

## **ОСОБЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ЛЕНТ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ FeSiBNbCu РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА**

**Комогорцев С.В.<sup>1,3,4\*</sup>, Крайнова Г.С.<sup>2</sup>, Ильин Н.В.<sup>2</sup>, Плотников В.С.<sup>2</sup>,  
Чеканова Л.А.<sup>1</sup>, Немцев И.В.<sup>1</sup>, Юркин Г.Ю.<sup>1,4</sup>, Исхаков Р.С.<sup>1</sup>, Ятманов Д.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, 660036, Россия*

<sup>2</sup>*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690000, Россия*

<sup>3</sup>*Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика  
М.Ф. Решетнева, Красноярск, 660000, Россия*

<sup>4</sup>*Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660036, Россия*

*\*e-mail: komogor@iph.krasn.ru*

Исследовано резонансное поглощение СВЧ волн в аморфных лентах FeSiBNbCu различного состава, полученных быстрой закалкой из расплава. Для величины эффективной намагниченности, рассчитанной по величине резонансного поля, наблюдается линейное снижение с ростом концентрации примеси бора, меди, а также суммарного количества атомов немагнитной примеси в лентах сплава FeSiBNbCu на основе железа.

Ключевые слова: аморфные металлические сплавы, магнитный резонанс, магнитные свойства, намагниченность.

### **Введение**

Быстрозакаленные сплавы FeSiBNbCu используются в качестве прекурсоров для приготовления методом частичной кристаллизации материалов семейства файнметов - современных «рекордсменов» среди магнитомягких ферромагнитных систем [1–5]. Данные сплавы на основе

железа применяют в качестве магнитопроводов высокочастотных трансформаторов и датчиков слабых магнитных полей и деформаций, магнитных экранов [6–9]. Исследованию связи структуры и свойств таких систем посвящено значительное количество работ (см. например [10–14]), но при этом остаются открытыми важнейшие вопросы, связанные с изучением высокочастотной динамики намагниченности [15,16]. Такие исследования представляются весьма актуальными, поскольку современные скорости обработки информации требуют высоких скоростей срабатывания элементов. Кроме того, известно, что свойства аморфных сплавов во многом определяются их составом [10,11,13,14,17–20], поэтому исследования зависимости их свойств, при изменении количества какого либо из компонентов сплава, актуальны. В данной работе исследовано резонансное поглощение сверхвысокочастотных (СВЧ) волн в аморфных лентах FeSiBNbCu различного состава, полученных быстрой закалкой из расплава.

## Эксперимент

Кривые поглощения СВЧ изучались на стандартном ЭПР-спектрометре с частотой накачки резонатора 9,2 ГГц при комнатной температуре. Использовался тип резонатора и расположение в нем образца, обеспечивающие нулевое значение электрической компоненты СВЧ поля. Внешнее поле прикладывалось параллельно плоскости ленты. Исследовано три серии лент, отличающихся по составу:  $\text{FeCu}_{0,2}\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_{0,5}\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_{1,5}\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$  (различное содержание меди);  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_5\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{16}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$  (различное содержание ниобия);  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_8$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_{13}$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{14}\text{B}_5$  (различное содержание металлоидов). Измерение намагниченности выполняли на СКВИД магнитометре MPMS - Quantum Design. За величину магнитного момента насыщения принимали

магнитный момент во внешнем поле 50 кЭ, которое соответствовало полному техническому насыщению и на несколько порядков превосходило коэрцитивное поле. Рельеф поверхности и толщину ленты контролировали с помощью растрового электронного микроскопа S5500 Hitachi.

## Результаты и обсуждение

Дифференциальные спектры поглощения СВЧ поля образцов характеризуются одним пиком, обусловленным ферромагнитным резонансом (ФМР), форма и положение которого различается для разных образцов (рис.1-3). По этому пику определяли основные характеристики резонансного поглощения: ширину линии  $\Delta H$  и резонансное поле  $H_r$ . Мы использовали два различных подхода к определению  $\Delta H$  и  $H_r$ . В первом подходе  $H_r$  вычислялось как среднее арифметическое между полями минимума и максимума дифференциальной кривой поглощения, а  $\Delta H$  как разность полей минимума и максимума. Во втором подходе мы описывали экспериментальные кривые производной от функции Лоренца, где  $\Delta H$  и  $H_r$  выступали в качестве параметров обеспечивающих минимальный квадрат отклонения экспериментальных данных от эксперимента. Величины резонансных полей, полученных обоими способами, отличались друг от друга не более чем на 1-3%, поэтому для дальнейшего мы воспользуемся только параметрами  $\Delta H$  и  $H_r$ , полученными вторым способом (смотри табл.1). Выбранная геометрия измерений позволяет использовать формулу Киттеля для идеальной бесконечно тонкой ферромагнитной пластины (отношение толщины ленты к длине измеряемого образца  $\sim 0,003$ ) для вычисления эффективной намагниченности  $M_{eff}$  из величины  $H_r$ :

$$M_{eff} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{(\omega/\gamma)^2 - H_r^2}{H_r}. \quad (1)$$

Величина  $\omega/\gamma$  в нашем эксперименте составляла 2900 Э.

Линейное снижение эффективной намагниченности, рассчитанной

по формуле (1) с ростом концентрации примеси, представленное на рис.4, в целом укладывается в представление об аморфных сплавах как твердых растворах с неограниченной растворимостью [1,3]. Линейная экстраполяция ряда данных (намагниченность в зависимости от суммарного количества атомов примеси) к нулю концентраций дает величину намагниченности около 1700 Гс, что весьма близко к намагниченности чистого ОЦК железа (рис.4). Величина эффективной намагниченности складывается как из спонтанной намагниченности, так и из других вкладов во внутреннее магнитное поле, таких как поле наведенной магнитной анизотропии, размагничивающее поле (источником которого может служить здесь неровность поверхности ленты). Поэтому для сравнения на трех образцах с различным содержанием бора, с помощью вибрационного магнитометра была измерена величина намагниченности насыщения эквивалентной спонтанной намагниченности ленты. Согласно традиционной практике магнитометрических измерений измеряемый образец предварительно взвешивается, в итоге позволяя рассчитать намагниченность в единицах Гс·см<sup>3</sup>/г (emu/g). Для сравнения с эффективной намагниченностью, нам было необходимо оценить магнитный момент, приведенный к единице объема (Гс). Поэтому, с помощью сканирующего электронного микроскопа, были также измерены толщина некоторых лент (таблица 2), позволившая в свою очередь оценить их плотность, а затем намагниченность в требуемых единицах. Количественное сопоставление данных по  $M_s$  из табл.2 и данных по  $M_{eff}$  данных на рис.4 обнаруживает хорошее их согласие. Небольшое превышение  $M_s$  над  $M_{eff}$  (в пределах 10%) может быть связано с размагничивающими полями, возникающими за счет неровностей поверхности ленты, которые наблюдаются на ее поперечном срезе при наблюдении с помощью растрового электронного микроскопа.

Для величины ширины линии поглощения  $\Delta H$  (смотри табл.1)

заметных трендов от химического состава лент не обнаруживается. Ширина линии достаточно велика и меняется в пределах от 220 до 920 Э. Основной вклад в ширину линии исследуемых лент дает так называемое неоднородное уширение, связанное с неоднородностью локальных параметров ленты (намагниченность, поле магнитной анизотропии) [15,21–24]. Неоднородность, в свою очередь, может быть связана как с естественными флуктуациями химического состава, так и с технологически наведенными градиентами, такими как градиент механических напряжений в направлении поперечном поверхности ленты. Таким образом, величину  $\Delta H$  можно использовать для сравнительной оценки таких неоднородностей в различных лентах. Можно отметить, что наиболее узкие линии наблюдаются в сплавах с минимальным содержанием меди и максимальным содержанием бора. Известно, что при кристаллизации аморфных сплавов данного семейства кластеры меди образуются в первую очередь [25]. Таким образом, именно добавка меди вносит определяющий вклад в развитие химической неоднородности сплава на ранних этапах кристаллизации. Примесь бора в данных сплавах играет роль стабилизатора неравновесного аморфного состояния, поэтому можно ожидать, что повышение его концентрации должно приводить к гомогенизации сплава, поскольку предельный беспорядок в пространственном расположении атомов соответствует наибольшей пространственной однородности [1,3].

## **Выводы**

В лентах аморфных сплавов FeSiBNbCu на основе железа методом ферромагнитного резонанса обнаружено линейное снижение намагниченности с ростом концентрации примеси бора, меди, а также суммарного количества атомов примеси. Исследования ширины линии

ферромагнитного резонанса указывают на возможные способы управления однородностью сплава при изменении его состава.

## Список литературы

1. McHenry M.E., Willard M.A., Laughlin D.E. Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets // *Prog. Mater. Sci.* 1999. Vol. 44, № 4. P. 291–433.
2. Глезер А.М. Аморфные сплавы: вчера, сегодня, завтра // *Известия РАН. Серия физическая.* 2001. Vol. 65, № 10. P. 1382.
3. O’Handley R.C. Physics of ferromagnetic amorphous alloys // *J. Appl. Phys.* 1987. Vol. 62, № 10. P. R15–R49.
4. Herzer G. Modern soft magnets: Amorphous and nanocrystalline materials // *Acta Mater.* 2013. Vol. 61, № 3. P. 718–734.
5. Sheftel’ E.N., Bannykh O.A. Nanocrystalline films of soft magnetic iron-based alloys // *Russ. Metall.* 2006. Vol. 2006, № 5. P. 394–399.
6. Rodionova V. et al. The stress components effect on the Fe-based microwires magnetostatic and magnetostrictive properties // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. Vol. 422. P. 216–220.
7. Zhukova V. et al. Tailoring of magnetoimpedance effect and magnetic softness of Fe-rich glass-coated microwires by stress- annealing // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8, № 1. P. 3202.
8. Kurlyandskaya G.V. Giant magnetoimpedance for biosensing: Advantages and shortcomings // *J. Magn. Magn. Mater.* 2009. Vol. 321, № 7. P. 659–662.
9. Антонов А.С., Бузников Н.А. Возникновение асимметрии в нелинейном магнитоимпедансе аморфного миропровода при наличии подмагничивающего тока // *Материаловедение.* 2016. № 1. P. 3–9.
10. Yoshizawa Y., Yamauchi K. Magnetic properties of Fe-Cu-M-Si-B (M = Cr, V, Mo, Nb, Ta, W) alloys // *Mater. Sci. Eng. A.* 1991. Vol. 133. P. 176–179.
11. Мушников Н.В. et al. Магнитные свойства и структура нанокристаллических сплавов типа Файнмет с различным содержанием железа // *Физика металлов и металловедение.* 2015. Vol. 116, № 7. P. 701–708.
12. Herzer G. Soft magnetic nanocrystalline materials // *Scr. Metall. Mater.* 1995. Vol. 33, № 10–11. P. 1741–1756.
13. Менушенков В.П. et al. Изучение структуры и магнитных свойств метастабильных фаз в сплавах Fe-B, закаленных из расплава // *Материаловедение.* 2015. № 7. P. 9–12.

14. Шефтель Е.Н. et al. Фазово-структурное состояние магнитных пленок FeZrN, полученных магнетронным распылением нагретой мишени // Материаловедение. 2014. № 10. P. 8–14.
15. Комогорцев С.В. et al. Особенности ферромагнитного резонанса нанокристаллических сплавов Fe<sub>73.5</sub>CuNb<sub>3</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub> // Физика твердого тела. 2010. Vol. 52, № 11. P. 2143–2146.
16. Rubinstein M., Harris V.G., Lubitz P. Ferromagnetic resonance in nanocrystalline Fe<sub>73.5</sub>CuNb<sub>3</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub> (Finemet) // J. Magn. Magn. Mater. 2001. Vol. 234, № 2. P. 306–312.
17. Котвицкий А.Н. et al. Влияние отжига на магнитные характеристики спиннингованных лент на основе железа // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Vol. 79, № 6. P. 795–799.
18. Ильин Н.В. et al. Влияние состава на процессы структурной релаксации аморфных сплавов на основе железа, “Известия Российской академии наук. Серия физическая” // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2017. № 3. P. 415–418.
19. Kraynova G. et al. Features of magnetic state of Fe-based melt-spun alloys upon heating // 2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG). IEEE, 2015. P. 1–1.
20. Котвицкий А.Н. et al. Изменение магнитных характеристик аморфных металлических сплавов как индикатор структурных преобразований // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2013. Vol. 77, № 10. P. 1395–1399.
21. Шефтель Е.Н. et al. Исследование магнитных свойств и параметров магнитной структуры нанокристаллических пленок Fe<sub>79</sub>Zr<sub>10</sub>N<sub>11</sub> // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Vol. 74, № 10. P. 1510–1512.
22. Сидоренко П.К., Шефтель Е.Н., Комогорцев С.В. Исследование магнитных свойств и параметров магнитной структуры нанокристаллических плёнок Fe<sub>79</sub>Zr<sub>10</sub>N<sub>11</sub> // Перспективные материалы. 2010. № 9. P. 224–227.
23. Исхаков Р.С. et al. Ферромагнитный резонанс и магнитная микроструктура в пленках нанокомпозитов Co<sub>x</sub>(SiO<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>, (CoFeB)<sub>x</sub>(SiO<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub> // Физика твердого тела. 2010. Vol. 52, № 11. P. 2120–2123.
24. Komogortsev S. V et al. Random Magnetic Anisotropy and Ferromagnetic Resonance in Nanocrystalline Alloy Fe<sub>73.5</sub>CuNb<sub>3</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub> // Solid State Phenom. 2011. Vol. 168–169. P. 365–368.
25. Hono K. et al. Microstructures of Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub> nanocrystalline soft magnetic material investigated by APFIM and HRTEM // Surf. Sci. 1992. Vol. 266, № 1–3. P. 385–390.

## Подписи к рисункам

Рисунок 1 — Дифференциальные кривые поглощения СВЧ для лент аморфных сплавов  $\text{FeCu}_{0,2}\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_{0,5}\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_{1,5}\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$  (различное содержание меди). Сплошная линия – подгонка данных производной от функции Лоренца.

Рисунок 2 — Дифференциальные кривые поглощения СВЧ для лент аморфных сплавов  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_5\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{16}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$  (различное содержание ниобия).

Рисунок 3 — Дифференциальные кривые поглощения СВЧ для лент аморфных сплавов  $\text{FeCuNbSiB}$  с различным содержанием металлоида.

Рис.4. Изменение эффективной намагниченности аморфных сплавов  $\text{FeSiBNbCu}$  при варьировании различных компонент.



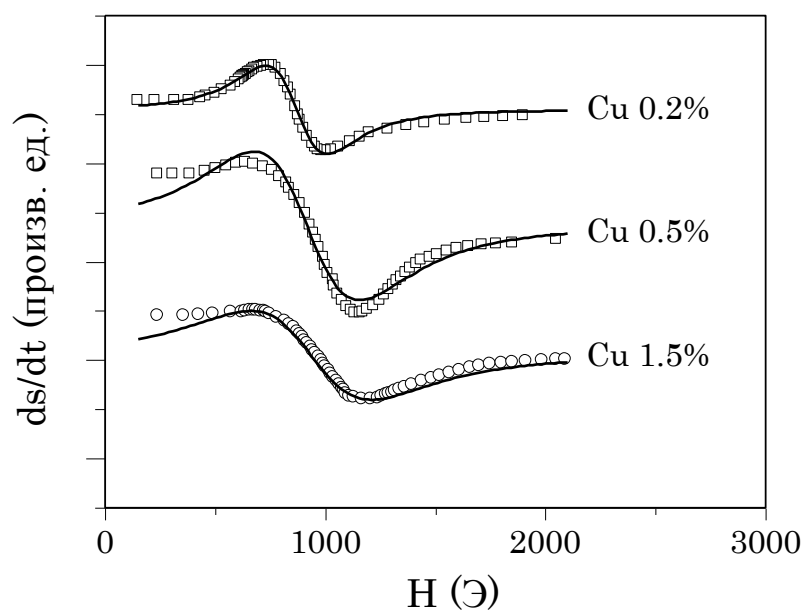


Рисунок 1 — Дифференциальные кривые поглощения СВЧ для лент аморфных сплавов  $\text{FeCu}_{0,2}\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_{0,5}\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_{1,5}\text{Nb}_3\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$  (различное содержание меди). Сплошная линия – подгонка данных производной от функции Лоренца.

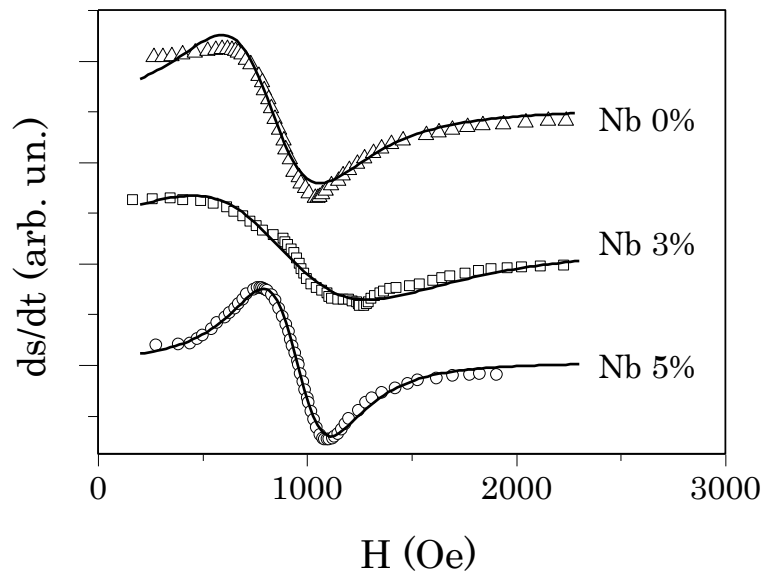


Рисунок 2 — Дифференциальные кривые поглощения СВЧ для лент аморфных сплавов  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_5\text{Si}_{16,5}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{16}\text{B}_6$ ;  $\text{FeCu}_1\text{Si}_{16}\text{B}_6$  (различное содержание ниобия).

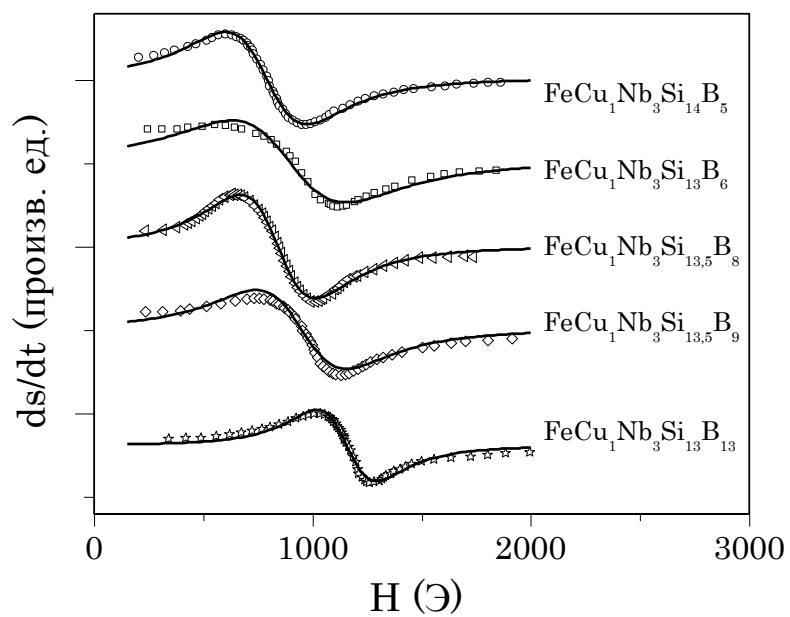


Рисунок 3 — Дифференциальные кривые поглощения СВЧ для лент аморфных сплавов FeCuNbSiB с различным содержанием металлоида.

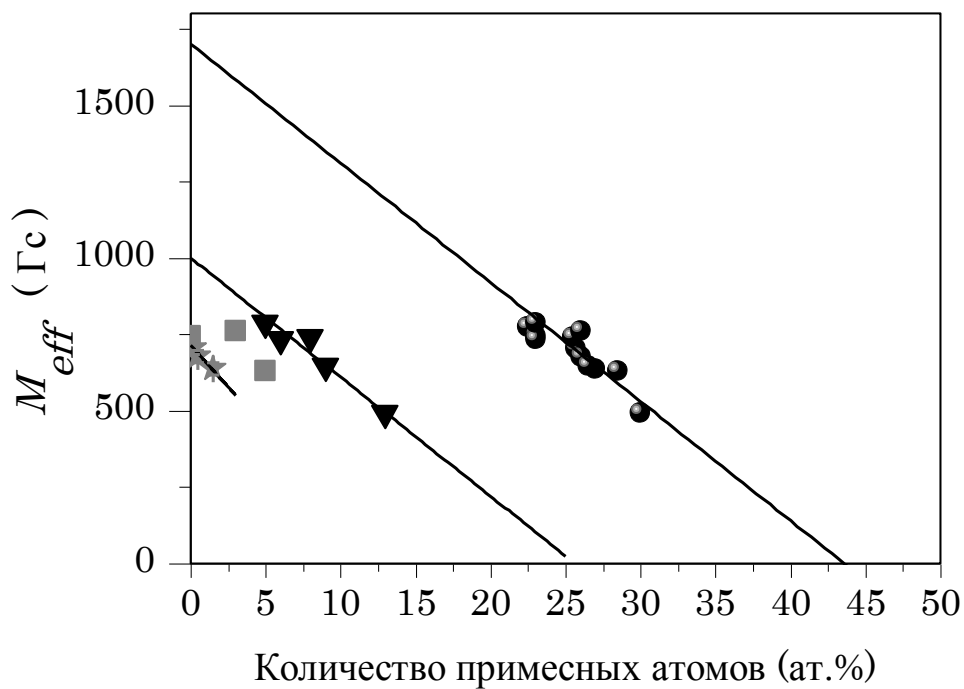


Рис.4. Изменение эффективной намагниченности аморфных сплавов FeSiBNbCu при варьировании различных компонент. Круглые символы – зависимость от суммарного содержания B+Si+Nb+Cu, треугольники - зависимость от содержания B, квадраты - зависимость от содержания Nb, звездочки - зависимость от содержания Cu.

Таблица 1. Параметры ферромагнитного резонанса сплавов FeSiBNbCu различного состава\*.

Особенность серии сплавов	Сплав	$H_r$ , Oe	$\Delta H_{FMR}$ , Oe
Различное содержание меди	<b>FeCu<sub>0,2</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>16,5</sub>B<sub>6</sub></b>	870	240
	<b>FeCu<sub>0,5</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>16,5</sub>B<sub>6</sub></b>	900	520
	<b>FeCu<sub>1,5</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>16,5</sub>B<sub>6</sub></b>	940	550
Различное содержание ниобия	<b>FeCu<sub>1</sub>Si<sub>16</sub>B<sub>6</sub></b>	830	420
	<b>FeCu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>16</sub>B<sub>6</sub></b>	810	920
	<b>FeCu<sub>1</sub>Nb<sub>5</sub>Si<sub>16,5</sub>B<sub>6</sub></b>	950	320
Различное содержание металлоида	<b>FeCu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>14</sub>B<sub>5</sub></b>	790	370
	<b>FeCu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13</sub>B<sub>6</sub></b>	840	560
	<b>FeCu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13,5</sub>B<sub>8</sub></b>	830	380
	<b>FeCu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13,5</sub>B<sub>9</sub></b>	930	400
	<b>FeCu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13</sub>B<sub>13</sub></b>	1150	220
*Здесь и в последующих таблицах ошибка определения $H_r$ составляет 20 Э, а $\Delta H$ - 10 Э.			

таблица 2. Толщина и плотность некоторых лент сплавов FeSiBNbCu.

Состав ленты	толщина ленты (мкм)	плотность (г/см <sup>3</sup> )	$M_s$ (Гс)
FeCu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>13</sub> B <sub>13</sub>	22.0	7.6±0.4	790
FeCu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>13,5</sub> B <sub>9</sub>	18.0	7.0±0.3	750
FeCu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>13</sub> B <sub>6</sub>	16.5	7.85±0.14	850
FeCu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>13</sub> B <sub>5</sub>	15.0	8.29±0.11	-

**FERROMAGNETIC RESONANCE IN AMORPHOUS FeSiBNbCu  
RIBBONS OF VARIOUS COMPOSITION**

**Komogortsev S.V.<sup>1,3,4\*</sup>, Kraynova G.S.<sup>2</sup>, Ilin N.V.<sup>2</sup>, Plotnikov V.S.<sup>2</sup>,  
Chekanova L.A.<sup>1</sup>, Nemtsev I.V.<sup>1</sup>, Yurkin G.Yu.<sup>1,4</sup>, Iskhakov R.S.<sup>1</sup>,  
Yatmanov D.A.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Physics, SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>2</sup>*Far Eastern Federal University, 690000, Vladivostok, Russia*

<sup>3</sup>*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660000,  
Krasnoyarsk, Russia*

<sup>4</sup>*Siberian Federal University, 660036, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: komogor@iph.krasn.ru*

The resonance absorption of microwaves in amorphous FeSiBNbCu ribbons of various compositions prepared by rapid quenching is studied. A linear decrease of the effective magnetization with increasing boron, copper, and total nonmagnetic impurity concentration in the FeSiBNbCu iron-based ribbons is observed.

Key words: amorphous alloys, magnetic resonance, magnetic properties, magnetization.