

## ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ПРОДОЛЬНОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ КРЕМНИЯ НА МЕЖДОЛИННЫХ ПЕРЕХОДАХ ЭЛЕКТРОНОВ

Изоэнергетическая поверхность дна зоны проводимости кремния представляет собой шесть эллипсоидов, расположенных на главных осях куба, что обуславливает анизотропию эффективной массы и времени релаксации. Последняя и определяет особенности гальваномагнитных эффектов. Особенно магнитосопротивление является наиболее чувствительным к анизотропии изоэнергетической поверхности. Влияние последнего на магнитосопротивление наиболее отчетливо выявляется в области сильных магнитных полей, где магнитосопротивление насыщается.

Величина насыщения магнитосопротивления кремния n-типа в классически сильном продольном магнитном поле, в случае  $J||H||[110]$  определяется по формуле [1]:

$$\left. \frac{\rho_H}{\rho_0} \right]_{нас}^{II} = \frac{(2k+1)(k+1)}{k(k+5)}. \quad (1)$$

Произведем численные оценки, принимая  $k = 4,72$  (из опытов циклотронного резонанса).

Тогда:  $\left. \frac{\rho_H}{\rho_0} \right]_{нас}^{II} = 1,315$ , что хорошо согласуется

с экспериментальными значениями, полученными на образцах кремния с концентрацией электронов  $n_e = 3,1 - 10^{13} \text{ см}^{-3}$  в интервале температур

$$150-300 \text{ К} \left. \frac{\rho_H}{\rho_0} \right]_{нас}^{II} = 1,31.$$

Совпадение результатов расчета и эксперимента свидетельствует о том, что в данном интервале температур  $k_\tau = 1$  (это значит, доминирует междолинный механизм рассеяния).

Однако с понижением температуры расхождение экспериментальных значений с расчетными увеличивается, так например, для  $T=77,4$  К оно достигает (на рис. 1, кривая 1)

$$\frac{\rho_H}{\rho_0} \Big|_{нас} = 1,4,$$

что связано с вкладом анизотропии механизма рассеяния (в данном случае акустические фононы, для которых  $k_\tau = \frac{\langle \tau_{||} \rangle}{\langle \tau_{\perp} \rangle} = 0,76$ ).

Из экспериментальных результатов следует, что выше температуры 100К доминирующим является междолинный механизм рассеяния.

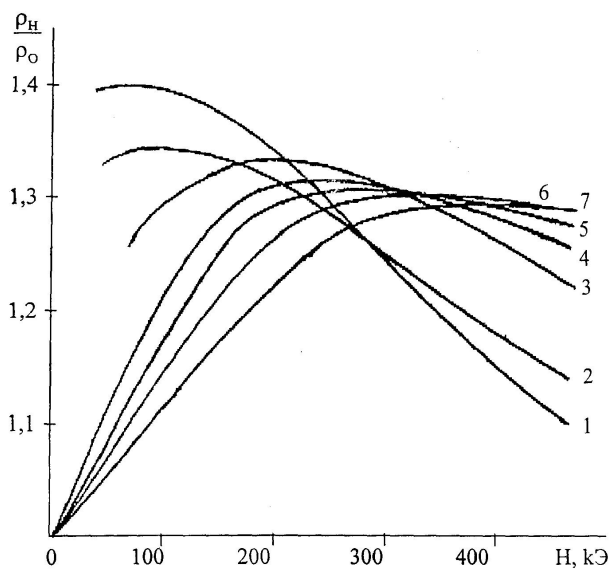


Рис. 1. Температурная зависимость продольного магнитосопротивления кремния n-типа при T°K: 1 - 77, 2 - 102, 3 - 150, 4 - 204, 5 - 240, 6 - 270, 7 - 300

Как видно из рис., в сильных магнитных полях (в квантующих), кроме насыщения магнитосопротивления, наблюдается и проявление квантовых эффектов. С последним, в свою очередь, связан ряд особенностей, в частности, перераспределение электронов между долинами (рис. 2), имеющими эффективные массы электронов  $0,19m_0$  и  $0,422 m_0$ , соответственно.

Это явление впервые экспериментально было обнаружено в работе [2] на германии n-типа при

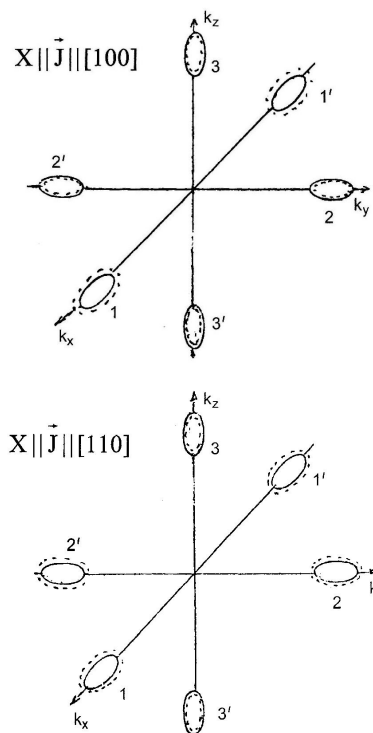


Рис. 2. Перераспределение электронов между долинами

изучении продольного магнитосопротивления (при 20,4 К), а его теоретическая трактовка была дана в работе [3].

Данное явление нами было обнаружено на монокристаллах кремния n-типа при изучении как продольного, так и поперечного магнитосопротивления в случае  $J||H||[001]$ ; ( $J||[100]$ ,  $H||[001]$ ) [4].

Явление, обусловленное перераспределением электронов между долинами, было обнаружено и в случае  $J||H||[110]$ , результаты которой представлены на рис. 1.

Из рис.1 видно, что магнитосопротивление после насыщения имеет участок спада. Этот спад связан с многодолинной моделью изоэнергетической поверхности зоны проводимости и его легко можно понять из следующего.

В квантовом пределе, благодаря неэквивалентности разных долин относительно магнитного поля, дно этих долин в магнитном поле приподнимается по разному из-за разных эффективных масс в этих долинах и начинается переселение электронов из верхней долины в нижние (рис. 2), в результате чего проводимость увеличивается и наблюдается спад кривых магнитосопротивлений. Полное переселение электронов из верхней долины в нижние осуществляется только в

ультраквантовой области ( $44 \gg k_B T$ ), тогда как до ультраквантового предела ( $\hbar \omega_c \gg k_B T$ ) переселяется лишь часть электронов. Поскольку энергия нижней подзоны Ландау определяется соотношением  $\varepsilon = \frac{1}{2} \hbar \omega_c$ , то в результате сравнения

значение энергии долин  $i$ -й и  $j$ -й в квантующих магнитных полях получим, что энергетический зазор между нижайшими подзонами Ландау при  $H=350$  кЭ, с учетом значений эффективных масс, приведенных выше, составляет 7 мэВ.

Эти экспериментальные результаты, полученные в кремнии  $n$ -типа, наглядно демонстрирует достоверность механизма отрицательного магнитосопротивления, обусловленного, действительно, перекачкой носителей тока между долинами зоны проводимости, смещающимися по шкале энергии в квантующем магнитном поле с разной «скоростью».

Отметим, что с помощью одноосной упругой деформации энергетический зазор между долинами можно изменять в более широких пределах, чем это достигается в квантующих полях необходимой напряженности и, тем самым, убедиться в достоверности этой интерпретации наблюдавшегося отрицательного магнитосопротивления кремния  $n$ -типа при ориентации  $J||H||[110]$ .

Результаты таких экспериментов приводятся в другой статье.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gold L., Roth L.M. Galvanomagnetik Theory for Elektron in Germanium and Silicon: Magnetoresistance in the High-Field Saturation Limit // Phys. Rev. 1956. V. 103, N1. P. 61-66.
2. Love W.F., Wei W.F. Longitudinal Magnetoresistance in  $n$ -Type Germanium: Experimental // Phys. rev. 1961. V. 123, N 1. P. 67-73.
3. Miller S.C., Omar M.A. Longitudinal Magnetoresistance in  $n$ -Type Germanium: Theoretikal // Phys. rev. 1961. V. 123, N 1. P. 77-80.
4. Оразгульев Б. Явления переноса в кремнии в сильных магнитных полях: докт. дис. Киев, 1989.

## Резюме

Мақалада  $n$ -типті кремнийдің магниттік кедергісі электрондар концентрациясы  $n_e = 3,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  кристалдарда 77,4-300 К температуралар аралығындағы зерттеулер бойынша алынған тәжірибелік нәтижелер  $\text{см}^{-3}$  келтіріледі. Электрондардың алқаптар араларында қайта таралуына негізделген қума магниттік кедергі байқалды. Тәжірибелік қорытындыларды қолданыстағы теориялармен салыстырғанда, сан және сапа бойынша жақсы сәйкестік бар екені анықталды.  $H = 350$  кЭ болғанда, Ландаудың ең төменгі аймақтары астындағы аралықтағы энергетикалық саңылау 7 мэВ құрайды.

## Summary

The article bears the results of analysis of  $n$ -type silicon magnetoresistance with the concentration of electrons being  $n_e = 3,1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  77,4-300 K temperature range. Negative longitudinal magnetoresistance caused by redistribution of electrons between the valleys was witnessed. Experimental results have a good match with existing theories and both good qualitative and quantitative matches were seen. With  $H = 350$  kE an energetic clearance between the lowest Landau subzones makes 7 meV.