

Спиновый эффект Холла (SHE)

- История
- Спиновый ток
- Связь между зарядовым и спиновым токами
- Физические следствия
- Difference between **SHE** and **HE**
- Experiments
- Spin-dependent effects in scattering
- Swapping of spin currents
- Hype
- Conclusions

О ВОЗМОЖНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СПИНОВ ТОКОМ

М. И. Дьяконов, В. И. Перель

В результате у поверхности образца с током должен существовать слой в котором спины электронов ориентированы (спиновый слой). Толщина спинового слоя определяется длиной спиновой диффузии.

С феноменологической точки зрения явление может быть описано следующим образом. Введем вектор спиновой плотности \mathbf{S} и тензор плотности спинового потока $q_{\alpha\beta}$. Величина $q_{\alpha\beta}$ дает плотность потока β -компоненты спина в направлении α . Спиновая плотность \mathbf{S} удовлетворяет уравнению непрерывности

$$\frac{\partial S_{\beta}}{\partial t} + \frac{\partial q_{\alpha\beta}}{\partial x_{\alpha}} + \frac{S_{\beta}}{\tau_s} = 0, \quad (1)$$

где τ_s — время спиновой релаксации. Выражение для плотности спинового потока $q_{\alpha\beta}$ запишем в виде

$$q_{\alpha\beta} = -b_s E_{\alpha} S_{\beta} - d_s \frac{\partial S_{\beta}}{\partial x_{\alpha}} + \beta_s n \epsilon_{\alpha\beta\gamma} E_{\gamma}, \quad (2)$$

Индуцированное током накопление спинов (Spin Hall Effect)

Volume 35A, number 6

PHYSICS LETTERS

12 July 1971

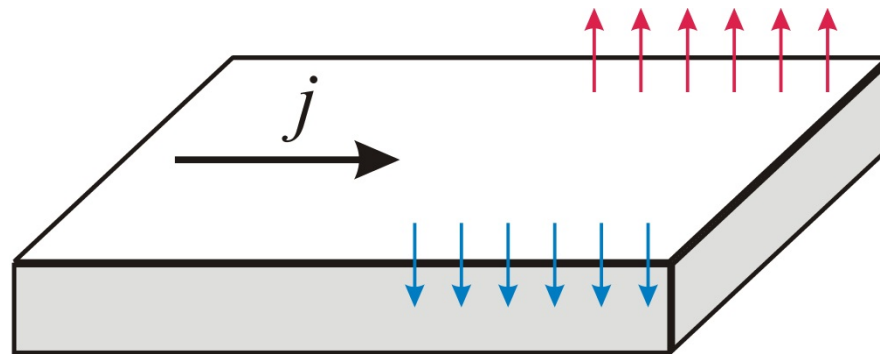
CURRENT-INDUCED SPIN ORIENTATION OF ELECTRONS IN SEMICONDUCTORS

M. I. DYAKONOV and V. I. PEREL

*A. F. Ioffe Physico-Technical Institute of the Academy of
Sciences of the USSR, Leningrad, USSR*

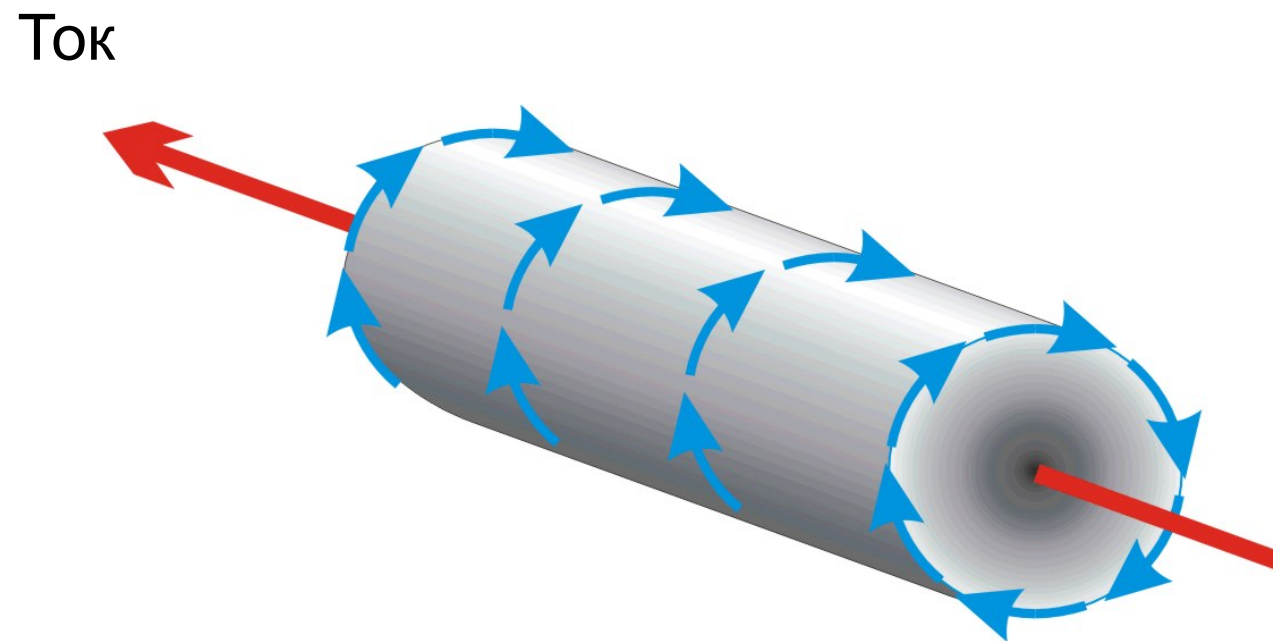
Received 12 June 1971

An electrical current in a semiconductor induces spin orientation in a thin layer near the surface of the sample due to spin-orbit effects in scattering of electrons. A weak magnetic field parallel to the current destroys this orientation.



Электрический ток приводит к накоплению на границах противоположно направленных спинов

Индucedированное током накопление спинов в цилиндрическом проводнике



Спины “наматываются” вокруг линии тока

Еще более ранняя история

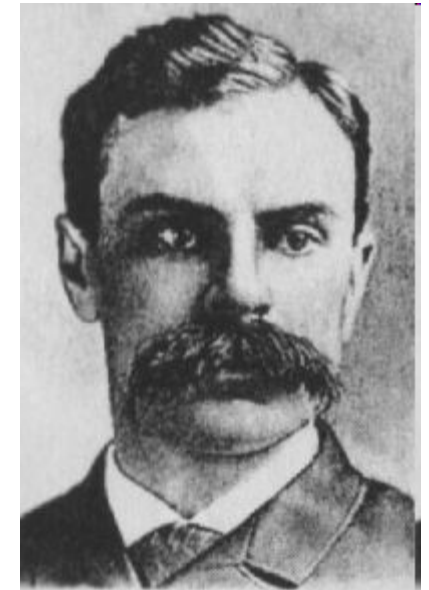
- 1879 Эффект Холла

$$\rho_{xy} = R_H B$$

- 1881 Аномальный эффект Холла в FM:

$$\rho_{xy} = R_H B + R_A \cdot \frac{4\pi}{H} M$$

$$R_{AH} > R_H$$



Edwin Hall

Объяснение (SOI !):

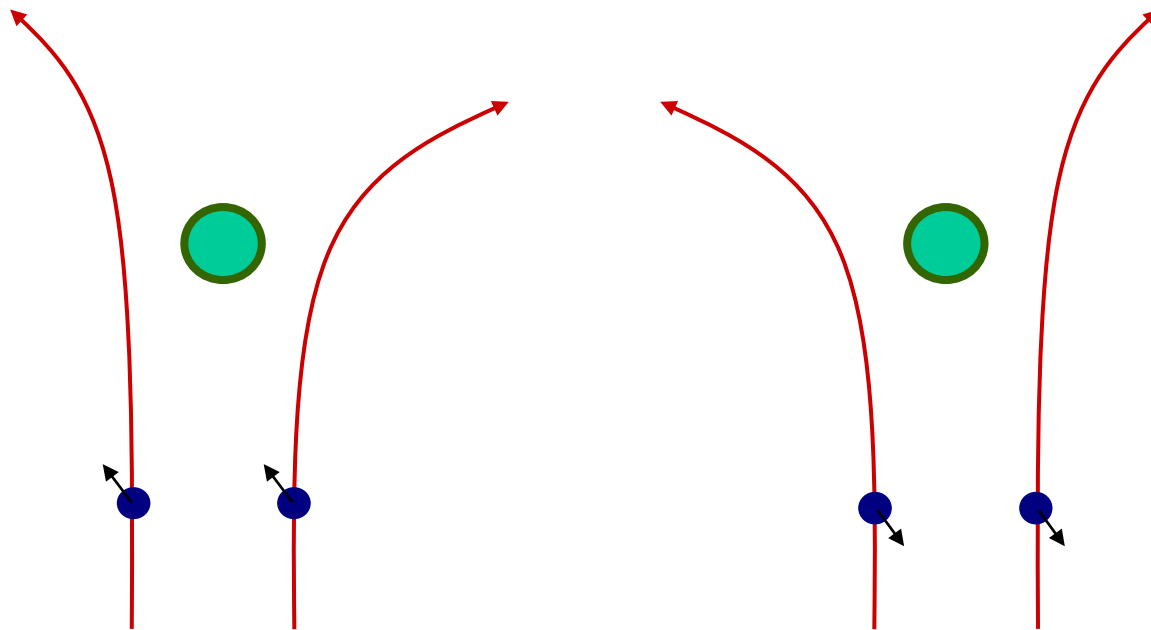
J. Smit (1951); R. Karplus, J.M. Luttinger (1954)

Эффект Магнуса и Моттовское рассеяние

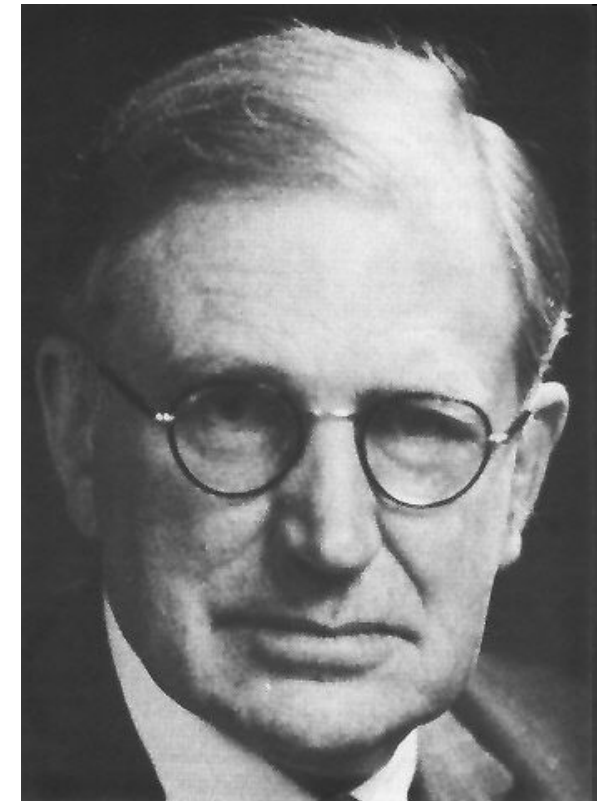
Эффект Магнуса

Закрученный теннисный мяч отклоняется от прямой траектории направо или налево, в зависимости от направления вращения (впервые замечено Ньютоном)

Схематическая иллюстрация зависящей от спина асимметрии в рассеянии электронов



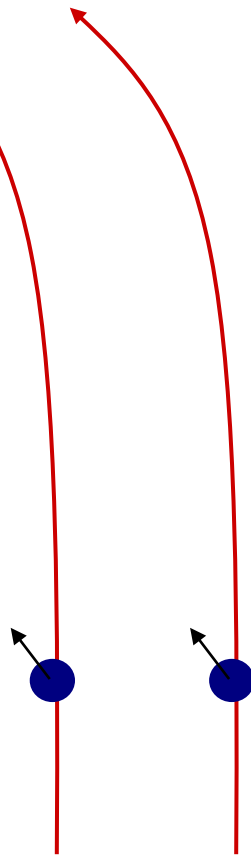
Косое (skew) рассеяние или эффект Мотта (1929)



Neville Mott

Следствия спиновой асимметрии: аномальный эффект Холла

$$\mathbf{j} = e \beta \mathbf{E} \times \mathbf{P}$$



Спин-поляризованные электроны

R. Karplus and J.M. Luttinger (1954)

- intrinsic mechanism



Joaquin Mazdak Luttinger

Следствия спиновой асимметрии: генерирование спинового тока

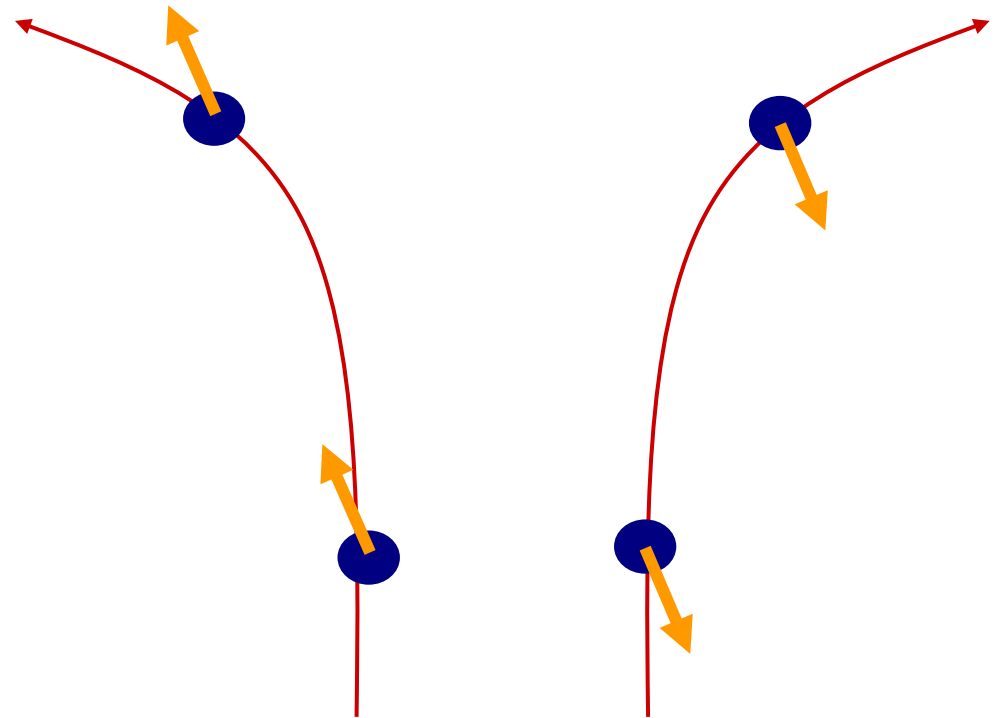
Дьяконов и Перель в 1971г. поняли, что в результате асимметрии рассеяния, вызываемой SOI, будет происходить дрейф спин-поляризованных электронов в противоположных направлениях

Он происходит из-за члена
$$j = e\beta E_x H$$

Перель, Дьяконов (1971)

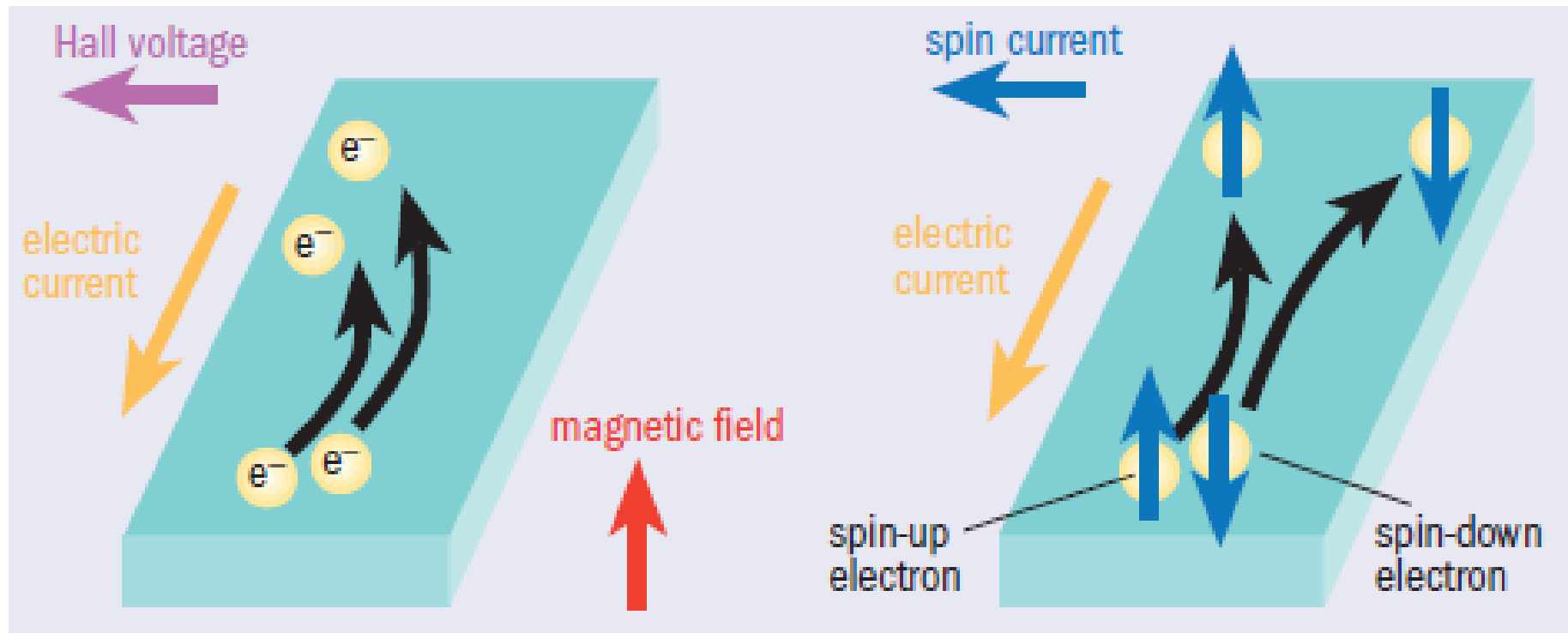


Ленинград, 1976



Unpolarized electrons

Эффект Холла (HE) and спиновый эффект Холла (SHE)



HE

SHE

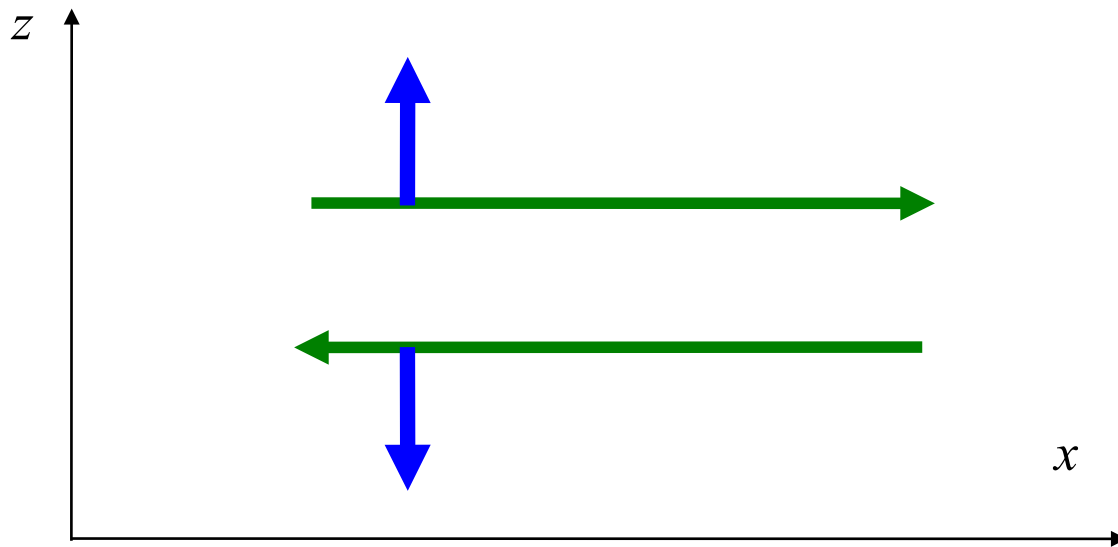
Спиновые и зарядовые токи



q_{xz} - z компонента спинов
текущих в направлении x

В общем случае: q_{ij}

Пусть в направлении x распространяется ток зарядов q_x (электрический ток $\mathbf{j} = -\mathbf{q}/e$)



В таком случае - *чисто*
спиновый ток q_{xz}

Зарядовый ток равен нулю: $\mathbf{q}=0$

Также как и ток зарядов, спиновый ток изменяет знак при инверсии пространства
В противоположность току зарядов, спиновый ток НЕ изменяет знак при инверсии
времени

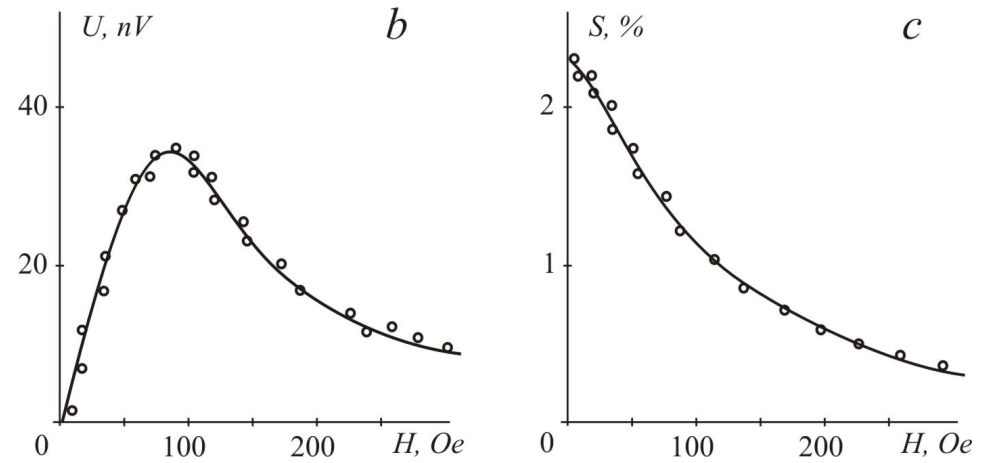
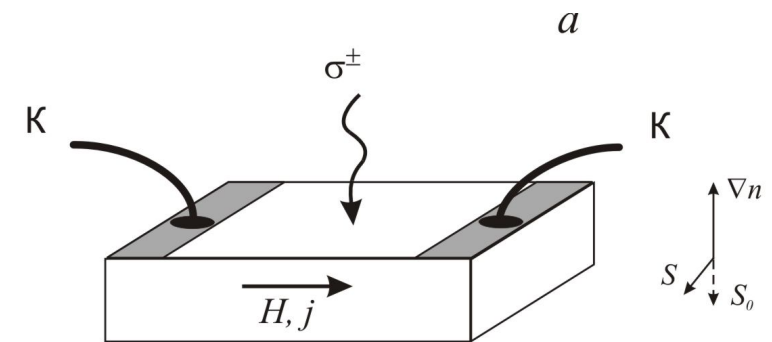
Первое наблюдение SHE ($j \sim \text{curl } P$) при облучении циркулярно-поляризованным светом

Proposal: N.S. Averkiev and M.I. Dyakonov, *Sov. Phys. Semicond.* **17**, 393 (1983)

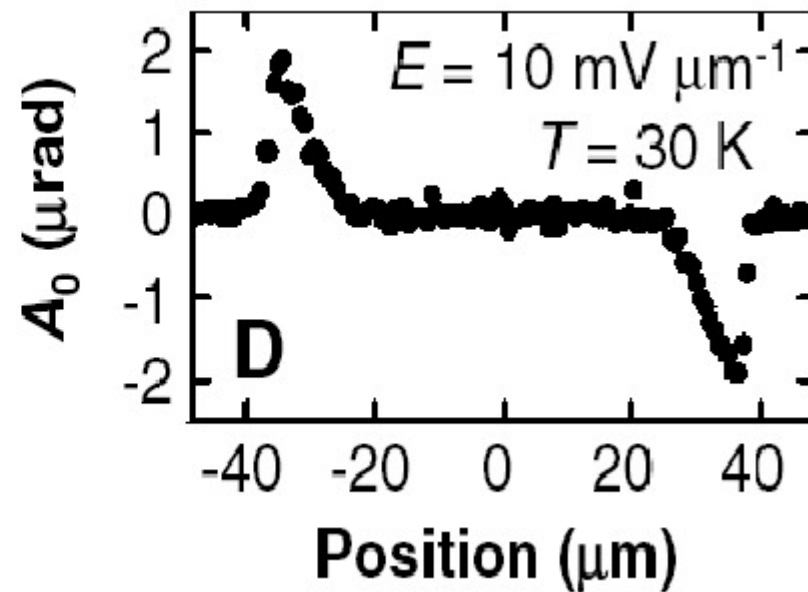
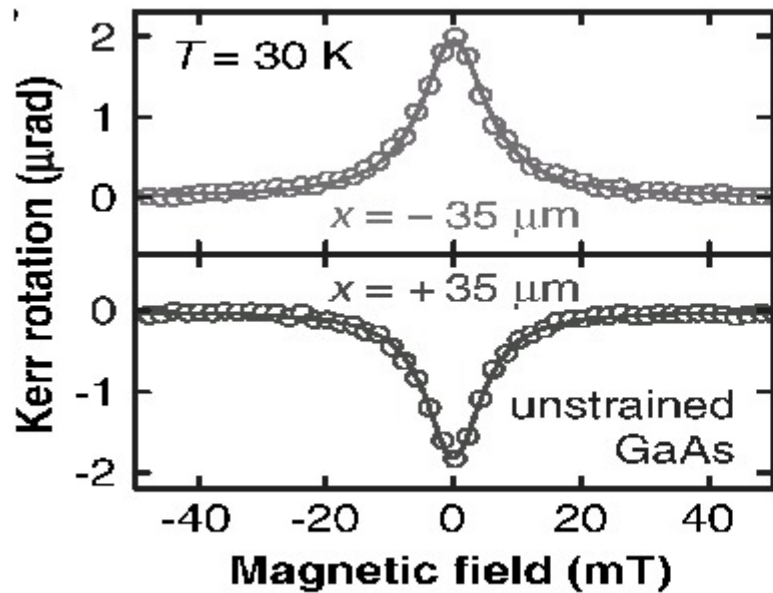
Experiment: A.A. Bakun, B.P. Zakharchenya, A.A. Rogachev, M.N. Tkachuk, and V.G. Fleisher, *Sov. Phys. JETP Lett.* **40**, 1293 (1984)

Циркулярно поляризованный свет создает спиновую поляризацию P

Приложение магнитного поля параллельно поверхности создает y компоненту P .
Вследствие этого возникает $\text{curl } P$ и следовательно электрический ток в направлении x



Первое наблюдение SHE из эффекта Керра

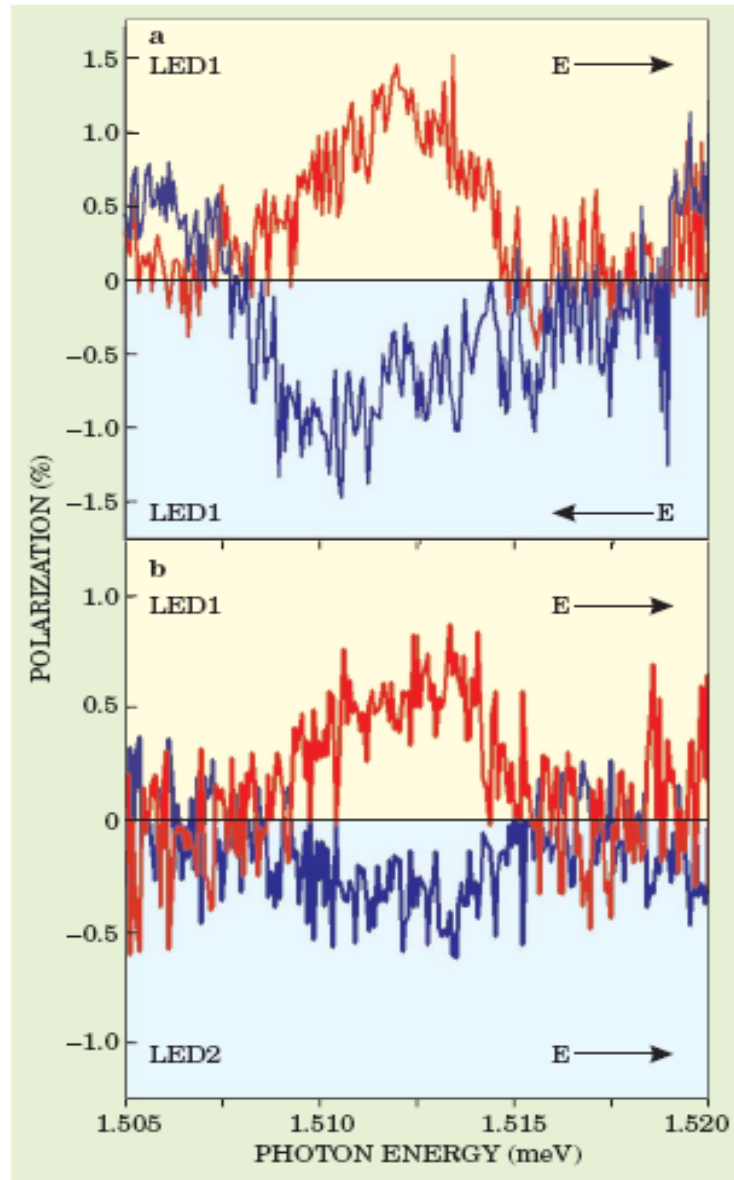


Y.K. Kato, R.C. Myers, A.C. Gossard, and D.D. Awschalom, *Science* **306**, 1910 (2004)

Наблюдение SHE из эффекта Керра

Experiment

2D газ дырок в гетероструктуре
AlGaAs/GaAs
(оптическая регистрация)



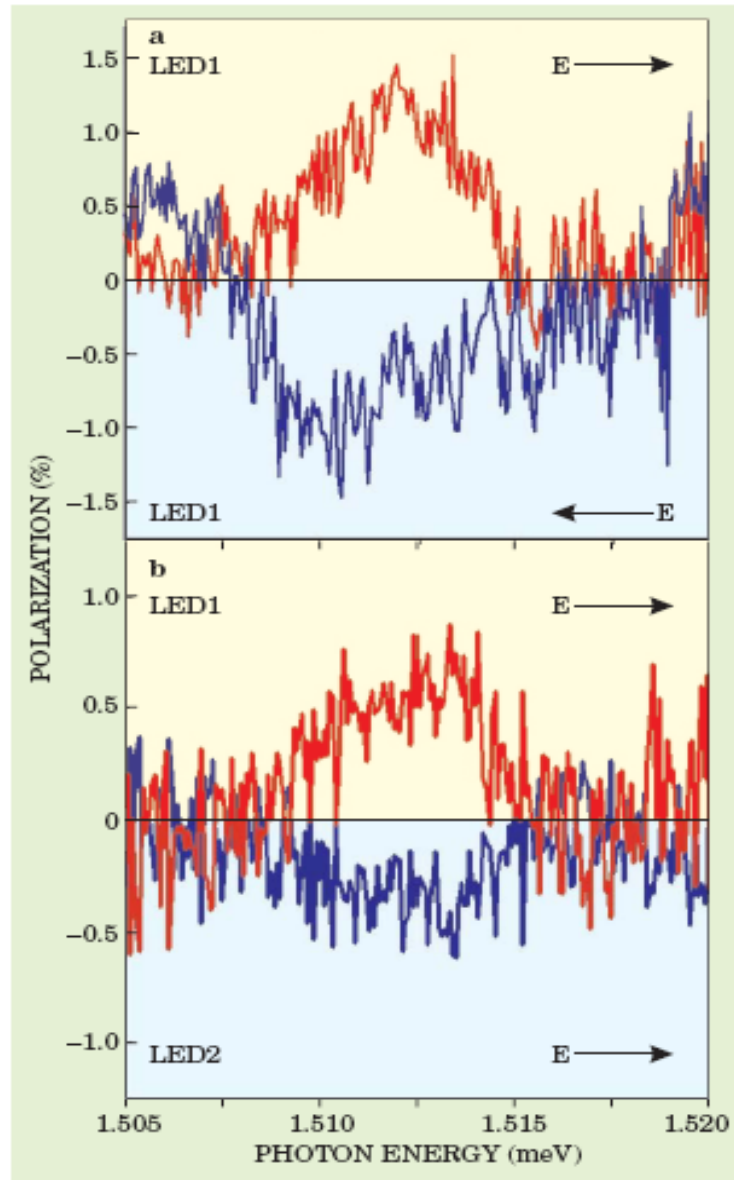
Реверс поляризации
при изменении
направления тока

Противоположная
поляризация спинов на
противоположных краях
образца

First observations of the Spin Hall effect

Experiment

Two-dimensional gas of holes in AlGaAs/GaAs heterostructure (optical registration)



Polarization reversal when the current direction is changed

Polarization at opposite edges of the sample

CONDENSED MATTER PHYSICS

Spin Current Sighting Ends 35-Year Hunt

The electron's charge gets all the glory: It is, after all, responsible for the plethora of electronic gizmos that surround us. But the particle's magnetic behavior—a property known as spin—has also been tantalizing scientists for decades. Thirty-five years ago, for example, Russian theorists suggested that impurity atoms in a semiconductor might interact with electrons' spins to redirect currents flowing through it. A related

for more than a century. But despite decades of work, the spin-based Hall effect had never been spotted—until now.

In a paper published online this week by *Science* (www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1105514), researchers led by David Awschalom, a physicist at the University of California, Santa Barbara (UCSB), report the first experimental sighting of the spin Hall effect. “It is as beautiful as it is a

Бездиссипативный транспорт спинов

Toward dissipationless spin transport in semiconductors

by B. A. Bernevig and S. Zhang

Spintronics, Volume 50, Number 1, 2006

Spin-based electronics promises a radical alternative to charge-based electronics, namely the possibility of logic operations with **much lower power consumption** than equivalent charge-based logic operations. In this paper we review the potential means of **dissipationless spin transport** in semiconductors.

- 1) ALL spin currents, independently of their microscopic mechanism, are dissipationless**
(*spin current does not change sign under time inversion*)
- 2) The existence of dissipationless spin currents does not mean that we can save energy**
(*dissipation is elsewhere: in the charge current that induces the spin current*)

The normal Hall current is dissipationless too!

Does it mean that we should try to reduce energy consumption by building computers utilizing Hall currents??

US Patent 7037807 - Electric field induced spin-polarized current

Inventor(s):

- **Murakami Shuichi**
- **Nagaosa Naoto**
- **Zhang Shoucheng**