

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕЕРНУЮ ДИАГРАММУ СПЕКТРА МАГНИТОПОГЛОЩЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ*

Г. Гулямов¹, У.И. Эркабоев², А.Г. Гулямов³

¹Наманганский инженерно-строительный институт
д. 12, пр-т И. Каримова, г. Наманган, 160103, Республика Узбекистан
тел.: (0369) 234-15-23, (+99890)741-46-56; факс: (0369) 234-15-23
e-mail: gulyamov1949@mail.ru

²Наманганский инженерно-технологический институт
д. 7, ул. Косонсой, г. Наманган, 160115, Республика Узбекистан
тел.: (0369) 225-10-07, (+99890)741-46-56; факс: (0369) 232-97-79
e-mail: erkaboev1983@mail.ru

³Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан
д. 2Б, ул. Г. Мавлянова, г. Ташкент, 100084, Республика Узбекистан
тел.: (+99871) 233-12-71, (+99893)499-79-16; факс: (+99871) 235-42-91
e-mail: abdurusul.gulyamov@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.01-03.104-115

Заключение совета рецензентов: 28.11.18 Заключение совета экспертов: 05.12.18 Принято к публикации: 10.12.18

Рассмотрены осцилляции межзонного магнитооптического поглощения в полупроводниках с кейновским законом дисперсии. Сравнивались изменения осцилляций комбинированной плотности состояний по энергии фотона для различных уровней Ландау в параболических и непараболических зонах. Получено аналитическое выражение для осцилляции комбинированной плотности состояний в узкозонных полупроводниках. Предложен простой метод расчета осцилляции комбинированной плотности состояний в квантующем магнитном поле с неквадратичным законом дисперсии. Получена температурная зависимость осцилляции комбинированной плотности состояний в полупроводниках с непараболическим законом дисперсии. Объяснена температурная зависимость ширины запрещенной зоны в сильном магнитном поле с неквадратичным законом дисперсии. Данный метод расчета применен в исследовании магнитопоглощения в узкозонных полупроводниках с непараболическим законом дисперсии. Рассчитана зависимость максимальной энергии фотона от магнитного поля при различных значениях температуры. Теоретическое исследование зонной структуры показало, что с ростом температуры осцилляции магнитопоглощения уменьшаются, и энергия фотона нелинейно зависит от сильного магнитного поля. Показано, что с ростом температуры за счет термического уширения смываются уровни Ландау, и плотность состояний превращается в плотность состояний без магнитного поля. С помощью математической модели рассмотрена температурная зависимость распределения плотности энергетических состояний в сильных магнитных полях. Показано, что сплошной спектр плотности состояний, измеренный при температуре жидкого азота, при низких температурах превращается в дискретные уровни Ландау. Математическое моделирование процессов с использованием экспериментальных значений сплошного спектра плотности состояний дает возможность рассчитать дискретные уровни Ландау. Построена трехмерная веерная диаграмма осцилляции магнитопоглощения в полупроводниках с учетом комбинированной плотности состояний. Показано, что при неквадратичном законе дисперсии максимальная частота поглощаемого света и ширина запрещенной зоны нелинейно зависят от магнитного поля. Моделирование температурной зависимости позволило определить уровни Ландау в полупроводниках в широком температурном диапазоне. С помощью предложенной модели проанализированы экспериментальные результаты, полученные для узкозонных полупроводников.

Ключевые слова: веерная диаграмма; энергия фотона; магнитооптические эффекты; межзонное магнитопоглощение.

*Гулямов Г., Эркабоев У.И., Гулямов А.Г. Математическое моделирование влияния температуры на веерную диаграмму спектра магнитопоглощения в полупроводниках // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE), 2019;01-03:104-115.



MATHEMATICAL MODELING OF TEMPERATURE EFFECT ON THE FAN CHART OF MAGNETOABSORPTION SPECTRUM IN SEMICONDUCTORS

G. Gulyamov¹, U.I. Erkaboev², A.G. Gulyamov³

¹Namangan Engineering-Construction Institute
12 I. Karimov Av, Namangan, 160103, Uzbekistan
tel.: (0369) 234-15-23, (+99890)741-46-56; fax: (069) 234-15-23
e-mail: gulyamov1949@mail.ru

²Namangan Engineering-Technological Institute
7 Kosonsoy Str., Namangan, 160115, Uzbekistan
tel.: (0369) 225-10-07, (+99890)741-46-56; fax: (069) 232-97-79
e-mail: erkaboev1983@mail.ru

³Physico-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
2 "B", G. Mavlyanov Str., Tashkent, 100084, Uzbekistan
tel.: (+99871) 233-12-71, (+99893)499-79-16; fax: (+99871) 235-42-91
e-mail: abdurasul.gulyamov@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.01-03.104-115

Referred 28 November 2018 Received in revised form 5 December 2018 Accepted 10 December 2018



The article considers the oscillations of interband magneto-optical absorption in semiconductors with the Kane dispersion law. We have compared the changes in oscillations of the joint density of states with respect to the photon energy for different Landau levels in parabolic and non-parabolic zones. An analytical expression is obtained for the oscillation of the combined density of states in narrow-gap semiconductors. We have calculated the dependence of the maximum photon energy on the magnetic field at different temperatures. A theoretical study of the band structure showed that the magnetoabsorption oscillations decrease with an increase in temperature, and the photon energies nonlinearly depend on a strong magnetic field. The article proposes a simple method for calculating the oscillation of joint density of states in a quantizing magnetic field with the non-quadratic dispersion law. The temperature dependence of the oscillations joint density of states in semiconductors with non-parabolic dispersion law is obtained. Moreover, the article studies the temperature dependence of the band gap in a strong magnetic field with the non-quadratic dispersion law. The method is applied to the research of the magnetic absorption in narrow-gap semiconductors with non-parabolic dispersion law. It is shown that as the temperature increases, Landau levels are washed away due to thermal broadening and density of states turns into a density of states without a magnetic field. Using the mathematical model, the temperature dependence of the density distribution of energy states in strong magnetic fields is considered. It is shown that the continuous spectrum of the density of states, measured at the temperature of liquid nitrogen, at low temperatures turns into discrete Landau levels. Mathematical modeling of processes using experimental values of the continuous spectrum of the density of states makes it possible to calculate discrete Landau levels. We have created the three-dimensional fan chart of magneto optical oscillations of semiconductors with considering for the joint density of energy states. For a nonquadratic dispersion law, the maximum frequency of the absorbed light and the width of the forbidden band are shown to depend nonlinearly on the magnetic field. Modeling the temperature dependence allowed us to determine the Landau levels in semiconductors in a wide temperature spectrum. Using the proposed model, the experimental results obtained for narrow-gap semiconductors are analyzed. The theoretical results are compared with experimental results.

Keywords: fan chart; photon energy; magneto-optical effects; interband magnetic absorption.



Гафур Гулямов
Gafur Gulyamov

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика», Наманганский инженерно-строительный институт.

Образование: Ташкентский государственный университет (1971 г.).

Область научных интересов: физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

Публикации: более 200.
<https://orcid.org/0000-0001-9879-3165>

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor of Physics chair, Namangan Engineering Construction Institute.

Education: Tashkent State University, 1971.

Research interests: physics of semiconductors and semiconductor devices.

Publications: more than 200.





Улугбек Инаятллаевич
Эркабоев
Ulugbek Erkaboev

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика», Наманганский инженерно-технологический институт.

Образование: Андижанский государственный университет (2008 г.).

Область научных интересов: физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

Публикации: более 50.
<http://orcid.org/0000-0002-6841-8214>

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor at Physics Chair, Namangan Engineering-Technological Institute.

Education: Andijan State University, 2008.

Research interests: physics of semiconductors and semiconductor devices.

Publications: more than 50.



Абдурасул Гафурович
Гулямов
Abdurasul Gulyamov

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник-исследователь лаборатории «Физика полупроводников и теории твердого тела» Физико-технического института Академии наук Республики Узбекистан.

Образование: Наманганский инженерно-технологический институт (1996 г.).

Область научных интересов: физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

Публикации: более 60.
<https://orcid.org/0000-0001-6824-8246>

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Senior Researcher at the Laboratory “Physics of Semiconductors and Solid State Theory”, Physical-Technical Institute, Academy of Sciences of Uzbekistan.

Education: Namangan Institute of Engineering Technology, 1996.

Research interests: physics of semiconductors and semiconductor devices.

Publications: more than 60.

1. Введение

В последние годы развивается новая научно-техническая отрасль – магнетоэлектроника, или как теперь принято ее называть – спинтроника, занимающаяся изучением и практическим применением эффектов и устройств, использующих спины электронов. Спинтроника изучает магнитные и магнитооптические взаимодействия в металлических и полупроводниковых структурах, а также квантовые магнитные явления в структурах наноразмеров [1–4].

В работах [5, 6] исследованы осцилляции, обусловленные оптическими межзонными переходами электронов в точке L зоны Бриллюэна висмута, в диапазоне температур $T = 77 \div 280$ К в магнитных

полях до $B = 22$ Тл, а также в образцах, представляющих собой две разделенные зазором симметричные половинки монокристалла висмута, измерен коэффициент пропускания инфракрасного излучения в зависимости от индукции импульсного магнитного поля. Верная диаграмма содержит информацию как о слабых магнитных полях (эффект Зеемана и диамагнитный сдвиг), так и о сильных полях (переходы между уровнями Ландау) [7–13]. Однако в этих работах не рассматривалось влияние температуры на ширину запрещенной зоны в квантующем магнитном поле.

Осцилляции магнитооптического поглощения в полупроводниках вычисляются с помощью следующей формулы [14]:

$$\alpha_H = \frac{2e^2}{m^2 \omega n c} |ep_{cv}(0)|^2 \left(\frac{2m_r}{\hbar^2}\right)^{3/2} \mu_r H \sum_N [\hbar\omega - E_g - (2N+1)\mu_r H]^{-1/2}, \quad (1)$$

где p_{cv} – матричный элемент; m_r – приведенная эффективная масса; μ_r – приведенный эффективный магнетон Бора; N – номер уровней Ландау.

Эта формула применима для прямых разрешенных переходов с параболическим законом дисперсии. Из формулы (1) можно определить комбинированные плотности состояний:

$$N_{jds}^p(\hbar\nu, H) = \left(\frac{2m_r}{\hbar^2}\right)^{3/2} \mu_r H \sum_N \frac{1}{\sqrt{\hbar\nu - E_g - (2N+1)\mu_r H}}. \quad (2)$$

В этом случае эффективные массы электронов будут постоянными. Но важной особенностью полу-

проводников с узкой запрещенной зоной является сильная непараболичность зоны проводимости.

Здесь реализуется предельный случай модели Кейна, то есть в таких полупроводниках эффективная масса сильно зависит от энергии электронов.

Исследования, посвящённые разработке конкретной модели осцилляций межзонного магнитооптического поглощения при разных температурах в полупроводниках с непараболическим законом дисперсии, в литературе не найдены.

Целью данной работы является построение математической модели зависимости межзонного магнитооптического поглощения от температуры в узкозонных полупроводниках.

тооптического поглощения от температуры в узкозонных полупроводниках.

В задачи исследования входят: изучение зависимости ширины запрещенной зоны и частоты поглощаемого света от сильного магнитного поля с непараболическим законом дисперсии с помощью приведенной модели; рассмотрение влияния температуры на веерную диаграмму спектра магнитопоглощения; сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
α	Коэффициент магнитооптического поглощения света
μ	Уровень Ферми
μ_r	Приведенный эффективный магнетон Бора
Δ	Величина спин-орбитального отщепления
\hbar	Постоянная Планка
ω	Частота света
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
B	Индукция магнитного поля
E	Энергия электронов в зоне проводимости
E_g	Ширина запрещенной зоны
f_0	Функция Ферми – Дирака
k	Волновые векторы дырок или электронов
m_c	Циклотронная эффективная масса
m_r	Приведенная эффективная масса
N	Число уровней Ландау
P_{cv}	Матричный элемент
S	Площадь сечения изоэнергетической поверхности плоскости
T	Температура
<i>Индексы верхние</i>	
n	Непараболические зоны (no parabolic)
<i>Индексы нижние</i>	
c	Циклотронная (cyclotron)
g	Ширина запрещенной зоны (gap)
h	Дырка (hole)
jds	Комбинированная плотность состояний (joint density of states)
r	Приведенный (reduced)
x, y, z	Направление декартовых координат
<i>Аббревиатуры</i>	
КПС	Комбинированные плотности состояний

2. Теоретическая часть

2.1. Определение осцилляции комбинированной плотности состояний в полупроводниках с неквадратичным законом дисперсии

Рассмотрим изменение осцилляции комбинированной плотности состояний (КПС) в полупроводниках с непараболическим законом дисперсии. Непараболическость зоны проводимости для электронов можно записать следующим образом [15]:

$$E_c = -\frac{E_g}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{E_g^2 + 4E_g \left[\left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m_n} \right]}. \quad (3)$$

Началом отсчета энергии выбрано дно зоны проводимости. Отсюда неквадратичный закон дисперсии для дырок записывается аналогичным образом:

$$E_v = -E_c - E_g = -\frac{E_g}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{E_g^2 + 4E_g \left[\left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c + \frac{\hbar^2 k_{pz}^2}{2m_p} \right]}, \quad (4)$$

где E_v – энергия потолка валентной зоны. Отметим, что оба закона дисперсии (3) и (4) изотропны, эффективная масса дырок и электронов равны: $mn = mp = m$. Такое поведение спектров дырок и электронов связано с внутренней симметрией узкозонных полупроводников [16, 17].

$$E = hv = E_c(k_z, B) - E_v(k_z, B) = \sqrt{E_g^2 + 4E_g \left[\left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m} \right]}. \quad (5)$$

Здесь hv – энергия поглощаемого фотона.

Теперь определим комбинированное число состояний с энергиями в интервале между двумя уровнями Ландау. Пользуясь выражением для циклотронной массы, найдем разность площадей сечений двух изоэнергетических поверхностей, энергии которых различаются на $\Delta E = \hbar\omega_c$:

$$\Delta S = \frac{2\pi m_c}{\hbar^2} \Delta E = \frac{2\pi m_c}{\hbar^2} \hbar\omega_c.$$

Число состояний в плоскости $k_x k_y$ между двумя квантовыми орбитами определяется следующим выражением:

$$\frac{L_x L_y}{(2\pi)^2} \Delta S = \frac{m\omega_c}{2\pi\hbar} L_x L_y.$$

Из уравнения (5) определим k_z (6):

$$N(E, B) = \frac{L_x L_y L_z m^{\frac{3}{2}}}{2^{\frac{3}{2}} \pi^2 \hbar^3} \hbar\omega_c \cdot \sum_{N=0}^{N_{\max}} \sqrt{\frac{(hv)^2}{E_g} - \left(E_g + 4\left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c \right)}. \quad (9)$$

В результате мы определяем комбинированные плотности состояний в единице объема с кейновским законом дисперсии:

$$N_{jds}^n(hv, B) = \frac{dN(hv, B)}{dhv} = \frac{(m)^{\frac{3}{2}}}{(2)^{\frac{3}{2}} \pi^2 \hbar^3} \frac{\hbar\omega_c}{2} \sum_{N=0}^{N_{\max}} \frac{\frac{hv}{E_g}}{\sqrt{\frac{(hv)^2}{E_g} - \left(E_g + 4\hbar\omega_c \left(N + \frac{1}{2} \right) \right)}}. \quad (10)$$

Здесь $N_{jds}^n(hv, B)$ – КПС с неквадратичным законом дисперсии при квантуемом магнитном поле.

2.2. Зависимость ширины запрещенной зоны и частоты поглощаемого света от сильного магнитного поля с непараболическим законом дисперсии

Закон сохранения квазиимпульса будет выглядеть следующим образом: $k_h = k_c = k$, где, k_h, k_c – волновые векторы дырок и электронов соответственно [16, 17].

Для таких энергетических зон из выражений (3) и (4) следует:

$$k_z = \frac{(2m)^{\frac{1}{2}}}{\hbar} \sqrt{\frac{(hv)^2}{E_g} - \left(E_g + 4\left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c \right)}. \quad (6)$$

Вернемся теперь к вычислению КПС с непараболическим законом дисперсии в квантуемом магнитном поле. Движения электрона свободны по оси z , не квантуются по k_z , то есть

$$k_z = \frac{2\pi}{L_z} n_z. \quad (7)$$

Согласно выражениям (6) и (7) число состояний в интервале энергий от $(N + \frac{1}{2})\hbar\omega_c$ до E

$$n_z = \frac{m^{\frac{1}{2}} L_z}{2^{\frac{1}{2}} \pi \hbar} \sqrt{\frac{(hv)^2}{E_g} - \left(E_g + 4\left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c \right)}. \quad (8)$$

Полное число КПС с энергиями меньшими E составляет:

В работе [18] было показано, что магнитное поле приводит к образованию уровней Ландау в зоне проводимости и валентной зоне. Энергии этих уровней в параболической зоне определяются по формуле (1). При $N = 0$ находим, что дно зоны проводимости и потолок валентной зоны при изменении B_z смещаются так, что ширина запрещенной зоны увеличивается [19]:



$$E_g(B) = E_g(0) + \frac{1}{2}\hbar\left(\frac{e}{m_n} + \frac{e}{m_p}\right)B_z = E_g(0) + \frac{e\hbar}{2m_r}B_z. \quad (11)$$

Как видно из выражения (11), для параболических зон этот сдвиг пропорционален магнитной индукции B_z . Нелинейная зависимость может возникнуть вследствие непараболическости зон. Соответствующий сдвиг края собственного поглощения получен также экспериментально. Таким образом, с помощью приведенных моделей можно объяснить зависимость ширины запрещенной зоны от сильного магнитного поля в полупроводниках с непараболическим законом дисперсии.

Рассмотрим изменение частоты поглощаемого света и ширины запрещенной зоны при неквадратичном законе дисперсии при наличии магнитного поля. Сумма по N в (2) и (10) распространяется на все значения N , для которых подрадикальные выражения не отрицательны. Те значения ω , N и B , для которых подрадикальное выражение в (2) и (10) равно нулю, определяют сингулярные точки коэффициента поглощения. Эти точки соответствуют условию:

$$\hbar\omega_{\max} = E_g + (2N + 1)\mu_r H, \quad (12)$$

$$\hbar\omega_{\max} = \sqrt{E_g^2 + 4E_g(N + \frac{1}{2})\hbar\omega_c}, \quad (13)$$

где ω_{\max} – частота поглощаемого света, соответствующая максимуму поглощения. На рис. 1 и 2 представлены изменения максимальной частоты поглощаемого света в присутствии магнитного поля.

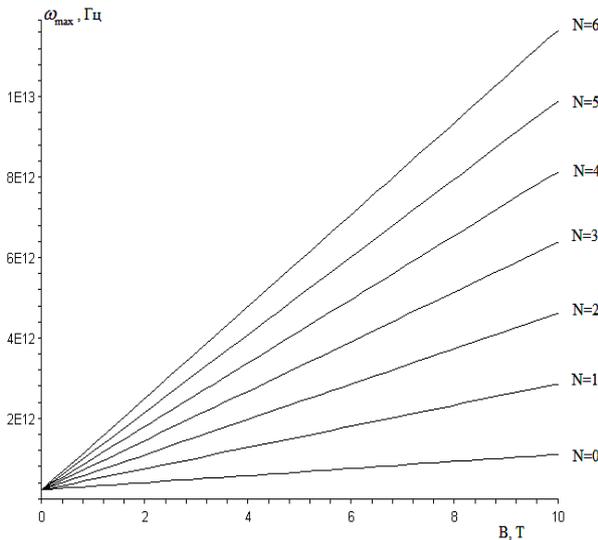


Рис. 1 – Зависимость максимальной частоты поглощаемого света от магнитного поля для разных уровней Ландау в параболическом законе дисперсии, вычисленная по формуле (12)

Fig. 1 – Dependence of the maximum frequency of the absorbed light on the magnetic field for different Landau levels in the parabolic dispersion law calculated from the formula (12)

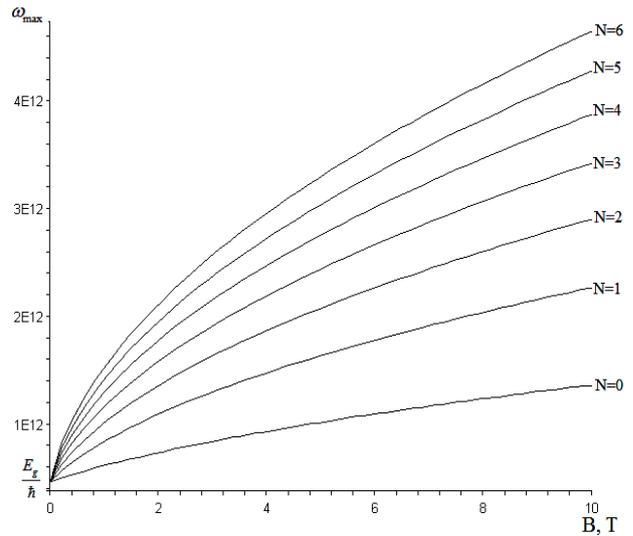


Рис. 2 – Влияние магнитного поля на максимальную частоту поглощаемого света в непараболическом законе дисперсии, вычисленное по формуле (13)

Fig. 2 – The effect of the magnetic field on the maximum frequencies of the absorbed light in the nonparabolic dispersion law calculated from formula (13)

Из (12) следует, что при заданном N частота поглощаемого света ω_{\max} линейно зависит от магнитного поля, а из (13) получаем, что максимальная частота поглощаемого света нелинейно зависит от магнитного поля при разных уровнях Ландау. На рис. 2 видно, что с увеличением номера уровней Ландау нелинейность ω_{\max} усиливается.

2.3. Влияние температуры на верхнюю диаграмму спектра магнитопоглощения в полупроводниках

КПС играют важную роль в межзонном магнитооптическом эффекте. Во многих случаях матричный элемент мало меняется в пределах зоны Бриллюэна. Следовательно, структура спектра преимущественно определяется КПС в полупроводниках.

Если начальные и конечные состояния имеют симметричные зонные спектры, тогда с помощью разложения в ряд по $\frac{df_0(E, \mu, T)}{dE}$ -функциям можно найти комбинированную плотность состояний при любой конечной температуре:

$$N_{jds}^n(E, H, T) = \sum_{i=1}^n N_{jds}^n(E_i, H) \frac{df_0(E_i, \mu, T)}{dE}. \quad (14)$$

$N_{jds}^n(E_i, H)$ – комбинированная плотность состояний в квантующем магнитном поле при абсолютном нуле температуры. Это выражение при $T \rightarrow 0$ превращается в (10). В этом случае уровни Ландау проявляются резко.

На рис. 3 приведена зависимость осцилляций КПС от температуры в InSb с непараболическим законом дисперсии. На этом рисунке осцилляции



комбинированной плотности состояний начинаются с $E = \hbar\omega = 0,27$ эВ при неквадратичном законе дисперсии. Здесь $E = \hbar\omega$ – энергия фотона.

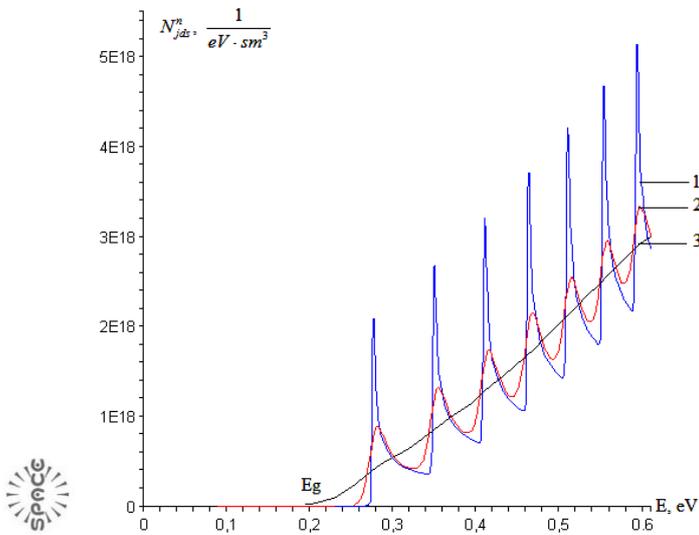


Рис. 3 – Температурная зависимость осцилляции комбинированной плотности состояний в квантующем магнитном поле с непараболическим законом дисперсии: 1 – $T = 5$ К, 2 – $T = 60$ К, 3 – $T = 200$ К; $B = 5$ Тл, для InSb $E_g(0) = 0,234$ эВ

Fig. 3 – Temperature dependence of the oscillations of the joint density of states in a quantizing magnetic field with a nonparabolic dispersion law: 1 – $T = 5$ К, 2 – $T = 60$ К, 3 – $T = 200$ К; $B = 5$ Т, for InSb $E_g(0) = 0.234$ эВ

На рис. 4 приведена температурная зависимость осцилляций КПС с параболическим законом дисперсии.

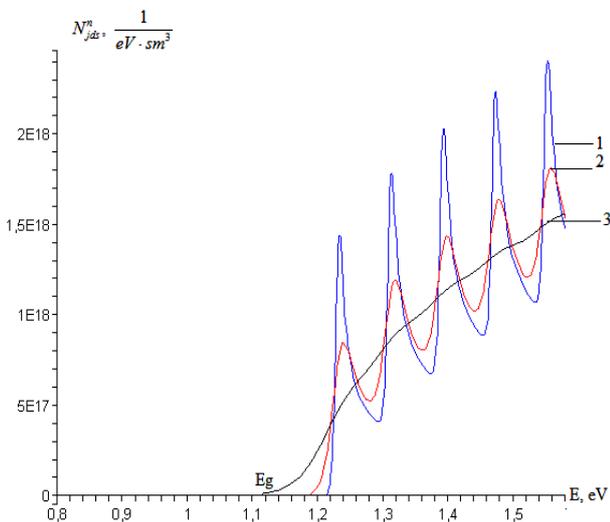


Рис. 4 – Температурная зависимость осцилляции комбинированной плотности состояний с параболическим законом дисперсии: 1 – $T = 10$ К, 2 – $T = 80$ К, 3 – $T = 300$ К; $B = 10$ Тл, для Si $E_g(0) = 1,1$ эВ

Fig. 4 – The temperature dependence of the oscillations of the combined density of states with a parabolic dispersion law: 1 – $T = 10$ К, 2 – $T = 80$ К, 3 – $T = 300$ К; $B = 10$ Т, for Si $E_g(0) = 1.1$ эВ

Как видно на рис. 3 и 4, при высокой температуре пики уровней Ландау практически не заметны и совпадают с плотностью состояний в отсутствие магнитного поля (рис. 5).

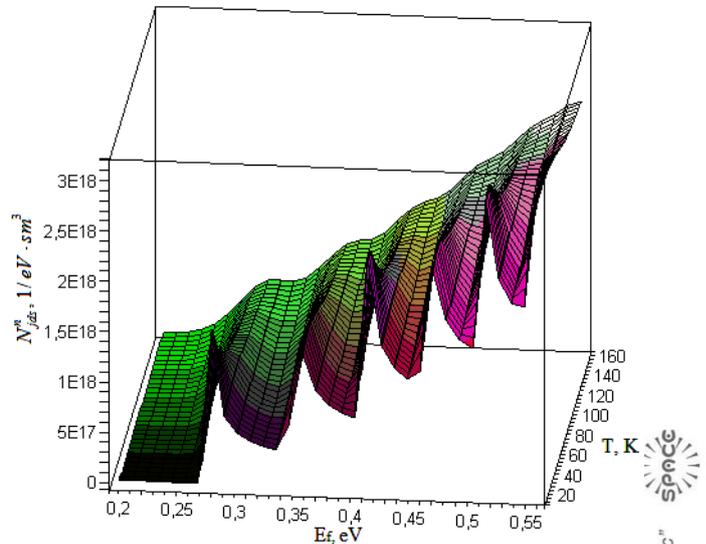


Рис. 5 – Осцилляции комбинированной плотности состояний в зависимости от энергии поглощаемого фотона и температуры в InSb

Fig. 5 – Oscillations of the joint density of states depending on the energy of the absorbed photon, and the temperature in InSb

Выполненный Бардиным и Шокли [20] теоретический расчет вклада, получаемого за счёт расширения решетки, показывает, что ширина запрещенной зоны при высоких значениях температуры меняется линейно с ростом температуры. Основываясь на теоретическом рассмотрении электрон-фононного взаимодействия, проведенного Васильевым [21] и Адамсом [22], Варшни [23–25] предложил следующую формулу для описания зависимости ширины запрещенной зоны от температуры:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \theta} \quad (15)$$

В работах [26–28] подробно исследовалась температурная зависимость ширины запрещенной зоны в новых материалах. Показано, что ширина запрещенной зоны с ростом температуры уменьшается.

Отсюда с помощью подстановки формулы (15) в уравнение (13) можно вычислить температурную зависимость спектра веерной диаграммы в полупроводниках:

$$\hbar\omega_{\max} = \sqrt{[E_g(T)]^2 + 4[E_g(T)] \cdot (N + \frac{1}{2})\hbar\omega_c} \quad (16)$$

Эта формула является температурной зависимостью верной диаграммы с учетом комбинированной плотности состояний.

3. Экспериментальная часть

На рис. 6а приведены изменения максимальной энергии поглощаемого фотона от сильного магнитного поля в InSb [29]. В этой работе наблюдались

прямые межзонные магнитооптические переходы в InSb при температуре жидкого гелия с использованием магнитных полей до 96,5 кЭ. Теперь можно вычислить зависимость максимальной энергии поглощаемого фотона от сильного магнитного поля в InSb с помощью формулы (13). В результате получаем зависимость энергии поглощаемого фотона от магнитного поля с непараболическим законом дисперсии в InSb (рис. 6б).

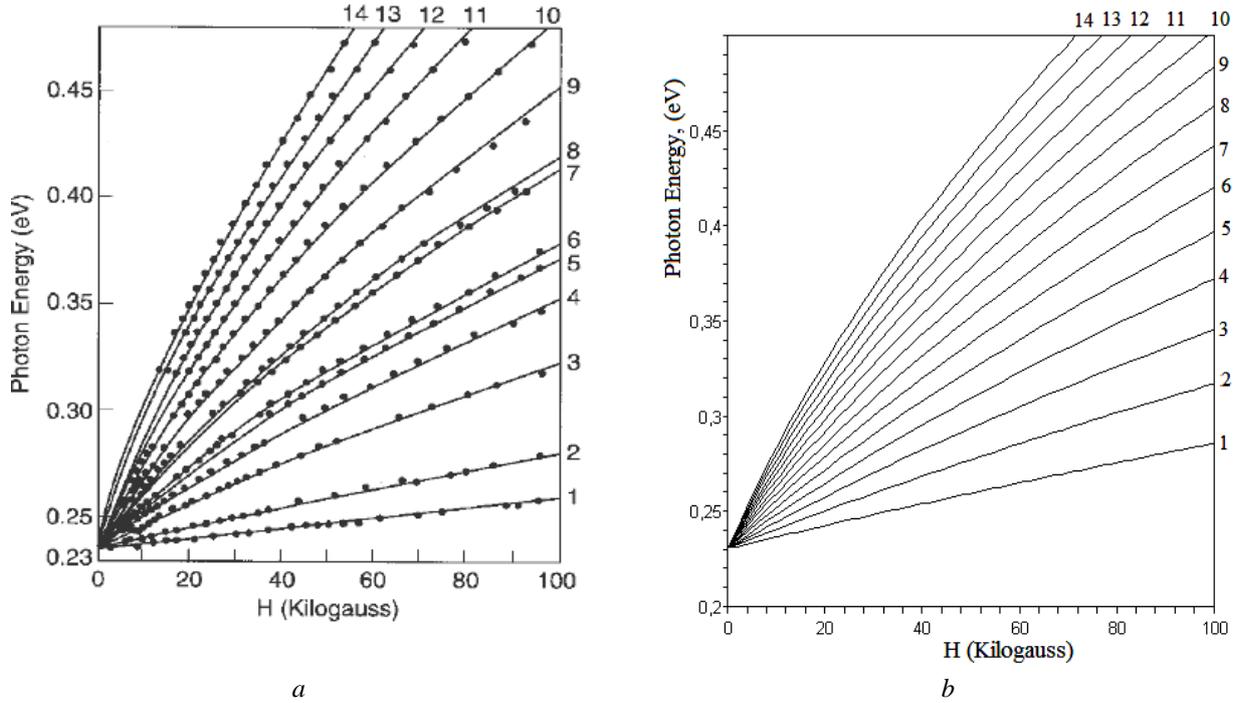


Рис. 6 – Изменение максимальной энергии поглощаемого фотона в InSb: а) экспериментальные данные [29]; б) расчет по формуле (13)

Fig. 6 – Changing the maximum energy of the absorbed photon in InSb: a) experimental data [29]; b) calculation using formula (13)

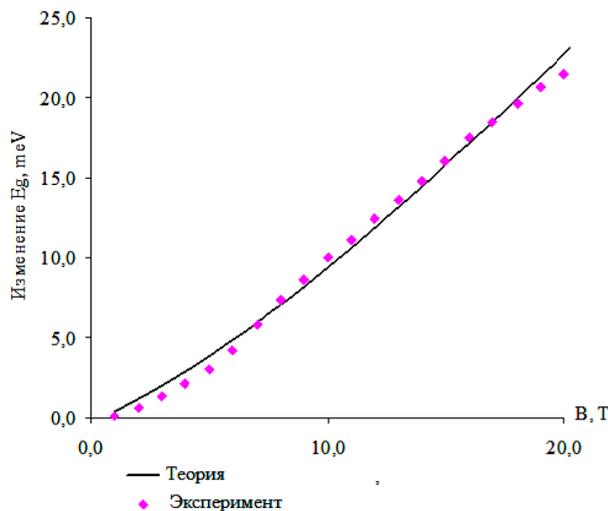


Рис. 7 – Зависимость ширины запрещенной зоны от магнитного поля в InAs

Fig. 7 – The dependence of the band gap on the magnetic field in InAs

На рис. 6 показано, что изменение максимальной энергии поглощаемого фотона нелинейно зависит от сильного магнитного поля.

На рис. 7 приведена зависимость ширины запрещенной зоны арсенида индия от магнитного поля [30]. Здесь показано, что изменение ширины запрещенной зоны нелинейно. С помощью формулы (13) можно определить зависимость ширины запрещенной зоны от магнитного поля при постоянной энергии поглощаемого фотона:

$$E_g(B) = \frac{1}{2} \left[(2N + 1)\hbar\omega_c + \sqrt{\left[\left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_c \right]^2 + (\hbar\omega)^2} \right]. \quad (17)$$

Из (17) следует, что изменение ширины запрещенной зоны не пропорционально B . На рис. 7 приведен график зависимости ширины запрещенной зоны от магнитного поля $E_g(H)$. Непрерывная линия (теоретический расчет) и точки (эксперимент) графика зависимости ширины запрещенной зоны от

магнитного поля [30] совпадают. Таким образом, при сильных магнитных полях теория и эксперимент хорошо согласуются.

4. Результаты и их обсуждение

Рассчитанные зависимости максимальной энергии фотона от магнитного поля при различной температуре представлены на рис. 8. Важным обстоятельством является тот факт, что с ростом температуры спектры магнитопоглощения изменяются.

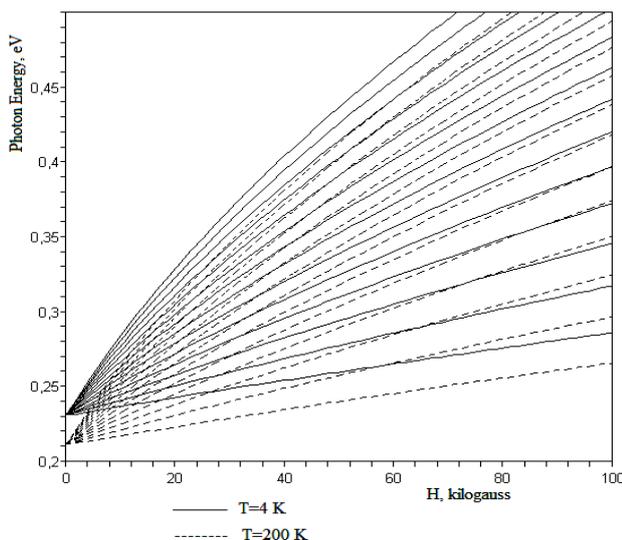


Рис. 8 – Зависимость энергии фотона от сильного магнитного поля при различных значениях температуры в InSb

Fig. 8 – The dependence of the photon energy on a strong magnetic field at various temperatures in InSb

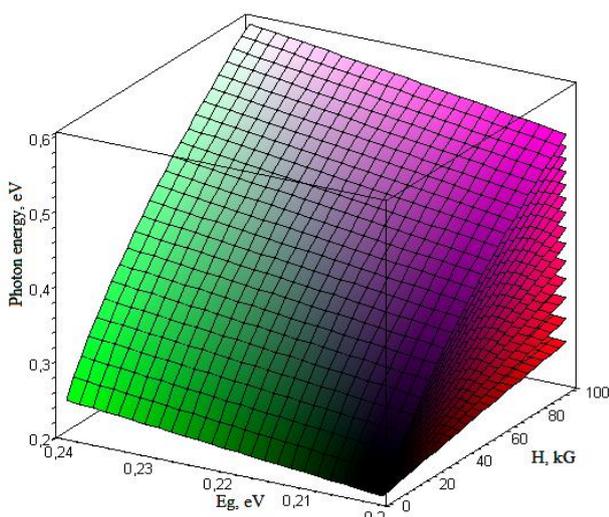


Рис. 9 – Трехмерная веерная диаграмма осцилляции магнитопоглощения в узкозонных полупроводниках с неквадратичным законом дисперсии

Fig. 9 – Three-dimensional fan chart magnetoabsorption oscillations in narrow-gap semiconductors with nonquadratic dispersion

На рис. 9 приведена трехмерная веерная диаграмма узкозонных полупроводников – энергии фотона изменяются в зависимости от магнитного поля и ширины запрещенной зоны. Видно, что во всем диапазоне магнитных полей экспериментальные значения спектра магнитопоглощения находятся в согласии с результатами теоретических расчетов при разных значениях температуры. Теоретическое исследование зонной структуры при этих значениях показало, что с ростом температуры осцилляции магнитопоглощения уменьшаются, и энергии фотона нелинейно зависят от сильного магнитного поля.

5. Заключение

Найденная температурная зависимость осцилляции комбинированной плотности состояний в полупроводниках с непараболическим законом дисперсии дала возможность вычислить магнитооптическое поглощение в квантующем магнитном поле. При неквадратичном законе дисперсии максимальная частота поглощаемого света и ширина запрещенной зоны нелинейно зависят от магнитного поля. Созданная трехмерная веерная диаграмма в полупроводниках с учетом комбинированной плотности позволила проанализировать межзонное магнитооптическое поглощение в узкозонных полупроводниках. Новый метод исследования влияния температуры на уровни Ландау в полупроводнике с непараболическим законом дисперсии дает возможность проанализировать экспериментальные результаты. Приведенный метод применен к исследованию магнитопоглощения в узкозонных полупроводниках с непараболическим законом дисперсии. Экспериментальные результаты интерпретируются при помощи комбинированной плотности состояний в сильном магнитном поле.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта ОТ-Ф2-70 «Влияние температуры, деформации и света на параметры наноразмерных полупроводников в сильных электромагнитных полях».

Acknowledgments

The work was performed in the framework of the grant OT-F2-70 “The effect of temperature, deformation and light on the parameters of nanoscale semiconductors in strong electromagnetic fields.”

Список литературы

- [1] Гулямов, Г. Моделирование зависимости энергии поглощаемого фотона от магнитного поля в полупроводниках / Г. Гулямов, У.И. Эркабоев, П.Ж. Байматов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). – 2016. – № 19–20. – С. 130–138.
- [2] Гулямов, Г. Влияние давления на магнитооптическое поглощение в узкозонных полупроводниках



ках / Г. Гулямов [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 07–09. – С. 112–120.

[3] Поплавко, Ю.М. Основы физики магнитных явлений в кристаллах / Ю.М. Поплавко. – Киев. НТУУ КПИ, 2007. – 230 с.

[4] Платонов, В.В. Исследование магнитопоглощения при различных температурах в гетероструктурах HgTe/CdHgTe с квантовыми ямами в импульсных магнитных полях / В.В. Платонов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49. – Вып. 12. – С. 1660–1664.

[5] Кондаков, О.В. Магнитооптические осцилляции в висмуте при температурах $T \geq 77\text{ K}$ / О.В. Кондаков, К.Г. Иванов // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37. – Вып. 5. – С. 543–545.

[6] Грабов, В.М. Магнитооптические исследования висмута при температуре 80–280K / В.М. Грабов, К.Г. Иванов, А.А. Зайцев // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34. – Вып. 11. – С. 1339–1341.

[7] Капустина, А.Б. Магнитопоглощение гексагональных кристаллов CdSe в сильных и слабых полях: квазикубическое приближение / А.Б. Капустина [и др.] // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42. – Вып. 7. – С. 1207–1217.

[8] Сейсян, Р.П. Диамагнитный экситон-поляритон в межзонной магнитооптике полупроводников / Р.П. Сейсян, Г.М. Савченко, Н.С. Аверкиев // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – Вып. 7 – С. 896–900.

[9] Ваганов, С.А. Температурно-зависимое экситонное поглощение в длиннопериодных структурах множественных квантовых ям InxGa1-xAs/GaAs / С.А. Ваганов, Р.П. Сейсян // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – Вып. 1 – С. 104–110.

[10] Бовкун, Л.С. Магнитоспектроскопия двойных квантовых ям HgTe/CdHgTe / Л.С. Бовкун [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50. – Вып. 11 – С. 1554–1560.

[11] Деревянчук, А.В. Особенности магнитооптического поглощения молекулярного кристалла в экситонной области частот / А.В. Деревянчук [и др.] // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – Вып. 6. – С. 1039–1041.

[12] Марков, С.А. Спектроскопия экситонных поляритонов в напряженных полупроводниковых структурах АПВІ с широкими квантовыми ямами / С.А. Марков, Р.П. Сейсян, В.А. Кособукин // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – Вып. 2 – С. 230–236.

[13] Р.П. Сейсян, В.А. Кособукин, М.С. Марков. Экситоны и поляритоны в полупроводниковых твердых растворах AlGaAs / Р.П. Сейсян, В.А. Кособукин, М.С. Марков // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. – Вып. 11. – С. 1321–1331.

[14] Ансельм, А.И. Введение в теорию полупроводников / А.И. Ансельм. – М.: Наука, 1978.

[15] Цидильковский, И.М. Электроны и дырки в полупроводниках / И.М. Цидильковский. – М.: Наука, 1972.

[16] Дубицкий, И.С. Эффект поля в тонких пленках полупроводников с кейновским законом дисперсии носителей заряда / И.С. Дубицкий, А.М. Яфясов // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48. – Вып. 3. – С. 327–333

[17] Павлов, Н.В. Оптические свойства гетероструктур с глубокими квантовыми ямами AlSb/InAs_{0,84}Sb_{0,16}/AlSb / Н.В. Павлов, Г.Г. Зегря // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т.48. – Вып. 9. – С. 1217–1227.

[18] Брандт, Н.Б. Квазичастицы в физике конденсированного состояния / Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский. – М.: Физматлит, 2007. – 632 С.

[19] Зеегер, К. Физика полупроводников / К. Зеегер. – М.: Мир. 1977. – С. 414.

[20] Bardeen, J. Deformation Potentials and Mobility in Non-Polar Crystals / J. Bardeen, W. Shockley // Phys. Rev. – 1950. – Vol. 80. – Iss. 1. – P. 72–80.

[21] Vasileff H.D. Electron Self-Energy and Temperature-Dependent Effective Masses in Semiconductors: n-Type Ge and Si / H.D. Vasileff // Phys. Rev. – 1957. – Vol. 105. – Iss. 2. – P. 441–446.

[22] Adams, E.N. Vasileff's Calculation of Electronic Self-Energy in Semiconductors / E.N. Adams // Phys. Rev. – 1957. – Vol. 107. – Iss. 3. – P. 671–672.

[23] Pässler, R. Semi-empirical descriptions of temperature dependences of band gaps in semiconductors / R. Pässler // Phys. Stat. Sol. (b). – 2003. – Vol. 236. – No. 3. – P. 710–728.

[24] Вайнштейн, И.А. О применимости эмпирического соотношения Варшни для температурной зависимости ширины запрещенной зоны / И.А. Вайнштейн, А.Ф. Зацепин, В.С. Кортов // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41. – Вып. 6. – С. 994–998.

[25] Pässler, R. Parameter sets due to fittings of the temperature dependencies of fundamental bandgaps in semiconductors / R. Pässler // Phys. Stat. Sol. (b) – 1999. – Vol. 216. – P. 975–1007.

[26] Gulyamov, G. The de Haas-van Alphen effect at high temperatures and low magnetic fields in semiconductors / G. Gulyamov, U.I. Erkaboev, N.Yu. Sharibaev // Modern Phys. Lett. B. – 2016. – Vol. 30. – No. 7. – P. 1–7.

[27] Gulyamov, G. Determination of the density of energy states in a quantizing magnetic field for model Kane / G. Gulyamov, U.I. Erkaboev, P.J. Baymatov // Advances in condensed matter physics. – 2016. – Vol. 5. – P. 1–5. Article ID 5434717; <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5434717>.

[28] Gulyamov, G. Effect of temperature on the thermodynamic density of states in a quantizing magnetic field / G. Gulyamov, U.I. Erkaboev, N.Yu. Sharibaev // Semiconductor. – 2014. – Vol. 48. – Iss. 10. – P. 1323–1328.

[29] Pidgeon, C.R. Interband Magneto-Absorption and Faraday Rotation in InSb / C.R. Pidgeon, R.N.



Brown // Phys. Rev. – 1966. – Vol. 146. – Iss. 2. – P. 575–583.

[30] Zwerdling, S. Magneto-band Effects in InAs and InSb in dc and High Pulsed Magnetic Fields / S. Zwerdling [et al.] // Phys. Rev. – 1956. – Vol. 104. – Iss. 6. – P. 1805–1808.

References

[1] Gulyamov G., Erkaboev U.I., Baymatov P.J. Simulation of Energy Dependence of the Photon Absorption on the Magnetic Field in Semiconductors (Modelirovanie zavisimosti energii pogloshchaemogo fotona ot magnitnogo polya v poluprovodnikakh). *International Scientific journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2016;(19–20):130–138 (in Russ.).

[2] Gulyamov G., Erkaboev U.I., Baymatov P.J., Gulyamov A.G. The effect of pressure on the magneto-absorption in narrow-gap semiconductors (Vliyaniye davleniya na magnitoopticheskoye pogloshcheniye v uzkozonnnykh poluprovodnikakh). *International Scientific journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;(7–9):112–120 (in Russ.).

[3] Poplavko Yu.M. Fundamentals of physics of magnetic phenomena in crystals (Osnovy fiziki magnitnykh yavlenii v kristallakh). Kiev: “NTUU KPI”, 2007; 230 p.

[4] Platonov V.V., Kudasov Yu.B., Makarov I.V., Maslov D.A., Surdin O.M., Zholudev M.S., Ikonnikov A.V., Gavrilenko V.I., Mikhailov N.N., Dvoretiskii S.A. Investigation of magnetoabsorption at different temperatures in HgTe/CdHgTe quantum-well heterostructures in pulsed magnetic fields. *Semiconductors*, 2015;49(12):1611–1615.

[5] Kondakov O.V., Ivanov K.G. Magneto-optical oscillations in bismuth at $T \geq 77\text{K}$. *Semiconductors*, 2003;37(5):523–525.

[6] Grabov V.M., Ivanov K.G., Zaitsev A.A. Magneto-optical study of bismuth at 80–280 K. *Semiconductors*, 2000;34(11):1287–1289.

[7] Kapustina A.B., Petrov B.V., Rodina A.V., Seisyan R.P. Magnetic absorption of hexagonal crystals CdSe in strong and weak fields: Quasi-cubic approximation. *Physics of the Solid State*, 2000;42(7):1242–1252.

[8] Seisyan R.P., Savchenko G.M., Averkiev N.S. Diamagnetic exciton polariton in the interband magneto-optics of semiconductors. *Semiconductors*, 2012;46(7):873–877.

[9] Vaganov S.A., Seisyan R.P. Temperature-dependent excitonic absorption in long-period multiple In x Ga1 – x As/GaAs quantum well structures. *Semiconductors*, 2011;45(1):103–109.

[10] Bovkun L.S., Krishtopenko S.S., Ikonnikov A.V., Aleshkin A.Ya., Kadykov A.M., Ruffenach S., Consejo C., Teppe F., Knap W., Orlita M., Piot B., Potemski M., Mikhailov N.N., Dvoretiskii S.A., Gavrilenko V.I. Magneto-spectroscopy of double HgTe/CdHgTe quantum wells. *Semiconductors*, 2016;50(11):1532–1538.

[11] Derevyanchuk A.V., Zenkova K.Yu., Kramar V.M., Nitsovich B.M. Magneto-optical absorption of a molecular crystal in the exciton frequency range. *Physics of the Solid State*, 2005;47(6):1073–1075.

[12] Shaldin Yu.V., Warchulska I., Rabadanov M.Kh., Komar V.K. Magnetic investigations of Cd1–xZnxTe (x = 0.12, 0.21) wide-gap semiconductors. *Semiconductors*, 2004;38(3):288–292.

[13] Seisyan R.P., Kosobukin V.A., Markosov M.S. Excitons and polaritons in AlGaAs semiconductor alloys. *Semiconductors*, 2006;40(11):1287–1296.

[14] Anselm A.I. Introduction to the theory of semiconductors (Vvedeniye v teoriyu poluprovodnikov). Moscow: Nauka Publ., 1978.

[15] Tsidilkovskiy I.M. Electrons and holes in semiconductors (Elektrony i dyrki v poluprovodnikakh). Moscow: Nauka Publ., 1972.

[16] Dubitski I.S., Yafyasov A.M. On the field effect in thin films of semiconductors with Kane’s charge-carrier dispersion relation. *Semiconductors*, 2014;48(3):312–319.

[17] Pavlov N.V., Zegrya G.G. Optical properties of heterostructures with deep AlSb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/AlSb quantum wells. *Semiconductors*, 2014;48(9):1185–1195.

[18] Brandt N.B., Kulbachinsky V.A. Quasiparticles in condensed matter physics (Kvazichastitsy v fizike kondensirovannogo sostoyaniya). Moscow: Fizmatlit Publ., 2007.

[19] Seeger K. Semiconductor physics (Fizika poluprovodnikov). Moscow: World Publ., 1977.

[20] Bardeen J., Shockley W. Deformation Potentials and Mobility in Non-Polar Crystals. *Physical Review*, 1950;80(1):72–80.

[21] Vasileff H.D. Electron Self-Energy and Temperature-Dependent Effective Masses in Semiconductors: n-Type Ge and Si. *Physical Review*, 1957;105(2):441–446.

[22] Adams E.N. Vasileff’s Calculation of Electronic Self-Energy in Semiconductors. *Physical Review*, 1957;107(3):671–672.

[23] Pässler R. Semi-empirical descriptions of temperature dependences of band gaps in semiconductors. *Physica status solidi (b)*, 2003;236(3):710–728.



- [24] Vainshtein I.A., Zatsopin A.F., Kortov V.S. Applicability of the empirical Varshni relation for the temperature dependence of the width of the band gap. *Physics of the Solid State*, 1999;41(6):905–908.
- [25] Pässler R. Parameter sets due to fittings of the temperature dependencies of fundamental bandgaps in semiconductors. *Physica status solidi (b)*, 1999;216:975–1001.
- [26] Gulyamov G., Erkaboev U.I., Sharibaev N.Yu. The de Haas-van Alphen effect at high temperatures and low magnetic fields in semiconductors. *Modern physics letter B*, 2016;30(7):1–7.
- [27] Gulyamov G., Erkaboev U.I., Baymatov P.J. Determination of the density of energy states in a quantizing magnetic field for model Kane. *Advances in condensed matter physics*, 2016;5:1–5; Article ID 5434717. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5434717>.
- [28] Gulyamov G., Erkaboev U.I., Sharibaev N.Yu. Effect of temperature on the thermodynamic density of states in a quantizing magnetic field. *Semiconductors*, 2014;48(10):1323–1328.
- [29] Pidgeon C.R., Brown R.N. Interband Magneto-Absorption and Faraday Rotation in InSb. *Physical Review*, 1966;146(2):575–583.
- [30] Zwerdling S., Keyes R.J., Foner S., Kolm H.H., Lax B. Magneto-band Effects in InAs and InSb in dc and High Pulsed Magnetic Fields. *Physical Review*, 1956;104(6):1805–1808.

Транслитерация по BSI



Уважаемые коллеги!

Приглашаем вас принять участие в V Научно-практической конференции «Теоретические и практические вопросы применения приборов контроля ВХР в энергетике».

Организатором с начала проведения Конференции и до настоящего времени является ООО «ВЗОР» – ведущий российский разработчик и производитель приборов аналитического контроля водных сред в тепловой, атомной энергетике, экологии и других отраслях.

Целью конференции является ознакомление участников с передовыми отечественными и зарубежными технологиями ведения водно-химического режима (ВХР) совершенствования систем химико-технологического мониторинга для различных предприятий, обсуждение проблем, связанных с практикой ведения ВХР на отечественных ТЭС и АЭС.

Направления работы конференции:

- АХК и системы мониторинга ВХР ТЭС и АЭС
- Особенности ВХР и хим. контроля на энергоблоках с ПГУ
- Особенности и химический контроль аммиачно-этанолламинного ВХР вторых контуров энергоблоков АЭС с ВВЭР
- Анализ кислорода и водорода в газовой среде на ТЭС
- Нормирование и методы контроля качества водного теплоносителя на ТЭС: проблемы и пути решения
- Приборный контроль ВХР. Опыт, проблемы, решения.

Конференция проводится с 2011 г. раз в два года и собирает ведущих экспертов энергетической отрасли, специалистов-практиков предприятий тепловой и атомной энергетике, представителей проектных институтов, ученых профильных вузов.

Место проведения: Россия, Нижегородская область
Дата: 18–20 сентября 2019 года

Информационная поддержка, публикация тезисов докладов – рецензируемый научный журнал «Энергосбережение и водоподготовка».

<http://www.vzorconf.ru/index.php/ru/>

