

О СТРОЕНИИ ДВУМЕРНЫХ ПОДЗОН В МДП СТРУКТУРАХ (111) ГЕРМАНИЯ

В.Т.Долгополов, Н.Б.Жигенев

Выполнены измерения осцилляций Шубникова – де Гааза на кривых $\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial V_g}(H)$ в МДП-структуре (111) германия вплоть до концентраций электронов в двумерном слое $N_S = 5,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Показано, что на кривых зависимости положения максимума осцилляций по магнитному полю от концентрации имеется излом при $N_S = (2,8 \pm 0,4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Предполагается, что излом связан с заполнением подзоны S_0' .

Двумерный электронный газ в МДП структурах на поверхности (111) германия в значительной мере аналогичен хорошо исследованному слою двумерных электронов на поверхности (100) кремния. Существуют две серии подзон $S_0, S_1 \dots$, и S_0', S_1', \dots , обусловленные электронами различных долин, имеющими различные массы в направлении, перпендикулярном поверхности образца. По мере увеличения концентрации электронов в слое сначала заполняются несколько подзон, соответствующих долине с тяжелой массой по нормали к поверхности. Затем следует ожидать заполнения подзон с легкой массой в этом направлении. Основное отличие от кремния состоит в том, что уже при сравнительно небольших и практически достижимых концентрациях электронов заполненными оказываются несколько электронных подзон.

Экспериментальные измерения структуры электронных двумерных подзон в германии выполнены на МДП-структурах (111) германия с использованием в качестве диэлектрика либо майларовой фольги¹, либо слоя лака^{2, 3}. В первой работе были обнаружены осцилляции Шубникова – де Гааза от подзоны S_1 , во второй – было показано, что при концентрациях электронов $N_S < 2,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ заполнены три двумерные подзоны. Квантовые осцилляции от электронов двух подзон S_0 и S_1 наблюдали в эксперименте. Вывод о заполнении третьей подзоны был сделан на основании измерения концентрации электронов в подзонах S_0 и S_1 по периоду квантовых осцилляций и сравнением суммы этих концентраций с полной концентрацией электронов в двумерном слое. Оказалось, что при концентрациях $N_S > 10^{12} \text{ см}^{-2}$ сумма концентраций $N_{S_0} + N_{S_1} < N_S$.

Третьей заполненной подзоной могла быть либо подзона S_2 (что вполне соответствовало бы расчету⁷), либо подзона S_0' . Авторы работ^{2, 3} пришли к выводу, что для объяснения всей совокупности полученных ими результатов более удобным является предположение о заполнении подзоны S_0' .

В настоящей работе произведены измерения осцилляций Шубникова – де Гааза на МДП-структуре *n*-германия. Диэлектрик представлял собой сэндвич из слоев SiO_2 , Si_3N_4 и SiO . Измерения выполнены в геометрии Корбино с помощью бесконтактной методики^{4, 5} в радиочастотном диапазоне $\omega/2\pi = 30 \cdot 10^6 \text{ Гц}$. Максимальная концентрация электронов составляла $5,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Следует специально отметить, что у исследованного образца при гелиевых температурах практически отсутствовали гистерезисные явления при изменении напряжения на затворе. Измерения выполнены при температуре 2 К.

Полученные экспериментальные результаты изображены на рис. 1, где показаны зависимости положения максимумов на кривых $(\partial \sigma_{xx} / \partial V_g)(H)$ при различных концентрациях электронов в двумерном слое N_S . Черными точками отмечены результаты работ^{2, 3}, кружки – соответствуют результатам настоящей работы. (Отметим, что при концентрации легирующей примеси, использованной в^{2, 3}, результаты на инверсионных и аккумуляционных слоях полностью совпадали).

Как видно из рисунка, в области малых концентраций положения тех максимумов, которые удалось наблюдать, в пределах погрешности совпадают с полученными ранее. Однако при больших концентрациях электронов $N_S > 3 \cdot 10^{12}$ наклон кривых, отмечающих

изменение магнитного поля, в котором наблюдается максимум, в зависимости от N_S , заметно иной, чем в области малых концентраций. Изменение наклона наблюдается при концентрации электронов $(2,8 \pm 0,4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

По периоду осцилляций в обратном магнитном поле $\Delta(1/H)$ можно определить заселенность соответствующей подзоны.

$$N_{Sn} = g_s g_v \frac{e}{2\pi\hbar} \frac{1}{\Delta_n(1/H)}$$

Для поверхности (111) германия и электронов с тяжелой массой в направлении, перпендикулярном поверхности образца, $g_v = 1, g_s = 2$. Зависимость концентрации электронов в подзоне S_1 от полной концентрации электронов в двумерном слое показана на рис. 2. Точками показаны результаты работ ^{2,3}, крестиками – работы ¹, кружки – результаты настоящей работы. Пунктиром показана экстраполяция результатов ранее известных измерений в область больших концентраций ^{3,6}. На этом рисунке также хорошо заметен излом при концентрации электронов $N_S \approx 2,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

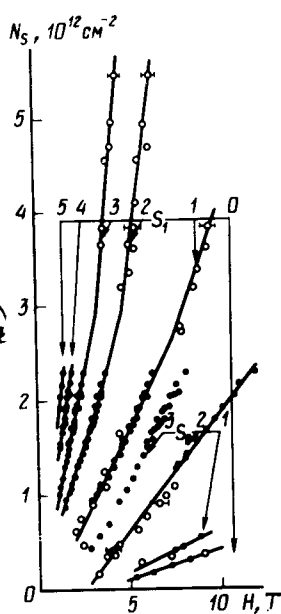


Рис. 1

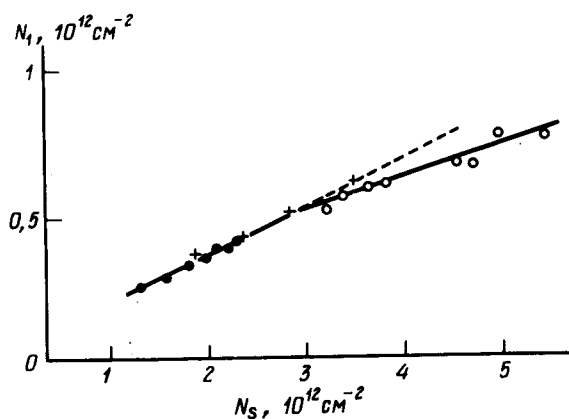


Рис. 2

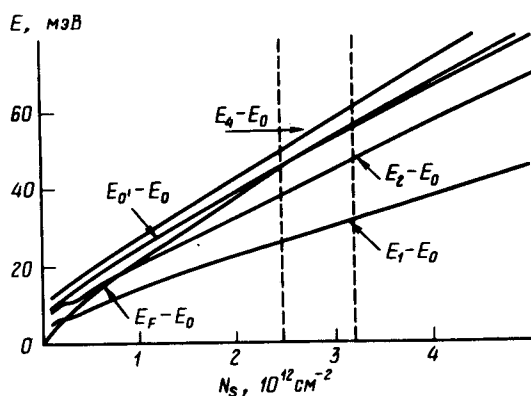


Рис. 3

Нумерация максимумов при больших значениях N_S установлена независимо от результатов предыдущих работ. Поскольку номер максимума l связан со значением магнитного поля H , в котором наблюдается максимум, соотношением:

$$l = \frac{H^{-1}}{\Delta(1/H)} - \gamma,$$

(где $\Delta(1/H)$ период осцилляций, а $\gamma < 1$), то нумерация легко может быть установлена в той области концентраций $(3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} < N_S < 3,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2})$, где на кривых $(\partial\sigma_{xx} / \partial V_g)(H)$ наблюдаются три максимума, относящиеся к одной двумерной подзоне. Коэффициент γ оказался равным 0,33.

На наш взгляд полученные экспериментальные результаты означают, что при концентрации электронов $N_S \approx 1,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ заполняется не подзона S_0' , как предполагалось ранее, а подзона S_2 . Заполнение подзоны S_0' начинается с концентрации $N_S \approx 2,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Подобная картина очень хорошо согласуется с результатами расчета ⁷. На рис. 3 представлены результаты расчета ⁷ зависимостей $E_n - E_0$ от концентрации электронов. Пунктиром обозначена область концентраций, в которой, согласно нашим экспериментам, происходит заполнение подзоны S_0' . Как видно из рисунка, именно в этой области концентраций происходит пересечение кривых $E_0' - E_0$ и $E_F - E_0$. Дополнительным аргументом в пользу того, что обнаруженный излом соответствует заполнению подзоны S_0' , может служить то обстоятельство, что излом этот выражен гораздо более резко, чем ранее наблюдавшийся излом при концентрации $1,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а значит соответствует заполнению подзоны с большей плотностью состояний.

Авторы выражают искреннюю благодарность И.Г.Неизвестному и В.Н.Овсюку, предоставившим пластины германия, на одной из которых был изготовлен использованный в работе образец, и Э.И.Рашба за полезные замечания.

Литература

1. Weber W., Abstreiter G., Koch F. Solid State Comm., 1976, **18**, 1397.
2. Binder J., Germanova K., Huber A., Koch F. Phys. Rev., 1979, **B20**, 2382.
3. Binder J. Dissertation, Technische Univ., München, 1979.
4. Dologoplov V.T., Zrenner A., Mazure C., Koch F. J. Appl. Phys., 1984.
5. Dologoplov V.T., Dorozhkin S.I., Shashkin A.A. Solid State Comm., 1984, **50**, 273.
6. Ando T. Fowler A.B., Stern F. Review of Modern Phys., 1982, **54**, 437.
7. Vinter B. Phys. Rev., 1979, **B20**, 2395.