

УДК 538.915, 538.935

МЕХАНИЗМ РЕЛАКСАЦИИ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ УРОВНЕЙ ЛАНДАУ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ

М. П. Теленков^{1,2}, Ю. А. Митягин^{1,3}, В. В. Агафонов¹, К. К. Нагараджа^{1,2}

Изучена кинетика внутривозонной релаксации энергии электронов в системе уровней Ландау, лежащих ниже энергии оптического фонона. Обнаружен необычный характер релаксации энергии возбуждения электронной подсистемы. Несмотря на то, что ее основным каналом является испускание оптических фононов, полное время релаксации на несколько порядков превышает характерные времена рассеяния на оптических фононах.

Ключевые слова: релаксация энергии, квантовая яма, уровни Ландау, электрон-электронное рассеяние.

В данной работе рассмотрена кинетика релаксации энергии электронов в системе уровней Ландау в квантовой яме, находящихся ниже энергии оптического фонона. В такой системе, вследствие подавления в квантующем магнитном поле процессов одно-электронного межуровневого рассеяния (на примесях, шероховатости гетерограниц и акустических фононах), определяющим механизмом рассеяния между уровнями Ландау является электрон-электронное рассеяние. Поскольку при электрон-электронном рассеянии суммарная энергия электронов, участвующих в акте рассеяния, остается неизменной, этот механизм приводит лишь к перераспределению электронов по уровням Ландау, но не может привести к релаксации энергии системы.

Кроме того, поскольку в акте межуровневого электрон-электронного рассеяния один из электронов всегда переходит на вышележащий уровень, то может возникать конечный поток электронов, направленный вверх по лестнице уровней Ландау. Это может приводить к попаданию электронов на уровни Ландау, расположенные вблизи или выше энергии оптического фонона, и, соответственно, к испусканию ими оптических фононов.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т., 53; e-mail: maxim_telenkov@mail.ru.

² Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", 119049 Россия, Москва, Ленинский пр-т., 4.

³ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31.

Описание картины перераспределения электронов по уровням Ландау и, соответственно, релаксации осложняется невозможностью введения фиксированного времени электрон-электронного рассеяния с уровня Ландау, поскольку оно сильно зависит как от его населенности, так и от населенностей остальных уровней. Это влечет за собой необходимость решения самосогласованной кинетической задачи – распределение электронов по уровням Ландау определяется временами рассеяния, тогда как сами эти времена определяются распределением электронов по уровням [1].

Указанные обстоятельства могут приводить к достаточно необычной картине релаксации электронов. Ниже мы представляем результаты расчетов временной эволюции распределения электронов по уровням Ландау при их селективном возбуждении на один из уровней, лежащий ниже энергии оптического фонона.

Кинетика релаксации в системе уровней Ландау. В работе рассматривается кинетика релаксации электронов в системе уровней Ландау в квантовой яме GaAs/AlGaAs n -типа в квантующем магнитном поле B , перпендикулярном слоям структуры. Первоначально квантовая яма находится в состоянии термодинамического равновесия. В начальный момент времени происходит мгновенное внутривозонное возбуждение части электронов на уровень Ландау, лежащий ниже энергии оптического фонона, и затем отслеживается временная эволюция населенностей уровней путем решения системы уравнений баланса [1, 2] между приходом электронов на уровень и уходом электронов с уровня вследствие двухчастичных актов электрон-электронного рассеяния и испускания продольных оптических фононов

$$\begin{aligned} \frac{dN_i}{dt} = & \sum_{j,g,f} W \begin{pmatrix} f & g \\ i & j \end{pmatrix} N_f N_g \left[1 - \frac{N_i}{\alpha}\right] \left[1 - \frac{N_j}{\alpha}\right] - \\ & - \sum_{j,g,f} W \begin{pmatrix} i & j \\ f & g \end{pmatrix} N_i N_j \left[1 - \frac{N_f}{\alpha}\right] \left[1 - \frac{N_g}{\alpha}\right] + \\ & + \sum_f \left\{ \frac{1}{\tau_{f \rightarrow i}^{(LO)}} N_f \left[1 - \frac{N_i}{\alpha}\right] - \frac{1}{\tau_{i \rightarrow f}^{(LO)}} N_i \left[1 - \frac{N_g}{\alpha}\right] \right\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь N_i – двумерная концентрация электронов на уровне Ландау i (населенность уровня), α – кратность вырождения уровня Ландау, $W \begin{pmatrix} i & j \\ f & g \end{pmatrix}$ – рассчитанная по правилу Ферми скорость электрон-электронного рассеяния для переходов электронов с уровней Ландау i и j на уровни Ландау f и g соответственно [3], $\tau_{i \rightarrow f}^{(LO)}$ – рассчитанное по правилу Ферми время рассеяния электрона с уровня Ландау i на уровень Ландау f с испус-

канием продольного оптического фонона [4]. В соответствии с результатами работы [5] плотность одноэлектронных состояний приближается гауссианом с шириной $\Gamma = 1$ мэВ, типичной для рассматриваемых структур и магнитных полей.

Характер релаксации будем иллюстрировать на примере квантовой ямы GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As шириной 25 нм и с уровнем легирования $N_d = 10^{10}$ см⁻² в магнитном поле $B = 3.5$ Тл. При таком магнитном поле ниже энергии оптического фонона лежат шесть уровней Ландау ($n = 0 - 5$) нижней подзоны. Неравновесную населенность в рассматриваемой системе будем создавать селективным возбуждением электронов из основного состояния ($n = 0$) на один из уровней Ландау, скажем, уровень $n = 4$, т.е. в начальный момент времени заселены только уровни $n = 0$ и $n = 4$.

Временная эволюция населенностей уровней Ландау для такой ситуации приведена на рис. 1. Как видно, процесс релаксации системы состоит из двух стадий. На первой короткой (несколько пикосекунд) стадии (вставка на рис. 1) происходит перераспределение электронов по уровням Ландау вследствие электрон-электронного рассеяния. В результате электронная подсистема термализуется с установлением распределения больцмановского типа с температурой $T_e \sim 50$ К, значительно превышающей температуру решетки (4.2 К). Существенно, что перераспределение электронов по уровням Ландау происходит практически без изменения полной энергии электронной подсистемы и, поскольку рассматриваемая электронная подсистема является квазизамкнутой, то устанавливающаяся температура определяется полной энергией возбуждения и слабо зависит от его характера.

Во время второй стадии происходит медленное снижение концентрации электронов на возбужденных уровнях Ландау. При этом в каждый момент времени распределение электронов по уровням остается больцмановским, но температура электронной подсистемы понижается (рис. 2), т.е. происходит остывание электронной подсистемы. Причем полное время релаксации превышает 200 пс, что на несколько порядков превышает как время термализации, определяемое процессами электрон-электронного рассеяния, так и время испускания оптических фононов, которое в рассматриваемой системе составляет 0.1 пс.

Таким образом, картина релаксации энергии в системе дискретных уровней Ландау качественным образом отличается от релаксации в двумерной непрерывной подзоне квантовой ямы, при которой процессы релаксации и термализации практически неразделимы.

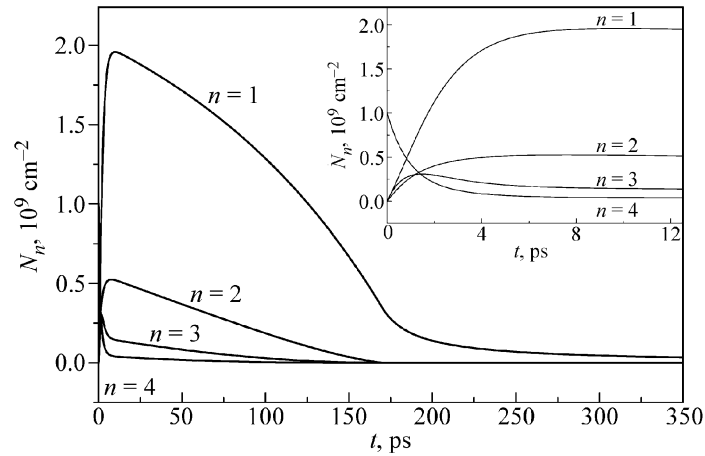


Рис. 1: Рассчитанная кинетика населенностей уровней Ландау первой подзоны в квантовой яме $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ шириной 25 нм и уровнем легирования $N_d = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ в магнитном поле $B = 3.5 \text{ Тл}$.

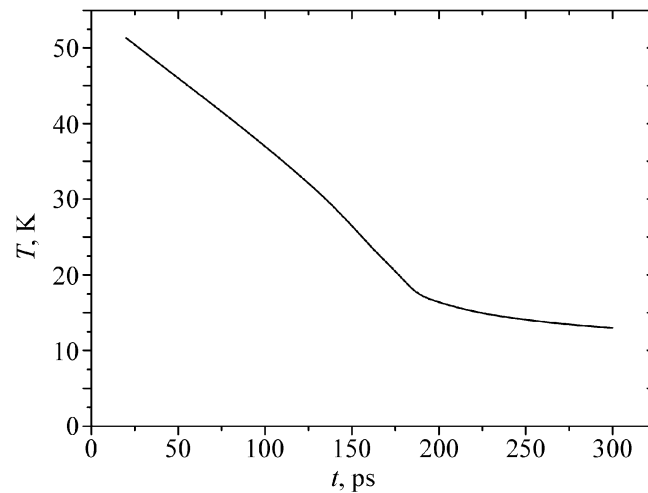


Рис. 2: Временная зависимость температуры электронной подсистемы.

Поскольку в установившемся распределении населенность уровня $n = 5$, лежащего непосредственно под оптическим фооном, мала, но конечна, то вследствие электрон-электронного рассеяния возникает поток электронов с этого уровня на вышележащий, достигнув которого, электроны испускают оптические фононы, тем самым передавая энергию решетке. Таким образом, именно процесс испускания фононов с уровней, лежащих выше оптического фонона, и приводит к релаксации энергии системы.

Заключение. Система уровней Ландау в квантовой яме обнаруживает необычный механизм релаксации энергии возбуждения электронной подсистемы, в котором

принимают участие процессы рассеяния двух типов. Во-первых, процессы электрон-электронного рассеяния, которые приводят как к термализации электронной подсистемы без изменения ее энергии, так и к доставке электронов на уровни Ландау, лежащие вблизи или выше энергии оптического фонона. Во-вторых, процессы испускания оптических фононов с этих уровней, за счет которых энергия электронной подсистемы передается кристаллической решетке. Такой характер релаксации приводит к большим ее временам, на несколько порядков большим, чем характерные времена рассеяния в рассматриваемой системе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-02-09055) и Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» среди ведущих мировых научно-образовательных центров (№ К4-2014-073).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. P. Telenkov, Yu. A. Mityagin, and P. F. Kartsev, *Opt. Quantum. Electron.* **46**(6), 759 (2014).
- [2] I. Savic, Z. Ikonic, V. Milanovic, et al., *Phys. Rev. B* **73**, 075321 (2006).
- [3] М. П. Теленков, Ю. А. Митягин, П. Ф. Карцев, *Письма в ЖЭТФ* **92**(6), 444 (2010).
- [4] C. Becker, A. Vasanello, C. Sirtori, and G. Bastard, *Phys. Rev. B* **69**, 115328 (2004).
- [5] T. Ando, A. B. Fowler, and F. Stern, *Rev. Mod. Phys.* **54**, 437 (1982).

Поступила в редакцию 8 сентября 2015 г.