

УДК.691.315.592

Б. ОРАЗГУЛЬЕВ, О.Д. БИГОЖА, Ш. ДЖУМАНОВ

## ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ПРОДОЛЬНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ КРЕМНИЯ *n*-ТИПА ПРИ РАССЕЯНИИ НА АКУСТИЧЕСКИХ ФОНОНАХ

Приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований продольного магнитосопротивления кремния *n*-типа на кристаллах с концентрацией электронов  $n_e = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $T = 77,4 \text{ К}$ , при котором основным механизмом рассеяния можно считать акустические фононы. Даны наблюдения отрицательного продольного магнитосопротивления кремния и, обоснован его механизм, приложив к образцу одноосную упругую деформацию, которая исключает междолинные переходы электронов.

Как известно, классическая теория предсказывает отсутствие изменения удельного сопротивления кристаллов в продольном магнитном поле, ориентированном вдоль любой из главных осей изоэнергетического эллипсоида, если не учитывать влияния магнитного поля на время релаксации.

Однако при учете последнего имеет место продольное магнитосопротивление и вдоль любой из главных осей изоэнергетического эллипсоида.

Согласно теории [1] в сильных магнитных полях в полупроводниках следует ожидать появления продольного магнитосопротивления, когда рассеяние носителей тока происходит на акустических колебаниях решетки. Этот эффект обусловлен изменением плотности состояний вследствие квантования движения электронов в магнитном поле. Максимальное значение отрицательного магнитосопротивления при этом составляет около 12%.

Наличие предсказываемого теорией [1] отрицательного магнитосопротивления в продольном магнитном поле для полупроводников со сферически симметричной изоэнергетической поверхностью было бы интересно проверить в случае эллипсоидальной и сильно анизотропной изоэнергетической поверхности, в частности, на

кремнии *n*-типа. Такие эксперименты нами были проведены и результаты излагаются ниже.

Экспериментальные результаты по магнитосопротивлению в продольном магнитном поле были получены на кристаллах кремния с концентрацией электронов  $n_e = 2,1 \cdot 10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (при  $T=77,4 \text{ К}$ ), основным механизмом рассеяния в которых можно считать рассеяние на акустических колебаниях решетки.

На рис. 1 и 2 точки – расчетные, а линии – экспериментальные значения магнитосопротивления кремния *n*-типа в продольном магнитном поле для образца с  $n_e = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $T=77,4 \text{ К}$ .

Как видно из рис. 1 магнитосопротивление отрицательно во всем диапазоне магнитных полей до 500 кЭ и лишь в 680 кЭ переходит в положительную область магнитосопротивления.

Здесь отрицательное магнитосопротивление образовано двумя механизмами: междолинными переходами электронов и рассеянием на акустических фононах. Участие первого можно исключить приложением к образцу одноосной упругой деформации.

Для выяснения вклада отдельных механизмов рассеяния к образцу было приложено одноосное сжатие, вследствие чего магнитосопротивление переходило с отрицательного на положительное значение.

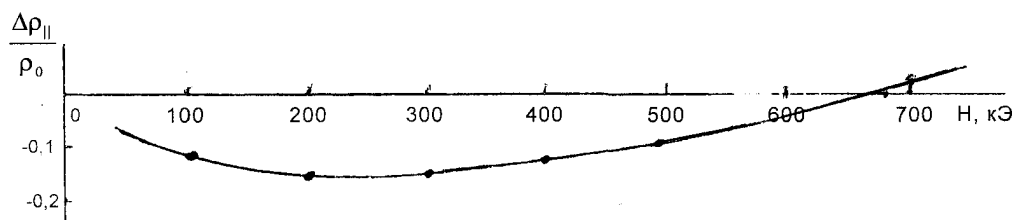


Рис. 1. Расчетное значение магнитосопротивления кремния *n*-типа для образца с  $n_e = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$   $\vec{J} \parallel \vec{H} \parallel [001]$  и  $T=77,4 \text{ К}$

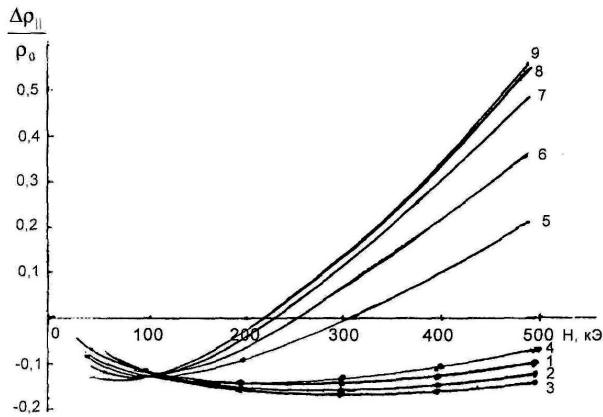


Рис. 2. Зависимость магнитосопротивления от одноосного давления того же образца

$$X \parallel \vec{J} \parallel \vec{H} \parallel [001], T = 77,4 K.$$

$$X \cdot 10^{-3} \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2} : 1-X = 2-0,5;$$

3-1; 4-2; 5-3; 6-4; 7-5; 8-6; 9-7

На рис. 2 представлены зависимости магнитосопротивления от одноосной упругой деформации для кристаллов кремния, на которых с увеличением одноосного сжатия, отрицательное магнитосопротивление постепенно уменьшается по величине приближаясь к нулевому значению, и переходит в положительную область магнитосопротивления в более сильных магнитных полях.

Для объяснения этой картины необходимо принять во внимание влияние квантования движения электронов в магнитном поле.

Как выше было уже сказано, что существуют, по крайней мере, два эффекта, приводящих к отрицательному магнитосопротивлению при квантовании: во-первых, перераспределение электронов между долинами, обусловленное различием энергетического положения уровней Ландау для разных долин; во-вторых, изменение вероятности рассеяния носителей (времени релаксации) в магнитном поле.

Ход полевой зависимости магнитосопротивления в продольном магнитном поле, рассчитанном по формуле[2]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = -\frac{2(z-1)(k-1)}{(z+2)(k+2)},$$

где  $z = n_i/n_j$ .

Из работы [2] следует, что для однодолинной модели зоны проводимости с существенно анизотропным законом дисперсии, при условии слабого квантования ( $\hbar\omega_H \leq k_B T$ ) также, как и в случае сферически симметричной изоэнергетической поверхности, должно наблюдаться отрицательное магнитосопротивление  $\left(\frac{\Delta\rho_{||}}{\rho_0} < 0\right)$ ,

обусловленное особенностями рассеяния электронов в продольном магнитном поле.

Экспериментальные данные записи полевой зависимости магнитосопротивления однодолинного кремния (рис. 1, 2) подтверждают сказанное.

Таким образом, при учете междолинного перераспределения электронов, влияние магнитного поля на рассеяние электронов на акустических колебаниях решетки в изотропной модели удастся описать экспериментальными данными по магнитосопротивлению двухдолинного кремния в исследованной области изменения магнитных полей.

Однако полного количественного согласия расчетов [1] с нашими экспериментальными данными на кремнии ожидать нельзя, поскольку в этой теории не учтены ни тензорный характер эффективной массы носителей тока, ни их рассеяние на поперечных акустических фононах.

Заметим, что в отличие от германия эффект отрицательного магнитосопротивления наблюдается в кремнии и в недеформированных кристаллах (рис. 1, 2), кроме того с приложением к кристаллу упругой деформации оно не исчезает и по величине качественно, частично количественно согласуется с выводом теории [1].

По кривым рис. 2 можно сделать вывод, что отрицательное магнитосопротивление в слабых магнитных полях (до 100 кЭ), обусловлено механизмом рассеяния на акустических колебаниях решетки, ибо оно не зависит от механического напряжения, и в более сильных магнитных полях – междолинными переходами электронов.

В работе [3] экспериментально и теоретически исследовано (при 77 К) изменение сопротивления германия n-типа упруго деформированного в направлении [111] в продольном магнитном поле, при слабом и сильном квантовании и наблюдается отрицательное магнитосопротивление.

Показано, что предсказанное теоретически и наблюдаемое на опыте в «одноэллипсоидном» германии n-типа отрицательное магнитосопротивление в продольном магнитном поле обусловлено разрывным характером времени релаксации при квантовании.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубинская Л.С. Отрицательное продольное магнитосопротивление при рассеянии на акустических фононах // ФТТ. 1965. Т. 7, вып. 9. С. 2821-2828.
2. Оразгульев Б. Влияние квантования движения электронов в магнитном поле на энергетический спектр // Сборник статей АктГУ. 2002. С. 284-387.
3. Баранский П.И., Королюк С.А., Колмеец В.В., Понкова В.В., Самойлович А.Г., Ягольник В.Л. Продольное магнитосопротивление в одноосно деформированном n-Ge квантующем магнитном поле // ФТТ. 1978. Т. 12, вып. 4. С. 786-798.

#### Резюме

n-типті кремнийдің қума магниттік кедергісі электрондарының концентрациясы мен температурасы  $n_e = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  және  $T = 77,4 \text{ К}$  кристаллдар үшін тежірибелік және теориялық зерттеулер қорытындылары келтірілген, ондағы негізгі шашырау механизмі, акустикалық фонондардан есептеуге болады. Кремнийдің теріс магниттік кедергісі мен оның механизмі үлгіге электрондардың алқаптар арасындағы өтулерін жоятын біростік серпінді деформациямен іспе асырылады.

#### Summary

The article carries the results of experimental and theoretical studies and tests to investigate the longitudinal magnetoresistance of n-type silicon on the crystals with the concentration of electrons being  $n_e = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  and  $T = 77,4 \text{ K}$ , where acoustical phonons are considered to be the main dissipation mechanism. In the course of tests the negative longitudinal magnetoresistance of silicon was witnessed and its mechanism established as uniaxial elastic deformation is applied to a sample thus excluding any intervalley transition of electrons.

АктГУ

Поступила 10.07.07г.