

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКСОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ  
АКАДЕМИИ НАУК СССР СОВМЕСТНО С ОТДЕЛЕНИЕМ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
(28—29 октября 1970 г.)**

28 и 29 октября 1970 г. состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР.

На сессии были заслушаны доклады:

1. С. С. Поликанов. Об изомерии формы ядер.
2. В. М. Лобашов. О слабых нуклон-нуклонных взаимодействиях.
3. А. А. Абрикосов, С. Д. Бенеславский. О возможности существования веществ, промежуточных между металлами и диэлектриками.
4. Р. А. Житников. Исследования по оптической ориентации атомов и ее использование для создания приборов квантовой электроники.
5. В. Б. Анзин, М. С. Бреслер, В. Г. Веселаго, Ю. В. Косичкин, Г. Е. Пикус, И. И. Фарбштейн, С. С. Шалыт. Экспериментальное обнаружение магнитного пробоя в полупроводниках.
6. Л. А. Арцимович. Проблема управляемого термоядерного синтеза.
7. М. С. Рабинович. Стеллаторная программа.
8. О. Н. Крохин. Использование лазеров для нагрева плазмы.
9. Л. И. Рудаков. Использование мощных электронных пучков для проблемы управляемого термоядерного синтеза.

Ниже публикуется краткое содержание некоторых из прочитанных докладов.

**С. М. Поликанов. Об изомерии формы ядер**

В настоящее время синтезировано более двадцати спонтанно делящихся изомеров. Экспериментальные исследования свойств этих изомеров показали, что энергия изомеров довольно велика ( $\sim 3 M\epsilon$ ), а спин мал (не превышает нескольких единиц  $\hbar$ ).

Эти результаты позволили высказать гипотезу о том, что спонтанно делящиеся изомеры являются изомерами формы. Это предположение находит дополнительное экспериментальное подтверждение в результатах изучения радиационного захвата нейтронов, приводящего к образованию спонтанно делящихся изомеров  $^{242}\text{Am}$  и  $^{244}\text{Am}$ .

Расчеты, учитывающие оболочечные эффекты при больших деформациях, проведенные Струтинским, привели к появлению дополнительного минимума потенциальной энергии при больших деформациях ядра.

В рамках этой модели изомерные состояния интерпретируются как нижние состояния во второй потенциальной яме.

Дальнейшие экспериментальные исследования спонтанно делящихся изомеров должны быть в значительной степени направлены на получение спектроскопической информации. Большой интерес представляют также поиски новых областей существования изомеров формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Поликанов, УФН 94, (1), 43 (1968).
2. V. M. Strutinsky, S. Bjornholm, Dubna Symposium, Nuclear Structure, 1968, p. 431.
3. S. M., Polikanov, G. Sletten, Nucl. Phys. A151, 656 (1970).

**Р. А. Житников.** Исследования по оптической ориентации атомов и ее использование для создания приборов квантовой электроники

Оптическая накачка (оптическая ориентация атомов), открытая А. Кастлером в 1949 г., превратилась сейчас в самостоятельную интенсивно развивающуюся область радиоспектроскопии<sup>1,2</sup>. Наряду с большим числом новых научных результатов, оптическая накачка дала очень много для квантовой электроники (квантовые стандарты частоты, квантовые магнитометры, квантовые гироскопы).

Сообщение посвящено результатам исследований по оптической накачке, проводящихся в ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР, а также работам по применению оптической накачки для создания новых приборов квантовой электроники.

Одним из направлений этих исследований явилось изучение с помощью оптической накачки природы взаимодействий атомов щелочных металлов в возбужденных состояниях с атомами инертных газов<sup>3-5</sup>. Эти исследования проводились путем наблюдения за поведением резонансных сигналов основного состояния оптически ориентированных атомов щелочных металлов в зависимости от давления и природы инертного газа. Применение вращающегося радиочастотного магнитного поля позволило разделить компоненты сверхтонкой структуры в сигнале магнитного резонанса<sup>5</sup>. Наблюдалось изменение знака резонансного сигнала оптической накачки при росте давления инертного газа вследствие явления перемешивания (столкновительной релаксации) в возбужденном состоянии атома щелочного металла. Исследования, проведенные на изотопах рубидия, позволили выяснить роль ядерного спина в столкновительной релаксации. Определены сечения такой релаксации и константы вандерваальсова взаимодействия между атомами рубидия и различных инертных газов<sup>5</sup>. Разработана теория наблюдавшихся явлений<sup>4</sup>.

В процессе изучения оптической ориентации атомов гелия-4 были обнаружены новые явления, заключающиеся во влиянии спиновой ориентации метастабильных атомов гелия на интенсивность всех оптических линий, испускаемых атомами гелиевой газоразрядной ячейки, и на электронную плотность в плазме этой ячейки<sup>6</sup>.

Объяснение этих явлений, возможно, заключается в том, что основным процессом образования электронов в гелиевой плазме является ионизация метастабилей при их соударениях друг с другом<sup>9</sup>. Выход электронов в таких процессах зависит от взаимной спиновой ориентации сталкивающихся метастабилей. Поэтому электронная плотность в плазме и связанная с ней интенсивность испускаемого света атомами должны зависеть от степени спиновой ориентации метастабилей. По-видимому, здесь имеется и противоположный по знаку конкурирующий процесс, приводящий при росте интенсивности разряда к перемене знака резонансного изменения интенсивности излучения<sup>6</sup>. Возможно, что этим процессом является оптический переход  $2^3P_1 \rightarrow 2^3P_1$  с дальнейшим распадом  $2^3P_1 \rightarrow 1^1S_0$ , приводящий к резонансному уменьшению концентрации метастабилей, возрастающему по величине при росте интенсивности разряда.

Удалось также наблюдать описанные явления при оптической накачке атомов гелия-3 в метастабильном состоянии. С помощью опытов на атомах гелия-3 в настоящее время проводится проверка предложенных объяснений природы этих явлений.

Получена оптическая ориентация как циркулярно поляризованным, так и неполяризованным светом метастабильных атомов неона и ксенона. Эти исследования оптической накачки атомов инертных газов в *P*-состоянии, представляющие значительный теоретический интерес, сейчас продолжают.

В ФТИ АН СССР проводятся работы по созданию новых приборов квантовой электроники на основе оптической ориентации атомов.

Создан новый тип квантового магнитометра: самогенерирующий квантовый магнитометр с оптической ориентацией метастабильных атомов гелия-4 (ГСМ-4)<sup>7</sup>. Этот магнитометр обладает целым рядом преимуществ по сравнению с существующими приборами. Так, в отличие от магнитометров на атомах щелочных металлов, гелиевый магнитометр обладает простой резонансной линией, линейной связью между магнитным полем и резонансной частотой и слабой температурной независимостью. По сравнению с существующими гелиевыми магнитометрами, работающими по схеме автоподстройки частоты генератора, самогенерирующий магнитометр ГСМ-4 обладает преимуществами простоты, компактности и надежности, которые обеспечивает спиновый генератор<sup>7</sup>.

Разработан также макет самогенерирующего магнитометра на оптической ориентации ядерных моментов гелия-3 (ГСМ-3). Этот магнитометр имеет много достоинств при проведении измерений в статических условиях.

Была разработана специальная методика изготовления поглощающих ячеек, с помощью которых получена одновременная оптическая ориентация атомов гелия и щелочного металла в одной ячейке<sup>8</sup>. Созданы также методы стабилизации магнитных полей с помощью спиновых генераторов на оптической накачке атомов щелочных металлов и гелия. Эти результаты могут быть использованы при разработке новых типов ядерных квантовых гироскопов с оптической накачкой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. Соhen - Таппоуджи, А. Кастлер, *Progr. in Optics* 5, 3 (1966).
2. Т. Карвер, *УФН* 84 (2), 325 (1964).
3. В. А. Житников, Р. Р. Кулешов, А. И. Окуневич, *Phys. Lett.* 29A (5), 239 (1969).
4. А. И. Окуневич, В. И. Перель, *ЖЭТФ* 58 (2), 666 (1970).
5. Р. А. Житников, П. П. Кулешов, А. И. Окуневич, Б. Н. Севастьянов, *ЖЭТФ* 58 (3), 831 (1970).
6. Б. Н. Севастьянов, Р. А. Житников, *ЖЭТФ* 56 (5), 1508 (1969).
7. В. Ф. Афанасьев, Р. А. Житников, П. П. Кулешов, *Геомагнетизм и аэрономия* 10 (1), 183 (1970).
8. Р. А. Житников, А. И. Кравцов, *ЖТФ* 40 (10), 2131 (1970).
9. М. V. McCusker, L. L. Hatfield, G. K. Walters, *Phys. Rev. Lett.* 22 (№ 16), 817 (1969).

Основные материалы доклада опубликованы в работах <sup>3-8</sup> цитированной литературы.

**В. Б. Анзин, М. С. Бреслер, В. Г. Веселаго, Ю. В. Косичкин, Г. Е. Пикус, И. И. Фарбштейн и С. С. Шалыт.** Экспериментальное обнаружение магнитного пробоя в полупроводниках

Кроме межзонного магнитного пробоя, наблюдавшегося в целом ряде металлов, теоретически рассматривался также внутризонный магнитный пробой, когда носители тока совершают туннельный переход между траекториями, относящимися к различным долинам одной и той же энергетической зоны, что возможно при наличии в энергетическом спектре седловой точки.

В настоящей работе в результате исследования эффекта Шубникова — де Гааза (ШГ) в монокристаллах теллура было установлено, что в энергетическом спектре валентной зоны теллура имеется седловая точка, отстоящая от края зоны на 2 *мэв*, и наблюдался внутризонный магнитный пробой траекторий носителей для энергий Ферми, близких к энергии седловой точки. Было показано, что закон дисперсии дырок описывается выражением

$$\varepsilon = Ak_z^2 + Bk_{\perp}^2 - \sqrt{\Delta^2 + c^2k_{\perp}^2}, \quad (1)$$

причем численные значения параметров определялись из экспериментальных данных <sup>1,2</sup>.

Согласно (1), при концентрации дырок  $p_{кр} = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (отвечающей энергии седловой точки) в магнитном поле  $\mathbf{H} \perp C_3$  ( $C_3$  — тригональная ось кристалла) носители тока описывают траектории с самопересечением.

В работах Зильбермана и Азбеля <sup>3,4</sup> было показано, что такое движение не может рассматриваться в квазиклассическом приближении; квантовомеханический анализ указывает в этом случае на возможность одновременной реализации двух траекторий — полной гантелеобразной и почти эллиптической, охватывающей примерно вдвое меньшую площадь, что является следствием туннелирования носителей тока с одной квазиклассической орбиты на другую (внутризонный магнитный пробой).

Для рассматриваемой модели магнитный пробой при  $p > p_{кр}$  — пробой шейки гантели — приводит к появлению дополнительных сечений при  $\mathbf{H} \perp C_1^{1,2}$ . При  $p < p_{кр}$  происходит перескок носителя тока с одной эллиптической орбиты на другую с образованием траектории, охватывающей примерно удвоенную площадь.

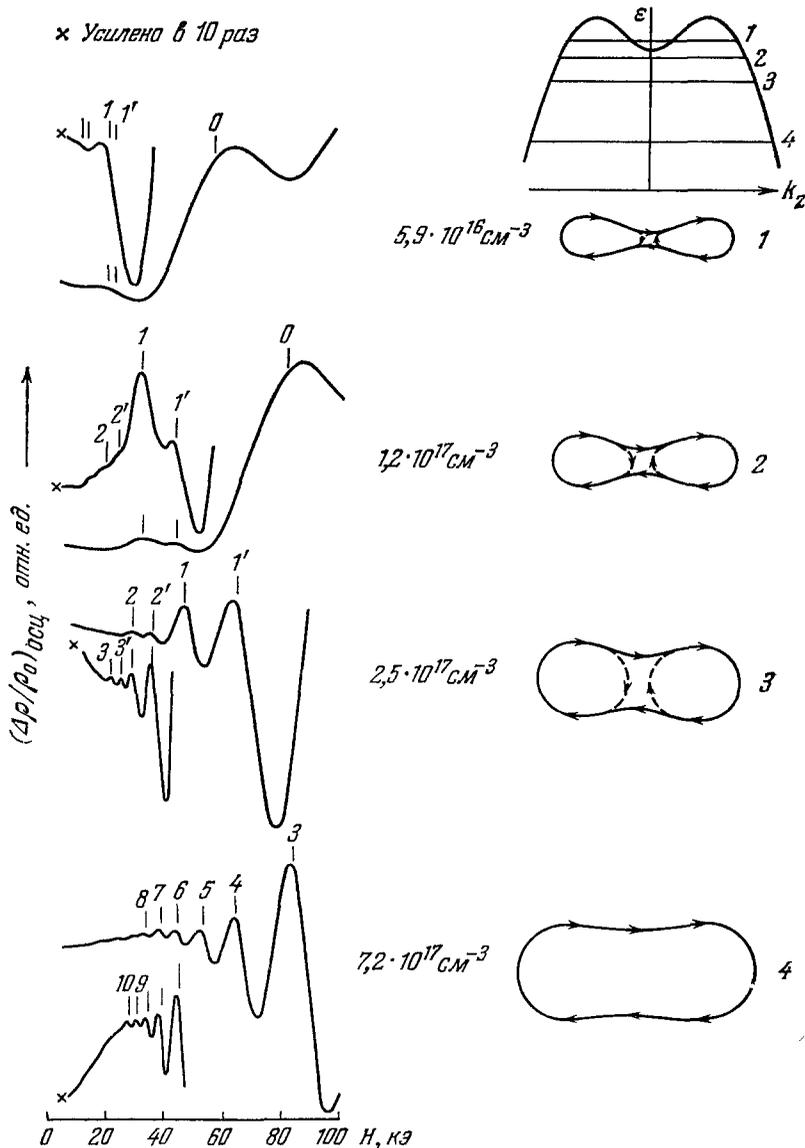
При точном решении такая качественная картина соответствует расщеплению в магнитном поле системы уровней для одного эллипсоида на две подсистемы, отвечающие двум типам орбит носителей в магнитном поле. В результате становится возможным наблюдение максимума магнетосопротивления, соответствующего нулевому уровню Ландау.

На рисунке представлены экспериментальные результаты исследования осцилляций ШГ в магнитном поле до 100 *кэ* при температуре жидкого гелия на образцах с различной концентрацией дырок вблизи  $p_{кр}$ .

Представленные результаты показывают, что осуществление магнитного пробоя приводит к одновременному появлению в осцилляциях гармоник, отвечающих двум типам возможных траекторий носителей, причем вклад каждой из траекторий в квантовые осцилляции ШГ меняется с повышением концентрации, т. е. с изменением вероятности пробоя.

Формулы квантования, приведенные в работе Азбеля <sup>4</sup>, а также квазиклассические правила квантования, которые можно применять в области энергий, достаточно удаленных от критической, позволяют построить зависимость положения уровней

Ландау от магнитного поля для закона дисперсии (1). Такой расчет удовлетворительно согласуется с приведенными экспериментальными данными.



Исследованная угловая зависимость положения нулевого максимума осцилляций от угла между направлением магнитного поля  $\mathbf{H}$  и осью  $C_3$  подтверждает интерпретацию наблюдаемого явления как внутризонного магнитного пробоя.

Результаты, представленные в докладе, опубликованы в статьях 1,2,5.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. С. Бреслер, И. И. Фарбштейн, Д. В. Машовец, Ю. В. Косичкин, В. Г. Веселаго, Phys. Lett. 29A, 23 (1969).
2. М. С. Бреслер, В. Г. Веселаго, Ю. В. Косичкин, Г. Е. Пикус, И. И. Фарбштейн, С. С. Шалыт, ЖЭТФ 57, 1479 (1969).
3. Г. Е. Зильберман, ЖЭТФ 34, 748 (1958).
4. М. Я. Азбель, ЖЭТФ 39, 878, 1276 (1960).
5. В. Б. Анзин, М. С. Бреслер, И. И. Фарбштейн, Ю. В. Косичкин, В. Г. Веселаго, Phys. Stat. Sol. 40, 417 (1970).

**М. С. Рабинович. Стеллараторная программа**

Стеллараторная программа была и остается одной из основных программ управляемого термоядерного синтеза (УТС). Принцип удержания плазмы в стеллараторе и токамаке один и тот же. Удержание плазмы определяется магнитными поверхностями с достаточно большим углом вращения силовых линий ( $i$ ), широм  $\theta = \frac{r^2}{R} \frac{di}{dr}$ , где  $r$  и  $R$  — малый и большой радиус тора, и ямой магнитного поля, усредненного вдоль силовой линии  $\langle H \rangle = \left\{ \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{1}{l} \int dl \right\} H$ . Недостатки стелларатора — в отсутствие осевой симметрии, сложности создания магнитного поля и, как следствие этих причин, более низкая эффективность использования энергии магнитного поля. Преимущество — в возможности управления параметрами поля, достижение больших углов  $i$ , создание стационарных установок, разнообразие конфигураций. Первый этап стеллараторной программы — это создание необходимых магнитных полей, методов измерения и коррекции магнитных поверхностей. Этот необходимый этап исследований уже пройден. Попытка перепрыгнуть через данный этап привела к неудаче стеллараторной программы лаборатории физики плазмы Принстонского университета, где в 1952 г. впервые возникла сама идея стеллараторов (Л. Спитцер). В настоящее время получены идеальные магнитные поверхности с углом  $i = 6\lambda$  (ФИАН), большим широм  $\theta = 0,1$  (ФТИ АН УССР и Калем, Англия).

Второй этап стеллараторной программы — это исследование удержания плазмы. Основные результаты этого этапа следующие:

1) В кинетическом режиме (длина свободного пробега больше периметра установки) при температурах  $T_e = 5-10$  эв,  $T_i = 20-40$  эв, плотности плазмы  $n < 10^{11}$  см<sup>-3</sup> время жизни частиц пропорционально углу вращения силовых линий и при шире  $\theta \gtrsim 0,05$  отличается от «классических» значений, определяемых парными соударениями, в пять раз.

2) При некоторых резонансных значениях угла  $i$ , когда силовая линия замыкается после небольшого числа оборотов  $\frac{i}{2\pi} = \frac{p}{q}$ , где  $p$  и  $q$  — небольшие целые числа, наблюдается резкое уменьшение времени жизни плазмы, по-видимому, связанное с образованием конвективных ячеек.

3) В гидродинамическом режиме получены классические времена жизни в холодной плазме (Гаршинг, ФРГ). Однако в этом случае бомовское время только на один порядок меньше классического. На установке «Ураган» (ФТИ АН УССР) получены времена жизни частиц около 30 бомовских времен и энергетическое время жизни четырех бомовских времен в плотной горячей плазме. Эти результаты являются рекордными. В настоящее время не обнаружено никаких экспериментальных или теоретических данных, которые в какой-то мере скомпрометировали стеллараторную программу. Однако из-за сложности конструкции стеллараторов развитие программы происходит медленно с использованием главным образом малых модельных установок.

Основными задачами стеллараторной программы в ближайшее время является:

1) Исследование удержания плазмы с плотностью  $10^{12}-10^{13}$  см при температуре  $T_e \sim 1$  кэв и при поперечных размерах плазмы 20 см. Для этой цели, по-видимому, будут созданы в ближайшие годы специальные установки (СССР, ФРГ, Англия).

2) Исследование роли конвективных ячеек в потерях плазмы и разработки методов борьбы с ними.

3) Разработка новых методов инжекции и нагрева плазмы, в том числе высокочастотного и лазерного. Выяснение роли инжекции в появлении конвективных ячеек и аномального ухода плазмы.

4) Поиск и выбор оптимальных систем, которые, по-видимому, будут представлять среднее между установками, с двух- и трехзаходными винтовыми обмотками, стеллараторами и торсотронами.

5) Применение на стеллараторах различных высокочастотных систем стабилизации неустойчивостей, в том числе с обратными связями.

6) Продолжение разработки технических проблем эффективного использования магнитных полей, применение криогенных обмоток и помещение обмоток в вакуумную камеру. Разработка гипотетических реакторов на основе стеллараторов.

**О. Н. Крохин. Использование лазеров для нагрева плазмы**

Мощные импульсные лазеры дают возможность получить высокие скорости энерговыделения в плотной плазме и поэтому могут использоваться для эффективного нагрева плазмы до термоядерных температур. В плане применения лазеров для термоядерного синтеза наиболее неприятным фактором является низкий к. п. д. лазерных установок, составляющий величину порядка 0,2—0,3%. Это обстоятельство делает

практически невозможным получение положительного выхода прямым на резонанс в некоторой области плазмы световым импульсом (если, конечно, к. п. д. лазеров в будущем не повысится). Поэтому, по-видимому, единственным способом получения энергетического выигрыша является переход к режиму «термоядерного горения» вещества, в котором роль лазера заключается в создании подходящих начальных условий. Другими словами, это означает, что, поскольку световая энергия дорога, необходимо на первом этапе изучить возможности получения достаточно больших коэффициентов усиления по энергии в плазме, нагреваемой лазерным излучением.

Расчеты показывают, что перспективными являются по крайней мере два направления: использование режима инерционного «самоудержания» и кумулятивные эффекты. В первом случае критерий  $nt = 10^{14}$  может быть выполнен при температуре плазмы 8—10 *кэв*, которая достигается при плотности энергии лазерного импульса на поверхности твердого дейтерия — трития  $\sim 10^5$  *дж/мм<sup>2</sup>* и длительности импульса  $10^{-9}$  *сек*. Этот режим, по-видимому, не может дать существенного выигрыша по энергии, но, вероятно, он может быть улучшен за счет специальной геометрии эксперимента, позволяющей удерживать плазму от разлета в течение гораздо более длительного времени, чем время «самоудержания».

Основные результаты опубликованы в журнале «Вестник АН СССР», № 6, 1970 г. (статья Н. Г. Басова, О. Н. Крохина «Применение лазеров для термоядерного синтеза»).

---