

ПОПЕРЕЧНАЯ ХЕМОМАГНИТНАЯ Э.Д.С. В ФОСФИДЕ ИНДИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АТОМАРНЫМ ВОДОРОДОМ

В.В. Стыров^{1,2,3}, С.В. Симченко¹

¹Приазовский государственный технический университет (Мариуполь)
Украина

²Бердянский государственный педагогический университет
Украина

³Физико-математическая школа "Университет" (Мариуполь)
Украина

Поступила в редакцию 01.03.2011

Обнаружена генерация продольной хемомагнитоэлектрической э.д.с. в полупроводниковых монокристаллических пластинах InP, размещенных во внешнем магнитном поле, при протекании на их поверхности гетерогенной химической реакции (рекомбинации атомов водорода, поступающих с газовой фазы). Исследованы зависимости величины хемомагнитной э.д.с. от температуры образца, величины магнитного поля и потока атомов на образец. Данную систему можно использовать для создания устройств, превращающих энергию химической реакции в электрический сигнал (например, химических сенсоров).

Ключевые слова: хемомагнитоэлектрический эффект, генерация неравновесных электронно-дырочных пар, продольная э.д.с., InP, преобразование химической энергии в электрическую в полупроводниках, химические сенсоры.

Виявлена генерація повздовжньої хемомагнітоелектричної е.р.с. в напівпровідникових монокристалічних пластинках InP, розміщених в зовнішньому магнітному полі, при протіканні на їх поверхні гетерогенної хімічної реакції (рекомбінації атомів водню, що надходять з газової фази). Досліджені залежності величини хемомагнітної е.р.с. від температури зразка, величини магнітного поля та потоку атомів на зразок. Дану систему можна використовувати для створення пристроїв, які перетворюють енергію хімічної реакції в електричний сигнал (наприклад, хімічних сенсорів).

Ключові слова: хемомагнітоелектричний ефект, генерація нерівноважних електронно-діркових пар, повздовжня е.р.с., InP, перетворення хімічної енергії в електричну в напівпровідниках, хімічні сенсори.

Production of transverse chemomagneto-electromotive force (e.m.f.) is discovered in the single crystal InP wafer placed in an external magnetic field due to energy released in heterogeneous chemical reaction which proceeds on the surface (recombination of hydrogen atoms impinging on the surface from the gas phase). The dependence of e.m.f. on the sample temperature, the value of the magnetic field and the hydrogen atomic flux on the surface is examined. The chemomagneto-electric effect on InP can be used for conversion of chemical energy into electricity (e.g. in chemical sensors applications).

Keywords: chemomagneto-electric effect, generation of nonequilibrium electron-hole pairs, longitudinal e.m.f., InP, chemical energy-to-electricity conversion, chemical sensors.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена исследованию хемомагнитоэлектрического эффекта (ХМЭЭ) при протекании поверхностной реакции рекомбинации атомов водорода на кристаллах фосфида индия¹, помещённых во внешнее магнитное поле. ХМЭЭ состоит в возник-

новении в кристалле э.д.с., называемой хемомагнитоэлектрической или хемомагнитной э.д.с., в направлении, поперечном, как по отношению к потоку атомов, так и направлению вектора индукции магнитного поля, рис. 1. Эффект вызван генерацией на поверхности полупроводника электронно-дырочных пар за счёт экзотермического эффекта реакции и разделения их магнитным полем в процессе

¹Благодарим Витер А.И. за любезное предоставление образцов.

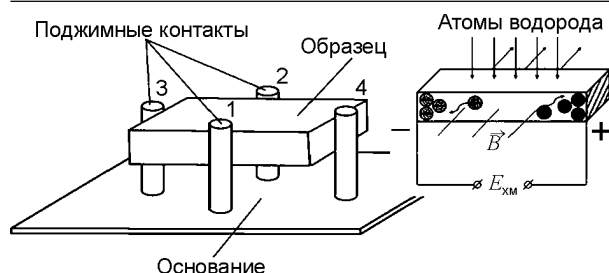


Рис. 1. Принципиальная схема измерений хемогнитноэлектрического эффекта на монокристалле InP (объяснения в тексте).

последующего диффузионного перемещения в глубь образца [1 – 6]. ХМЭЭ, таким образом, является поверхностным аналогом фотомагнитноэлектрического эффекта [7] при “химическом” возбуждении полупроводника. Обсуждаемый эффект основан на неадиабатических электронных переходах в гетерогенных химических реакциях [6]. ХМЭЭ даёт способ прямого преобразования химической энергии в электрическую на полупроводниках. До настоящего времени была известна только одна система, германий-атомарный водород, в которой наблюдался ХМЭЭ [1 – 6]. Важной научной и прикладной задачей является поиск других полупроводниковых материалов (и химических реакций), в которых наблюдается обсуждаемый эффект.

InP имеет широкое применение в современной электронике. С точки зрения ХМЭЭ он характеризуется более благоприятным, по сравнению с ранее исследованной системой Ge-атомарный водород [6], соотношением ширины запрещённой зоны (1.35 эВ при 300 К) и теплоты реакции $H + H$ (~4 эВ), поскольку КПД преобразования химической энергии в электрическую возрастает по мере сближения энергетического эффекта реакции и ширины запрещённой зоны полупроводника [1]. С прикладной точки зрения система атомарный водород-InP представляет интерес для её использования в приборах нового класса, например химических сенсорах, преобразующих энергию поверхностной химической реакции в электрический сигнал.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования были взяты монокристаллические пластинки InP* *n*-типа (поверхность (111)) толщиной 1 мм и разме-

рами 2×6 мм. Легирующей примесью служила сера.

Концентрация основных носителей в исследуемых образцах определялась нами на основе эффекта Холла и лежала в интервале $10^{20} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Под полупроводниковые кристаллы были изготовлены кристаллодержатели в виде печатных плат из фольгированного стеклотекстолита с припаянными тонкоплёночными вольфрамовыми микронагревателями и термопарами платина-платина-родий. Образцы устанавливались в кристаллодержателе с четырьмя поджимными медными контактами (1 – 4) по типу холловских, рис. 1, залуженными индием. Для предотвращения шунтирования полупроводника вольфрамовым нагревателем между ним и образцом прокладывались тонкие пластинки слюды.

Между контактами и образцом кратковременно подавался формовочный импульс тока ~0,5 А, что обеспечивало стабильность электрического контакта в процессе экспериментов. После формовки снимались вольт-амперные характеристики системы при смене полярности подключения контактов к источнику тока, рис. 2. Полученные линейные вольт-амперные характеристики контактов при обеих полярностях, а также отсутствие фото-эдс в контактной области свидетельствуют о высокой степени их омичности.

Образец InP в кристаллодержателе помещался в разрез магнитопровода электромагнита. Последний устанавливался в вакуумную реакционную ячейку, в которую подавался атомарный водород. Атомы водорода по-

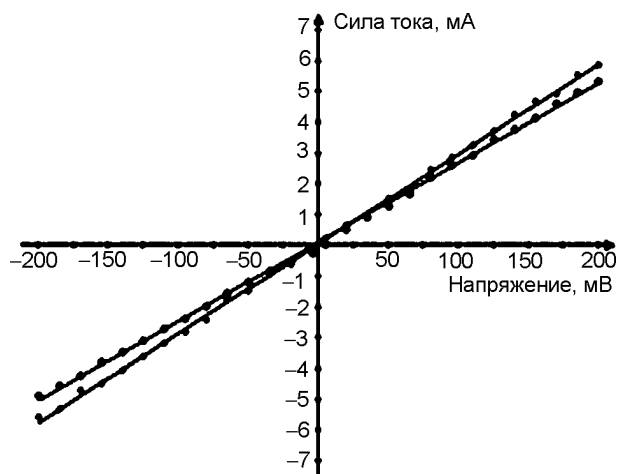


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики контактов к образцу (Контакты 1-2 — ◆ ; 3-4 — ● на рис. 1).

лучали при диссоциации H_2 в высокочастотном разряде в трубке Вуда (генератор УВЧ-66, 40 МГц, 20 Вт). От области разряда к рабочей камере с измерительной ячейкой атомы проходили диффузионный путь около 25 см. Для контроля потока атомов на образец, вблизи полупроводника укреплялся платиновый проволочный изотермический микрокалориметр [8, 9]. Эксперимент проводили при потоках атомов $10^{21} - 10^{22} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Натекание молекулярного водорода в реакционную ячейку регулировали вакуумным вентилем и регистрировали по показаниям вакуумметра ВИТ-2 (лампа ПМТ-2). На магистрали подачи атомов в ячейку располагались два рога Вуда для поглощения рассеянного света газового разряда. Металлические части всей конструкции и её крепления в вакуумной камере были защищены фторопластовой лентой от нежелательной рекомбинации атомов водорода на их поверхности.

Перед измерениями образец выдерживали в вакууме 10^{-4} Па и прогревали до температуры 380 К в атомарном водороде с целью десорбции остаточной влаги и адсорбированных молекул с поверхности полупроводника. Измерения проводились в интервале температур образца 290 – 350 К. Регулировку магнитного поля осуществляли током в катушке электромагнита. Величину поля измеряли прибором для измерения магнитной индукции Ш1-8. Холловскую и хемомагнитную э.д.с. регистрировали при помощи усилителя У5-11 и наблюдали по показаниям микровольтметра. Для последующей обработки экспериментальных данных сигнал хемомагнитной э.д.с. подавали на плату инструментального аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (производства National Instrument) с последующей записью на жёсткий диск компьютера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В наших опытах при напуске атомов водорода на поверхность образца, находящегося в магнитном поле, появлялась разность потенциалов на его гранях (рис. 1) в направлении перпендикулярном как к направлению векто-

ра \vec{B} , так и направлению налетающего на поверхность потока атомов водорода. При изменении направления вектора на противоположное, полярность э.д.с. также меняла знак (нечётный ХМЭЭ). В отсутствие поля хемомагнитная э.д.с. исчезала.

Из рис. 3 видно, что зависимость хемомагнитноэлектрической э.д.с. от величины индукции магнитного поля имеет линейный характер, что соответствует теоретическим представлениям [2 – 4]. Аналогичные зависимости мы наблюдали на исследуемой системе при освещении её светом от лампы накаливания через портативный монохроматор М-2 (изготовлен по спецзаказу).

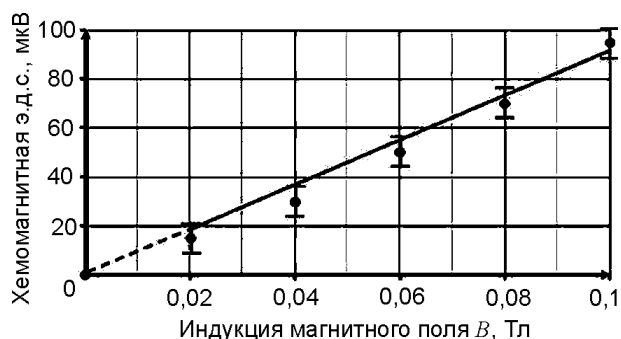


Рис. 3. Зависимость хемомагнитной э.д.с. на InP от индукции поперечного магнитного поля ($T = 300 \text{ К}$, $j \sim 10^{22} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

Хемомагнитная э.д.с. ($E_{\text{хм}}$) имела максимальное значение при температуре 300 К и далее уменьшалась с ростом температуры образца, рис. 4.

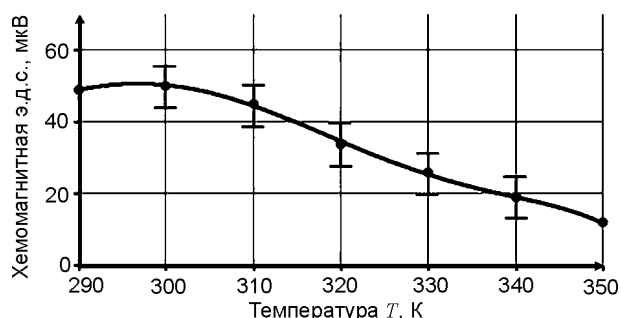


Рис. 4. Зависимость хемомагнитной э.д.с. на монокристалле InP от температуры ($B = 0,06 \text{ Тл}$, $j \sim 10^{22} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

На графике зависимости $E_{\text{хм}}$ от температуры, построенном в координатах $\ln E_{\text{хм}} - 1/T$, рис. 5, можно выделить два характерных линейных участка (в температурном интервале 300 – 350 К), с энергиями активации, со-

ответственно 0,11 и 0,25 эВ. Уменьшение $E_{\text{хм}}$ с ростом температуры, можно связать с уменьшением подвижности носителей зарядов из-за термостимулированной перезарядки некоторых рассеивающих центров. Этот эффект требует, однако, дополнительных исследований.

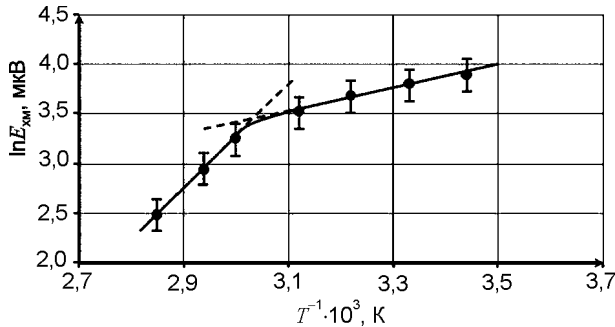


Рис. 5. Температурная зависимость хемомагнитной э.д.с. в InP ($B = 0,06$ Тл, $j \sim 10^{22} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$).

Нами также измерена зависимость величины $E_{\text{хм}}$ от плотности потока атомов водорода j на поверхность полупроводника (рис. 6). В исследованном интервале потоков атомов эта зависимость в хорошем приближении имеет линейный характер, что удобно при использовании исследованной системы в сенсорах атомарного водорода.

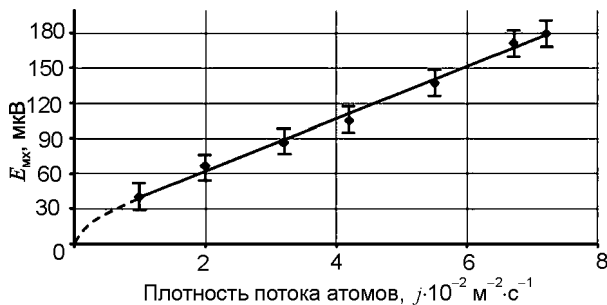


Рис. 6. Зависимость величины хемомагнитной э.д.с. в фосфиде индия от плотности потока атомов водорода ($B = 0,06$ Тл, $T = 300$ К).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые наблюдался хемомагнитоэлектрический эффект в системе InP-атомарный водород.

Проведённые эксперименты и обнаруженная хемомагнитоэлектрическая э.д.с. однозначно свидетельствуют о биполярном характере хемовозбуждения InP в реакции рекомбинации атомов водорода, то есть рождении электронно-дырочных пар в полупровод-

нике в ходе химической реакции на его поверхности. ХМЭЭ на InP может использоваться в детекторах атомарных частиц, а также в других устройствах, преобразующих энергию поверхностной химической реакции в электрический сигнал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kabansky A.Y., Styrov V.V. A New Means of Chemical Energy Conversion by Semiconductors//In the book "Advanced Materials for Energy Conversion II"/Edd. by Dhanesh Chandra, Renato G. Bautista, Lous Schlapblach. A Publication of TMS, Charlotte, USA. – 2004. – P. 43-51.
2. Савченко Н.М., Горбань А.Н.//Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 10, № 1. – С. 66.
3. Савченко Н.М., Горбань А.Н., Савченко Н.В. //Укр. физ. журнал. – 1979. – Т. 24, № 7. – С. 996.
4. Стыров В.В., Тюрин Ю.И., Кабанский А.Е.// Физика и техника полупроводников. – 1977. – Т. 11, № 11. –С. 2164.
5. Кабанский А.Е., Стыров В.В.//ЖЭТФ. – 1979. – Т. 76. – С. 1803.
6. Стыров В.В., Тюрин Ю.И. Неравновесные хемоэффекты на поверхности твердых тел. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 507 с.
7. Кикоин И.К., Лазарев С.Д. Фотоэлектромагнитный эффект//УФН. – 1978. – Т. 124, Вып. 4. – С. 597.
8. Рогинский С.З. Химическая кинетика и цепные реакции. – М.: Наука, 1966. – 153 с.
9. Wood B.J., Wise H.//J. Phys. Chem. – 1961. – Vol. 65. – P. 1976.

LITERATURA

1. Kabansky A.Y., Styrov V.V. A New Means of Chemical Energy Conversion by Semiconductors//In the book "Advanced Materials for Energy Conversion II"/Edd. by Dhanesh Chandra, Renato G. Bautista, Lous Schlapblach. A Publication of TMS, Charlotte, USA. – 2004. – P. 43-51.
2. Savchenko N.M., Gorban A.N.//Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 1976. – Т. 10, № 1. – S. 66.
3. Savchenko N.M., Gorban A.N., Savchenko N.V. //Ukr. fiz. zhurnal. – 1979. – Т. 24, № 7. – S. 996.
4. Styrov V.V., Tyurin Yu.I., Kabanskiy A.E.//Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 1977. – Т. 11, № 11. – S. 2164.

5. Kabanskiy A.E., Styrov V.V.//ZhETF. – 1979. – Т. 76. – S. 1803.
6. Styrov V.V., Tyurin Yu.I. Neravnovesnyye khemoeffekty na poverkhnosti tverdykh tel. – M.: Energoatomizdat, 2003. – 507 s.
7. Kikoin I.K., Lazarev S.D. Fotoelektromagnitnyy effekt//UFN. – 1978. – Т. 124, Vyp. 4. – S. 597.
8. Roginskiy S.Z. Khimicheskaya kinetika i tsepnyye reaktsii. – M.: Nauka, 1966. – 153 s.
9. Wood B.J., Wise H.//J. Phys. Chem. – 1961. – Vol. 65. – P. 1976.