

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ZnSe:Ag⁺ И p-n ПЕРЕХОДА НА ЕГО ОСНОВЕ

А.Н. Георгобиани, З.П. Илюхина, Л.С. Лепнев, И.Д. Муллабаев,
А.В. Спицин

Исследованы фотолюминесценция и электрические свойства монокристаллов ZnSe, имплантированных серебром. Получен плавный p-n переход с высотой потенциального барьера 2 эВ на основе низкоомного n-ZnSe (1–20 Ом·см) посредством имплантации ионов серебра. Исследованы инжекционная электролюминесценция (ЭЛ) и вольтамперные характеристики этих структур. Обсуждается механизм токопрохождения и природа наблюдаемых полос ЭЛ.

Решение ряда задач оптоэлектроники, связанных с необходимостью изготовления p-n переходов на основе широкозонных полупроводниковых соединений [1], в частности, ZnSe, тесно связано с решением проблемы получения проводимости дырочного типа в этих соединениях. Этому вопросу посвящены работы [2–5]. Примесями, представляющими интерес при решении этих проблем в ZnSe, являются, в частности, элементы группы 1⁶ (Cu, Ag, Au). Эти элементы, замещая цинк, могут образовывать акцепторные центры и известны в качестве активаторов люминесценции в видимой области спектра [6, 7]. Что касается их электрической активности, то в литературе имеются сообщения о дырочной проводимости в ZnSe:Cu [7, 8]. В работе [9] показано, что для получения в соединениях A²B⁶ проводимости p-типа принципиальным является применение относительно низких температур ($T \leq 600$ °C) при легировании акцепторной примесью. Одним из методов, удовлетворяющих этому условию, является ионная имплантация, использованная в настоящей работе.

В данной работе проведена ионная имплантация Ag⁺ в ZnSe n-типа с целью получения слоя с дырочной проводимостью и p-n перехода на этой основе. Исследованы их люминесцентные и электрические свойства.

В качестве исходных использованы монокристаллы ZnSe, выращенные из расплава и отожженные в жидком цинке, имевшие удельное сопротивление 1–20 Ом·см.

После имплантации ионами Ag⁺ при дозах 10^{14} , $5 \cdot 10^{14}$ и $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² и энергии 300 кэВ образцы отжигались в атмосфере аргона при температурах $T_a = 400$ – 750 °C в течение 15–20 мин с последующей закалкой. После отжига на имплантированный слой наносились омические контакты путем напыления золота, а на базу – вжиганием индия.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) образцов исследовались при возбуждении лазером ЛГИ-21 ($\lambda = 337,1$ нм, средняя мощность 2,5 мВт). На рис. 1 представлен типичный спектр ФЛ имплантированных кристаллов для двух температур отжига. Во всех образцах при температурах отжига 400 °C наблюдается, а при $T > 400$ °C преобладает полоса ФЛ с $\lambda_{\max} = 556$ нм. Эта полоса наблюдалась авторами работы [6] в ZnSe, выращенном методом жидкофазной эпитаксии с добавкой Ag, и в работе [10] – в ZnSe:Ag, выращенном из расплава. В этих работах предполагается донорно-акцепторная (ДА) природа полосы ФЛ и ее связь с акцепторным центром Ag_{Zn}.

Наблюдаемая полоса ФЛ с $\lambda_{\max} = 556$ нм не смещается при изменении температуры отжига в интервале 400–750 °C. В работе [11] по исследованию образцов ZnSe, имплантированных ионами аргона, показано, что для ФЛ в этой области спектра, связанной с собственными дефектами, характерно смещение в зависимости от температуры отжига. Учитывая это, можно предположить связь наблюдаемой в настоящей работе полосы с $\lambda_{\max} = 556$ нм с центром люминесценции, включающем атом серебра, вероятно, в положении Ag_{Zn}.

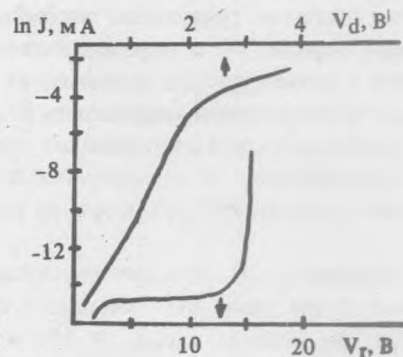
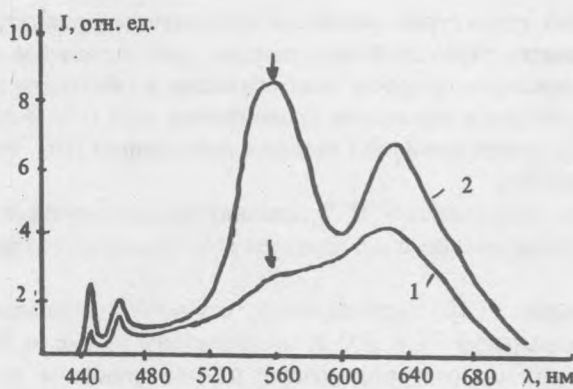


Рис. 1. Спектры ФЛ ZnSe:Ag⁺ при 77 К и T_a = 400 °С (1), 500 °С (2).

Рис. 2. Вольтамперная характеристика p-n перехода в ZnSe:Ag⁺.

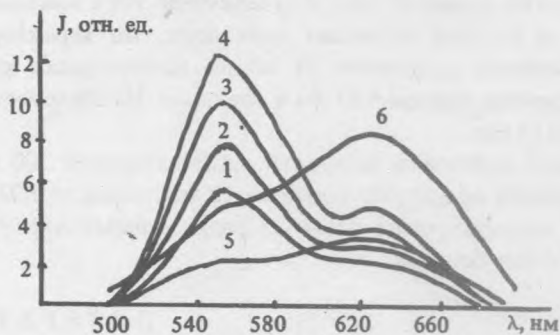
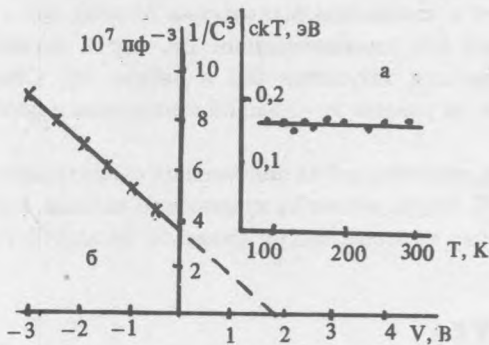


Рис. 3. а) зависимость ckT от температуры для p-n перехода в ZnSe:Ag⁺; б) C-V характеристика p-n перехода в ZnSe:Ag⁺.

Рис. 4. Спектры ЭЛ p-n перехода в ZnSe:Ag⁺ при различных токах и температурах 77 К (1-1 мА; 2-1,4 мА; 3-1,9 мА; 4-2,4 мА) и 300 К (5-8,2 мА; 6-14 мА).

По данным термо-ЭДС под омическими контактами имплантированные слои имели дырочную проводимость. Их удельное сопротивление при расчетной толщине слоя $\sim 0,1$ мкм [12] составляло $10^7 - 10^9$ Ом·см. При температурах отжига выше 600 °С удельное сопротивление возрастает в $10^2 - 10^3$ раз. Увеличение сопротивления сопровождается ростом интенсивности полосы ФЛ 556 нм. Вероятно, это связано с развитием процессов компенсации введенной примеси собственными донорными дефектами [1], которые, возможно, участвуют в образовании центров ФЛ, ответственных за полосу 556 нм.

Оценка глубины акцепторного уровня, ответственного за дырочную проводимость имплантированных слоев, произведенная по температурной зависимости электропроводности, дает величину 0,4 эВ. Это значение близко к полученному в [6, 13] для энергии активации температурного гашения полосы ФЛ 556 нм ($\sim 0,43$ эВ). Таким образом, электропроводность в имплантированных слоях, по-видимому, определяется тем же акцепторным центром с термической глубиной 0,4 эВ, который является ответственным и за полосу ФЛ с $\lambda_{max} = 556$ нм.

Типичная вольтамперная характеристика (ВАХ) полученных p-n структур приведена на рис. 2. Ее прямая ветвь в области напряжений до 2 В описывается соотношением [14/

$$J = J_c \exp(qV/ckT),$$

где q — заряд электрона, V — приложенное напряжение, k — постоянная Больцмана, T — температура, c и J_c определяются механизмом рекомбинаций в рассматриваемом конкретном случае и структурой диода.

В то время как типичные значения c для "идеальных" p-n переходов (т.е. переходов с коэффициентом инжекции, близким к единице) находятся в пределах 1-2, для исследованных нами структур они составляют 6-18, а их увеличение коррелирует с ростом дозы имплантации серебра. Такие большие значения

с могут быть связаны с тем, что в исследованных структурах основным механизмом прохождения тока является многоступенчатая туннельная рекомбинация через глубокие центры, расположенные в области пространственного заряда /14/ и определяющие высокую скорость рекомбинации в объемном заряде p-n перехода, а также с доминирующей ролью таких центров в механизме прохождения тока /15/. В этом случае при исследовании температурной зависимости ВАХ произведение skT остается постоянным /14/, что и наблюдалось для исследованных нами p-n переходов (рис. 3а).

На рис. 3б представлена C-V характеристика в координатах V, C^{-3} , типичная для исследуемых образцов. Спрямление в этих координатах указывает на наличие плавного p-n перехода /16/ с высотой потенциального барьера 2 эВ.

Спектры инжекционной электролюминесценции (ЭЛ) исследуемых структур, наблюдаемые при напряжениях 4–6 В при различных токах для температур 77 и 300 К представлены на рис. 4. В спектрах ЭЛ наблюдаются две полосы с $\lambda_{\max} = 556$ и 630 нм, соответствующие длинноволновым полосам ФЛ имплантированного слоя. Полоса 556 нм в ЭЛ ранее не наблюдалась. О природе центра, ответственного за первую из них, говорилось выше. Вторая связана в литературе с комплексным центром, включающим V_{Zn} /17/. Как видно из рис. 4, увеличение тока приводит к смещению максимума полосы ЭЛ с $\lambda_{\max} = 556$ нм в сторону коротких длин волн, что характерно для люминесценции ДА пар и согласуется с предположением, сделанным на основе исследования кинетики затухания ФЛ в работе /6/. Отчетливый сдвиг максимума полосы 630 нм в спектрах ЭЛ обнаружить не удается из-за малой амплитуды и перекрытия с полосой 556 нм.

Внешний квантовый выход ЭЛ при температуре 300 К, измеренный на полученных структурах методом интегрирующей сферы /18/ при токе 40 мА, равен $\sim 0,02\%$. Малая величина квантового выхода, возможно, связана с недостаточным отжигом радиационных дефектов, которые могут являться безызлучательными каналами рекомбинации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Георгобидани А.Н. УФН, 113, № 1, 129 (1974).
2. Георгобидани А.Н. и др. ФТП, 18, 408 (1984).
3. Бочков Ю.В. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 42 (1983).
4. Nishizawa J. et al. J. Appl. Phys., 57, 2210 (1985).
5. Yasuda T., Wistsuishi J., Kukimoto H. Appl. Phys. Lett. (USA), 52, 57 (1988).
6. Dean P.J., Fitzpatrick B.J., Bhargawa R.N. Phys. Rev. B, 26, 2016 (1982).
7. Stztingfellow G.B., Bube R.H. Phys. Rev., 171, 903 (1968).
8. Haanstra J.H., Dieleman J. Electrochem. Soc. Ext. abstr., 14, 2 (1965).
9. Георгобидани А.Н., Котляревский М.Б. В кн. Физика соединений A^2B^6 , под ред. Георгобидани А.Н., Шейнкман М.К., М., Наука, 1986.
10. Poolton N.R. et al. J. Cryst. Growth, 72, 336 (1985).
11. Георгобидани А.Н. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 2, 55 (1984).
12. Кумахов М.А. и др. Проективные пробеги и разбросы пробегов для 1240 комбинаций ион-мишень в интервале энергий $20 \text{ кэВ} \leq E \leq 1000 \text{ кэВ}$. М., изд-во МГУ, 1974.
13. Георгобидани А.Н. и др. Тезисы докладов VI Всесоюзного совещания "Физика, химия и технология люминофоров". ч. 1, с. 39, Ставрополь, 1989.
14. Адирович Э.И., Карагеоргиев — Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. М., Советское радио, 1978.
15. Стафеев В.И. ФТТ, 3, 185 (1961).
16. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М., Мир, 1973.
17. Canvenett B.C., Davies J.J. J. Phys. C (GB), 13, 6409 (1980).
18. Ботоев А.Н., Львова Е.Ю., Фок М.Ю. Труды ФИАН, 164, 57 (1985).

Поступила в редакцию 8 декабря 1989 г.