

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В СИЛЬНОМ КВАНТУЮЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Г. Гулямов<sup>1</sup>, Н. Ю. Шарибаев<sup>1,2</sup>, У. И. Эркабоев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Наманганский инженерно-педагогический институт

<sup>2</sup>Наманганский инженерно-технологический институт  
(Узбекистан)

Поступила в редакцию 15. 01. 2014

Исследовано влияние изменения циклотронной эффективной массы на температурную зависимость плотности энергетических состояний в сильном квантующем магнитном поле. С учетом зависимости циклотронной эффективной массы от энергии, получены графики температурной зависимости плотности энергетических состояний в сильном квантующем магнитном поле. С помощью предложенной модели исследовано влияние циклотронной эффективной массы на температурную зависимость плотности энергетических состояний в сильном квантующем магнитном поле. Получены графики температурной зависимости плотности энергетических состояний в сильном магнитном поле в InAs.

**Ключевые слова:** циклотронная эффективная масса, уровни Ландау, численный эксперимент и моделирование.

## ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ЩІЛЬНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНІВ У СИЛЬНОМУ КВАНТУЮЧОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Г. Гулямов, Н. Ю. Шарібаєв, У. І. Еркабоев

Досліджено вплив змінювання циклотронної ефективної маси на температурну залежність густини енергетичних станів у сильному квантуєчому магнітному полі. З урахуванням залежності циклотронної ефективної маси від енергії, отримані графіки температурної залежності щільності енергетичних станів у сильному квантуєчому магнітному полі. За допомогою запропонованої моделі досліджено вплив циклотронної ефективної маси на температурну залежність густини енергетичних станів у сильному квантуєчому магнітному полі. Отримано графіки температурної залежності щільності енергетичних станів у сильному магнітному полі в InAs.

**Ключові слова:** циклотронна ефективна маса, рівні Ландау, чисельний експеримент і моделювання.

## TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DENSITY OF STATE IN A STRONG QUANTIZING MAGNETIC FIELD

G. Gulyamov, N. Yu. Sharibaev, U. I. Erkaboev

Investigated the effect of changes in the cyclotron effective mass in the temperature dependence of the density of states in a strong quantizing magnetic field. Given the dependence of the cyclotron effective mass on the energy diagrams of the temperature dependence of the density of states in a strong quantizing magnetic field. With the proposed model to study the effect of the cyclotron effective mass in the temperature dependence of the density of states in a strong quantizing magnetic field. Diagrams of the temperature dependence of the density of states in a strong magnetic field in the InAs.

**Keywords:** cyclotron effective mass, Landau levels, the numerical simulation and experiment.

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1—3] рассмотрена температурная зависимость энергетического спектра плотности состояний полупроводников с учетом

температурной зависимости эффективной массы плотности состояний. В этих работах рассматривается влияние изменения циклотронной эффективной массы энергии

на температурную зависимость плотности энергетических состояний в сильном магнитном поле. Однако, как показали эксперименты [4—6], эффективная масса зависит от энергии. Эти изменения циклотронной эффективной массы меняют зависимость плотности состояний от энергии в сильном квантующем магнитном поле.

Целью настоящей работы является исследование влияния изменения циклотронной эффективной массы на температурную зависимость плотности энергетических состояний в сильном квантующем магнитном поле.

### ТЕОРИЯ

В сильном магнитном поле энергетический спектр свободных электронов и дырок претерпевает серьезные изменения, что отражается и на плотности энергетических состояний. Зависимость энергии  $E$  электрона с квадратичным эллипсоидальным законом дисперсии в магнитном поле от главного квантового числа  $n$ , спинового квантового числа  $s$  и проекции  $p_z$  импульса на направление магнитного поля  $H$  принимает следующий вид [7]:

$$E(n, s, p_z) = \hbar\omega_c \left( n + \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} sg\mu_B\mu_0 H + \frac{p_z^2}{2m_z^*}. \quad (1)$$

Здесь,  $g$ -фактор определяется только ориентацией магнитного поля  $H$  и не зависит от величины проекции  $p_z$  импульса, где  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $m_z^*$  — продольная эффективная масса.

Полная плотность энергетических состояний в магнитном поле у электронной системы с квадратичным изотропным законом дисперсии без учёта спинного расщепления уровней Ландау может быть записана в виде [7]:

$$N_H(E, H) = \frac{m^{*3/2} \hbar\omega_c}{\sqrt{2\pi^2 \hbar^3}} \sum_{n=0}^{n_E} \left[ E - \hbar\omega_c \left( n + \frac{1}{2} \right) \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

где,  $E$  — энергия свободного электрона,  $n = 0, 1, \dots$  — число уровней Ландау,  $m^*$  — циклотронная эффективная масса,  $\omega_c = \frac{eH}{m^*c}$  — циклотронная частота.

В частности, если энергетический спектр оператора чисто дискретный (точечный), то плотность энергетических состояний равна сумме  $\delta$ -функций, сосредоточенных в точках спектра  $E_i$ , амплитуда которых:

$$N_{si} = \psi_i^2(0) + \psi_i^2(0),$$

где  $E_i$  и  $\psi_i^2(x)$  — нормированные на единицу собственные функции [8]:

$$N_s(E) \sum_i N_{si} \delta(E - E_i). \quad (3)$$

Термическое уширение уровней в магнитном поле приводит к сглаживанию дискретных уровней. Термическое уширение будет учитываться с помощью  $GN$  функции. Как в работах [9—10],  $N_s(E, H, T)$  разложим в ряд по  $GN$  функциям

$$N_s(E, H, T) \sum_{i=1}^n N_{si}(E_i, E, H) GH(E_i, E, T). \quad (4)$$

Здесь,  $N_{si}(E_i, H, E)$  — плотность состояний в квантующем магнитном поле при абсолютном нуле температуры. Если же закон дисперсии неквадратичен, но изотропен, как, например, у электронов в соединениях III—V и II—VI, то эффективная масса, есть функция волнового числа или энергии.

Это значит, что по мере заполнения энергетической зоны носителями заряда эффективная масса их будет изменяться. Например, для InSb при  $k = 0$  и  $m_n = \frac{1}{70} m_0$  зависимость эффективной массы от энергии принимает простой вид [11]:

$$m(\xi) = m_n [1 + 2\xi - 2\nu\xi(2 + 3\xi)],$$

здесь,  $\xi = \frac{E}{E_g}$ ,  $\nu = \frac{m_n}{m_0}$ .

Циклотронная частота имеет вид:

$$\omega_c = \frac{eH}{m(\xi)c}. \quad (5)$$

Тогда можно записать плотность энергетических состояний в следующем виде:

$$N_s(E, H, m^*, T) = \sum_{i=1}^n N_{si}(E_i, E, H, m^*) \times GN(E_i, E, T). \quad (6)$$

Рассмотрим влияние изменения массы на плотность состояний в магнитном поле. Это может быть рассмотрено, как отклонение закона дисперсии электронов от параболическости.

### ВЛИЯНИЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

В сильном магнитном поле сплошной спектр энергетических состояний сильно деформируется и превращается в осциллирующие линии. С повышением температуры дискретные уровни смываются, и плотности энергетических состояний превращаются в сплошной спектр. В эксперименте, плотность состояний зависит от энергии, температуры, от эффективной массы. Эффективная масса зависит от энергии,  $\omega_c$  зависит от эффективной массы. Таким образом, с ростом энергии меняется расстояние между пиками.

При постоянной эффективной массе (параболическая зона) зависимость плотности состояний от энергии имеет вид:

$$\rho \sim \sqrt{E - E_c}.$$

Если с ростом энергии электронов увеличивается эффективная масса электронов, уменьшается расстояние между уровнями Ландау, кривая плотности состояний перемещается в сторону больших значений плотности состояний и перемещается вверх по оси плотности состояний.

Наоборот, если  $m(E)$  уменьшается с ростом энергии, кривая плотности состояний перемещается вниз по энергии вдоль оси плотности состояний. Таким образом, магнитное поле сдвигает плотность состояний в плоскости даже при температурах когда уровни Ландау не заметны. В работе [6] определена эффективная масса электронов в полупроводниках  $n$ -InAs при энергиях, не равных энергии Ферми, по температурной зависимости амплитуды осцилляций туннельной проводимости в сильном магнитном поле. На рис. 1 приведена зависимость эффективной массы в  $n$ -InAs от энергии из

работы [6]. Используя данные рис. 1 можно вычислять изменения эффективной массы на температурную зависимость плотности энергетических состояний в сильном магнитном поле.

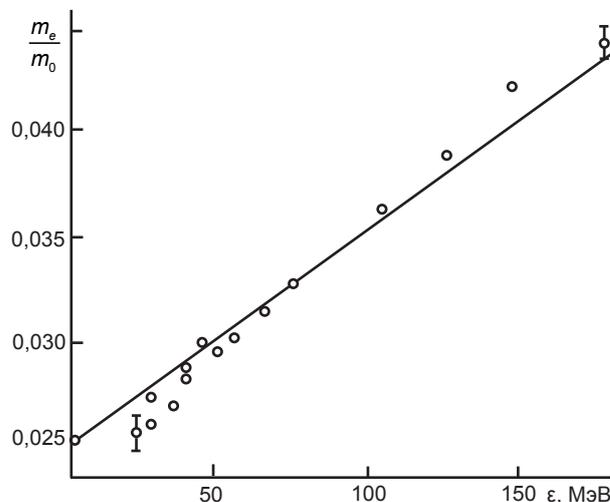
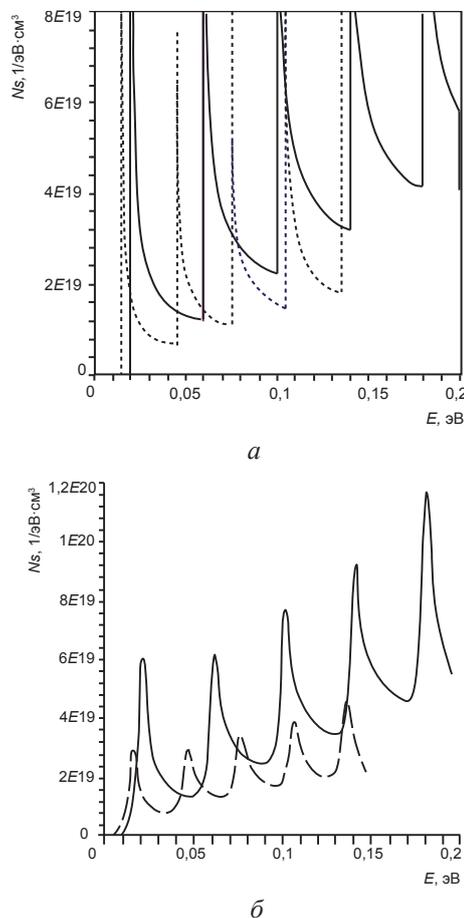


Рис. 1. Зависимость эффективной массы в  $n$ -InAs от энергии [6]

На рис. 2 приведен график температурной зависимости плотности энергетических состояний для InAs с учетом изменения эффективной массы.



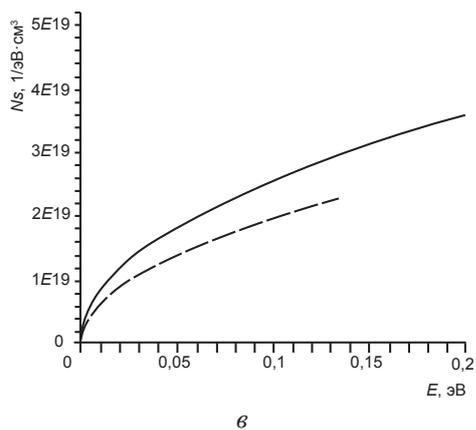


Рис. 2. Температурная зависимость плотности энергетических состояний в квантующем магнитном поле; — для  $m^* = \text{const}$ , - - для  $m^* = m(E)$ ; а:  $T = 5$  К, б:  $T = 50$  К, в:  $T = 300$  К

Из рис. 2 видно, что изменение эффективной массы с энергией может сильно повлиять на температурную зависимость плотности энергетических состояний в квантующем магнитном поле.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована температурная зависимость плотности энергетических состояний в полупроводниках в InAs с учетом зависимости эффективной массы от энергии в сильном квантующем магнитном поле. Получена температурная зависимость плотности энергетических состояний с учетом изменения циклотронной эффективной массы в сильном магнитном поле.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гулямов Г., Шарibaев Н. Ю., Эркабоев У. И. Влияние эффективной массы плотности состояний на температурную зависимость ширины запрещенной зоны в твердых растворах  $p\text{-Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$  // ФИП. — 2013. — Т. 11, № 2. — С. 195—199.
2. Gulyamov G., Sharibaev N. Yu., Erkaboev U. I. The temperature dependence of the density of states in semiconductors. // World Journal of Condensed Matter Physics. — 2013. — Vol. 3, No. 4. — P. 216—220.
3. Gulyamov G., Erkaboev U. I., Sharibaev N. Y. The temperature dependence of the band gap Si // Physical surface engineering. — 2013. — Vol 11, No. 3. — P. 289—292.
4. Lin C. Y., Chang S. T., Liu C. W. Hole effective mass in strained  $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$  alloys // Journal of

applied physics. — 2004. — Vol. 96, No. 9 — P. 5037—5041.

5. Chuiko G. P., Stepanchikov D. M. Geometrical way of determination of effective masses and densities of states within generalized Kildal's model // Physics and chemistry of solid state. — 2008. — Vol. 9, No. 2. — P. 312—318.
6. Зверев Л. П., Кружаев В. В., Миньков Г. М., Рут О. Э. О возможности использования туннельной спектроскопии для определения энергетической зависимости эффективной массы в полупроводниках // Письма в ЖЭТФ. — 1980. — Т. 31, Вып. 3. — С. 169—172.
7. Брандт Н. Б., Кульбачинский В. А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. — М.: Физматлит, 2007. — 297 с.
8. Лифшиц И. М., Гредескул С. А., Пастур Л. А. Введение в теорию неупорядоченных систем. М.: Наука, 1982. — 162 с.
9. Гулямов Г., Шарibaев Н. Ю. Определение плотности поверхностных состояний границы раздела полупроводник-диэлектрик в МДП структуре // ФТП. — 2011. — Т. 45, Вып 2. — С. 178—182.
10. Гулямов Г., Каримов И. Н., Шарibaев Н. Ю., Эркабоев У. И. Определение плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик в структурах  $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$  и  $\text{Al-SiO}_2\text{-}n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  при низкой температуре // Uzbek Journal of Physics. — 2010. — Vol. 12, No. 3. — P. 143—146.
11. Цидилковский И. М. Электроны и дырки в полупроводниках. — М.: «Наука», 1972. — 447 с.

## LITERATURA

1. Gulyamov G., Sharibaev N., Yu., Erkaboev U. I. Vliyanie effektivnoj massy plotnosti sostoyanij na temperaturnuyu zavisimost shiriny zapreschennoj zony v tverdyh rastvorah  $p\text{-Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$  // FIP. — 2013. — Vol. 11, No. 2. P. 195—199.
2. Gulyamov G., Sharibaev N. Yu., Erkaboev U. I. The temperature dependence of the density of states in semiconductors // World Journal of Condensed Matter Physics. — 2013. — Vol. 3, No. 4, P. 216—220.
3. Gulyamov G., Erkaboev U. I., Sharibaev N. Y. The temperature dependence of the band gap Si // Physical surface engineering. — 2013. — Vol 11, No. 3. — P. 289—292.
4. Lin C. Y., Chang S. T., Liu C. W. Hole effective mass in strained  $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$  alloys // Journal of applied physics. — 2004. — Vol. 96, No. 9.

- P. 5037—5041.
5. Chuiko G. P., Stepanchikov D. M. Geometrical way of determination of effective masses and densities of states within generalized Kildal's model // *Physics and chemistry of solid state*. — 2008. — Vol. 9, No. 2. — P. 312—318.
  6. Zverev L. P., Kruzhaev V. V., Min'kov G. M., Rut O. E. O vozmozhnosti ispol'zovaniya tunnel'noj spektroskopii dlya opredeleniya energeticheskoy zavisimosti effektivnoj massy v poluprovodnikah // *Pis'ma v ZhETF*. — 1980. — Vol. 31, Vyp. 3. — P. 169—172.
  7. Brandt N. B., Kul'bachinskij V. A. Kvazichasticy v fizike kondensirovannogo sostoyaniya. — M.: Fizmatlit, 2007. — 297 p.
  8. Lifshic I. M., Gredeskul S. A., Pastur L. A. Vvedenie v teoriyu neuporyadochennyh sistem. — M.: Nauka, 1982. — 162 p.
  9. Gulyamov G., Sharibaev N. Yu. Opredelenie plotnosti poverhnostnyh sostoyanij granicy razdela poluprovodnik-dielektrik v MDP strukture // *FTP*. — 2011. — Vol. 45, Vyp 2. — P. 178—182.
  10. Gulyamov G., Karimov I. N., Sharibaev N. Yu., Erkaboev U. I. Opredelenie plotnosti poverhnostnyh sostoyanij na granicy razdela poluprovodnik-dielektrik v strukturah Al-SiO<sub>2</sub>-Si i Al-SiO<sub>2</sub>-*n*-Si<Ni> pri nizkoj temperature. // *Uzbek Journal of Physics*. — 2010. — Vol. 12, No. 3. — P. 143—146.
  11. Cidilkovskij I. M. Elektrony i dyrki v poluprovodnikah. — M.: «Nauka», 1972. — 447 p.