

Речь пойдет о способах генерации сильных стационарных магнитных полей, пригодных не только для физических экспериментов, но и для химических, биологических, биофизических и т. д.

Сильное магнитное поле, взаимодействуя с магнитными моментами атомов, ядер, электронов, воздействует на любое вещество, включая объекты живой природы, причем, в большинстве случаев это воздействие растёт с увеличением магнитного поля.

В качестве примера влияния сильного поля на вещество можно назвать необратимое индуцирование новых магнитных фаз в веществах, изменение топологии поверхности Ферми под действием поля (вплоть до магнитного пробоя), сильное воздействие на температуру некоторых фазовых переходов, земановское расщепление спектральных линий и т. д.). Причем применение сверхсильных полей иногда снимает другие «сверх»-требования (например, к чистоте кристалла).

Имеется обширный круг задач, при решении которых предпочтительно (или необходимо) применение стационарных полей. Назову только некоторые задачи.

Исследование металлов, для которых импульсные поля часто неприменимы из-за вихревых токов. Здесь наиболее важная проблема — восстановление поверхности Ферми. Энергия взаимодействия магнитного момента электронов с полем для полей $\sim 10^5$ эрстед (э) оказывается сравнимой с энергией Ферми, поэтому применение сильных полей для восстановления поверхности наиболее целесообразно.

Исследование обменных взаимодействий в магнитоупорядоченных средах. Энергия обменного взаимодействия, приведенная к полю, составляет $\sim 10^4 \div 10^7$ э, поэтому применение сильных ($\sim 10^5$ э) полей приводит к существенному изменению уровней, иногда вплоть до перемагничивания («опрокидывания») отдельных подрешеток.

Радиоспектроскопические исследования (ФМР, ЭПР, ЯМР) в различных областях физики, химии, биологии. Повышение чувствительности и разрешения за счет повыше-

ния поля позволяет резко увеличить количество веществ, поддающихся исследованию данными методами (в т. ч. полупроводников, металлов, диэлектриков, биологических веществ и т. д.).

Изучение полей на ядрах в твердом теле, включая ферромагнетики, вплоть до перемагничивания ядерных систем.

Изучение фазовых превращений в сильных магнитных полях.

Спектральные исследования в сильных магнитных по-

лях ферромагнетиков препятствует получению больших полей. С помощью электромагнитов удается получать поля лишь до $20 \div 30$ кэ. Правда, используя массивные сердечники и заостренные полюсные наконечники, можно поднять поле, сконцентрировав его в очень малом объеме. Угрожающе быстрый рост веса таких магнитов при попытке поднять величину поля ставит их в ряд с вымершими динозаврами. Действительно, электромагниты на поле $60 \div 70$ кэ в объеме не-

в области сверхпроводников и, следовательно, сверхпроводящих соленоидов возможен лишь при наличии полей, которые сверхпроводящими соленоидами создать нельзя.

Основная трудность, с которой приходится сталкиваться при создании сильных магнитных полей, объясняется тем, что энергозатраты на их создание растут пропорционально квадрату поля. Причем, в полях, больших $100 \div 150$ кэ, эта зависимость «портится», потому что приходится жертвовать эффек-

«РАСКРУЧИВАЮЩИЙСЯ» СО

лях (включая магнитооптические).

Изучение плазмы в твердом теле.

Влияние сильных полей на специфические биологические объекты и т. д.

Особо необходимо подчеркнуть важность комплексных исследований в экстремальных условиях при одновременном воздействии на вещество сильного магнитного поля, высоких давлений, низких температур и т. д.

Сильные магнитные поля находят применение и в технике, хотя в этой области делаются лишь первые шаги. Здесь трудно удержаться, чтобы не привести довольно впечатляющий, хотя и мрачный пример использования первого водоохлаждаемого соленоида на 100 килоэрстед (кэ) (построенного Френсисом Битгером в США) для разделения изотопов урана во время осуществления Манхэттенского проекта по созданию атомной бомбы.

ТЕПЕРЬ остановимся на способах генерации сильных стационарных магнитных полей. Широко применяемые электромагниты не годятся для этой цели, так как ограниченная индукция насыще-

нескольких кубических миллиметров весят около 100 тонн.

В дальнейшем в этой статье будем называть сильными полями* такие поля, которые практически недостижимы с помощью электромагнитов с ферромагнитными сердечниками (т. е. поля выше $60 \div 70$ кэ).

Стационарные поля, лежащие у нижней границы диапазона сильных полей (порядка 100 кэ), можно получать с помощью сверхпроводящих соленоидов. К сожалению, сверхпроводимость разрушается в сильных магнитных полях, в том числе и в полях, создаваемых самим сверхпроводящим соленоидом. Предельные поля, полученные на сверхпроводящих соленоидах, лежат около $150 \div 160$ кэ (США).

Наибольшие же стационарные поля в настоящее время получают с помощью водоохлаждаемых (или комбинированных) соленоидов.

Возникающий вопрос о времени спор о том, каким соленоидам отдать предпочтение — водоохлаждаемым или сверхпроводящим, вряд ли целесообразен. Не вдаваясь в подробности, можно привести лишь один аргумент: прогресс

тивностью соленоида в угоду его механической прочности и тепловому режиму, при этом энергозатраты возрастают. Так, для генерации полей $\sim 150 \div 200$ кэ в рабочем диаметре в несколько сантиметров требуются мощности $\sim 8 \div 10$ Мвт.

Вся эта энергия выделяется в виде тепла в довольно малом объеме (в обмотке соленоида). Отсюда вторая проблема — проблема эффективного теплоотвода. В лучших конструкциях соленоидов удается отводить до 1000 Вт с квадратного сантиметра охлаждаемой поверхности витков.

Таким образом, для работы мощных соленоидов нужны большие энерго- и водоресурсы. С этой точки зрения Красноярск наиболее подходящее место для организации крупного центра сильных магнитных полей. Этому способствует и многопрофильность Института физики. Идею создания такого центра в Красноярске выдвинул в свое время академик Л. В. Киренский.

Третья трудность при создании сильных магнитных по-

лей заключается в необходимости сдерживать огромные пондеромоторные усилия, возникающие из-за взаимодействия витков обмотки соленоида с собственным полем и растущие пропорционально квадрату напряженности поля. Так, при генерации поля 200 кэ, в обмотке соленоида развивается давление более 3 тысяч атмосфер.

Ясно, что даже при наличии достаточной энергии, предел генерируемых полей может быть поднят лишь в результате новых конструктив-

ных галет показали, что в соленоидах с обмотками таковой конструкции можно получить поля ~ 300 кэ (разумеется, при достаточном количестве электроэнергии). Нам кажется, что такие конструкции могут быть весьма полезны при создании соленоидов с большой однородностью поля или, наоборот, с заданным градиентом поля.

Понятно желание применить разработанную технологию создания монолитных галет к известным конструкциям соленоидов для улучшения их параметров. Это при-

охлаждения выполняются в уже готовых галетах, то полностью исключается возможность перекрытия канала изоляцией. Это значительно снижает требования к точности изготовления. Кроме того, применение галет повышает прочность обмотки в основном за счет упрочнения самого слабого места в обмотке — изоляции (за счет ее «монокристаллического» соединения с проводящим диском). Однако основное преимущество заключается в том, что в таких галетах можно создать заданную «шероховатость» стенок

це металл — вода в каналах охлаждения составлял ≈ 2400 вт/см², что примерно вдвое превышает соответствующую величину в известных соленоидах.

Разработанные галеты позволяют значительно повысить объемную плотность энергии (при одновременном снижении гидравлического трения в каналах охлаждения) и, следовательно, поднять максимальную величину генерируемого соленоидом поля.

ТЕПЕРЬ остановимся на другом пути решения вопросов прочности соленоидов, который, видимо, в других магнитных лабораториях не используется.

В технике известны случаи, когда уменьшение жесткости системы в местах концентрации напряжений повышает прочность всей конструкции в целом. Вспомним, хотя бы, гибкие крылья у самолетов. Где гнется, там не ломается!

А нельзя ли пойти по аналогичному пути при создании полей? Заменить жесткую обмотку соленоида такой, которая под действием пондеромоторных сил может перемищиться (раскручиваться). Разумеется, если ничто не ограничивает этого раскручивания, то соленоид не получится. По соленоиду не получится в некий бандаж, например, цилиндрический, и посмотрим, как будет вести себя обмотка под действием пондеромоторных сил. Для начала рассмотрим вариант, когда трение между витками отсутствует. Решение задачи по распределению механических напряжений в этом случае кажется очевидным и без математических выкладок. Под действием пондеромоторных сил обмотка будет раскручиваться до тех пор, пока тангенциальные напряжения (наиболее опасные!) не станут равными нулю. В равновесном состоянии в витках такой обмотки будут существовать лишь нормальные (радиальные) механические напряжения, возрастающие по мере увеличения радиуса (из-за объемного характера пондеромоторных сил), передаваемые на бандаж. Такое перераспределение напряжений при использовании обмоток определенной геометрии может быть весьма выгодным.

Создание сильных стационарных магнитных полей для физических экспериментов

СОЛЕНИОИД

ных решений, позволяющих поднять плотность теплового потока при охлаждении соленоида и повысить устойчивость обмотки к пондеромоторным силам*. Вместе с тем, разрабатываемые конструкции должны обладать хорошей энергетической эффективностью.

Естественный путь увеличения прочности состоит в придании максимальной жесткости обмотке соленоида. На основании опыта, приобретенного при работе над импульсными полями, в лаборатории сильных магнитных полей Института физики был разработан универсальный элемент для стационарных соленоидов, имеющий очень высокую жесткость: монолитная галета с постоянной по радиусу плотностью тока. На основе таких галет был разработан соленоид (обмотка из 12 галет), генерирующий поле 125 кэ при потребляемой мощности 4,2 Мвт (плотность тока $1,3 \times 10^4$ а/см²). Прочностные и тепловые испытания отдель-

ного биттеровского соленоида. С помощью соленоидов именно биттеровского типа сейчас получают максимальные магнитные поля. Обмотка таких соленоидов состоит из отдельных проводящих и изолирующих дисков с большим количеством отверстий для охлаждения. В обратной обмотке проводящие диски образуют спираль, по которой и течет ток. Причем, плотность тока оказывается обратно пропорциональной радиусу обмотки, что обеспечивает довольно хорошую энергетическую эффективность биттеровских соленоидов.

Однако есть у такой обмотки и уязвимое место: при сборке из-за различного рода перекосов и деформаций, особенно в изоляционных дисках, нередко каналы охлаждения могут быть в каком-либо месте частично перекрыты. При работе это неминуемо создает локальный перегрев и выход обмотки из строя.

В разработанных нами соленоидах обмотка собирается не из большого числа отдельных дисков, а из сравнительно малого количества биттеровских галет. Если каналы

каналов охлаждения химическим травлением готовой галеты и оптимизировать таким образом теплопередачу от обмотки к охлаждающей жидкости. А это, в свою очередь, даст серьезный выигрыш в величине поля. Проверка работоспособности большого поля и, следовательно, больших пондеромоторных сил проводилась на трехсекционном биттеровском соленоиде международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (ПНР). Испытания проводились в суммарном поле, равном 190 кэ; поле, создаваемое внутренней секцией, набранной из 12 галет, составляло 70 кэ. Гидравлическое сопротивление галетной секции оказалось в 1,5 раза меньше гидравлического сопротивления такой секции, набранной из отдельных дисков.

В этой же лаборатории были проведены испытания тепловых режимов наших галет. При предельно достижимом токе его максимальная плотность в медных витках галет достигала 1,2 ка/мм², а объемная плотность энергии в обмотке — 10,5 квт/см³. При этом тепловой поток на грани-

* Пондеромоторные силы — силы взаимодействия проводника с током и магнитного поля, которое создает этот же проводник.

Так, например, прочность ленты при действии сил в нормальном к ее плоскости направлении значительно выше, чем при действии сил вдоль ленты. Такой соленоид был бы достаточно прочным, но он не осуществим, так как между витками всегда есть трение. Однако и в этом случае, при реальных коэффициентах трения, как показал проведенный анализ, величина максимальных механических тангенциальных напряжений в обмотке соленоида примерно вдвое меньше максимальных механических напряжений в «жестких» изотропных обмотках. Полученный результат показал, что избранный путь может (а по нашему мнению, — и должен) быть перспективным.

ПРАКТИЧЕСКАЯ реализация идеи раскручивающегося соленоида осуществлена на ленточных соленоидах. Предварительно были проведены модельные эксперименты на импульсных ленточных соленоидах, а затем изготовлен стационарный соленоид, который, кстати, был первым стационарным, изготовленным в лаборатории.

Обмотка этого соленоида была выполнена из твердой медной ленты, поперек которой проштампованы каналы охлаждения (теперь такие каналы выдавливаются методом прокатки ленты). Внутренний контакт нашей конструкции мог поворачиваться и давал обмотке возможность раскручиваться в некоторых пределах под действием пондеромоторных сил. Такой соленоид генерирует поле 140 кэ при токе 20 ка (и потребляемой мощности 4 Мвт) в рабочем канале 34 мм.

Были разработаны и испытаны модификации ленточных соленоидов — соленоиды с трапецевидной обмоткой и аксиально-секционированный (для источников тока с повышенным напряжением). Такие соленоиды генерируют поля 150 кэ.

Необходимо отметить, что конструкция ленточных соленоидов достаточно проста; только не надо думать, что она означает простоту проблемы в целом. Просто найдено довольно изящное решение для полей такого диапазона. Действительно, сам процесс изготовления соленоида, последовательность операций довольно просты, сильно ослаблены требования к прочности,

каналы охлаждения не перегибаются, поэтому может быть ослаблено и требование к чистоте охлаждающей воды. Нам кажется, что ленточные конструкции себя еще полностью не исчерпали, работа над ними продолжается.

КЛАССИЧЕСКИЕ конструкции биттеровского и ленточного типа при возможных ухищрениях, видимо, позволяют подняться до полей 250–300 кэ (в стационарном режиме). Дальнейший рост поля потребует принципиальных изменений в конструкциях соленоидов, поэтому мы считаем необходимым вести некоторую теоретическую проработку данного вопроса (для осуществления задела). Одно из возможных направлений — создание обмоток, в которых все витки должны иметь одинаковые механические напряжения («равнонагруженная» обмотка), равные предельно допустимым. Такую «равнонагруженность» возможно создать соответствующим распределением плотности тока по объему соленоида.

Проведен всесторонний анализ различных «равнонагруженных» конфигураций и разработана методика машинного расчета таких соленоидов. Расчеты, проведенные с использованием развитой методики, показали, что при использовании существующих проводящих материалов достижимы поля величиной до 400 кэ при достаточно высокой энергетической эффективности соленоидов.

Однако для генерации таких полей требуется не только создать соленоид, но и решить проблему его питания. А так как потребляемая при этом мощность измеряется уже десятками мегаватт, то это, естественно, вызывает необходимость строительства специальных энергоемких сооружений и капитальных затрат.

Тем не менее кажется, что открывающиеся при применении таких сверхсильных полей уникальные возможности для экспериментов оправдали бы все затраты.

Б. ХРУСТАЛЕВ,
кандидат физико-математических наук.

Институт физики имени Л. В. Киренского СО АН СССР.

г. КРАСНОЯРСК.