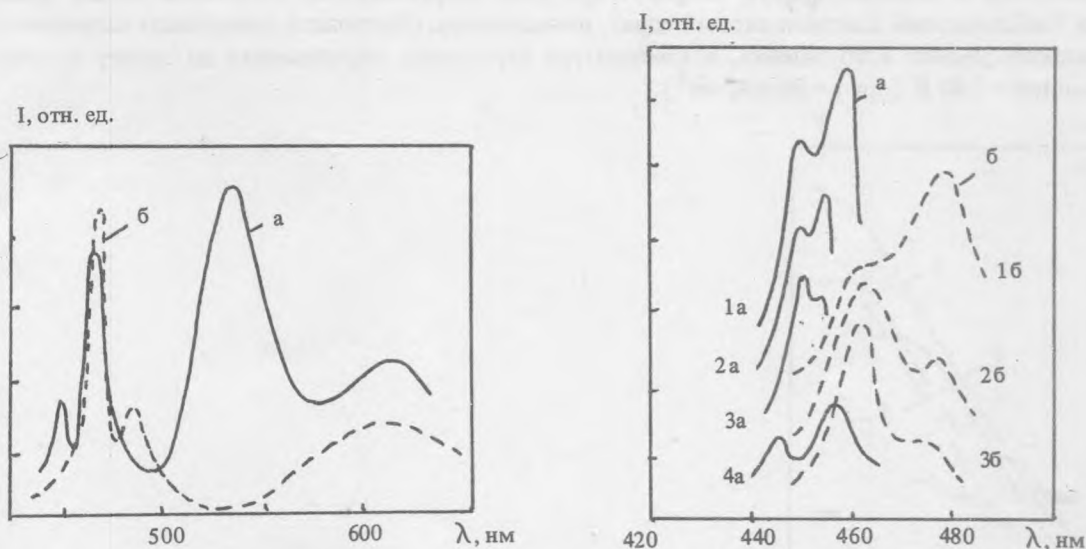


Рис. 1. Спектры ЭЛ структур при  $I = 10$  мА,  $T = 90$  К (а) и при  $I = 10$  мА,  $T = 300$  К (б).

Рис. 2. Спектры ЭЛ структур при разных плотностях возбуждения: а)  $T = 90$  К,  $j = 80$  мА/мм<sup>2</sup> (1),  $50$  мА/мм<sup>2</sup> (2),  $30$  мА/мм<sup>2</sup> (3),  $10$  мА/мм<sup>2</sup> (4); б)  $T = 300$  К,  $j = 40$  мА/мм<sup>2</sup> (1),  $20$  мА/мм<sup>2</sup> (2),  $10$  мА/мм<sup>2</sup> (3).

и структур металл-диэлектрик-полупроводник, обладающих высокой эффективностью инжекции и электролюминесцирующих уже при напряжениях около 2–3 В, соответствующих ширине запрещенной зоны. Разработанный нами метод [2] радикало-лучевой гетерирующей эпитаксии монокристаллических слоев в окиси цинка на базе соединений цинка с металлоидом VI группы позволил осуществить инверсию типа проводимости и получить p-n переход.

В настоящей работе рассмотрена электролюминесценция структур In-ZnSe-ZnO-Au, полученных путем термообработки низкоомных кристаллов ZnSe в атомарном (активированном) кислороде [2], в результате которой на поверхности ZnSe происходит образование слоя ZnO.

В исследуемых структурах In-ZnSe-ZnO-Au при прямых смещениях 2–3 В, т.е. при подаче положительного потенциала на золотой электрод структуры обнаружена электролюминесценция (ЭЛ).

Спектр ЭЛ исследуемой структуры, снятый при  $T = 90$  К при плотности тока  $j = 10$  мА/мм<sup>2</sup>, представлен на рис. 1. Присутствует "голубая" полоса с  $\lambda_{\max} = 446$  нм, полоса с максимумом при  $\sim 460$  нм (FB-полоса или краевая полоса, приписываемая излучательному переходу свободного электрона на мелкий акцепторный уровень [3]), "зеленая" полоса с  $\lambda_{\max} = 530$  нм и слабая желто-оранжевая с  $\lambda_{\max} = 610$  нм. Как было показано в работе [4], появление "зеленой" полосы обусловлено возникновением слоев p-типа в ZnSe. Эта полоса приписывалась комплексному центру, в состав которого входит вакансия цинка ( $V_{Zn}$ ).

С повышением температуры интенсивность зеленой полосы быстро уменьшается, и около 200 К она полностью гасится. Термическая энергия активации ее гашения  $\sim 0,35$  эВ, что хорошо согласуется с результатом работы [5], где изучалась люминесценция кристаллов p-типа проводимости и эта полоса интерпретировалась как излучательный переход электрона с мелкого донорского уровня на акцепторный уровень глубиной  $\sim 0,35$  эВ, обусловленный комплексным центром с вакансией цинка.

При изменении плотности тока через структуру спектр ЭЛ в голубой области изменяется существенным образом. На рис. 2 показан спектр ЭЛ структур, снятый при разных плотностях тока и температурах 90 и 300 К. Как видно из рис. 1а, если при плотности тока  $j = 10$  мА/мм<sup>2</sup> в голубой области присутствует экситонная полоса ( $\lambda_{\max} = 446$  нм) и FB-полоса ( $\lambda_{\max} = 460$  нм), то при повышении  $j$  до 50 мА/мм<sup>2</sup> краевая (FB) полоса полностью подавляется, и на длинноволновом крыле экситонной полосы появляется новая узкая полоса. Максимум ее сдвинут на 5 нм (35 мэВ) относительно максимума экситонной полосы. При  $j = 80$  мА/мм<sup>2</sup> доминирующей становится эта "новая" полоса. Максимумы экситонной и "новой" полосы сдвигаются в длинноволновую сторону, при этом энергетическое расстояние между полосами не меняется. Наблюдаемый длинноволновый сдвиг, по-видимому, обусловлен джоулевым нагревом структур при высоком уровне возбуждения, и температура структуры, определенная по сдвигу экситонных полос, составляет  $\sim 140$  К (при  $j = 50$  мА/мм<sup>2</sup>).

lg B, отн. ед.

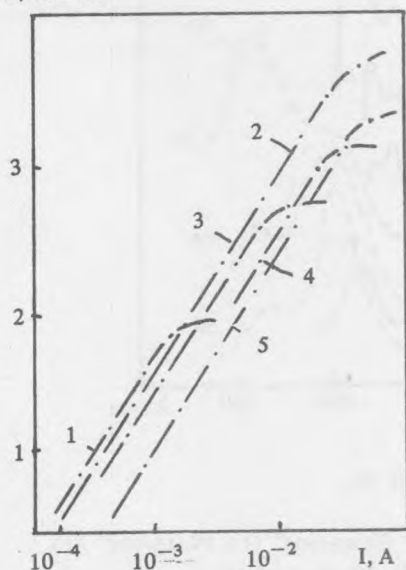


Рис. 3. Люкс-амперные характеристики полос ЭЛ структур при  $T = 90$  К;  $B \cong I^k$ ,  $k \cong 1,5$ . 1 – FB, 2 –  $\lambda_{\max} \cong 535$  нм, 3 –  $F_{\chi}$ , 4 – "новая полоса"; 5 –  $\lambda_{\max} = 610$  нм.

Изменения происходят и при повышении плотности тока при комнатной температуре (рис. 2б). Здесь доминирующей становится полоса с максимумом при 480 нм. Эта область голубого свечения локализована у золотого контакта, а длинноволновое излучение выходит из всего ZnSe.

На рис. 3 представлены люкс-амперные характеристики полос ЭЛ. Видно, что эти зависимости на больших участках аппроксимируются выражением  $B \propto I^k$ , где  $k = 1,5$  для всех полос. Появление "новой" полосы носит пороговый характер. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что при высоком уровне инжекции, т.е. при больших прямых смещениях, величина электрического поля на переходе резко снижается и создается условие для локализации экситонов на акцепторных уровнях, образованных вакансиями цинка, обуславливающих "зеленую" полосу. Механизм прохождения тока описывается в рамках теории Саа – Шокли – Нойса /6/. Поверхностный слой окиси цинка р-типа проводимости, по-видимому, играет роль инжектирующего контакта к слою ZnSe р-типа проводимости. Внешний квантовый выход голубой электролюминесценции исследуемых структур достигает  $10^{-3}$  фотон/электрон или 0,1 %. В исследованных структурах не были предприняты специальные меры для улучшения вывода света.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Георгобиани А.Н. УФН, **113**, 129 (1974).
2. Бутхузи Т.В. и др. Труды ФИАН, **182**, 140 (1987).
3. Yamaguchi M., Yamamoto A. Jap. J. Appl. Phys., **16**, 77 (1977).
4. Nishisawa J., Itch K., Okuno J. J. Appl. Phys., **57**, 240 (1985).
5. Пикус Г.Я., Чайка Г.Е. ЖФК, **52**, 3101 (1978).
6. Sah C.T., Noyce R.N., Shockley W. Proc. IRE, **45**, 1228 (1957).

Поступила в редакцию 3 мая 1990 г.