

СВОЙСТВА НАПРЯЖЕННЫХ СЛОЕВ ZnSe, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ Si И ZnS ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЭПИТАКСИЕЙ

С.Н. Максимовский, П.П. Сидоров, А.П. Шотов

Методами фотолюминесценции и оптического поглощения исследованы свойства напряженных эпитаксиальных слоев ZnSe на Si и ZnS. Исследовано излучение со стороны границы раздела ZnS/ZnSe.

Полупроводниковые соединения ZnSe и ZnS используются для создания оптоэлектронных приборов видимого диапазона. Слои ZnSe, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках Si, являются основой электролюминесцентных ячеек постоянного тока /1/. Гетероструктуры и сверхрешетки ZnSe/ZnS используются для создания высокоэффективных лазеров с накачкой электронным пучком /2/ и лазерных МДП диодов /3/.

Для такого типа гетероструктур проблемой является создание бездефектных границ раздела, поскольку рассогласование параметров решеток оказывается значительным. Так, для пары ZnSe-Si $\Delta a/a = 4\%$, а для ZnSe-ZnS $\Delta a/a = 4,7\%$. Коэффициенты линейного термического расширения α трех этих материалов также сильно различаются. Для ZnSe $\alpha = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, для ZnS $6,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, для Si $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Рассогласование параметров решеток приводит к образованию на границе раздела сетки дислокаций несоответствия, а различие коэффициентов термического расширения — к возникновению напряжений в слоях. Эти факторы сильно ухудшают фотоэлектрические свойства структур.

Настоящая работа посвящена исследованию оптических свойств эпитаксиальных слоев ZnSe, выращенных на подложках из Si и ZnS различными технологическими методами.

Слои ZnSe выращивались эпитаксией из паровой фазы, а также фотостимулированной эпитаксией /4/ при температуре подложек $650 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Совершенство слоев ZnSe оценивалось по спектрам фотолюминесценции (ФЛ) при 77 K , возбуждаемой УФ излучением ксеноновой лампы высокого давления в диапазоне длин волн $0,3-0,4 \text{ мкм}$.

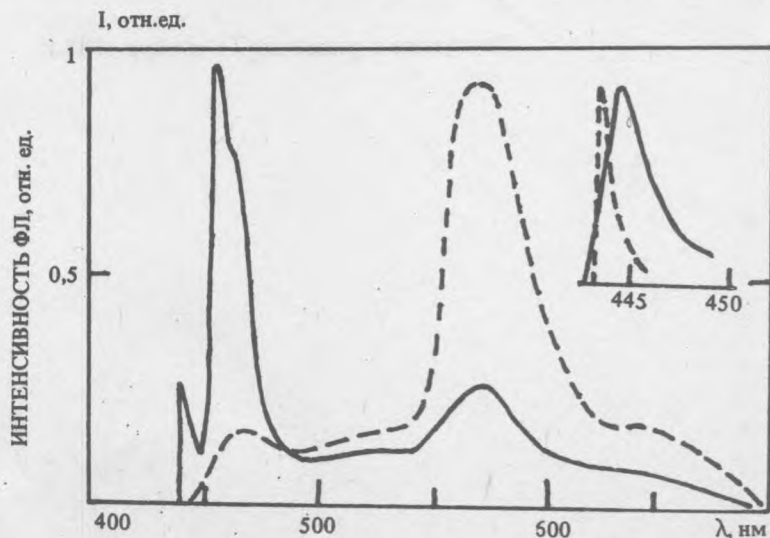


Рис. 1. Спектры ФЛ при 77 K слоев ZnSe на Si, выращенных фотостимулированной эпитаксией (сплошная кривая) и в термическом процессе (штриховая кривая). Вставка: слой ZnSe — сплошная кривая, монокристалл — штриховая кривая.

В спектре ФЛ слоя ZnSe толщиной 0,3 мкм на Si, выращенного в термическом процессе, доминирует широкая полоса в примесно-дефектной области (рис. 1).

В спектрах ФЛ слоя, выращенного фотостимулированной эпитаксией, доминирует голубое краевое излучение с максимумом при 458,5 нм и присутствует линия излучения связанных экситонов с максимумом при 445 нм. На вставке рис. 1 показаны участки спектра в экситонной области для объемного монокристалла и слоя ZnSe на Si. Заметно, что максимум линии экситонного излучения слоя сдвинут в длинноволновую сторону по сравнению с положением 444,5 нм для объемного монокристалла, а сама линия сильно уширена.

Сдвиг и уширение экситонной линии можно объяснить влиянием напряжений, возникающих в слое и обусловленных различием в коэффициентах термического расширения ZnSe и Si. Подобный эффект был обнаружен при исследовании спектров краевой фотолюминесценции слоев GaAs, выращенных при 700 °C на подложках из Si /5/.

В слоях полярного полупроводника ZnSe, выращенных на неполярной подложке Si, возможно возникновение антифазовых областей. Наличие в слое GaAs антифазовых границ сильно ухудшает его излучательные свойства /6/.

Снижение степени антифазового разупорядочения достигалось за счет предварительного напыления слоя As на подложку Si и образования слоя SiAs. Косвенным доказательством наличия в слоях ZnSe на Si антифазового разупорядочения является тот факт, что интенсивность краевого излучения этих слоев на два порядка ниже, чем слоев ZnSe на ZnS /4/.

В случае фотостимулированной эпитаксии возможно образование слоя SiSe (подобного слою SiAs) под действием излучения ксеноновой лампы.

Спектры ФЛ слоя ZnSe на ZnS толщиной 0,8 мкм снимались в двух геометриях. В одном случае возбуждение осуществлялось со стороны слоя ZnSe, в другом – через подложку ZnS излучением в диапазоне 0,35–0,4 мкм, для которого ZnS прозрачен, а ZnSe имеет сильное поглощение; таким образом удалось исследовать излучательные свойства границы раздела ZnS/ZnSe.

Как видно из рис. 2, в спектре ФЛ слоя ZnSe, выращенного фотостимулированной эпитаксией, доминирует краевое излучение с максимумом при 462 нм и присутствует линия излучения связанных экситонов с максимумом 446 нм. Из экситонной области спектра (вставка рис. 2) видно, что линия экситонного излучения слоя очень сильно уширена и смещена в длинноволновую область по сравнению с объемным монокристаллом, что можно объяснить влиянием сильного термического напряжения на положение экситонных уровней.

В спектре ФЛ переходного слоя ZnS/ZnSe доминирует широкая полоса в примесно-дефектной области, а экситонная линия вовсе отсутствует. Это свидетельствует о наличии большой плотности дефектов. В переходном слое образуются дислокации несоответствия, являющиеся основными каналами безызлучатель-

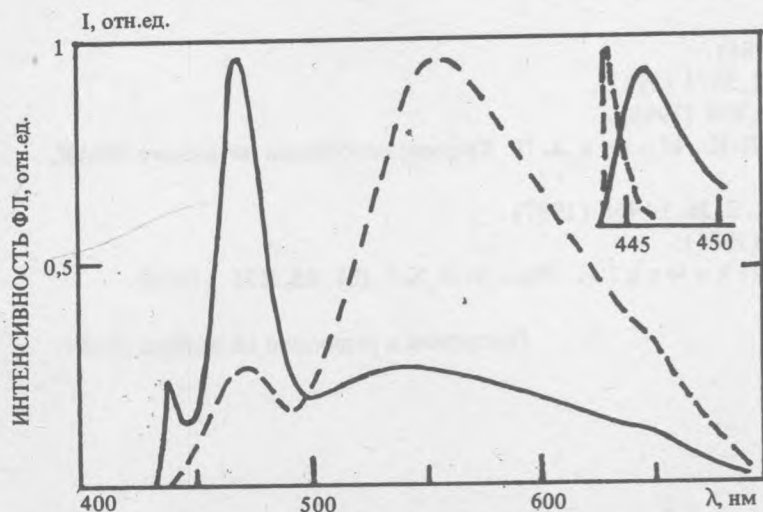


Рис. 2. Спектры ФЛ при 77 К слоя ZnSe на ZnS (сплошная кривая) и переходного слоя ZnS/ZnSe (штриховая кривая). Вставка: слой ZnSe – сплошная кривая, монокристалл – штриховая кривая.

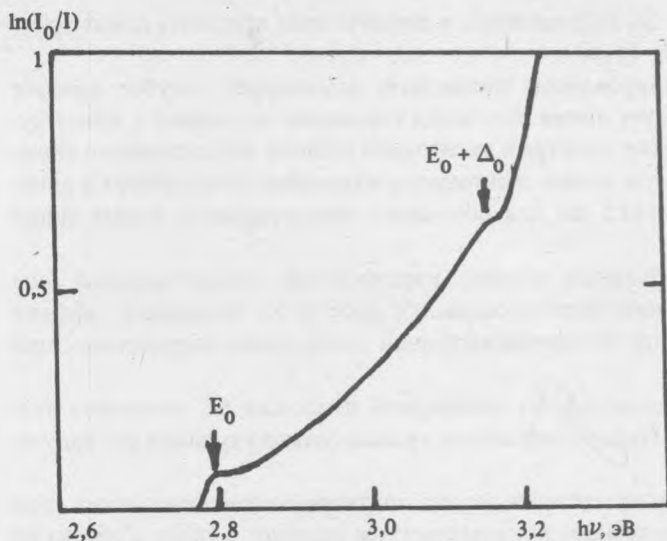


Рис. 3. Спектр поглощения при 77 К слоя ZnSe на ZnS.

ной рекомбинации, поэтому интенсивность краевой люминесценции в переходном слое ниже, чем у поверхности. По мере удаления от границы раздела слой ZnSe становится более совершенным, что видно по появлению в спектре экситонной линии.

В области фундаментальной полосы при 77 К на слое ZnSe на ZnS толщиной 0,8 мкм снята зависимость оптической плотности $\ln(I_0/I)$ от $h\nu$, где I_0 — интенсивность света, прошедшего через чистую подложку ZnS, а I — интенсивность света, прошедшего через подложку со слоем ZnSe (рис. 3). Значение энергии перехода $E_0 = 2,8$ эВ соответствует ширине запрещенной зоны ZnSe при 77 К. Энергия перехода из спин-орбитально отщепленной валентной зоны в зону проводимости $E_0 + \Delta_0 = 3,17$ эВ. Для монокристаллов ZnSe при 77 К определены значения $E_0 = 2,8$ эВ, $E_0 + \Delta_0 = 3,2$ эВ, $\Delta_0 = 0,4$ эВ /7/. В слое ZnSe на ZnS величина $\Delta_0 = 0,37$ эВ, сдвиг спин-орбитального расщепления составляет 30 мэВ. Этот сдвиг может быть вызван термическими напряжениями.

Таким образом показано, что фотостимулированная эпитаксия позволяет получать слои ZnSe на Si и ZnS, обладающие высокой вероятностью излучательной рекомбинации, что свидетельствует о малом количестве дефектов, обусловленных рассогласованием параметров решетки и антифазовым разупорядочением. Термические напряжения в слое могут быть уменьшены за счет снижения температуры эпитаксии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mino N. et al. J. Appl. Phys., **58**, 793 (1985).
2. Gammack D. A. et al. J. Appl. Phys., **62**, 3071 (1987).
3. Jain F. C., J. Cryst. Growth, **86**, 1-4, 929 (1988).
4. Максимовский С. Н., Сидоров П. П., Шотов А. П. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 8, 43 (1988).
5. Enatsu M. et al. Japan J. Appl. Phys., pt. 2, **26**, L1468 (1987).
6. Fisher R. et al. J. Appl. Phys., **60**, 1640 (1986).
7. Wagner T. S., Heckelman G. H., Nelkowski H. Phys. Stat. Sol. (b), **65**, K75 (1974).

Поступила в редакцию 16 ноября 1988 г.