

УДК 535.37

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ZnSe, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ КИСЛОРОДА

У. А. Аминов, А. А. Галаев¹, А. Н. Георгобиани, Б. Т. Эльтазаров²

Ионной имплантацией кислорода в селенид цинка получены структуры с инжекционной электролюминесценцией. Излучательные и электрофизические характеристики этих структур соответствуют характеристикам p - n перехода с длинной базой.

Широкозонные полупроводниковые соединения типа II-VI обычно имеют монополярную, электронную проводимость. Это обусловлено тем, что введение акцепторной примеси сопровождается образованием компенсирующего собственно-дефектного донора – вакансии халькогена.

Ранее было показано [1, 2], что для подавления самокомпенсации необходимо снижение температур технологических режимов ниже критической величины. Оценочные расчеты показывают, что для получения селенида цинка с дырочной проводимостью эти температуры должны быть меньше 800°C . В связи с этим перспективно использование ионного легирования, так как его температурные режимы ниже критической величины. Ранее сообщалось о получении p -типа проводимости в ZnSe путем имплантации ионов Li^+ [3, 4], фосфора P^+ [5, 6] и азота N^+ [7] с последующим отжигом кристаллов в соответствующих атмосферах. В последнее время появились сообщения [8, 9] о получении p -типа проводимости в ZnSe путем легирования кислородом в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. В этих публикациях сообщается об образовании при легировании кислородом ZnSe мелких акцепторных уровней, энергия ионизации которых 80 мэВ .

¹Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия.

²Ташкентский физико-технический институт, Ташкент, Узбекистан.

Целью настоящей работы было получение структур с инжекционной электролюминесценцией в результате ионной имплантации кислорода в $ZnSe$. В качестве исходных образцов были использованы монокристаллы $ZnSe$ n -типа, выращенные из расплава с удельным сопротивлением $\sim 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Образцы размером $5 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$ были ориентированы в плоскости (111). После механической шлифовки и полировки они были обработаны в полирующем травителе $CrO_3:HCl$ ((20 мл:30 г) в течение 10 минут. Имплантация ионами кислорода O^+ проводилась при комнатной температуре. Энергия ионов $E \cong 300 \text{ кэВ}$, дозы $D \sim 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$. После имплантации образцы отжигались в атмосфере кислорода при температурах 300 и 350°C. Длительность отжига – 15 минут. Омические контакты к кристаллу-подложке готовились путем вжигания индия в потоке инертного газа в специальном реакторе [10], а золотые контакты с диаметром $\sim 1 \text{ мм}$ и толщиной $\sim 0,4 - 0,5 \text{ мкм}$ наносились на поверхность ионно-имплантированного слоя $ZnSe$ в установке НВА-1 с остаточным вакуумом $10^{-6} \text{ мм рт.ст.}$

Спектр электролюминесценции (ЭЛ) регистрировался на установке, включающей монохроматор МДР-23. Возбуждающее напряжение подавалось от источника стабилизированного тока Б5-49. Свет на выходе монохроматора регистрировался фотоэлектронным множителем ФЭУ-100. Сигнал с ФЭУ поступал на вход усилителя постоянного тока УПТ-1, а с выхода усилителя направлялся на двухкоординатный самописец Endim-620.02.

При снятии вольт-амперных характеристик в качестве источника напряжения использовался генератор сигналов специальной формы Г6-15 в режиме "нарастающей пилы".

Вольт-емкостные характеристики (ВЕХ) структур снимались с помощью цифрового моста МЦЕ-7А на частоте 1 МГц при амплитуде измерительного напряжения $\sim 100 \text{ мВ}$.

Спектр ЭЛ при 2,7 В содержит (кривая 1, рис. 1): в области связанных экситонов – линию с максимумом при 447 нм, в области люминесценции донорно-акцепторных пар (ДАП) – полосу с максимумом при 462 нм с ее фонными повторениями, а также полосу с максимумами при 545 нм и 558 нм и в области самоактивированной люминесценции (САЛ) – полосу с максимумом при 620 нм. Мы предполагаем, что за полосу 462 нм ответственны донорно-акцепторные пары с мелкими акцепторами, а за полосу 545-558 – пары с глубокими акцепторами. При повышении напряжения (кривые 2-4, рис. 1) голубые полосы сливаются и интенсивность образовавшейся полосы растет быстрее, чем

интенсивность длинноволновых полос. Максимумы зеленой полосы также сливаются, а полоса САЛ сдвигается в ДВ сторону. Из-за малой яркости голубого свечения спектры регистрировались при больших щелях монохроматора (2,8 мм).

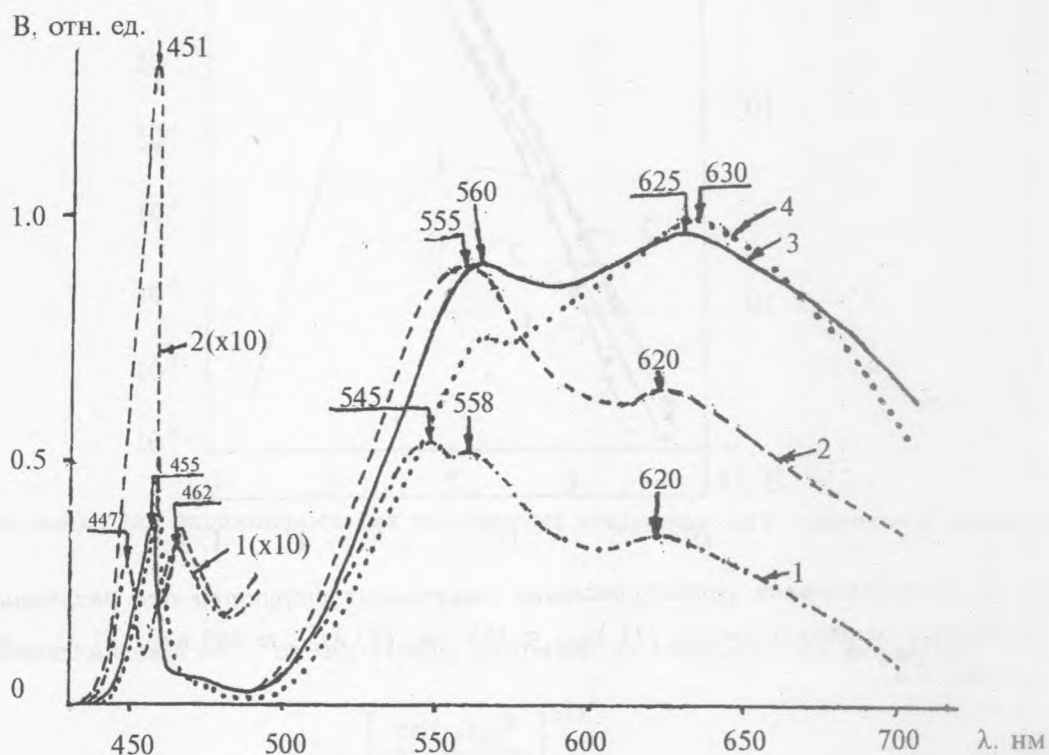


Рис. 1. Спектр электролюминесценции ($T = 77$ К) структур на основе $ZnSe$, полученных ионной имплантацией кислорода, при различных напряжениях U : (1) 2,7 В, (2) 3,2 В, (3) 3,7 В, (4) 4,0 В.

Зависимость величины спектральных максимумов от силы тока можно представить в виде $B \sim I^k$ (рис. 2). Для полос $\lambda_{max} \approx 462$ нм, $\lambda_{max} \approx 545$ нм и $\lambda_{max} \approx 630$ нм имеем $k \approx 2,2$. Зависимость $B \sim I^k$ для полосы с $\lambda_{max} \approx 455$ нм имеет коэффициент $k \approx 3$ при малых токах и $k \approx 1,8$ при больших токах.

Низковольтная часть вольт-амперной характеристики ($U \leq 1,4$ В) спрямляется в координатах $\lg I$ и U соответствует формуле

$$I = I_s \exp\left(\frac{eU}{nk_B T}\right), \quad (1)$$

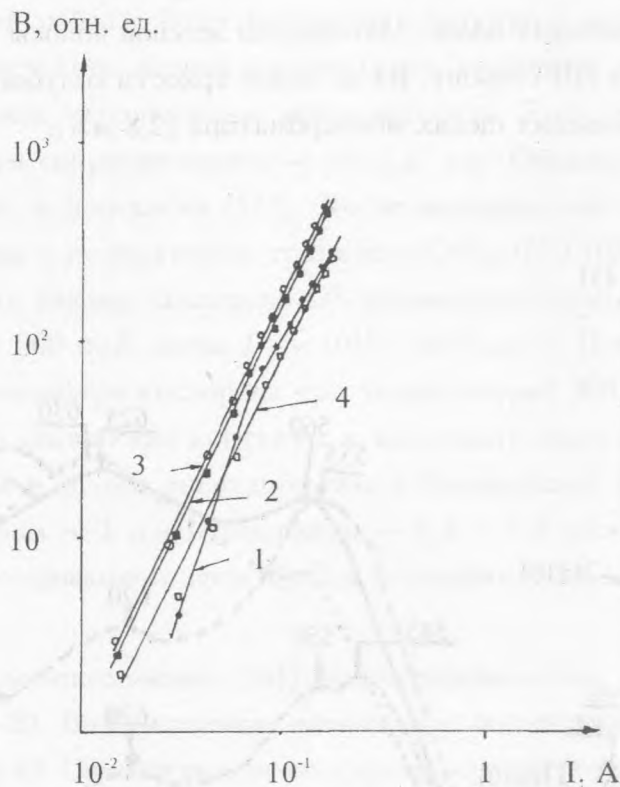


Рис. 2. Люкс-амперная характеристика полученных структур для различных полос при температуре жидкого азота: (1) $\lambda_{max} \approx 455$ нм, (2) $\lambda_{max} \approx 462$ нм, (3) $\lambda_{max} \approx 545$ нм, (4) $\lambda_{max} \approx 630$ нм.

где I — ток через p - n переход, I_s — ток насыщения, U — приложенное напряжение, e — заряд электрона, n — постоянная величина, k_B — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

В нашем случае $n \cong 3,4$. Такая величина n соответствует p - n переходу с длинной базой [11]. При больших напряжениях характеристика становится более полой, что очевидно связано с влиянием сопротивления базы. В этом случае определяющую роль играет дрейф носителей в электрическом поле; при этом проводимость толщи увеличивается медленнее, чем растет ток.

Высота потенциального барьера в структуре может быть определена из ВЕХ, которая в нашем случае спрямляется в координатах $1/C^3 = f(U)$ (рис. 4). Такой вид зависимости соответствует p - n переходу с линейным распределением центров, формирующих пространственный заряд, по-видимому, акцепторных центров [12]. В таком

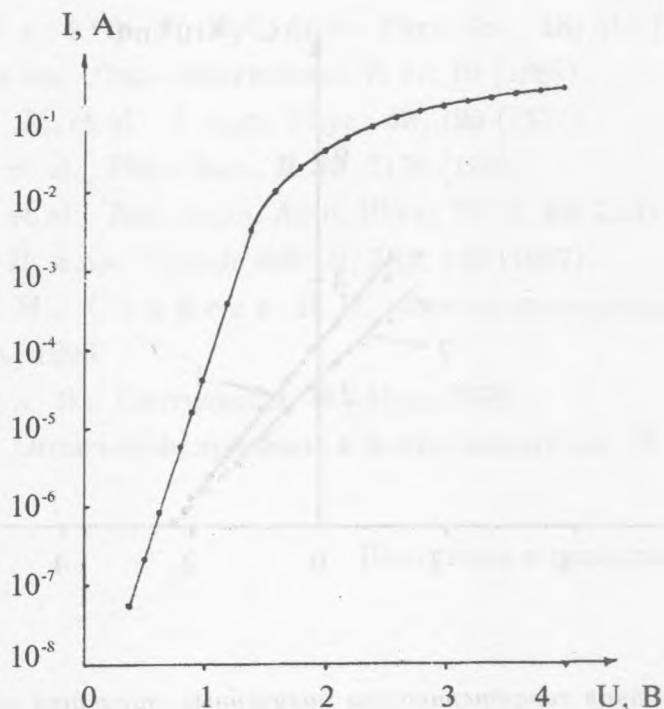


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика полученных структур при комнатной температуре.

случае зависимость емкости C от обратного напряжения описывается формулой

$$C = \left[\frac{e\alpha(\epsilon_s\epsilon_0)^2}{12(\varphi_k \pm U)} \right]^{1/3}, \quad (2)$$

где φ_k – высота барьера в p - n переходе, ϵ_s – диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, α – градиент концентрации акцепторных центров, U – приложенное напряжение.

Экстраполяция экспериментальной зависимости до пересечения с осью абсцисс дает значение напряжения, соответствующее величине потенциального барьера. В нашем случае она получилась равной $\varphi_k \approx 2,3$ В. Эта величина барьера близка к ширине запрещенной зоны $ZnSe$, что может быть только в случае наличия в нем p - n перехода. Близость величины рабочего напряжения при ЭЛ к ширине запрещенной зоны в свою очередь свидетельствует о том, что имеет место инжекция в p - n переходе.

Подставляя в формулу (2) значения $\varphi_k = 2,3$, $\epsilon_s = 8,66$ [13], $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Фм⁻¹, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а $C = 100$ пФ · мм⁻² при $U = 1,5$ В, мы находим градиент концентрации акцепторных центров $\alpha \sim 10^{20}$ см⁻⁴. Используя полученное значение α и

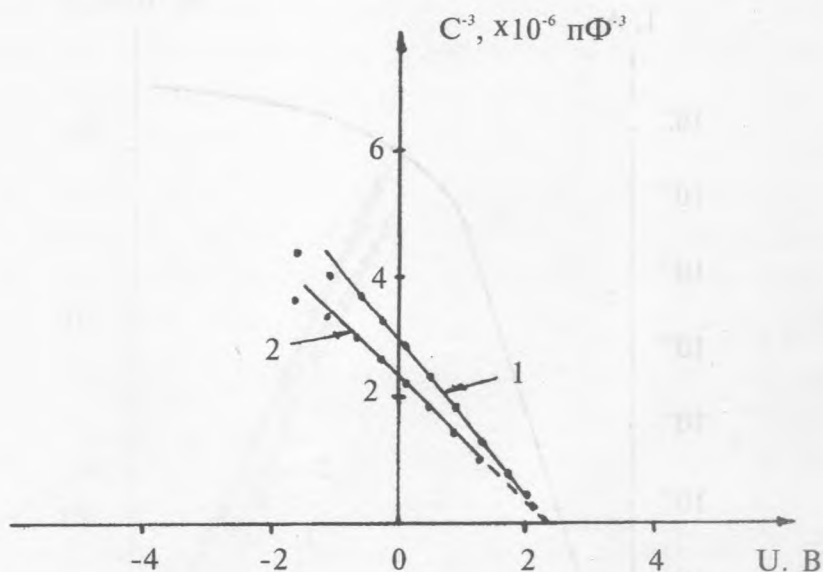


Рис. 4. Вольт-емкостная характеристика полученных структур при температурах жидкого азота (кривая 1) и комнатной (кривая 2).

известные величины, можно определить ширину $p-n$ перехода по формуле [11]

$$d = 2 \left(\frac{3\varphi_k \epsilon_s \epsilon_0}{2e\alpha} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

которая дает $d \sim 1$ мкм.

Таким образом, излучательные и электрофизические характеристики структур, полученных в результате ионной имплантации кислорода в монокристаллы $ZnSe$ с последующим отжигом в атмосфере кислорода, соответствуют характеристикам $p-n$ перехода с длинной базой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Георгобидани А. Н. УФН, **113**, 129 (1974).
- [2] Георгобидани А. Н., Котляревский М. Б. Изв. АН СССР, сер. Физ. **49**, 1916 (1985).
- [3] Park Y. S., Shin B. K. J. Appl. Phys., **45**, 1444 (1971).
- [4] Park Y. S. et al. Appl. Phys. Lett., **18**, 45 (1971).

- [5] Shin B. K.; Park Y. S. Bull. Amer. Phys. Soc., **18**, 414 (1973).
- [6] Козак Е. Н. и др. Физ. электроника, N 37, 19 (1988).
- [7] Yamaguchi M. et al. J. Appl. Phys., **48**, 196 (1977).
- [8] Akimoto K. et al. Phys. Rev., **B 39**, 3138 (1989).
- [9] Akimoto K. et al. Jap. Journ. Appl. Phys., Pt. 2, **28**, L531 (1989).
- [10] Бутхузи Т. В. и др. Труды ФИАН, **182**, 140 (1987).
- [11] Викулин В. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов, М., Радио и связь, 1990.
- [12] Берг А., Дин П. Светодиоды, М., Мир, 1979.
- [13] Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках, М., Мир, 1973.

Поступила в редакцию 9 октября 1996 г.