



Министерство образования Республики Беларусь

*Учреждение образования*  
«Белорусский государственный педагогический  
университет имени Максима Танка»

## **Физико-математические науки и информатика, методика преподавания**

*Материалы Международной студенческой  
научно-практической конференции  
г. Минск, 19 апреля 2017 г.*

Минск 2017

## ИЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОВЕРХНОСТЬ В ЯВЛЕНИЯХ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

*Е. Гракович, физико-математический факультет;  
П. Круглень, УО "Гимназия №20, г. Минска"*

*Научные руководители: д.ф.-м.н., проф., В.Р. Соболев;  
учитель высш. квалифик. кат. Е.Б. Турец*

Все проводящие электрический ток материалы – металлы (Al, In, Cu, Ag, Ni, Fe), полуметаллы (As, Sb, Bi) полупроводники (однокомпонентные Si, Ge), интерметаллические соединения AsGa, InSb, CdTe) характеризуются по типу проводимости и другим кинетическим свойствам в соответствии со статистикой носителей заряда. При этом так называемая изоэнергетическая поверхность (поверхность Ферми), которая в фазовом пространстве волновых векторов разделяет занятые электронами энергетические состояния от свободных и характеризует свойства материала по проводимости. Известно, что у диэлектриков при значительной ширине зоны запрещенных значений энергии 3.0–4.0 эВ уровень Ферми приходится на середину запрещенной зоны и электроны не могут возбуждаться из валентной зоны в зону проводимости, электрический ток в принципе отсутствует, поверхности Ферми вообще нет. В полупроводниках с шириной зоны запрещенных значений энергии до 1.5–2.0 эВ тепловое возбуждение способно переводить электроны в зону проводимости, и они, описываемые статистикой Максвелла – Больцмана, обеспечивают проводимость порядка  $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , поверхность Ферми вырождена в точку. В легированных полупроводниках (к четырехвалентному кремнию, германию добавлен пятивалентный мышьяк либо трехвалентный индий) количество носителей можно увеличить на три-четыре и более порядков вплоть до вырождения, когда необходима квантовая статистика Ферми – Дирака и здесь изоэнергетическая поверхность может иметь форму сферы, что означает изотропность по различным кристаллографическим направлениям. В полуметаллах  $n$  только на три-четыре-пять порядков меньше, чем  $n$  в нормальных металлах, где на каждый атом приходится порядка одного валентного электрона с  $n \sim 10^{22} - 10^{23}$  эл.  $\text{см}^{-3}$ . Соответственно, поверхность Ферми полуметаллов, металлов не изотропна, может быть замкнутой (Na, K), открытой. (Cu, Ag, Au, Cd). Ее вид определяется концентрацией электронов и размером кристаллической ячейки. Алюминий в металлическом состоянии имеет замкнутую поверхность Ферми, но дырочного типа, которая заполнена в первой зоне Бриллюэна и имеет малые электронные сегменты в третьей зоне. Это означает, что в алюминии по мере возрастания магнитного поля постоянная Холла  $R = (ne)^{-1}$  изменяет свою величину от отрицательных значений к положительным. Проводимость алюминия, однако, возможно описывать в приближении свободных электронов и в магнитном поле тензор проводимости имеет довольно простой вид.

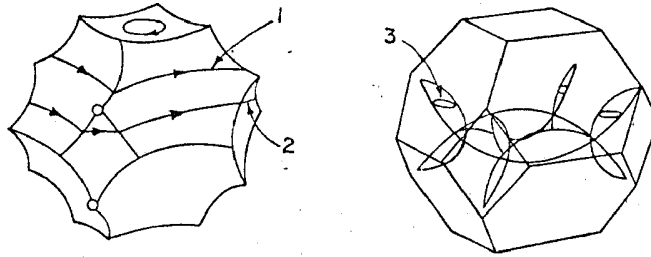


Рис. 1. Поверхность Ферми Al во второй и третьей зонах Бриллюэна: 1, 2 – замкнутые дырочные орбиты; 3 – замкнутые электронные орбиты.

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \frac{\sigma_0}{1+(\Omega\tau)^2} & \frac{\sigma_0(\Omega\tau)}{1+(\Omega\tau)^2} & 0 \\ -\frac{\sigma_0(\Omega\tau)}{1+(\Omega\tau)^2} & \frac{\sigma_0}{(1+\Omega\tau)^2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{pmatrix}$$

Здесь  $\Omega$  – циклотронная частота,  $\tau$  – время свободного пробега электрона,  $\sigma_0$  – проводимость в нулевом магнитном поле. Другой нормальный металл – медь – как одновалентный химический элемент в металлическом состоянии обладает поверхностью Ферми открытого типа, то есть в кристаллографическом направлении  $[111]$  сферические элементы в каждой зоне Бриллюэна соединяются и создают систему гофрированных цилиндров.

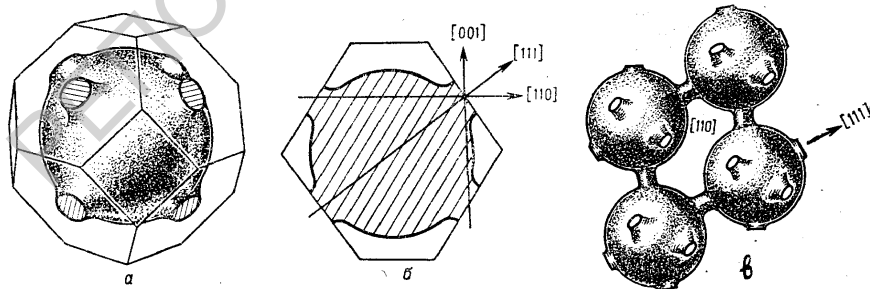


Рис. 2. Поверхность Ферми Si: а – первая зона Бриллюэна, б – сечение первой зоны плоскостью (110), в – в схеме расширенных зон показана открытость вдоль кристаллографического направления  $[111]$  через сужения.

Для поверхности Ферми типа гофрированного цилиндра если открытость направлена вдоль оси OX вид тензора проводимости в магнитном поле отличается от рассмотренного ранее. За счет открытости, то есть инфинитности движения, вдоль направления OX среднее значение приращения скорости вдоль оси OY

не равно нулю и тензор проводимости для кристаллической среды типа меди будет выглядеть:

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \frac{a_{xx}}{(\Omega\tau)^2} & \frac{a_{xy}}{\Omega\tau} & \frac{a_{xz}}{\Omega\tau} \\ \frac{a_{yx}}{\Omega\tau} & a_{yy} & a_{yz} \\ \frac{a_{zx}}{\Omega\tau} & a_{zy} & a_{zz} \end{pmatrix}.$$

В сообщении сопоставляются свойства по переносу заряда в магнитном поле для алюминия и меди в кристаллическом и поликристаллическом состоянии и сопоставлены геометрии Холла и Корбино. Анализируются исходные соотношения электродинамики по появлению холловской разности потенциалов и тока Холла в проводниках пластинчатой и цилиндрической формы, возможности регистрации типа проводимости и концентрации носителей заряда, условия реализации состояния магнитодинамической нелинейности свойств металлов при криогенных температурах.

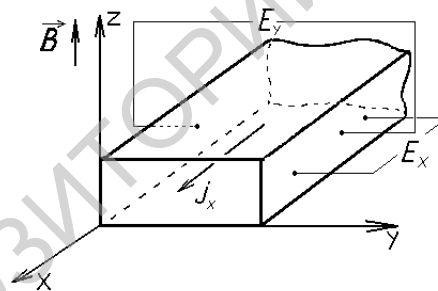


Рис. 3 Схематическое изображение геометрии Холла при изучении характеристик носителей заряда в конденсированных средах.

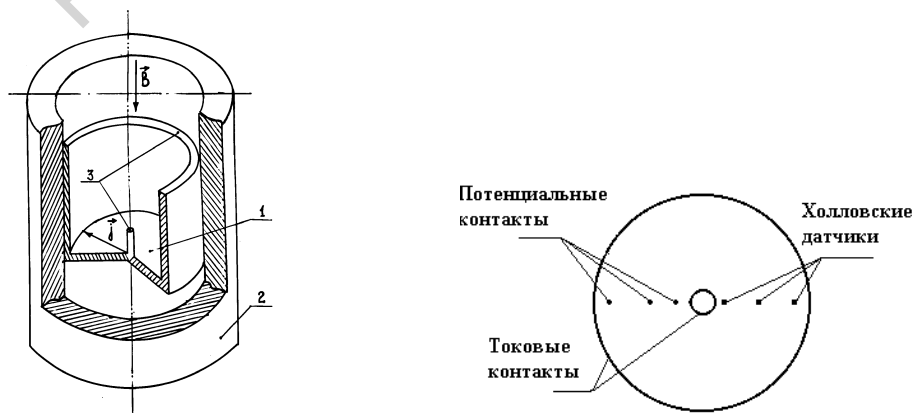


Рис. 4. Принципиальная схема геометрии Корбино: образец в форме диска (1) находится в поле сверхпроводящего соленоида (2), ток подводится через центр и по образующей цилиндра (3).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев В.Р. Электродинамика криопроводников в неоднородном стационарном магнитном поле / В.Р.Соболев, О.Н. Мазуренко // – Мн.: Бел. Наука. – 2003. – 198 с.
2. Соболев В.Р. Магнитодинамическая нелинейность электрических свойств некомпенсированных металлов / В.Р.Соболев, О.Н.Мазуренко // – ФНТ. – 2001. – Т. 27, N 1. – С. 60–67.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ