Ангармонические блоховские осцилляции электронов в электрически смещённых сверхрешётках

Гиршова Е.И.¹, Иванов К.А.^{1,2}, Калитеевский М.А.^{1,2,3}, Морозов К.М.^{1,2}, Clark S.J.⁴

¹ Санкт-Петербургский Академический Университет, 194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8/3

² Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

³ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 264

⁴ Durham University, Durham, DH1 3LE, United Kingdom

DOI 10.34077/Semicond2019-162

Явление блоховских осцилляций заключается в том, что в штарковской лестнице электронных уровней, образующейся при приложении постоянного электрического поля F к периодической структуре (с периодом d), возможны межуровневые переходы на т. н. блоховской частоте ($\omega = eFd/h$) [1]. Блоховские осцилляции сопровождаются излучением на блоховской частоте [2].

Цель настоящей работы — показать, что блоховские осцилляции не ограничиваются излучением на единственной частоте, но может наблюдаться излучение и на частотах, кратных ω — явление, которое можно назвать ангармоническими блоховскими осцилляциями.

В нашей работе моделировались волновые функции электрона и дырки в электрически смещённой одномерной сверхрешётке [3]. Расчёт проводился методом матриц переноса, использующим непрерывность волновой функции и её производной (точнее — потока) на границе слоёв с различной (постоянной) потенциальной энергией. Полученные семейства волновых функций были использованы для вычисления матричных элементов и вероятностей дипольных оптических переходов между уровнями штарковской лестницы. Были исследованы переходы между соседними уровнями и переходы через один и два уровня (т.е. с частотами ω , 2ω и 3ω). В результате оказалось, что вероятности дипольных переходов ненулевые и для всех типов переходов демонстрируют близкую к линейной скорость роста, уменьшаясь при этом по величине на порядок для каждой следующей кратной частоты. Эти результаты отражены на рис. 1.

Рис.1. — Зависимость вероятности переходов на одинарной, двойной и тройной блоховских частотах (квадраты, круги и треугольники, соответственно) от частоты.

На втором этапе исследования был рассмотрен случай модуляции потенциала сверхрешётки малой величиной с удвоенным периодом. Показано, что это приводит к расщеплению минизоны сверхрешётки на две подминизоны с зазором Δ между ними. Следовательно, и бывшая прежде единая штарковская лестница эквидистантных уровней разделяется на две. Обе они имеют расстояние между уровнями $2\hbar\omega$, а минимальное расстояние между уровнями одной и другой лестницы составляет теперь $\omega\delta$, где δ немонотонно зависит от Δ . Локализация электронов также изменяется, что приводит к появлению серии линий излучения.

В результате проведённого исследования были выявлены разнообразные варианты ангармонических блоховских осцилляций. Представленная модель может быть использована, в частности, для объяснения наблюдавшегося экспериментально терагерцового излучения на кратных блоховских частотах в естественных сверхрешётках — политипах карбида кремния [4].

[1] F. Bloch, Z. Phys. **52**, 555 (1928).

[2] V.I. Sankin et al., Appl. Phys. Lett. **100**, 111109 (2012)

[3] Г.Б. Дубровский, А.А. Лепнева, ФТТ **19**, 5, 1252 (1977).

[4] В.И. Санкин и др., ФТП **49**, 2, 249 (2015).