

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ АЗОТА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ $ZnSe:Ag^+$ И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ p-n ПЕРЕХОДОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

А.Н. Георгобиани, Э.П. Илюхина, Л.С. Лепнев, И.Д. Муллабаев

Проведено сравнительное исследование электрических характеристик слоев $ZnSe:Ag^+$ и $ZnSe:Ag^+, N^+$ p-типа, полученных на n-ZnSe. При дополнительной имплантации $ZnSe:Ag^+$ ионами азота удельное сопротивление слоя падает в $10^2 - 10^3$ раз, а в электролюминесценции p-n переходов появляется полоса с $\lambda_{max} = 458$ нм. Обсуждается природа электрически активных центров в имплантированных слоях.

Селенид цинка является перспективным материалом для создания эффективных свето- и фотодиодов, работающих в голубой области спектра. Применение ZnSe для этих целей тесно связано с задачей получения дырочной проводимости в этом соединении, решение которой затруднено вследствие сильного развития процессов компенсации [1]. Исследования последних лет показали, что для получения проводимости p-типа принципиальным является применение относительно низких температур ($T \leq 600$ °C) [2] при легировании акцепторной примесью. Одним из "низкотемпературных" методов легирования является ионная имплантация, использовавшаяся в указанных целях в настоящей работе.

В качестве исходных использовались монокристаллы ZnSe n-типа проводимости с удельным сопротивлением 1–20 Ом·см, выращенные из паровой фазы и отожженные в жидком цинке. В спектрах фотолюминесценции (ФЛ) этих кристаллов преобладало излучение вблизи края собственного поглощения ($\lambda \cong 460$ нм). Образцы подвергались ионной имплантации серебром (энергия $E = 300$ кэВ, доза $D = 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$) и азотом ($E = 100$ кэВ, $D = 10^{14}$ см $^{-2}$), а также обеими этими примесями. Отжиг образцов, имплантированных серебром, проводился в атмосфере аргона, а при имплантации N^+ и обеими примесями в потоке N_2 в течение 15–20 минут. Температура отжига варьировалась в интервале от 300 до 750 °C. Омические контакты на имплантированный слой наносились путем напыления золота, а на базу – вжиганием индия. Качество контактов контролировалось измерением вольт-амперных характеристик. Слои, отожженные при $T = 400-600$ °C, судя по знаку термо-ЭДС под омическими контактами, имели дырочную проводимость. Удельное сопротивление (при расчетной толщине слоя $\sim 0,1$ мкм) [3] для $ZnSe:Ag^+$ составляло $\rho \approx 10^7 - 10^9$, а для $ZnSe:Ag^+, N^+$ – $10^4 - 10^6$ Ом·см, т.е. в $10^2 - 10^3$ раз меньше.

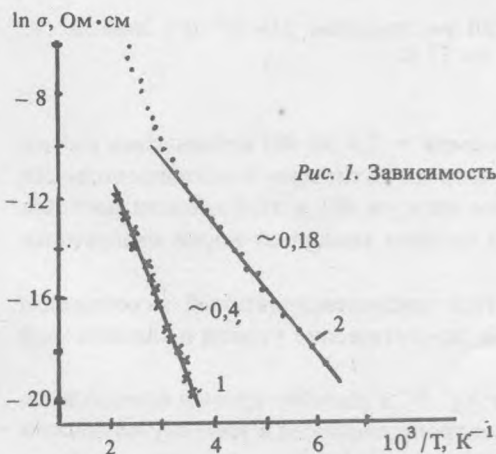


Рис. 1. Зависимость электропроводности σ от температуры для $ZnSe:Ag^+$ (1) и $ZnSe:Ag^+, N^+$ (2).

На рис. 1 представлены зависимости логарифма электропроводности от обратной температуры, дающие значения энергии активации проводимости, равные $0,4 \pm 0,03$ эВ для ZnSe:Ag^+ и $0,18 \pm 0,02$ эВ для $\text{ZnSe:Ag}^+, \text{N}^+$.

Для решения вопроса о том, соответствует ли полученное значение энергии активации положению энергетического уровня дефекта или половине этой величины [4], можно провести измерение зависимости величины "примесной" фотопроводимости (ФП) от интенсивности света. При "полном" заполнении уровня дырками эта зависимость в исследуемых образцах должна быть пропорциональна корню квадратному из интенсивности света, а при частичном — иметь линейный характер [5].

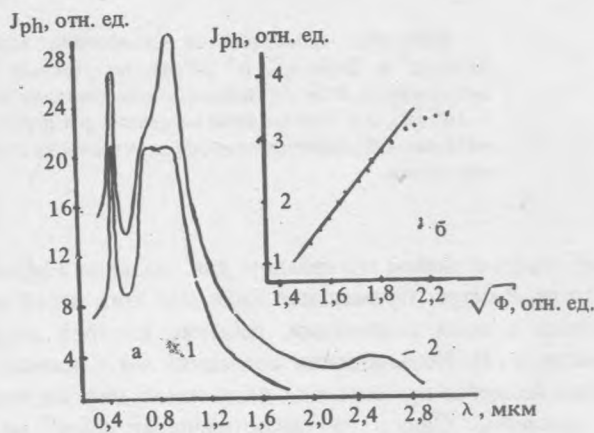


Рис. 2. а) спектр фотопроводимости ZnSe:Ag^+ (1) и $\text{ZnSe:Ag}^+, \text{N}^+$ (2) при 77 К; б) зависимость фотопроводимости от интенсивности света Φ ($\lambda = 2,5$ мкм) для $\text{ZnSe:Ag}^+, \text{N}^+$ при 77 К.

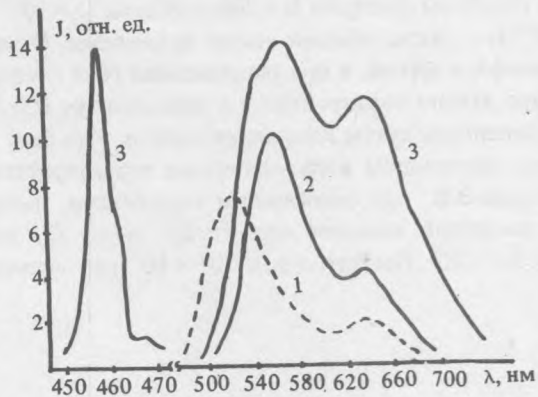


Рис. 3. Спектры ЭЛ p-n переходов ZnSe:N^+ (1), ZnSe:Ag^+ (2) и $\text{ZnSe:Ag}^+, \text{N}^+$ (3) при 77 К.

Как видно из спектров ФП (рис. 2а), при энергиях квантов света $\sim 0,4$ эВ ФП наблюдалась только в образцах $\text{ZnSe:Ag}^+, \text{N}^+$ в той области температур, в которой энергия активации электропроводности равна 0,18 эВ. Оценка глубины уровня по длинноволновому краю спектра ФП в этой области дает для $\text{ZnSe:Ag}^+, \text{N}^+$ значение $\sim 0,45$ эВ, причем интенсивность фототока линейно зависит от корня квадратного из интенсивности света с $\lambda = 2,5$ мкм (0,5 эВ) (рис. 2б).

Эти данные показывают, что в образцах $\text{ZnSe:Ag}^+, \text{N}^+$ имеется некомпенсированный акцепторный уровень с энергией $E_v + 0,4$ эВ, в то время как в ZnSe:Ag^+ такие энергетические уровни в значительной степени заполнены электронами.

Однако энергия активации электропроводности 0,18 эВ в $\text{ZnSe:Ag}^+, \text{N}^+$ к данному уровню не относится, так как при слабой компенсации в температурной зависимости электропроводности в этом случае должны

были бы проявиться две энергии активации: $\sim 0,4$ эВ в области низких температур и $\sim 0,2$ эВ – при более высоких /4/, что противоречит полученным экспериментальным данным (рис. 1).

Таким образом, из полученных данных следует, что в ZnSe:Ag^+ ответственным за дырочную проводимость является уровень с глубиной $E_v + 0,4$ эВ, а в $\text{ZnSe:Ag}^+, \text{N}^+$ – с $E_v + 0,18$ эВ.

Из данных работ /6, 7, 8/ по исследованию ФЛ ZnSe:Ag^+ следует связь уровня $E_v + 0,4$ эВ с AgZn . Уровень $E_v + 0,18$ эВ, по-видимому, связан с V_{Zn} (глубина уровня $\sim 0,2$ эВ /9/) либо с комплексом, включающим азот.

На полученных указанным выше способом структурах наблюдалась электролюминесценция (ЭЛ) при прямых смещениях 4–7 В. Спектры ЭЛ при 77 К представлены на рис. 3. На диодах, полученных имплантацией Ag^+ , наблюдаются две полосы ЭЛ с $\lambda_{\text{max}} = 560$ нм и 630 нм, связанные с AgZn /6, 8/ и собственным комплексным дефектом, включающим V_{Zn} /10/ (рис. 3, кривая 2), а в диодах на основе ZnSe:N^+ – полосы с максимумом 530 и 630 нм (рис. 3, кривая 1), связанные с комплексными центрами, включающими V_{Zn} /11/. В диодах, полученных путем ионной имплантации Ag^+ и N^+ , кроме длинноволновых полос ЭЛ наблюдаются полосы с $\lambda_{\text{max}} = 458$ нм и 460 нм (рис. 3, кривая 3). Последняя (Q_0) связана с ZnSe с неконтролируемой примесью лития /12/, а полоса 458 нм – с люминесценцией донорно-акцепторных пар, в которых акцептором является N_{Se} /13/. Близкая по спектральному положению полоса ЭЛ ($\lambda_{\text{max}} = 459$ нм) наблюдалась в работе /14/ при имплантации азотом ZnSe n-типа проводимости.

Авторы выражают глубокую благодарность А.В. Спицину и В.Ю. Макухе за проведение ионной имплантации образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Георгобиани А.Н. УФН, 113, № 1, 129 (1974).
2. Георгобиани А.Н., Котляревский М.Б., В кн. Физика соединений A^2B^6 , под ред. Георгобиани А.Н., Шейнкман М.К. М., Наука, 1986.
3. 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.
4. Блад П., Ортон Дж.В. Зарубежная радиоэлектроника, № 1, 3 (1981).
5. Ридли Б. Квантовые процессы в полупроводниках. М., Мир, 1986.
6. Dean P.J., Fitzpatrick B.J., Bhargawa R.N. Phys. Rev. B, 26, № 4, 2016 (1982).
7. Davies J.J., Nicholls J.E., Fitzpatrick B.J. J. Cryst. Growth, 72, № 1–2, 336 (1985).
8. Георгобиани А.Н. и др. Тезисы докладов VI Всесоюзного совещания "Физика, химия и технология люминофоров", ч. 1, с. 39, Ставрополь, 1989.
9. Jiang X.J. et al. J. Phys. Soc. Japan, 52, 4008 (1983).
10. Canvenett V.C., Davies J.J. J. Phys. C. (GB), 13, 6409 (1980).
11. Santiago J.J. et al. Ion implantation in semiconductors and other materials. N.-Y., 1973.
12. Bhargawa R.N. et al. Phys. Rev., B20, 2407 (1979).
13. Wu Z.L., Merz J.L. Appl. Phys. Lett, 40, 445 (1982).
14. Akimoto K., Mayajima T., Mori Y. J. Journal of Appl. Phys., 28, № 4, pt. 2, L528 (1989).

Поступила в редакцию 8 декабря 1989 г.