

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО ПЕРЕХОДА НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА

Р.А. Нусретов, Ж.К. Уролбоев (ТашГТУ)

*В статье рассмотрена возможность получения p-i-n структуры на основе плёнок ZnO на кремниевых подложках методом ультразвукового спрей-пиролиза. Показаны результаты измерений вольт-амперной характеристики данных структуры. Установлена электролюминесценция p-i-n структуры. Обнаружено, что спектр излучаемого света ZnO p-i-n структуры имеет максимумы в синей (440 нм) и зеленой (510 нм) областях оптического спектра. Синяя полоса эмиссии отражает излучающие рекомбинации донорно-акцепторных пар, где акцепторы - атомы азота, а зеленая полоса эмиссии - рекомбинации донорно-акцепторных пар, где глубокие доноры - вакансии кислорода.*

*The possibility of obtaining a p-i-n structure based on ZnO films on silicon substrates by the ultrasonic spray-pyrolysis method is considered in the article. The results of measurements of the current-voltage characteristic of these structures are shown. The electroluminescence of the p-i-n structure is established. It was found that the spectrum of the emitted light of the ZnO p-i-n structure has maxima in the blue (440 nm) and green (510 nm) regions of the optical spectrum. The blue emission band reflects the radiating recombinations of donor-acceptor pairs, where the acceptors are nitrogen atoms, and the green emission band is recombination of donor-acceptor pairs, where deep donors are oxygen vacancies.*

*Мақолада ультратовушли спрей-пиролиз усули ёрдамида кремнийли тагликларда ZnO-плёнка асосидаги p-i-n структурасини олиши имконияти куриб чицилган. Ушбу структураларнинг вольт-ампер характеристикалари улчов натижалари курсатилган. p-i-n структураларида электро-люминесценция аниқланди. ZnO p-i-n структурасида нурланган ёруклик спектри кук (440 нм) ва яшил (510 нм) уудудларда максималга эга эканлиги аниқланди. Эмиссиянинг кук рангли цисми акцепторлари - азот атомлари булган донор-акцептор жуфтларининг; эмиссиянинг яшил рангли цисми эса чуқур донорлари - кислород ваканциялари булган донор-акцептор жуфтларининг нурланишини курсатади.*

После получения достижений при создании излучающих устройств с нитридом галлия в коротковолновом диапазоне, все больше проявляется интерес к материалам на основе оксида цинка [1, 2]. ZnO - это широкозонный полупроводник с энергией запрещенной зоны  $E_g \sim 3,37$  эВ (при температуре 300 К). Также известно, что ультрафиолетовое свечение ZnO обусловлено экситонной рекомбинацией возбуждения. Вследствие высокой энергии связи электрона и дырки ( $E_{ex}(ZnO) = 60$  мэВ) экситоны в оксиде цинка термически стабильны вплоть до 550 К, что обуславливает высокий квантовый выход электролюминесценции и появление возможности стимулированного излучения, как в объёмном материале, так и в тонких плёнках - в свою очередь они могут быть гомо- или гетероструктурами [3].

До недавнего времени получение ZnO p-типа являлось неразрешимой задачей из-за присутствия в структурах оксида цинка значительных концентраций междуузельного цинка (Zn - мелкий донор, глубина залегания составляет  $\sim 0,1$  эВ). Попытки легирования оксида цинка азотом, элементом пятой группы, с замещением кислорода азотом, приводили лишь к компенсации лишним электроном междуузельного цинка. При нанесении тонких плёнок оксида цинка, легированных азотом (толщина плёнок  $\sim 120$  нм), на кремниевых подложках были получены плёнки ZnO с

концентрацией дырок  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что можно связать с уходом междоузельного цинка в кремниевую подложку [4]. Разница постоянных решёток кремния и ZnO приводит к напряженности кристаллических структур и, как следствие, к смещению края оптического поглощения.

Используя метод ультразвукового распыления для получения тонких пленок ZnO p- типа, авторами были изготовлены пленки ZnO с p-n переходом. Структура ZnO p-n перехода схематически показана на (рис. 1).

Сначала на кремниевой подложке p-типа проводимости был выращен слой ZnO p- типа, легированный азотом, толщиной порядка 200 нм. Затем на этот слой через специальную маску с круглыми одинаковыми отверстиями (кондуктор), который использовался для того, чтобы получить сразу несколько одинаковых по характеристикам структур на одной кремниевой пластине, был осажден другой слой нелегированного ZnO i-типа, то есть имеющего собственную проводимость. Толщина этого слоя составляла  $\sim 100$  нм. Поверх i-ZnO слоя был осажден легированный алюминием слой ZnO n-типа 200 нм. И на последнем этапе на слой ZnO n-типа через кондуктор с меньшим диаметром отверстий были осаждены металлические контакты (Al/Au) вакуумным термическим испарением. На обратную сторону кремниевой подложки был нанесен сплошной металлический контакт (Ni/Au).

На рис. 2 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) образца, изготовленного как ZnO с p-i-n-переходом. Как видно, вольт-амперная характеристика является типичной для полупроводниковых p-n переходов и имеет ярко выраженный выпрямляющий эффект. Ток утечки при обратном напряжении - 10 В составляет менее 100 мкА. При приложении напряжения в прямом направлении 10 В ток через структуру составлял 80 мА. Таким образом, отношение тока в прямом направлении к обратному току составляет  $\sim 10$ .

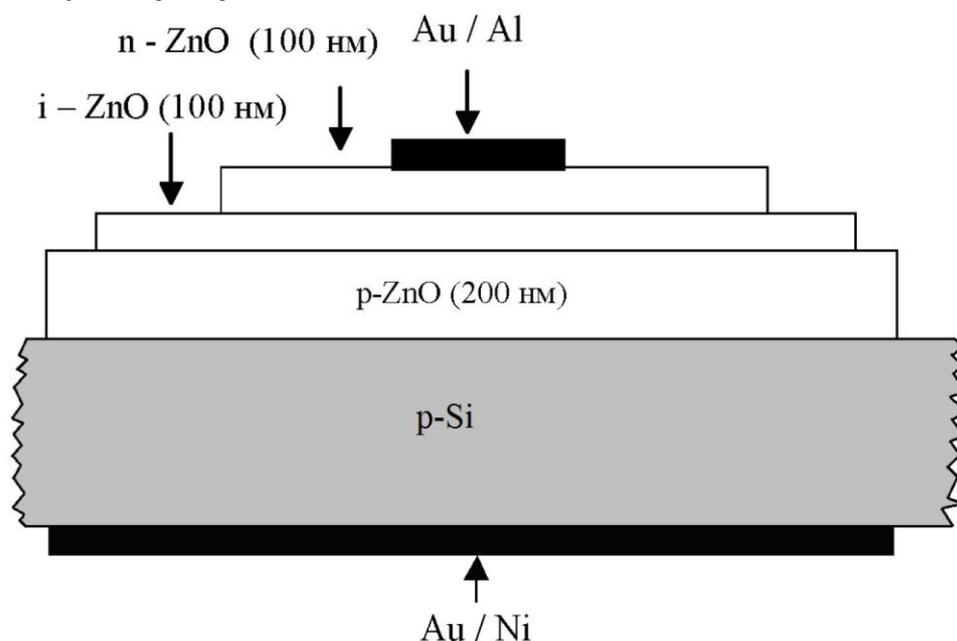


Рис. 1. Схематическое изображение структуры ZnO с p-i-n-переходом

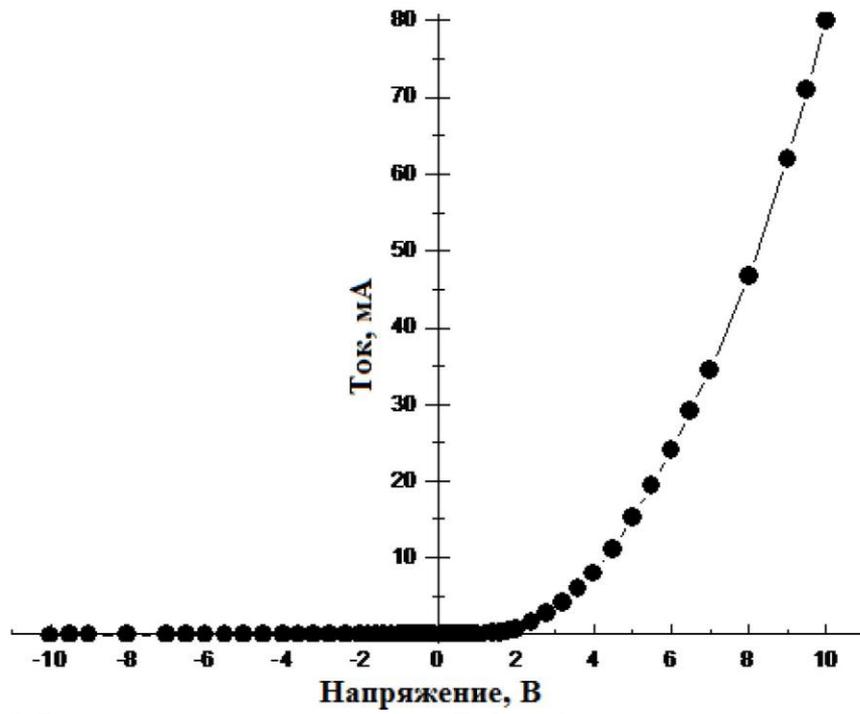


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ZnO с p-i-n переходом

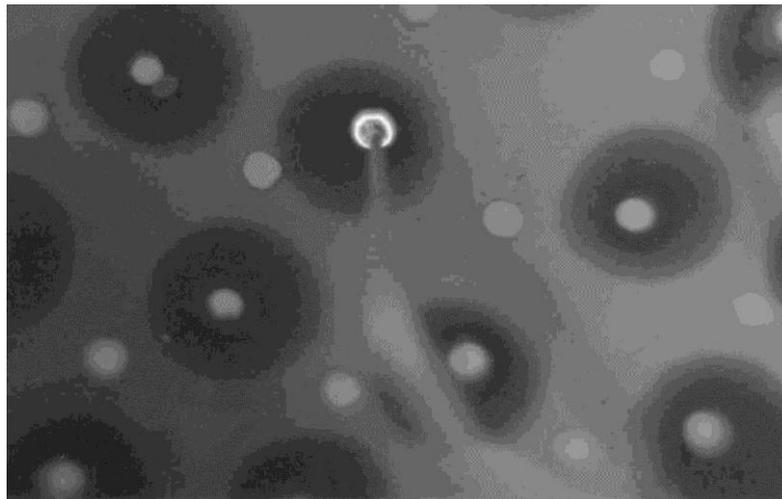


Рис. 3. Изображение ZnO с p-i-n структурой при приложении напряжения в прямом направлении

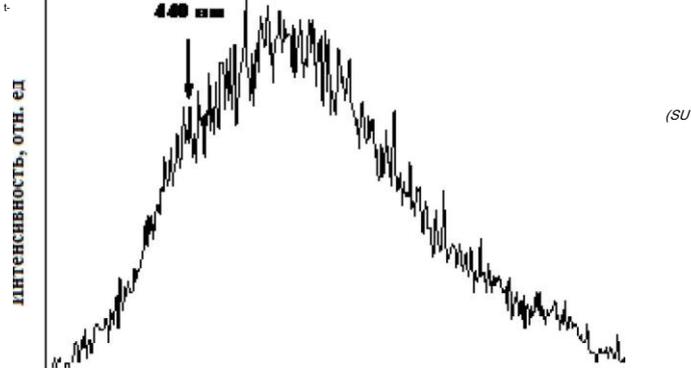


Рис. 4. Спектр электролюминесценции ZnO с p-i-n структурой

При приложении прямого напряжения наблюдалась электролюминесценция из данной p-i-n структуры ZnO. На рис. 3 приведено изображение p-i-n структуры ZnO. Отчетливо наблюдается световое пятно под металлическим электродом. Спектр излучаемого света представлен на рис. 4. Спектр электролюминесценции имеет максимумы в синей (440 нм) и зеленой (510 нм) областях оптического спектра. Синяя полоса люминесценции 440 нм обусловлена излучательной рекомбинацией на донорно-акцепторных парах в активном i- ZnO слое.

Так как концентрацию акцепторов не удалось поднять выше восемнадцатой степени, то расстояние  $r$  между донорной и акцепторной примесью в донорно-акцепторной паре намного больше постоянной решётки  $a_0$  ( $r \gg a_0$ ), тогда энергия испускаемого кванта света:

$$h\nu_L = E_g - E_D - E_A + AE$$

$$AE = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$$

где

где  $E_D$  и  $E_A$  - донорные (D) и акцепторные (A) энергии ионизации.

Примеси занимают в решетке кристалла дискретные положения, что приводит к появлению в спектре люминесценции дискретных линий, согласно коэффициенту  $\gamma$ . Но, при больших как в нашем случае  $\gamma$ , линии перекрываются, образуя более широкую полосу спектра. Естественно, это приводит к уменьшению энергии свечения.

Зеленая полоса излучения 510 нм обусловлена излучательной рекомбинацией с участием глубоких уровней, по-видимому, вакансий атомов кислорода.

Методом спрей-пиролиза на кремниевых подложках p-типа, были получены гомо- и гетероструктуры ZnO. Обе структуры имеют ярко выраженную диодную вольт-амперную характеристику.

Обнаружено, что спектр излучаемого света ZnO с p-i-n структурой имеет максимумы в синей (440 нм) и зеленой (510 нм) областях оптического спектра. Синяя полоса эмиссии приписана излучающей рекомбинации донорно-акцепторных пар, где акцепторы - атомы азота, зеленая полоса эмиссии происходит путем образования рекомбинации донорноакцепторных пар, где глубокие доноры - атомы кислорода.

В результате, полученные новые данные вносят определенный вклад в физику широкозонных полупроводников и представляют интерес для синтеза материалов, применяемых в приборах оптоэлектроники при определении ВАХ.

### Литература

1. Ozgur U., Alivov Ya. I., Liu C., Teke A., Reshchikov M. A., Dogan S., Avrutin V., Cho S. J., Morko9 H. // Journal of applied physics, 2005. Vol. 98, 041301, P. 1-103.
2. Yuldashev S. U., Nusretov R. A., Khvan I. V., Yalishev V. Sh., Kang T. W. // Japanese Journal of Applied Physics, 2008. Vol.47. No.1. P. 133-135.
3. Khomchenko V.S., Lytvyn O.S., Mazin M.A., Rodionov V.E., Vlaskina S.I., Demydiuk P.V., Yuldashev S.U. // Nanoscience and Nanoengineering, 2016. 4(2). P. 46-51.
4. Yuldashev Sh. U., Kang T. W., Nusretov R.A., Khvan I. V., Khabibullaev P.K., Yeo Y.K. and Hengehold R.L. Electroluminescence of n-Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O/ ZnO /p- Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O Heterostructures Grown on Si Substrates // J. Korean Phys. Soc.. - Seoul, 2008. V.53. P. 2913-2916.
5. Yuldashev Sh. U., Nusretov R. A., Khvan I. V., Yalishev V. Sh., and Kang T. W. White light emission from ZnO/ Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O heterostructures grown on Si substrates. // Jpn. Appl. Phys. - Tokyo, 2008. V.47. P. 133-135.
6. Khabibullaev P.K., Yuldashev Sh.U., Nusretov R.A., Khvan I.V. Electroluminescence of ZnO p-i-n structures prepared by ultrasonic spray pyrolysis // Doklady Physics / Doklady Akademii Nauk (Proceedings of the Russian Academy of Sciences). - Moscow, 2007. V.414. P. 300-302.