

## ДВУМЕРНЫЙ ГАЗ ДЫРОК В ОДНОМЕРНОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

З.Д.Квон, Б.Б.Кольцов, И.Г.Неизвестный, В.Н.Овсяк

Обнаружена минищель в энергетическом спектре двумерных дырок в инверсионных каналах на высокоиндексных поверхностях кремния. Таким образом, впервые получено прямое экспериментальное свидетельство существования на таких поверхностях одномерной сверхрешетки.

В 1977 г. в работе [1] были обнаружены аномалии в переносе электронов в инверсионных каналах на высокоиндексных поверхностях кремния, обусловленные проявлением минищели (МЩ) в спектре двумерных (2D) электронов. В ней было предположено, что это явление вызвано существованием на таких поверхностях одномерной сверхрешетки (СР) неизвестной природы. Независимо и одновременно в [2] было показано, что на поверхностях полупроводников с высокими индексами Миллера новый трансляционный период должен приводить к появлению СР, период которой зависит от ориентации поверхности ("ориентационная" СР). Однако в [1] содержались два факта, на первый взгляд, серьезно противоречившие предположению об одномерной СР: во-первых, сравнение периода идентичности с экспериментально измеренным дало резкое несогласие, во-вторых, в дырочных каналах при тех же условиях минищель обнаружена не была. По этой причине в [3] была предложена альтернативная модель междолинного расщепления, правильно предсказавшая положения МЩ в  $k_{||}$ -пространстве. В настоящее время все экспериментальные работы ограничиваются исследованием МЩ в электронных каналах (см. обзор [4]), а все результаты (из последних см. [5]) интерпретируются в рамках модели междолинного расщепления, хотя в работе [6] было показано, что противоречия, полученные в [1], являются мнимыми и связаны с неправильным построением 2D зон Бриллюэна для электронов. Таким образом оказалось, что в электронных каналах и модель междолинного расщепления и одномерная СР приводят к одинаковым предсказаниям. Вследствие этого вопрос о существовании на высокоиндексных поверхностях кремния одномерной СР, способной приводить к экспериментально наблюдаемым эффектам, до сих пор оставался открытым и только обнаружение минищели в дырочных каналах могло бы его решить.

В данной работе впервые сообщается об обнаружении МЩ в энергетическом спектре 2D дырок в инверсионных каналах на высокоиндексных поверхностях кремния, возникновение которой обусловлено именно одномерной СР.

Экспериментальные образцы представляли собой р-канальные МОП-транзисторы, изготовленные по обычной технологии на поверхностях кремния, отклоненных от поверхности (111) к поверхности (110) вокруг направления  $[011]$  соответственно на углы  $\theta_0 = 2,2^\circ$ ,  $\theta = 2,5^\circ$  и  $\theta = 3^\circ$ . Толщина полевого диэлектрика 1100 — 1300 Å, подвижность дырок в максимуме при 4,2К 1000 — 1300 см<sup>2</sup>/В·сек. На рис. 1 приведены зависи-

мости проводимости инверсионного канала от приповерхностного избытка дырок  $\Gamma_p$  при 4,2К для угла  $\theta = 2,2^\circ$  и для двух направлений тока — параллельно  $[01\bar{1}]$  ( $G_k^{\parallel}$ ) и перпендикулярно ему ( $G_k^{\perp}$ ). Видно, что проводимость имеет анизотропный характер, причем  $G_k^{\parallel} > G_k^{\perp}$  и разность между ними растет с увеличением  $\Gamma_p$ . Подобная анизотропия может быть в принципе обусловлена одномерными рассеивателями [7] и здесь обсуждаться не будет. Кроме того, на зависимости  $G_k^{\perp}(\Gamma_p)$  достаточно ясно виден небольшой провал вблизи  $\Gamma_p = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ; на зависимости же  $G_k^{\parallel}(\Gamma_p)$  не наблюдается никаких особенностей. На рис. 2 (кривая 2) показана

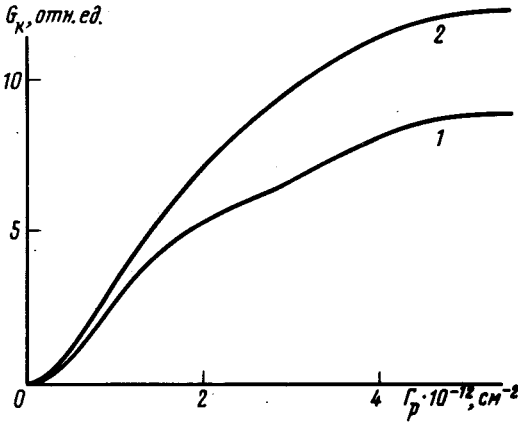


Рис. 1. Зависимость  $G_k(\Gamma_p)$  для двух направлений тока дырок (1 —  $G_k^{\perp}(\Gamma_p)$ , 2 —  $G_k^{\parallel}(\Gamma_p)$ )

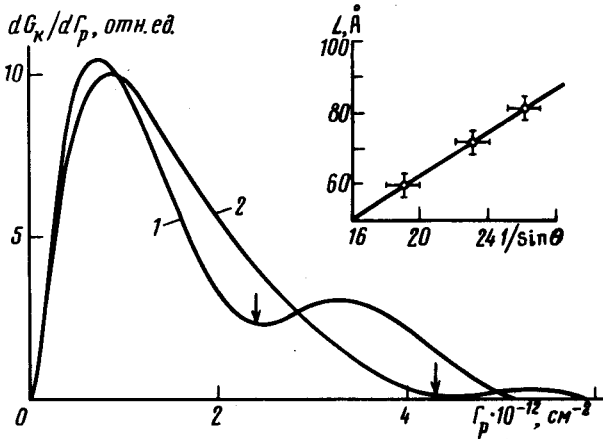


Рис. 2. Зависимость  $dG_k^{\perp}/d\Gamma_p$  от  $\Gamma_p$  для двух углов наклона (1 —  $\theta = 2,2^\circ$ ; 2 —  $\theta = 3^\circ$ ; стрелками указаны положения особенностей). На вставке — зависимость периода СР от  $(\sin\theta)^{-1}$  (точки — эксперимент, прямая — теоретическая зависимость  $L_T = a/\sqrt{3}\sin\theta$ )

зависимость  $dG_k^{\perp}/d\Gamma_p$  от  $\Gamma_p$ , положение аномалии на которой может быть определено значительно точнее. Если связать данную особенность с наличием МШ, появляющейся в результате воздействия одномерной СР [2], то ее положение в  $k_{\parallel}$ -пространстве должно однозначно определяться периодом идентичности  $L_T$  (который, собственно, и является периодом СР) в направлении "скака" поверхности. В нашем случае  $L_T = a/\sqrt{3}\sin\theta$ , где  $a = 5,43\text{Å}$  — постоянная решетки кремния. Известно, что для поверхности (111) условие заполнения только основной подзоны квантования строго выполняется в дырочных каналах при 4,2К до концентраций  $5,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  [8]. С учетом этого для граничных значений  $k_F^{\Delta}$  и  $\Gamma_p^{\Delta}$ , соответствующих началу "аномалий" на зависимостях  $G_k^{\perp}$  или  $dG_k^{\perp}/d\Gamma_p$  от  $\Gamma_p$ , получим  $k_F^{\Delta} = \pi/L = (\pi\sqrt{3}/a)\sin\theta$  и  $\Gamma_p^{\Delta} = (k_F^{\Delta})^2/2\pi = \pi/2L^2$ , где  $L$  — период одномерной СР. Пользуясь этими соотноше-

ниями, можно определить  $L$  по экспериментальному значению  $\Gamma_p^\Delta$  и сравнить его с периодом идентичности  $L_T$ . Для  $\theta = 2,2^\circ$   $L_T = 82\text{Å}$ , действительно, практически совпадает с экспериментальным значением периода СР  $L_g = 80 + 85\text{Å}$ . Однако наиболее ярким проявлением СР является сдвиг аномалии с изменением угла  $\theta$  по закону  $\Gamma_p^\Delta \sim \sin^2\theta$ . Этот сдвиг при переходе к углу  $3^\circ$  иллюстрируется кривой 2 на рис. 2, а на вставке к этому рисунку приведены полученные из эксперимента периоды СР для всех трех исследованных углов. Как видно, измеренные значения хорошо легли на прямую  $L_T = a/\sqrt{3}\sin\theta$ . Такое поведение обнаруженной аномалии в проводимости дырок позволяет уже определенно говорить, что она обусловлена МШ, вызванной воздействием одномерной СР, период которой совпадает с периодом идентичности вичинальной поверхности кремния.

Форма особенности позволяет (правда, с невысокой точностью из-за сильного размытия, вызванного рассеянием дырок) оценить величину  $\Delta$  обнаруженной МШ. Оценка дает  $3\text{ мэВ} < \Delta < 6\text{ мэВ}$ , и, таким образом,  $\Delta$  сравнима с величиной МШ в спектре двумерных электронов при тех же величинах приповерхностных избытков носителей заряда. Отсюда же вытекает, что влияние одномерной СР должно обязательно учитываться и при анализе данных о МШ в спектре  $2D$  электронов.

В заключение следует отметить, что одномерная СР может быть обусловлена не только появлением новой трансляционной симметрии на высокоиндексной поверхности кремния, но и одномерной периодической структурой обнаруженной недавно в [9]. Выяснение относительной роли этих двух факторов требует дальнейших экспериментов.

Институт физики полупроводников  
Академии наук СССР  
Сибирское отделение

Поступила в редакцию  
15 апреля 1981 г.

### Литература

- [1] T. Cole, A. Laknani, P. J. Stiles. Phys. Rev. Lett., **38**, 722, 1977.
- [2] В.А.Петров, Сб. тезисов докладов VI Всесоюзного совещания по физике поверхности полупроводников. Киев, ч. 2, стр. 80, 1977; ФТП, **12**, 380, 1978.
- [3] L. J. Sham, S. J. Allen, A. Kamgar, D. C. Tsui. Phys. Rev. Lett., **40**, 472 1978.
- [4] В.А.Волков, В.А.Петров, В.Б.Сандомирский. УФН, **131**, 423, 1980.
- [5] A. Kamgar, M. Sturge, D. C. Tsui. Phys. Rev., **B22**, 841, 1980.
- [6] В.А.Волков, В.Б.Сандомирский. Письма в ЖЭТФ, **27**, 688, 1978.
- [7] З.Д.Квон, И.Г.Неизвестный, В.Н.Овсюк, Г.А.Ягунова. Письма в ЖЭТФ, **32**, 370. 1980.
- [8] A. Laknani, P. J. Stiles, J. C. Cheng. Phys. Rev. Lett., **32**, 1003, 1974.
- [9] Б.З.Ольшанецкий, А.В.Ржанов. Письма в ЖЭТФ, **32**, 337, 1980.