

**СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ**

53 (048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
АКАДЕМИИ НАУК СССР**

**(29—30 января 1986 г.)**

29 и 30 января 1986 г. в Институте физических проблем им. С. И. Вавилова АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

**29 января**

1. М. И. Каганов, В. Б. Фикс. Трансформация электромагнитной энергии в звуковую электронами металла (теория).

2. А. Н. Васильев, Ю. П. Гайдук. Бесконтактное возбуждение звука в металлах (эксперимент).

3. В. А. Комаров. Электромагнитно-акустическое преобразование — метод разрушающего контроля.

**30 января**

4. А. А. Комар. Метод рентгенолитографии в микроэлектронике: проблемы и перспективы.

5. А. П. Силин. Полупроводниковые сверхрешетки.

6. А. И. Головашкин, А. Н. Лыков. Субмикронные сверхпроводящие структуры.

Краткое содержание пяти докладов приводится ниже.

**А. П. Силин.** Полупроводниковые сверхрешетки. Сверхрешетками принято называть твердотельные структуры, в которых, помимо периодического потенциала кристаллической решетки, имеется дополнительный одномерный потенциал, период которого существенно превышает постоянную решетки.

Сверхрешетки представляют собой новый тип полупроводников, характеризующийся наличием большого числа зон, которые обладают очень сильной анизотропией (они практически двумерны). Впервые такие системы были рассмотрены Л. В. Келдышем в 1962 г. <sup>1</sup>. Свойства полупроводниковых сверхрешеток довольно подробно изложены в обзорах <sup>2-5</sup> и монографиях <sup>6-7</sup>.

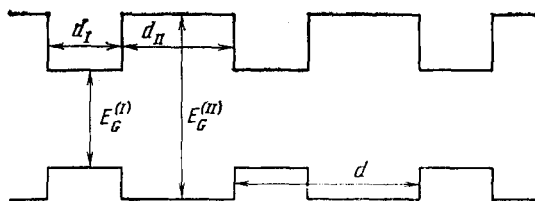


Рис. 1

Бурный рост как теоретического, так и экспериментального интереса к сверхрешеткам связан с последними достижениями технологии, основанной на молекулярно-лучевой эпитаксии в ультравысоком вакууме, металл-органической

эпитаксии из газовой фазы и других методов. Низкая температура эпитаксии и малая скорость роста ( $\sim 1$  Å/с) позволяет получать атомно-гладкие поверхности раздела и выращивать высококачественные сверхрешетки.

Физические свойства полупроводниковых сверхрешеток определяются их электронным спектром. В то время как движение носителей тока перпендикулярно оси сверхрешетки свободно, движение вдоль оси сверхрешетки ( $z$ ) будет иметь минизонный характер.

Композиционные сверхрешетки I типа (рис. 1) представляют собой такое периодическое чередование слоев двух полупроводников с толщиной  $d_I$  и  $d_{II}$  и энергетическими щелями  $E_G^{(I)}$  и  $E_G^{(II)}$ , при котором возникает периодическая система квантовых ям для электронов и дырок (полупроводник I), которые отделены друг от друга квантовыми барьерами.

Энергетический спектр электронов в композиционных сверхрешетках I типа имеет следующий вид:

$$E_{c,j}(\mathbf{p}) = \frac{p_z^2}{2m_c} + E_{c,j}(d_I) + E_{c,j}(p_z, d_{II}), \quad (1)$$

где  $E_{c,j}(d_I)$  — положение дна энергетической минизоны, которая в основном определяется шириной квантовой ямы  $d_I$ , для низших минизон

$$E_{c,j}(d_I) \approx \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_c d_{I,1}^2}. \quad (2)$$

$E_{c,j}(p_z, d_{II})$  — дисперсия энергетических минизон, которая в приближении сильной связи имеет следующий вид:

$$E_{c,j}(p_z, d_{II}) = -\Delta_{c,j}(d_{II}) \cos \frac{p_z d}{\hbar}, \quad (3)$$

где  $|\Delta_{c,j}(d_{II})|$  — ширина  $j$ -й минизоны,  $d$  — период сверхрешетки. При увеличении номера минизоны ее ширина увеличивается, а ширина энергетической минищели убывает. Изменяя ширину квантовой ямы  $d_I$ , можно выбрать нужное положение минизоны  $E_{c,j}(d_I)$ , а выбором ширины барьера  $d_{II}$  — ширину минизоны  $|\Delta_{c,j}(d_{II})|$ .

Если ширина квантовой ямы становится порядка или меньше боровского радиуса экситона в массивном полупроводнике, то из-за пространственного ограничения энергия связи экситонов возрастает. Благодаря увеличению энергии связи экситоны в этих сверхрешетках могут наблюдаться при более высоких температурах, в том числе и при комнатных. Пространственное ограничение сказывается также и на том, что спектр излучения и поглощения композиционных сверхрешеток I типа определяется в основном свободными экситонами, а не примесями<sup>8</sup>, а также на аномально большом эффекте Штарка<sup>9</sup>.

Особый интерес при изучении транспортных свойств представляют модулированно легированные сверхрешетки I типа, у которых легируются только слои более широкозонного полупроводника. При этом ионизованные примесные центры и порожденные ими носители тока, которые переходят в слои более узкозонного полупроводника, пространственно разделены. В результате этого сильное легирование одних слоев приводит к существенному изменению концентрации свободных носителей в других, почти не меняя в них подвижности.

В сильном статическом электрическом поле, параллельном оси сверхрешетки  $E_z$ , движение носителей тока является финитным — они совершают колебания со штарковской частотой  $\Omega = eE_z d / \hbar$ , и ток равен нулю. Такое поведение носителей тока легко объяснить тем, что в периодическом потенциале сверхрешетки энергия их движения вдоль оси сверхрешетки (3), а следовательно, и скорость  $v_z = dE_{c,j}/dp_z$  осциллируют с периодом  $2\pi/\Omega$ <sup>10</sup>.

Малые размеры областей допускаемых движений носителей тока в координатном и импульсном пространстве обуславливают сильную нелинейность проводимости сверхрешеток, в частности, отрицательную дифференциальную проводимость уже в слабых электрических полях.

В композиционных сверхрешетках II типа вершина валентной зоны одного полупроводника (GaSb) находится по энергии выше, чем дно проводимости другого (InAs), поэтому через границы раздела будет происходить перетекание электронов из валентной зоны GaSb в зону проводимости InAs.

Однако, если толщина слоев этой сверхрешетки будет достаточно малой, то размерное квантование носителей тока может привести к переходу из полуметаллического в полупроводниковое состояние<sup>3</sup>.

Значительное улучшение пространственного (в атомном масштабе) контроля за легированием в процессе выращивания пленок методом молекулярно-лучевой эпитаксии позволило вырастить легированные сверхрешетки — периодическое чередование тонких слоев GaAs n- и p-типов. Потенциал сверхрешетки создается только пространственным распределением заряда (рис. 2).

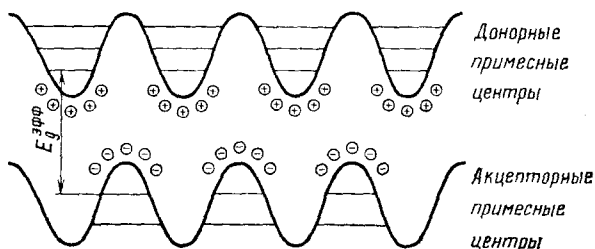


Рис. 2

Важной особенностью легированных сверхрешеток является то, что экстремумы волновых функций электронов сдвинуты на половину периода сверхрешетки относительно экстремумов волновых функций дырок. Поэтому эффективная энергетическая щель  $E_g^{\text{эфф}}$  является непрямой в пространстве координат. Выбором параметров легированной сверхрешетки можно сделать рекомбинационные времена носителей тока исключительно большими, так как перекрытие волновых функций можно сделать очень малым <sup>4</sup>. Большие времена жизни позволяют легко изменять концентрацию носителей тока.

Кроме рассмотренных выше композиционных и легированных сверхрешеток были синтезированы также напряженные сверхрешетки с большим рассогласованием (1—5 %) постоянных решетки, а также аморфные композиционные и легированные сверхрешетки (см., например, <sup>5</sup>).

Сверхрешетки предоставляют уникальную возможность практически произвольным образом изменять их зонную структуру (зонная инженерия). Это позволяет, в частности, сильно изменять их транспортные и оптические свойства и создавать на их основе низкошумящие лавинные фотодиоды, фотомножители, быстродействующие приборы, фотодетекторы <sup>11</sup>. Кроме того, полупроводниковые сверхрешетки уже используются для создания нового поколения светоизлучающих приборов, более простых в изготовлении и более эффективных <sup>12</sup>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Келдыш Л. В. // ФТТ. 1962. Т. 4. С. 2265.
2. Шик А. Я. // ФТП. 1974. Т. 8. С. 1841.
3. Esaki L. // Lect. Not. Phys. 1980. V. 133. P. 302.
4. Ploog K., Dohler G. H. // Adv. Phys. 1983. V. 32. P. 285.
5. Силин А. П. // УФН. 1985. Т. 147. С. 485.
6. Two-dimensional Systems, Heterostructures, and Superlattices. — Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1984. — (Springer Series in Solid-State Physics. V. 53).
7. Многослойные полупроводниковые структуры и сверхрешетки. — Горький, ИПФ АН СССР, 1984.
8. Weisbuch C., Miller R. C., Dingle R., Gossard A. C., Wegmann W. // Sol. State Commun. 1981. V. 37. P. 219.
9. Miller D. A. B., Chemla D. S., Damen T. C., Gossard A. C., Wiegmann W., Wood T. H., Burrus C. A. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 54. P. 2173.
10. Келдыш Л. В. // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 661.
11. Carasso F. // Physica. Ser. B. 1985. V. 129. P. 92.
12. Bimberg D., Christen J., Stecenborn A. // <sup>6</sup>. — P. 136.