

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранчиков Е. И., Гордеев А. В. и др. Магнитная самоизоляция электронных пучков в вакуумных линиях.— ЖЭТФ, 1978, т. 75, вып. 6.
2. Рудаков Л. И. Транспортировка РЭП до термоядерной мишени.— Физика плазмы, 1978, т. 4, вып. 1.
3. Гордеев А. В. О возможности срыва магнитной самоизоляции.— Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, вып. 16.
4. Федосов А. И. К вопросу о магнитной самоизоляции.— В кн.: Тезисы докл. III Всесоюз. симпоз. по сильноточной электронике. Томск: изд. Ин-та сильноточной электроники СО АН СССР, 1978.
5. Брейзман Б. Н., Рютов Д. Д. К теории фокусировки релятивистского электронного пучка в диоде.— ДАН СССР, 1975, т. 225, № 6.
6. Бугаев С. П., Литвинов Е. А. и др. Взрывная эмиссия электронов.— УФН, 1975, т. 115, вып. 1.
7. Головин Г. Т. Численное исследование стационарного движения РЭП в цилиндрическом вакуумном диоде с использованием метода макрочастиц.— В кн.: Разностные методы математической физики/Под ред. А. А. Самарского, Ю. П. Попова. М.: Изд-во МГУ, 1979.
8. Захаров А. В., Самарский А. А., Свешников А. Г. Применение метода больших частиц к расчету движения заряженного пучка в электромагнитном поле с учетом пространственного заряда пучка.— В кн.: Вычислительные методы и программирование. Вып. 16. М.: Изд-во МГУ, 1971.
9. Головин Г. Т., Гордеев А. В., Гуцин И. С., Захаров А. В., Мокин Ю. П. Моделирование релятивистских электронных пучков в сильноточных вакуумных диодах.— В кн.: Труды III Междунар. конф. по мощным электронным и ионным пучкам. Новосибирск: изд. ИЯФ СО АН СССР, 1979.
10. Мокин Ю. И. Особенности некорректно поставленных задач, возникающих при исследовании движения электронов в электромагнитном поле.— ЖВММФ, 1980, т. 20, № 1.
11. Головин Г. Т. Один итерационный метод интегрирования стационарных систем уравнений электродинамики, связанных с учетом объемного заряда.— В кн.: Вычислительные методы и программирование. Вып. 31. М.: Изд-во МГУ, 1979.
12. Головин Г. Т. Об одном итерационном методе решения диодных задач.— В кн.: Разностные методы математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1980.
13. Коломенский А. А., Крастелев В. Г., Яблоков Б. Н. Измерение тока самоизоляции вакуумных коаксиальных линий.— Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, вып. 13.
14. Аранчук Л. Е., Баранчиков Е. И., Гордеев А. В. и др.— В кн.: Труды Междунар. конф. по мощным электронным и ионным пучкам. Т. 2. Новосибирск: изд. ИЯФ СО АН СССР, 1979.
15. Аранчук Л. Е., Баранчиков Е. И., Гордеев А. В., Королев В. Д., Смирнов В. П. Влияние ионных утечек на магнитную самоизоляцию электронов в вакуумной коаксиальной линии. ИАЭ-3251/7. М., 1980.
16. Березин Ю. А., Брейзман Б. Н., Вшивков В. А. Численное моделирование инжекции мощного электронного пучка в вакуумную камеру с сильным магнитным полем. Препринт № 18. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1979.

УДК 538.4

ПОЛУЧЕНИЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МК-ГЕНЕРАТОРАМИ НА ПОРИСТОМ ВЕЩЕСТВЕ

С. Д. Гилев, А. М. Трубачев
(Новосибирск)

В магнитно-кумулятивных (МК) генераторах, предназначенных для получения сильных магнитных полей, захват начального магнитного потока и последующее его сжатие осуществляются замкнутой металлической оболочкой, ускоренной продуктами взрыва заряда ВВ. Наиболее сильные магнитные поля получены по схеме МК-1 [1—3].

Для качественной и устойчивой работы такого генератора требуется сохранение цилиндрической симметрии сжимающейся оболочки. Поэтому к изготовлению и самой оболочке и генератора цилиндрической детонационной волны предъявляются довольно жесткие требования.

Процесс обжатия поля осложняется также развитием на внутренней поверхности кумулирующей оболочки тейлоровской неустойчивости, амплитуда которой растет со временем. Этот эффект нарушает симметрию сжатия оболочки и ведет к катастрофическим потерям потока на последней стадии работы генератора.

Высокой повторяемости результаты получены в [3], где оригинально разрешена проблема введения начального потока в рабочую область совмещением функций солеоида и кумулирующей оболочки. Однако генератор МК-1 по-прежнему является слож-

ным устройством, а его изготовление и эксплуатация под силу единичным лабораториям. В [4, 5] для усиления тока в плоских и коаксиальных генераторах был впервые применен динамический способ формирования движущейся проводящей оболочки. С этой целью кумулирующая область заполнялась пористым материалом, который при ударном воздействии приобретает высокую проводимость. Если в таком материале организовать замкнутую конфигурацию ударных волн, сходящихся к одной оси, то проводящий слой, формирующийся за их фронтом, может быть использован для компрессии магнитного потока. Аналогичный метод предложен в [6].

В данной работе приводятся результаты экспериментов по получению магнитных полей мегагауссного диапазона и оцениваются предельные возможности метода.

1. Схема генератора, использованного в наших экспериментах, приведена на фиг. 1. В квадратной форме 1, изготовленной из изоляционного материала, расположены заряд ВВ 2 и рабочее вещество 3, разделенные прокладкой 4. Поле в центре генератора измерялось индуктивным датчиком 5. Для создания начального магнитного потока в области сжатия генератор помещался внутрь соленоида, питаемого от конденсаторной батареи (на фиг. 1 не показано).

Подрыв заряда ВВ осуществляется одновременно в точках 6 по углам квадрата на половине высоты заряда с помощью четырех отрезков детонационного шнура, которые инициировались одним детонатором.

Проведены две серии экспериментов с генераторами, отличающимися размером области сжатия ($50 \times 50 \text{ мм}^2$ и $92 \times 92 \text{ мм}^2$). Высота рабочей части всех генераторов 30 мм. Заряд ВВ — гексоген плотности, близкой к насыпной. В первой серии масса ВВ около 70 г, во второй — около 200 г.

В качестве рабочего вещества в основном использовалась алюминиевая пудра ПАП-1 с начальной плотностью $0,33 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Обычно в исходном состоянии частицы порошка покрыты окисной пленкой, поэтому порошок имеет удовлетворительную изоляционную прочность. При ударном нагружении из-за механического разрушения окисного слоя и резкого увеличения его электропроводности с температурой порошок приобретает высокую проводимость. Эти процессы идут в среднем при более низких давлениях, чем фазовый переход полупроводник — металл [4], а следовательно, энергия ударной волны может быть полнее преобразована в энергию магнитного поля. Результаты экспериментов приведены в таблице.

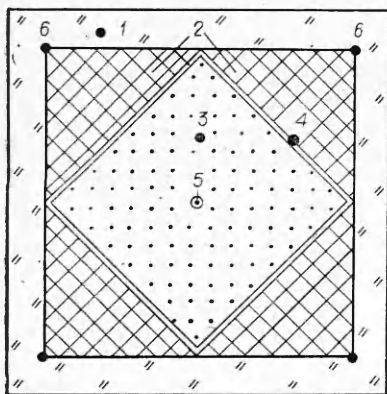
В опыте 4 в качестве рабочего вещества был использован алюминиевый порошок ПА-4 плотности $1,6 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Сравнение этого опыта с остальными явным образом демонстрирует преимущество алюминиевой пудры, поэтому она была использована во всех других экспериментах.

Сопоставление экспериментов 1 и 2, а также 5 и 6 показывает, что увеличение давления в ударной волне не приводит к увеличению коэффициента усиления магнитного поля $k = B_*/B_0$, более того, для генераторов с более мощным ВВ коэффициент k оказался ниже.

Для того чтобы оценить размер области сжатия к концу работы генератора и точность прихода ударных волн к датчику, был проведен опыт 8.

Отличие его от эксперимента 6 состояло в том, что датчик размещался внутри текстолитовой трубки с внешним диаметром 10 мм. Значительно меньший коэффициент усиления поля в этом случае свидетельствует о том, что сжатие области происходит достаточно симметрично и ее площадь в эксперименте 6 к концу работы генератора составила менее чем $0,2 \text{ см}^2$. Этот же эксперимент позволил оценить среднюю за время работы генератора величину отношения массовой скорости к ударной, которое оказалось равным 0,7.

Эксперименты 6 и 7 проводились в одинаковых условиях, однако зарегистрированные в этих опытах коэффициенты усиления отличаются на 20%. Это расхож-



Ф и г. 1

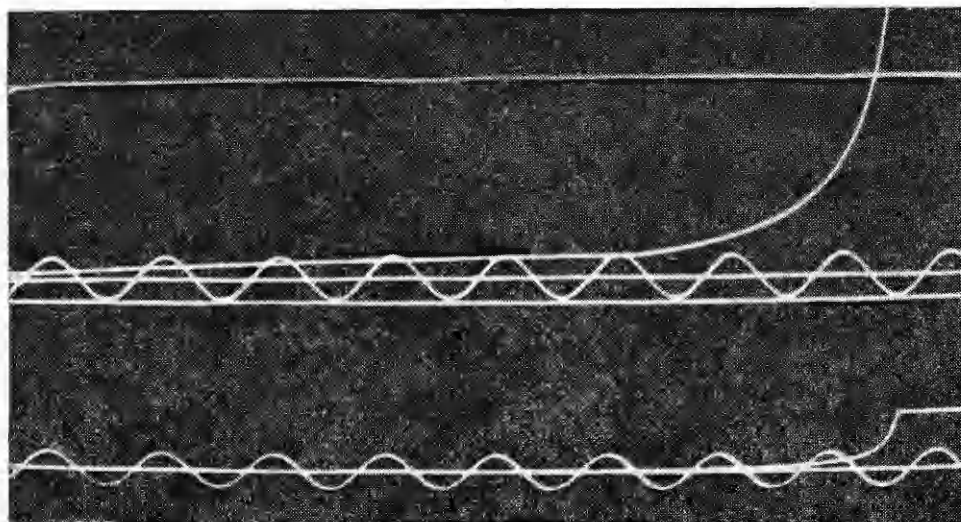
Серия	Номер опыта	Плотность гексогена, г/см ³	B_0 , кГс	$h=B_*/B_0$	B_* , кГс
I	1	1,13	6,8	10	68
	2	0,9	6,4	18	115
	3	0,9	22	20	440
II	4	0,9	4,9	3,5	17,2
	5	1,13	3,8	20	76
	6	0,9	18,9	33,5	630
	7	0,9	19,4	26	500
	8	0,9	18,7	18	340
	9	0,9	19,6	46	900
	10	0,9	38,6	26	1000

дение объясняется нарушением симметрии сжатия из-за неодновременности выхода ударных волн в порошок, а также погрешностями изготовления и сборки генератора. Оценка возможного разброса результатов по этой причине также около 20%.

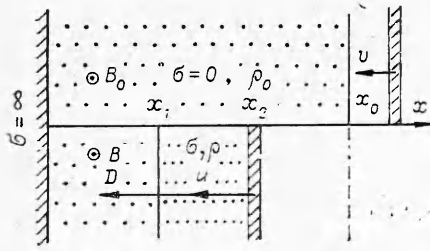
Эксперимент 9, в котором получен максимальный коэффициент усиления, демонстрирует влияние начальной формы рабочей области на качество работы генератора. Прокладка, разделяющая заряд ВВ и порошок, слегка изгибалась в сторону ВВ ($R = 153$ мм). Такое изменение формы позволило увеличить начальный магнитный поток, захваченный кумулирующей оболочкой, и одновременно несколько уменьшить вес заряда ВВ. Осциллограмма этого эксперимента приведена на фиг. 2. Здесь по обоим лучам записано поле в центре генератора, чувствительность каналов отличается в 15 раз. Метки времени 10 мкс.

Отметим, что в наших экспериментах поведение магнитного поля и его производной в процессе сжатия не обнаруживает каких-либо особенностей или тенденции к насыщению до момента разрушения датчика. Кроме того, скорости ударных волн в генераторах двух серий, оцененные по времени их работы, практически одинаковы. Это свидетельствует о слабом затухании ударных волн в порошке. Следовательно, подбирая более удачную форму рабочей области и увеличивая поперечный размер генератора, можно достичь еще больших значений коэффициента усиления и конечного магнитного поля.

2. Для оценки предельного поля, которое может быть получено обжатием ударными волнами, рассмотрим задачу в плоской постановке (фиг. 3).



Ф и г. 2



Ф и г. 3

В области $0 < x \leq x_0$, заполненной пористой средой плотности ρ_0 , имеется начальное магнитное поле B_0 . Слева от области — стенка с бесконечной проводимостью. В момент времени $t = 0$ на правую границу области со скоростью v налетает пластина массы M на единицу площади. В исходном состоянии среда непроводящая. За фронтом ударной волны проводимость σ . Для нашей оценки будем считать, что пористая среда состоит из жестких частиц, которые пакуются ударной волной от плотности ρ_0 до плотности ρ . Такая модель среды обеспечивает постоянство отношения массовой скорости к ударной, т. е. $u/D = \text{const}$.

В этой постановке процесс обжатия поля описывается уравнением

$$(2.1) \quad -\frac{B^2}{2\mu_0} = \rho_0 u D + [\rho(x_2 - x_1) + M] \frac{du}{dt},$$

где x_1 и x_2 — координаты ударного фронта и ударника соответственно; B — поле между стенкой и ударным фронтом.

Так как отношение u/D постоянно, то из уравнения электромагнитной индукции можно получить закон изменения поля в области сжатия $0 < x \leq x_1$:

$$(2.2) \quad B = B_0(x_0/x_1)^{u/D}.$$

Это соотношение справедливо в том случае, когда диффузионными потерями потока из области сжатия можно пренебречь по сравнению с конвективными. Область применимости этого приближения будет указана ниже.

Интегрированием уравнения (2.1) с учетом (2.2) легко получить скорость движения ударного фронта в зависимости от его координаты

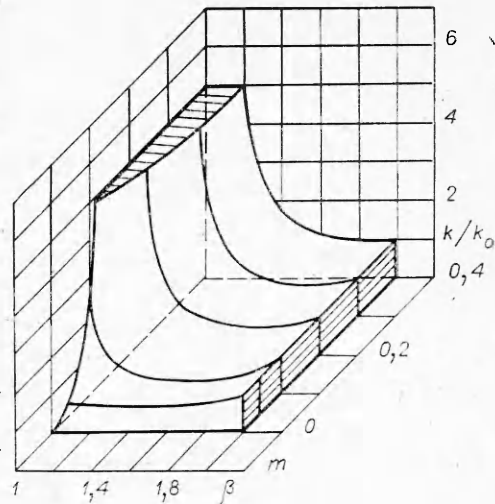
$$D^2(x_1) = \left(\frac{dx_1}{dt}\right)^2 = \left(1 + \frac{m}{\beta-2} - \frac{x_1}{x_0}\right)^{-2} \frac{4p_0}{\rho_0\beta} \times \\ \times \left\{ \left[\left(\frac{x_0}{x_1}\right)^{\beta-2} - 1 \right] \frac{1}{\beta-2} + \frac{1 + \frac{m}{\beta-2}}{\beta-1} \left[\left(\frac{x_0}{x_1}\right)^{\beta-1} - 1 \right] + \frac{\varepsilon m}{\beta(\beta-2)} \right\},$$

где $m = 2M/\rho_0 x_0$ — безразмерная масса; $\varepsilon = Mv^2/\rho_0 x_0$ — безразмерная энергия; $p_0 = B_0^2/2\mu_0$ — плотность магнитной энергии в начальный момент времени; $\beta = 2u/D$.

Поле в области сжатия $0 < x \leq x_1$ достигает максимального значения в момент остановки среды и ударника, т. е. когда $dx_1/dt = 0$. Из этого условия с учетом (2.2) получим уравнение для предельного поля B^*

$$(2.3) \quad \frac{2-\beta+m}{\beta-1} \left[\left(\frac{B^*}{B_0}\right)^{\frac{2(\beta-1)}{\beta}} - 1 \right] + \left(\frac{B^*}{B_0}\right)^{\frac{2(\beta-2)}{\beta}} - 1 = \frac{\varepsilon m}{\beta}.$$

Отсюда получаются два предельных режима усиления поля:



Ф и г. 4

а) $\beta \rightarrow 2$, т. е. $u \rightarrow D$ — плоский МК-генератор со сверхпроводящим лайнером

$$(2.4) \quad B^*/B_0 = 1 + \varepsilon/2;$$

б) $\beta \rightarrow 1$, т. е. $u/D \rightarrow 0,5$. В этом случае максимальное поле экспоненциально зависит от энергии ε :

$$(2.5) \quad B^*/B_0 = \exp [(\varepsilon m + 1)/2(m + 1)].$$

Сравнение соотношений (2.4) и (2.5) показывает, что подбором параметров ε и m при $u/D \rightarrow 0,5$ можно достичь больших коэффициентов усиления поля, чем в классическом случае.

На фиг. 4 приведено решение уравнения (2.3), полученное численным методом. Здесь для $\varepsilon = 100$ в зависимости от параметров β и m приведен коэффициент усиления поля $k = B^*/B_0$, отнесенный к коэффициенту усиления при $\beta = 2$.

Поведение поля при обжатии его цилиндрической ударной волной качественно сохраняет тот же характер, что и в плоской геометрии, т. е. поле линейно связано с ε при $\beta \rightarrow 2$ и имеет экспоненциальную зависимость от ε при $\beta \rightarrow 1$.

3. В проведенной выше оценке предельного поля, мы пренебрегали диффузионными потерями потока из кумулирующей области. Действительно, диффузионные потери потока существенны при больших градиентах магнитного поля, а при обжатии поля ударной волной из-за конвективного выноса потока веществом из области сжатия градиенты сглаживаются. Из уравнения электромагнитной индукции можно получить оценку размера области сжатия, при котором диффузионные потери потока сравниваются с конвективными $x_1/x_0 \sim (u + D)D/[\mu(D - u)^2]$, где $\mu = \mu_0 \sigma D x_0$ — магнитное число Рейнольдса.

Подстановка в это соотношение характерных величин, реализуемых в экспериментах с алюминиевой пудрой, приводит к оценке $x_1 \sim 10^{-4}$ м. Так как реально в области сжатия размещаются датчик или исследуемый образец, которые имеют размеры больше, чем оцененный нами, то при работе МК-генератора на пористом веществе практически всегда можно пренебрегать диффузионными потерями потока.

Авторы выражают благодарность Е. И. Биченкову за постоянное внимание к работе.

Поступила 10 VIII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Fowler C. M., Garn W. B., Caird R. S. Production of very high magnetic fields by explosion.— J. Appl. Phys., 1960, vol. 31, N 3.
2. Людаев Р. З., Сахаров А. Д. и др. Магнитная кумуляция.— ДАН СССР, 1965, т. 165, № 1.
3. Павловский А. И., Колокольчиков Н. П. и др. Соленоид начального магнитного потока взрывом магнитного генератора МК-1.— ПТЭ, 1979, № 5.
4. Биченков Е. И., Гилев С. Д., Трубачев А. М. МК-генератор с использованием перехода полупроводникового материала в проводящее состояние.— ПМТФ, 1980, № 5.
5. Гилев С. Д., Трубачев А. М. МК-генераторы на порошковом алюминии.— В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 48. Новосибирск: изд. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1980.
6. Nagayama K. New method of magnetic flux compression by means of the propagation of shock-induced metallic transition in semiconductors.— Appl. Phys. Lett., 1981, vol. 38, N 2.