

Последние 50 лет в мире интенсивно развивалась новая область исследований — физика и техника получения и применения сверхсильных магнитных полей, то есть полей, превышающих 1 МГс (100 Тл). При разработке различных систем, использующих столь высокие магнитные поля и соответствующие им плотности электромагнитной энергии (например, для поля 10 МГс плотность энергии магнитного поля

в сторону вакуума или плазмы или из области вакуума в сторону изолятора, — поверхностные разряды подразделяются на Н-отжатые и Н-прижатые, т. е. магнитное давление либо отбрасывает пары от поверхности изолятора, либо, наоборот, прижимает их. Мы остановимся на случае Н-прижатого (магнитоприжатого) разряда, имеющем много общего со случаем диффузии сверхсильного магнитного поля в металл, рас-

давление будет прижимать зону разряда к изолятору) он будет препятствовать выходу магнитного потока из области. Другим примером магнитоприжатого разряда может являться разряд на поверхности изолятора при измерении магнитных полей датчиками, помещенными в изолятор. При помещении в магнитное поле тела из изолятора или холодной плотной плазмы при проникновении магнитного поля внутрь такого

МАГНИТОПРИЖАТЫЙ РАЗРЯД НА ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯТОРА В СВЕРХСИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

С. Ф. ГАРАНИН

примерно в 40 раз превышает плотность энергии взрывчатых веществ, а магнитное давление примерно равно давлению в центре Земли) в различных узлах и устройствах, возникает необходимость передачи электромагнитной энергии через поверхность изолятора. В работе узлов, использующих такую передачу, может возникнуть поверхностный пробой изолятора и его последующее развитие. В этом случае часть тока (или весь ток) ответвляется в разряд, в результате чего мощность и магнитный поток, передаваемые в нагрузку через поверхность изолятора, уменьшаются. В зависимости от того, в каком направлении вытекает магнитный поток: из изолятора

смотренным в статье автора в журнале «Атом» № 32 (2006, с. 21).

Примером задачи об Н-прижатом разряде может быть такая ситуация: вначале в контуре, окружающем некоторую область с магнитным полем, увеличивается ток, причем магнитный поток в эту область поступает через изолятор. Затем ток, запитывающий контур, начинает уменьшаться, и магнитный поток начинает уходить из области. На поверхности изолятора появляется напряжение, которое может вызвать пробой по этой поверхности. В результате развития разряда (в котором, поскольку магнитное поле в контуре будет выше, чем со стороны запитки, магнитное

тела также возможно формирование магнитоприжатого разряда.

Аналогично задаче о проникновении сверхсильного магнитного поля в металл проникновение магнитного поля в изолятор описывается уравнением диффузии, причем коэффициент магнитной диффузии D обратно пропорционален проводимости (пропорционален удельному сопротивлению) материала стенки. Зная коэффициент диффузии D , можно оценить глубину проникновения магнитного поля в материал (толщину так называемого скин-слоя — слоя, в который проникло магнитное поле) $\delta \sim \sqrt{Dt}$, где t — характерное время приложения магнитного поля к границе стенки. В боль-

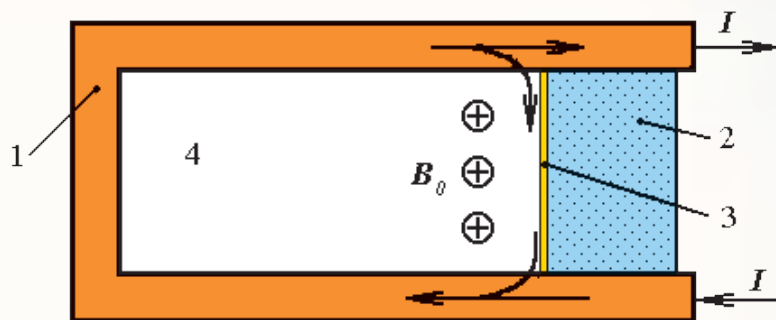


Рис. 1. Схема возникновения H-прижатого разряда по поверхности изолятора: 1 — проводящие стенки; 2 — изолятор; 3 — плазма разряда; 4 — рабочий объем

шинстве интересных для приложений случаев можно считать, что образующаяся в разряде плазма паров успевает прийти в равновесие с силами, действующими со стороны магнитного поля $B^2/8\pi$, поэтому можно считать, что полное давление (вещества и магнитного поля) в каждый момент времени постоянно по всей зоне разряда. Саму зону разряда обычно можно считать плоским слоем, так как обычно ее толщина мала по сравнению с размерами установки.

Вначале проводимость изолятора равна нулю, но по мере развития разряда на поверхности изолятора образуется плазма, проводимость которой зависит в основном от температуры: чем выше температура, тем больше проводимость. Возникает вопрос: как для заданного уровня магнитного поля B определить характерную для разряда проводимость и тем самым найти толщину возникающей зоны разряда δ , а значит, и все характеристики разряда (сопротивление разряда, напряжение на нем и т. д.)? Ведь при возрастающей по мере повышения температуры проводимости, казалось бы, могла возникнуть следующая ситуация: увеличение нагрева

зоны разряда джоулевым теплом приводит к росту проводимости и еще большему нагреву до тех пор, пока весь ток не начнет течь по тонкому слою чрезвычайно перегретой плазмы. Эту ситуацию, в которой делается попытка описать развитие разряда только проводимостью, можно назвать бесконечно быстрым скинированием разряда в бесконечно тонкий слой.

Однако аналогично задаче о магнитной диффузии в металл существует процесс, ограничивающий перегрев слоя плазмы, по которому течет ток. Этим процессом является теплопроводность. В условиях горячей плазмы, образованной из паров изолятора, теплопроводность будет определяться переносом излучения. Из-за наличия теплопроводности и остывания плазменного слоя за счет излучения перегрева плазмы не происходит. Профили температуры, плотности и магнитного поля, возникающие в магнитоприжатом разряде при диффузии постоянного магнитного поля $B_0 = 1$ МГс в изолятор (оргстекло) представлены на рис. 1.

Для постоянного магнитного поля на границе задача, как и для диффузии в металл,

оказывается автомодельной, с автомодельной переменной x/\sqrt{t} . Зная пространственное распределение величин в какой-то момент времени (например, $t = 1$ мкс, см. рис. 1), легко пересчитать это распределение на любой другой момент времени, пропорционально \sqrt{t} растянув или сжав пространственную координату x . Дополнительным интересным обстоятельством в случае магнитоприжатого разряда по поверхности изолятора оказывается то, что в определенном интервале магнитных полей задача оказывается автомодельной также и по магнитному полю, т. е. она допускает пересчет для любого магнитного поля, заданного на границе. Для пересчета к произвольному полю B_0 нужно только уменьшить масштаб координат пропорционально $B_0^{0,36}$, увеличить магнитные поля пропорционально B_0 , температуры — пропорционально $B_0^{1,62}$, плотности — пропорционально $B_0^{1,35}$, и если интересуют другие величины, то их также изменить пропорционально определенным степеням B_0 , например, давление должно быть увеличено пропорционально B_0 .

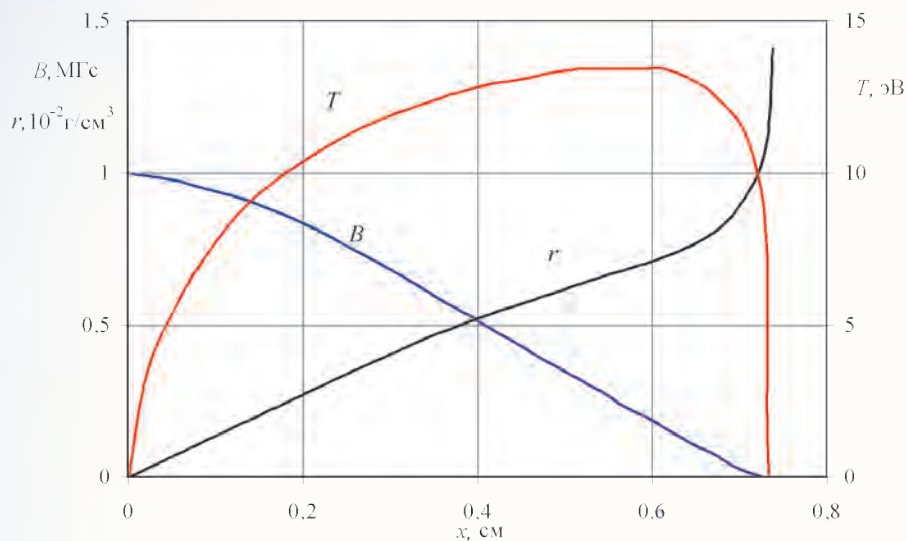


Рис. 2. Профили температуры, T плотности r и магнитного поля B при диффузии магнитного поля $B_0 = 1$ МГц в изолятор на момент времени $t = 1$ мкс

При конечном сопротивлении разряда магнитный поток будет поступать вглубь изолятора, и если контур за изолятором будет замкнутым, то там будет расти магнитное поле (и магнитные поля на входе в изолятор и внутри изолятора могут начать выравниваться). При постоянном магнитном поле электрическое поле, обусловленное сопротивлением разряда, внутри изолятора будет уменьшаться со временем обратно пропорционально \sqrt{t} и составит для $B_0 = 1$ МГц и $t = 1$ мкс примерно 14 кВ/см. При увеличении B_0 электрическое поле будет расти пропорционально $B_0^{0,64}$.

Если сравнивать характерные пространственные масштабы и температуры для случаев диффузии магнитного поля в металл и магнитопржатого разряда, то оказывается, что толщина скин-слоя при диффузии магнитного поля в металл гораздо меньше толщины зоны магнитопржатого разряда. Это можно объяснить существенным влиянием лежащего под плазменным слоем проводящего материала, хотя и потерявшего первоначальную прово-

димость, но все еще достаточно проводящего. Этот материал имеет большую проводимость, чем изоляторная плазма в магнитопржатом разряде и, в отличие от изоляторной плазмы, не позволяет магнитному полю быстро диффундировать внутрь вещества. Шунтирование протекающего по плазме тока током, протекающим по этому материалу, приводит к гораздо меньшим джоулевым разогревам плазмы при магнитной диффузии в металл и, соответственно, к гораздо меньшим, чем в случае магнитопржатого разряда, температурам. Так, если для $B_0 = 5$ МГц при диффузии в металл характерная температура плазменного слоя 10 эВ, то в магнитопржатом разряде на поверхности изолятора она составляет около 30 эВ.

Изложенные представления о проникновении сверхсильных магнитных полей в вещество нуждаются в количественном уточнении теоретических моделей и расчетов, а также в сравнении теоретических результатов с экспериментом. В настоящее время не существует экспериментальных работ, специаль-

но посвященных исследованию магнитопржатого разряда, хотя во многих установках, использующих сильные магнитные поля, он образуется и его влияние оказывается важным.

Рассмотренный в статье поверхностный разряд — явление нежелательное: он ухудшает работу узла. Но есть установки, где такой разряд создается специально. Поскольку температура на поверхности Н-пржатого разряда может составлять десятки электронвольт (сотни тысяч градусов), то его можно использовать как мощный источник ультрафиолетового излучения. Для меньших полей это будет не ультрафиолет, а видимый свет. Работы по созданию таких источников излучения для научных и промышленных приложений ведутся во многих лабораториях.

ГАРАНИН
Сергей Флорович —
начальник отдела
ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор физ.-мат. наук