

ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ГИРОПРИБОРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2011 г. М. Ю. Глявин, К. А. Журин, Е. А. Копелович,
А. Г. Лучинин, М. В. Морозкин, Ф. А. Флат

Институт прикладной физики РАН
Россия, 603090, Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
Поступила в редакцию 04.08.2010 г.

Описан генератор импульсного магнитного поля амплитудой до 50 Тл с длительностью импульса по основанию единицы миллисекунд, получаемого при разряде емкостного накопителя энергии через тиристорно-диодный коммутатор на соленоид с азотным охлаждением. Повторяемость амплитуды импульса тока соленоида с точностью до десятых долей процента обеспечивается за счет стабилизации предразрядного напряжения накопителя и термостабилизации соленоида. С помощью генератора успешно проведены эксперименты по получению терагерцового излучения киловаттного уровня мощности на частотах от 0.9 до 1.3 ТГц.

Гиротроны – вакуумные приборы, основанные на использовании стимулированного циклотронного излучения пучка электронов,двигающегося по винтовым траекториям в магнитном поле, являются перспективными источниками мощного электромагнитного излучения терагерцового диапазона [1, 2]. Слабая распространенность, несмотря на востребованность, гиротронов в терагерцовом диапазоне связана, в частности, с необходимостью создания сильных магнитных полей, а также с трудностями обеспечения высокоэффективной одномодовой генерации при работе в режиме циклотронного резонанса на высоких циклотронных гармониках.

Существующие на сегодня криомагнитные системы позволяют получать магнитные поля до 20 Тл (см., например, [3, 4]). Из использованной нами хорошо известной формулы условия циклотронного резонанса электронов $f, \text{ГГц} = nf_c = \frac{28n}{(1 + U[\text{кВ}]/511)} B[\text{Тл}]$ (где f – частота генерируемого излучения, B – магнитное поле, U – напряжение электронного пучка, n – номер циклотронной гармоники, f_c – циклотронная частота электронов в магнитном поле), легко видеть, что терагерцовое излучение в этих системах может быть получено только на второй и более высоких гармониках, что, как правило, требует разработки специальных методов селекции рабочего типа колебаний. При этом необходимо учитывать чрезвычайно высокую стоимость подобных криосистем. Гибридные магниты, в принципе, позволяют получать магнитные поля до 90 Тл, но эти крупногабаритные (весом в несколько тонн) системы с энергопотреблением в десятки мегаватт

(см., например, [5, 6]) недоступны большому числу пользователей. Достаточно высокие средние уровни мощности (до нескольких сотен ватт) в терагерцовом диапазоне реализуются в лазерах на свободных электронах, но и эти комплексы представляют собой уникальные, крупногабаритные и чрезвычайно дорогостоящие научные установки, для работы которых требуются на один–два порядка более высокие энергии частиц, чем в гироприборах.

Таким образом, для создания широкодоступных компактных импульсных источников с в.ч.-излучения киловаттного уровня мощности в терагерцовом диапазоне представляется целесообразным использовать гиротроны на основном циклотронном резонансе с импульсными соленоидами, создающими магнитные поля около 40 Тл.

Для получения импульсов тока заданной амплитуды в соленоиде $L-R$ (рис. 1) использован разряд емкостного накопителя энергии (е.н.э.) C через тиристорно-диодный коммутатор $T-D$. Требуемая амплитуда импульса тока в соленоиде

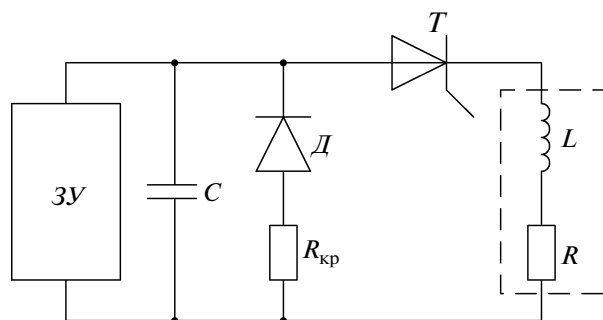


Рис. 1. Схема разрядного контура источника питания импульсного соленоида.

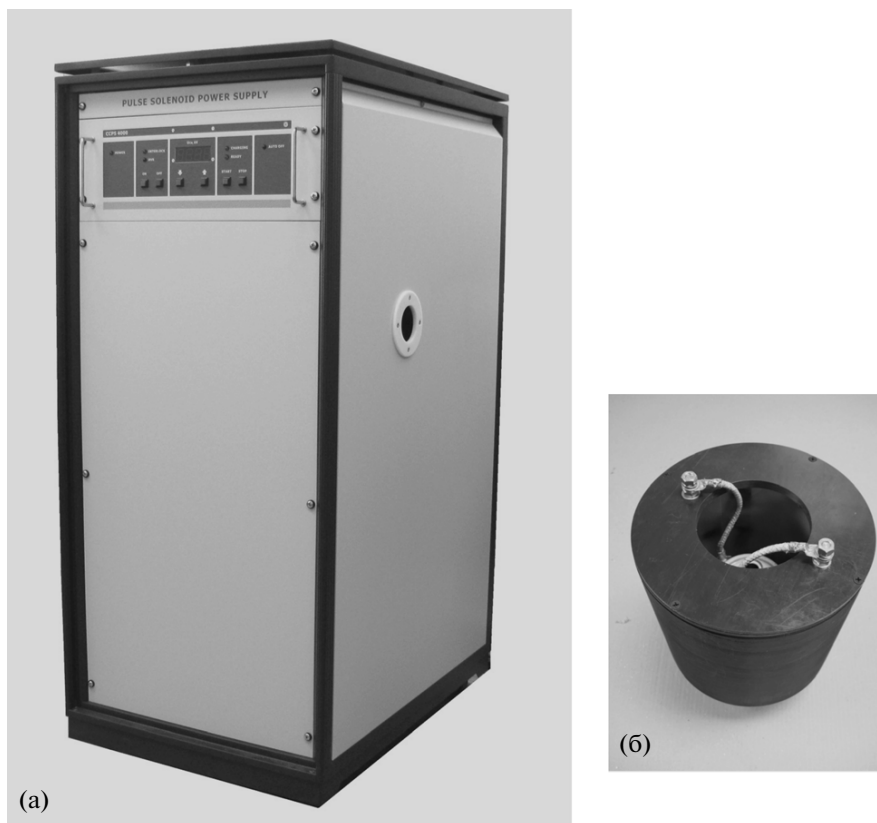


Рис. 2. Внешний вид источника питания импульсного соленоида (а) и соленоида в азотной ванне (б).

I_{\max} обеспечивается при зарядке е.н.э. до напряжения $U_{\text{зар}} \approx I_{\max}(L/C)^{1/2}\exp(-\pi/4Q)$, где $Q = (L/C)^{1/2}/(R_0 + R)$ – добротность разрядного контура; R_0 – эквивалентное активное сопротивление разрядного контура, определяемое потерями энергии в накопительных конденсаторах, контактных соединениях и шинах, тиристорном коммутаторе; R – активное сопротивление соленоида. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что $Q \approx 3$.

Для обеспечения экспериментов с различными соленоидными емкостью накопителя варьировалась в диапазоне от 1800 до 3300 мкФ. Зарядка е.н.э. до регулируемого в диапазоне 0.5–3.8 кВ напряжения осуществляется с помощью зарядного устройства ЗУ средней мощностью 1.5 кВт, выполненного на основе высокочастотного транзисторного преобразователя с дозирующими конденсаторами и трансформаторным выходом [7].

Как правило, в гиротронах полоса циклотронного резонанса составляет несколько процентов, и для поддержания гиротрона в оптимальных по к.п.д. условиях необходимо, чтобы изменение магнитного поля в режиме генерации не превышало десятых долей процента. Повторяемость амплитуды импульса тока в соленоиде и соответственно магнитного поля от импульса к импульсу

с точностью на уровне $\pm 0.1\%$ обеспечивается благодаря релейной стабилизации предразрядного напряжения е.н.э.

С целью снижения тепловой нагрузки на соленоид параллельно е.н.э. включена кроубарная цепь, состоящая из последовательно соединенных диода D и резистора $R_{\text{кр}} \gg R$. Сопротивление кроубарного резистора выбрано равным 0.1 Ом с учетом принятого из практических соображений максимально допустимого значения напряжения обратной полярности на е.н.э. на уровне 800 В.

За рабочий импульс в кроубарном резисторе выделяется энергия $W_{\text{кр}} \approx 0.5LI_{\max}^2/(1 + R/R_{\text{кр}})$. В связи с тем, что $W_{\text{кр}}$ составляет около 15 кДж при максимальном зарядном напряжении, кроубарный резистор выполнен с принудительным воздушным охлаждением и изготовлен из трубки $\varnothing 10$ мм, с толщиной стенки 1 мм и длиной около 4 м из нержавеющей стали 12X18H10T. Собственная индуктивность кроубарного резистора составляет ~ 1 мкГн.

Тиристорно-диодный коммутатор $T-D$ разработан в ООО НИЦ ПП (Саранск) и выполнен в виде единой сборки на двух последовательно соединенных полупроводниковых приборах табличной конструкции: тиристоре ТИ143-320-50 и диоде ДИ143-320-50.



Рис. 3. Внешний вид импульсного соленоида с азотным охлаждением.

Источник питания импульсного соленоида (рис. 2а) размещен в стойке типа minirack производства фирмы Schroff (Германия), имеющей следующие размеры: 553 (ширина) × 780 (глубина) × 1270 мм (высота).

В ходе экспериментов было получено магнитное поле до 50 Тл. Магнитная индукция измерялась следующим образом: при определенных значениях тока соленоида $I_{\max 0}$ наблюдалась генерация микроволнового излучения на основной циклотронной гармонике в условиях циклотронного резонанса. Измерение частоты генерации f_0 гетеродинным методом позволило установить однозначное соответствие между током соленоида и напряженностью магнитного поля B_0 (определить постоянную соленоида в Э/А). Поскольку измерение частоты генерации представляет собой достаточно сложный и длительный процесс [8], в дальнейшем рабочее напряжение электронного пучка было постоянным от импульса к импульсу, что позволило при изменении тока соленоида пересчитывать магнитное поле и частоту генерации по соотношениям подобия $B = B_0 \frac{I_{\max}}{I_{\max 0}}$, $f = B \text{ const} =$

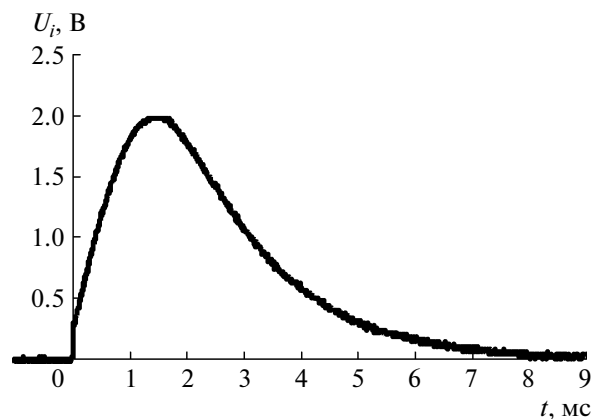


Рис. 4. Осциллограмма импульса тока через соленоид, полученная с помощью шунта 75 мВ/300 А.

$= f_0 \frac{I_{\max}}{I_{\max 0}}$. Чтобы в течение с.в.ч.-импульса длительностью 50 мкс изменение магнитного поля не превышало десятых долей процента, рабочий участок выбирался вблизи максимума импульса разрядного тока длительностью >2.5 мс.

Для уменьшения энергии магнитного поля (а следовательно, и энергии, запасаемой в накопителе) соленоид наматывался непосредственно на корпус лампы. В качестве хладагента выбран жидкий азот, который существенно уменьшает сопротивление меди (в ~ 7 раз) при уменьшении теплоемкости только в 2 раза, что в 4 раза ослабляет нагрев, термостабилизирует соленоид и увеличивает его механическую прочность. Поверх обмотки соленоида сделан бандаж из стеклоткани толщиной ~ 5 мм. Соленоид находился в ванне с жидким азотом емкостью ~ 3 л (рис. 2б), что позволяло получать 15–20 импульсов магнитного поля без дополнительной заливки при частоте следования импульсов 1 раз в минуту. Все материалы, выбранные для конструкции магнитной системы, не теряли своих механических качеств при температуре кипения жидкого азота. Поле 50 Тл создавалось током с амплитудой ~ 8 кА при индуктивности соленоида 250 мкГн.

При использовании аналогичной технологии была изготовлена катушка с увеличенным размером рабочего отверстия ($\varnothing 16$ мм), намотанная медным проводом (рис. 3). Измеренное значение индуктивности составило 320 мкГн при постоянной соленоида 3.4 Тл/кА. Постоянная соленоида определялась при постоянном токе ~ 10 А датчиком Холла. В этой катушке в режиме разовых импульсов (1 импульс в 3 мин) при токе 8 кА получено магнитное поле 28 Тл (рис. 4).

Исследовались два варианта катушки — с дополнительными каналами охлаждения и полностью монолитный вариант с усиленным бандажом из стекловолокна толщиной 10 мм. Катушка

с дополнительными каналами позволила увеличить частоту следования импульсов тока до 1 импульса в 40 с при воспроизведении амплитуды тока от импульса к импульсу, но ее прочность оказалась недостаточной, и после десятка импульсов катушка разрушилась. Монолитный вариант обеспечивает воспроизводимость формы импульса при частоте следования 1 импульс в 3 мин (при токе 8 кА), но следует отметить незначительный расход хладагента — 3 л жидкого азота достаточно для нескольких десятков импульсов.

При эксплуатации генераторов сильных импульсных магнитных полей необходимо иметь в виду, что срок службы используемых в них соленоидов ограничен, как правило, несколькими тысячами импульсов даже при удачной конструкции, после чего происходит разрушение соленоида (обрыв вывода или обмотки) из-за механических напряжений или из-за пробоя изоляции провода, которая подвергается циклическим механическим и тепловым нагрузкам. Проведенные испытания источника питания соленоида показали, что выбранное схемное решение его разрядного контура позволяет без повреждений коммутатора выдерживать аварийный режим холостого хода, возникающий при разрушении соленоида.

Разработанный источник импульсного магнитного поля работал устойчиво и на текущий момент выдержал около 3000 импульсов при амплитуде >35 Тл и около сотни импульсов при ам-

плитуде >45 Тл без какого-либо изменения в рабочих характеристиках. Создание генератора с рабочим полем в десятки тесла позволило впервые получить в гиротронах устойчивую однододовую генерацию киловаттного уровня мощности в терагерцовом диапазоне [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bratman V., Glyavin M., Idehara T. et al.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2009. V. 37. № 1. P. 36.
2. *Bratman V.L., Glyavin M.Yu., Kalynov Yu.K. et al.* // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2010. V. 31. № 12.
3. *Saito T., Nakano T., Hoshizuki H. et al.* // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2007. V. 28. № 12. P. 1063.
4. *Kurusu T., Ono M., Hanai S. et al.* // IEEE Trans. on Appl. Superconductivity. 2004. V. 14. № 2. P. 393.
5. *Watanabe K., Nishijima G., Awaji S. et al.* // IEEE Trans. on Appl. Superconductivity. 2004. V. 14. № 2. P. 388.
6. *Bourquard A., Bresson D., Daël A. et al.* // J. of Low Temperature Phys. 2010. V. 159. № 1–2. P. 332.
7. *Копелович Е.А.* Патент на полезную модель № 94089 РФ. МПК Н 03 К 3/53 // БИ. 2010. № 13.
8. *Третьяков М.Ю., Калынов Ю.К.* // ПТЭ. 2006. № 5. С. 74 (*Tretyakov M.Yu., Kalynov Yu.K.* // Instruments and Experimental Techniques. 2006. V. 49. № 5. P. 661).
9. *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu.* // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. № 1. 015101.