

- [2] Webb P.F., McIntyre R.J. // IEEE Trans. on Electr. Dev. 1984. ED-21. N 9. P. 1206.
- [3] Кравченко А.Б., Плотников А.Ф., Шубин В.Э. // Квантовая электроника. 1987. Т. 5. В. 11. С. 2482-2484.
- [4] Вуль А.Я., Дидейкин А.Т., Саченко А.В., Шкретий А.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 19. С. 1729-1732.
- [5] Вуль А.Я., Саченко А.В. // ФТП. 1986. Т. 17. В. 8. С. 1361-1376.
- [6] Гасанов А.Г., Гэловиц В.М., Садыгов З.Я., Юсипов Н.Ю. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 8. С. 706-709.
- [7] Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 455 с.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
4 августа 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 21

12 ноября 1990 г.

01

© 1990

## СИСТЕМА УРОВНЕЙ ЛАНДАУ ЛЕГКИХ ДЫРОК В ГЕРМАНИИ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Ю.Л. Иванов, Ю.Б. Васильев,  
В.А. Рейнгольд

В работе [1] при спектральном анализе усиления-поглощения в системе легких дырок германия в условиях приложения сильных скрещенных электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей показано, что инверсия в распределении дырок по уровням Ландау возникает в пределах только одной пары. Благодаря неэквидистантному расположению нижних уровней Ландау легких дырок германия [2] усиление и поглощение оказываются разнесенными по частоте, что обуславливает возможность возникновения генерации. Из данных работы [1] следует также, что пара уровней с инверсной заселенностью имеет наибольшую энергию циклотронных переходов (при данном  $H$ ) среди остальных пар, переходы между которыми вызывают поглощение. Вместе с тем известно, что циклотронная генерация в германии характеризуется двумя областями существования в плоскости  $E$ -,  $H$ -координат. Генерация в этих областях различается частотны-

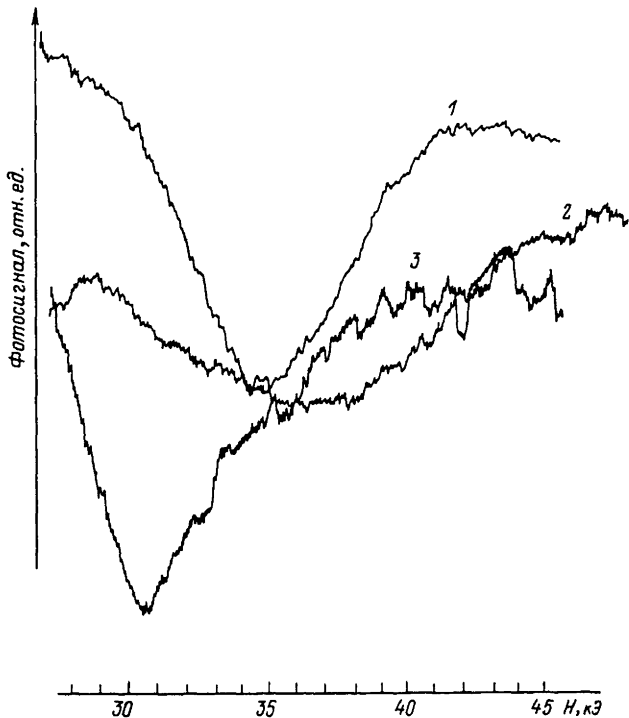


Рис. 1. Полоса поглощения на внутрицентровых переходах мелких акцепторов в германии в магнитном поле. Кривым соответствуют частоты излучения: 1 - 74,4, 2 - 77,4, 3 - 82,7  $\text{см}^{-1}$ .

ми интервалами и положением уровней Ландау. Данные работы [1] относятся лишь к низкочастотной области; представляется интересным провести аналогичные исследования в высокочастотной области.

Эксперимент проводился по методике, описанной в [1]. Излучение регистрировалось приемником из германия с примесью галлия.

При развертке магнитного поля образца без подачи на него электрического поля в магнитных полях, близких по величине к магнитному полю лазера, наблюдаются широкие полосы поглощения. Они связаны с изменением в магнитном поле энергий внутрицентровых переходов мелких примесей, которые расположены в этой области спектра. В качестве иллюстрации приведен рис. 1. Настоящая работа не имела своей целью идентифицировать наблюдаемые полосы с теми или иными примесями. Однако внутрицентровые переходы значительно затрудняют интерпретацию результатов, а в некоторых случаях делают невозможным постановку эксперимента. Например, в отсутствие электрического поля или в слабых электрических полях, когда примеси выморожены, образец не является прозрачным, и мето-

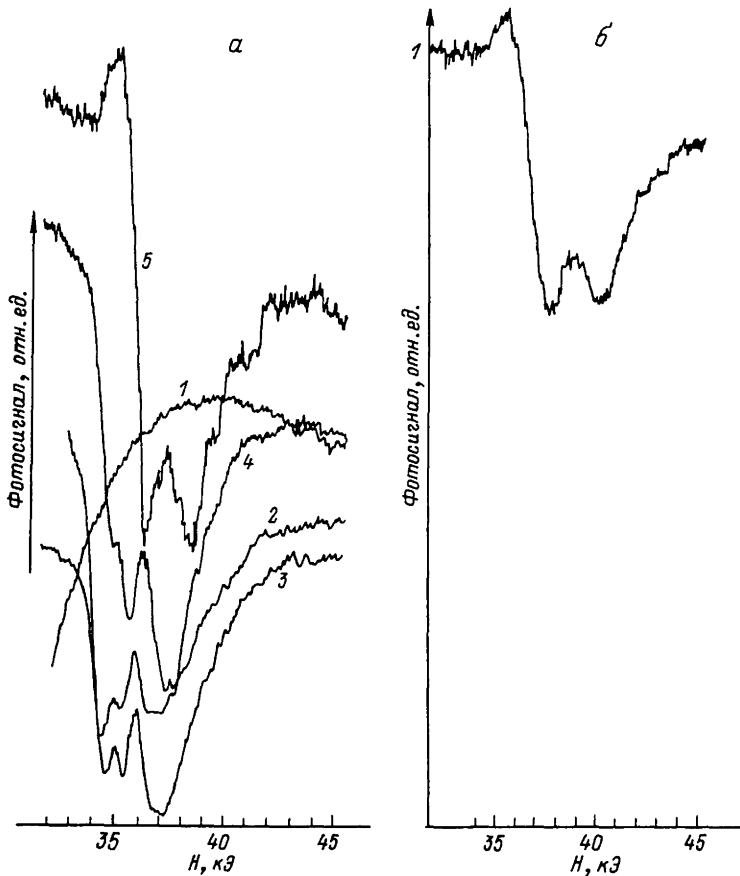


Рис. 2. Пики поглощения на циклотронных переходах легких дырок германия в поперечном магнитном поле. Частота излучения  $72.2 \text{ см}^{-1}$ . а) Кривым соответствуют электрические поля  $E$ , кВ/см: 1 - 0, 2 - 0.7, 3 - 1.2, 4 - 2.4, 5 - 5.0; б)  $\bar{\nu} = 75 \text{ см}^{-1}$ ,  $E = 2.9 \text{ кВ/см}$ .

дику определения величины коэффициента усиления, как описано в [3], использовать нельзя.

При приложении к образцу слабого, ионизирующего мелкие акцепторы поля  $E$  появляется поглощение, связанное с переходами между уровнями Ландау. Поглощение имеет хорошо выявленную структуру: для частот падающего излучения больших  $75 \text{ см}^{-1}$  в слабых полях  $E$  четко различаются четыре пика поглощения, связанные с неэквидистантным положением нижних уровней Ландау легких дырок германия. По мере увеличения электрического поля положение пиков смещается в сторону больших значений магнитного поля, причем два из них, расположенные при наибольших значениях  $H$ , сливаются в один широкий пик. Вместе с тем изменяется их интенсивность, а

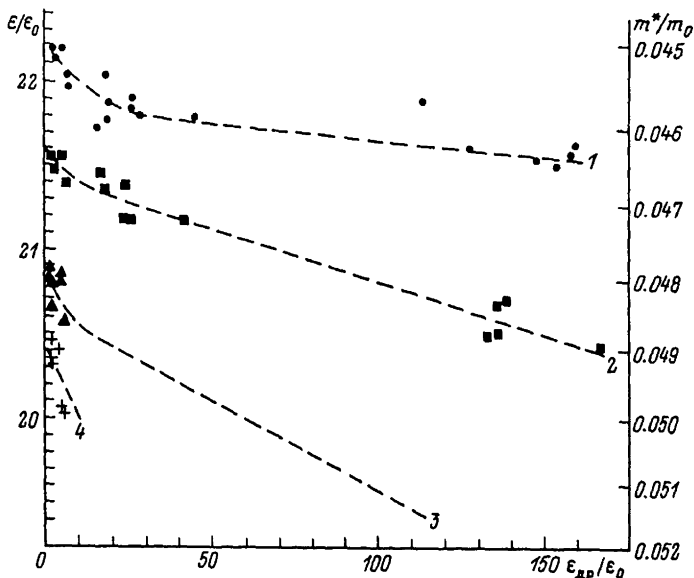


Рис. 3. Сдвиг пиков циклотронного поглощения в поперечном электрическом поле. Пояснения в тексте.

на месте первого пика поглощения, находящегося при меньшем значении магнитного поля, в некотором интервале поля  $E$  возникает усиление. Два примера таких измерений представлены на рис. 2. Зависимость, приведенная на рис. 2, б, позволяет судить об абсолютных величинах усиления и поглощения. По этим данным можно оценить коэффициент усиления. Его величина достигает примерно  $0.24 \text{ см}^{-1}$ , что совпадает со значениями коэффициента усиления, определенного в [3] для более длинноволновой области генерации. При оценке учитывалось, что излучение, падающее на образец, является неполяризованным, а усиливается оно на переходах между уровнями Ландау с эллиптической поляризацией [4].

На рис. 3 представлены зависимости безразмерной энергии циклотронных переходов, соответствующих пикам поглощения  $\epsilon/\epsilon_0$ , от величины безразмерной энергии дрейфа  $\epsilon_{др}/\epsilon_0$ . Здесь  $\epsilon_0 = \hbar \frac{eH}{m_0 c}$  - циклотронная энергия свободного электрона,  $m_0$  - масса свободного электрона,  $\epsilon_{др} = \frac{m_0 (cE)^2}{2 (H)^2}$ . Подставляя константы, имеем:  $\epsilon/\epsilon_0 = \frac{\bar{\nu}}{0.093H}$ , где  $\bar{\nu}$  - частота излучения в  $\text{см}^{-1}$ ,  $H$  - магнитное поле в кЭ,  $\epsilon_{др}/\epsilon_0 = 2.47 \cdot 10^5 \frac{E^2}{H^2}$ ,  $E$  - электрическое поле в образце в кВ/см.

Смещение пиков циклотронного поглощения по оси  $H$  с изменением поля  $E$  связано с различием величины Штарк-эффекта для каж-

дого из нижних уровней Ландау легкой подзоны германия, как это вычислено в работе [5] для слабых полей  $E$ . Для сильных полей  $E$  подобный расчет сделан в [6]. К сожалению, ни в [5], ни в [6] не учитывались непараболичность подзоны легких дырок и анизотропия подзоны. Поэтому детальное сравнение эксперимента с теорией провести затруднительно, это оставляет открытым вопрос о номерах уровней Ландау, в системе которых существует инверсия. Можно констатировать лишь, что, как и в низкочастотной области, инверсия существует в пределах одной пары, и что эта пара имеет наибольшую энергию циклотронных переходов при данном значении  $H$ .

Учитывая, что в слабых полях  $E$  наибольшая величина поглощения оказывается у первого пика, можно полагать, что ему соответствуют циклотронные переходы между первым и вторым уровнями Ландау, в системе которых в сильных  $E$  возникает инверсия. Уширение и слияние третьего и четвертого пиков поглощения при сильных  $E$  можно объяснить выходом соответствующих уровней Ландау в активную область. Как показывает простой подсчет, им соответствуют четвертый и пятый уровни.

В заключение отметим, что в данной работе впервые разрешены несколько пиков поглощения на циклотронном резонансе легких дырок в  $E \perp H$  полях, связанных с неэквидистантным расположением уровней Ландау, что в принципе позволяет измерить эффект Штарка для каждого уровня Ландау отдельно.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Иванов Ю.Л., Васильев Ю.Б., Рейнгольд В.А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 20. С. 1239-1242.
- [2] Hensel J.C., Suzuki K. // Phys. Rev. B. 1974. V. 9. N 10. P. 4219-4257.
- [3] Васильев Ю.Б., Иванов Ю.Л. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 12. В. 4. С. 250-254.
- [4] Иванов Ю.Л., Васильев Ю.Б., Рейнгольд В.А. В кн.: Тез. докл. XI Всес. конф. по физике полупроводников, Кишинев. 1988. Т. 1. С. 130-131.
- [5] Hensel J.C., Peter M. // Phys. Rev. 1959. V. 114. N 2. P. 411-417.
- [6] Мурзин В.Н., Стоклицкий С.А. // Крат. сообщения по физ., ФИАН. 1987. Т. 12. С. 28-30.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
4 сентября 1990 г.