

отсутствуют. Полученные нами теоретические результаты могут быть полезны при качественном анализе экспериментов, обусловленных тепловым смещением энергетических уровней в кристаллах $A^{IV}B^{IV}C_2^V$.

Список литературы

- [1] Fan H. Y. // Phys. Rev. 1951. V. 82. P. 900—905.
- [2] Antoncik E. // Czech. J. Phys. 1955. V. 5. N 4. P. 367—378.
- [3] Baumann K. // Phys. St. Sol. (b). 1974. V. 63. N 1. P. K74—K74.
- [4] Allen Ph. B., Heine V. // J. Phys. C. 1976. V. 9. N 12. P. 2305—2312.
- [5] Tsay Y. F., Gong B. // Phys. Rev. B. 1972. N 6. P. 2330—2336.
- [6] Camassel J., Auvergne D. // Phys. Rev. B. 1975. V. 12. N 8. P. 3258—3267.
- [7] Walter J. P., Zucca R. R., Cohen M. L., Shen Y. R. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 24. N 3. P. 102—104.
- [8] Hennel A. M. // Phys. St. Sol. (a). 1971. V. 8. N 2. P. K111—K113.
- [9] Shindo K., Hoshino K. // Phys. Lett. A. 1972. V. 41. N 3. P. 243—244.
- [10] Vetelino J. F., Gaur S. P., Mitra S. S. // Phys. Rev. B. 1972. V. 3. N 6. P. 2360—2366.
- [11] Кожина И. И. // Вестн. ЛГУ. 1979. № 6. С. 83—87.
- [12] Кожина И. И., Ошерин В. Н. // Вестн. ЛГУ. 1982. № 10. С. 35—39.
- [13] Weaire D., Noolandi J. // J. Phys. Coll. 3. 1975. V. 36. P. C3—27—C3—29.
- [14] Masumoto K., Isomura S. // Trans. Nat. Res. Inst. Metals. 1966. V. 8. N 5. P. 200—209.
- [15] Лебедев А. А., Овезов К., Прочухан В. Д., Рудь Ю. В., Сергинов М. // Письм. ЖЭТФ. 1976. Т. 2. В. 9. С. 385—390.
- [16] Кесаманлы Ф. П., Рудь Ю. В., Слободчиков С. В. // ДАН СССР. 1965. Т. 161. В. 5. С. 1065—1066.
- [17] Акимченко И. П., Борщевский А. С., Иванов В. С. // ФТП. 1973. Т. 7. В. 1. С. 144—148.
- [18] Madelon R., Shaimi M., Hairic A., Poumier K., Mercey B. // Sol. St. Commun. 1984. V. 5. N 6. P. 545—548.
- [19] Сахарулидзе Г. А., Тучкевич В. М., Уханов Ю. М., Шмарцев Ю. В. // ФТТ. 1966. Т. 8. В. 4. С. 1159—1164.
- [20] Strauss A. J., Rosenberg A. J. // J. Phys. Chem. Sol. 1961. V. 17. N 3. P. 278—284.

Кемеровский государственный университет

Получено 3.01.1991

Принято к печати 18.01.1991

ФТП, том 25, вып. 5, 1991

***p-n*-ГОМОГЕННЫЕ InSe-ФОТОДИОДЫ**

Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З.

Как полупроводниковое соединение моноселенид индия используется в качестве основы многих диодных структур: гетеропереходов [1, 2], барьеров Шоттки [3], *p-n*-гомопереходов [4-6]. Сравнение свойств *p-n*-гомогенных InSe-диодов позволяет заключить, что в [5] при их изготовлении не достигнуто резкого распределения концентрации донорных и акцепторных примесей в полупроводнике, а в [6] полученные диоды не обладали идеальными вольт-амперными характеристиками (ВАХ).

В настоящей работе для формирования потенциального барьера в InSe использован хорошо зарекомендовавший себя при создании гетеропереходов метод оптического контакта [7] и установлено, что свойства диодов, полученных таким способом, удовлетворительно описываются в рамках диффузионной теории *p-n*-переходов.

Нелегированные и специально легированные примесью кадмия [8] кристаллы InSe выращивались методом Бриджмена и имели соответственно *n*- и *p*-тип проводимости с концентрацией основных носителей $\sim 10^{15}$ и $\sim 10^{13}$ см⁻³. Диоды готовились аналогично [7] и имели площадь $\sim 6 \div 10$ мм². Толщина слоя *n*-InSe в различных образцах составляла $\sim 20 \div 30$ мкм, а *p*-InSe — $300 \div 500$ мкм.

Измерения вольт-фарадных (ВФХ) и вольт-амперных характеристик исследуемых диодов проводились по стандартной схеме с той лишь разницей, что для устранения влияния последовательного сопротивления диодов на эти характе-

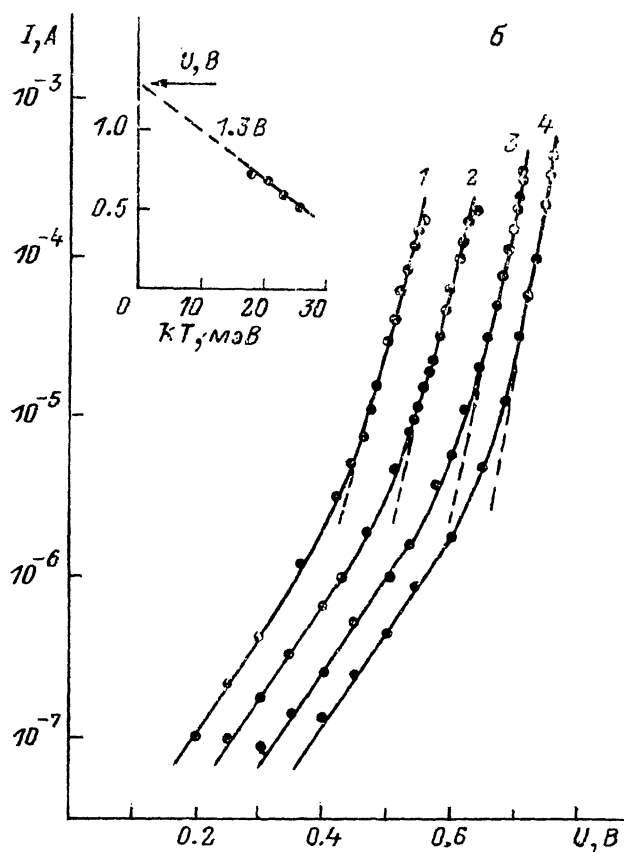
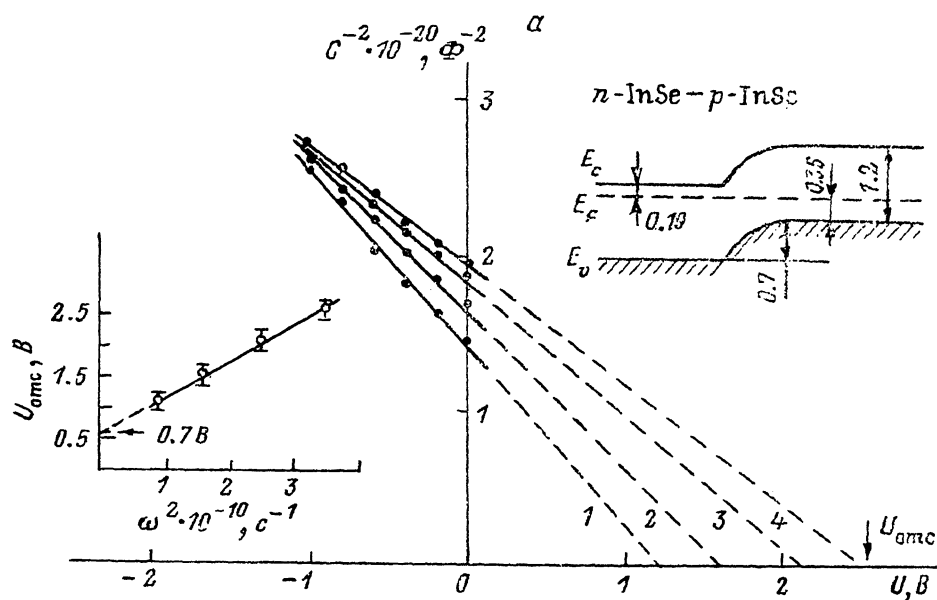


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики InSe-диодов при различных частотах (а), прямые ветви вольт-амперных характеристик InSe-диодов при различных температурах (б).
 а) f , кГц: 1 — 15, 2 — 20, 3 — 25, 4 — 30. На вставках показаны частотная зависимость емкостного напряжения отсечки и зонная диаграмма гомоперехода (все величины выражены в эВ). б) T , К: 1 — 300, 2 — 270, 3 — 240, 4 — 210. На вставке — график зависимости, выраженной уравнением (2).

ристики в первом случае использовались их частотные зависимости [9], а во втором — экспоненциальная связь фотоэлектрических величин: фототока от напряжения холостого хода [10].

На рис. 1, а представлены ВФХ изготовленных диодов при различных частотах. В координатах C^{-2} от U они линейны, что указывает на резкий характер сформированного в InSe $p-n$ -перехода. Поскольку причиной расхождения характеристик является последовательное сопротивление диодов, диффузионный потенциал определялся из частотной зависимости напряжения отсечки $U_{отс} = f(\omega^2)$ при $\omega \rightarrow 0$ [9]. Его величина составила ~ 0.7 В (см. нижнюю вставку на рис. 1, а) и использовалась в дальнейшем при построении энергетической зонной диаграммы гомоперехода, которая изображена на этом же рисунке вверху. Значения положений уровня Ферми в n - и p -InSe были получены в каждом конкретном случае по формуле [11] $|E_{c(v)} - E_F| = kT \ln [N_{c(v)} / N_{n(p)}]$, где $E_{c(v)}$ — энергия дна зоны проводимости (потолка валентной зоны), E_F — энергия уровня Ферми, $N_{c(v)}$ — эффективная плотность состояний в соответствующих разрешенных зонах, $N_{n(p)}$ — концентрации основных носителей заряда. Еще один параметр — ширина запрещенной зоны E_g при комнатной температуре — взят из работы [12]. Особенностью данной диаграммы является то, что практически весь изгиб зон приходится на p -область. Это связано с большим различием в концентрациях основных носителей используемых материалов.

Температурные зависимости ВАХ диодов показаны на рис. 1, б. Они исследовались в интервале от 300 до 210 К с периодом в 30 град и точностью поддержания температуры в кристате ± 0.1 град. Измерения при $T < 210$ К были затруднены в связи с резким возрастанием сопротивления базы диодов. В полупрологарифмических координатах все изображенные кривые характеризуются двумя линейными участками, по наклону которых можно определить диодный коэффициент n прямой ветви ВАХ при каждой из исследованных температур. Экспериментальный наклон в верхней части ВАХ следует изменениям температуры таким образом, что при всех $T \approx 1.09$. Диоды, обладающие указанными свойствами $I-U$ -зависимости, очень близки к идеальным, для которых $n=1$, а механизм протекания тока через переход в них определяется диффузией носителей [13]. На это указывают большая величина диффузионного потенциала, определенная из ВФХ, малая концентрация основных носителей заряда в p -InSe и их низкая подвижность в направлении $p-n$ -перехода [14].

В нижней части ВАХ диодный коэффициент $n > 3$, а параллельное смещение характеристик с понижением температуры свидетельствует о независимости прямого тока от температуры, что имеет место в случае туннелирования [13]. Однако, как отмечалось в [15], туннелирование носителей через $p-n$ -переход при малых прямых смещениях маловероятно, поскольку толщина обедненной области еще достаточна, чтобы препятствовать туннелированию. Альтернативное туннелированию объяснение наблюдаемой закономерности в протекании прямого тока следует из исследования характеристик большого числа образцов. Более тщательное приготовление $p-n$ -перехода позволяет уменьшить параметр n для нижнего участка ВАХ и одновременно снизить величину тока, при которой происходит переход к более крутой зависимости ВАХ. В специально деформированных образцах, наоборот, значения n возрастают и существенно повышается величина самих токов на указанном участке ВАХ. Такое поведение характеристик указывает на их связь с шунтирующими токами утечек, которые могут быть вызваны дефектами $p-n$ -перехода. С повышением напряжения преобладающим над токами утечек становится диффузионный ток, а характеристики ток—напряжение различных образцов совпадают.

Температурная зависимость диффузионного тока позволяет определить E_g полупроводника. Для того чтобы убедиться в правильности интерпретации полученных результатов и построения зонной диаграммы, из семейства ВАХ была найдена ширина запрещенной зоны InSe. Выражение, связывающее прямой ток с температурой, имеет вид [13]

$$I \sim T^{3+\frac{\gamma}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}} e^{\frac{qU}{nkT}}, \quad (1)$$

которое справедливо при $qU \gg kT$. Здесь γ — некоторый численный параметр. Прологарифмировав обе части уравнения (1) и приняв слабо меняющуюся величину $\ln T$ за постоянную, можно прийти к другому выражению:

$$qU - nE_g = ckT, \quad (2)$$

где c — новая постоянная, учитывающая, что значение $\ln I$ фиксировано при различных T на верхнем участке ВАХ. Зависимость (2) представлена на вставке к рис. 1, б, а ее продолжение к $T \rightarrow 0$ позволяет определить значение nE_g при 0 К. Если учесть, что $n=1.09$, то величина $E_g \approx 1.3$ эВ, что хорошо согласуется с литературными данными для ширины запрещенной зоны InSe при низких температурах [12].

Следовательно, приведенные результаты измерений позволяют заключить, что на основе InSe можно формировать качественные $p-n$ -переходы. Такие

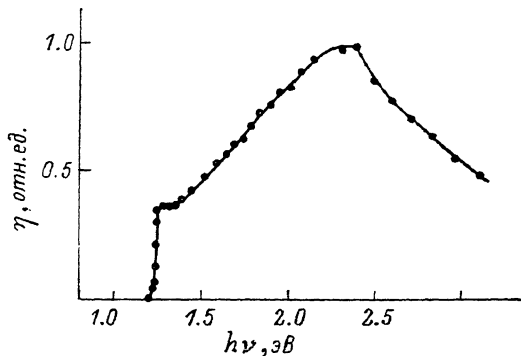


Рис. 2. Спектральное распределение относительной квантовой эффективности InSe-диодов при комнатной температуре.

диоды обладают значительной фоточувствительностью, сравнимой с чувствительностью кремниевых фотодиодов. При освещении мощностью ~ 100 мВт/см² напряжение холостого хода диодов достигает ~ 0.6 В. Как видно из рис. 2, широкая полоса спектральной чувствительности позволяет использовать InSe-гомопереходы в качестве фотодетекторов или преобразователей света.

Список литературы

- [1] Бакуменко В. Л., Ковалюк З. Д., Курбатов Л. Н., Тагаев В. Г., Чижко В. Ф. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 2. С. 374—377.
- [2] Малик А. И., Баранюк В. Б., Ковалюк З. Д. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 2. С. 409—411.
- [3] Giulio M. D., Micocci G., Rizzo A., Terore A. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 10. P. 5839—5843.
- [4] Segura A., Guesdon J. P., Besson J. M., Chevy A. // Rev. Phys. Appl. 1979. V. 14. N 1. P. 253—257.
- [5] Segura A., Guesdon J. P., Besson J. M., Chevy A. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 2. P. 876—888.
- [6] Shigetomi S., Ikari T., Koga Y., Shigetomi S. // Japan. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 7. P. 1271—1274.
- [7] Бакуменко В. Л., Чижко В. Ф. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 10. С. 2000—2002.
- [8] Segura A., Martinez-Tomas M. C., Mari B., Cosonovas A., Chevy A. // Appl. Phys. A. 1987. V. 44. N 3. P. 249—260.
- [9] Goodman A. M. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 2. P. 329—338.
- [10] Манассон В. А., Малик А. И. // Приб. и техн. эксперимента. 1981. № 5. С. 190—191.
- [11] Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М., 1977. 672 с.
- [12] Landolt-Börnstein. Numerical Data Functional Relationships Sci. Techn. / Ed. by O. Madelung. Berlin, 1983. 562 p.
- [13] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984. Т. 1. 456 с.
- [14] Shigetomi S., Ikari T., Koga Y., Shigetomi S. // Phys. St. Sol. (a). 1985. V. 88. N 1. P. K71—K73.
- [15] Бакуменко В. Л., Курбатов Л. Н., Тагаев В. Г. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 7. С. 1145—1148.

Институт проблем материаловедения АН УССР
Черновицкое отделение

Получено 25.10.1990
Принято к печати 28.01.1991