

Высокочастотная нелинейная динамика заряда в полупроводниковых сверхрешетках

Александр Баланов

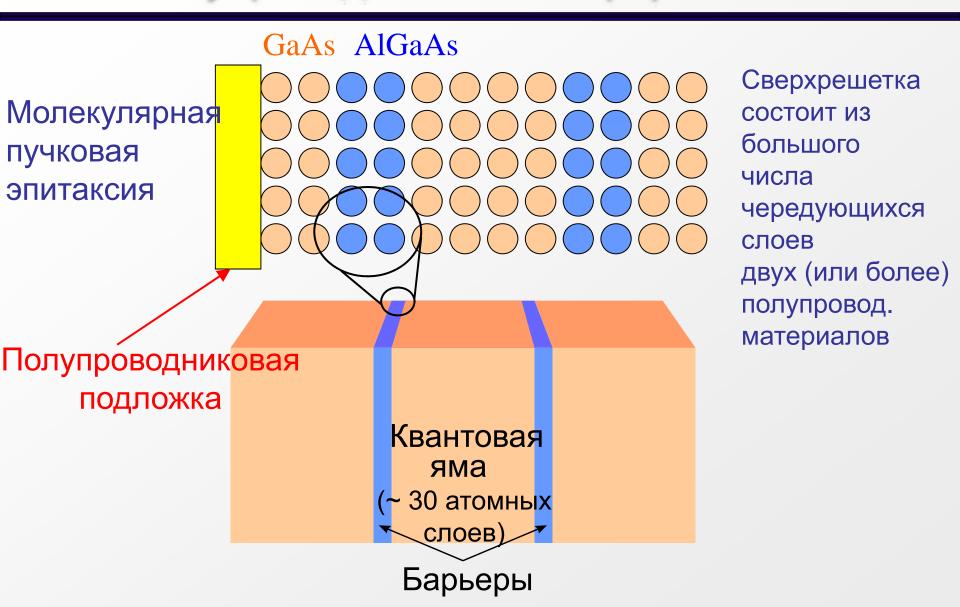


Raphael Tsu (слева) и Leo Esaki (справа) в 1975 г.





Полупроводниковая сверхрешетка





Полупроводниковая сверхрешетка

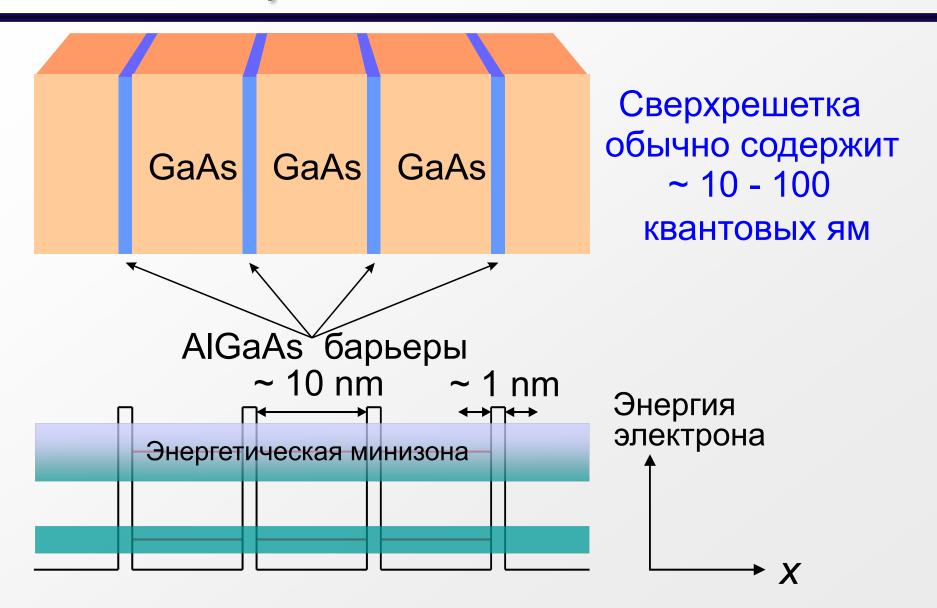


Цепь квантовых ям формирует 1D периодическую структуру подобную кристаллической решетке.

Но так как период такой решетки значительно больше, чем в любом естественном кристалле, стуктуру называют "сверхрешеткой" ("superlattice"- SL)

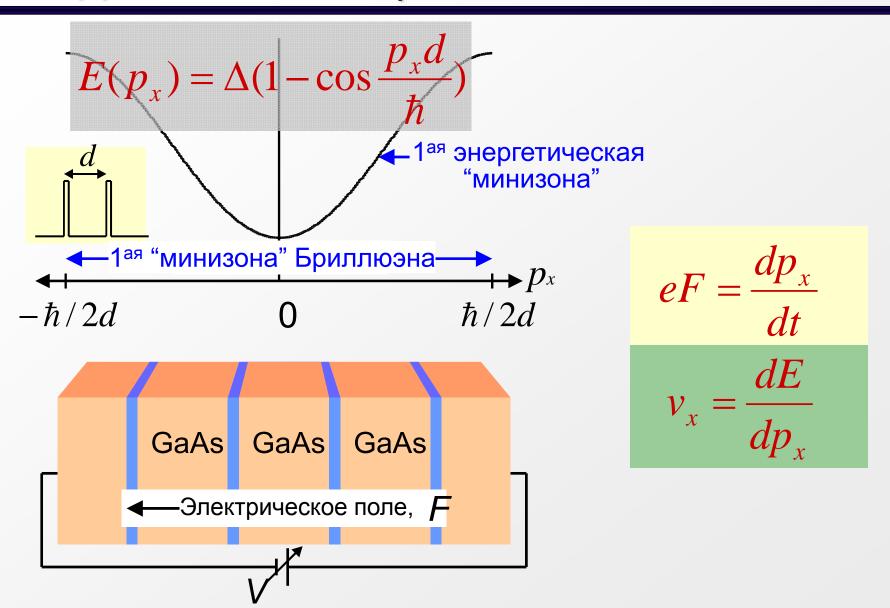


Энергетические минизоны



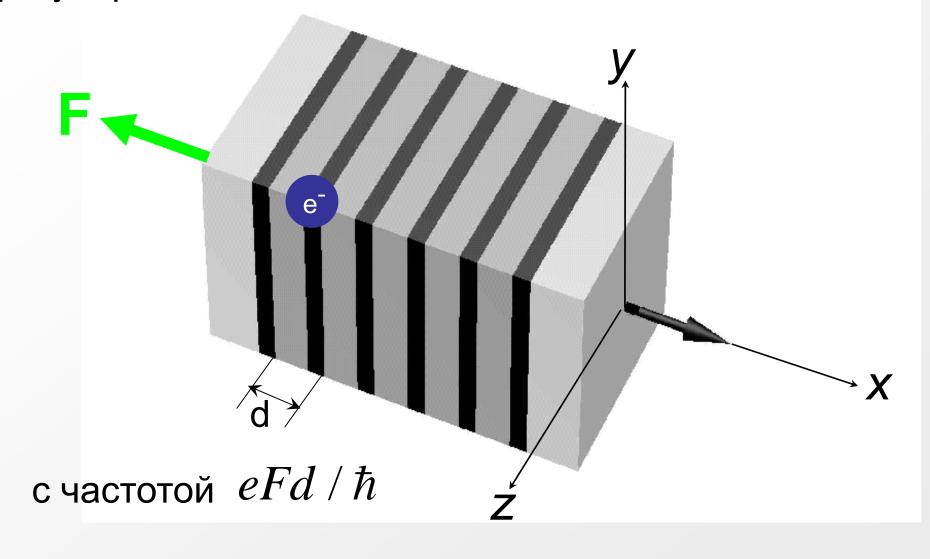


Движение электрона в 1ой минизоне



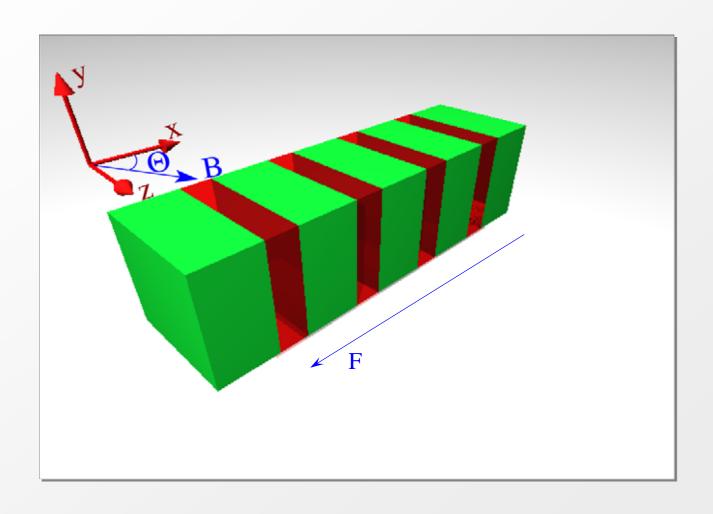


Постоянное электрическое поле генерирует регулярные Блоховские колебания



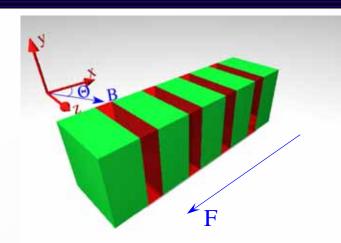


Как управлять динамикой электронов? с помощью магнитного поля





Модельные уравнения I:



Электрическое поле: $\mathbf{F}(-F, 0, 0)$

Магнитное поле: $\mathbf{B}(\mathbf{B}cos\Theta, 0, \mathbf{B}sin\Theta)$

Дисперсионная зависимость:

$$E(\mathbf{p}) = \frac{\Delta}{2} (1 - \cos \frac{p_x d}{\hbar}) + \frac{1}{2m^*} (p_y^2 + p_y^2)$$

импульс электрона: $\mathbf{p}(p_x, p_y, p_x)$

Уравнение движения:

$$\dot{\mathbf{p}} = -e\mathbf{F} - e(\nabla_{\mathbf{p}}E \times \mathbf{B})$$

$$\dot{p}_{x} = eF - \hat{\omega}_{c} p_{y} \tan \Theta$$

$$\dot{p}_{y} = m^{*} \hat{\omega}_{c} \tan \Theta \frac{d\Delta}{2h} \sin(\frac{p_{x}d}{h}) - \hat{\omega}_{c} p_{z}$$

$$\dot{p}_{z} = \hat{\omega}_{c} p_{y}$$

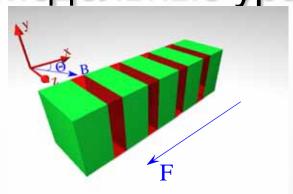
циклотронная частота:

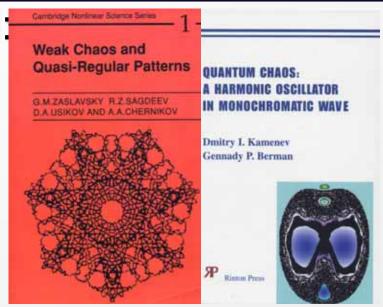
$$\omega_c = eB/m^*$$

$$\hat{\omega}_c = \omega_c \cos \Theta$$



Модельные уравнения II:





частота ьлоха: $\omega_b = eFd/\hbar$ Циклотронная частота: $\hat{\omega}_c = eB\cos\theta/m^*$

$$\ddot{p}_z + \hat{\omega}_c^2 p_z = -\frac{m^* \omega_c^2 \Delta \sin 2\Theta}{4\hbar} \sin(\frac{d \tan \Theta}{\hbar} p_z - \omega_b t)$$

Маятник под воздействием плоской волны

Fromhold et al, PRL 87, 046803(2001) Balanov et al., PRE 77, 026209 (2008)

Модельные уравнения III:

$$\ddot{p}_z + \hat{\omega}_c^2 p_z = -\frac{m^* \omega_c^2 \Delta \sin 2\Theta}{4\hbar} \sin(\frac{d \tan \Theta}{\hbar} p_z - \omega_b t)$$

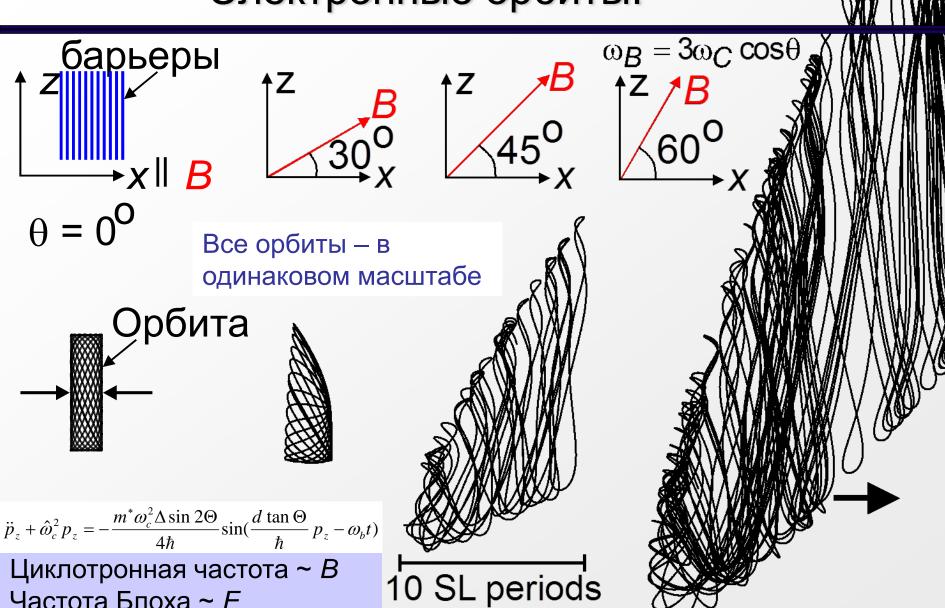
Все другие координаты движения могут быть выражены в терминах p_z :

$$p_x = eFt - \dot{p}_z \tan \Theta, \quad p_y = \hat{\omega}_c^{-1} \dot{p}_z$$

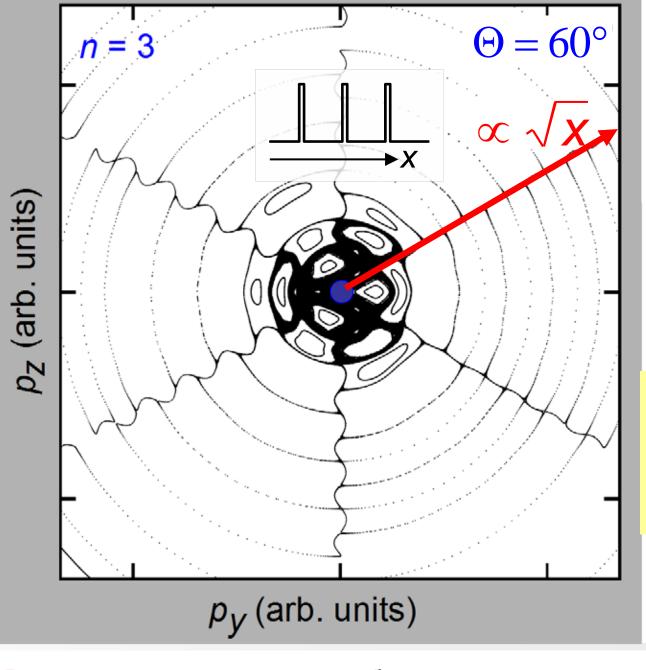
$$\dot{x} = \frac{d\Delta}{2\hbar} \sin(\frac{d \tan \Theta}{\hbar} p_z - \omega_b t), \quad \dot{y} = \frac{\dot{p}_z}{\hat{\omega}_c m^*}, \quad \dot{z} = \frac{\dot{p}_z}{m^*}$$



Электронные орбиты:



Частота Блоха ~ *F*



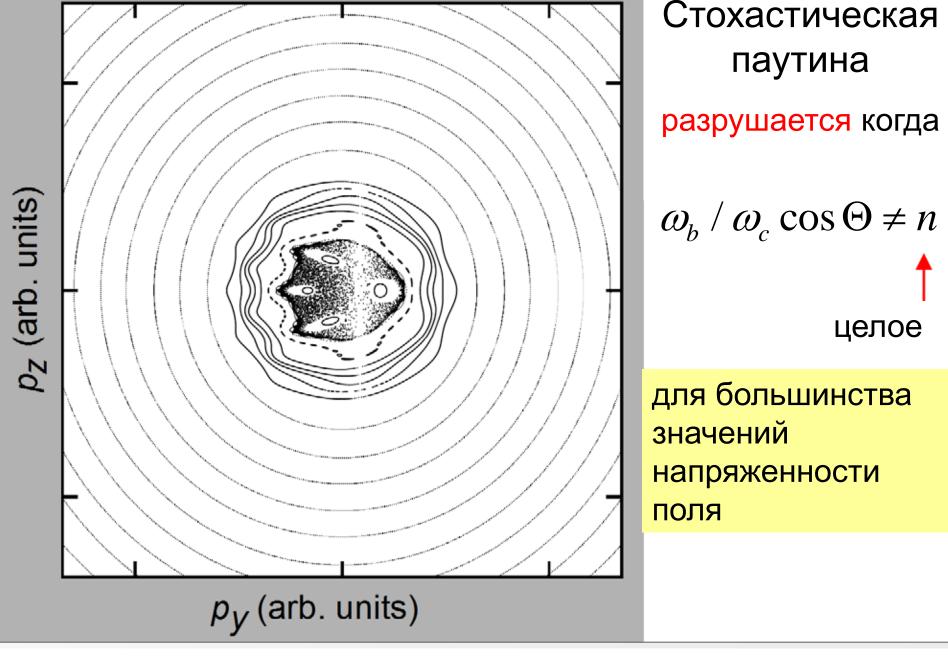
Стохастическая паутина

формируется когда

для дискретных значений напряженности поля

В резонансах хаотические орбиты неограничены



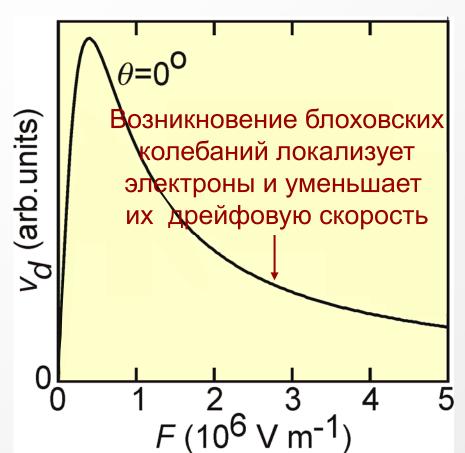




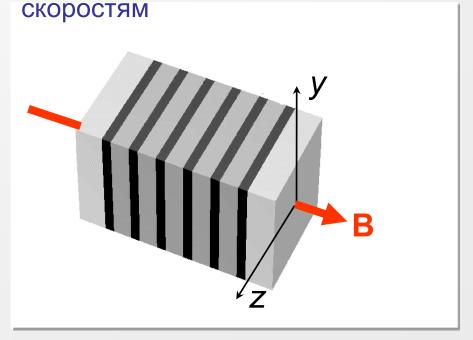
175 fs

Дрейфовая скорость электронов

 $v_d(F) = \frac{\delta}{\tau} \sum_{t=0}^{\infty} \int_{0}^{\infty} v_x(t) \exp(-t/\tau) dt$ время рассеяния



суммирование по всем начальным

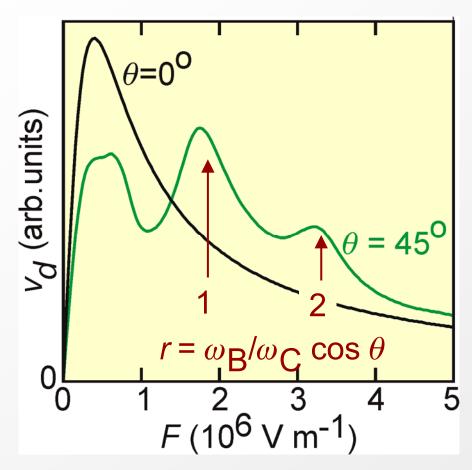




Дрейфовая скорость электронов

175 fs

$$v_d(F) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=0}^{\infty} v_x(t) \exp(-t/\tau) dt$$



суммирование по всем начальным скоростям

Fromhold et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 046803 (2001); *Nature* **428**, 726 (2004) Fowler et al., *Phys. Rev. B.* **76**, 245303 (2007)

Balanov et al., *Phys. Rev. E.* **77**, 026209 (2008)

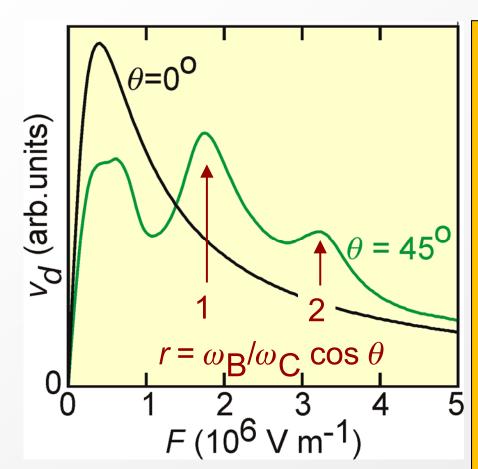
Related work on "Ultrafast Fiske Effect" by Kosevich et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 137403 (2006)



Дрейфовая скорость электронов

175 fs

$$v_d(F) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=0}^{\infty} v_x(t) \exp(-t/\tau) dt$$



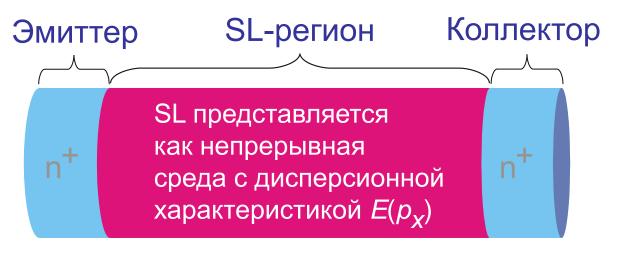
 $V_d(F)$ кривые использовались для вычисления I(V),

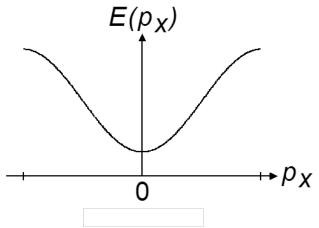
решая самосогласованную систему, содержащую

- уравнение непрерывности
- уравнение Пуассона



Полуклассическая модель электронного транспорта



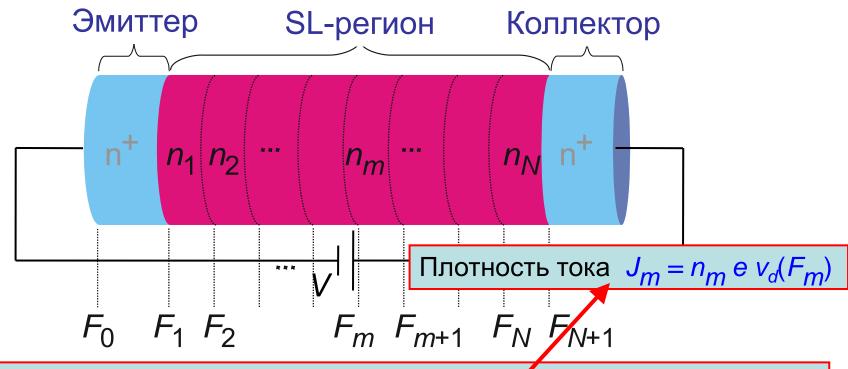


$$\frac{\partial J}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{n}{\varepsilon \varepsilon_0}$$



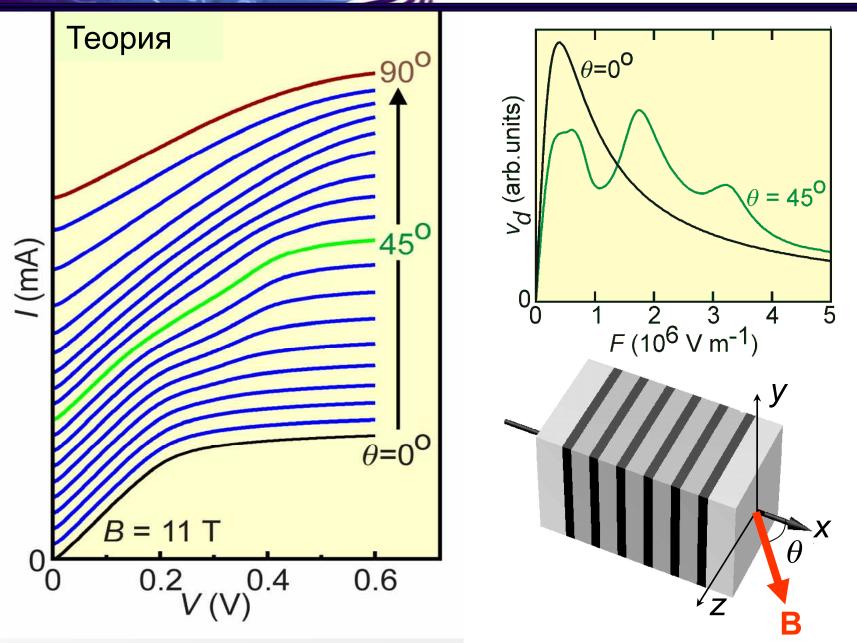
Полуклассическая модель электронного транспорта



- Решается уравнения сохранения заряда $dn_m/dt = (J_m J_{m+1})/e\Delta x$,
- и уравнения Пуассона F_{m+1} F_m = $(n_m$ n_D) $e\Delta x/\mathcal{E}_0\mathcal{E}_r$
- Требуется, чтобы сумма падений напряжения на всех слоях = V

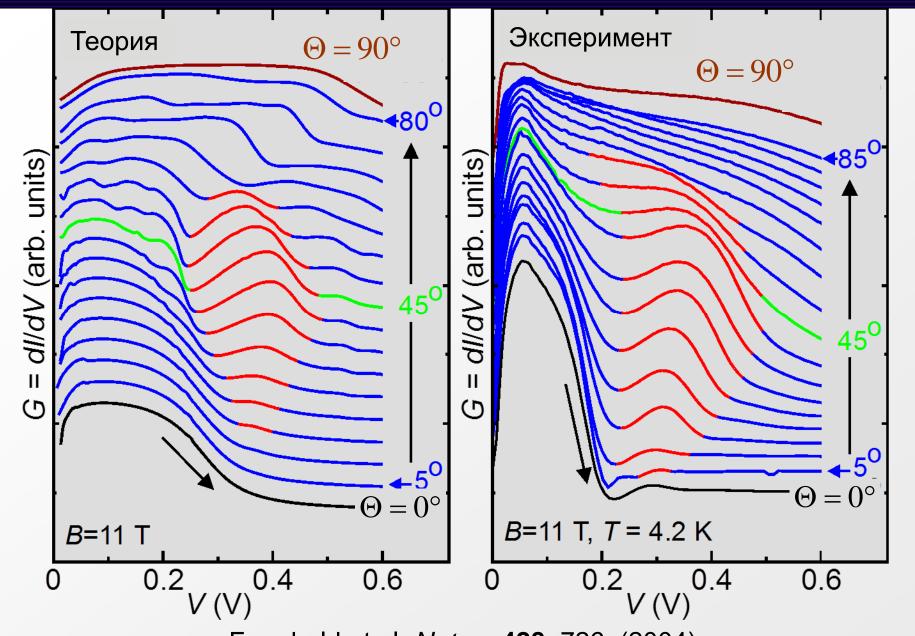
• Вычисляется ток
$$I(t) = \frac{A}{N+1} \sum_{m=0}^{N} J_m$$





Fromhold et al., *Nature* **428**, 726 (2004); Balanov et al., *PRE* **77**, 026209 (2008)





Fromhold et al, *Nature* **428**, 726 (2004)

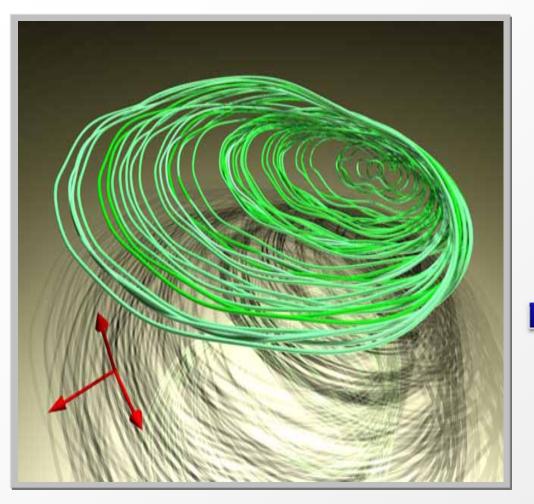


Выводы

• Динамика электронов в минизоне полупроводниковой сверхрешетки, находящейся под воздействием электрического и наклонного магнитного поля, может иметь сложный хаотический характер (КАМ и не-КАМ хаос).

• Сложные динамические режимы электронов могут быть использованы для управления электрической проводимостью сверхрешетки.



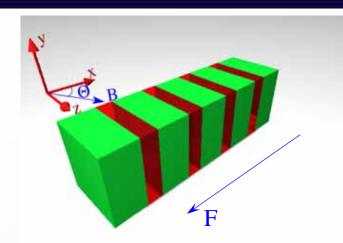


Высокочастотная нелинейная динамика заряда в полупроводниковых сверхрешетках

Александр Баланов



Модельные уравнения:



Электрическое поле: $\mathbf{F}(-F, 0, 0)$

Магнитное поле: $\mathbf{B}(\mathbf{B}cos\Theta, 0, \mathbf{B}sin\Theta)$

Дисперсионная зависимость:

$$E(\mathbf{p}) = \frac{\Delta}{2} (1 - \cos \frac{p_x d}{\hbar}) + \frac{1}{2m^*} (p_y^2 + p_y^2)$$

импульс электрона: $\mathbf{p}(p_x, p_y, p_x)$

Уравнение движения:

$$\dot{\mathbf{p}} = -e\mathbf{F} - e(\nabla_{\mathbf{p}}E \times \mathbf{B})$$

$$\dot{p}_{x} = eF - \hat{\omega}_{c} p_{y} \tan \Theta$$

$$\dot{p}_{y} = m^{*} \hat{\omega}_{c} \tan \Theta \frac{d\Delta}{2h} \sin(\frac{p_{x}d}{h}) - \hat{\omega}_{c} p_{z}$$

$$\dot{p}_{z} = \hat{\omega}_{c} p_{y}$$

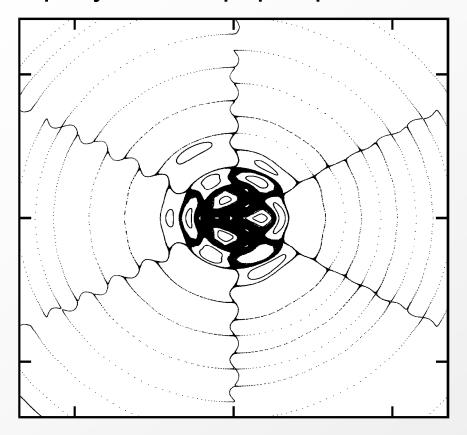
циклотронная частота:

$$\omega_c = eB/m^*$$

$$\hat{\omega}_c = \omega_c \cos \Theta$$



Моделирование показало, что резонансная делокализация отдельных электронов, возникающая в результате формирования стохастической паутины

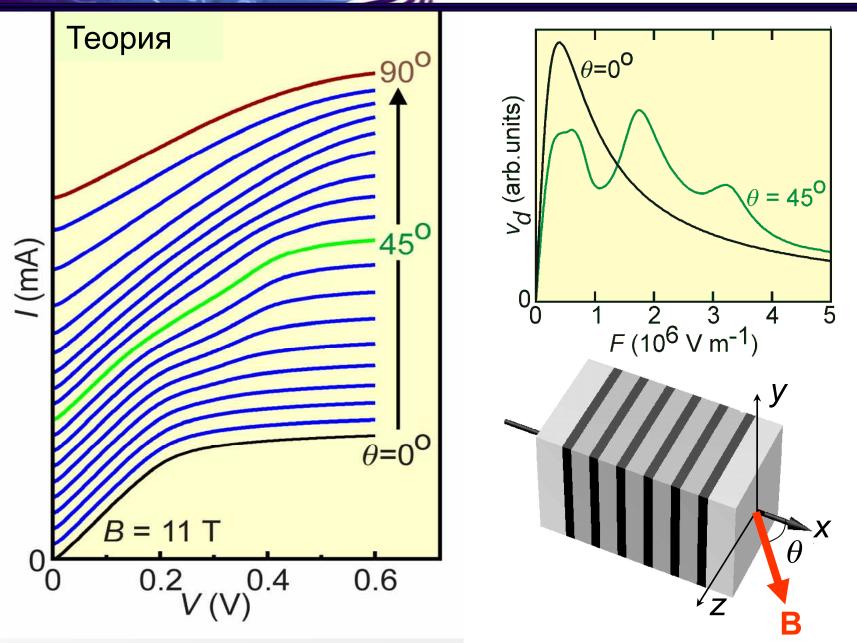


Дрейфовая скорость:

$$v_d(F) = \frac{\delta}{\tau} \sum_{n=0}^{\infty} v_x(t) \exp(-t/\tau) dt$$

влияет на коллективное распределение электронов и профиль электрического поля вдоль сверхрешетки...

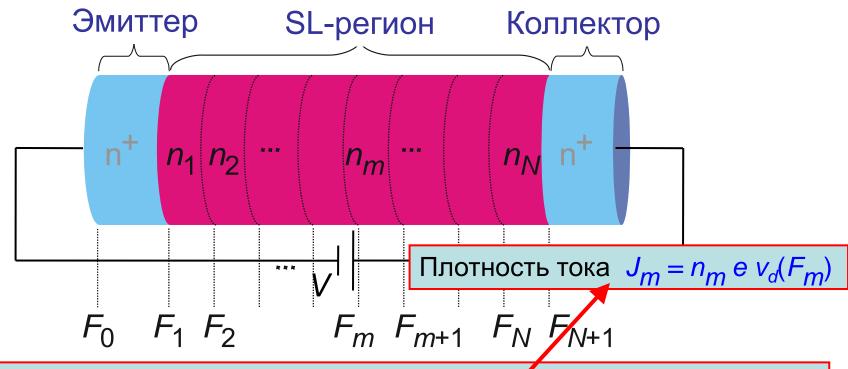




Fromhold et al., *Nature* **428**, 726 (2004); Balanov et al., *PRE* **77**, 026209 (2008)



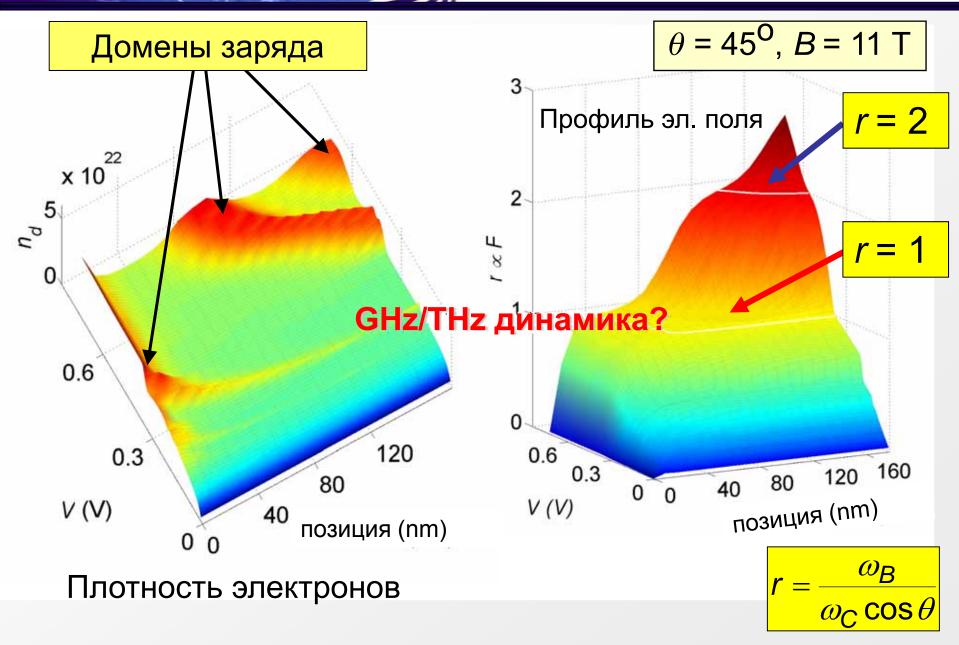
Полуклассическая модель электронного транспорта



- Решается уравнения сохранения заряда $dn_m/dt = (J_m J_{m+1})/e\Delta x$,
- и уравнения Пуассона F_{m+1} F_m = $(n_m$ n_D) $e\Delta x/\mathcal{E}_0\mathcal{E}_r$
- Требуется, чтобы сумма падений напряжения на всех слоях = V

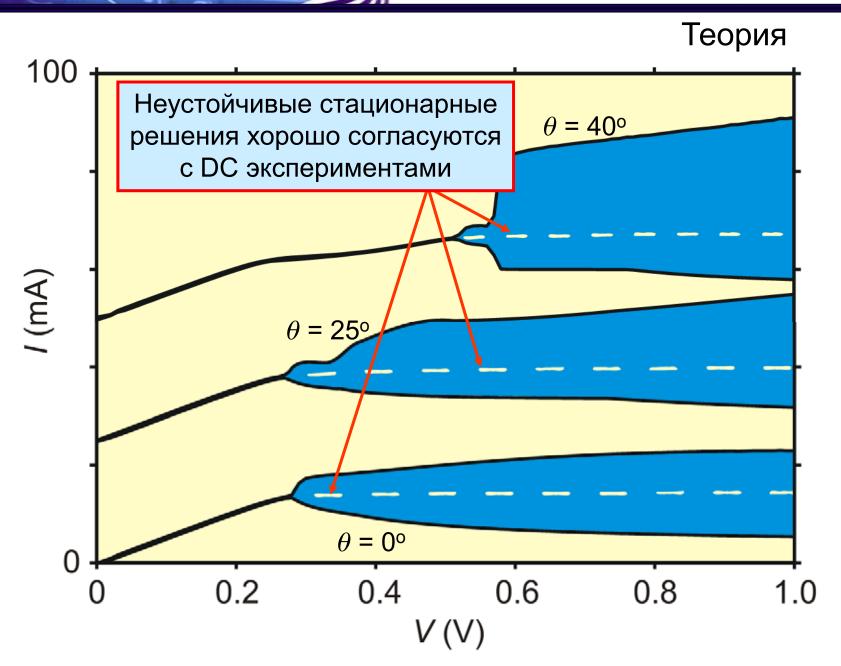
• Вычисляется ток
$$I(t) = \frac{A}{N+1} \sum_{m=0}^{N} J_m$$

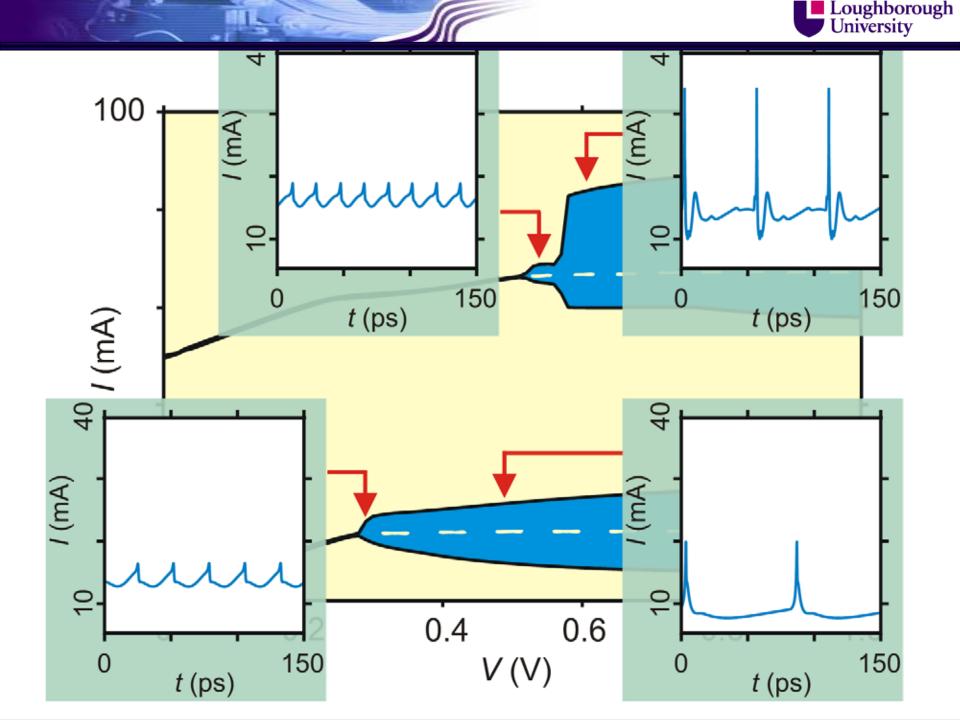




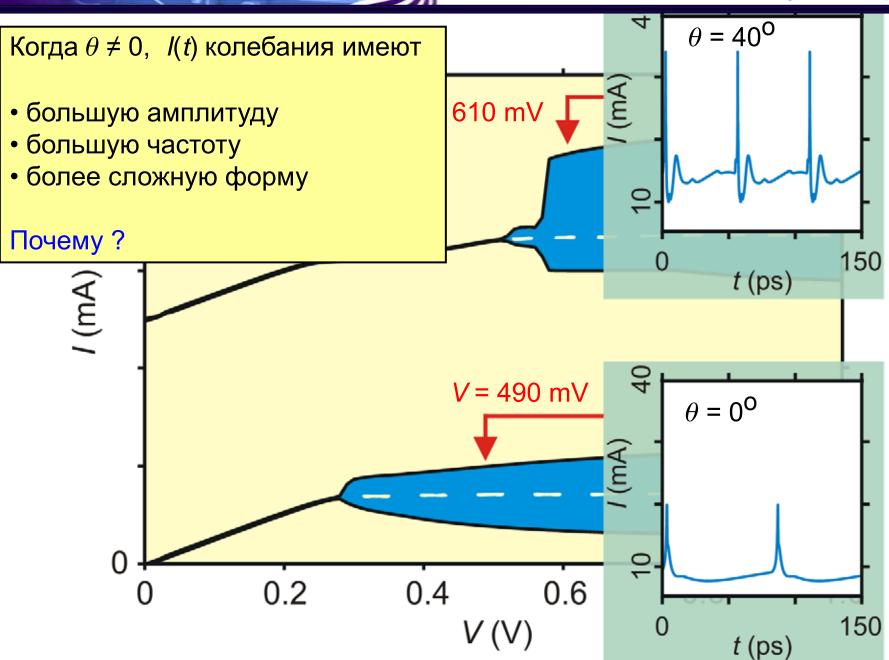
Детерминированный хаос управляет статическими доменами заряда

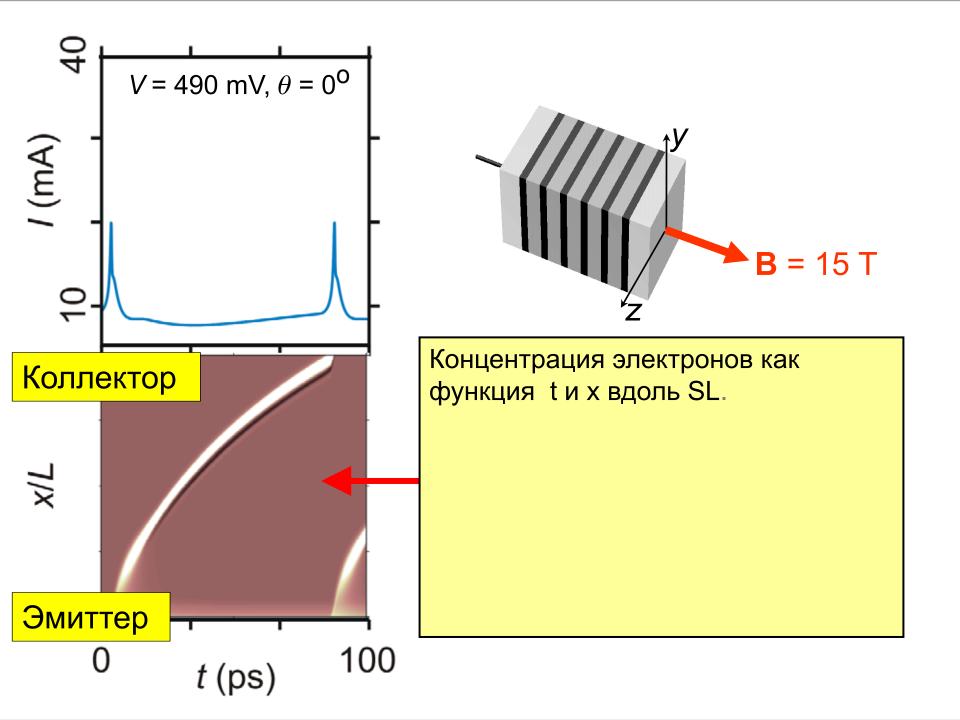


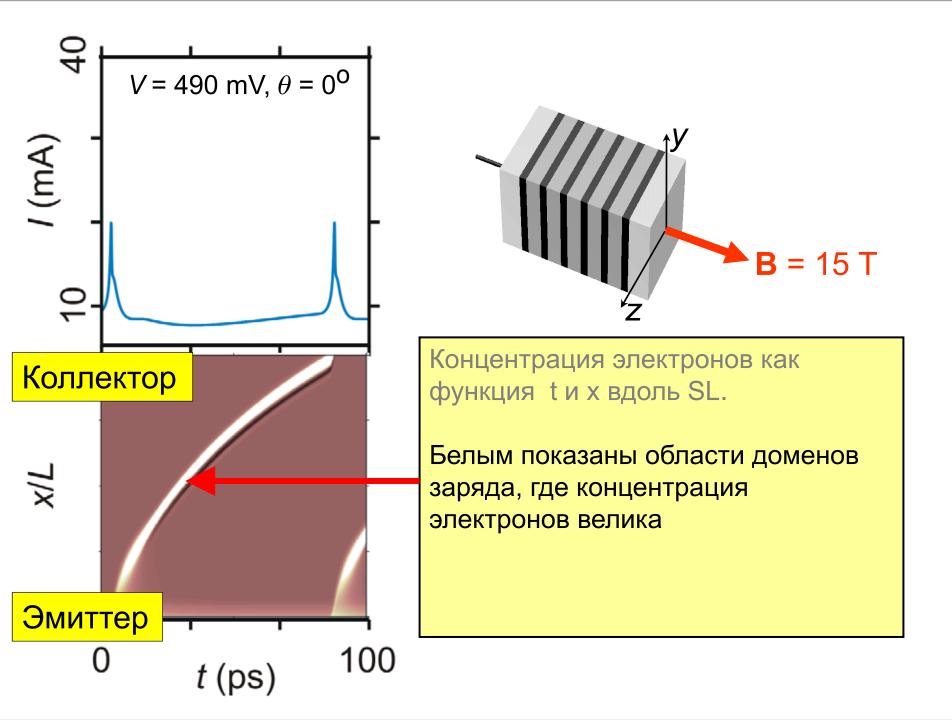


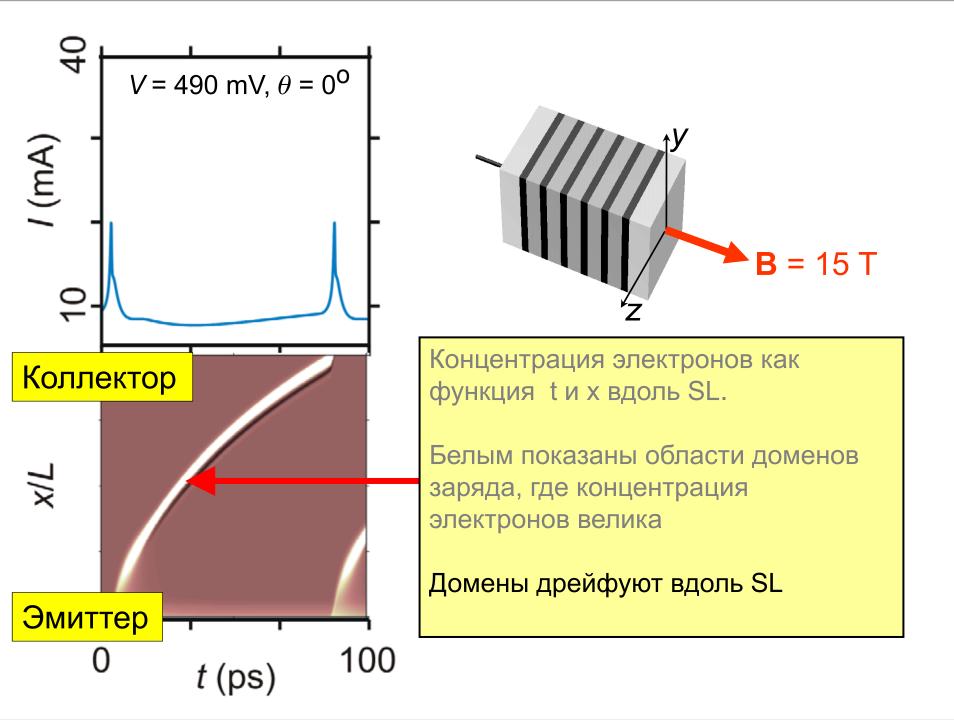


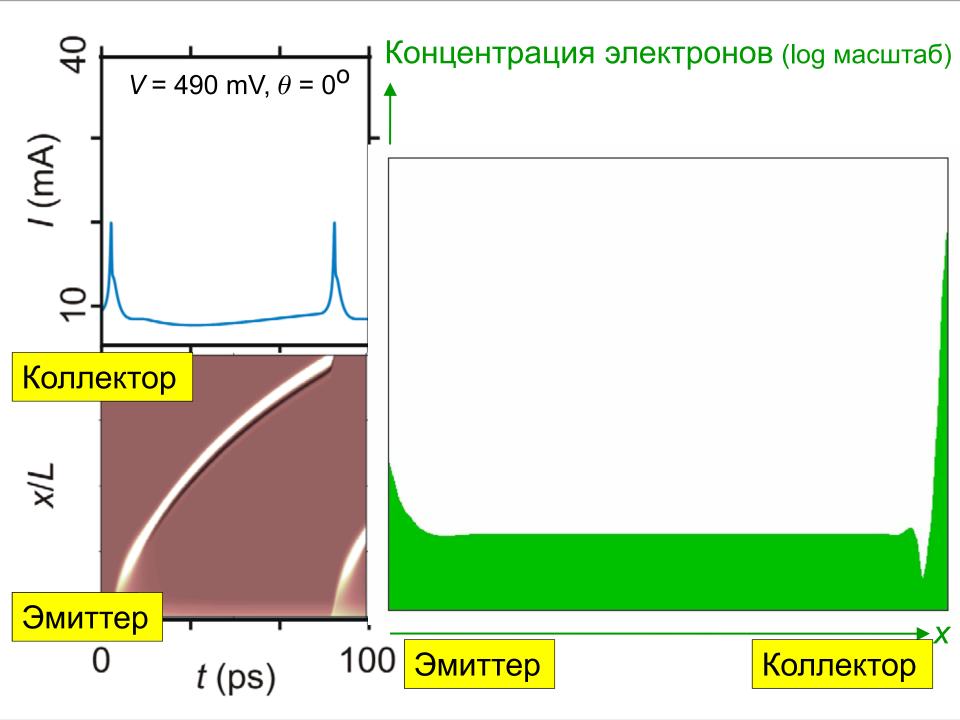


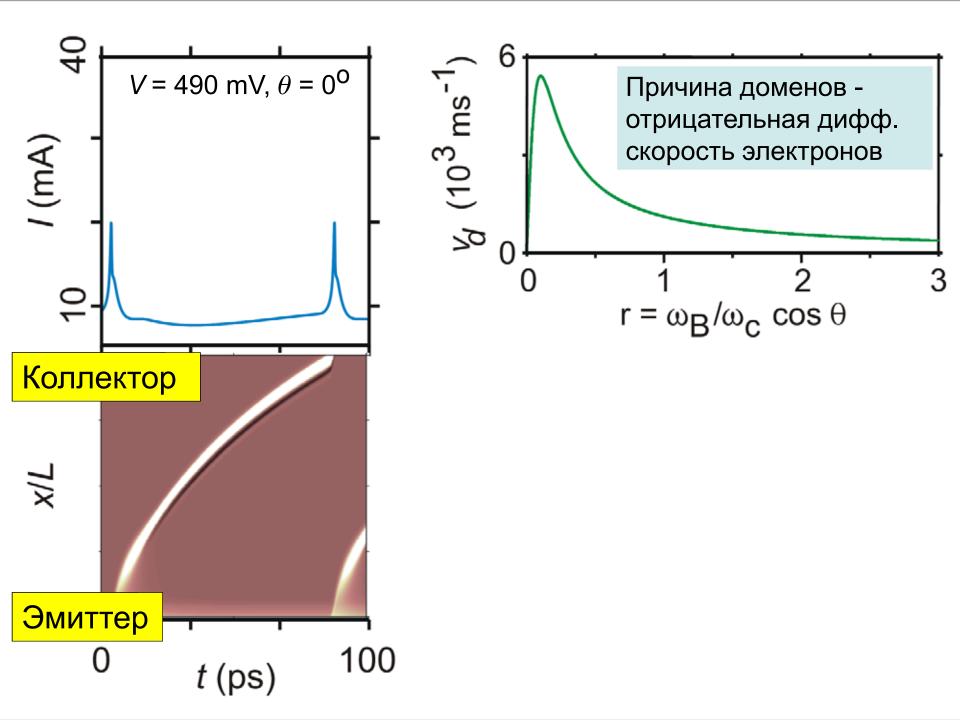


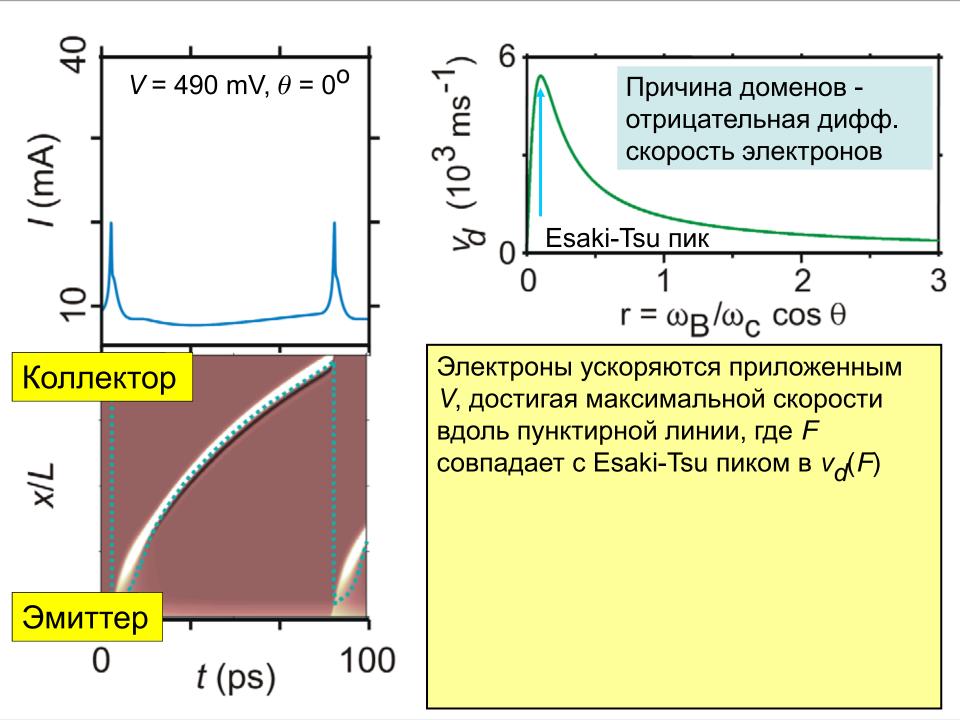


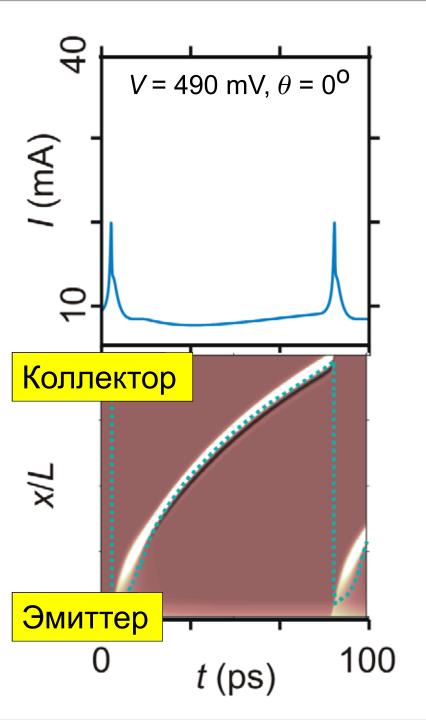


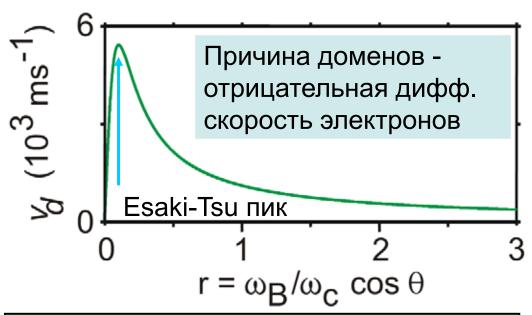






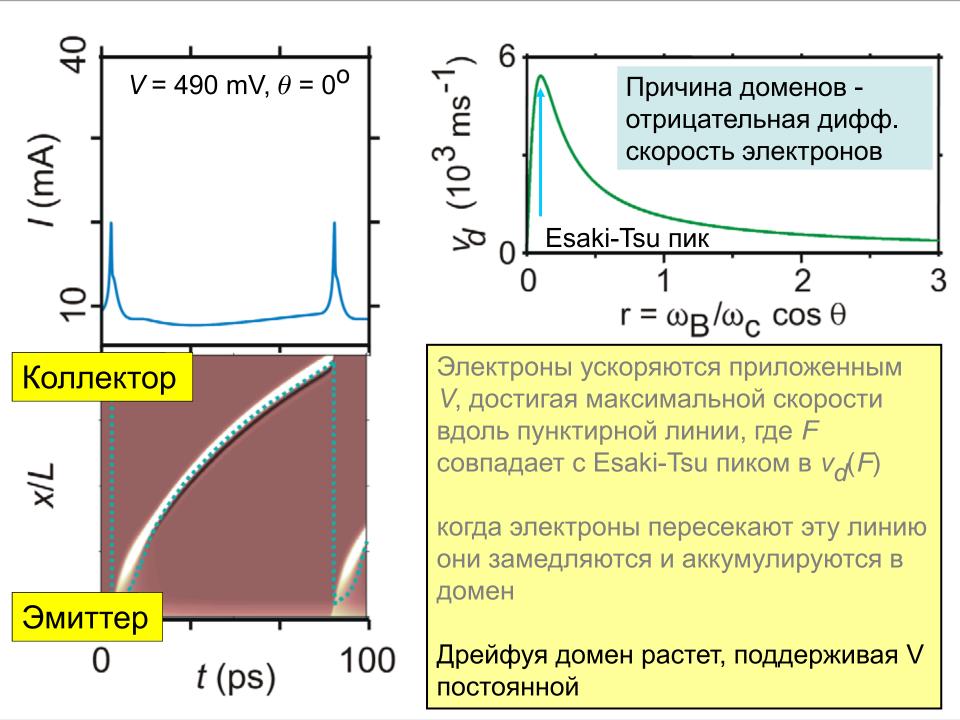


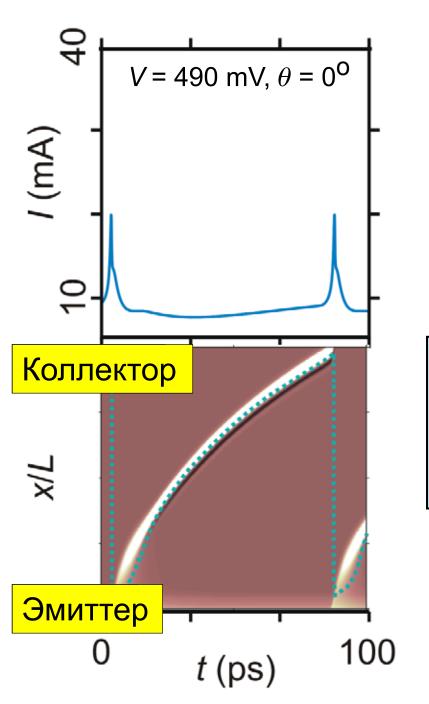


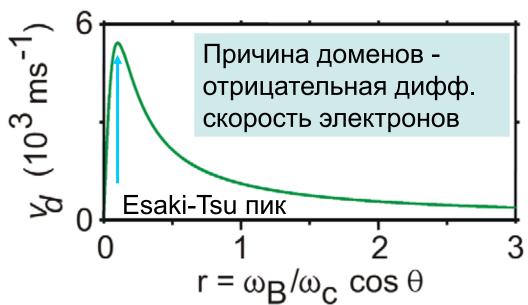


Электроны ускоряются приложенным V, достигая максимальной скорости вдоль пунктирной линии, где F совпадает с Esaki-Tsu пиком в $V_O(F)$

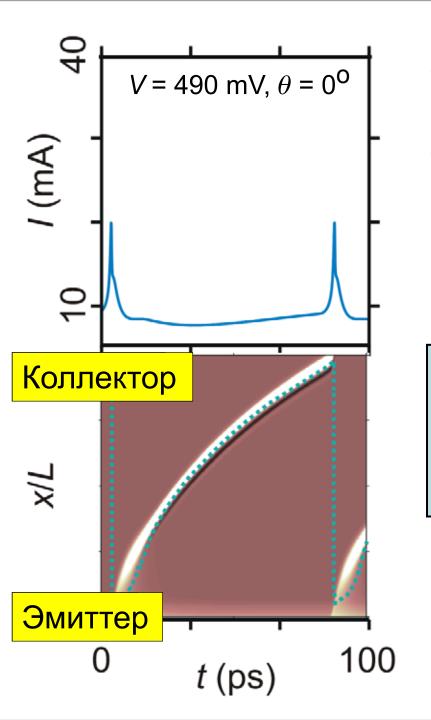
когда электроны пересекают эту линию они замедляются и аккумулируются в домен

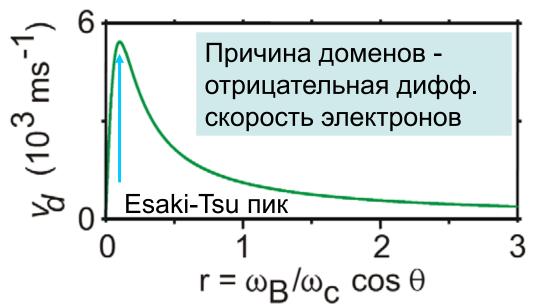






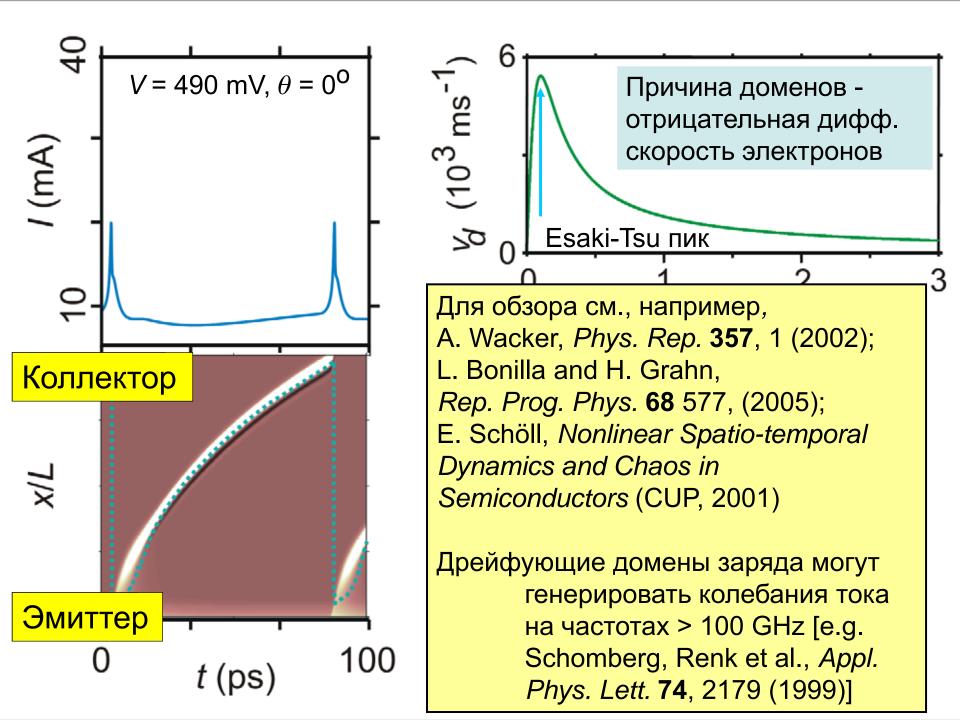
Когда домен пребывает на коллектор, в I(t) возникает пик

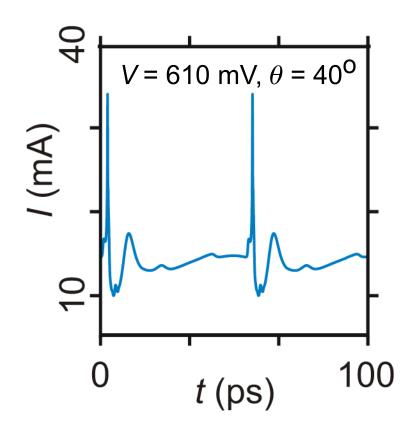




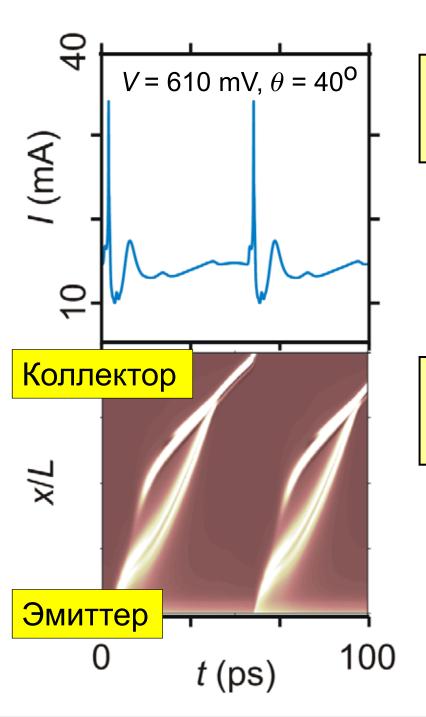
Когда домен пребывает на коллектор, в I(t) возникает пик

Другой домен фромируется вблизи эмиттера и цикл повторяется



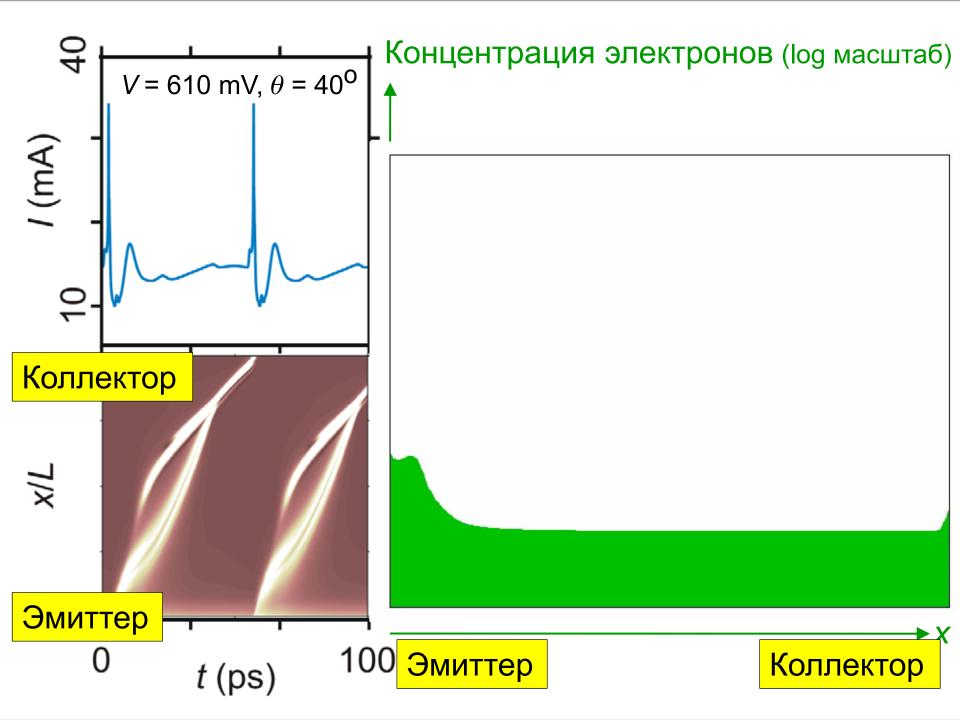


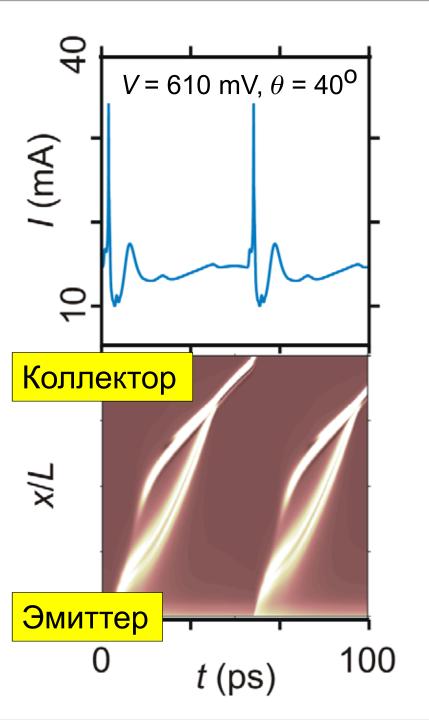
Когда **В** наклонено, колебания I(t) имеют большую амлитуду и более сложную форму

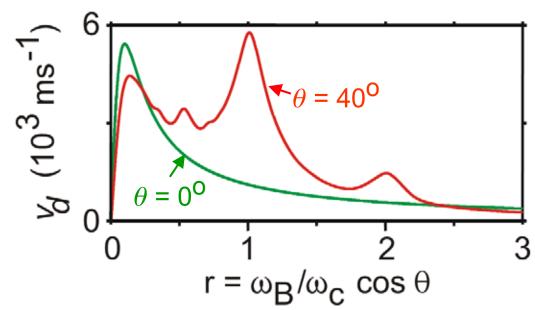


Когда **В** наклонено, колебания I(t) имеют большую амлитуду и более сложную форму

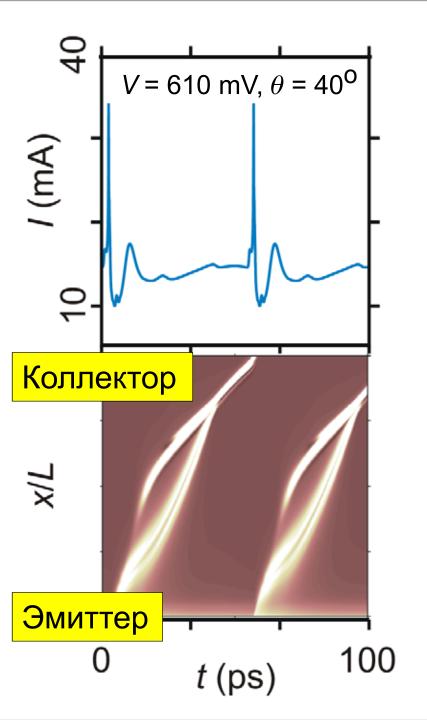
так как больше доменов (здесь 4) вовлечено в транспорт заряда

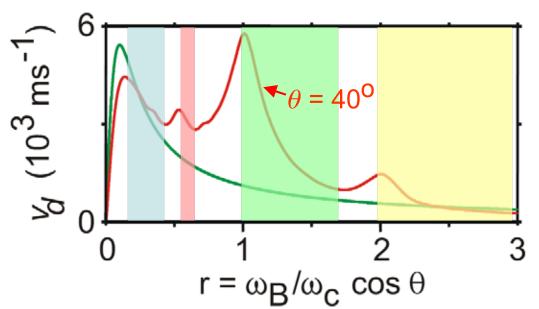






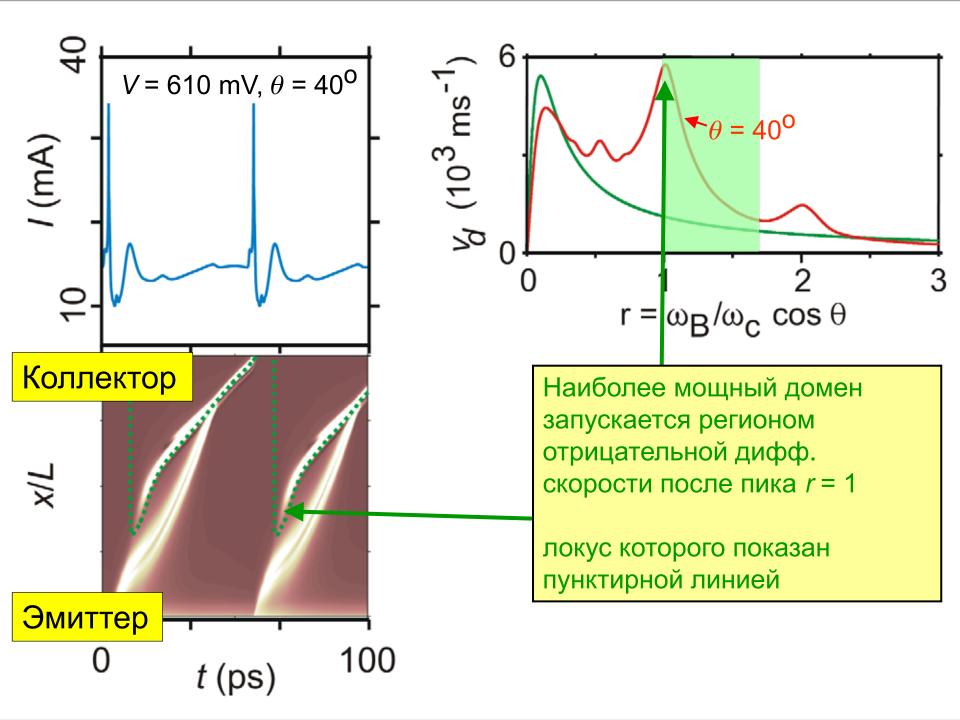
Когда $\theta = 0^{\circ}$, есть только один регион с отрицательной дифференциальной скоростью

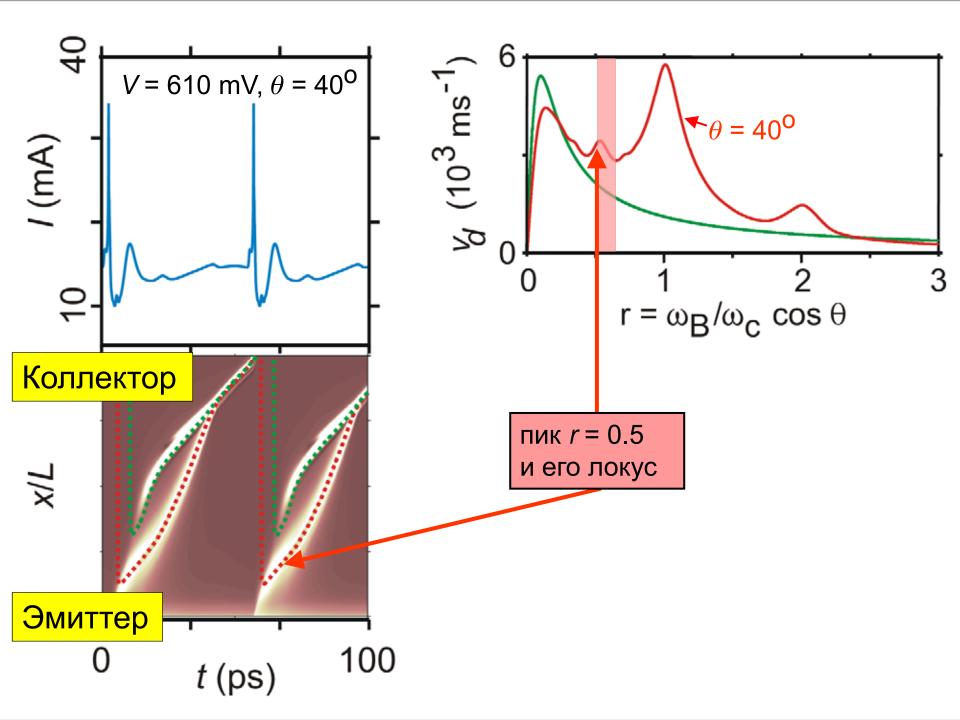


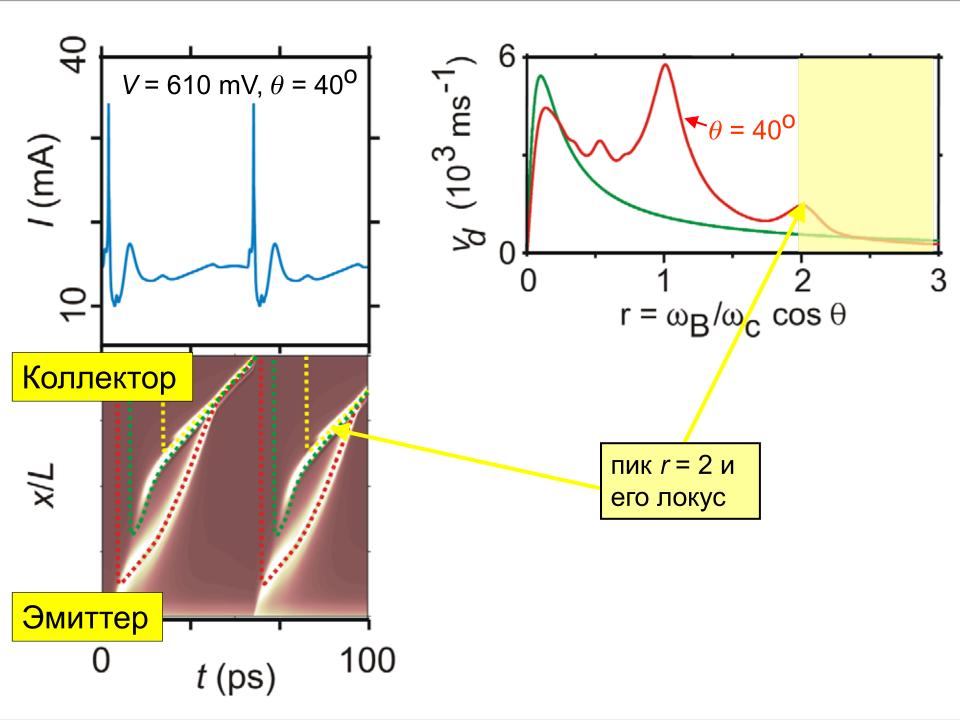


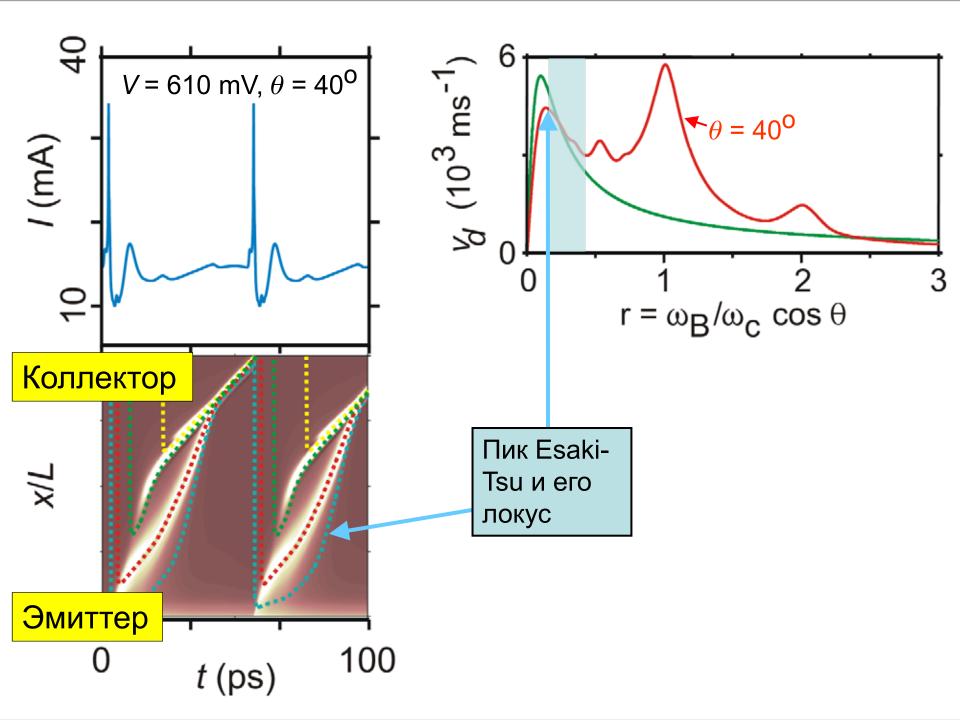
Когда $\theta = 0^{\circ}$, есть только один регион с отрицательной дифференциальной скоростью

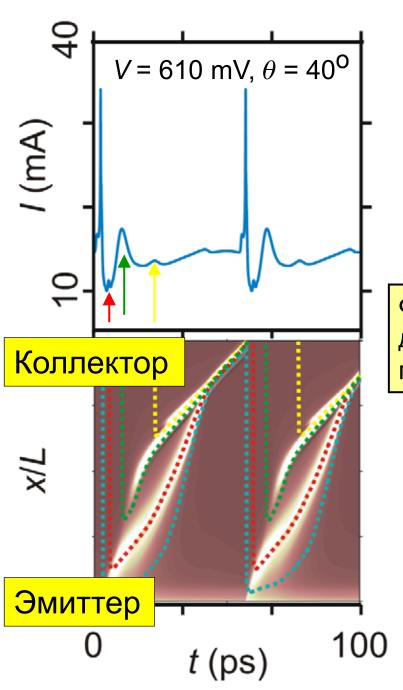
Но для θ = 40⁰, их 4, и каждый генерирует домен заряда



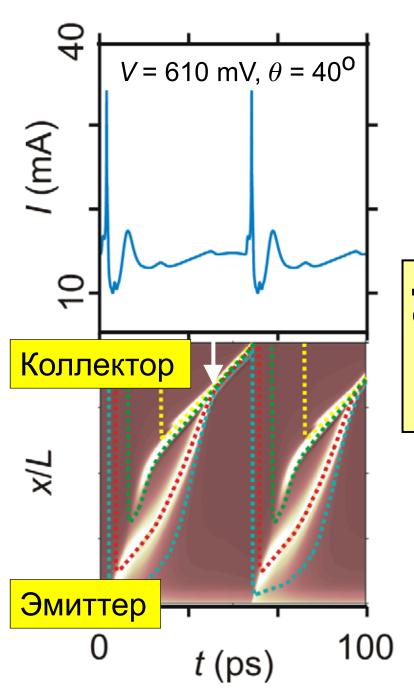




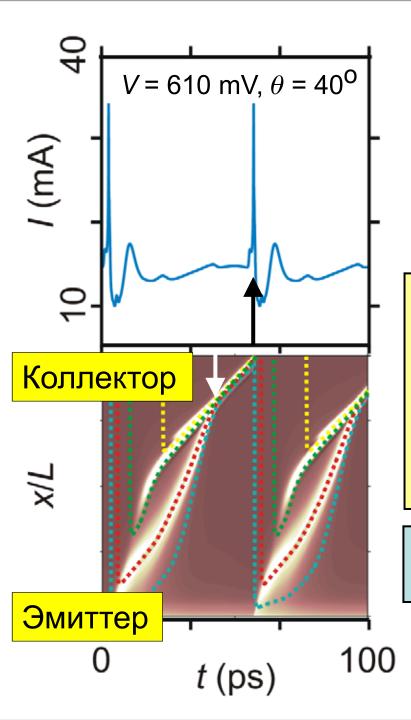




Формирование r = 0.5, 1 и 2 доменов создает дополнительные пики в I(t)



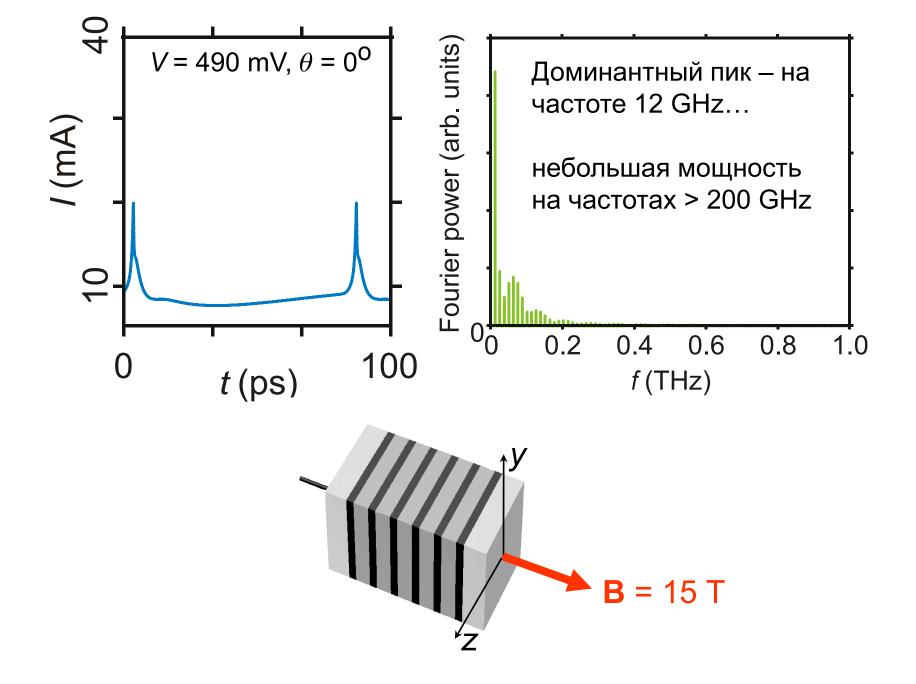
Домены иногда сливаются, образуя "сверхдомен"...

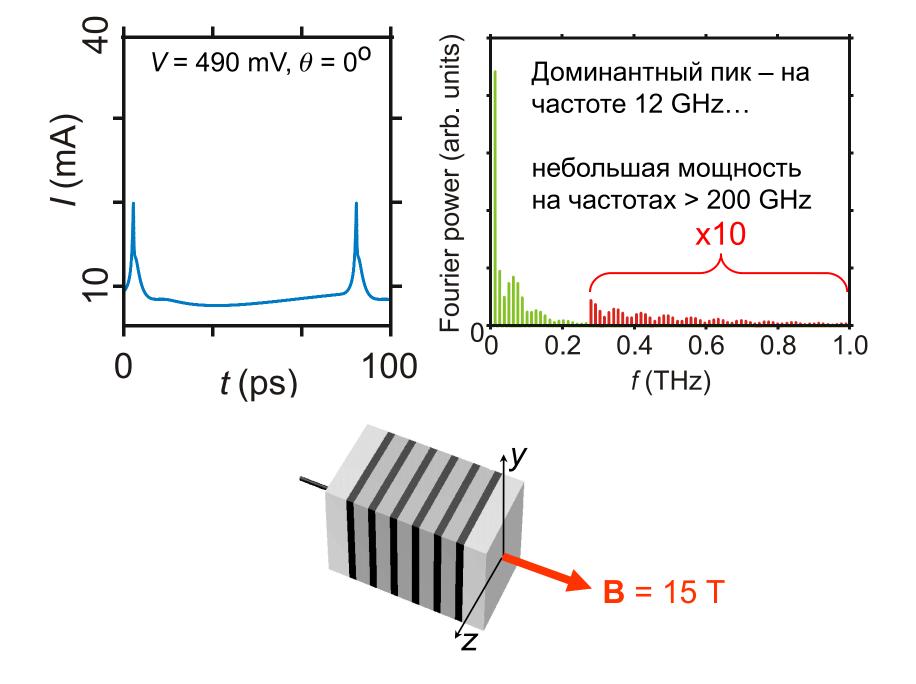


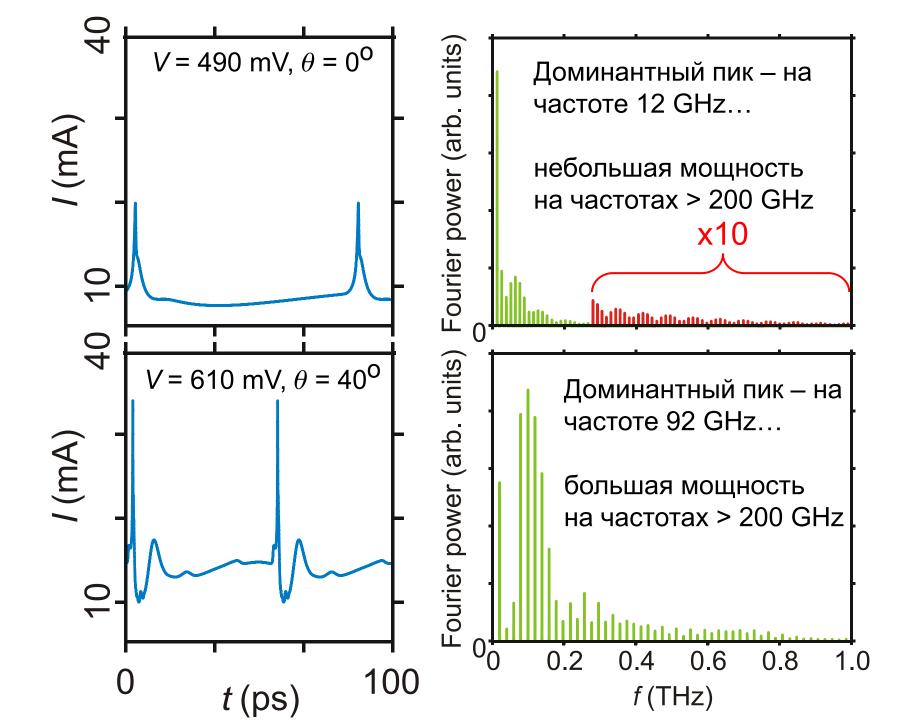
Домены иногда сливаются образуя "сверхдомен"...

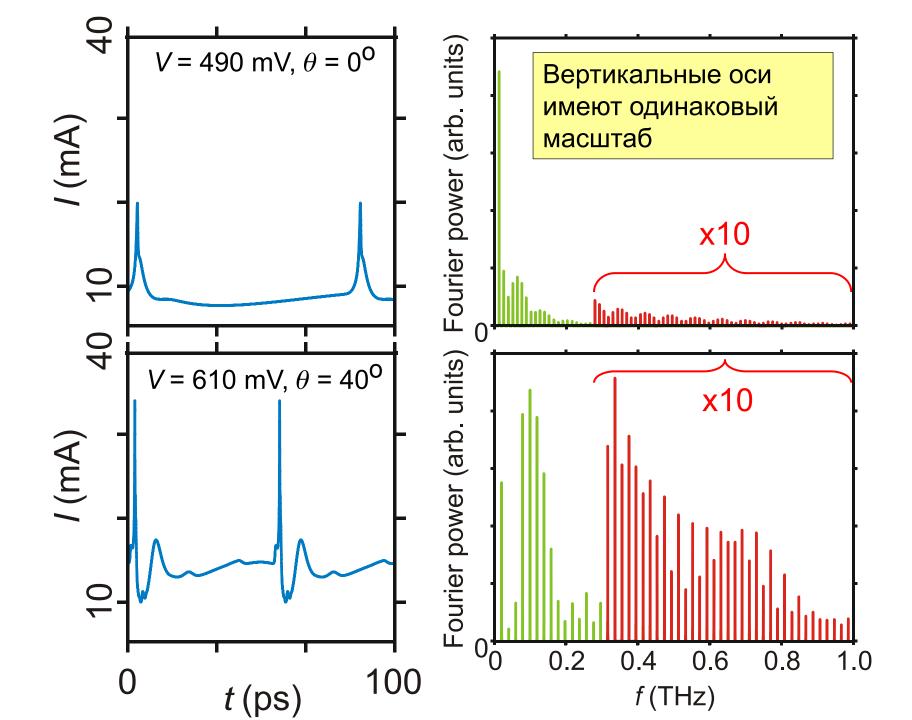
...который создает большой пик в I(t), когда пребывает на коллектор

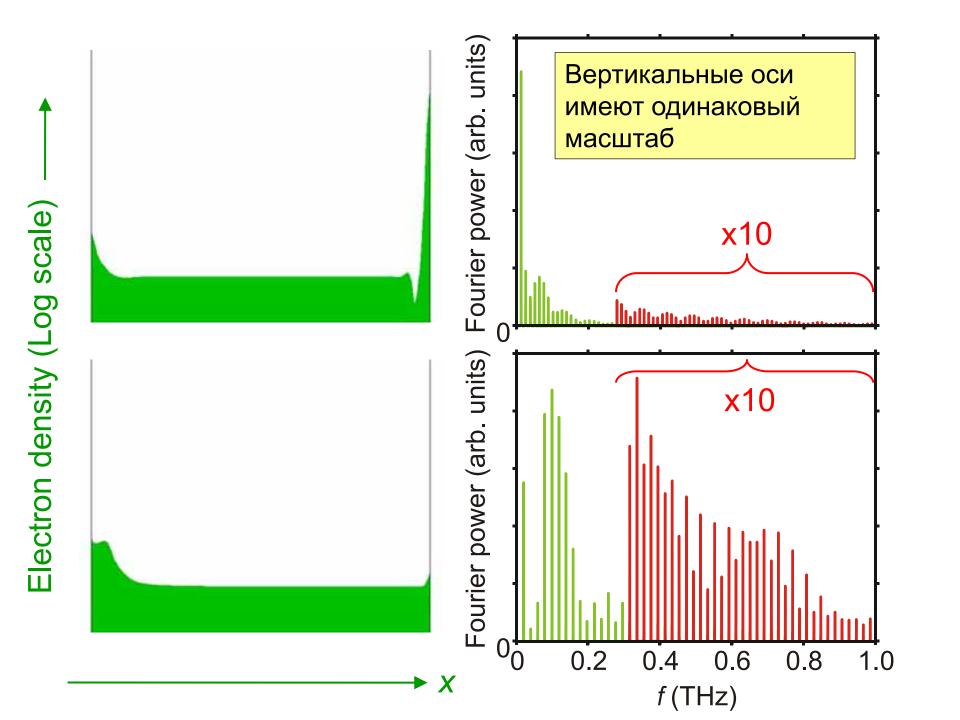
Сравним спектры мощности I(t) для $\theta = 0^{\circ}$ и $\theta = 40^{\circ}$













Выводы

- Динамика доменов заряда в полупроводниковых сверхрешетках может быть использована для генерации суб-ТГц и ТГц сигналов.
- Приложенное наклонное магнитное поле может существенно улучшить частотные и амплитудные характеристики устройств на базе полупроводниковых сверхрешеток.
- Результаты предлагают способ управления коллективным транспортом в сверхрешетках (и похожих системах), основанный на знании одноэлектронной динамики в системе.

M.T Greenaway et al., PRB 80 205308 (2009)