

- [4] Анникеев И.Ю., Басов Н.Г., Глазков Д.А., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 4. С. 661.
- [5] Фабелинский И.Л. Молекулярное рассеяние света. М.: Наука, 1965.

Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
29 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 19 12 октября 1989 г.

06.3

СТРУКТУРА И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПЛЕНОК $ZnSe:Ga,As$ ВЫРАЩЕННЫХ ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЭПИТАКСИЕЙ

П.П. Сидоров, О.В. Александров,
И.В. Карпов, С.Н. Максимовский,
М.И. Случ

1. Полупроводниковое соединение $ZnSe$ привлекает интерес в связи с возможностью его использования для создания электролюминесцентных диодов [1] и лазеров [2], излучающих в голубой части видимого диапазона. Развитие технологических методов получения пленок $ZnSe$ направлено на достижение интенсивной краевой люминесценции при комнатной температуре. Один из путей решения этой проблемы заключается в легировании $ZnSe$ атомами III и V групп. Интенсивная голубая фотолюминесценция при 300 К была получена в пленках $ZnSe$, легированных Ga , выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией [3] и в пленках $ZnSe$, легированных M , выращенных металл-органической эпитаксией из паровой фазы [4].

Одной из технологий, позволяющей получать пленки $ZnSe$ высокого качества, является фотостимулированная эпитаксия в атмосфере водорода [5]. Этой технологией были получены качественные напряженные гетероструктуры $ZnSe/Si$ и $ZnSe/ZnS$. В спектрах ФЛ при 77 К слоев $ZnSe$ присутствовали интенсивные линии экситонного излучения, что указывало на их совершенство.

Настоящая работа посвящена получению пленок $ZnSe$, легированных Ga и As , обладающих интенсивной голубой люминесценцией при комнатной температуре.

2. Пленки выращивались в атмосфере чистого водорода под воздействием излучения в диапазоне 0.25–1.2 мкм от ксеноновой лампы высокого давления и интенсивностью 0.1 Вт/см². В качестве подложек использовались пластинки $GaAs$ с ориентацией (100) и отклонением на 2° в направлении $\langle 110 \rangle$. Температура подложек составляла 500 °С, скорость роста – 0.5 мкм/час. Легирова-



Рис. 1. Электронная микрофотография поверхности пленки $ZnSe$.

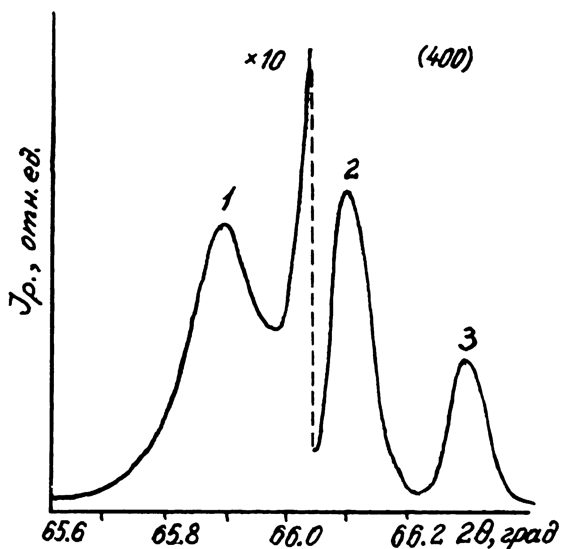


Рис. 2. Рентгенограмма (излучение $CuK\alpha$ линии) пленки $ZnSe$ в области рефлекса (400), пики: $ZnSeK\alpha_1$ (1), $ZnSeK\alpha_2$ и $GaAsK\alpha_1$ (2), $GaAsK\alpha_2$ (3).

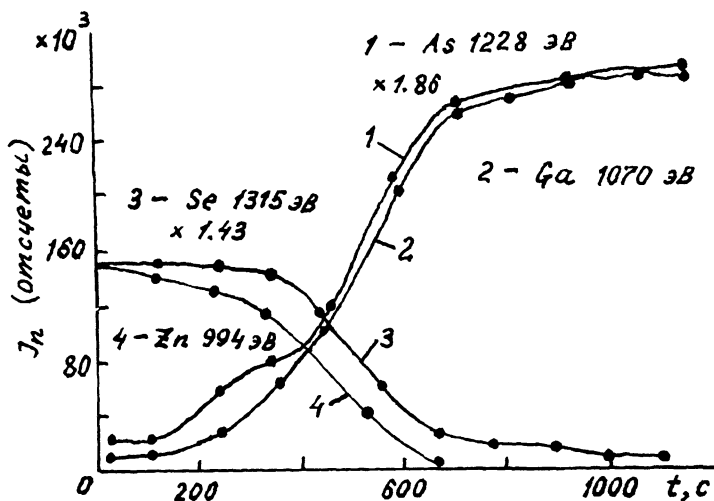


Рис. 3. Оже-профиль границы раздела $ZnSe/GaAs$.

ние осуществлялось за счет диффузии атомов Ga и As из подложки.

3. Структура пленок исследована методами электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, профильной Оже-спектроскопии.

На рис. 1 показана типичная морфология поверхности пленок $ZnSe$ толщиной 1 мкм. В основном пленки обладают зеркально-гладкой поверхностью, на которой в отдельных местах присутствуют ориентированные фигуры роста, обусловленные разориентацией поверхности подложки.

На рис. 2 представлен участок рентгенограммы пленки $ZnSe$ в области рефлекса (400). Пик $ZnSeK\alpha_1$ — 65.9° наблюдается со стороны меньших углов от пика $GaAsK\alpha_1$ — 66.1° . Рентгенограмма содержит рефлексы кратные (100), а их ширина на полувысоте сравнима с шириной рефлексов от монокристаллической подложки $GaAs$; таким образом видно, что пленки $ZnSe$ являются монокристаллическими и ориентированными в плоскости (100).

Профильная Оже-спектроскопия проводилась на установке $LHS-10$ при возбуждении электронами с энергией 5 КэВ. Травление осуществлялось ионами Ar^+ с энергией 3 КэВ по площади 2×2 мм.

На рис. 3 представлена картина распределения элементов Zn, Se, Ga, As в области границы раздела пленка — подложка. Для более наглядного представления информации о распределении элементов проведен пересчет интенсивностей Оже-пиков с учетом коэффициентов элементной чувствительности, представленных на рисунке в виде множителей; видимо на границе раздела существует избыток элементов Se и As над стехиометрическим соотношением.

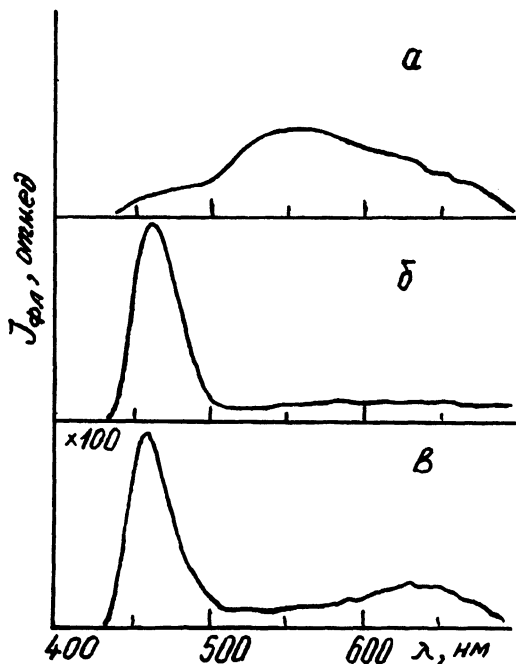


Рис. 4. Спектры ФЛ при 300 К пленок $ZnSe$ толщиной 0.2 мкм (а), 0.5 мкм (б), 1 мкм (в).

По мере удаления от границы раздела уменьшается концентрация Ga и As в пленке, что и обуславливает разницу в характере люминесценции пленок различной толщины.

4. Спектры ФЛ снимались при 300 К на спектрометре „*Jobin Yvon HR-320*“. Возбуждение осуществлялось излучением лазера на молекулярном азоте с длиной волны 337 нм импульсами длительностью 10 нс, энергией до 1 мкДж.

На рис. 4 представлены спектры ФЛ при 300 К пленок $ZnSe$ различной толщины. У пленок толщиной 0.2 мкм голубое краевое излучение не регистрируется, а наблюдается полоса излучения глубоких уровней с максимумом около 540 нм, образованных комплексом мышьяк плюс вакансия цинка. В спектрах пленок толщиной 0.5 мкм доминирует полоса голубого излучения с максимумом 465 нм (2.66 эВ) и полушириной 65 мэВ. Максимум этой полосы сдвинут на 40 мэВ к меньшим энергиям от положения края запрещенной зоны с энергией 2.7 эВ. У пленок толщиной 1 мкм интенсивность этой полосы на два порядка ниже.

В спектрах ФЛ нелигированных пленок $ZnSe$, выращенных на подложках из Si этим же технологическим методом, полоса кра-

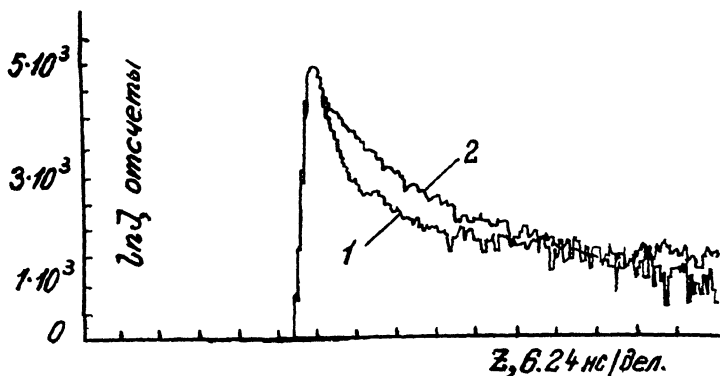


Рис. 5. Кинетика люминесценции при 300 К пленки $ZnSe$, кривая 1 – возбуждение 337 нм, кривая 2 – излучение 465 нм.

евого излучения имеет максимум около 461 нм (2.69 эВ) и полуширину 32 мэВ. Это говорит о том, что появление этих полос в спектрах ФЛ обусловлено различными механизмами излучательной рекомбинации. В случае нелегированных пленок излучение обусловлено рекомбинацией свободных носителей [6]. В случае пленок $ZnSe: Ga, As$ излучение обусловлено рекомбинацией электрона и дырки, связанных на Ga и As . По мере увеличения толщины пленок уменьшается количество Ga и As в приповерхностном слое, в котором происходит возбуждение ФЛ, следовательно понижается интенсивность полосы голубого излучения.

5. Кинетика люминесценции при 300 К исследовалась на спектрофлюориметре фирмы «Edinburgh Instruments». Возбуждение осуществлялось излучением с длиной волны 337 нм, импульсами длительностью 1 нс от лампы-вспышки, наполненной азотом. Измерения проводились в режиме старт-стоп с выводом на персональный компьютер.

На рис. 5 представлена кинетика люминесценции пленки толщиной 0.5 мкм на длине волны 465 нм. Характер затухания люминесценции описывается суммой двух экспонент:

$$I(t) = 0.46 \cdot \exp(-t/\tau_1) + 0.02 \cdot \exp(-t/\tau_2),$$

где времена жизни $\tau_1 = 0.35$ нс и $\tau_2 = 5.75$ нс, $\chi^2 = 3.4$. Это говорит о том, что возможно происходит рекомбинация носителей с двух возбужденных состояний, при этом время жизни одного состояния на порядок меньше, чем другого. Однако необходимо отметить, что время жизни 5.75 нс при 300 К достаточно велико. Это свидетельствует о малом количестве каналов безызлучательной рекомбинации в пленках.

6. Таким образом, показано, что пленки $ZnSe: Ga, As$, выращенные фотостимулированной эпитаксией, обладают высоким кристалли-

ческим совершенством и интенсивной голубой люминесценцией при комнатной температуре. На основании исследования кинетики люминесценции определено, что излучение на длине волны 465 нм обусловлено рекомбинацией с двух возбужденных состояний, имеющих времена жизни 0.35 и 5.75 нс.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Y a m a g u c h i M., Y a m a m o t o A., K o n d o M. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. N 1. P. 196-202.
- [2] J a i n F.C. // J. Cryst. Growth. 1988. V. 86. N. 1-4. P. 929-934.
- [3] N i i n a T., M i n a t o T., Y o n e d a K. // Japan. J. Appl. Phys. 1982. V. 21. N 6. P. L387-L389.
- [4] F u j i t a S., T e r a d a K., S a k a m o t o T. and F u j i t a S. // J. Cryst. Growth. 1989. V. 94. N 1. P. 102-108.
- [5] М а к с и м о в с к и й С.Н., С и д о р о в П.П., Ш о т о в А.П. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1989. № 3. С. 38-40.
- [6] K o h E r a, L a n g e r D.W. // J. Luminescence. 1970. V. 1-2. P. 514-527.

Физический институт
им. П.Н. Лебедева
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
3 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 19

12 октября 1989 г.

04; 12

КРИВОЛИНЕЙНОЕ И ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ РЕЛЬСОТРОННОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Г.А. А с к а р ь я н, И.В. Г о с у д а р е в,
Л.Д. К л е б а н о в

Исследование рельсотронного ускорения [1-5] занимает в последнее время большое место в плазменной физике больших токов и магнитных полей. Для ряда прикладных задач представляет интерес движение плазменного тока по криволинейной траектории с большими центробежными ускорениями. К таким задачам относятся, например, многократное или многовитковое (кольцевое или спиральное) ускорение плазмы и малых тел, создание плазменных поверхностей большой площади, моделирование рождения или формиро-