

МАГНЕТОПРИМЕСНЫЙ РЕЗОНАНС В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В.Л.Гуревич

В настоящей заметке рассматриваются полупроводники с несколькими энергетическими минимумами в p -пространстве. Цель заметки — указать на своеобразную резонансную зависимость, которую может испытывать в таких полупроводниках вероятность электронного рассеяния на примесях, сопровождающегося переходом между отдельными минимумами, как функция магнитного поля. Наличие таких резонансов может привести к осцилляциям статической электропроводности (а также и ряда других кинетических коэффициентов) при изменении магнитного поля.

Спектр электронов проводимости, принадлежащих к некоторому минимуму α , в магнитном поле состоит из системы уровней Ландау, положение которых в простейшем случае (рассмотрением которого мы здесь ограничимся) дается формулой:

$$\epsilon_{\alpha}(n_{\alpha}, \sigma_{\alpha}) = \hbar \Omega_{\alpha} \left(n_{\alpha} + \frac{1}{2} \right) + \mu_{\alpha} H \sigma_{\alpha} + \Delta \epsilon_{\alpha}. \quad (1)$$

Здесь $n_{\alpha} = 0, 1, 2, \dots$, $\Omega_{\alpha} = eH/m_{\perp\alpha} c$ — циклотронная частота, e — заряд электрона, $m_{\perp\alpha}$ — соответствующая "поперечная" эффективная масса, H — магнитное поле, μ_{α} — эффективный магнетон, определяющий расщепление спиновых уровней электрона, $\sigma_{\alpha} = \pm 1$, $\Delta \epsilon_{\alpha}$ характеризует положение дна α -го минимума по отношению к некоторому общему для всех минимумов началу отсчета.

Плотность электронных состояний в магнитном поле имеет особенность (острый максимум) при значениях энергии, совпадающих с положениями соответствующих уровней Ландау. При вычислении вероятности междуминимумного перехода для электронов с данной энергией необходимо произвести усреднение по начальным состояниям и просуммировать по конечным. В итоге в выражение для вероятности перехода войдет произведение плотностей начальных и конечных состояний. Это произведение имеет максимум, когда положение двух уровней Ландау, принадлежащих к разным минимумам, совпадает. Это и есть условие магнетопримесного резонанса, которое для переходов между двумя минимумами, α и β , записывается в следующем виде:

$$\hbar \Omega_{\alpha} \left(n_{\alpha} + \frac{1}{2} \right) + \mu_{\alpha} H \sigma_{\alpha} + \Delta \epsilon_{\alpha\beta} = \hbar \Omega_{\beta} \left(n_{\beta} + \frac{1}{2} \right) + \mu_{\beta} H \sigma_{\beta}, \quad (2)$$

где $\Delta \epsilon_{\alpha\beta} = \Delta \epsilon_{\alpha} - \Delta \epsilon_{\beta}$.

Если $\Delta\epsilon_{\alpha\beta} = 0$, как например в случае переходов между минимумами с центрами на осях [111] в n -Ge, то величина магнитного поля из условия (2) выпадает, и резонанс может достигаться только при изменении ориентации магнитного поля относительно кристаллографических осей. Более интересен, однако, случай, когда $\Delta\epsilon_{\alpha\beta} \neq 0$, и когда резонансы могут возникать при изменении величины магнитного поля (при неизменном его направлении). Сюда, например, относится случай "центрального" и "боковых" минимумов в n -GaAs (где $\Delta\epsilon_{\alpha\beta} = 0,36 \text{ эВ}$) и в ряде других полупроводниковых соединений. Сюда также принадлежит случай предварительно деформированных германия и кремния, где под влиянием статической деформации приподнимается дно у одних минимумов и опускается у других, в результате чего разность $\Delta\epsilon_{\alpha\beta}$ может оказаться значительной.

В общем случае осцилляционная картина сложна и не обладает периодичностью по H или $1/H$. Однако возможны исключения. К их числу, например, относится случай предварительно деформированных полупроводников типа n -Ge или n -Si. Если магнитное поле в них направлено так, что $\Omega_{\alpha} = \Omega_{\beta}$, и существенны переходы без переворота спина, то вероятность перехода есть периодическая функция $1/H$ с периодом

$$\Delta(1/H) = e\hbar / (m_1 c / \Delta\epsilon_{\alpha\beta}). \quad (3)$$

Для наблюдения магнетоприmesного резонанса необходимо, чтобы в обоих минимумах, между которыми происходят переходы, существовали уровни Ландау. Соответствующее условие имеет вид:

$$\Omega \tau \gg 1, \quad (4)$$

где τ — время релаксации электронов проводимости.

Осцилляции данного типа могут иметь место как при статистике Ферми, так и при статистике Больцмана. В этом отношении магнетоприmesные резонансные осцилляции существенно отличаются от эффекта Шубникова — де Гааза и напоминают магнетофонный резонанс, рассмотренный ранее Фирсовым и автором [1-3] и Эфросом [4] (см. также [5]) и спинмагнетофонный резонанс, изученный Павловым и Фирсовым [6].

В случае статистики Больцмана при $|\Delta\epsilon_{\alpha\beta}| \gg kT$ вероятность между минимумных переходов пропорциональна $\exp(-|\Delta\epsilon_{\alpha\beta}| / kT)$, т.е. весьма мала. Это связано с тем, что мало число электронов с соответствующей энергией. В таком случае магнетоприmesный резонанс, вероятно, лучше всего наблюдать в опытах с "горячими" электронами, так как "разогрев" электронов с помощью постоянного электрического поля или каким-либо иным путем может резко увеличить число между минимумных переходов (ср. [7]).

Осцилляционная зависимость вероятности между минимумных переходов должна проявиться на опыте в осцилляциях поперечного магнетосопротивления. Последнее пропорционально вероятности рассеяния и потому при выполнении резонансного условия должно проходить через максимум (ср. [1,5]). Нужно, однако, иметь в виду, что между минимум-

ные переходы происходят обычно гораздо реже внутриминимумных, и потому осциллирующий вклад от них не всегда будет заметен на соответствующем фоне.

Вероятность междуминимумных переходов может быть измерена и непосредственно при изучении различных акустических эффектов в полупроводниках [8, 9]. В работе Ганцевича и автора [10] уже обсуждалась возможность использования этих эффектов для изучения магнетофононных резонансных осцилляций вероятности междуминимумных переходов. Там же было приведено и выражение для вероятности междуминимумного примесного рассеяния в случае $\Delta\epsilon_{\alpha\beta} = 0$. Прделанный в [10] количественный анализ может быть почти без изменения перенесен и на случай $\Delta\epsilon_{\alpha\beta} \neq 0$.

Изучение магнетопримесного резонанса может дать интересные сведения об электронном спектре полупроводников, о величине $\Delta\epsilon_{\alpha\beta}$ для различных энергетических минимумов и о вероятностях междуминимумных переходов.

Институт полупроводников
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
9 января 1967 г.

Литература

- [1] В.Л.Гуревич, Ю.А.Фирсов. ЖЭТФ, **40**, 199, 1961.
- [2] Ю.А.Фирсов, В.Л.Гуревич. ЖЭТФ, **41**, 512, 1961.
- [3] В.Л.Гуревич, Ю.А.Фирсов. ЖЭТФ, **47**, 734, 1964.
- [4] А.Л.Эфрос. ФТТ, **3**, 2848, 1961.
- [5] В.Л.Гуревич, Ю.А.Фирсов, А.Л.Эфрос. ФТТ, **4**, 1813, 1962.
- [6] С.Т.Павлов, Ю.А.Фирсов. ФТТ, **7**, 2634, 1965; ЖЭТФ, **49**, 1664, 1965.
- [7] E.M.Conwell, M.O.Vassell. Proc. Intern. Conf. on Phys. Semicond., Kyoto, 1966.
- [8] G.Weinreich, T.M.Sanders, Jr., G.H.White. Phys. Rev., **114**, 33, 1959.
- [9] В.Л.Гуревич, А.Л.Эфрос. ЖЭТФ, **44**, 2131, 1963.
- [10] С.В.Ганцевич, В.Л.Гуревич. ФТТ, **6**, 2871, 1964.