

## ИНЖЕКЦИОННО-КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ НЕУПОРЯДОЧЕННОГО СЕЛЕНИДА ЦИНКА

А. П. Беляев, В. П. Рубец, Х. А. Тошходжаев, И. П. Калинин

Санкт-Петербургский технологический институт им. Ленсовета, 198013, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 12.02.1992. Принята к печати 24.04.1992)

Сообщается о результатах исследования электрических и оптических свойств гетероструктур  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—CdTe—In}$ . Приводятся вольт-амперные характеристики, спектры поглощения и фотолюминесценции. Показано влияние отжига на электрофизические свойства указанных гетероструктур.

Показано, что: проводимость гетероструктуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$  на основе субмикронного слоя селенида цинка определяется приграничной с катодом концентрацией носителей, собственных или инжектированных, на краю подвижности полупроводника ZnSe; отжиг гетероструктуры способствует формированию неоднородного потенциального рельефа зон ZnSe; изменения потенциального рельефа зон, происходящие при отжиге, носят не только количественный, но и качественный характер.

Исследованиям инжекционно-контактных явлений посвящено большое число публикаций. Несколько вне этого внимания оказались гетероструктуры с субмикронными слоями. Однако именно на базе такого рода структур созданы широко применяемые сегодня приборы, в частности телевизионные передающие трубки типа ньюмикон и ньюкосвикон [1].

В связи с этим в настоящей работе приводятся результаты электрических и оптических исследований гетероструктур на основе субмикронного слоя селенида цинка, т. е. гетероструктур, используемых в упомянутых приборах.

Исследовались гетероструктуры, приготовленные путем послойного роста на стеклянной подложке слоев оксида индия, селенида цинка и индия, и гетероструктуры, содержащие слои оксида индия, селенида цинка, теллурида кадмия и индия.

Толщина слоя оксида индия, наносимого методом катодного распыления, составляла  $\sim 0.01$  мкм. Удельное сопротивление  $\sim 5.0 \cdot 10^{-3}$  Ом·см. Все остальные слои наносились методом термического напыления в вакууме при давлении  $10^{-3}$  Па. Слои специально не легировались. Толщина слоя селенида цинка варьировалась в интервале  $0.05 \div 0.1$  мкм. Структура слоя представляла собой текстуру, ориентированную плоскостью (111) параллельно подложке. Угол разориентации отдельных кристаллитов относительно друг друга составлял  $3 \div 5^\circ$ .

Толщина слоя теллурида кадмия не превышала долей микрона.

Слои оксида индия и селенида цинка обладали электронной проводимостью. Тип проводимости определялся по знаку термоэдс.

В приготовленных таким образом образцах исследовались зависимости тока от напряжения, люминесценция и край поглощения.

Основные результаты исследований представлены на рис. 1—3.

Ряд гетероструктур перед измерениями отжигались в течение 5 мин при температуре  $550^\circ\text{C}$ . После отжига на образцы, в которых предполагались электрические измерения, наносился индиевый слой. На отожженных гетероструктурах проводились те же исследования, что и на образцах без отжига — результаты отражены на рис. 1, 2. Фотолюминесценция в отожженных образцах не наблюдалась.

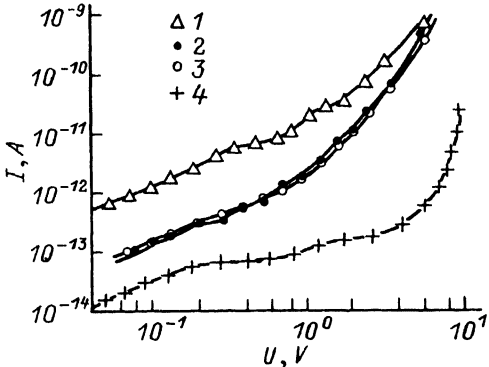


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики гетероструктур  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$  (1, 4) и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—CdTe—In}$  (2, 3), полученные до (1, 2) и после (3, 4) отжига. Катод —  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

Представленные данные позволяют утверждать, что в результате отжига электрические свойства гетероструктуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—CdTe—In}$  практически не изменяются, а в гетероструктуре  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$  почти на 2 порядка уменьшается проводимость, структура теряет свои фотолуминесцентные свойства и характеризуется более слабой, чем неотожженные образцы, зависимостью ко-

эффициента поглощения от энергии фотона.

Согласно теории [2], проводимость гетероструктуры на основе субмикронного слоя полупроводника определяется эффективной концентрацией носителей заряда  $n_{\text{eff}}$ :<sup>1</sup>

$$n_{\text{eff}} \approx N_c \exp\left(\frac{\chi - \Psi_c}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{\epsilon \epsilon_0 E_D d_c}{\epsilon_c kT}\right), \quad (1)$$

$$E_D \approx \frac{1}{L} \left( \frac{\Psi_A}{e} - \frac{\Psi_c}{e} \right),$$

где  $N_c$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости;  $\chi$  — электронное сродство;  $\Psi_c$ ,  $\Psi_A$  — работа выхода соответственно из катода и анода;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\epsilon_c$  — диэлектрическая проницаемость прикатодного зазора;  $E_D$  — напряженность диффузионного поля в структуре;  $T$  — абсолютная температура;  $k$  — постоянная Больцмана;  $e$  — заряд электрона;  $L$  — толщина слоя полупроводника;  $d_c$  — толщина прикатодного зазора, имеющего место между катодом и слоем полупроводника.

Из (1) следует, что отжиг не должен влиять на проводимость структуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$ , если пренебречь его влиянием на дрейфовую подвижность носителей. Действительно, величина  $\Psi_c$ , входящая в (1), изменяться не может, так как слой индия наносится после отжига;  $d_c$ , как следует из расчетов, проведенных на основе экспериментальных вольт-амперных характеристик (ВАХ) по методике [2], остается практически неизменной. Диффузионное поле  $E_D$  при отжиге существенных изменений также не претерпевает, поскольку в противном случае проводимость структуры должна была бы уменьшиться только при одном направлении сквозного тока, в то время как при противоположном — возрасти. Однако такого факта экспериментально не наблюдалось. Остается электронное сродство селенида цинка  $\chi$ , изменение которого в процессе отжига трудно предположить. Тем не менее результаты эксперимента указывают на уменьшение проводимости гетероструктуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$  после отжига почти на 2 порядка, что можно видеть из рис. 1. Очевидно, что столь существенное уменьшение

<sup>1</sup> Формула (1) применима для структур, в которых слой полупроводника много меньше радиуса Дебая. Для рассматриваемой гетероструктуры радиус Дебая в слое селенида цинка, оцененный на основании экспериментальных данных о проводимости в условиях, близких к дрейфово-диффузионному равновесию, составляет сотые доли см, что значительно больше толщины слоя. При расчетах использовалось значение дрейфовой подвижности  $0.1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , типичное, согласно литературным данным, для подобного рода пленок. Даже если принять во внимание возможность ошибки в проведенной таким образом оценке радиуса Дебая, различие в 3 порядка, нам представляется, делает оправданным применение формулы (1).

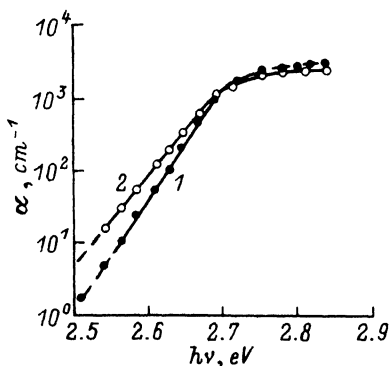


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$  в слое селенида цинка до (1) и после (2) отжига.

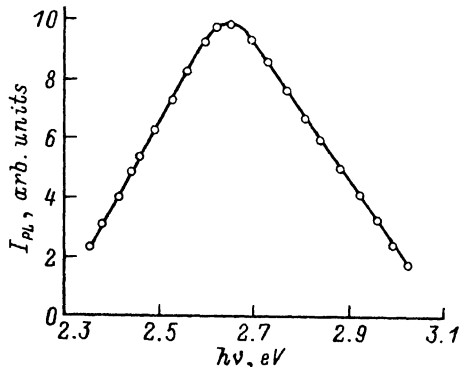


Рис. 3. Спектральная зависимость интенсивности фотолуминесценции  $I_{PL}$  слоя селенида цинка до отжига образца.  $T = 4$  К.

проводимости нельзя отнести и на счет изменения дрейфовой подвижности, так как трудно поверить, что при столь кратковременном отжиге может произойти уменьшение последней на 2 порядка.

Несоответствия теории и эксперимента можно избежать, если полагать, что слой селенида цинка является неупорядоченным полупроводником, т. е. полупроводником, внутри которого существует случайное электрическое поле, модулирующее энергетические зоны. Процессы токопереноса в таких полупроводниках в зависимости от масштаба неоднородностей определяются концентрацией носителей либо на уровне протекания, либо на краю подвижности [3-5]. Если характерные размеры неоднородностей значительно превосходят дебаевский радиус, де-бройлевскую длину волны и длину свободного пробега носителей, то потенциальный рельеф зон считается крупномасштабным, и проводимость определяется концентрацией носителей на уровне протекания. Если же указанные условия нарушаются, то имеют место квантовые эффекты, и проводимость оценивают по концентрации носителей на краю подвижности. С учетом субмикронной толщины слоя селенида цинка очевидно, что в данном случае более применимо понятие края подвижности.

Однако, если признать, что процессы токопереноса в селениде цинка определяются концентрацией носителей на краю подвижности, то проводимость гетероструктуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$  будет определяться приэлектродной концентрацией носителей не на дне зоны, а на краю подвижности. Формально это значит, что в выражение (1) вместо электродного сродства  $\chi$  следует подставить энергетическое положение края подвижности. Энергетическое положение края подвижности зависит в свою очередь от амплитуды неоднородностей и характера потенциального рельефа зон, т. е. от величин, которые в процессе отжига могут изменяться. Противоречие между теорией и экспериментом снимается.

Оценим, является ли действительно слой селенида цинка неупорядоченным полупроводником. Наличие потенциального рельефа в полупроводнике должно заметно сказываться на его свойствах [3-5]. К таким свойствам, в частности, относятся проводимость, фотолуминесценция и поглощение света. Для неупорядоченных полупроводников характерны низкие значения проводимости; большая ширина полос фотолуминесценции (если фотолуминесценция имеет место); наличие края Урбаха в поглощении (экспоненциальная зависимость между коэффициентом поглощения и энергией кванта света). Все указанные свойства, как следует из эксперимента (рис. 1-3), присущи слою селенида цинка. Следовательно, можно констатировать, что слой селенида цинка действительно является неупорядоченным полупроводником.

Рассмотрим, как влияет отжиг на характер неупорядоченности полупроводника. Из рис. 2 можно видеть, что после отжига зависимость коэффициента поглощения от энергии фотона ослабевает. Подобное ослабление наблюдали авторы [6] после бомбардировки образца ионами He, когда неупорядоченность полупроводника с очевидностью возрастала. В пользу усиления неупорядоченности слоя селенида цинка после отжига говорит и гашение люминесценции. Наконец, предположение о росте неупорядоченности подтверждается рентгенофазовым анализом. Эксперимент показал, что после отжига пики рентгенограммы несколько уширяются.

Что же является причиной возрастания неупорядоченности в процессе отжига? Для ответа на этот вопрос вспомним, что отжиг практически не влиял на гетероструктуру  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—CdTe—In}$ . Указанная гетероструктура отличается от рассматриваемой только наличием слоя теллурида кадмия. Естественно полагать, что если до отжига ее проводимость существенно меньше, чем проводимость гетероструктуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$ , то слой CdTe вносит в процессы токопереноса определяющий вклад. Однако после отжига, как можно видеть из рис. 1, напротив, проводимость гетероструктуры без слоя теллурида кадмия во много раз ниже. Следовательно, отжиг по-разному влияет на слой селенида цинка при закрытой и открытой его поверхности (если исключить из рассмотрения маловероятный, как нам представляется, процесс прямо противоположного влияния отжига на слой селенида цинка и теллурида кадмия). Поскольку электронографически нам не удалось обнаружить на открытой при отжиге поверхности слоя селенида цинка окисной пленки, можно полагать, что причиной роста неупорядоченности является удаление из объема ZnSe в процессе отжига через поверхность каких-то атомов. Учитывая склонность селенида цинка к образованию вакансий цинка [7], которые, будучи заряженными дефектами, при случайном расположении в объеме могут формировать потенциальный рельеф зон, естественно связать процесс роста неупорядоченности именно с атомами цинка. Таким образом, с большой долей вероятности мы можем полагать, что проводимость гетероструктуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$  после отжига уменьшается вследствие увеличения амплитуды неоднородности потенциального рельефа зон селенида цинка, обусловленного образованием вакансий цинка. Для рассматриваемой гетероструктуры, с учетом полученных выше результатов [см. рис. 1 и выражение (1)], уменьшение проводимости вместе с ростом амплитуды неоднородности возможно лишь при приближении края подвижности к уровню вакуума. Такое поведение края подвижности, как следует из [4, 8], возможно лишь, если при этом будет изменяться функциональный характер случайного потенциала.

В заключение обратим внимание на характер ВАХ гетероструктуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$  до и после отжига. Как можно видеть из рис. 1, он практически не меняется. Исходя из этого, можно полагать, что инжекционно-контактные процессы в образце также остаются неизменными. Очевидно, отличие лишь в том, что вклад в проводимость отожженной гетероструктуры будет вносить меньшая часть инжектированных в зону проводимости электронов, и, следовательно, участок резкого нарастания тока на ВАХ должен иметь начало при больших внешних смещениях. Экспериментальные данные, показанные на рис. 1 (кривые 1 и 4), подтверждают сделанное предположение.

Таким образом, на основании приведенных выше результатов можно сделать следующие выводы.

1. Проводимость гетероструктуры  $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$  на основе субмикронного слоя селенида цинка определяется приграничной концентрацией носителей, собственных или инжектированных, на краю подвижности полупроводника ZnSe.
2. Отжиг гетероструктуры на основе субмикронного слоя селенида цинка способствует формированию неоднородного потенциального рельефа зон ZnSe.
3. Изменения потенциального рельефа зон ZnSe, происходящие при отжиге образца, носят не только количественный, но и качественный характер.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] S. Fujiwara, T. Chikamura, O. Eguchi, J. Yamamoto, Y. Kuramoto, M. Fukai. National Technical Report, 25, 286 (1979).
- [2] А. Н. Зюганов, С. В. Свечников. Инжекционно-контактные явления в полупроводниках, 255. Киев (1981).
- [3] А. Я. Шик. В кн.: Кинетические явления в неоднородных полупроводниках. Неоднородные и примесные полупроводники во внешних полях, 22. Кишинев (1979).
- [4] Н. Мотт, Э. Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах, 663. М. (1982).
- [5] А. П. Беляев, И. П. Калинин, В. А. Санитаров. ФТП, 18, 1975 (1984).
- [6] J. A. Olley. Sol. St. Comm., 13, 1437 (1973).
- [7] А. Милнс, Д. Фойхт. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник, 432. М. (1975).
- [8] А. Я. Шик. ЖЭТФ, 71, 1159 (1976).

Редактор: Л. В. Шаронова

---