

Циклотронный резонанс дырок в кремнии в квантующих магнитных полях

© Д.Б. Векслер, В.И. Гавриленко, К.Е. Спирин

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

Исследуются спектры циклотронного резонанса дырок в объемном кремнии в квантующих магнитных полях при низких температурах. Полученные результаты хорошо согласуются с данными численного расчета значений эффективных циклотронных масс m^*/m_0 и матричных элементов M для переходов между различными уровнями Ландау дырок в Si при $\mathbf{H} \parallel [001]$, полученными ранее М. Owner-Petersen и M.R. Samuelson.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-02-16808) и Минпромнауки РФ (госконтракт № 40.072.1.1.1173).

Хорошо известно, что нижние уровни Ландау дырок в алмазоподобных полупроводниках Ge и Si неэквидистантны [1,2]. Это является следствием вырождения валентной зоны в точке $\mathbf{k} = 0$. Неэквидистантность уровней Ландау с малыми номерами приводит к тому, что в сильных магнитных полях ($\hbar\omega_c \geq k_B T$) в спектрах циклотронного резонанса (ЦР) вместо двух линий поглощения, соответствующих легким и тяжелым дыркам, возникает множество различных резонансных линий, обусловленных оптическими переходами между различными парами уровней. ЦР дырок в квантующих магнитных полях детально исследован в Ge (см., например, [3]). Как это ни удивительно, аналогичным исследованиям в Si посвящено всего несколько работ [4,5]. Наиболее подробно результаты исследований спектров ЦР дырок в Si в пределе сильных магнитных полей представлены в [5], где дано сопоставление результатов измерений при различных кристаллографических ориентациях магнитного поля с данными теоретических расчетов. Это сопоставление позволило авторам работы [5] существенно уточнить параметры закона дисперсии дырок в Si. Исследования проводились в миллиметровом диапазоне длин волн ($j = 45$ GHz) в интервале температур 1.2–5 K на образцах высокоомного p -Si ($\rho_{300\text{K}} = 3.9 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$).

В настоящей работе проведены аналогичные исследования на более чистом образце n -Si ($\rho_{300\text{K}} \approx 10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$) в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн при $T = 4.2$ K. Сопоставление полученных результатов с данными расчетов [5] позволяет сделать вывод о необходимости дальнейшего уточнения параметров закона дисперсии дырок в кремнии.

1. Методика эксперимента

Спектры ЦР измерялись при постоянной частоте и автоматической развертке магнитного поля при $T = 4.2$ K. Образцы объемного кремния размером $5 \times 5 \times 0.3$ mm размещались в световодной вставке в транспортный гелиевый дьюар СТГ-40 в центре сверхпроводящего соленоида так, что магнитное поле было направлено перпендикулярно плоскости образца $\mathbf{H} \parallel [001]$. В качестве

источников излучения в двух- и четырехмиллиметровых диапазонах длин волн использовались генераторы на основе ламп обратной волны (ЛОВ) Г4-161 и Г4-142 соответственно. Свободные носители в образце создавались модулированной с частотой 1 kHz межзонной подсветкой с помощью арсенид-галлиевого светодиода ($\lambda \approx 0.9 \mu\text{m}$), расположенного рядом с образцом. Прошедшее через образец микроволновое излучение детектировалось кристаллом n -InSb. Использовалась стандартная методика синхронного детектирования сигнала, который затем с помощью аналого-цифрового преобразователя записывался в персональный компьютер.

2. Обсуждение результатов

Полученные в работе спектры ЦР представлены на рис. 1. Наряду с линиями электронов ($m^*/m_0 = 0.19$ и $m^*/m_0 = 0.42$) в спектрах видны многочисленные резонансы, обусловленные переходами между различными неэквидистантными уровнями Ландау дырок. Переходы с циклотронными массами около $0.15m_0$ и $0.5m_0$ соответствуют ЦР классических легких и тяжелых дырок соответственно, т.е. дырок, занимающих уровни Ландау с высокими номерами. В то же время дырочным линиям, лежащим между линиями ЦР электронов, отвечают переходы между нижними неэквидистантно расположенными уровнями Ландау. Хорошо видно, что в сильных (квантующих) магнитных полях (т.е. при больших величинах отношения $\hbar\omega/k_B T$, (рис. 1, а) относительные интенсивности „квантовых“ линий ЦР (соответствующих эффективным массам около $0.3m_0$) заметно выше, чем на рис. 1, б. Разрешение линий „квантового“ ЦР дырок в спектре на рис. 1, а, полученном в настоящей работе, оказалось существенно лучше, чем в работе [5], хотя в последнем случае отношение $\hbar\omega/k_B T$ даже несколько больше. Лучшее разрешение линий ЦР дырок в нашем спектре, по-видимому, связано с большей чистотой образца.

Рассчитанные в работе [5] положения нижних уровней Ландау дырок представлены на рис. 2, а в таблице приведены значения эффективных масс и матричных элементов межуровневых переходов. Переходы № 3–13

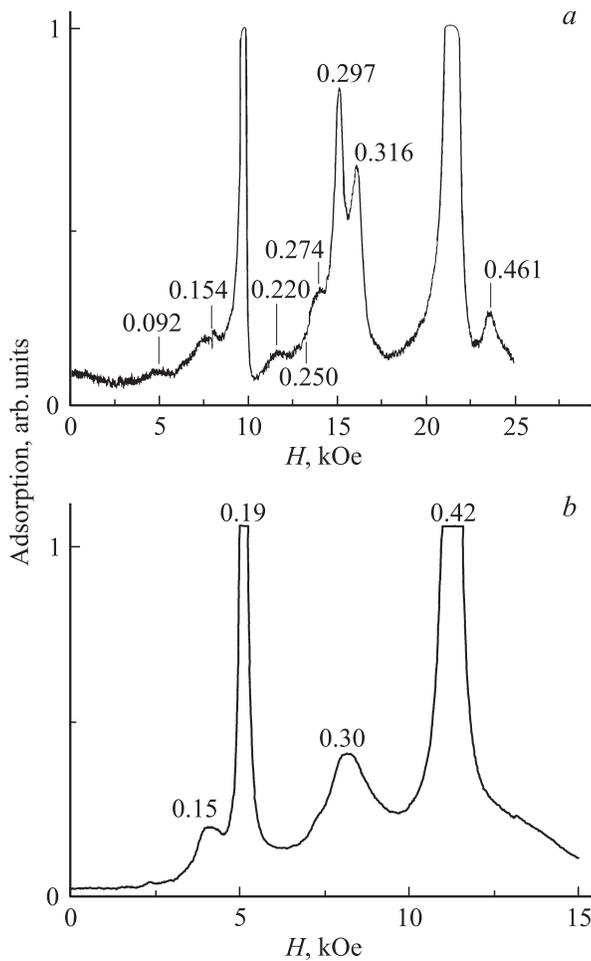


Рис. 1. Спектры ЦР фотоносителей в Si при 4.2 К на частотах 142.8 (а) и 75 GHz (b); числа пиков у кривых — величины циклотронной массы (в единицах m_0).

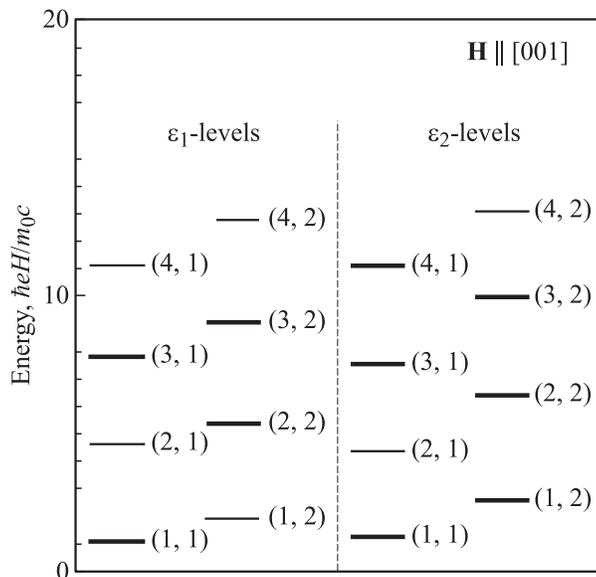


Рис. 2. Диаграмма нижних уровней Ландау дырок в Si, рассчитанная для следующего набора зонных параметров: $\gamma_1 = 4.25$, $\gamma_2 = 0.35$, $\gamma_3 = 1.39$, $\kappa = -0.46$ [5].

Рассчитанные значения эффективных циклотронных масс m^*/m_0 и матричных элементов M для переходов между различными уровнями Ландау дырок в Si при $\mathbf{H} \parallel [001]$ [5]

№	m^*/m_0	M	Переход
1	0.224	0.495	$\epsilon_1(2, 1) \rightarrow (3, 2)$
2	0.232	0.432	$\epsilon_1(1, 1) \rightarrow (2, 2)$
3	0.264	1.061	$\epsilon_2(1, 2) \rightarrow (2, 2)$
4	0.270	1.80	$\epsilon_1(3, 2) \rightarrow (4, 2)$
5	0.273	1.46	$\epsilon_1(2, 2) \rightarrow (3, 2)$
6	0.285	1.07	$\epsilon_1(1, 1) \rightarrow (2, 1)$
7	0.286	1.56	$\epsilon_2(2, 2) \rightarrow (3, 2)$
8	0.287	1.70	$\epsilon_2(3, 1) \rightarrow (4, 1)$
9	0.292	1.04	$\epsilon_1(1, 2) \rightarrow (2, 2)$
10	0.305	1.52	$\epsilon_1(2, 1) \rightarrow (3, 1)$
11	0.314	1.45	$\epsilon_2(2, 1) \rightarrow (3, 1)$
12	0.314	1.85	$\epsilon_1(3, 1) \rightarrow (4, 1)$
13	0.319	1.99	$\epsilon_2(3, 2) \rightarrow (4, 2)$

происходят каждый в пределах своей лестницы уровней Ландау и имеют сравнимые значения матричных элементов. В сильных магнитных полях, т.е. при $\hbar\omega/k_B T \geq 1$, в спектрах ЦР должны доминировать переходы с нижних уровней Ландау дырок. Как видно из таблицы, в ней приведены три из четырех таких переходов (№ 3, 6, 9), последнему из которых соответствует эффективная масса $0.292m_0$. С некоторой „натяжкой“ этот переход может быть связан в спектре на рис. 1, а с наблюдаемой линией ЦР, которой соответствует эффективная масса $0.297m_0$. Другой ярко выраженной линии „квантового“ ЦР дырок на рис. 1, а с массой $0.316m_0$ в таблице может соответствовать группа переходов № 11–13. Все они, однако, происходят не с низших, а с лежащих выше уровней Ландау, вследствие чего их интенсивность должна быть невелика. Между тем отсутствующему в таблице последнему четвертому переходу с одного из нижних уровней Ландау $\epsilon_2(1, 1) \rightarrow (2, 1)$ соответствует эффективная масса $0.32m_0$. Таким образом, естественно предположить, что обнаруженная нами линия ЦР дырок с эффективной массой $0.316m_0$ связана именно с этим переходом. Для окончательного ответа на этот вопрос было бы целесообразно провести измерения ЦР в более сильных магнитных полях (при той же температуре). Как отмечалось в работе [5], именно при ориентации магнитного поля $\mathbf{H} \parallel [001]$ спектральное положение переходов с четырех нижних уровней Ландау оказывается наиболее чувствительным к параметру γ_2 закона дисперсии дырок, который может быть таким образом уточнен.

Список литературы

- [1] J.M. Luttiger, W. Kohn. Phys. Rev. **97**, 4, 869 (1955).
- [2] J.M. Luttiger. Phys. Rev. **102**, 4, 1030 (1956).
- [3] J.C. Hensel, K. Suzuki. Phys. Rev. B **9**, 10, 4184; 4219 (1974).
- [4] J.J. Stickler, H.J. Zeiger, G.H. Heller. Phys. Rev. **127**, 4, 1077 (1962).
- [5] M. Owner-Petersen, M.R. Samuelsen. Phys. Stat. Sol. **28**, 211 (1968).