

չորրորդական անցումներ նատրիումի ատոմներից  $MPc$ -ի մոլեկուլին, առաջացնելով  $(MPc)^{n-}$  տեսքի մոլեկուլային անիոններ, որտեղ  $n=1, 2, 3, 4$ , ընդ որում, էլեկտրոնը կարող է լոկալիզացվել ինչպես ֆտալոցիանինի  $\pi$ -ի էլեկտրոնային օղակի, այնպես էլ կենտրոնական մետաղի վրա: Դիտարկված է  $MPc$ -ի մոլեկուլի էլեկտրոնային կառուցվածքի փոփոխությունը կախված լեգիրացման աստիճանից:

## EPR STUDY OF THE ELECTRONIC STRUCTURE OF COPPER PHTHALOCYANINE AND ZINC PHTHALOCYANINE DOPED WITH SODIUM

A. R. HARUTYUNYAN, L. S. GRIGORYAN, E. G. SHAROYAN

The interaction between polycrystalline samples of copper phthalocyanine ( $CuPc$ ) and zinc phthalocyanine ( $ZnPc$ ) of  $\beta$ -modification and the sodium vapour leading to the formation of  $Na_x(MPc)$  compounds, where  $M=Cu, Zn$  and  $0 < x \leq 11$ , has been investigated. It was definitely established by means of EPR that depending on the values of  $x$  up to four electrons could be transferred from the sodium atoms to the  $MPc$  molecule, thus forming  $(MPc)^{n-}$  (where  $n=1, 2, 3, 4$ ) molecular anions. The transferred electrons are shown to be localized either at the central metal ion or distributed over the phthalocyanine ring. A model is proposed for the electronic structure of  $ZnPc$ . Variations of the electronic structure of the  $MPc$  molecule as a function of the doping level are considered.

Изв. АН Армянской ССР, Физика, т. 22, вып. 3, 166—170 (1987)

УДК 537.311.322

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $In_{1-x}Ga_xP$ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В. М. АРУТЮНЯН, М. А. ДИМАКСЯН, А. И. ВАГАНЯН,  
Г. Е. ГРИГОРЯН, А. Б. ДИМАКСЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 2 октября 1986 г.)

Методом усреднения кинетического уравнения Больцмана выполнен расчет скорости дрейфа электронов, их подвижности, коэффициента диффузии, а также плотности тока в зависимости от напряженности электрического поля. Показано изменение указанных характеристик с изменением зонного строения  $In_{1-x}Ga_xP$  различных составов.

Среди множества полупроводников наиболее перспективными в смысле эффекта Ганна являются некоторые соединения  $A^{III}B^V$  и твердые растворы на их основе. В настоящее время наиболее подробно изучен как экспериментально, так и теоретически фосфид индия [1, 2]. Рассчитаны также сильнополевые характеристики твердого раствора  $In_{0,8}Ga_{0,2}P$  [3] и показано наличие области отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП).

Так как в твердых растворах, в данном случае  $In_{1-x}Ga_xP$ , с изменением  $x$  изменяются положения минимумов зоны проводимости относительно потолка валентной зоны [4, 5] (рис. 1), то естественно ожидать изменения сильнополевых характеристик.

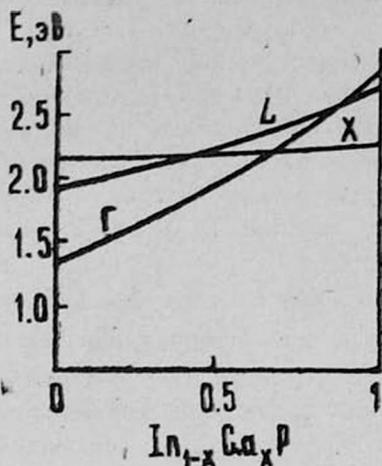


Рис. 1. Изменение положения  $\Gamma$ -,  $X$ - и  $L$ -минимумов зоны проводимости от состава  $In_{1-x}Ga_xP$ .

Этому вопросу и посвящена настоящая работа, в которой выполнен расчет зависимостей скорости дрейфа электронов, их подвижности, коэффициента диффузии, а также плотности тока от напряженности электрического поля при температуре решетки  $T_0 = 300$  К.

Метод расчета основан на усреднении кинетического уравнения Больцмана по концентрации, импульсу (волновому числу) и энергии [2]. При

этом для каждой долины получается система из трех уравнений, связывающих концентрации  $n_i$  (или относительные заселенности  $c_i$ ), волновые числа  $k_i$  и эффективные температуры электронов  $T_i$  с усредненными временами релаксации при рассеянии на оптических и акустических колебаниях решетки, междолинном рассеянии, рассеянии между эквивалентными минимумами и рассеянии на ионизированных и нейтральных атомах примеси для каждого значения напряженности электрического поля. Трудность решения системы уравнений заключается в том, что усредненные времена релаксации при ионном, оптическом и междолинных рассеяниях выражаются через интегралы, которые не дают аналитического представления через эффективную температуру электронов  $T_i$ . И даже при выбранных значениях эффективной температуры электронов вычисление этих интегралов с помощью ЭВМ затруднительно, поскольку верхний предел интегрирования бесконечен. Чтобы обойти эти трудности в работе [6] указанные интегралы были преобразованы соответствующим образом и получены формулы для усредненных времен релаксации при ионном, оптическом и междолинных рассеяниях, выраженные через специальные функции.

Задача решается для стационарного случая без учета непараболичности зон. Кроме того, принимается, что в области рассматриваемых напряженностей электрических полей эффективная температура электронов в верхних долинах ( $X$  или  $L$ ) остается постоянной [2, 7, 8], а эффективная температура электронов в центральной долине ( $T_\Gamma$ ) может изменяться в широких пределах. При различных значениях температуры  $T_\Gamma$  рассчитываются времена релаксации. При каждом значении  $T_\Gamma$  и напряженности электрических полей определяются относительные заселенности долин  $c_i$  и

волновые числа электронов  $k_z$ . Имея для каждой долины  $s$ ,  $k_z$  и  $T_s$ , по общеизвестным формулам рассчитываются  $\mu(E)$ ,  $v_d(E)$  и  $J(E)$ . Коэффициент диффузии  $D(E)$  рассчитывается на основе соотношения Эйнштейна в предположении, что распределение электронов является максвелловским [9].

Расчеты выполнены в двухуровневой модели зоны проводимости:  $\Gamma-L$  (для составов, близких к фосфиду индия),  $\Gamma-X$  (для составов  $0,4 < x < 0,68$ ) и  $X-\Gamma$  (при  $x > 0,68$ ). Влияние третьих по энергии долин не рассматривается, так как заполнение их составляет ничтожный процент от общего числа электронов. По трехуровневой модели  $\Gamma-L-X$  рассчитаны характеристики для  $x = 0,40$ , где энергии  $L$  и  $X$  долин совпадают,  $\delta E_{\Gamma L(X)} = 0,35$  эВ.

Концентрации ионизированных и нейтральных примесей для каждого состава  $In_{1-x}Ga_xP$  определены по формуле для концентрации электронов многодолинных полупроводников [10], причем для всех составов принято  $N_d = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_a = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Остальные параметры, использованные в расчетах, те же, что и в работе [5], за исключением величины акустического деформационного потенциала, для которой взято значение 6 эВ [2,8].

Как показали расчеты, при напряженностях электрических полей ниже пороговых преобладают рассеяния на оптических и акустических колебаниях решетки. При  $E > E_{\text{пор}}$  начинает преобладать междолинный переброс электронов, который дает основной вклад в эффективное время релаксации, особенно при малых  $\delta E$ .

На рис. 2 и 3 приведены зависимости скорости дрейфа и коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля. Видно, что с изменением состава твердых растворов  $In_{1-x}Ga_xP$  заметного изменения порогового поля не происходит. Это частично можно объяснить тем, что при этом изменяются как  $\delta E$ , так и механизмы рассеяния и связанные с ними параметры. Максимальная скорость дрейфа сильно уменьшается с уменьшением энергетического расстояния между центральной и боковыми долинами. Уменьшаются также величина отрицательной дифференциальной подвижности и отношение максимальной скорости дрейфа к минимальной при одновременном увеличении протяженности участка ОДП.

При  $\delta E < 0,08$  эВ область ОДП исчезает, так как при малых энергетических зазорах между долинами уже при температуре решетки (300 К) большинство электронов находится в боковых долинах. Так, для состава  $x = 0,65$  ( $\delta E_{\Gamma X} = 0,035$  эВ)  $J(E)$  в слабых полях подчиняется закону Ома, а в сильных полях вследствие разогрева электронов эта зависимость нарушается и  $J \sim E^{0,5}$ , т. е. подвижность электронов изменяется по закону  $\mu \sim E^{-0,5}$ , характерному для горячих электронов в однодолинной модели.

В области составов  $x > 0,68$ , где абсолютными являются  $X$ -минимумы (рис. 1), в широком диапазоне электрических полей закон Ома не нарушается. Это объясняется тем, что «тяжелые» электроны труднее разогреваются полем. С другой стороны, вследствие большего эффективного числа плотности состояний в нижней долине (в данном случае  $X$ ) по сравнению с верхней ( $\Gamma$ ) во всем интервале напряженностей электрического

поля, как показавали расчеты, не происходит заметного изменения заселенности минимумов.

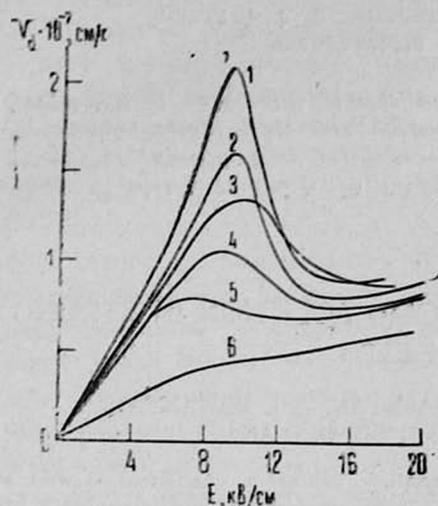


Рис. 2.

Рис. 2. Зависимость скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля для различных составов  $In_{1-x}Ga_xP$ :

- 1 —  $x = 0,20$ ,  $\varphi E = 0,48$  эВ ( $\Gamma \rightarrow L$ );
- 2 —  $x = 0,40$ ,  $\varphi E = 0,35$  эВ ( $\Gamma \rightarrow X \rightarrow L$ );
- 3 —  $x = 0,50$ ,  $\varphi E = 0,22$  эВ ( $\Gamma \rightarrow X$ );
- 4 —  $x = 0,54$ ,  $\varphi E = 0,17$  эВ ( $\Gamma \rightarrow X$ );
- 5 —  $x = 0,58$ ,  $\varphi E = 0,12$  эВ ( $\Gamma \rightarrow X$ );
- 6 —  $x = 0,60$ ,  $\varphi E = 0,08$  эВ ( $\Gamma \rightarrow X$ ).

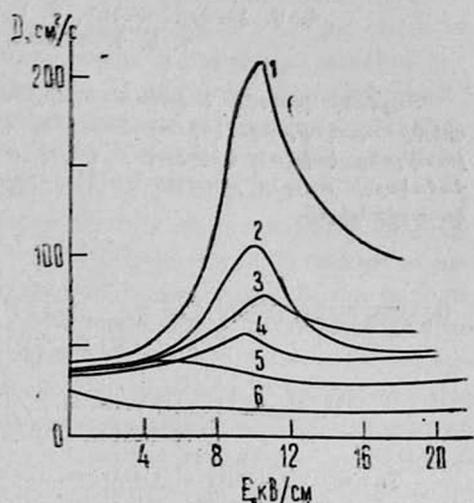


Рис. 3.

Рис. 3. Зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля для различных составов  $In_{1-x}Ga_xP$  (обозначения на кривых те же, что и на рис. 2).

Таким образом, в системе  $In_{1-x}Ga_xP$  в области составов  $0 \leq x < 0,60$  можно менять сильнополевые характеристики, управлять зависимостями  $v_d(E)$  и максимальными частотами генерации. Это можно использовать для создания специальных генераторных диодов с переменным составом по длине активной области диода. С другой стороны, при  $x > 0,60$  неустойчивость тока не будет наблюдаться.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Левинштейн М. Е., Пожела Ю. К., Шур М. С. Эффект Ганна. Изд. Советское радио, М., 1975.
2. Прохоров Э. Д., Белецкий Н. И. Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов. Изд. Вища школа, Харьков, 1982.
3. Ваганян А. И. и др. Изв. АН АрмССР, Физика, 21, 84 (1986).
4. Suiyokwaishi A. Trans. Mining and Metallurg., 17, 293 (1972).
5. Авакьянц Г. М., Ваганян А. И., Димаксян М. Л. Изв. АН АрмССР, Физика, 13, 118 (1978).
6. Димаксян М. Л. Изв. АН АрмССР, Физика, 20, 322 (1985).
7. Белецкий Н. И., Прохоров Э. Д. Радиотехника и электроника, 19, 1467 (1974).
8. Heinle W. Phys. Rev., 178, 1319 (1969).
9. Зеегер К. Физика полупроводников. Изд. Мир, М., 1977.
10. Ваганян А. И. ФТП, 16, 520 (1982).

Վ. Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Մ. Լ. ԴԻՄԱԿՍՅԱՆ, Ա. Ի. ՎԱԿՆՅԱՆ,  
Գ. Ե. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա. Բ. ԴԻՄԱԿՍՅԱՆ

Բույցմանի կիսկոնի հալասարման միջինացման միջոցով հաշվարկված են էլեկտրոնների դրեյֆի արագությունը, շարժունակությունը, դիֆուզիայի գործակիցը, ինչպես նաև հոսանքի խտությունը կախված էլեկտրական դաշտի լարվածությունից: Ցույց է տրված  $In_{1-x}Ga_xP$  համակարգի տարրեր բաղադրությունների բնութագրերի փոփոխությունը կախված գոտիական կառուցվածքից:

## INVESTIGATION OF $In_{1-x}Ga_xP$ SOLID SOLUTION IN STRONG ELECTRIC FIELDS

V. M. ARUTYUNYAN, M. L. DIMAKSYAN, A. I. VAHANYAN,  
G. E. GRIGORYAN, A. B. DIMAKSYAN

The drift velocity of electrons, their mobility, diffusion coefficient as well as the current density were calculated in dependence of electric field strength using the method of averaging the Boltzman kinetic equation. Changes in the characteristics with the variation in the zone structure of different  $In_{1-x}Ga_xP$  compositions are shown.

Изв. АН Армянской ССР, Физика, т. 22, вып. 3, 170—175 (1987)

УДК 539.074.22:621.3.017

## УСТАНОВКА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Г. АМБАРՉՄՅԱՆ, Բ. Ա. ԱՏԱԲԱՏՅԱՆ, Ա. Ն. ԻՕԱՆՆԻՍՅԱՆ,  
Ր. Լ. ԿԱՎԱԼՈՎ, Վ. Մ. ԿՈՒԿԱՐԵՎ, Լ. Կ. ՓԱՐԼԱԿՅԱՆ

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 19 марта 1986 г.)

На вторичном электронном пучке Ереванского синхротрона проведены исследования характеристик детектора рентгеновского переходного излучения, представляющего собой систему из мишени в виде слоистой среды и пропорциональной камеры с двойным дрейфовым отсеком. Измерения проводились с использованием двух различных методов выделения РПИ-фотонов на фоне ионизационных потерь энергий первичных частиц: измерения интегрального энерговыделения и измерения энерговыделений от локальных сгустков. Проведено сравнение экспериментально измеренного дифференциального спектра фотонов РПИ с теоретически ожидаемым. Полученные данные пересчитаны на случай «сэндвича», составленного из нескольких таких детекторов.