



нитного момента ферромагнитных материалов на воздействие электромагнитного излучения все еще является предметом дискуссий, поскольку в СВЧ и оптической областях магнитная проницаемость ферромагнитных материалов практически равна единице и поэтому обычно считается, что вышеуказанные явления не могут быть связаны с магнитной нелинейностью ферромагнетика.

Поэтому для выяснения механизма нелинейного преобразования электромагнитного излучения в ферромагнетике важно исследовать новые аспекты проявления нелинейности.

В настоящей работе исследована генерация гармоник, а также суммарной и разностной частоты СВЧ излучения малой мощности в намагниченном ферромагнетике, когда магнитное поле СВЧ излучения коллинеарно вектору намагниченности ферромагнитного образца. Исследована эффективность преобразования в зависимости от параметров СВЧ излучения, намагничивающего поля и характеристик ферромагнитного образца.

**2. Экспериментальная установка и результаты измерений.** Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве основного СВЧ генератора 1 был использован векторный генератор сигналов VSG25A компании SignalHound, который способен формировать множество сложных сигналов в рабочем диапазоне от 100 МГц до 2.5 ГГц с мощностью выходного сигнала от -80 до +13 дБм. Сигнал от СВЧ генератора подавался на первичную катушку, намотанную вокруг исследуемого ферромагнитного образца 3 (см. рис. 1). На ферромагнитный образец через вторую обмотку подавался также сигнал от другого генератора 2 (DS345 фирмы Stanford Research Systems) с относительно низкой частотой ( $f_2=30$  МГц). Сигнал с ферромагнитного образца снимался с помощью третьей обмотки, намотанной на образец (см. рис. 1.) и подавался на вход анализатора спектра Signal Hound USB-SA124B, с частотным диапазоном 100 кГц - 12.4 ГГц.

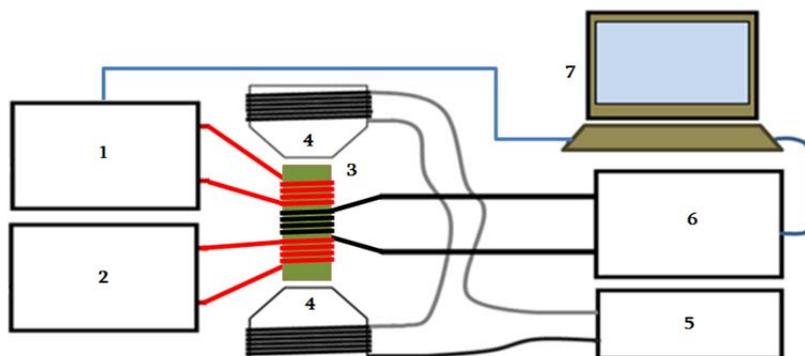


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – СВЧ генератор VSG25A, 2 – ВЧ генератор DS345, 3 – ферромагнитный образец, 4 – электромагнит, 5 – регулируемый блок питания электромагнита, 6 – анализатор спектра USB-SA124B, 7 – компьютер.

В качестве ферромагнитных образцов использовались низкочастотные ферриты разных составов, разных форм и размеров, а также поликристаллический железо-иттриевый гранат (ЖИГ). Ниже представлены результаты исследований, проведенных на феррите марки М400НН цилиндрической формы высотой 15 мм и диаметром 8 мм и на образце низкочастотного феррита марки 2000НМ прямоугольной формы размерами  $2.8 \times 5.6 \times 8 \text{ мм}^3$ .

Ферромагнитный образец устанавливался в магнитном поле электромагнита 4, как показано на рис. 1. При указанном расположении ферромагнитного образца относительно электромагнита СВЧ магнитное поле оказывается параллельным (коллинеарным) постоянному полю намагничивания.

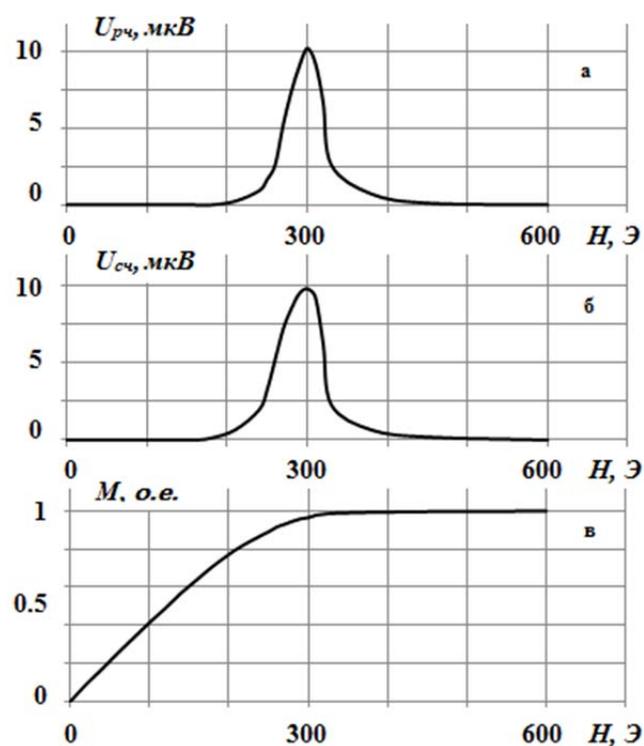


Рис. 2. Зависимость амплитуд сигналов на суммарной (а) и разностной (б) частотах от магнитного поля смещения; в – кривая статического намагничивания образца феррита М400НН.

Исследования преобразования частот проводились как в режиме развертки СВЧ генератора 1 (диапазон развертки 1-2.5 ГГц), так и на отдельных фиксированных частотах. Отметим, что во всем исследуемом диапазоне частот каких-либо особенностей замечено не было.

На рис. 2 и 3 представлены результаты исследований генерации сум-

марной и разностной частот в феррите М400НН при следующих параметрах генераторов:  $f_1=1$  ГГц,  $U_{m1} \approx 1.5$  В,  $f_2=30$  МГц,  $U_{m2} \approx 0.5$  В.

На рис. 2 а, б приведены амплитуды полученных сигналов на суммарной и разностной частотах в зависимости от магнитного поля смещения, а на рис. 2, в показана кривая статического намагничивания данного образца феррита. Следует отметить, что форма кривой намагничивания сильно зависит не только от магнитных свойств материала образца, от его геометрической формы и размеров, но и от магнитных свойств окружающей среды. Поэтому кривая намагничивания каждого образца измерялась после помещения данного образца в экспериментальную установку. Измерения проводились следующим образом. Сначала измерялась индуктивность  $L(H_0) = \mu'(H_0)L_0$  одной из катушек, намотанной на ферромагнитном образце, в зависимости от внешнего магнитного поля  $H_0$  (где  $\mu'(H_0) = (dB/dH)|_{H=H_0}$  – дифференциальная магнитная проницаемость образца,  $L_0$  – индуктивность катушки без сердечника ( $\mu' = 1$ )), после чего интегрированием  $\mu'(H_0)$  восстанавливалась форма кривой намагничивания.

Как и следовало ожидать, максимальные значения сигналов как на суммарной, так и разностной частотах получались при магнитном поле смещения  $H_0 \approx H_{\max} \approx 320$  Э (в области максимальной нелинейности кривой намагничивания ферромагнитного образца). Аналогичная зависимость от магнитного поля смещения была получена также для амплитуды второй гармоники.

Соответствующие спектры сигналов (на основных частотах, на суммарной частоте, на разностной частоте, а также на второй гармонике СВЧ сигнала), полученные с помощью анализатора спектра USB-SA124B, при  $H_0 \approx H_{\max}$  представлены на рис. 3.

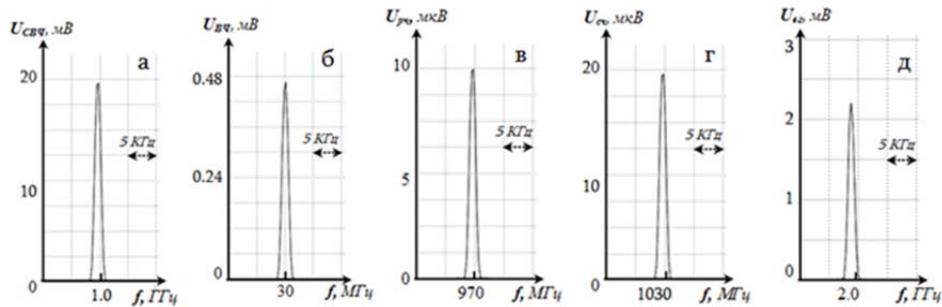


Рис. 3. Спектры сигналов на входе анализатора: а, б – на основных частотах (1 ГГц и 30 МГц), в – на разностной частоте (970 МГц), г – на суммарной частоте (1030 МГц), д – на второй гармонике СВЧ сигнала (2 ГГц).

Были исследованы также детектирование амплитудно-модулированного СВЧ сигнала (частота модуляции  $f_{\text{mod}} = 120$  кГц) и генерация второй

гармоники в низкочастотном феррите марки 2000НМ. На рис. 4, а представлена зависимость амплитуды детектированного сигнала от магнитного поля смещения.

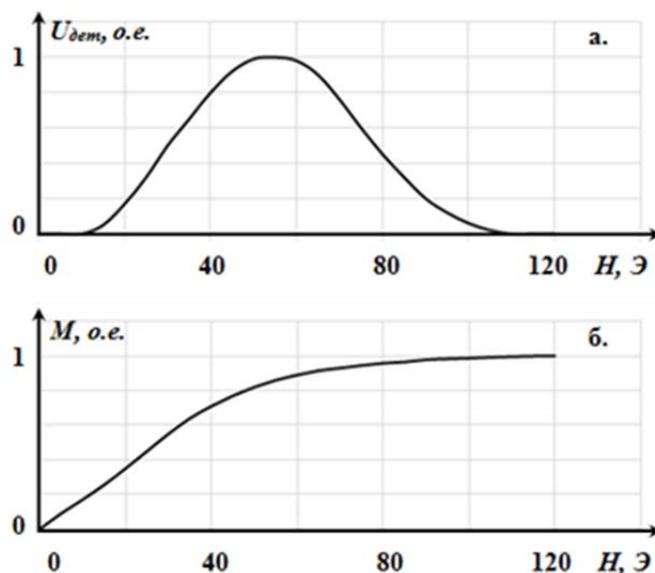


Рис. 4. а – Зависимость амплитуды детектированного сигнала, б – кривая статического намагничивания образца феррита 2000НМ.

Как видно из рис. 4, а, амплитуда детектированного сигнала достигает своего максимального значения при  $H_{\text{макс}} \approx 50$  Э, что хорошо коррелирует с кривой статического намагничивания данного ферромагнитного образца (см. рис. 4, б). Следует только отметить, что изменение знака магнитного поля смещения приводит к изменению фазы детектированного сигнала на противоположную. Результаты измерений амплитуд детектированного сигнала и второй гармоники в зависимости от мощности основного СВЧ сигнала при  $H_0 \approx H_{\text{макс}}$  представлены на рис. 5, а и б соответственно.

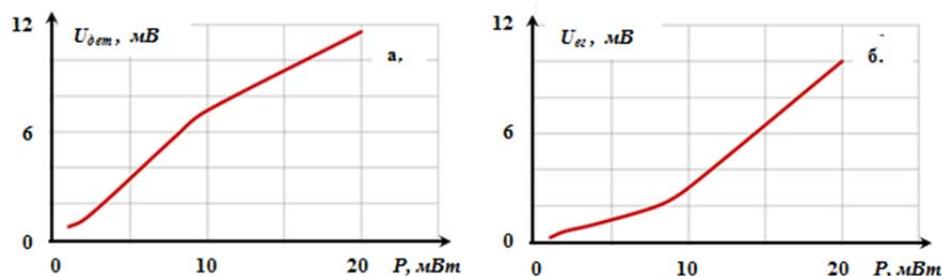


Рис. 5. Зависимости амплитуд детектированного сигнала (а) и второй гармоники (б) от мощности основного СВЧ сигнала ( $f_0 = 1$  ГГц,  $f_{\text{мод}} = 120$  кГц): ( $f_{2\text{го}} = 2$  ГГц).

**3. Обсуждение и выводы.** Настоящие исследования подтверждают, что при коллинеарном расположении  $H_0$  и  $H_{\sim}$  эффективное нелинейное взаимодействие в ферромагнетике возможно, что не следует из уравнения Ландау – Лифшица. Результаты измерений показывают, что эффективность нелинейного преобразования существенно зависит от магнитного поля смещения  $H_0$  и формы кривой намагничивания. Это означает, что магнитный момент, помимо затухающей прецессии вокруг постоянного поля  $H_0$ , также колеблется на частоте переменного магнитного поля, причем амплитуда колебаний зависит от крутизны кривой намагничивания (от дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu'$ ) при заданном значении магнитного поля смещения. Следовательно, в области нелинейности кривой намагничивания эти колебания становятся негармоничными, и в зависимости от характера нелинейности в спектре колебаний могут появляться низкочастотная составляющая, гармоники колебаний, а также их комбинационные частоты (в частности суммарные и разностные частоты). Экспериментально получены детектирование, удвоение частоты и генерация суммарных и разностных частот СВЧ сигнала в низкочастотном феррите при комнатной температуре.

Анализ результатов измерений показывает, что величина и знак детектированного сигнала, а также амплитуда сигнала второй гармоники хорошо коррелируют с кривыми статического намагничивания. Амплитуда второй гармоники СВЧ сигнала пропорциональна мощности СВЧ сигнала, что характерно для квадратичной нелинейности. При мощности СВЧ излучения  $P \approx 20$  мВт коэффициент преобразования составляет  $\sim 1\%$ , однако, как следует из рис. 5, он растет с увеличением мощности СВЧ сигнала. Следует отметить, что ферромагнитные материалы имеют значительные потери в СВЧ области, которые зависят от приложенного поля намагничивания. Это тоже может привести к нелинейным эффектам, в частности к детектированию излучения. Однако в наших экспериментах изменения потерь в зависимости от намагниченности образцов замечено не было.

В заключение мы предполагаем, что полученные результаты могут найти практическое применение для детектирования и преобразования частоты электромагнитного излучения, для записи, обработки и хранения информации и др.

Ереванский государственный университет  
e-mail: armenm@ysu.am

**А. О. Макарян**

### **Преобразование частот СВЧ излучения в феррите**

Экспериментально исследованы генерация второй гармоники, смешивание частот, а также детектирование маломощного СВЧ излучения в намагниченном ферромагнетике при комнатной температуре. Показано, что эффективность преобразования сильно зависит от формы кривой статического намагничивания фер-

ромагнитного образца, а также от внешнего магнитного поля. Результаты измерений хорошо коррелируют с кривыми статического намагничивания ферромагнитных образцов.

## Ա. Ն. Մակարյան

### ԳԲՀ ճառագայթման հաճախականությունների փոխակերպումը ֆերիտում

Փորձնականորեն հետազոտվել են փոքր հզորության ԳԲՀ ճառագայթման երկրորդ հարմոնիկի գեներացումը, դետեկտումը և հաճախությունների խառնումը մագնիսացված ֆերոմագնիսական միջավայրերում սենյակային ջերմաստիճանում: Յույց է տրվել, որ փոխակերպման արդյունավետությունը խիստ կախված է ֆերոմագնիսական նմուշի ստատիկ մագնիսացման կորի տեսքից, ինչպես նաև արտաքին մագնիսական դաշտից: Չափումների արդյունքները լավ կորելացված են ֆերոմագնիսական նմուշների ստատիկ մագնիսացման կորերի հետ:

## A. N. Makaryan

### Frequency Conversion of Microwave Radiation in Ferrite

The second harmonic generation, frequency mixing, and the detection of low-power microwave radiation in the magnetized ferromagnet at room temperature were experimentally studied. It was shown that the conversion efficiency strongly depends on the shape of the static magnetization curve of the ferromagnetic sample, as well as on the external magnetic field. The measurement results correlate well with the static magnetization curves of ferromagnetic samples.

## Литература

1. Bloembergen N., Damon R. W. – Phys. Rev. 1952. V. 85. P.699.
2. Ферриты в нелинейных СВЧ устройствах. Сб. статей под. ред. А. Г. Гуревича. М. ИИЛ. 1961. 634 с.
3. Нелинейные свойства ферритов в полях СВЧ. Сб. статей под. ред. А. Л. Микаэляна. М. ИИЛ. 1963. 256 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М. Физматлит. 2003.
5. Martirosian R. M., Makaryan A. H., Mekhitarian V. M. et al. – JETP Letters. 2014. V. 99. № 8. P. 435-440.
6. Мартиросян Р. М., Макарян А. О., Мыхитарян В. М. и др. – Физические основы приборостроения. 2016. Т. 5. № 1 (18). С. 88–97.
7. Bagdasaryan D., Hakhoumian A., Martirosian R. In: International Conference on Microwave and THz Technologies, photonics and Wireless communications, IRPhE' 2016, May 4-6 (2016). Yerevan, Armenia P.TH-11.
8. Kimel A. V., Kirilyuk A., Hansteen F. et al. – J. Phys.: Condens. Matter. 2007. V. 19. P. 043201 (1-24).
9. Baranga A.B.-A., Battesti R., Fouche M. et al. Observation of the Inverse Cotton-Mouton Effect, <hal-00518059v2> (2010).