

## АСИММЕТРИЯ ПЕРКОЛЯЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КОМПЕНСИРОВАННОГО $n$ -InP

С. Ашмонтас, А. Скучене

Институт физики полупроводников Академии наук Литвы,  
232600, Вильнюс, Литва

(Получена 22.07.1992. Принята к печати 27.07.1992)

Проведены исследования протекания тока в компенсированном  $n$ -InP со случайными флуктуациями потенциала, в случае когда постоянное или СВЧ электрическое поле создано вдоль направления изменения амплитуды среднеквадратичных флуктуаций. При температуре жидкого азота обнаружены асимметрия вольт-амперных характеристик и эффект выпрямления СВЧ токов. Механизм их возникновения объясняется в рамках модели перколяционной проводимости.

Особенности электрических и фотоэлектрических свойств компенсированного  $n$ -InP(Cd), выращенного методом Чохральского, при температуре решетки  $T = 80$  К можно объяснить с помощью модели полупроводника с флуктуирующим потенциалом  $\gamma(r)$  [1]. Амплитуда среднеквадратичных флуктуаций  $\gamma_0$  в объеме такого материала обычно меняется, поэтому интересно выяснить влияние пространственного изменения  $\gamma_0$  на его физические свойства.

В настоящей работе проведены исследования протекания тока в образцах  $n$ -InP(Cd), в случае когда внешнее постоянное или СВЧ электрическое поле создано в направлении изменения амплитуды  $\gamma_0$ . Образцы были вырезаны из стержней, вдоль которых в разных местах  $l$  были измерены электропроводность и эффект Холла. Эти экспериментальные данные позволили косвенным путем оценить продольное изменение амплитуды флуктуаций  $\gamma_0$  ( $l$ ). Из работы Шкловского [2] известно, что в случайно неоднородных полупроводниках электрический ток носит активационный характер

$$I \sim \exp(-(\varepsilon_A - \alpha' E^{1/2})/kT), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_A$  — энергия активации омической электропроводности,  $\alpha$  — параметр, характеризующий степень неоднородности материала. Как показано в [3], в слабо легированных с большой степенью компенсации  $K$  ( $K > 0,9$ ) материалах при  $T \ll \gamma_0$  ( $\ln(N_D/n)$ )

$$\varepsilon_A = \varepsilon_P - \varepsilon_F \sim \gamma_0, \quad (2)$$

где  $n$  и  $N_D$  — соответственно концентрации электронов и ионизированных доноров,  $\varepsilon_P$  и  $\varepsilon_F$  — уровни протекания и Ферми. Будем считать, что для исследуемого  $n$ -InP при  $T = 80$  К соотношение (2) справедливо, так как в этом материале  $n$  и  $N_D$  приблизительно равны  $10^{14}$  и  $10^{16}$   $\text{см}^{-3}$ , а  $\gamma_0$  — около 0.2 эВ [1]. На основе теории протекания в работе [4] показано, что рост  $\gamma_0$  ведет к уменьшению холловской подвижности  $\mu_H$  и к увеличению крутизны ее температурной зависимости  $\mu_H(T)$ . Из упомянутых работ [2-4] следует, что представленные в таблице значения  $\varepsilon_A$ ,  $\mu_H$ ,  $\mu_H(300 \text{ K})/\mu_H(80 \text{ K})$ , определенные вблизи противоположных концов  $a$  и  $b$  образца, позволяют судить об изменении  $\gamma_0$  вдоль него.

Энергия активации электропроводности  $\epsilon_A$ , холловская подвижность  $\mu_H$  (300 К) и отношение холловских подвижностей  $\mu_H$  (300 К)/ $\mu_H$  (78 К) в концах *a* и *b* образца; коэффициент асимметрии электропроводности  $\delta$  образца при  $E_0 = 2000$  В/см и постоянная разность потенциалов  $U_D$ , возникающая при  $E_M = 2000$  В/см

| № образца | $\epsilon_A$ , мэВ |          | $\mu_H$ (300 К), см <sup>2</sup> /В·с |          | $\mu_H$ (300 К)/ $\mu_H$ (80 К) |          | $\delta$ , % | $U_D$ , мэВ |
|-----------|--------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------------------|----------|--------------|-------------|
|           | <i>a</i>           | <i>b</i> | <i>a</i>                              | <i>b</i> | <i>a</i>                        | <i>b</i> |              |             |
| 1         | 29                 | 22       | 1600                                  | 2200     | 2.4                             | 1.5      | -2           | +150        |
| 2         | 24                 | 31       | 2400                                  | 1600     | 1.4                             | 2.3      | +2.5         | -270        |
| 3         | 30                 | 26       | 1700                                  | 2100     | 2.4                             | 1.8      | -1           | +40         |
| 4         | 27                 | 32       | 1900                                  | 1400     | 2.2                             | 2.8      | +1.5         | -70         |
| 5         | 27                 | 27       | 2100                                  | 2100     | 2.0                             | 2.0      | 0            | 0           |

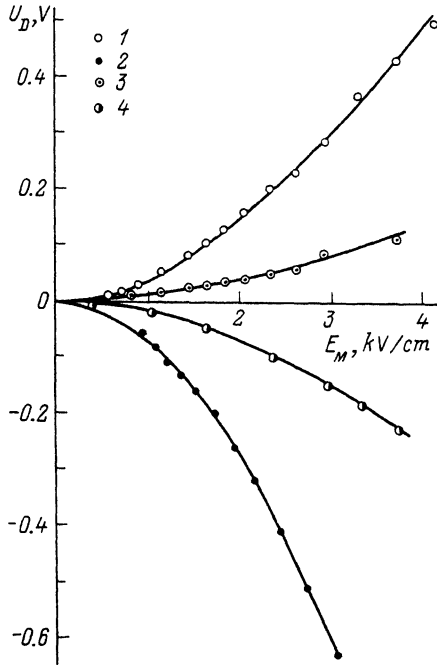
Чтобы исключить влияние контактов на вольт-амперные характеристики (ВАХ) в сильных электрических полях, образцы имели форму гантелей с массивными блоками. Полевые зависимости тока были измерены при двух направлениях напряженности постоянного электрического поля  $E_0$ . При  $T = 80$  К они соответствовали выражению (1). В образцах, вдоль которых  $\gamma_0$  менялась, была определена разность между токами  $I^+$  и  $I^-$ , текущими в противоположные направления. Введен коэффициент асимметрии электропроводности

$$\delta = 2(I^+ - I^-)/(I^+ + I^-), \quad (3)$$

характеризующий асимметричность ВАХ. Чтобы выявить возможное влияние контактов на величину асимметрии, для нескольких образцов варьировалось поперечное сечение суженной части при неизменном сечении блока. Установлено, что значение  $\delta$  практически не меняется при уменьшении сечения более чем на порядок, что свидетельствует о том, что асимметрия ВАХ является объемным свойством этих образцов. Получено, что знаки и значения  $\delta$  зависят от изменения амплитуды  $\gamma_0$  вдоль образца. В таблице представлены значения  $\delta$  при  $E_0 = 2000$  В/см.

Для исследования эффекта выпрямления переменных токов асимметричной ВАХ образец помещался в прямоугольный волновод трехсантиметрового диапазона волн. Кривые на рисунке представляют разности потенциалов  $U_D$ , возникающие на концах образцов в СВЧ полях при  $T = 80$  К. Знаки  $U_D$  и  $\delta$  соответствуют их знакам при эффекте выпрямления. Значения этих величин коррелируют между собой и, в частности, при  $\delta = 0$  и  $U_D = 0$  (см. таблицу). Зависимость  $U_D$  от амплитуды СВЧ электрического поля  $E_M$  является квадратичной до значений полей, достигающих нескольких кВ/см.

Исходя из результатов проведенных исследований и представлений об перколяционной проводимости, предлагается модель возникновения асимметрии электропроводности в исследуемом *n*-InP. Из выражения (2) следует, что в области температур, где оно справедливо, в направлении роста амплитуды  $\gamma_0$  уровень протекания по отношению к уровню Ферми как бы повышается. Если в этом направлении создать внешнее электрическое поле, то при воздействии кулоновской силы нелокализованные электроны будут двигаться в сторону понижения  $\epsilon_F$  и их пути в трехмерном лабиринте будут расширяться. При обратном направлении электрического поля носителям заряда нужна дополнительная энергия, чтобы преодолевать потенциальные пороги. В итоге электрический ток в первом случае будет больше, чем во втором. Это соответствует знаку коэффициента асимметрии  $\delta$ , полученному из экспериментальных ВАХ. Исходя



Зависимость разности потенциалов  $U_D$  от амплитуды СВЧ электрического поля  $E_M$  при  $T = 80$  К; номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

из этой модели, видно, что асимметрия электропроводности будет расти при увеличении изменения  $\gamma_0$  вдоль образца.

Таким образом, в исследуемом  $n$ -InP(Cd) при  $T = 80$  К экспериментально обнаруженная асимметрия ВАХ и в СВЧ полях возникающая разность потенциалов  $U_D$ , по-видимому, обусловлены изменением амплитуды флуктуаций потенциала вдоль образца.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] С. Ашмонтас, А. Скучене. Лит. физ. сб., 30, 310 (1990).
- [2] Б. И. Шкловский. ФТП, 13, 93 (1979).
- [3] Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос. ЖЭТФ, 60, 867 (1971).
- [4] В. Г. Карпов, А. Я. Шик, Б. И. Шкловский. ФТП, 16, 1406 (1982).

Редактор В. В. Чалдышев