

## ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ InSe В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 4.2—30 К

Гусев М. Ю., Дмитриев А. И., Зюганов А. Н., Ковалюк З. Д.,  
Лазоренко В. И., Лашкарев Г. В., Смертенко П. С.

Исследование вольт-амперных характеристик монокристаллов слоистого полупроводника InSe в области температур 4.2—30 К свидетельствует о том, что объект представляет собой естественную сверхрешетку с периодом порядка 1500 Å, в которой при внешних электрических полях выше 1 В/см имеет место прыжковая проводимость по локализованным примесям.

Предположение о том, что политипные слоистые полупроводники, обладающие дополнительной периодичностью с периодом, значительно превышающим размеры элементарной ячейки кристалла, могут иметь свойства сверхрешеток (СР), высказывалось в [1], однако экспериментального подтверждения этого получено не было. В [2] теоретически показана возможность образования СР в ряде твердых растворов, испытывающих полиморфные превращения, где образуются одномерные длиннопериодические структуры, обусловленные периодическим распределением дефектов упаковки, расположенных в параллельных плоскостях. С учетом двумерного характера газа — носителя тока (НТ) [3–6] в слоистом InSe в гелиевой области температур и политипизма последнего представляется актуальным исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) при низких температурах с целью выявления механизмов токопереноса, влияния на них интеркаляции, а также поиска особенностей, свойственных СР. Эти особенности должны заключаться, в частности, в появлении на ВАХ  $N$ -образных областей с участками отрицательной дифференциальной проводимости [1, 7].

ВАХ монокристаллов  $\beta$ -политипа InSe, выращенных методом Бриджмена, исследовались в квазистатическом режиме с помощью автоматизированного комплекса «Иней», управляемого микро-ЭВМ «Электроника-60». Длительность импульсов фиксированного напряжения или тока составляла 10—100 мс. Измерения проводились в конце импульса. Электрическое поле прикладывалось как вдоль ( $E \parallel C$ ) предполагаемой оси СР (кристаллографическая ось С), так и поперек ее ( $E \perp C$ ). Измерения проводились в диапазоне температур 4.2—60 К.

ВАХ для случая вектора напряженности электрического поля  $E \perp C$  приведены на рис. 1. В области  $E < 0.6$  В/см,  $I < 10^{-6}$  А и  $T < 18$  К видны  $N$ -образные особенности. При напряженностях поля  $E > 0.6$  В/см ВАХ сверхлинейны, на зависимостях степени ВАХ от поля имеется максимум, а при  $E > 60$  В/см кривые практически совпадают и ток не зависит от температуры.

Проведенные оценки с использованием методики [8] на основе [1] показывают, что наблюдаемые особенности ВАХ могут быть интерпретированы в области  $T < 18$  К и низких напряженностей поля ( $E < 0.6$  В/см) как проявление свойств СР с дополнительным периодом порядка  $10^{-7}$  м.

При  $T > 18$  К  $N$ -образные особенности ВАХ пропадают, что является отражением перехода от двумерного режима проводимости к трехмерному. Переход такого типа обнаружен нами ранее при исследовании кинетических свойств InSe [6, 9].

В области высоких значений  $E$  ( $> 0.6$  В/см) ВАХ имеет вид  $I \sim \exp \times [- (E_0/E)^2]$ ,  $z = \text{d} \lg \alpha / \text{d} \lg E$ ,  $\alpha = \text{d} \lg I / \text{d} \lg E$ , характерный для прыжковой проводимости между локализованными состояниями [1] при  $z$ , изменяющемся от  $1/8$  до  $1/4$  в условиях выпрямления на границе и постоянного поля в слое соответственно [10].

При интеркалировании InSe свинцом совместно с литием (концентрации  $10^{19}$  и  $10^{22}$  см $^{-3}$  соответственно)  $N$ -образные участки ВАХ наблюдаются лишь в узкой области температур двумерного режима проводимости  $7 < T < 20$  К (рис. 2). При  $T < 7.1$  К свинец находится в решетке InSe в виде преципитатов, переходит в сверхпроводящее состояние и шунтирует потенциальные барьеры между слоями. Это приводит к замене двумерного режима проводимости на трехмерный [6], ВАХ становится линейной, за исключением области очень слабых электрических полей.

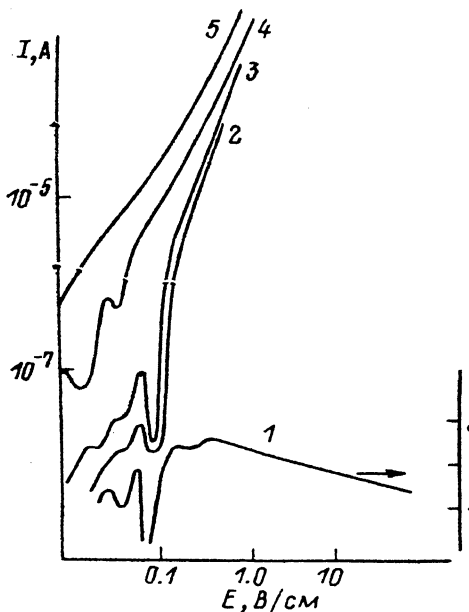


Рис. 1. ВАХ образца InSe 1 для  $E \perp C$  ( $N = 3.2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $\mu = 1.6 \cdot 10^3$  см $^2$ /В·с при 4.2 К).

$T$ , К: 1, 3 — 4.3, 2 — 10.2, 4 — 17.3, 5 — 24.3.

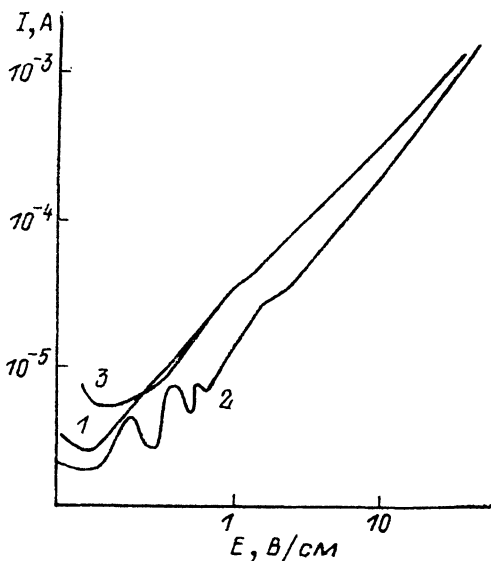


Рис. 2. ВАХ образца InSe 2, интеркалированного совместно свинцом с концентрацией  $10^{19}$  см $^{-3}$  и литием с концентрацией  $10^{22}$  см $^{-3}$  ( $N = 6.1 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $\mu = 10^3$  см $^2$ /В·с при 4.2 К).

$T$ , К: 1 — 4.3, 2 — 12.8, 3 — 17.  $E \perp C$ .

Приложение к образцу поля  $E \parallel C$  (рис. 3) приводит к смещению  $N$ -образных особенностей в сторону больших электрических полей по мере возрастания температуры, что связано, по-видимому, с характером протекания тока в направлении оси  $C$ .

Область пространственного заряда, очевидно, формируется как дефектами структуры и неконтролируемыми примесями, так и атомами интеркалянта, локализованными в межслоевых промежутках. Последние можно представить в виде потенциальных барьеров величины  $W$ . Носители тока, локализованные между этими барьерами в пакетах Se—In—In—Se, находятся на размерно-квантованных уровнях  $E_1$ . Следующий разрешенный уровень  $E_2$ , по-видимому, расположен выше потолка потенциальных барьеров в энергетической области трехмерной проводимости. Прыжковая проводимость, вероятно, осуществляется по схеме, представленной на вставке к рис. 3.

Поскольку реальный образец InSe можно рассматривать как совокупность чешуек (не пронизывающих весь образец), плоскость которых нормальна к оси  $C$ , при любых направлениях тока всегда существует компонента тока вдоль оси  $C$ .

Проведенные оценки [8] показывают, что наблюдаемые особенности ВАХ могут быть интерпретированы в области низких напряжений как проявление свойств сверхрешеток с дополнительным периодом порядка  $10^{-7}$  м и в параллельном, и в перпендикулярном направлениях при подвижности электронов в слое  $\mu \geq 2 \cdot 10^8$  см<sup>2</sup>/В·с.

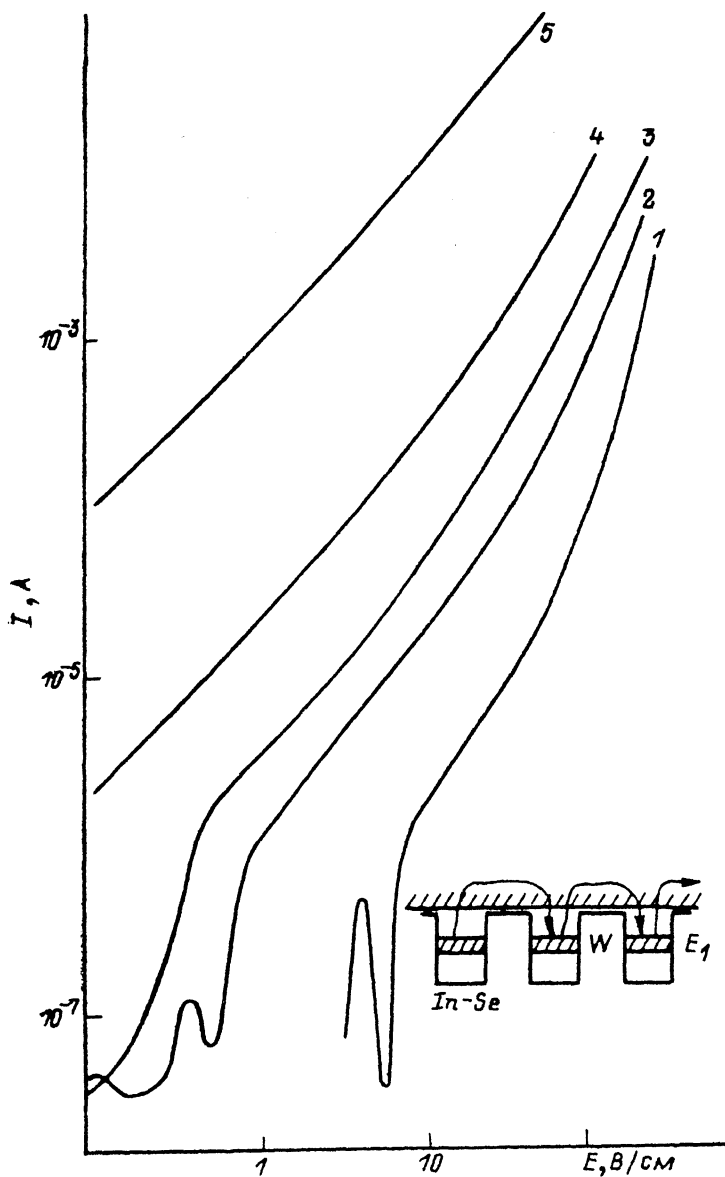


Рис. 3. ВАХ образца InSe 1 для  $E \parallel C$ .

Т, К: 1 — 8.65, 2 — 14.8, 3 — 17.2, 4 — 25.2, 5 — 60.0. На вставке — пространственно-энергетическая схема прыжковой проводимости вдоль оси  $C$ ;  $W$  — высота потенциальных барьеров,  $E_1$  — уровень размерного квантования.

Значение  $\mu$  оценено по критерию наблюдения эффекта Шубникова—де-Гааза:  $\mu H/c \gg 1$  [4, 5] и отличается от значений, определенных из холловских измерений:  $\mu_H \approx 2 \cdot 10^8$  см<sup>2</sup>/В·с.

Образование СР, вероятно, связано с политипизмом кристаллов, но может быть объяснено возникновением волн зарядовой плотности [11]. В пользу последнего свидетельствуют данные анализа особенностей электронного и фотонного спектров моноселенида индия в области низких температур [12].

Список литературы

- [1] Шик А. Я. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 10. С. 1844—1863.
- [2] Гаевский А. Ю., Устинов А. М. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 10. С. 3051—3053.
- [3] Kress-Rogers E., Hopper G. F., Nicholas R. J., Hayes W., Portal I. C., Chevy A. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1983. V. 16. N 21. P. 4285—4295.
- [4] Бельский Г. Л., Годжаев М. О., Зверев В. Н. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 43. В. 12. С. 594—597.
- [5] Брандт Н. Б., Кульбачинский В. Н., Ковалюк З. Д., Лашкарев Г. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1230—1234.
- [6] Дмитриев А. И., Ковалюк З. Д., Лазоренко В. И., Лашкарев Г. В., Пырля М. Н., Сердюк А. И. // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 4. С. 1246—1248.
- [7] Келдыш Л. В. // ФТТ. 1972. Т. 6. В. 11. С. 2265—2267.
- [8] Зюганов А. Н., Свечников С. В. Инжекционно-контактные явления в полупроводниках. Киев, 1981. 256 с.
- [9] Дмитриев А. И., Ковалюк З. Д., Лазоренко В. И., Лашкарев Г. В. // Тез. докл. XI Всес. конф. по физике полупроводников. Кишинев, 1988. Т. 2. С. 106—107.
- [10] Шкловский Б. И. // ФТП. 1972. Т. 6. В. 12. С. 2335—2340.
- [11] Булаевский Л. Н. // УФН. 1976. Т. 120. В. 2. С. 256—271.
- [12] Дмитриев А. И. // Препринт ИПМ АН УССР. Киев, 1990. № 7.

Институт проблем материаловедения  
АН УССР  
Киев

Получена 14.11.1989  
Принята к печати 11.04.1990