

## Оптическая резонансная идентификация дальнего туннелирования электронов между уровнями сверхрешетки в электрическом поле

© А.А. Андронов, Е.П. Додин<sup>¶</sup>, Д.И. Зинченко, Ю.Н. Ноздрин

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 16 мая 2012 г. Принята к печати 31 мая 2012 г.)

Предложен способ диагностики взаимодействия электронных состояний в многослойных гетероструктурах в постоянном электрическом поле. В основе методики лежит измерение резонансного отклика амплитуды гармоники тока в гетероструктуре на воздействие модулированного лазерного излучения. В настоящей работе метод продемонстрирован при исследовании туннелирования между уровнями Ванье–Штарка в сверхрешетке с сильно связанными квантовыми ямами.

Недавно нами был предложен [1], рассчитан [2] и запатентован [3] лазер на ванье-штарковских переходах в сверхрешетках с сильно связанными ямами (сверхрешетка со слабыми барьерами). В отличие от квантово-каскадного лазера (ККЛ) [4,5] предложение [1] основано на эффекте дальнего туннелирования электронов в электрическом поле между уровнями ванье–штарковских лестниц квантовых ям, отстоящих друг от друга на несколько (два и более) периодов. Как установлено в [1], делокализация волновых функций в электрическом поле приводит к тому, что вблизи резонансов уровней Ванье–Штарка матричные элементы оптических переходов между далеко отстоящими квантовыми ямами, а, следовательно, и силы осцилляторов, значительно больше, чем в ККЛ. Это обстоятельство вместе с равновесной населенностью уровней Ванье–Штарка в отдельной яме и дает основу для создания предложенного лазера, который является фактически модификацией предложения Казаринова и Суриса [6] на сверхрешетках с сильно связанными ямами (см. обсуждение в работе [2]).

В работе [1] области резонансного туннелирования между уровнями Ванье–Штарка были идентифицированы на основе регулярно повторяющихся по напряжению особенностей („плеч“) на вольт-амперной характеристике (ВАХ) сверхрешеток [1,2]. В нижней части рис. 1 приведена такая ВАХ (средняя кривая) для сверхрешетки CP816 (см. таблицу). Здесь хорошо просматриваются 3 плато („плеча“), грубо отвечающие трем резонансным переходам электронов: между 1- и 2-м основными уровнями Ванье–Штарка, принадлежащими квантовым ямам, отстоящим друг от друга на 4, 3 и 2 периода при напряжениях (на один период) 9, 12.5 и 19 мВ соответственно.

Соответствие положения особенностей на вольт-амперной характеристике резонансным переходам между уровнями подтверждается хорошим совпадением экспериментальных измерений производной по напряжению от ВАХ с расчетами уровней энергии в постоянном электрическом поле. Веер энергетических состояний для

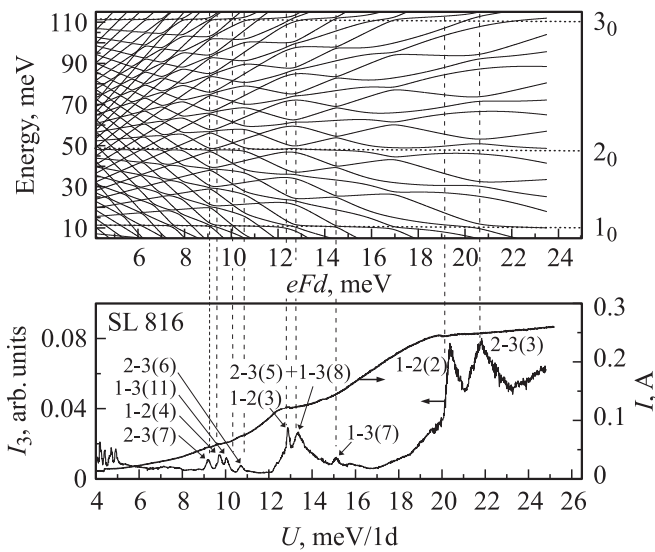
данной структуры приведен на верхней части рис. 1. (Детали квантово-механического расчета волновых функций, энергетических уровней и используемой модели подробно описаны в работе [1]).

В данной работе предлагается более информативный и более точный способ диагностики туннелирования электронов между уровнями Ванье–Штарка в постоянном электрическом поле. В основе новой методики лежит измерение амплитуды *резонансного* отклика тока в сверхрешетке (CP) на воздействие импульсно-модулированного лазерного излучения. Схема эксперимента представлена на рис. 2. Здесь в дополнение к стандартной схеме измерения ВАХ сверхрешетки в импульсном поле ( $t_{\text{imp}} = 5$  мкс) образец облучается импульсным лазером, длительность импульсов света которого составляет 400 фс, частота повторения импульсов 20 МГц. Лазер имеет почти плоский спектр излучения в диапазоне 0.4–1.8 мкм. Засветка образца происходит как через полупрозрачный верхний омический контакт, так и по боковой образующей цилиндрической мезаструктуры, содержащей сверхрешетку. В этом случае полный ток в структуре наряду со средней (постоянной) компонентой содержит и наведенную негармоническую переменную составляющую. Сверхрешетка вместе с внешней цепью имеет широкий спектр собственных частот колебаний тока (см., например, [7]), и одна из собственных частот совпадает с 3-й гармоникой частоты модуляции лазера (60 МГц). Величина тока на этой частоте возрастет при уменьшении дифференциальной проводимости сверхрешетки. Такое уменьшение происходит вблизи

CP	$\varepsilon_0$ , мэВ	$\Delta\varepsilon_1$ , мэВ	$\varepsilon_1$ , мэВ	$\varepsilon_{\text{gap}}$ , мэВ	$\varepsilon_2$ , мэВ	$\Delta\varepsilon_2$ , мэВ	$d = w + b$ , Å	$N_d$
816	7.4	9.8	17.2	16.8	33.9	32.5	160 + 20	1000

*Примечание.*  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$  — дно и потолок первой мини-зоны проводимости соответственно,  $\Delta\varepsilon_1$  — ширина первой мини-зоны проводимости,  $\varepsilon_{\text{gap}}$  — ширина первой запрещенной мини-зоны,  $\varepsilon_2$  и  $\Delta\varepsilon_2$  — дно и ширина второй мини-зоны соответственно,  $w$  — ширина квантовой ямы,  $b$  — ширина барьера,  $d$  — период сверхрешетки,  $N_d$  — число периодов сверхрешетки (CP)

<sup>¶</sup> E-mail: dodin@ipm.sci-nnov.ru

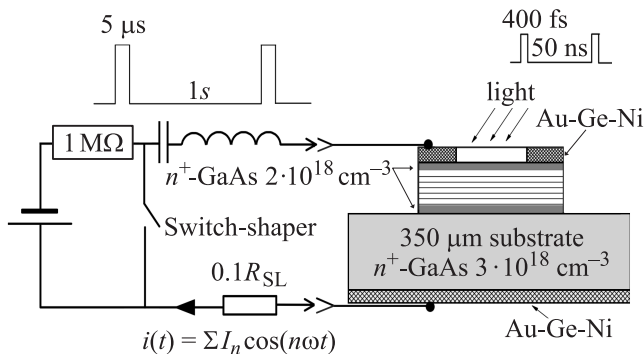


**Рис. 1.** Вверху — рассчитанный веер электронных состояний Ванье–Штарка в постоянном электрическом поле (вертикальные пунктирные прямые объединяют антикроссинги уровней разных порядков). В середине — измеренная ВАХ сверхрешетки CP816. Внизу — амплитуда 3-й гармоники тока через облученную импульсным светом сверхрешетку в постоянном электрическом поле. Обозначения  $i-j(n)$  разъяснены в тексте.

в первой группе резонансов (в окрестности напряжений  $U \approx 10$  мВ/период или, что в данном случае то же самое, при энергии  $\varepsilon = eFd = 10$  мэВ, где  $F$  — напряженность постоянного электрического поля) наблюдаются переходы между уровнями 1, 2 и 3 через 4, 6 и 10 квантовых ям. Аналогично во второй группе резонансов ( $U \approx 13$  мВ/период или соответственно  $\varepsilon = eFd \approx 13$  мэВ) хорошо идентифицируются переходы через 3, 5, 8 ям, и т.д. Для последнего случая на рис. 3 показаны потенциальный рельеф и перечисленные выше туннельные переходы между соответствующими энергетическими уровнями.

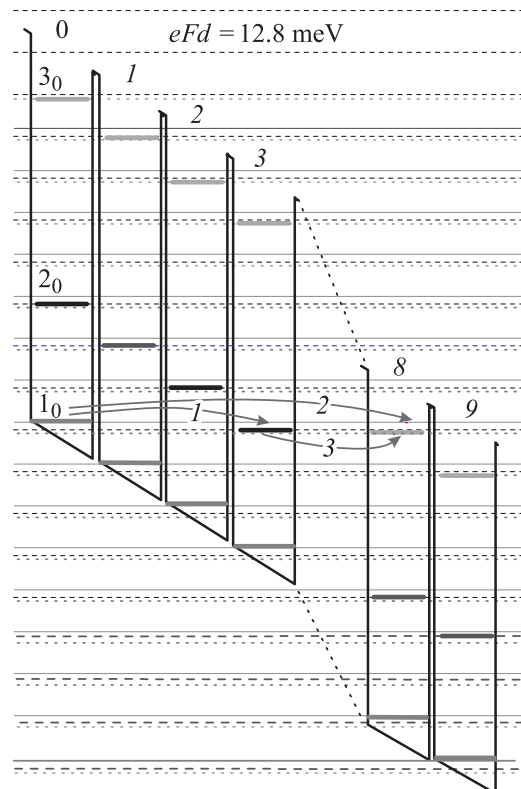
Отметим несовпадение в пределах  $\sim (5-10)\%$  расчетной и измеряемой энергий (рис. 1, верхняя и нижняя оси абсцисс соответственно), что, по-видимому, обусловлено либо некоторой неоднородностью электрического поля в сверхрешетке, либо имеет место частичное падение напряжения на контактах. Этими же причинами может быть обусловлено и небольшое отклонение от расчетных энергий местоположение резонансов при  $U \approx 10$  мВ/период.

Отметим также, что вблизи  $U \approx 15$  мВ/период однозначно наблюдается резонансный переход 1–3(7), который никак не проявляется на измеренной вольт-амперной характеристике. Что касается переходов при малых напряжениях  $U \leq (4-5)$  мВ/период, то они слишком



**Рис. 2.** Схема эксперимента („Switch-shaper“ — формирователь прямоугольных импульсов).

резонансов туннелирования электронов между уровнями Ванье–Штарка, т.е. вблизи „плеч“ на ВАХ. Следует отметить, что вне плеч, когда дифференциальная проводимость сравнительно большая, амплитуды первых нескольких гармоник близки. Вблизи плеч амплитуда 3-й гармоники превышает амплитуды других гармоник в 3–7 раз. В результате при напряжениях, близких к плечам на ВАХ, когда имеет место туннелирование между уровнями Ванье–Штарка различных порядков, наблюдается набор пиков *резонансного увеличения амплитуды тока* 3-й гармоники (нижняя кривая на рис. 1). На рисунке показаны  $i-j(n)$  — резонансы (переходы), где  $i$  и  $j$  — номера уровней в ямах начального и конечного состояний,  $n$  — число периодов (ям), через которые происходит туннелирование электронов. Так,



**Рис. 3.** Диаграмма зоны проводимости сверхрешетки в электрическом поле и резонансные переходы между уровнями квантовых ям, отстоящих на  $n$  периодов друг от друга при  $eFd = 12.8$  мэВ: 1 — 1, 2 (3); 2 — 1–3 (8); 3 — 2, 3 (5).

близко по напряжению расположены друг относительно друга и в данных измерениях не могут быть точно идентифицированы из-за ограниченности разрешения.

Другим вариантом подобных измерений может быть возбуждение системы не световыми импульсами, а синусоидальным переменным напряжением частоты 60 МГц, приложенным в дополнение к постоянному. В этом случае, как показали наши эксперименты, переменное напряжение „разваливает“ некоторые резонансы и имеет место резонансное *уменьшение* амплитуды переменной составляющей тока 3-й гармоники. При этом токовые резонансы существенно слабее (вплоть до исчезновения некоторых), а местоположение их по напряжению в зависимости от амплитуды переменного напряжения на периоде СР на несколько милливольт (0.2–2 мВ) может отличаться от результатов измерений при лазерной подсветке. Причиной такого расхождения является то, что при лазерной подсветке дополнительно возникающее количество свободных носителей подчеркивает увеличение амплитуды гармоники тока в окрестности резонансного напряжения, а при дополнительном переменном синусоидальном напряжении происходит размытие резонансов и уменьшение амплитуды наведенного тока вследствие уменьшения проводимости СР (по напряжению — справа от резонансов). Расхождение результатов (отклонение от напряжений резонансного туннелирования электронов между уровнями Ванье–Штарка) при разных возбуждениях тем больше, чем больше амплитуда переменного напряжения модуляции.

Таким образом, нами предложен способ наблюдения и идентификации уровней Ванье–Штарка в СР с сильно связанными квантовыми ямами путем измерения резонансного отклика амплитуды наведенного тока в сверхрешетке на воздействие модулированного лазерного излучения. Нам представляется, что метод может быть полезен для исследования и других многоямных квантовых гетероструктур в электрическом поле, например в структурах квантовых каскадных лазеров. Кроме того, наблюдение эффектов резонансного туннелирования через 10 периодов сверхрешетки демонстрирует достаточно высокое качество выращенных структур.

Работа поддержана грантами РФФИ 11-02-12165-офи-м-2011 и 12-02-00085-а. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП ИФМ РАН.

Авторы благодарят А.А. Мармалюка и А.А. Падалицу за сотрудничество по выращиванию сверхрешеток.

## Список литературы

- [1] А.А. Андронов, Е.П. Додин, Д.И. Зинченко, Ю.Н. Ноздрин. ФТП, **43** (2), 240 (2009); А.А. Andronov, E.P. Dodin, Yu.N. Nozdrin, D.I. Zinchenko. Phys. Status Solidi C, **5** (1), 190 (2008).
- [2] А.А. Андронов, Е.П. Додин, Д.И. Зинченко, Ю.Н. Ноздрин, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица. КЭ, **40** (5), 400 (2010).
- [3] А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, А.А. Андронов, Е.П. Додин, Д.И. Зинченко, Ю.Н. Ноздрин. Патент на изобретение „Активная зона генератора на полупроводниковой структуре“ № 2415502 (2011).
- [4] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco et al. Science, **264**, 553 (1994).
- [5] R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram et al. Nature, **417**, 156 (2002).
- [6] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис. ФТП, **5**, 797 (1971).
- [7] А.А. Андронов, Е.П. Додин, Д.И. Зинченко, Ю.Н. Ноздрин. ФТП, **43** (2), 248 (2009).

Редактор Т.А. Полянская

## Optical resonant identification of long-range electron tunneling between superlattice energy levels in electric field

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Andronov, E.P. Dodin, D.I. Zinchenko,  
Yu.N. Nozdrin

**Abstract** The method of diagnostics of electron states interaction in multilayer heterostructures in constant electric field is proposed. This method is based on measuring the resonant response of electric current harmonic amplitude in heterostructure to the effect of modulated laser emission. In this work the method is demonstrated in studying of electron tunneling between Wannier–Stark levels in superlattice with strongly coupled quantum wells.