

## К ТЕОРИИ ОБОГАЩЕННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ УЗКОЩЕЛЕВОГО ПОЛУПРОВОДНИКА

А.Е.Кучма, В.А.Свердлов

Показано, что непараболичность зоны проводимости приводит к особому характеру заполнения двумерных подзон в обогащенном слое на поверхности вырожденного полупроводника.

Энергетический спектр квазидвумерных электронов как в инверсионном, так и в обогащенном слое определяется зависимостями  $E_i(p_{\parallel})$ , где  $i$  – номер двумерной подзоны,  $p_{\parallel}$  – двумерный квазиимпульс. Для полупроводников, у которых химический потенциал электронов  $\mu < 0$  (все энергии отсчитываем от дна зоны проводимости в объеме), вопрос о заполнении электронами двумерных подзон решается при нулевой температуре просто – заполнены те состояния, для которых

$$E_i(p_{\parallel}) < \mu. \quad (1)$$

Существенно, что заполнение  $i$ -й подзоны при увеличении поверхностного изгиба зон начинается в этом случае с ее дна ( $p_{\parallel} = 0$ ) в момент, когда выполнено условие

$$E_i(p_{\parallel}) = \mu,$$

независимо от эффектов непараболичности зоны проводимости. Такая картина для полупроводников с  $\mu < 0$  хорошо согласуется с данными многочисленных экспериментов<sup>1</sup>.

Совершенно иная ситуация имеет место в обогащенном слое на поверхности полупроводника с  $\mu > 0$ . В этом случае выполнение условия (1) также является необходимым для того, чтобы состояние с энергией  $E_i(p_{\parallel})$  было занято, однако при этом остается открытым вопрос, является ли указанное состояние локализованным в приповерхностной потенциальной яме, или отвечает инфинитному движению в перпендикулярном к границе  $z = 0$  полупроводника направлении. Обычно используемое условие начала заполнения  $i$ -й подзоны в виде<sup>2</sup>

$$E_i(p_{\parallel}) = 0 \quad (2)$$

приводит к скачкообразному изменению концентрации связанных носителей при начале заполнения очередной подзоны.

В действительности заполнение очередной подзоны в случае вырожденного узкощелевого полупроводника начинается при поверхностном изгибе зон существенно меньшем, чем это следует из (2), а концентрация носителей в подзоне возрастает непрерывно.

Чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть случай слабого поверхностного изгиба зон, когда потенциальная энергия электрона  $V(z)$  удовлетворяет условию

$$|V(z)| \ll E_g (1 + E_{\parallel}/E_g). \quad (3)$$

Здесь  $E_g$  – ширина запрещенной зоны, а  $E_{\parallel}$  для принятой модели Кейна определяется равенством

$$E_{\parallel} (1 + E_{\parallel}/E_g) = p_{\parallel}^2 / (2m),$$

где  $m$  – эффективная масса на дне зоны проводимости. При выполнении (3) нетрудно показать, что для фиксированного  $p_{\parallel}$  существование  $i$ -го связанного состояния в потенциале  $V(z)$  определяется в квазиклассическом приближении условием

$$\int_0^{\infty} |V(z)|^{1/2} dz > \pi \hbar [2m (1 + E_{\parallel}/E_g)]^{-1/2} (i + 3/4). \quad (4)$$

В случае параболической зоны ( $E_g \rightarrow \infty$ ) условие (4) не зависит от  $p_{\parallel}$  и эквивалентно (2).

При учете конечности  $E_g$  это условие выполняется тем легче, чем больше  $p_{\parallel}$ . Отсюда следует, что заполнение  $i$ -й подзоны начинается с состояний с максимально большим  $p_{\parallel}$ , при котором еще  $E_{\parallel} < \mu$ , т. е. с  $p_{\parallel} = p_F$ , где  $p_F$  — импульс Ферми в объеме. При дальнейшем увеличении поверхностного изгиба зон заполнение идет как за счет состояний с  $p_{\parallel} > p_F$ , так и состояний с  $p_{\parallel} < p_F$ , которые становятся связанными в приповерхностном слое. Концентрация носителей в подзоне возрастает при этом непрерывно от начального нулевого значения, хотя измеряемый по периоду магнитоосцилляций <sup>2</sup> фермиевский импульс для этой подзоны есть  $p_i > p_F$ .

Указанные особенности процесса заполнения двумерных подзон имеют место и при сильном поверхностном изгибе зон, а также вне зависимости от применимости квазиклассического приближения. Учет этих особенностей необходим для правильной интерпретации экспериментальных данных, полученных при изучении свойств квазидвумерных электронов на поверхности узкощелевых полупроводников. Прежде всего это относится к результатам, касающимся характеристик обогащенного слоя в области значений поверхностного изгиба зон вблизи старта очередной двумерной подзоны.

#### Литература

1. Ando T., Fowler A.B., Stern F. Rev. Mod. Phys., 1982, 54, 563.
2. Раданцев В.Ф., Дерябина Т.И., Зверев Л.П. и др. ЖЭТФ, 1986, 91, 1016.

Ленинградский государственный университет  
им. А.А.Жданова

Поступила в редакцию  
25 января 1988 г.